

РГАСНТИ 90.01.85, 90.03.07,
90.01.29

ISSN 0202—7585



ИТОГИ НАУКИ И ТЕХНИКИ

МЕТРОЛОГИЯ
И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

Том 6



Москва 1988

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ ИНСТИТУТ НАУЧНОЙ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
(ВИНИТИ)

ИТОГИ НАУКИ И ТЕХНИКИ

СЕРИЯ

МЕТРОЛОГИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Том 6

Научный редактор к. т. н. Е. Б. Дудин

Серия издается с 1969 г.



МОСКВА 1988

Главный редактор информационных изданий ВИНТИ
профессор *П. В. Нестеров*

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

информационных изданий по автоматике
и вычислительной технике

Главный редактор — акад. *С. В. Емельянов*

Члены редакционной коллегии: д. т. н. *А. К. Айламазян*,

д. т. н. *И. А. Болошин*, к. т. н. *Е. В. Гамсахурдия*,

д. т. н. *З. Б. Голембо*, к. т. н. *Е. Б. Дудин* (зам. главного редактора),

к. т. н. *Н. Ф. Зюзев* (ученый секретарь редколлегии),

д. т. н. *И. М. Коган*, акад. *В. А. Котельников*, к. т. н. *А. В. Лазарев*,

к. т. н. *Н. Н. Миловидов*, д. т. н. *В. И. Нейман*, акад. *Г. С. Поспелов*,

к. т. н. *Н. А. Соболева*, д. т. н. *А. В. Соколов*, к. т. н. *Ю. Н. Сорокин*,

чл.-корр. АН СССР *Л. Н. Сумароков*, чл.-корр. АН СССР *Я. З. Цыпкин*,

д. т. н. *Н. И. Чистяков*, д. т. н. *Ю. М. Шашков*, к. т. н. *А. В. ШМИД*

Научный редактор к. т. н. *Дудин Е. Б.*

Рецензенты:

д. т. н. *Бердичевский Б. Е.*, к. т. н. *Добровольский В. А.*

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Сычев Е.И.

ВВЕДЕНИЕ

Использование измерительной техники в исследованиях, технологических процессах и других сферах человеческой деятельности связано с решением интеллектуальных задач планирования эксперимента, управления средствами измерений, их диагностирования, адаптации к изменяющимся условиям измерений, обработки и интерпретации их результатов. При измерении параметров сложных объектов эта часть работ становится преобладающей и весьма трудоемкой. Поэтому в последние годы усиленно проводятся изыскания, направленные на автоматизацию интеллектуальных операций измерительного эксперимента, на создание так называемой интеллектуальной измерительной техники, позволяющей многократно повысить производительность труда при проведении измерений и значительно повысить их точность. В настоящей работе сделан анализ состояния и направлений развития интеллектуальной измерительной техники, раскрыты типовые технические приемы автоматизированного решения интеллектуальных задач в измерительных преобразователях и приборах, в контрольно-измерительных системах. При этом анализируется также новая роль вычислительной техники в современной измерительной технике, построенной на принципе ее интеллектуализации.

1. ОБЩИЕ НАПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

В современном обществе измерения превратились в одну из самых распространенных и массовых операций, выполняемых в производственной и научной сферах, в торговле и на транспорте, в медицине и при охране окружающей среды. Затраты на измерения и работы по обеспечению их единства и

точности составляют от 6 до 15% стоимости годового совокупного национального продукта развитых стран.

Разработка, производство и эксплуатации современных технических систем связаны с многочисленными и точными измерениями, которые осуществляются на макетах, на опытных образцах, в ходе технологического процесса, при техническом обслуживании и ремонте. Затраты на измерения в СССР составляют 5–10% себестоимости промышленной продукции (в радиоэлектронике – 25%, в электронике – 25–50%) [1]. Аналогичные свидетельства приводятся и в зарубежных источниках. Так, осуществление программы "Аполлон" было связано с затратами на измерения и испытания в сумме 10–11 млрд. долл., что составило свыше 40% общей стоимости всей программы. Стоимость всех видов испытаний, измерений и контроля для большинства фирм США составляет от 4 до 21% всех затрат, достигая в некоторых случаях 30 и даже 70%.

Характерным является непрерывный рост числа измерений во всех сферах человеческой деятельности, поэтому уменьшение трудоемкости измерений становится одним из обязательных условий повышения эффективности труда и успешного решения экономических и социальных проблем.

Необходимость выполнения массовых измерений привела к автоматизации и расширению функциональных возможностей всех видов средств измерений. Сильным толчком в совершенствовании измерительной техники промышленного назначения явилось бурное развитие гибких производственных систем (ГПС). Гибкое автоматизированное производство возможно только тогда, когда наряду с программным вводом исходных данных для обработки деталей, программно-управляемым ходом самого процесса изготовления изделий имеются получаемые путем измерения сведения о положении и ориентировании обрабатываемых деталей, а также сведения о параметрах технологического процесса и показателях качества изделий. В этих производствах особое внимание уделяется получению достоверной, точной и своевременной измерительной информации, что обусловлено следующими причинами [2].

1. При автоматизации производства во все большей степени исключается возможность контроля человеком-оператором параметров, характеризующих процесс технологической операции и состояние оборудования. В то же время резкое повышение производительности оборудования в условиях автоматизации приводит к тому, что любое нарушение технологического процесса может вызвать массовый брак или поломку обо-

рудования. Для предотвращения этих нарушений необходимо оснастить промышленное оборудование автоматическими измерительными средствами, которые следили бы за его состоянием и состоянием обрабатываемого инструмента. Так, в современных металлорежущих станках применяются системы адаптивного регулирования режима резания, учитывающие результаты измерения качества обрабатываемой поверхности, температуры, параметров вибрации, механической нагрузки и контроля состояния инструмента. Благодаря этому производительность станков увеличивается на 25%.

2. В ГПС все более широкое применение находят работы, возможности которых в значительной степени определяются их способностью ориентироваться в окружающей обстановке, приспособляться к ней и реагировать на ее изменения. Для этого они должны иметь в своем составе автоматические измерительные устройства системы машинного зрения и др.

3. В условиях массового производства и автоматического контроля оператор лишен возможности повторить процедуру проверки при сомнениях в показаниях прибора. Поэтому для обеспечения достоверности автоматического контроля необходимо осуществлять тщательную обработку измерительной информации с целью выявления причин отклонения показаний приборов от норм.

Развитие ГПС выдвинуло новые задачи автоматизации электрических измерений: идентификацию объектов (адекватный выбор метода измерения и измеряемых параметров); оптимизацию воздействия на объект (использование результата измерений для подналадки обрабатывающего оборудования); автоматизацию настройки, градуировки, поверки и диагностики измерительных средств; автоматизацию измерений и обработки результатов.

Комплексное решение этих задач возможно благодаря использованию измерительных роботов, построенных на основе координатно-измерительных машин и многомерных манипуляторов с измерительными головками.

Таким образом, функционирование ГПС невозможно без измерительной информации, необходимой для осуществления контроля качества продукции в процессе производства и на его выходе, контроля работоспособности самих ГПС и контроля окружающей среды.

Автоматизация измерений связана не только с рационализацией этого процесса (снижением стоимости, уменьшением трудоемкости и т.п.), но обеспечивает также повышение объек-

тивности его результатов. Кроме того, автоматизация позволяет снизить требования к квалификации персонала, повысить точность измерений путем автоматического учета влияющих величин и статистической обработки результатов, упростить и ускорить поверку средств измерений (в том числе и с помощью встроенных мер).

Применение мини- и микроЭВМ в измерительных системах расширяет функциональные возможности последних с точки зрения запоминания и представления измерительной информации, обработки и сжатия данных, а также практической реализации косвенных методов измерений по сложным алгоритмам [3].

Известны три основных направления автоматизации измерений:

- применение специальных схем в измерительных приборах для автоматического решения задач настройки, выбора диапазона измерений, оценки погрешности выходного сигнала и т.п.;

- приспособливание средств измерений для работы с электронными вычислительными машинами (введение в состав средств измерений аналого-цифровых преобразователей (АЦП) на выходе, цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) на входе для восприятия цифровых управляющих сигналов, интерфейсных плат для сопряжения с ЭВМ и др.);

- использование микропроцессоров как составных частей средств измерений.

Уменьшение габаритов и снижение стоимости микропроцессоров сделали целесообразным их использование и в простейших средствах измерений - первичных измерительных преобразователях, и в сложных измерительных приборах. Универсальность микропроцессоров, возможность хранения и обработки больших массивов данных измерений, а также формирования сигналов управления - все это привело к тому, что была исключена необходимость ввода многочисленных логических и вычислительных схем, которые ранее использовались для выполнения функций автоматизации управления приборами и обработки измерительной информации. В измерительной технике широкое применение микропроцессоров обеспечивает:

- математическую обработку результатов измерений (вычисление динамических параметров, нахождение максимальных и минимальных значений, выделение искаженных результатов, запоминание результатов в цифровой форме, коррекция нелинейностей и т.п.);

- управление процессом измерения (автоматическая градуировка прибора, выбор пределов измерений, контроль за выполнением программы измерений, установка нуля);

- замену механических и ручных операций электронными (переключение пределов измерений, использование дисплеев для вывода массивов информации и инструкций оператору);

- реализацию методов измерений, основанных на анализе структуры измеряемых сигналов математическими (программными) методами.

Применение вычислительной техники в средствах измерений нацелено на решение двух принципиально различных задач: автоматизацию процессов управления и контроля измерительными приборами и автоматизацию обработки результатов измерений.

Если раньше автоматизация средств измерений была связана с исключением необходимости выполнять вручную некоторые механические операции (установка нуля, выбор диапазонов измерений, переключение входных цепей и т.п.), то в современной измерительной технике вычислительные средства во все большей степени ориентируются на выполнение интеллектуальных функций, т.е. таких функций, которые нуждаются не только в физических усилиях человека, но и требуют умственных усилий для выполнения логических задач, принятия решений и т.д. и т.п. Объясняется это также и тем, что процессы измерений превратились в настоящее время в сложные операции получения количественной информации с помощью различных многомерных отношений. Поскольку это приближается к узнаванию сложных отношений объектов, доступному только человеку, такие процессы получили название интеллектуальных. Интеллектуальными считаются и измерения на основе искусственного зрения, слуха, осязания, обоняния и т.п. Поэтому можно утверждать, что важнейшим отличительным признаком новейших средств измерений является их интеллектуальность, т.е. способность измерительных приборов и систем выполнять операции преобразования, обработки и анализа информации, которые ранее были доступны только человеку.

К интеллектуальным средствам относятся измерительные приборы и системы, приспособливающие результаты измерений для восприятия органами чувств человека и выполняющие интеллектуальные функции по получению, обработке и оценке измерительной информации. Интеллектуальные измерительные приборы выполняют функции анализа и синтеза результатов

измерений, приводят их к виду, удобному для восприятия органами чувств человека, обеспечивают ввод данных от оператора в прибор на профессиональном языке. В интеллектуальных измерениях возникают следующие метрологические проблемы: оценка погрешностей, обусловленных затратами времени на обработку данных в процессе; определение и учет погрешностей, возникающих вследствие аналого-цифрового преобразования измерительной информации; учет погрешности восстановления измеряемой величины на основании погрешности выходных измерительных сигналов; использование априорной информации об объекте измерений для повышения точности измерений; проведение самопроверки (самокалибровки) измерительной техники [4].

В интеллектуальных измерительных системах возникают две группы погрешностей: аппаратурная, связанная с задержкой между моментом измерения и моментом выдачи результата измерения, и погрешность вычислений. Аппаратурная погрешность может быть оценена по величине задержки измерительной информации в вычислителе. Погрешность вычислений зависит от точности алгоритма обработки измерительных сигналов. Для ее уменьшения можно воспользоваться методами редукции к идеальному прибору, использовать априорную информацию для исключения больших погрешностей, применять методы теории нечетких множеств [5].

Можно выделить два направления разработки интеллектуальной измерительной аппаратуры, получивших в настоящее время наибольшее распространение:

- разработка измерительных автоматов со встроенными вычислителями (как правило, микропроцессорами);
- комбинация обычных измерительных приборов с подходящими ЭВМ и создание на этой основе интеллектуальных систем, включающих в себя зачастую экспертные системы (ЭС). Последние представляют собой системы искусственного интеллекта, использующие знания из сравнительно узкой предметной области для решения возникающих в ней задач, причем так, как это делал бы эксперт-человек, т.е. в процессе диалога с заинтересованным лицом, поставляющим необходимые сведения по конкретному вопросу.

Под предметной областью понимают специальным образом выделенную и описанную область человеческой деятельности. Описание предметной области должно содержать описание всех объектов, явлений, фактов и процессов, существенных с точки зрения рассматриваемой области.

ЭС фактически выполняют функцию высококвалифицированных специалистов, извлекая из него множества знаний необходимые, строя умозаключения, делая выводы и предъявляя аргументы в пользу этих выводов. Они включают в себя следующие четыре существенных компонента: база знаний, машина вывода, модуль извлечения знаний, система объяснения (интерфейс ЭС для связи с конечным пользователем). В основе ЭС находится обширный запас сведений о некоторой проблемной области, который организуется в базу данных и базу знаний. В большинстве случаев знания представляют собой некоторую совокупность правил, которая позволяет делать заключения на основе исходных данных или предположений. В последнее время не выделяют сведения, имеющиеся в ЭС, и считают, что база знаний содержит и данные.

Таким образом, базой знаний называют совокупность данных, представляющих описание предметной области и схемы, описывающей структуру знаний об этой предметной области.

Машина вывода служит для построения цепочки логических рассуждений. Модуль извлечения знаний необходим для обучения ЭС путем автоматизированного опроса экспертов и соответствующего формализованного оформления их знаний. Система объяснения служит для выдачи конечному пользователю сведений о том, как был получен тот или иной вывод.

Логические рассуждения строятся часто дедуктивным методом, поэтому машины вывода называются иногда дедуктивными машинами.

Физически ЭС представляют собой совокупность аппаратных и программных средств вычислительной техники. Традиционные средства вычислительной техники приспособлены, главным образом, для проведения расчетов и мало пригодны для решения интеллектуальных задач. Поэтому в настоящее время ведутся работы по созданию вычислительных систем пятого поколения, ориентированных на обработку знаний и обладающих весьма развитыми возможностями логического вывода. Одно из направлений этих работ связано с созданием ассоциативных вычислительных устройств.

ЭС, входящие в состав интеллектуальных средств измерений, могут быть использованы и при планировании измерений для выбора соответствующих измерительных приборов, определения схем их соединения и алгоритмов обработки измерительной информации. В базе данных таких систем сосредотачиваются сведения о средствах измерений, схемах их использования и алгоритмах обработки результатов измерений. В ба-

ве знаний содержатся указания, позволяющие конечному пользователю (оператору) на основе информации об измерительной задаче произвести выбор необходимых компонентов измерительного процесса [6].

В последние годы появились работы, в которых исследуются вопросы формализации взаимодействия оператора с измерительной системой в целях определения целесообразных границ автоматизации выполнения интеллектуальных функций. Так, в исследованиях, проведенных в институте метрологии во Вроцлаве (ЧССР) рассматриваются модели человека-оператора в решении измерительных задач, отмечается перспективность применения теории размытых (нечетких) множеств для построения этих моделей, устанавливаются принципы определения функций, подлежащих автоматизации [7].

Хотя создание интеллектуальных измерительных автоматов и систем возможно и на базе мини-ЭВМ, интеллектуализация измерительной техники приобрела особенно большие масштабы в связи с появлением микропроцессоров.

Микропроцессор представляет собой устройство для обработки данных, работающее под управлением программы и выполненное на основе одной или нескольких больших интегральных микросхем (БИС). Так как микропроцессор является универсальной БИС с программируемой логикой работы, то он заменил многие типы интегральных схем с жесткой, фиксированной логикой. Изменяя программу, можно решать с помощью микропроцессора множество разнообразных задач. Микропроцессор рассчитан на совместную работу с запоминающими устройствами и устройствами ввода-вывода информации. Как правило, выпускается комплект интегральных микросхем различного функционального назначения, образующий микропроцессорный набор.

Микропроцессорный набор или комплект — это совокупность специально разработанных отдельных микропроцессорных и других интегральных микросхем, которые совместимы по своим конструктивно-технологическим данным и могут быть собраны в единое целое. Обычно в комплект входят БИС микропроцессора, запоминающих устройств, устройств ввода-вывода информации, микропроцессорного управления и др. Микропроцессорный набор используется для создания микропроцессорной системы, которая представляет собой собранную в единое целое совокупность взаимодействующих БИС микропроцессорного комплекта — модулей (иногда дополненная БИС из других комплектов), организованную в рабо-

тающую систему, т.е. вычислительную или управляющую систему с микропроцессором в качестве узла обработки информации. Система, в которой используются два или более микропроцессоров, называют мультимикропроцессорной.

Изолированный микропроцессор не способен к самостоятельному функционированию, поэтому он является частью измерительного прибора. Кроме того, микропроцессор служит частью либо основой микроЭВМ, входящей в состав измерительного прибора или функционирующей автономно, либо микроконтроллера.

МикроЭВМ — это конструктивно законченное вычислительное устройство, построенное на основе микропроцессорного комплекта или модулей в отдельном корпусе и имеющее свой источник питания, пульт управления, узлы ввода-вывода информации, что позволяет использовать его в качестве автономного, независимо работающего устройства со своим программным обеспечением.

Микроконтроллером называется устройство управления, построенное на одной или нескольких микропроцессорных БИС. Иногда для сокращения его называют просто контроллером. Он может быть программируемым и непрограммируемым. Встраиваемый в измерительный прибор контроллер представляет собой функциональный блок, содержащий микропроцессорный комплект и оформленный конструктивно в виде платы. По существу — это микроЭВМ без источника питания, корпуса, пульта управления, периферийных узлов, которая не может работать как самостоятельное автономное устройство; она функционирует лишь в составе прибора. Для измерительных систем выпускают и контроллеры на основе микропроцессорной системы, представляющие собой конструктивно законченные, автономные устройства.

Множество выпускаемых промышленностью универсальных микропроцессоров можно разделить по конструктивному признаку на две разновидности:

- однокристалльные с фиксированной длиной (разрядностью) слова и определенной системой команд;
- многокристалльные (секционированные) с наращиваемой разрядностью слова и микропрограммным управлением. Они состояются из двух и более БИС.

Хотя возможности многокристалльных микропроцессоров существенно выше, чем однокристалльных, многие прикладные задачи, и в том числе построения автоматических измерительных приборов, успешно решаются на основе использования однокристалльного микропроцессора.

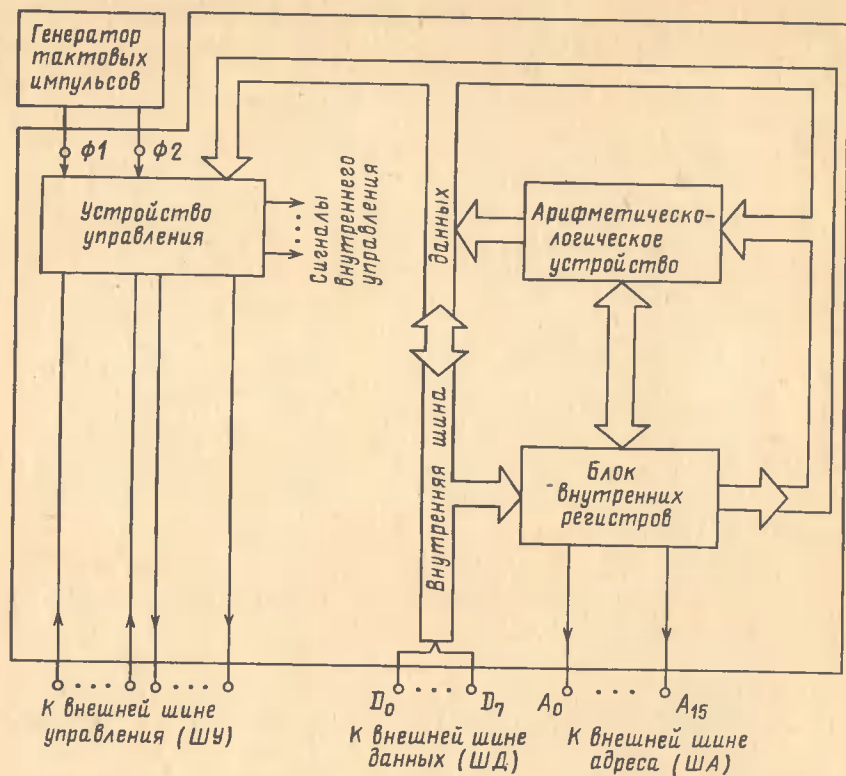


Рис. 1. Структурная схема однокристалльного микропроцессора

Упрощенная структурная схема однокристалльного универсального микропроцессора приведена на рис. 1.

Арифметическо-логическое устройство (АЛУ), служащее ядром микропроцессора, выполняет по командам арифметические и логические операции: сложение, вычитание, сдвиг, пересылку, логическое сложение (ИЛИ), логическое умножение (И), сложение по модулю 2.

Устройство управления (УУ) "руководит" работой АЛУ и внутренних регистров, а также потоками информации. Действия УУ определяются командами. Совокупность команд, которые следует выполнить для решения данной задачи, называется программой. Согласно коду операции, содержащемуся в команде, УУ формирует внутренние сигналы управления блоками микропроцессора. Адресная часть команды совместно с сигналами управления используется для считывания из определенной ячейки памяти (или записи в ячейку) данных, подлежащих

обработке. По сигналам УУ осуществляется выборка каждой новой, очередной команды.

Блок внутренних регистров, расширяющий возможности АЛУ, служит внутренней памятью микропроцессора и используется для временного хранения данных и команд. Он также выполняет некоторые процедуры обработки информации. Обычно этот блок содержит регистры общего назначения и специальные регистры: регистр-аккумулятор, буферный регистр адреса, буферный регистр данных, счетчик команд, регистр команд, регистры стека, регистр признаков.

Как видно из рис. 1, для структуры микропроцессора характерно наличие внутренней шины данных, соединяющей между собой его основные части. Шинной называют группу линий передачи информации, объединенных общим функциональным признаком.

Разрядность внутренней шины данных, т.е. количество передаваемых по ней одновременно (параллельно) битов числа, соответствует разрядности слов, с которыми оперирует микропроцессор. Очевидно, что разрядность внутренней и внешней шин данных должна быть одной и той же. У восьмиразрядного микропроцессора внутренняя шина состоит из восьми линий, по которым можно передавать последовательно восьмиразрядные слова - байты. Следует иметь в виду, что по шине данных передаются не только обрабатываемые АЛУ слова, но и командная информация. Следовательно, недостаточно высокая разрядность шины данных может ограничить состав (сложность) команд и их число. Поэтому разрядность шины данных относят к важным характеристикам микропроцессора - она в большой мере определяет его структуру.

Шина данных работает в режиме двунаправленной передачи. Это означает, что по ней можно передавать слова в обоих направлениях, но, разумеется, не одновременно: требуется применение специальных буферных схем и мультиплексного режима обмена данными между микропроцессором и внешней памятью.

Использование микропроцессоров, и тем более микро- и мини-ЭВМ, персональных ЭВМ для выполнения традиционных задач обработки измерительной информации заведомо избыточно, поэтому постоянной тенденцией развития цифровой измерительной техники является все более широкий охват автоматизацией вычислительных, управляющих, контрольных и сервисных функций.

Контроллерные функции связаны с управлением со стороны

вычислительных средств функциональными узлами измерительного прибора, вычислительные функции – с обработкой и анализом данных, тестовые функции – с определением работоспособности прибора, диагностикой и локализацией неисправности, сервисные функции обеспечивают общение оператора с измерительной системой.

К контроллерным функциям относится автоматизация переключения каналов и диапазонов, подключение образцовых мер в процессе калибровки, управление измерительными преобразователями. В приборах для измерения неэлектрических величин к этим функциям относится управление подготовкой измерительной процедуры: управление манипуляторами, дозаторами, температурным режимом и др.

К вычислительным функциям относится обработка сигналов измерительной информации, осуществляемая в целях настройки, градуировки линеаризации, нормализации, масштабирования, цифровой фильтрации, сжатия данных, статистической обработки результатов измерений и др.

Общими для всех цифровых средств измерений являются следующие вычислительные функции: автокалибровка (настройка, градуировка); напоминание и введение поправок к показаниям в отдельных точках и для всей градуировочной кривой; сжатие, фильтрация и сглаживание (устранение неинформативных отсчетов); статистическая обработка данных, идентификация распределений и их параметров.

Для отдельных типов радиоизмерительных приборов к вычислительным функциям относятся:

1) для цифровых вольтметров

- определение абсолютных и относительных минимумов и максимумов, амплитудных, средних и эффективных значений;
- линейное (масштабирование, сдвиг) и логарифмическое преобразования;

– расчет комплексного сопротивления и мощности;

2) для цифровых частотомеров

- пересчет интервалов времени в частоту и фазовый сдвиг;
- определение фронта и спада импульсов;
- расчет средних частот, девиаций и относительных отклонений, индексов частотной и фазовой модуляции;

3) для цифровых осциллографов

- равномерная или адаптивная дискретизация;
- кодирование и оцифровка отсчетов, их визуальная индикация;
- вычисление текущих средних значений параметров сигналов и их линейное преобразование;

4) для временных и частотных анализаторов

- запоминание данных, преобразование данных из временной области в частотную и обратно;
- вычисление амплитуд и коэффициентов гармоник, а также интегральных характеристик сигналов по ускоренным алгоритмам;
- пересчет абсолютных уровней в логарифмические.

Тестовые функции обеспечивают самоконтроль современных измерительных приборов и систем со встроенными микропроцессорами (ЭВМ), поскольку дополнительные затраты на их реализацию составляют небольшую часть общей стоимости прибора (системы) и сводятся, в основном, к стоимости дополнительного постоянного запоминающего устройства для хранения тестовой программы.

Функции тестирования состоят в циклическом контроле основных узлов и локализации неисправностей в них с точностью до конструктивных блоков или типовых элементов замены, активизации резервных функций, режимов и блоков, регистрации внезапных и постепенных отказов (включая метрولوجические) и выполнении операций по их устранению.

Функции самопроверки чаще всего выполняет основной процессор измерительного прибора, однако возможно и встраивание в прибор специального микропроцессорного узла, предназначенного только для самоконтроля и самодиагностики. В режиме самоконтроля осуществляется лишь проверка работоспособности прибора; локализация неисправности может быть при этом проведена раздельным запуском тестов отдельных функциональных узлов прибора. В режиме самодиагностики производится локализация неисправностей по отдельным элементам тестируемого функционального узла, например, по рядам шин данных, адресов и управления.

Сервисные функции складываются из выполнения ряда процедур диалогового типа с представлением оператору различных сообщений о ходе обработки данных:

- предъявление подсказок и меню – на этапе ввода заданий;
- индикация о качестве и достоверности поступающей информации – на этапе предварительной обработки;
- формирование и представление альтернативных решений о выборе или корректировке измерительно-вычислительных процедур – на этапе основной обработки и интерпретации результатов;
- выбор форм представления результатов и технических средств вывода – на этапе вывода.

В интеллектуальном измерительном приборе (или системе) реализуется существенно больше возможностей, чем в простом приборе, поэтому резко увеличивается обмен информацией между оператором и прибором: оператор имеет возможность использовать большое число режимов прибора, вводить необходимые исполнительные директивы, исходные данные; со стороны прибора оператору выдаются сигналы визуальной и звуковой информации, подсказки о возможных вариантах измерения и обработки. Поэтому в интеллектуальном измерительном приборе (системе) обычно реализуется так называемый режим интерактивной обработки – многостадийного диалога оператора с прибором [9]. При этом весь процесс измерения и обработки разбивается на ряд последовательных процедур взаимного обмена информацией. Обеспечение интерактивного режима составляет основную часть сервисных функций в измерительном приборе. Выделяют следующие этапы измерения и обработки с применением диалога: ввод задания; сбор и предварительная обработка измерительной информации; основная обработка и интерпретация результатов; вывод результатов измерений для отображения, хранения и документирования.

Интеллектуальные измерительные приборы и системы находят применение в научных исследованиях, в робототехнике, в автоматизированных производствах.

Современное производство, объединяющее в себе материальные, энергетические и информационные процессы, невозможно без массового применения компьютеризированной контрольно-измерительной аппаратуры, с помощью которой осуществляют определенные интеллектуальные операции: информационный анализ (селекция, классификация и др.) и информационный синтез (вычисления, сравнение, принятие решений). Применение интеллектуальной измерительной техники ведет к непрерывному повышению производительности труда, к интеграции технологии измерений и производства для работы в реальном масштабе времени. К примеру, интеллектуальные функции прибора ДКГ 160, предназначенного для контроля качества фотомасок в микроэлектронном производстве, дают возможность в 5 раз повысить эффективность обнаружения статистически распределенных дефектов и вычислять следующие характеристики качества фотомасок:

- число дефектных простых изображений;
- число дефектов на 1 см² площади фотомаски;
- число дефектов определенных размеров, формы и положения;
- число дефектов по категориям визуальной оценки [29].

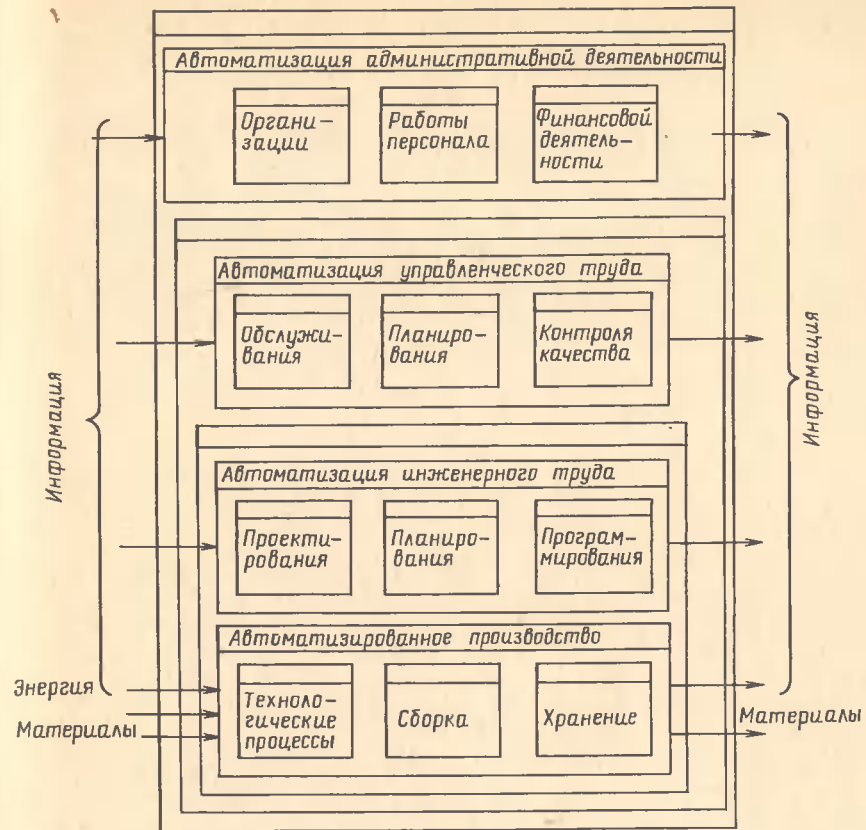


Рис. 2. Сферы применения искусственного интеллекта в промышленности

Следует заметить, что в производственных процессах интеллектуальные измерения (и, следовательно, интеллектуальная измерительная техника) используются не только в автоматизированных с помощью ЭВМ производствах, но и в системах автоматизированного проектирования, в системах автоматизации инженерного труда, в интегрированных производственных системах, в системах автоматизации административной деятельности и в автоматизированных информационных системах управления промышленностью (рис. 2). История развития промышленности за последние 30–40 лет свидетельствует о том, что измерения, как способ получения объективной количественной информации о параметрах технологических процессов и обрабатываемых деталей, становятся во все большем

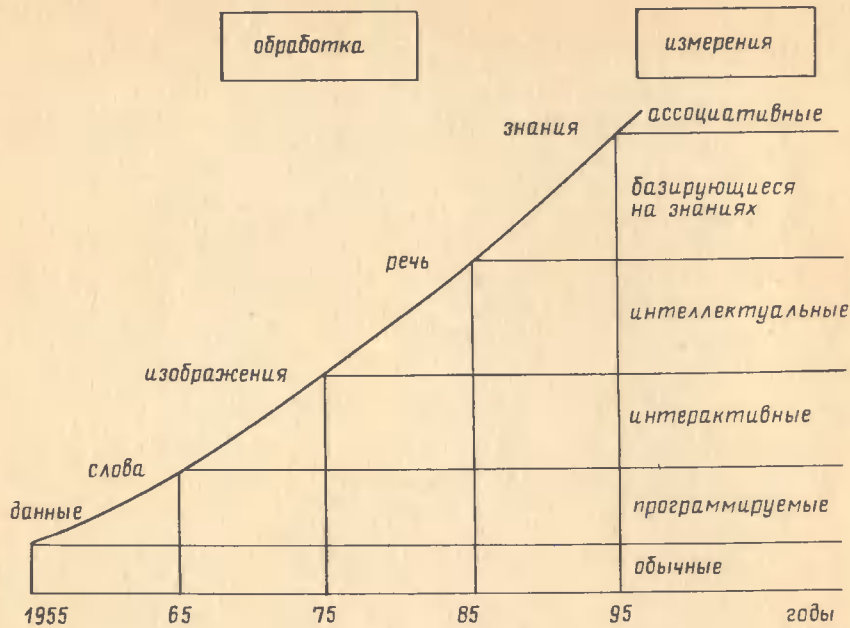


Рис. 3. Компьютерная технология и измерения: качественные изменения в характере получаемых при измерениях сведений в масштабе источником знаний (а не только данных) (рис. 3). Этому свидетельствует широкое внедрение вычислительных средств в измерительную технику и придание последней свойств интеллектуальности.

2. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В последние годы появились элементы искусственного интеллекта в первичных измерительных преобразователях (ПИП) и в (АЦП). Создание интеллектуальных преобразователей преследует цель повышения точности измерений и рациональное распределение вычислительных возможностей в измерительных и управляющих системах для повышения надежности, живучести и гибкости последних.

Конструктивно ПИП выполняются в виде совокупности следующих составных частей: чувствительных элементов, схем подготовки и обработки сигналов измерительной информации (рис. 4). Чувствительный элемент служит для восприятия

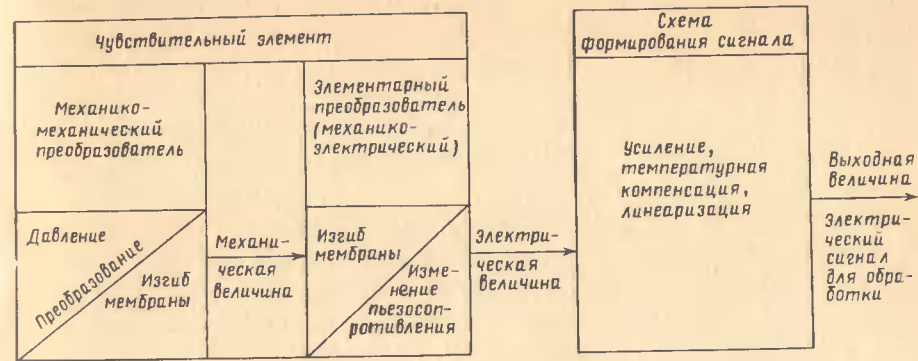


Рис. 4. Структурная схема первичного измерительного преобразователя

измеряемой величины и преобразования ее, как правило, в электрический сигнал. В схеме подготовки этот сигнал усиливается, линеаризуется, дополняется сигналом термокомпенсации и, наконец, нормируется. Обработка сигнала измерительной информации осуществляется с целью его усреднения, выполнения других арифметических и алгебраических операций.

Одним из основных направлений развития ПИП является повышение степени их интеграции со схемами обработки сигналов измерительной информации (рис. 5). В простейших ПИП имеется лишь чувствительный элемент, в более сложных, кроме того, схема формирования сигнала. ПИП с цифровым выходом имеют в своем составе АЦП.

Объединение чувствительного элемента со схемой подготовки сигналов измерительной информации приводит к созданию интегрированных ПИП. Комбинация интегрированных ПИП с микропроцессором называется интеллектуальным ПИП. В таком ПИП выходной сигнал представляется в форме, удобной для управления исполнительными механизмами или для последующей обработки в ЭВМ. Таким образом, интеллектуальные ПИП представляют собой законченное измерительно-вычислительное устройство, состоящее в общем случае из источника питания, преобразователя измеряемого параметра, встроенного вычислителя для обработки сигнала в цифровой форме, схемы идентификации параметров и интерфейсной схемы для соединения с последующими узлами системы [10]. Интеллектуальные ПИП являются новым поколением средств измерений и отличаются от аналоговых возможностью непосредственной связи с центральным процессором и обработки результатов измерений в цифровой форме.

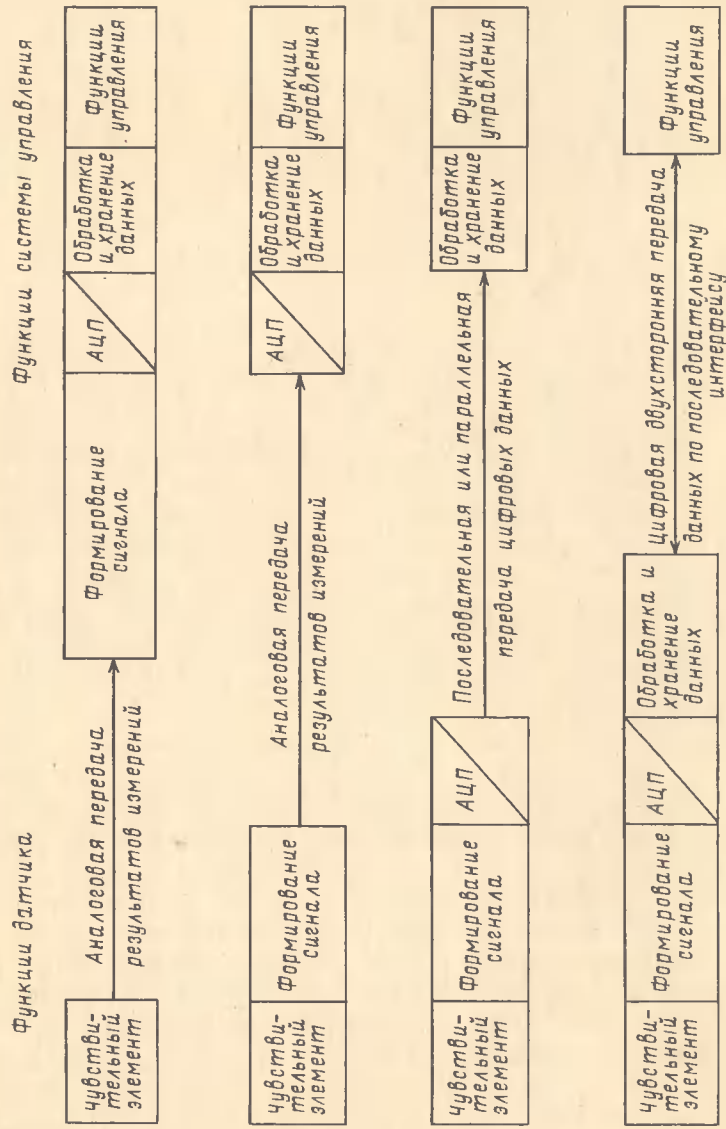


Рис. 5. Рост степени интеграции ПИП

Различают следующие этапы развития (поколения) интеллектуальных ПИП:

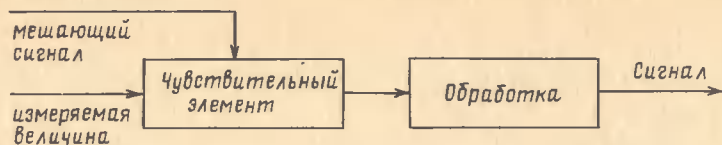
- аналоговые ПИП со схемами цифровой обработки сигналов измерительной информации;
- гибридные системы ПИП;
- монолитные системы ПИП, создаваемые на одном кремниевом кристалле.

Интеллектуальные свойства могут быть приданы ПИП с помощью специальных блоков, предназначенных для восприятия сигналов от чувствительных элементов, обработки этих сигналов и выдачи управляющих воздействий на контролируемый объект. Обработка сигналов заключается в компенсации ухода нуля, выборе диапазона измерений, линеаризации характеристик ПИП, вычислении дисперсии, математического ожидания, температурной компенсации и др. Для этого в состав указанных блоков включаются измерительные усилители, АЦП, микропроцессоры, источники питания и другие функциональные узлы [11]. В современных интеллектуальных ПИП осуществляются измерения влияющих величин на учет дополнительных погрешностей, учет результатов градуировки в выходном сигнале ПИП, реализация косвенных измерений на основе программного обеспечения.

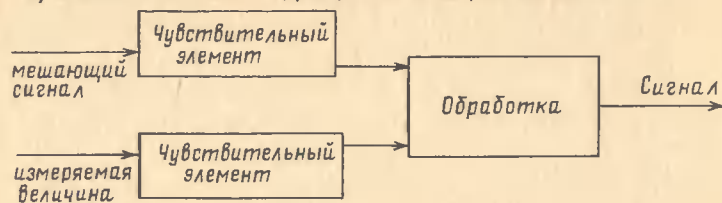
Одним из главных принципов построения таких ПИП является принцип структурной компенсации, сущность которого состоит в том, чтобы выбрать такую топологию и механическую структуру чувствительного элемента, при которых обеспечивался бы выходной сигнал, содержащий дополнительные (от влияния мешающих факторов) составляющие разного знака. За счет последующего использования схем балансировки можно исключить из результирующего выходного сигнала мешающую составляющую. Применение этого метода иллюстрируется на рис. 6. В интеллектуальных ПИП, кроме традиционных причин возникновения погрешностей, принимаются во внимание такие, как квантование, выборка, нелинейность, округление и округление при выполнении расчетов. Для повышения точности и уменьшения влияния помех при испытаниях интеллектуальных ПИП определяются коэффициенты оптимального фильтра, которые затем записываются в память микропроцессора и используются для фильтрации измерительного сигнала.

Для повышения точности в интеллектуальных ПИП используется несколько чувствительных элементов, что позволяет уменьшить или вовсе исключить влияние мешающих факторов на результаты измерений. Кроме того, использование

а) измерительная цепь



б) автоматическая коррекция мешающего сигнала



с)

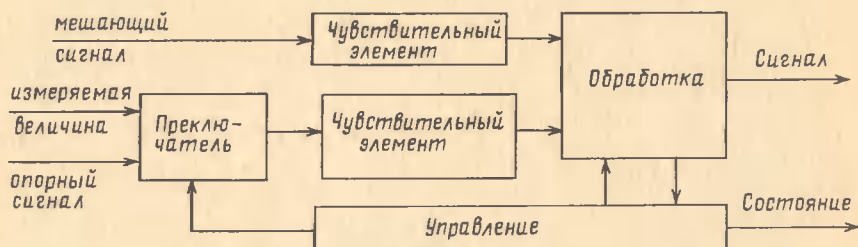


Рис. 6. Повышение точности измерений в ПИП за счет учета влияющих величин

ПИП с несколькими чувствительными элементами позволяет осуществить точное измерение векторных физических величин. Например, находят применение интеллектуальные ПИП с тремя чувствительными элементами для измерения вектора ускорений в трехмерном пространстве, для измерения вектора магнитного поля и др.

В интеллектуальных ПИП реализуются следующие функции [12]:

- преобразование измерительных значений в цифровой код;
- контроль измеренных значений и формирование сигнала ошибок;
- автоматическая коррекция или компенсация систематической погрешности преобразователей, обусловленной нелинейностью, уходом нуля, частотной зависимостью и т.п.;

- сокращение избыточности и уплотнение измерительной информации путем исключения данных, не представляющих в дальнейшем интереса;

- выполнение сложных расчетов по обработке измерительной информации;
- хранение измеренных значений и параметров, важных для измерительного процесса;
- подготовка данных для передачи по каналам связи;
- самоконтроль с помощью тестовых программ;
- выполнение простейших управляющих функций.

Интеллектуальные ПИП по сравнению с обычными обладают следующими достоинствами:

- простота приспособления для использования в любой системе;
- модифицируемость измеренных данных;
- идентичность схемно-конструктивного исполнения при измерениях различных физических величин;
- отсутствие влияния отказа преобразователя на работу системы в целом;
- сокращение потока передаваемых данных благодаря предварительной обработке результатов измерений;
- повышение достоверности измерений за счет использования избыточности;
- упрощение программирования, контроля и обслуживания.

В системах автоматизированного управления производственными процессами применяется большое число ПИП. Так, на автоматизированных рабочих местах используются ПИП для прямого регулирования процессов и управления станками, контроля качества продукции, обеспечения необходимой обратной связи и установки динамических допусков. При управлении потоком изделий и их приемке применяются ПИП сопровождения (например, индуктивные ПИП перемещения контейнеров с деталями), ПИП постушения деталей (например, ПИП-выключатель приближения для учета или управления положением деталей), ПИП для идентификации изделий (оптические и магнитные считыватели кодов и др.). Кроме того, для управления технологическими процессами используются ПИП температуры, давления, расхода, электропроводимости и др., для управления технологическим оборудованием и роботами - ПИП для определения положения и ориентации обрабатываемых деталей, для определения параметров вибрации, силы и момента схватывания деталей, для самоконтроля и самокалибровки машин. ПИП для обеспечения обратной связи нужны при ор-

ганизации точных монтажных работ с помощью автоматов и роботов. С этой целью применяются устройства для воспроизведения и обработки изображений, для узнавания и схватывания деталей, а также тактильные ПИП для точного размещения деталей при монтаже [13].

В гибких автоматизированных производствах и в робототехнике необходимы ПИП технического зрения (тактильные или бесконтактные), способные распознавать форму и цвет обрабатываемых или монтируемых деталей. Такие ПИП имеют в своем составе микропроцессоры, решающие задачу распознавания деталей. Примером ПИП для системы управления роботом является ПИП силы и момента, схема использования которого приведена на рис. 7 и 8. Как правило, возможности программного обеспечения таких систем ограничены, особенно, если в их составе используются вычислители с последовательным принципом выполнения операций, что приводит к снижению быстродействия систем при усложнении алгоритмов обработки измерительной информации. Поэтому требуется рациональное распределение интеллектуальных функций между ПИП и центральным вычислителем системы управления. Для этого особенно приемлемы ПИП, имеющие встроенные электронные системы, существенно улучшающие их точностные и динамические характеристики и расширяющие их функции возможности. Эти ПИП имеют стандартный цифровой выход, в них исключена нелинейность, они обладают возможностью са-

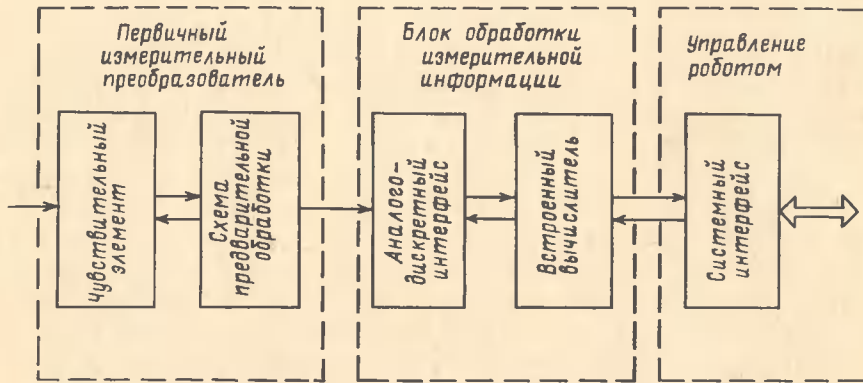


Рис. 7. Схема применения интеллектуальных ПИП в робототехнике

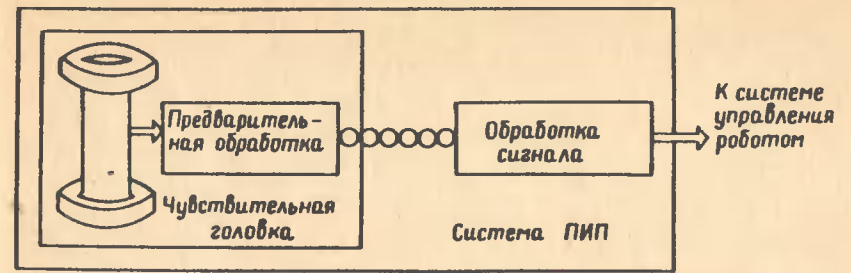


Рис. 8. Структурная схема ПИП силы и момента, используемых в роботах для управления схватыванием

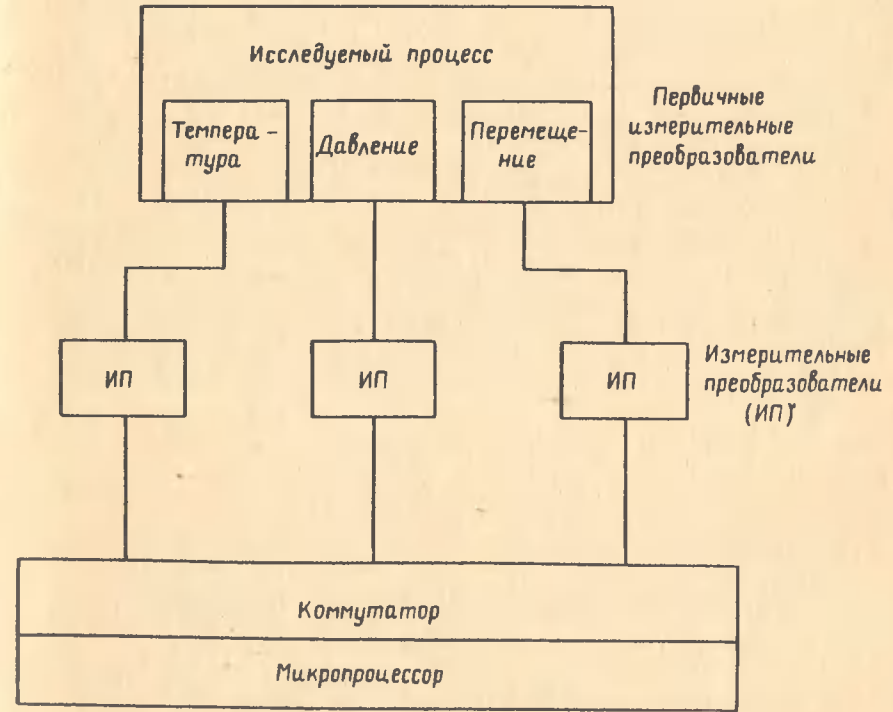


Рис. 9. Традиционная схема измерения параметров процесса

поверки и самодиагностики, способны осуществлять статистическую обработку сигналов измерительной информации.

Один из возможных вариантов рационального распределения интеллекта в измерительных системах приведен в работе [14], где показано, что традиционные методы измерения таких физических величин, как температура, давление, перемещение обычно реализуются по структурной схеме (рис. 9). Такая структура часто не позволяет использовать все преимущества, обусловленные применением средств вычислительной техники в измерительных системах. Это обусловлено наличием промежуточного звена – измерительного преобразователя (ИП) между собственно чувствительным элементом и микропроцессором. Кроме того, такое построение системы приводит к существенному увеличению ее стоимости с увеличением количества измерительных каналов. При этом следует учитывать более высокие требования и к производительности процессора.

Более рациональная структура измерительной системы такого типа представлена на рис. 10. Здесь ИП и коммутатор выполнены в виде функционального законченного блока. Существенным отличием данной системы от представленной выше является возможность непосредственного доступа к чувствительным элементам по шине данных и адресной шине, а также значительно меньшие аппаратные затраты. При этом обеспечиваются определенные преимущества по сравнению с измерительными системами, реализованными по традиционной структуре:

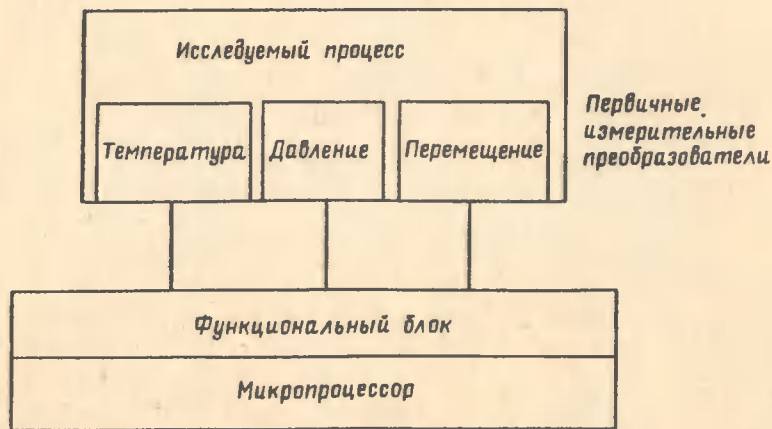


Рис. 10. Схема измерительной системы с интеллектуальными преобразователями

– возможность контроля измерительной цепи между процессором и исследуемым процессом;

– возможность автоматической подстройки всего измерительного тракта в целом;

– исключение необходимости использования прецизионных измерительных элементов вследствие возможности автоматического распознавания и коррекции отдельных составляющих погрешности во время автоматической поверки и балансировки;

– использование сравнительно узкой номенклатуры функциональных блоков, обусловленной, в основном, количеством типов первичных чувствительных элементов.

В идеальном случае функциональные узлы такого типа должны быть выполнены таким образом, чтобы обеспечить возможность проведения измерений максимально возможного количества физических величин с помощью минимального набора измерительных блоков и чувствительных элементов.

Структурная схема такого интеллектуального ИП представлена на рис. 11. Здесь предусмотрена возможность любого варианта включения собственно резистивного элемента, что обеспечивается коммутатором и переключателями 1; 2. При этом изменение режима работы осуществляется автоматически непосредственно с управляющего микропроцессора. Компенсация напряжения смещения и установка коэффициента передачи производятся автоматически с помощью восьмиарядных ЦАП. Настройка схемы осуществляется в автоматическом режиме путем подключения к измерительному входу точного образцового резистора сопротивлением 100 Ом. При этом включается калибровочный канал ИП и опорное напряжение на выходе ЦАП 4 изменяется до тех пор, пока выходное напряжение не станет равным нулю. Аналогичным образом устанавливается и коэффициент передачи ИП при подключении к входу образцового резистора сопротивлением 250 Ом. Поскольку большинство современных резистивных чувствительных элементов обладает явно выраженной нелинейностью передаточной характеристики, в ИП предусмотрена возможность линеаризации результирующей характеристики с помощью ЦАП 3. При этом результирующая погрешность измерения температуры в случае использования платинового терморезистивного ИП не превышает $0,2^\circ$ в диапазоне температур от -100 до $+400^\circ\text{C}$. Схема рис. 11 предусматривает возможность проведения прямых измерений напряжения при соответствующем состоянии коммутирующих элементов.

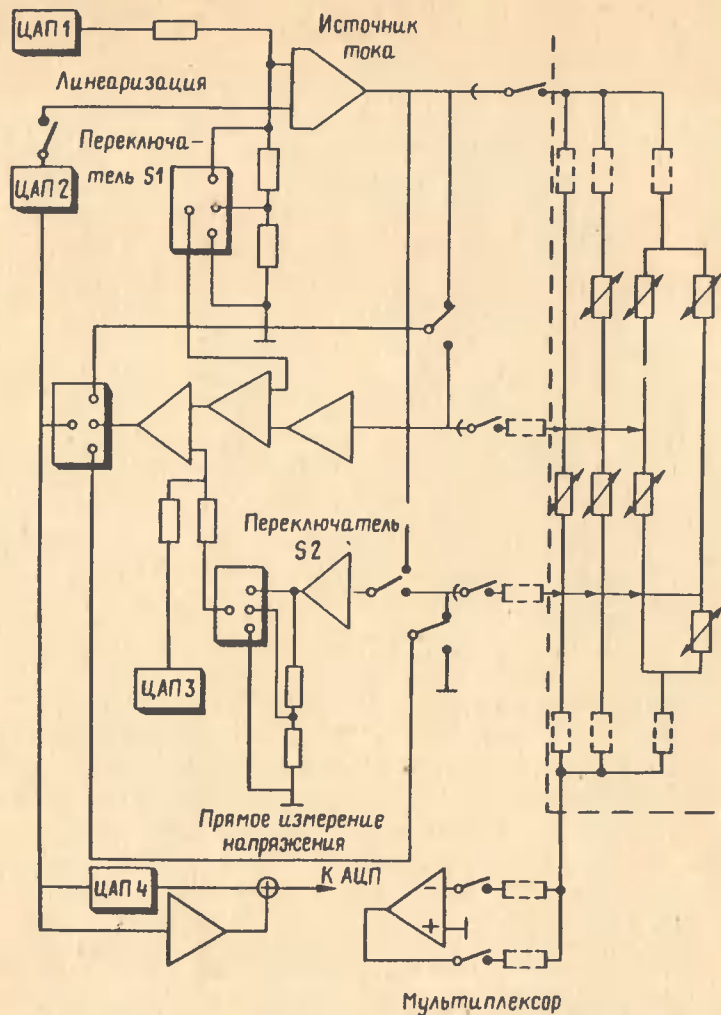


Рис. 11. Структурная схема интеллектуального измерительного преобразователя

Управление устройством такого типа осуществляется с помощью простейшей программы, причем к производительности микропроцессора не предъявляется высоких требований. В принципе здесь возможно использование специализированного периферийного процессора с минимальной производительностью, через который осуществляется связь с основным блоком обработки или центральной управляющей и обрабатывающей ЭВМ. Функции управления мостовой схемой здесь заключают-

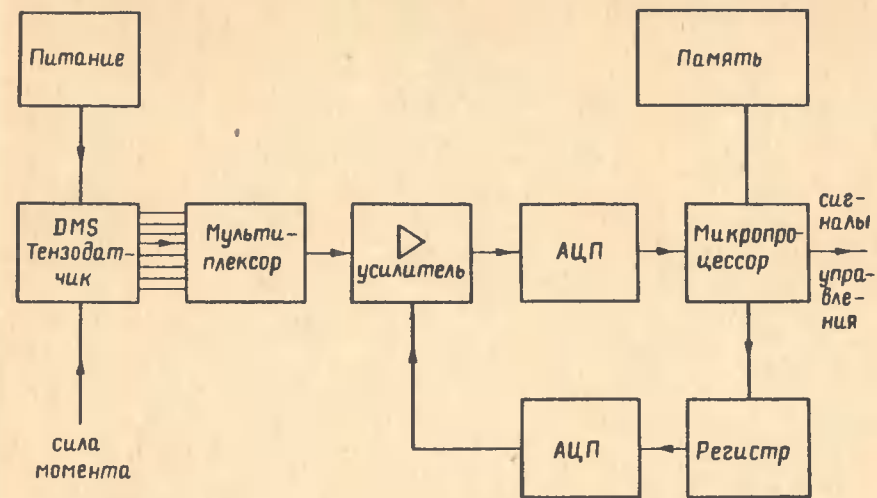


Рис. 12. Общая схема соединения ПИП с системой управления роботом

ся в автоматической настройке аналогового измерительного тракта, преобразовании результата измерения в цифровую форму, переключении коммутатора и ключевых элементов в соответствии с необходимым режимом работы. При этом соответствующие команды могут формироваться в простейшей форме в центральной ЭВМ, а их расшифровка и вывод непосредственно на соответствующие элементы ИП производятся уже с помощью периферийного микропроцессора. Последний одновременно осуществляет синтаксический контроль поступающих инструкций и формирование аварийных сигналов при наличии ошибок передачи.

Результаты измерений по соответствующим командам выдаются непосредственно на центральное устройство управления; в то же время имеется возможность предварительной обработки информации с помощью периферийного процессора (при наличии определенных резервов времени). Очевидно, что применение интеллектуальных ПИП описанного типа во многом облегчает процесс разработки измерительной аппаратуры, причем основное внимание в данном случае уже уделяется принципиальным и методическим вопросам построения измерительных систем с использованием средств вычислительной техники.

Общая схема соединения ПИП с системой управления промышленным роботом приведена на рис. 12. На выходе преоб-

разователя формируются стандартные сигналы, поступающие на другие каскады для последующей обработки. Фактически блок управления промышленным роботом должен реализовывать все необходимые функции обработки информации. При этом существуют следующие возможности объединения системы интеллектуальных ПИП в законченное устройство:

- соединение ПИП со встроенными микропроцессорами или интегральными блоками обработки с помощью стандартных последовательных интерфейсов;
- соединение ПИП, имеющих аналоговые или частотно-аналоговые сигналы, к общему обрабатываемому модулю;
- подключение ПИП с двоичными выходными сигналами непосредственно к цифровым входам блока управления (такое подключение обычно используется для оперативного управления промышленными роботами в аварийных ситуациях).

Интеллектуальные ПИП имеют довольно сложную конструкцию, поэтому их поверка организуется подобно измерительным приборам аналогичного назначения. Например, допустимые границы погрешностей для измерительных преобразователей температуры устанавливаются такими же, как и для соответствующих термометров (для медицинских 0,2, для термометров в холодильных камерах 1°C). Если характеристика ПИП не является линейной, а ее значения хранятся в запоминающем устройстве, то такой интеллектуальный ПИП подлежит поверке вместе с запоминающим устройством.

Интеллектуальные ПИП особенно чувствительны к электромагнитным шумам различного происхождения, поэтому они должны быть испытаны на влияние электромагнитных помех определенного уровня [16].

Интеллектуальные ПИП имеют, как правило, возможность самоповерки и аттестуются неконтактными методами. Методы поверки измерительных систем основываются на использовании специальных математических моделей, точность которых должна учитываться при расчете поверочных схем. При поверке измерительных систем в динамическом режиме принимаются во внимание передаточные функции систем и их элементов, но с помощью встроенных мер можно ограничиться статическими алгоритмами поверки [17].

Все более широкое применение находят микропроцессоры в АЦП, в которых методами искусственного интеллекта повышается точность преобразования [8]. Примером такого средства измерений является отечественный групповой ИП Ш-711, имеющий в своем составе АЦП, микропроцессорный

контроллер и модуль памяти, предназначенный для преобразования сигналов термоэлектрических ПИП по 32 каналам в унифицированный сигнал. Он осуществляет программную перестройку на ПИП различных типов, линеаризацию градуировочных характеристик, выработку сигналов отклонения измеряемых параметров от указанной величины, автоматический метрологический самоконтроль, реализацию различных программ опроса каналов, а также функционирование под управлением внешней программы. Сочетание аппаратных и программно-алгоритмических решений, принятых в преобразователе Ш-711, позволило в сравнении с традиционным вариантом построения такой аппаратуры в 3-5 раз повысить точность измерения, на порядок увеличить надежность, в несколько раз уменьшить массогабаритные характеристики [18].

В 20-разрядном АЦП фирмы National Semiconductor (США) [19] применен метод однократного интегрирования, в котором линейно нарастающее образцовое напряжение сравнивается с измеряемым. Преимущество этого метода - высокая линейность преобразования; в числе основных недостатков - влияние нестабильности емкости интегрирующего конденсатора. Вследствие этого недостатка более широкое применение в измерительной технике находит метод двухтактного интегрирования (ДИ). В АЦП ДИ результат преобразования определяется отношением времени разряда от образцового напряжения к времени заряда от измеряемого напряжения. Для АЦП ДИ влияние нестабильности емкости конденсатора исключается, но на линейность характеристики преобразования может оказать влияние диэлектрическая абсорбция интегрирующего конденсатора.

Применение микропроцессора в АЦП, реализующих метод однократного интегрирования, позволяет скорректировать нестабильность емкости конденсатора за счет измерения времени интегрирования для трех напряжений: нулевого уровня V_0 , полной шкалы V_{III} и измеряемого V_x . Структурная схема измерительной части показана на рис. 13. В схеме применен микропроцессор INS 8070. Последовательность операций при преобразовании следующая: микропроцессор подключает вход компаратора к V_0 , ждет начала интегрирования образцового напряжения и измеряет время t_0 от начала интегрирования до пересечения с уровнем V_0 . Затем те же операции проводятся с напряжением полной шкалы V_{III} и измеряемым

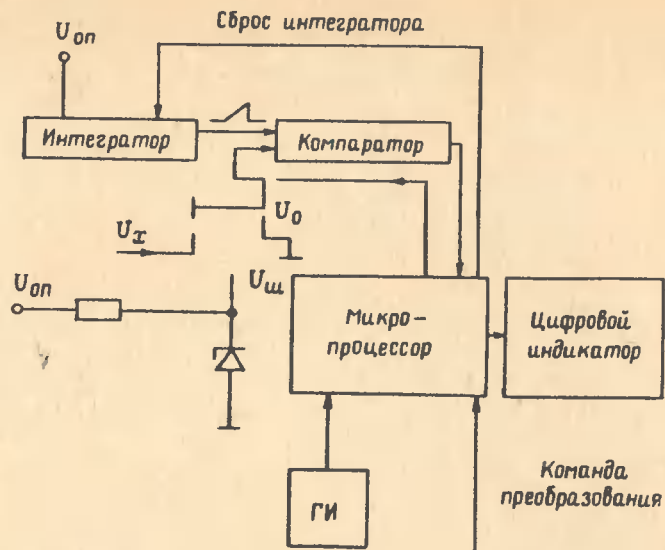


Рис. 13. Микропроцессорный аналого-цифровой преобразователь с однократным интегрированием

напряжением V_x . Измеряемое напряжение вычисляется по формуле

$$V_x = k(t_x - t_0)/(t_{ш} - t_0).$$

Так как конденсатор заряжается всегда с одной скоростью и в одном направлении, погрешность вследствие диэлектрического поглощения устает при самопроверке. Основным ограничением по точности является нестабильность источника опорного напряжения: температурная – около $0,25 \cdot 10^{-6}$ 1/°C, временная – несколько миллионных долей вольт в год. Эти нестабильности влияют на величину t_0 .

Другой прием аналого-цифрового преобразования – интегрирующее преобразование с балансировкой зарядов [20]. Временная диаграмма процесса преобразования поясняется на рис. 14. Интегрирующий конденсатор заряжается от известного напряжения до 2В, после чего с частотой 500 кГц производится частичный сьем зарядов с интегрирующего конденсатора, затем следует фаза окончательного разряда конденсатора и фиксирование момента равенства нулю напряжений на конденсаторе. Время от начала фазы окончательного разряда части схемы С помощью микропроцессора МС 6808 обеспечиваются последовательные измерения U_0 и $U_{ш}$, а также постоянное удерживание в памяти текущих значений t_0 и $t_{ш}$.

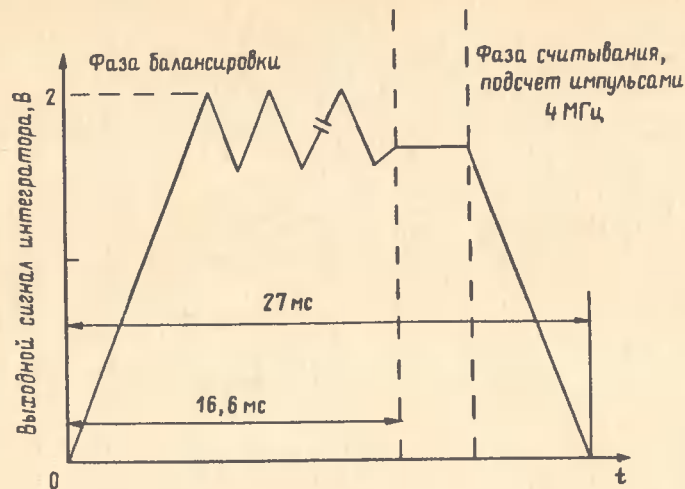


Рис. 14. Процесс аналого-цифрового преобразования с балансировкой зарядов

При однократном измерении и подключении микропроцессора к входу компаратора t_x измеряется U_x и определяется U_x по приведенной ранее формуле. Цикл одного измерения длится 27 мс; микропроцессор управляет процессом измерения через универсальный адаптер-интерфейс, оптически развязанный с аналоговыми цепями.

Таким образом, интегрирующие АЦП с временем преобразования 30–300 мс с использованием микропроцессора позволяют получить высокую точность при сравнительно простой схеме преобразования и малом числе прецизионных элементов. При необходимости повышения быстродействия используются АЦП последовательного приближения.

Простейшая схема АЦП последовательного приближения может быть реализована на ЦАП, компараторе и схемах простой логики с программным управлением процессом преобразования от микропроцессора. В работе [21] описана подобная реализация с управлением от микропроцессора 8080. Для восьмиразрядного АЦП время преобразования составляет около 500 мкс, что вполне достаточно для многих промышленных применений. Структурная схема АЦП показана на рис. 15, схема программы микропроцессора, управляющей аналого-цифровым преобразованием – на рис. 16. В схему включен мультиплексор на восемь аналоговых входов, управляемый через "картированный" порт. Для минимизации числа элемен-

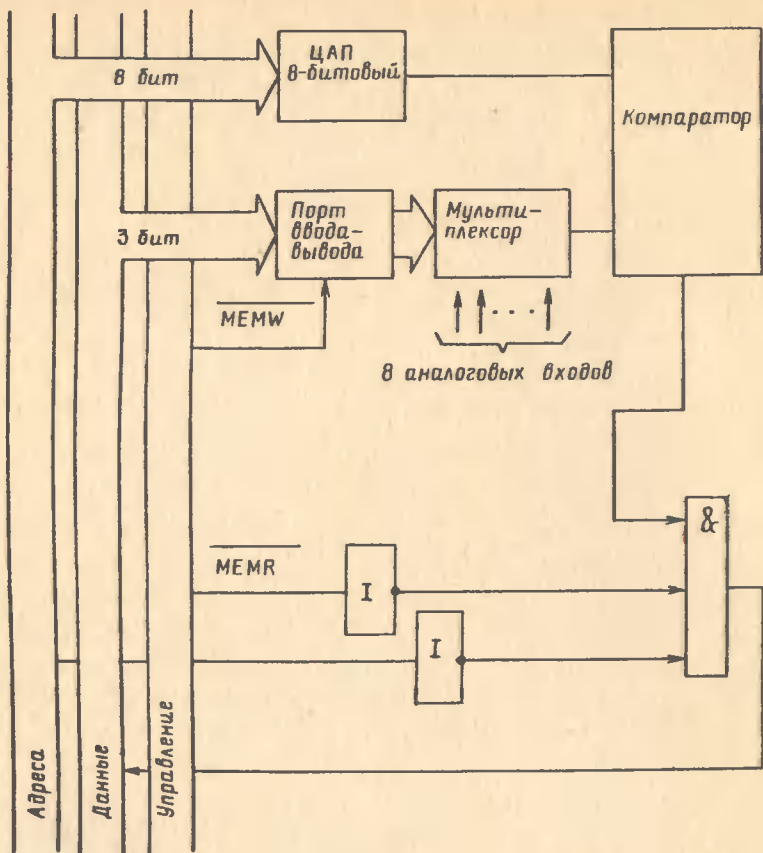


Рис. 15. Аналого-цифровой преобразователь с программным управлением

тов схемы управление ЦАП и считывание результата шага преобразования с компаратора производится не с помощью системы портов, а присоединением ЦАП непосредственно к шине адресов, а компаратора через простую логику – к шине данных. Такое соединение позволяет сэкономить два порта за счет резервирования области адресов памяти. Выдача кода на ЦАП и чтение результата с компаратора производятся при этом одной командой MOV A, M. Предполагается при этом, что общее время срабатывания ЦАП и компаратора не превышает времени между подачей адреса и считыванием данных в этой команде – около одного такта работы микропроцессора (500 нс).

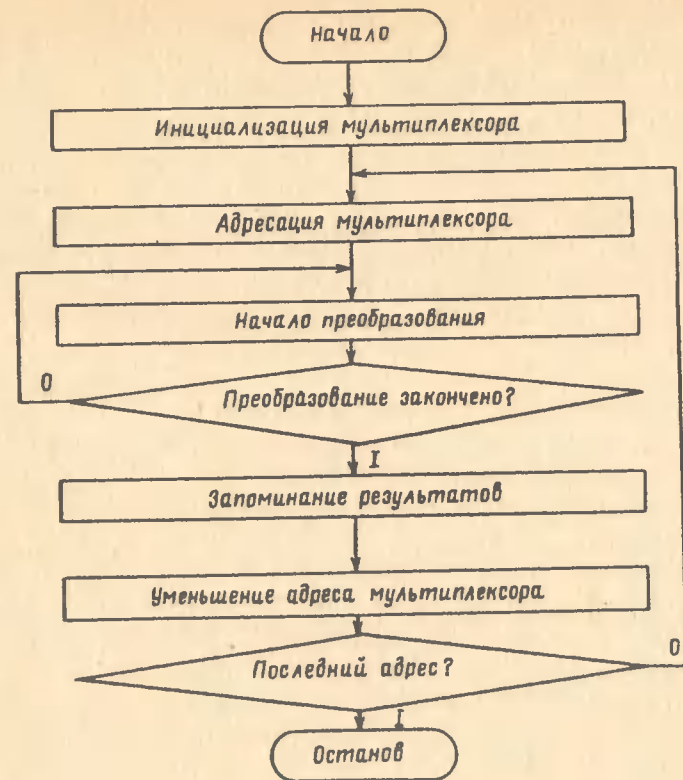


Рис. 16. Схема программы управления аналого-цифровых преобразователей

Схема на рис. 15 модифицируется для случая применения медленных ЦАП, когда между подачей адреса на вход ЦАП и считыванием результата с компаратора проходит время, превышающее длительность одного такта работы микропроцессора – для этого вводится простая схема ожидания результата на двух триггерах. Число входных каналов возможно увеличить до 128.

Применение микропроцессорного управления процессом аналого-цифрового преобразования с последовательным приближением приводит к потерям процессорного времени. Широкое распространение однокристалльных АЦП, в которых процесс преобразования управляется встроенными в них аппаратными средствами, и постоянное уменьшение их стоимости делают удобным их применение в микропроцессорных измерительных приборах. Время преобразования в однокристалльных АЦП ши-

рокого применения составляет 5–50 мкс; в них предусматриваются специальные возможности для сопряжения с микропроцессорами: трехстабильный выход для стыковки с магистралью данных, встроенный мультиплексор для работы с несколькими входными каналами, управление от стандартных шин микропроцессорной магистрали. Так, в работе [22] описаны восьмиразрядный АЦП ADC-0801-04, совместимый с микропроцессором 8080, и метод цифровой коррекции напряжения смещения, позволяющий получить повышенное разрешение. Метод основан на формировании корректирующего напряжения с помощью дополнительного ЦАП, управляемого от микропроцессора через порт.

При использовании АЦП неизбежно возникают погрешности, обусловленные дискретизацией результатов измерений. Применение систем искусственного интеллекта дает возможность оценить характер преобразуемых сигналов и выбрать режим работы АЦП, минимизирующий эти погрешности [16].

При решении задач регистрации в цифровой форме временных зависимостей сигналов различного вида и определения их параметров (среднего квадратического значения, максимального значения и т.д.) высокие требования предъявляются к точности, разрешающей способности и быстродействию АЦП, которые должны работать в широком диапазоне измерения мгновенных значений входного сигнала. При регистрации сигналов различного типа необходимая частота дискретизации определяется динамическими параметрами входного сигнала. Поэтому наиболее рациональным решением проблемы преобразования равнообразных сигналов в цифровую форму является применение адаптивных АЦП с изменяемым быстродействием и разрешающей способностью (рис. 17).

Здесь конкретные значения управляющих параметров определяются характеристиками исследуемого сигнала, а затем используются для управления тактовой частотой и разрешающей способностью АЦП. Чаще всего таким управляющим параметром является скорость изменения входного сигнала [23].

Мгновенная скорость изменения входного сигнала зависит от формы кривой, частоты повторения, максимального значения и коэффициента амплитуды сигнала, так что оценка данного значения в текущем режиме в реальном масштабе времени представляет собой достаточно сложную задачу. Устройства для измерения мгновенной скорости изменения сигнала произвольной формы на практике реализуются различными спо-

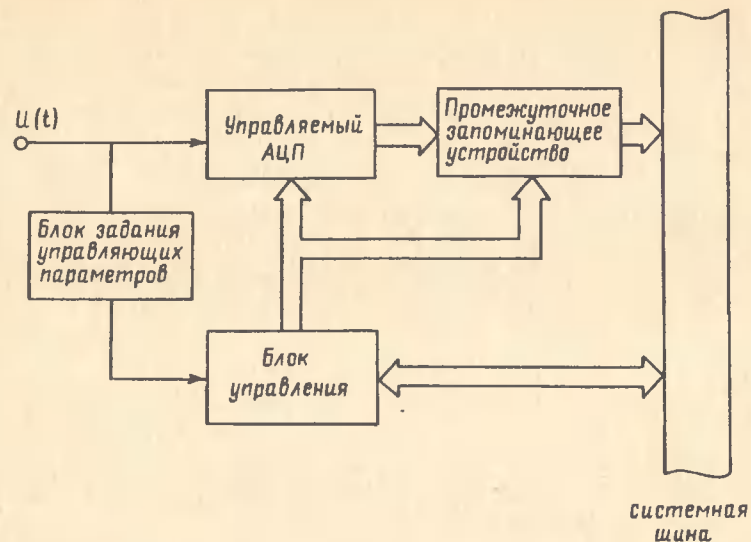


Рис. 17. Структурная схема адаптивного аналого-цифрового преобразователя

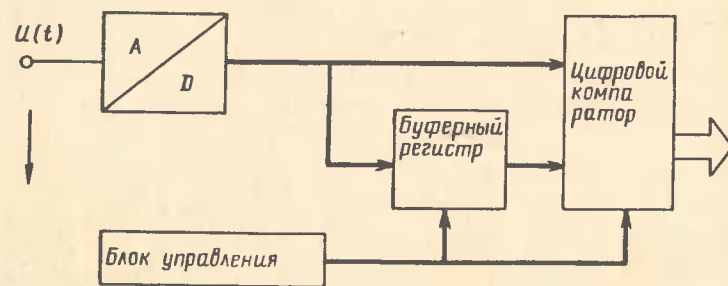


Рис. 18. Структурная схема аналого-цифрового преобразователя с цифровым способом анализа скорости применения входного сигнала

собами. В первом случае используются аналоговые методы построения, предусматривающие прямую обработку входного аналогового сигнала с помощью дифференцирующего операционного усилителя. В то же время применение такого решающего усилителя обуславливает увеличение общего времени преобразования АЦП при существенных трудностях реализации идеальной передаточной характеристики. Кроме того, устройства такого типа отличаются низкой устойчивостью.

Во втором случае значение скорости изменения сигнала определяется цифровым способом путем анализа входного сигнала в текущем режиме с максимально возможной частотой дискретизации. В данном случае предварительная оценка параметров сигнала производится при минимальной разрешающей способности и при необходимости (при исследовании медленно изменяющихся и постоянных сигналов) подключаются дополнительные блоки АЦП, обеспечивающие высокую точность и разрешающую способность преобразования. Структура такого АЦП показана на рис. 18.

3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Развитие измерительных приборов идет не только по пути расширения частотного и динамического диапазонов, повышения точности измерений, но и по пути обеспечения гибкой и автоматической перестройки их структуры, введения дополнительных функций (сигнализации, контроля и т.п.), осуществления косвенных и совокупных измерений, экспресс-обработки измерительной информации, различных сервисных функций, программирования и адаптации к различным условиям проведения измерений, автоматизации операций градуировки, поверки и коррекции результатов измерений. Необходимость увеличения надежности приборов приводит к использованию специальных методов организации измерительного процесса, самодиагностирования, обеспечения всевозможности сокращения числа выполняемых функций в целях обеспечения работоспособности и т.п.

В связи с этим в последние годы широкое распространение получили интеллектуальные приборы, которые выполнены преимущественно на больших или сверхбольших интегральных схемах, имеют цифровой выход на канал общего пользования как для управления приборами извне, так и для передачи результатов измерений на внешние регистрирующие, обрабатывающие или запоминающие устройства. Интеллектуальные приборы предназначены для выполнения одной или нескольких интеллектуальных функций и способны автоматически работать под управлением ЭВМ (или микропроцессора) и принимать решения. Термин интеллектуальные приборы стал весьма распространенным и используется для обозначения измерительных приборов, которые являются программируемыми

и содержат в своем составе запоминающее устройство с программой работ. Они имеют, как правило, встроенный микропроцессор, служащий для управления всеми функциями прибора в соответствии с заданной оператором программой. Подобные приборы позволяют повысить точность измерений (за счет многократного повторения измерений физической величины, исключения субъективных ошибок оператора, возможности учета дополнительных погрешностей, обусловленных внешними воздействующими факторами и нестабильностью метрологических характеристик прибора).

Повышение точности измерений в приборах с микропроцессорами объясняется исключением влияния на результаты измерений температуры и старения элементов, поскольку перед автоматической установкой нуля производится измерение дрейфа, запоминание его, а затем вычитание запомненного значения из измеренного значения. Кроме того, в таких приборах исключаются погрешности, связанные с нестабильностью напряжения внутреннего источника питания, так как при самоградуировке и поверке прибор измеряет уход напряжения, запоминает его и соответствующим образом корректирует результаты измерений. Случайные выбросы измеряемой величины не влияют на точность вследствие усреднения достаточно большого числа измерений. К тому же повышаются быстродействие приборов и достоверность результатов измерений, поскольку самопроверка микропроцессорных измерительных приборов практически исключает случаи получения неверных результатов. Так, применение микропроцессора в осциллографе для автоматизации процессов управления и обработки результатов измерений обеспечивает сокращение продолжительности измерения интервалов времени до 60 мс, а напряжения с цифровым отсчетом — до 500 мс. При этом существенно расширяются функции осциллографа как измерительного прибора, поскольку кроме перечисленных величин он позволяет измерять величину, обратную временному интервалу, относительную амплитуду сигнала в процентах и др. При исследовании характеристик многорезонансных элементов (в частности, кварцевых резонаторов) возникает противоречие между желанием получить точные сведения о всех резонансных частотах и стремлением определить их в минимальные сроки. Разрешение этого противоречия возможно на основе ЭС, управляющих процессом поиска и измерения параметров резонанса. Подобное решение реализовано в интеллектуальном приборе, разработанном в институте радиоэлектроники Варшавского техни-

ческого университета для контроля кварцевых резонаторов. В рассматриваемом приборе ЭС содержит априорные данные об объекте измерений (многорезонансном элементе), о характеристиках исследуемой партии элементов и о результатах предшествующих измерений. Эта информация используется для проверки измерительного прибора, установления режима поиска резонансов и определения их характеристик [24].

Средства измерений, основанные на использовании микропроцессоров, обладают тремя основными преимуществами:

- меньшей стоимостью и аппаратурной сложностью, что обусловлено заменой существующих логических и вычислительных схем, равнообразиям конфигурации, меньшим числом элементов, содержащихся в микропроцессоре;

- расширенными логическими и вычислительными возможностями, не реализуемыми на базе обычных логических и вычислительных схем;

- возможностью создания "активного" устройства, способного под воздействием команд программы выполнять определенную последовательность операций или взаимодействовать с другими устройствами. Интеллектуальные измерительные приборы выполняют функции анализа и синтеза измерительной информации, приводят ее к виду, удобному для восприятия органами чувств человека, обеспечивают ввод данных от оператора в прибор на профессиональном языке. По уровню интеллектуальности различают 5 групп измерительных приборов в зависимости от их способностей выполнять определенную измерительную задачу в соответствии с имеющейся программой, выбирать программу для решения заданной измерительной задачи, выбирать необходимую программу для решения измерительной задачи в условиях заданных ограничений, работать в режиме интерактивных измерений, работать в режиме самообучения 25. Как правило, каждый последующий уровень интеллектуальности характеризуется более высокой точностью измерений.

Первые измерительные приборы с микропроцессорами были разработаны в 1974 г., а в настоящее время они находят применение практически в каждой группе средств измерений: в радионизмерительных приборах, в расходомерах, тестерах и т.п. Общая схема измерительного прибора с микропроцессором представлена на рис. 19. Сигналы от ПИП поступают для превращения в двоичный код на АЦП и затем - в микропроцессор, осуществляющий обработку сигнала, а также функцию устройства сопряжения измерительного прибора с

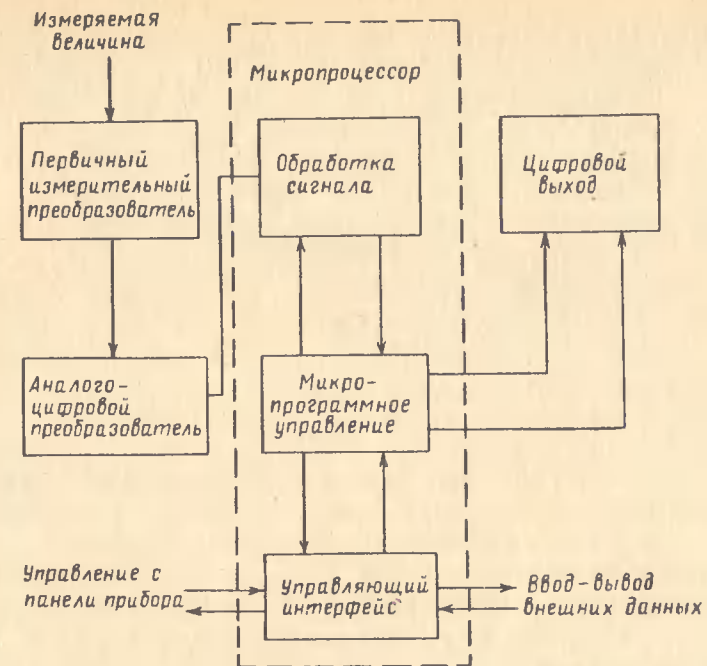


Рис. 19. Структурная схема микропроцессорного измерительного прибора

внешними средствами. Микропроцессор в такой схеме производит любое требуемое усреднение или формирование сигнала либо другие линейные или нелинейные операции, необходимые для представления информации в нужном виде. Микропроцессор обеспечивает не только внутреннее или внешнее управление, но позволяет также облегчить решение проблемы обслуживания приборов за счет организации внутренней диагностики, самопроверки и самокалибровки, увеличивает надежность и точность средств измерений. Программируемость микропроцессора позволяет осуществлять простые диагностические подпрограммы, обеспечивающие контроль с целью выявления неправильной работы вследствие внезапного отказа или нарушения градуировки, и осуществлять коррекцию характеристики.

Операция автоматической калибровки, настройки интеллектуального прибора иллюстрируется схемами, приведенными на рис. 20. На рис. 20 а показана конфигурация такого прибора в режиме измерений, а на рис. 20 б - в режиме самокалибровки. Во время калибровки микропроцессор подключает источник опорного сигнала (меру) к ПИП и разрывает связь

6351

а - (сигнал на выходе)
б - (сигнал на входе)

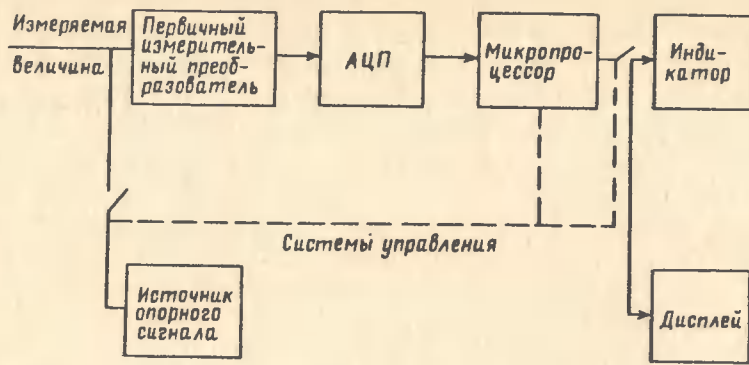


Рис. 20. Схема автоматической калибровки в интеллектуальном приборе

прибора с показывающим устройством (индикатором) и дисплеем. Проверка правильности измерений опорного сигнала осуществляется путем сравнения измеренного значения с хранящимся в памяти значением этого сигнала (меры). При наличии разности указанных значений вычисляется поправка, которая автоматически вводится в показания прибора [26].

В отечественной электроизмерительной технике элементы искусственного интеллекта начинают появляться в цифровых измерительных приборах, имеющих в своем составе микропроцессоры или одноплатные микроЭВМ. В этих приборах осуществляется автоматический выбор диапазона измерений, режима работы. В некоторых наиболее сложных приборах осуществляется автокалибровка, коррекция нуля, самодиагностика. Наличие в них вычислителя и запоминающего устройства позволяет вести обработку достаточно длинных последовательностей измерений, запоминание результатов и регистрацию их на цифрочечатающем устройстве. Цифровые приборы часто имеют стандартный интерфейс для сопряжения с более мощной ЭВМ, что расширяет их интеллектуальные возможности. Дальнейшее развитие интеллектуализации цифровых электроизмерительных приборов происходит в направлении расширения их программных возможностей и тесно связанного с этим увеличения памяти. В перспективе эти приборы в сочетании с персональными ЭВМ должны обеспечивать пользователю возможности измерения, эквивалентные современным измерительно-вычислительным комплексам, а в сочетании с другими цифровыми измерительными приборами образовывать распределенные измерительные структуры конкретного назначения с коллективным интеллектом [18].

Даже щитовые электроизмерительные приборы получили развитие в направлении интеллектуализации. В условиях постоянного увеличения объемов информации и оперативности ее представления человеку-оператору эти приборы необходимо снабжать дополнительными функциями по сигнализации о критических режимах, выдаче параллельно с результатами измерений контрольных сигналов в контуры автоматического управления, запоминанию последнего экстремального значения и др. Отечественный щитовой показывающий прибор Ф 738 имеет в своем составе однокристалльную микроЭВМ; он осуществляет измерение постоянных напряжений и токов, выдачу сигналов трехпозиционного регулирования, сигнализацию о превышении установленных пределов, хранящихся в памяти прибора, измерение температуры с линеаризацией характеристик термопар, запоминание и индикацию (по вызову) минимального и максимального значений измеряемой величины за некоторый интервал времени и др.

Таким образом, в приборах для измерения электрических и неэлектрических величин микропроцессоры выполняют следующие основные функции [8]:

- автоматическую установку пределов измерений, коррекцию аддитивных и мультипликативных погрешностей;
- автоматическое управление процессом уравнивания в приборах сравнения постоянного и переменного токов;
- первичную обработку данных: определение отклонений от номинальных значений, определение моментов приближения к граничным условиям, вычисление отношений максимума-минимума, именованных значений отсчетов, умножение и деление на константы;
- статическую обработку данных: определение средних значений контролируемых величин за определенный интервал времени, вычисление вариаций, дисперсий, средних квадратических значений и др.;
- обработку данных по упрощенным алгоритмам: определение контролируемых параметров по измеренным значениям и известным зависимостям, в частности, определение расхода с вычислением по формулам, определение температуры с учетом нелинейности характеристик термоэлементов и температуры окружающей среды, сглаживание полученных значений и т.п.;
- обработку данных по алгоритмам, реализующим метод измерения: определение скорости движения и значений расхода на основе корреляционных методов, определение параметров объекта на основе спектрального анализа сигналов и др.;

– регистрацию данных в буферных (транзитных) регистраторах: управление частотой отсчетов, рациональное использование буферной памяти, подготовка данных к передаче в блоки основной регистрации;

– визуализацию и регистрацию данных на осциллографах и дисплеях: управление процессом визуализации, организация памяти, формирование знаков, управление цветом, формирование меток и др;

– диагностику функциональных узлов приборов: определение перед началом измерения исправности основных узлов сложных приборов, организация тестов, индикация неисправностей;

– управление работой узлов, выполняющих отдельные функции измерительного преобразования, в частности, работой аналого-цифрового преобразования;

– полное управление процессом измерения по заданной программе, включая управление внешними блоками, дополнительными устройствами (в том числе переключателями, вентилями, микродвигателями) для приборов, измеряющих неэлектрические сигналы.

Таким образом, в микропроцессорном интеллектуальном приборе реализуются контроллерные, вычислительные, тестовые и сервисные функции, сущность которых раскрыта ранее. Рассмотрим пример реализации вычислительной функции системного прибора на примере коррекции его систематической погрешности [27]. Принцип коррекции систематической погрешности, связанной с тем, что значение коэффициента передачи, характеризующее вносимое трактом передачи сигнала усиление или ослабление, отличается от номинального и заключается в следующем (рис. 21). В памяти микропроцессорной системы хранится число B , не разрушаемое при отключении питания и соответствующее строго определенному значению A_0 вход-

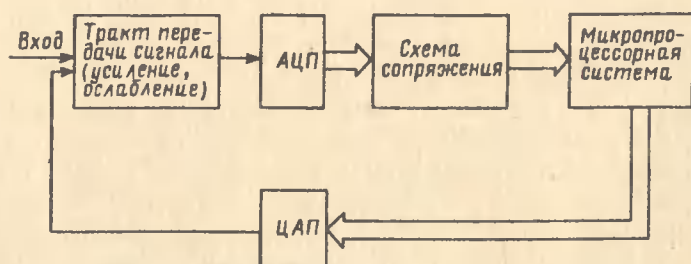


Рис. 21. Коррекция систематической погрешности в микропроцессорном измерительном приборе

ного напряжения, т.е. число, которое должно получаться на выходе АЦП, если на вход вольтметра поступает напряжение A_0 , и коэффициент передачи тракта сигнала, а также коэффициент преобразования АЦП соответствуют своим нормативным значениям. Внутри прибора имеется ЦАП, содержащий образцовый источник питания. При подведении числового эквивалента B к входам ЦАП на его выходе образуется напряжение, значение которого равно $A_0 \cdot B$. Это напряжение подается на вход прибора. В результате аналого-цифрового преобразования получается число B' , отличающееся от числа B наличием систематической погрешности. Ее характеризует отношение чисел $k=B/B'$, вычисляемое микропроцессором и фиксируемое в памяти. Таким образом, в памяти содержится поправочный множитель.

Когда на вход прибора поступает измеряемое напряжение постоянного тока, то на выходе АЦП получается число C' , соответствующее значению этого напряжения. Введение поправочного множителя, т.е. выполняемое микропроцессором умножение числа C' на коэффициент k , дает правильный результат измерения – число C .

Микропроцессоры дают возможность так организовать общение прибора и оператора, что даже при невысокой квалификации последнего в области вычислительной техники возможно локализовать неисправность с точностью до конструктивного блока или типового элемента замены. После этого можно оперативно восстановить работоспособность прибора путем замены отказавшего блока или типового элемента замены.

Для возможности помодульного тестирования необходимо при проектировании системы обеспечить взаимное соответствие типовых элементов замены и функциональных модулей – это связано с функциональным принципом построения системы тестов. Последовательность процедур тестирования должна быть построена так, чтобы каждый модуль при проверке получал контрольные сигналы только от модулей, уже прошедших проверку. На практике это не всегда выполнимо, так как минимальное работоспособное в режиме тестирования ядро микропроцессорной системы включает в себя центральный процессор, ПЗУ и индикатор, т.е. несколько функциональных модулей. Требование полноты теста, глубины диагностики, средней наработки на отказ и стоимости прибора должны рассматриваться при проектировании в комплексе, и компромисс между ними достигается на основе системных соображений.

Можно разделить все типы тестирования приборов со встроенными микропроцессорами на два основных класса: тестирование с применением внешних микропроцессорных средств и полностью автономное тестирование. Возможно также использование комбинированных методов.

Для первого типа тестирования применяются специализированные тестеры или системы типа универсальной микроЭВМ. Программы тестирования стандартных блоков обычно входят в программное обеспечение тестера; в некоторых системах программы тестирования могут составляться пользователем на языке высокого уровня, и, таким образом, пользователь имеет возможность создания тестовых систем для произвольных блоков и приборов.

Другой тип тестирования — полностью автономное тестирование — рассчитан на проверку прибора в условиях эксплуатации без каких-либо дополнительных средств. В зависимости от требований пользователя тестирование может проводиться в двух основных режимах:

— определение работоспособности (для этого режима достаточно двух точечных индикаторов, показывающих положительный или отрицательный результат проверки модуля или системы в целом; локализация неисправности в данном случае может быть произведена отдельным запуском тестов отдельных модулей. Возможен также вариант с цифровой индикацией номера отказавшего модуля);

— диагностика неисправности (для этого режима нужно устройство вывода сообщений: дисплей или принтер).

При автономном тестировании для хранения программы тестирования используется внешнее устройство памяти (накопитель на диске или магнитной ленте), если оно имеется в системе для основного режима, либо, чаще, тестовое ПЗУ. В последнем случае часто тестовое ПЗУ размещается в том же адресном пространстве, что и основное ПЗУ; это позволяет экономить адресное пространство. Учитывается то, что во время основной работы тестовое ПЗУ не нужно и доступ к нему можно запретить специальным сигналом. При тестировании запрещается доступ к основному ПЗУ и открывается доступ к тестовому ПЗУ. Иногда ПЗУ для тестирования модуля размещают конструктивно в самом этом модуле. Это дает ряд преимуществ: большую автономность теста, экономию пространства при использовании ряда сменных модулей и др. То же ПЗУ часто используется для идентификации модуля. В сложных системах с большим числом сменных модулей этот прием поз-

воляет избавиться от ввода оператором дополнительной информации при смене модулей. В ПЗУ модуля записываются для ввода в процессор основные технические характеристики и структурные особенности модуля; в том же ПЗУ находится протокол связи модуля с центральным процессором.

Проведение полного тестирования модулей (т.е. во всех возможных режимах при всех комбинациях входного сигнала) невозможно по условиям быстродействия, поэтому в перечисленной серии тестов обычно используется ограниченное число комбинаций входных величин, соответствующее наиболее тяжелым условиям эксплуатации. Ряд функциональных устройств приходится тестировать совместно для того, чтобы можно было замкнуть тестовую цепочку: микроЭВМ — задание тестового сигнала — тестируемый модуль — выходной сигнал — микроЭВМ анализ выходного сигнала. Так, устройства дискретного вывода объединяются с устройствами дискретного ввода; устройства цифроаналогового преобразования объединяются с устройствами аналого-цифрового преобразования.

Примером интеллектуального измерительного прибора может служить измерительный приемник, используемый в измерительной системе для анализа помех [28]. В нем автоматизированы функции, которые ранее выполнялись оператором: установка частоты; сквозная калибровка измерительного канала; выбор режима для измерения малых и больших уровней шумов; оценка статистических характеристик шумовых сигналов (средних и максимальных значений) в течение выбранного интервала времени от 5 мс до 100 с; учет характеристик измерительного канала (коэффициентов преобразования измерительных блоков, нелинейности и т.п.). Кроме того, обеспечивается так называемый "благожелательный интерфейс с оператором", т.е. такая форма представления данных конечному пользователю, которая ему понятна.

Для проведения измерительного эксперимента необходим целый ряд сведений, которыми обладает, как правило, лишь специалист (эксперт), осуществляющий исследования. К этим сведениям относятся: измеряемые величины, выбор которых производится на основе построения модели объекта измерений; конфигурация измерительной системы, определяемая при планировании эксперимента; получаемые при измерении данные, их обработка; погрешности измерений и интерпретация результатов измерений.

Особенно большие сложности в организации измерительного эксперимента возникают в случае, когда требуется опреде-

лять свойства многопараметрического объекта, для чего нужна многоцелевая измерительная система, состоящая из разнообразных измерительных, вычислительных и управляющих объектов (устройств). Создание подобной системы и планирование измерительного эксперимента связаны с проведением экспертизы (теоретико-метрологической и технической). Теоретико-метрологическая экспертиза сводится к анализу основных характеристик измерительного процесса, выбору метода измерений, установлению условий проведения измерений, определению способов обработки измерительной информации. Техническая экспертиза сводится к выбору необходимых средств измерений, определению структуры измерительной системы, способа управления измерительным процессом. Автоматизация перечисленных выше операций возможна с помощью экспертной системы (системы искусственного интеллекта), для чего требуется формализовать эти операции. Часть из них уже формализована в форме алгоритмов оценки результатов измерений, схем принятия решений и т.п., а другая часть (специфическая для конкретной области измерений) приспособляется к автоматизации при разработке конкретной ЭС.

Традиционная аналоговая регистрирующая техника практически уже исчерпала свои возможности по скорости регистрации и мало приспособлена для последующей автоматической обработки результатов измерений. Наиболее перспективным направлением развития регистрирующей аппаратуры является использование преобразователей измеряемого сигнала в цифровую форму, запоминание его и последующая регистрация на носителе. Введение в состав регистрирующего прибора микропроцессора и элементов памяти позволяет реализовать в нем принципиально новые возможности: растяжение изображения регистрируемого процесса и сдвиг его по оси времени; организация режима "электронной лупы" для анализа отдельных участков исследуемого процесса; организация ждущих режимов регистрации; адаптация регистрирующих приборов к конкретным исследуемым объектам.

В частности, при построении нового поколения электроэнцефалографов венгерскими приборостроителями предлагается включать в их состав ЭС на основе микропроцессора [30]. Такой прибор будет состоять из двух основных блоков: программируемого самописца электроэнцефалограмм и анализатора записанных сигналов (рис. 22). Анализатор осуществляет функции определения амплитудных характеристик сигналов (средней интенсивности, тренда и т.п.), спектральной плотности мощности сигнала и спектра шумов в каналах.

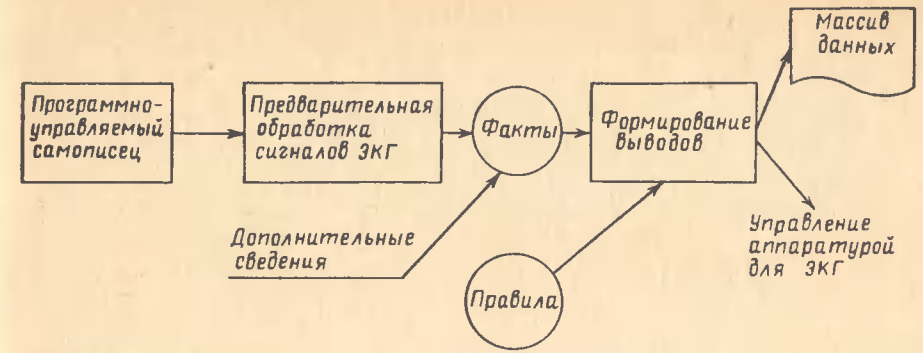


Рис. 22. Структурная схема интеллектуального электроэнцефалографа

Из измерительной информации с помощью вспомогательных (эвристических) данных извлекаются знания (факты), которые отображаются на дисплее либо используются для управления электроэнцефалографом. Благодаря этому облегчается задача оператора при работе с прибором. Обработка записываемых сигналов служит для подготовки данных, необходимых для работы ЭС (рис. 22).

Наибольшей степенью интеллектуальности обладают сложные измерительные приборы для научных исследований. Они имеют в своем составе системы данных, обеспечивающие выполнение широкого круга интеллектуальных функций, включая управление и оптимизацию параметров приборов, выбор метода проведения эксперимента и обработки результатов, анализ массива результатов измерений с использованием библиотеки для интерпретации полученных данных. В качестве примера на рис. 23 изображена схема создания программного обеспечения для интеллектуальных приборов, используемых при химическом анализе веществ. Из общей схемы автоматизации эксперимента следует, что первой интеллектуальной функцией является автоматизация формализованной постановки задачи, без чего невозможно планировать эксперимент. При этом выходом системы данных интеллектуального научного прибора должна быть формулировка задачи либо поиск такой формулировки на основе сокращения множества возможных постановок задач. Схема автоматизации планирования эксперимента представляет собой первую стадию многопараметрического анализа системы данных при исследованиях пирролиза методом масс-спектрометрии. Подобный подход к

6351

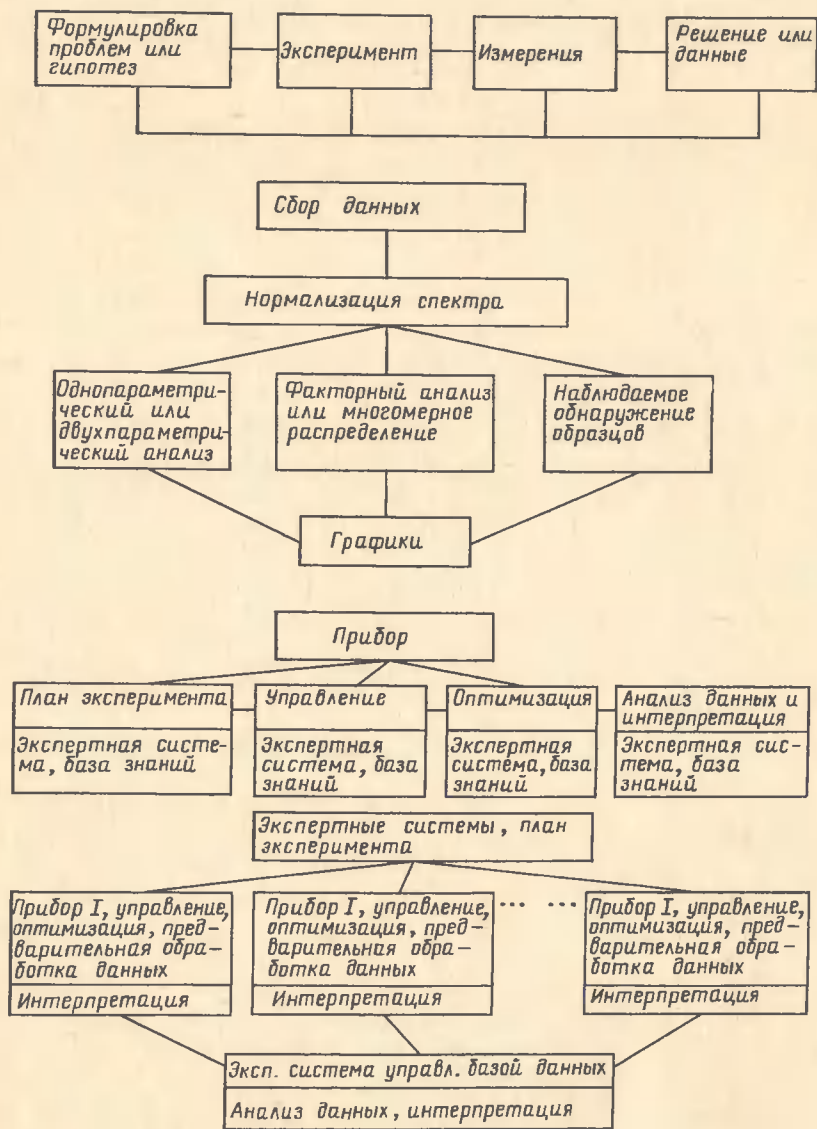


Рис. 23. Экспертная система в масс-спектрометрах

планированию проведения эксперимента позволяет сформулировать проблему, интерпретировать результаты и выдать решение исследователю. По существу на этой позиции представлены макеты прикладных программ для микро-ЭВМ, которая обрабатывает поступающие от масс-спектрометра данные. Объединение пакетов прикладных программ для многомерного статистического анализа с системой данных является ключевым моментом в интеллектуальном программировании измерительных приборов. На рис. 23 представлена также ЭС, предназначенная для придания интеллектуальности прибору. С ее помощью прибор может приспособливаться для формулировки серии задач и выбора сети решений на каждой из стадий анализа, а также использовать интеллектуальный драйвер для многомерного анализа и интерпретации результатов анализа на каждой стадии. Указано место такой ЭС в лаборатории, где имеется множество приборов; управление приборами и интерпретацию результатов такая система дает на основе данных многих анализов.

Приведенные на рис. 23 диаграммы не охватывают всеобщие направления автоматизации научных исследований, однако дают представление о связях проблем, возникающих при планировании интеллектуальных измерений.

Формулировка проблем может рассматриваться с позиций статистического анализа, когда формулируются и проверяются некоторые гипотезы о возможных методах химического анализа. Однако в химических исследованиях проблемы слабо формализованы и задача сводится к иерархии исследований данных, ведущей к формулировке одной или нескольких проблем. Например, имеется ли разница в химическом составе серии образцов? Если имеется, то что является причиной этой разницы? Коррелирована ли наблюдаемая разница с наблюдаемыми изменениями физических свойств? Могут ли быть предсказаны физические свойства, если известна указанная разница?

Интеллектуальный прибор должен иметь базу знаний для того, чтобы можно было автоматически получать решение каждой из сформулированных проблем. База знаний может содержать данные, правила, программы и эвристические знания. В работе [31] рассматривается база знаний, необходимая при постановке и проведении программы анализа состава полимера путем газовой хроматографии при пиролизе. Область возможных постановок задач включает в себя оптимизацию параметров пиролиза, условий хроматографии и характеристик

интерфейса, управление прибором и параметрами процесса сбора данных, сжатие данных и их интерпретацию. База знаний должна обеспечивать возможность формализации всех четырех названных задач. Для оптимизации параметров могут быть использованы различные определения оптимума, алгоритмы эффективного движения к оптимуму, правила для обнаружения плохой структуры поверхности оптимизации и т.п. Управление прибором осуществляется с помощью базы знаний, в которой содержатся правила для автоматического осуществления таких событий, как начало пиролиза или сбора данных. Уплотнение данных осуществляется с использованием правил и сведений, необходимых для определения (коррекции) линии отсчета, нормализации хроматографии и сопоставления ее пиков. База знаний необходима для предварительного сбора данных, позволяющих составить протоколы составления пиков, правил для определения линии отсчета, правил и алгоритмов нормализации, правил принятия или отвержения хроматограммы в процессе анализа. Интерпретация данных может потребовать библиотеки ранее полученных хроматограмм, а также правил и алгоритмов для интерпретации текущих событий на основе знаний о том, как интерпретировались прежние результаты. В связи с этим база данных должна содержать постоянные знания и знания о результатах анализа последних хроматограмм.

Для приборов химического анализа и таких современных методов, как газовая хроматография (масс-спектрометрия и тандем-масс-спектрометрия) требуется исключительно много времени для осуществления процедур уплотнения данных и их интерпретации. Обусловлено это тем, что при таком анализе собираются тысячи данных, которые необходимо подвергнуть научной экспертизе. Вследствие этого проходит много времени между непосредственными измерениями и получением результата измерений. Одним из путей решения этой проблемы является включение в состав прибора системы уплотнения данных, реализующей методы многомерного анализа. Поскольку разные эксперты пользуются разными методами анализа, необходимо, чтобы указанная система уплотнения данных работала как ЭС. Ей может быть задан, например, такой вопрос: "Имеется ли корреляция между двумя переменными?" При подготовке ответа невидимыми для пользователя останутся операции определения распределения параметров, вычисления коэффициента корреляции и определения значимости полученного результата. Ответ ЭС может выдать в такой

форме: "имеется существенная корреляция между первой переменной и логарифмом второй переменной. Нужно ли Вам представить вычисленные значения?"

Таким образом, интеллектуальные измерительные приборы дают возможность производить сложный анализ многопараметрических данных и интерпретировать их на основе гипотез, которые без ЭС проверить невозможно. ЭС позволяют более глубоко понять результаты эксперимента, в широких масштабах внедрить количественные методы анализа результатов исследований.

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Измерительная система представляет собой совокупность измерительных приборов и вспомогательных устройств, предназначенных во взаимодействии решать определенные измерительные задачи. Сущность автоматизации измерительных систем иллюстрируется на рис. 24. Основными компонентами измерительных систем являются источники сигналов, генерирующие входные сигналы, необходимые для измерений, и измерители, воспринимающие и количественно определяющие выходные сигналы исследуемого объекта. В традиционных измерительных системах (рис. 24а) с ручным управлением оператор выбирает выходные характеристики источника сигналов и входные характеристики измерителя, подготавливает объект к измерениям (подключает объект к источнику питания, выбирает токи для измерения параметров и т.п.), считывает показания приборов и оценивает результаты измерений.

В автоматических измерительных системах (рис. 24б) оператора заменяет управляющий блок, который одновременно определяет последовательность этапов получения результатов измерения, хранения и обработки. Управление и обмен данными в таких системах осуществляются с помощью цифровых сигналов, а соединение компонентов системы — с помощью стандартного интерфейса.

Различают три вида автоматизированных измерительных систем: системы сбора и обработки информации, функционально-модульные и приборно-модульные системы.

Первый вид автоматизированных измерительных систем предназначен для измерения параметров разнесенных в

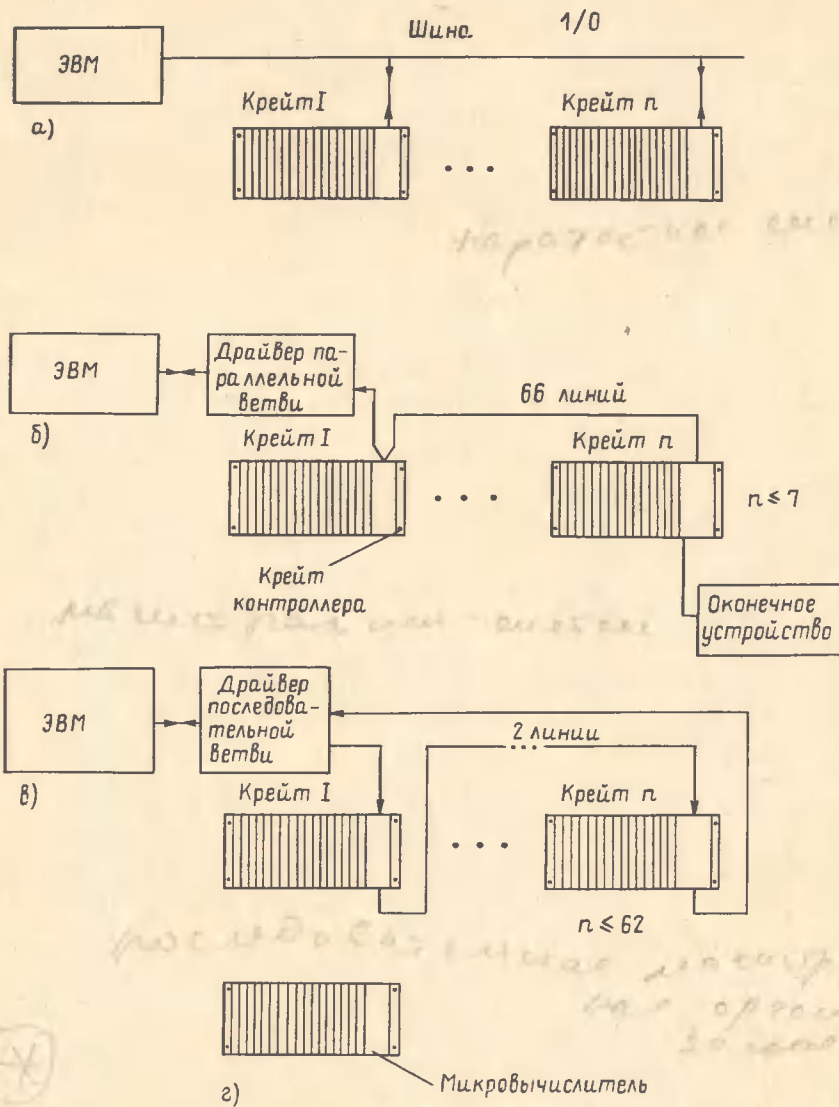


Рис. 24. Структура измерительных систем: а) неавтоматизированных; б) автоматизированных

пространстве объектов и представляет собой совокупность ПИП, расположенных рядом с объектами измерений (встроенных в эти объекты), линий передачи измерительной информации и средств коммутации, вторичного преобразования измерительных сигналов, их обработки, хранения, документирования и представления оператору (рис. 25). В системах обработки данных, связанных с поступлением больших массивов измеренных значений по нескольким измерительным каналам, применяются различные методы сокращения объемов протоколируемых или регистрируемых данных.

Наиболее распространенным из этих методов является граничный метод, при котором регистрируются только те данные, которые превышают некоторый уровень. Этот метод часто используется в устройствах сигнализации о повреждениях цепи для уменьшения объема обрабатываемых данных. Измеряемый сигнал дифференцируется и значение его первой производной сравнивается с заданным граничным значением. Данный метод может быть использован для контроля положительных и отрицательных ускорений вращающихся валов с целью предотвращения их разрушений.

При пороговом методе дополнительно определяется полоса гистерезиса измеряемой функции. Если измеренные значения колеблются в узкой полосе относительно граничного значения, этот метод позволяет достичь значительно уменьшения регистрируемых данных. Наконец, последний метод основан на запоминании только тех измеренных значений, которые существенно отличаются от предыдущих. Этот метод можно использовать либо самостоятельно, либо в комбинации с тремя другими методами. Комбинации этих методов имеют большие преимущества перед обычными методами, особенно при анализе дан-

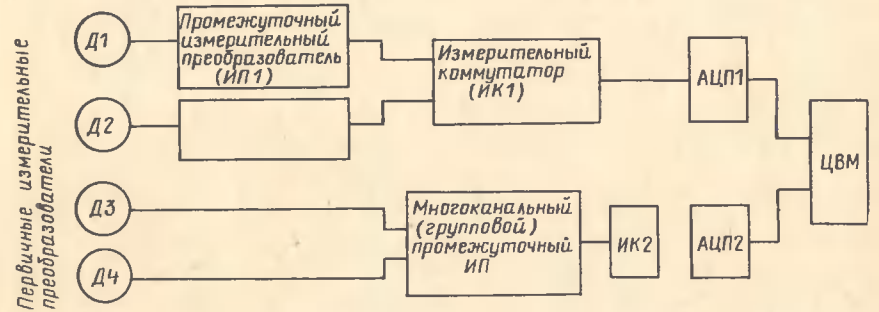


Рис. 25. Структурная схема системы сбора и обработки измерительной информации

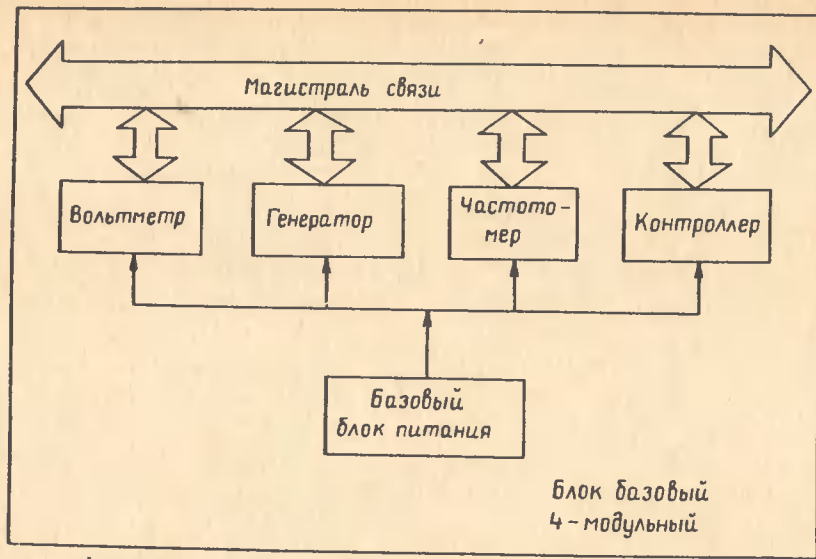
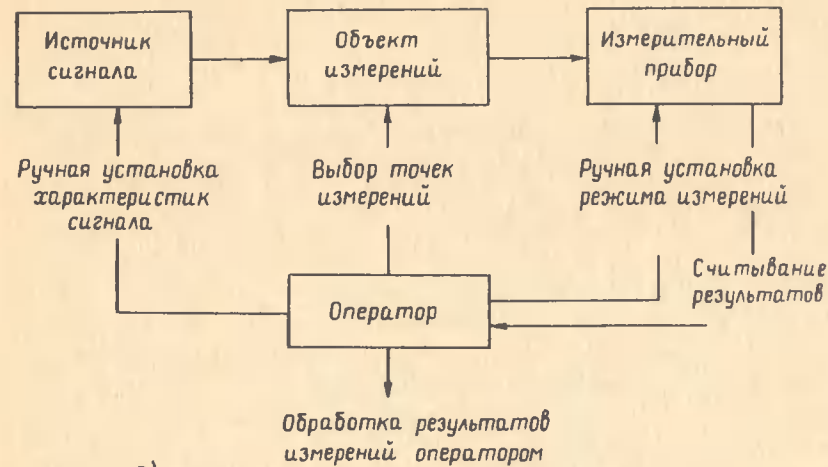


Рис. 26. Структурная схема функционально-модульной системы

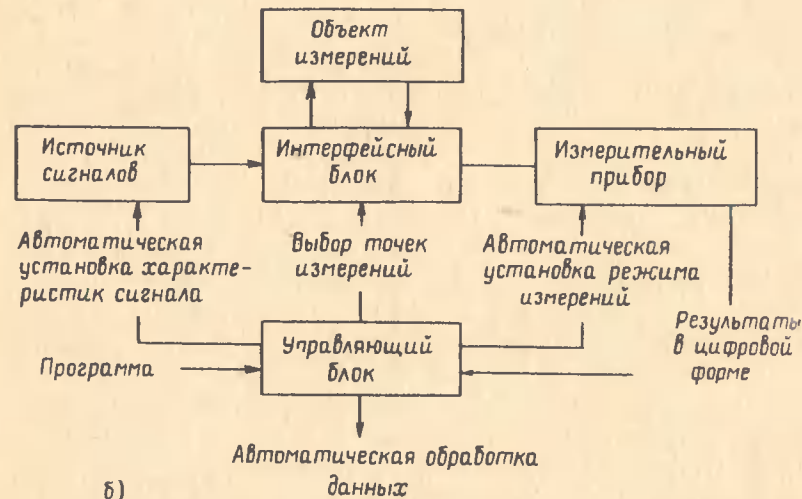
ных в реальном масштабе времени. Прежде всего эти преимущества заключаются в уменьшении затрат за счет сокращения емкости запоминающего устройства. Кроме того, сокращается время передачи данных в ЭВМ для их дальнейшей обработки, что эквивалентно повышению быстродействия системы. Наконец, сокращается время выборки данных при селективном считывании.

Описанные выше методы являются своеобразным фильтром на пути огромного потока данных, требующего регистрации и обработки [32].

Функционально-модульные автоматизированные измерительные системы – это наборы модульных малогабаритных мер и измерительных приборов различного назначения, конструктивно объединенных в одном базовом блоке – крейте (рис. 26). Отдельные приборы-модули, составляющие такие системы, являются фактически функциональными узлами и не могут быть использованы в качестве самостоятельных средств измерений. В составе базового блока имеется контроллер для управления приборами-модулями и общий блок питания. Базовые блоки рассчитываются на 3, 4, 5 либо 6 модулей. Гибкая система конфигурации позволяет потребителю при изменении измерительных задач изменять состав приборов-модулей. Система электропитания автоматизированных измерительных систем ор-



а)



б)

Рис. 27. Варианты построения измерительной системы в стандарте КАМАК: а) параллельная система; б) магистральная система; в) последовательная магистральная организация; г) индивидуальный крейт КАМАК

6351

накрыть

88

ганизована таким образом, что базовые блоки независимо от числа входящих в них модулей обеспечивают необходимые питающие токи и напряжения, поэтому приборы-модули можно вставить в любую ячейку системы. Примером таких систем является измерительная система в стандарте КАМАК [33], разработанная в Европейском центре ядерных исследований. Варианты построения такой системы приведены на рис. 27. В Варшавском техническом университете разработан способ построения автоматизированных измерительных систем на основе персональной ЭВМ ZX Spectrum и измерительной аппаратуры, выполненной в стандарте КАМАК [34]. Связь между персональной ЭВМ и измерительной аппаратурой осуществляется с помощью стандартного интерфейса RS-232C, для чего создана специальная интерфейсная схема (карта). Измерительная система на основе аппаратуры, выполненной в стандарте КАМАК, и ЭВМ ZX Spectrum обеспечивает "благожелательный" интерфейс между оператором и системой, т.е. позволяет осуществлять удобную для оператора визуализацию результатов измерений, представлять их в аксонометрической проекции и рассматривать под различным углом зрения.

Приборно-модульные автоматизированные измерительные системы строятся путем агрегатирования программно-управляемых средств измерений общего применения, объединяемых друг с другом и с управляющей ЭВМ посредством стандартного приборного интерфейса. Помимо программно-управляемых мер, измерительных приборов и управляющей ЭВМ в состав такой системы входят различные вспомогательные устройства: коммутаторы измеряемых параметров и сигналов измерительной информации, средства отображения и документирования результатов измерений, устройства сопряжения системы с объектом контроля, кабельные соединения, средства энергоснабжения, вентиляции и др. (рис. 28). По магистрали (каналу общего пользования (КОП)) от измерительных приборов поступают результаты измерений физических величин, а от ЭВМ - управляющие сигналы, необходимые для установки средств измерений и других элементов системы в режим, определяемый алгоритмом ее работы. Любой обмен данными в магистрали происходит только по командам от ЭВМ. Соединение средств измерений с объектом контроля производится через устройство согласования (адаптер) и блок аналогового интерфейса. Последний состоит из коммутационных элементов, линий связи и разъемов для аналоговых измерительных цепей. Для организации автоматического управления работой контролируемого объекта (переключе-

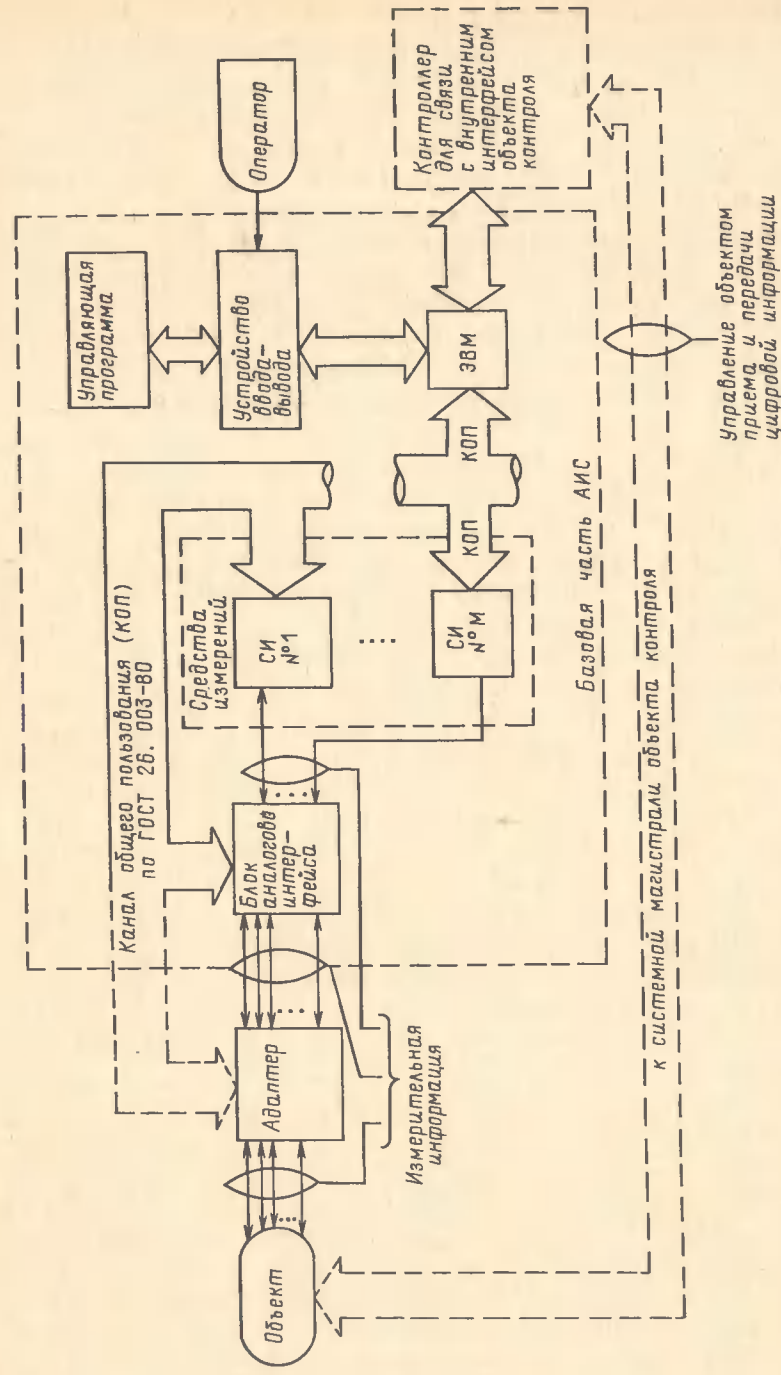


Рис. 28. Структурная схема приборно-модульной системы

чение режимов, передача и прием цифровой информации и т.п.) в состав автоматизированной измерительной системы может быть включен контроллер для связи с системной магистралью объекта измерений. Такой контроллер может быть реализован на основе отдельной микроЭВМ или в виде устройства ввода-вывода, входящего в состав управляющей ЭВМ измерительной системы. Для удешевления и упрощения автоматизированных измерительных систем можно использовать в качестве контроллеров любые микроЭВМ, а не только те, у которых имеется стандартный приборный интерфейс (IEC -625, IEEE -488, интерфейс по ГОСТ 26.003-80). Сопряжение таких микроЭВМ с измерительными приборами, имеющими стандартный интерфейс, осуществляется программным способом, что приводит к снижению скорости передачи данных до 5,2 Кбайт/с, однако исключает необходимость каких-либо аппаратных затрат для реализации интерфейсных функций [35].

ЭС начинают использоваться для автоматизированного проектирования модульных автоматизированных измерительных систем из средств измерений, имеющих стандартный приборный интерфейс. Так, на 5-м Международном симпозиуме IMEKO докладывался проект ЭС, облегчающей проектирование измерительных систем, если сформулирована измерительная задача. ЭС осуществляет выбор метода решения измерительной задачи и необходимых для ее реализации измерительных средств. Система создана на основе персональной ЭВМ Olivetti M24 с оперативной памятью в 512 кбит, памятью на гибких дисках в 360 кбит и на твердых дисках в 10,7 Мбит. В ней используется компилятор MODULA-2 в комбинации с языком высокого уровня Турбо-Паскаль [6].

В отечественном приборостроении одними из первых интеллектуальных средств измерений явились измерительно-вычислительные комплексы. Наличие в составе комплексов свободно программируемого процессора явилось определяющим моментом, позволившим реализовать принципиально новые методы и процедуры измерения: программно-алгоритмическую коррекцию результатов измерений, цифровую линеаризацию градуировочных характеристик, статистическую обработку результатов измерений с процессом их получения, переход к аддитивным измерительным процедурам, программной перестройке структуры комплексов [18]. Использование многоуровневой структуры с распределенными вычислительными мощностями позволило на основе введения аппаратной избыточности и встроенных средств автоматического самотестирования

резко повысить надежность функционирования измерительных систем и комплексов, построенных на их основе.

Большие вычислительные возможности автоматизированных измерительных систем дают возможность решать широкий спектр интеллектуальных задач, создавать в составе таких систем ЭС с базами данных. Так, для автоматизации метрологических работ, проводимых в физико-техническом институте ФРТ и связанных с исследованиями и использованием высокостабильных квантовых эффектов при разработке эталонов единиц физических величин и прецизионных приборов, необходимы сложные интеллектуальные измерительные системы, которые не только компьютеризированы и автоматизированы, но имеют высокое быстродействие, работают в реальном масштабе времени и включают в себя множество ПИП для измерения различных физических величин. Эти системы способны к адаптации при непредсказуемых изменениях измеряемых величин, к самопрограммированию, распознаванию анализируемых процессов, самооптимизации и принятию логических решений. Они также обеспечивают самокалибровку и автоматическую коррекцию результатов измерений на основе определения параметров окружающей среды. Такие системы находят применение в автоматических системах управления качеством продукции, установках создания искусственного климата, в сложных комплексах для медицинских и биологических целей [17].

Одним из основных принципов создания автоматизированных измерительных систем является распределение интеллекта. В таких системах интеллект имеется на всех уровнях, начиная от ПИП и кончая центральным ядром (основным вычислителем). Благодаря этому становится возможным на всех уровнях использовать общую шину (канал общего пользования) для соединения частей системы. Сигнал на выходе ПИП имеет цифровую форму, каждый элемент системы самостоятелен и приводится в действие, если только к нему адресуется команда, передаваемая по общей шине.

Для статических и динамических исследований механических свойств сооружений, материалов и механизмов в отделении прикладной физики научно-исследовательского института гражданских сооружений в Братиславе (ЧССР) разработаны измерительные системы с распределенным интеллектом, который реализуется с помощью микропроцессоров и ЭВМ [36]. Системы содержат три группы основных составных частей: ПИП, анализаторы данных и средства вычислительной тех-

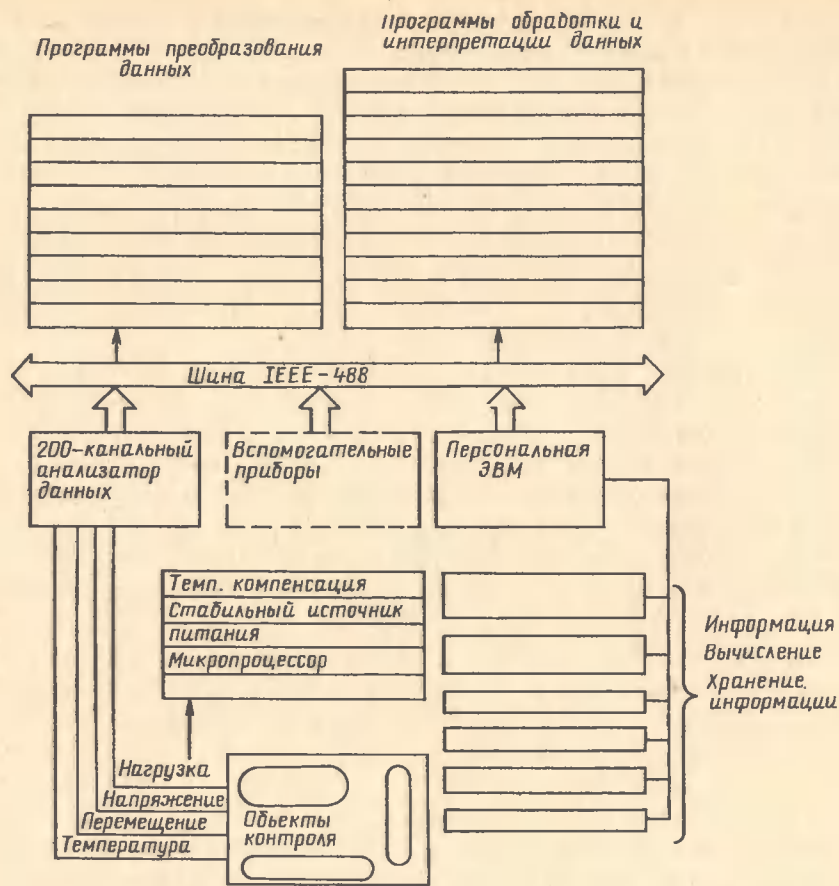


Рис. 29. Схема измерительной системы для статических и динамических испытаний сооружений и механизмов

ники, причем элементы интеллекта присутствуют во всех трех вышеперечисленных частях системы (рис. 29). ПИП измеряют температуру, нагрузку, механическое напряжение, перемещение, силу, скорость, ускорение. Для коррекции показаний ПИП используются микропроцессоры, учитывающие влияние воздействующих факторов на результаты измерений, осуществляющие линеаризацию характеристик и др. Анализ измерительной информации осуществляется в реальном масштабе времени с использованием различных математических методов: преобразования Фурье, передаточных функций, корреляционного и регрессионного анализа и др. Для этих целей используется персональная ЭВМ с разветвленной периферией: цветным дисплеем, памятью на винчестерских и флопидисках,

печатающие устройства и т.п. Соединение приборов в системы осуществляется с помощью стандартного интерфейса IEEE-488.

Наряду с измерительными системами, имеющими распределенный интеллект, находят применение и такие, в которых интеллект сосредоточен в интеллектуальных передающих модулях [11]. Благодаря этому имеется возможность с помощью указанных модулей решать определенный круг интеллектуальных задач в измерительных системах, построенных с использованием обычных и интеллектуальных ПИП.

Интеллектуальные измерительные системы являются необходимой составной частью автоматизированных гибких и роботизированных промышленных производств, где они применяются, в частности, для автоматизации контроля геометрических размеров деталей, визуального обнаружения дефектов. При этом применяются либо детерминированные методы анализа изображений, либо методы теории нечетких множеств. В составе базы данных ЭС имеется библиотека подпрограмм для анализа изображений, что позволяет придать измерительным системам гибкость и универсальность. Перспективные измерительные системы этого класса должны включать в себя специализированные ЭВМ, предназначенные для решения задач искусственного интеллекта путем их первоначального обучения и последующего использования методов распознавания образов [37].

5. ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ И ИСПЫТАНИЙ

Методы и средства искусственного интеллекта начинают играть все более заметную роль в создании систем для тестирования и испытаний электронной техники. В частности, в работе [38] указывается, что в настоящее время большое внимание уделяется вопросам стоимости и эффективности методов обнаружения и локализации неисправностей, используемых в электронных системах. Круг задач включает обеспечение адекватного охвата отказов аппаратурой встроенного контроля и автоматических испытаний, снижение вероятности ложных тревог, выделение перемежающихся отказов и снижение требований по подготовке к техническому обслуживанию. В качестве первого шага проводилось исследование методов искусственного интеллекта с целью оценки возможности их потенциально-

го приложения к контролю и испытанию электронной техники. Поскольку в электронных системах обнаружение и выявление неисправностей осуществляется главным образом при помощи встроенного контроля и аппаратуры автоматического тестирования, были определены возможные области использования искусственного интеллекта.

Анализ, проведенный сотрудниками фирмы Boeing и Ромского научно-исследовательского центра ВВС США, показал, что при оценке по критерию стоимость - эффективность значительно выгоднее использовать методы искусственного интеллекта для решения проблемы контролепригодности, чем улучшать средства диагностики или аппаратуру автоматического тестирования. По результатам проведенных исследований были также разработаны несколько потенциальных приложений искусственного интеллекта:

- предварительное автоматизированное проектирование с учетом контролепригодности;
- руководство автономным тестированием в целях совершенствования функциональных испытаний на уровне блоков: на системном уровне ЭС может обеспечить оперативную классификацию отказов, разгружая оператора и способствуя улучшению автономной диагностики;
- применение программированной процедуры встроенного контроля в блоках или на платах для улучшения идентификации перемежающихся отказов и снижения частоты ложных тревог путем использования зарегистрированных данных об эксплуатационных отказах, а также искусственного интеллекта для идентификации и диагностики отказов;
- использование искусственного интеллекта для подготовки программ автоматического тестирования, что позволит составлять оптимальные программы;
- создание "разумной" настольной испытательной установки, представляющей собой ЭС обслуживания для использования вместе с другим настольным испытательным оборудованием на автоматизированном рабочем месте.

В работе [39] рассматривается процесс обнаружения и локализации отказов в реконфигурируемой системе в реальном масштабе времени на основе сочетания методов автоматической избыточности и концепции теории искусственного интеллекта. Для этих целей используются различные методы. В частности, методы адаптивного управления [40] применимы, если число настраиваемых параметров модели не слишком велико; их недостаток состоит в том, что они не учитывают

отказы, которые требуют реконфигурации системы. Методы, основанные на обобщенном критерии максимального правдоподобия надежно работают при скачкообразных изменениях состояния системы, но не дают хороших результатов при параметрических отказах. Кроме того, используются методы статистических гипотез, в которых номинальная модель объекта управления и совокупность моделей, соответствующих некоторому множеству отказов, образуют множество допустимых гипотез. Недостатки этих методов заключаются в большом объеме вычислений, к тому же алгоритм становится плохо обусловленным при увеличении множества исследуемых гипотез.

Для преодоления этих трудностей предлагается применить на первом этапе эвристические методы с целью уменьшения множества испытываемых гипотез. В качестве исходной используется априорная информация о причинно-следственных связях в динамической модели объекта управления, а также текущая информация в виде показаний ПИП. На основе этой информации производится выделение наиболее вероятных состояний диагностируемого объекта и подмножества возможных источников отказов. Если это подмножество содержит небольшое число элементов, то каждый из них может быть проанализирован на следующем этапе диагноза с применением различных аналитических методов, в результате чего неопределенность процесса принятия решений резко уменьшается. Если в подмножестве имеется большое число элементов, то используемая процедура диагностики выполняется в три последовательных этапа, преобразующих исходное множество подозреваемых источников отказа в множество гипотез.

В момент обнаружения отказа все индикаторы (средства отображения информации о техническом состоянии системы) классифицируются на две группы. К первой относятся те индикаторы, которые находятся в возбужденном состоянии, ко второй - остальные индикаторы. Первый этап диагностики, который называется маскированием, состоит в том, что на исходном графе зависимости сигналов маскируются те узлы, которые определяют состояние индикаторов, находящихся в не-возбужденном состоянии. Этот этап основан на предположении о том, что каждому узлу графа, находящемуся в состоянии отказа, должен соответствовать индикатор в возбужденном состоянии.

Второй этап диагностики является чисто дедуктивными и использует операцию пересечения. На этом этапе необходимо выделить среди всех оставшихся после маскирования узлов

графа те, которые влияют на состояние конкретного индикатора, находящегося в возбужденном состоянии. После того, как эта операция выполнена для всех возбужденных индикаторов, результирующее подмножество гипотез относительно источника отказа определяется как пересечение полученных множеств с исходным множеством узлов. Если множество гипотез оказывается пустым, то это говорит о нарушении основного допущения о единственном источнике отказов. В дальнейшем это событие будет называться отказом при поиске. На завершающем этапе осуществляется ранжирование полученного множества гипотез с использованием матрицы взаимовлияния, которая строится на основе более полной каузальной модели.

Методы искусственного интеллекта особенно широко внедряются в аппаратуру контроля и диагностики электронных схем. Так, отделение Integrated Logistics Support фирмы Westinghouse (США) для обнаружения схемных ошибок в испытываемых устройствах создало систему, базирующуюся на практическом опыте инженеров-испытателей и подробной информации по физическим процессам, протекающим в электронных схемах [40].

Эта система, получившая название "Диагностическая система на основе знаний для внутрифирменного использования", содержит базу данных и базу знаний (рис. 30). База данных проектирования включает в себя описания принципиальной схемы и функционирования микросхемы и используется входящей в состав системы дедуктивной машиной вывода, учитывающей причинно-следственные связи, для анализа символов-признаков неисправностей и выявления дефектных компонентов. База знаний (правил) содержит информацию (собранную для практических схем или полученную теоретически) относительно взаимосвязей между испытательными воздействиями, внешними признаками-симптомами ошибок и конкретными ошибками. Предполагается, что эта информация будет поступать как от дедуктивной диагностической машины, так и от инженеров-испытателей, отражая их опыт и результаты анализа конкретных ситуаций. Дедуктивная машина вывода, работающая с использованием правил, скомпонованных в базе знаний, помогает инженеру-испытателю обнаруживать причину ошибки в тестируемом устройстве. Принимая активное участие в процессе отладки, система учится у инженера-испытателя и запоминает знания в базе правил. Отмечается, что сейчас система находится в стадии отработки.

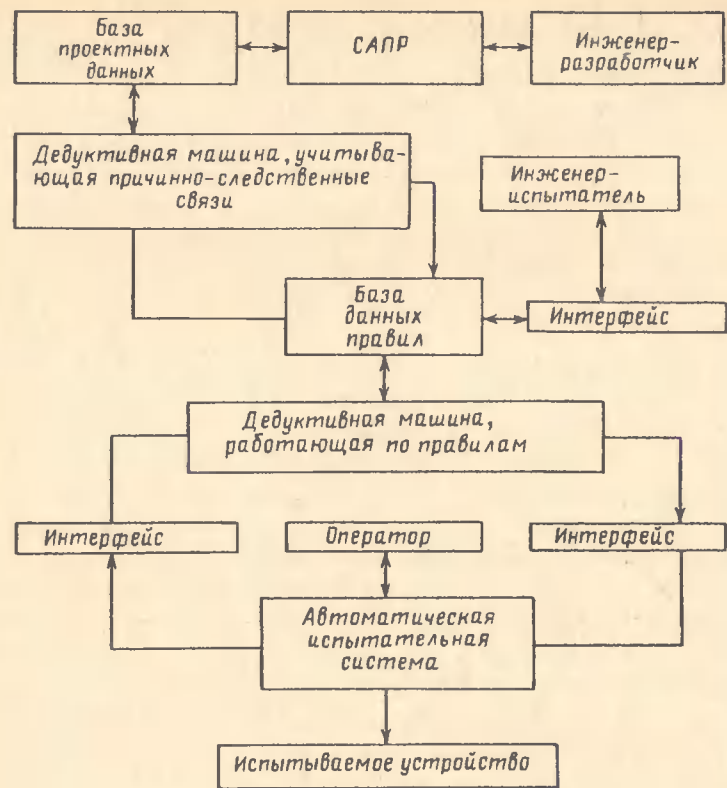


Рис. 30. Структурная схема диагностической системы

Фирма Teradyne (США) разработала аналогичную систему искусственного интеллекта, с помощью которого осуществляется диагностика неисправностей аналоговых компонентов на плате, подвергаемой испытаниям при помощи внутрисхемного тестера. Схемные тестеры выделяют каждый компонент печатной схемной платы, находят такие аналоговые компоненты, как резисторы и транзисторы, и проверяют их рабочие характеристики. Затем оператор системы расшифровывает признаки ошибок, чтобы установить, почему какой-либо компонент не выдержал испытания и каким образом исправить ошибку.

Система фирмы Teradyne под названием "Внутрисхемная диагностика" (ICD-In-Circuit Diagnostics) — это часть программного обеспечения для тестеров L-200, предназначенных для проверки работоспособности плат со СБИС; система состоит из трех элементов: базы знаний, которая разра-

батывается в процессе генерации тестов и содержит информацию относительно испытываемой платы и каждого расположенного на ней компонента; анализатора "не пройденных" тестов; диагностической дедуктивной машины. Дедуктивная машина на основе данных о каждом компоненте, хранящихся в базе знаний, а также правил для аналоговых систем определяет причину отказа того или иного компонента.

Фирма Sentry/Schlumberger (США) предлагает систему искусственного интеллекта под названием Smart (инструментальные средства анализа и подготовки данных для полупроводникового производства). Smart – это новый вариант системы автоматизации производства под названием "Руководитель участка испытаний". Система содержит знания, полученные от инженеров, занимающихся проблемами изготовления и испытания полупроводниковых приборов. Такие знания охватывают факты и зависимости, относящиеся к физике приборов, описания конкретных изделий, технологические свойства и характеристики, а также описания тестов и испытаний. Система Smart – часть комплекса средств автоматизации производства, который определяет весь процесс изготовления полупроводниковых приборов и управляет им. Комплекс содержит систему искусственного интеллекта под названием PIES (Parametric interpretation expert system – ЭС интерпретации результатов параметрических испытаний), которая устанавливает причины технологических нарушений, анализируя данные параметрических испытаний, т.е. значения параметров, измеряемых на технологических линиях изготовления полупроводниковых приборов. В свою очередь, система Smart использует эти результаты в сочетании с другой информацией из своей базы знаний, чтобы выработать рекомендации по устранению причин нарушения технологического процесса. Затем все подобные причины и способы их устранения вводятся в базу данных.

Усовершенствованная версия системы, которая служит для нахождения и устранения неисправностей в самих испытательных системах, представлена фирмой Teradyne. Система под названием MIND (машина для интеллектуальной диагностики) вдвое уменьшает среднее время, затрачиваемое на ремонт сложной системы тестирования СБИС. Система MIND, которая войдет в состав системного программного обеспечения тестера J937, предназначенного для контроля устройств памяти, работает в составе автоматизированного рабочего листа компании Sun Microsystems Inc. и по линиям связи соеди-

няется с тестерами СБИС фирмы Teradyne, эксплуатируемыми на производственных участках. По утверждению фирмы, ее система обеспечивает двухкратный выигрыш по времени при производстве ремонта.

В системах сочетаются средства двух видов: средства алгоритмического анализа неисправностей, предусматривающие прослеживание ошибки, начиная с выхода схемы до источника ошибки с учетом логики, и средства обработки знаний, собранных у опытных специалистов по эксплуатационному техническому обслуживанию, которые обычно быстро определяют, какую конкретную отказавшую схемную плату следует заменить. В каждом тестере производственного участка имеется программа под названием Check, которая взаимодействует с системой MIND, осуществляя локализацию системной ошибки.

На той же фирме Meradyne организован центр сбора данных, где сосредотачиваются сведения, поступающие от производственных тестеров, каждый из которых имеет свою собственную систему MIND. Последняя содержит "аппаратный журнал", который периодически передается в базу данных аппаратных журналов фирмы Meradyne (рис. 31). Анализируя данные, поступающие с производственных участков, фирма может обновлять базы правил систем MIND тестеров, внося в них новую информацию. Такой метод фактически основан на моделировании процесса накопления опыта человеком.

Другая система (под названием Arnold) производит автоматический выбор конфигурации тестера при переходе на но-

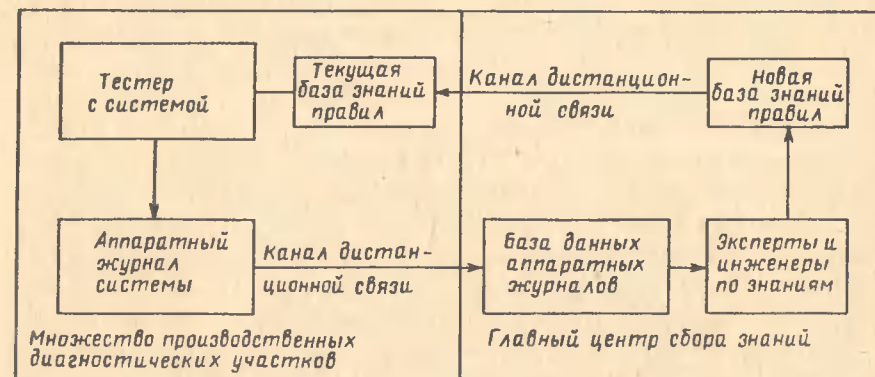


Рис. 31. Центр сбора данных от систем MIND тестеров СБИС, расположенных на производственных участках

вые СБИС-компоненты. Система Arnold, разработанная фирмой Mektronix Inc. (США), сама не генерирует тест-векторы, а использует тест-векторы и параметрические данные, вводимые инженером-испытателем. Она имеет данные об аппаратуре своего тестера и наилучшем способе испытания СБИС-компонентов. Инженер-испытатель описывает расположение и назначение выводов корпуса микросхемы в базе знаний по испытываемым приборам, остальное реализует система Arnold; она, в частности, определяет какие элементы устройства параметрических измерений к каким выводам корпуса нужно подключить, и какую выдержку времени надо дать на срабатывание релейных переключателей, прежде чем запустить тест. Фактически система Arnold выполняет все действия по коммутации и выбору конфигурации тестера, которые раньше инженеру-испытателю приходилось делать самому.

В работе [41] описываются функциональное назначение, области применения и основные характеристики интеллектуального логгера Quartel, служащего для анализа и регистрации потока данных, поступающих от цифровых измерительных средств. Его принцип действия основан на сравнении текущих данных с ранее запомненными. Скорость анализа меняется от 1,5 раза в секунду до одного раза в течение 100 сут. Наличие в составе логгера персональной ЭВМ дает возможность производить сложный анализ поступающих сигналов, автоматически изменять периодичность проведения анализа, уменьшать чувствительность к шумам и др. Этот прибор предназначен для анализа речевых сигналов, результатов измерений температуры и т.п. Персональная ЭВМ, кроме того, обеспечивает легкую сопрягаемость логгера с другими элементами информационной техники, что необходимо для модульного построения систем.

Фирмой McDonnell Douglas Aircraft (США) были проведены летные испытания ЭС AIMES (Avionics Integrated Maintenance Expert System) технического обслуживания бортового радиоэлектронного оборудования самолета F/A-18. В полете ЭС анализировала информацию о функционировании всех узлов и блоков бортового радиоэлектронного оборудования и локализовала возникающие неисправности на уровне платы. Система объясняла свои заключения; она существенно облегчала проведение ремонтно-профилактических работ в условиях аэродрома, так как исключала необходимость контроля бортовой аппаратуры на Земле. Полетная информация, хранящаяся в кас-

сетном запоминающем устройстве, обрабатывалась на Земле для определения вида ремонтных работ. Аппаратные средства AMES состоят из однокристалльного процессора 80186, работающего с тактовой частотой 6 МГц, ОЗУ с произвольной выборкой емкостью 512 Кбайт, ППЗУ емкостью 256 Кбайт и контроллера шины данных.

Фирма McDonnell Aircraft (MCAIR) (США) реализует программу INS-FAAMS (inertial navigation system-fault analysis), по которой разрабатывается ЭС для анализа и устранения отказов в бортовой инерциальной навигационной системе. База знаний этой системы содержит сведения, полученные от специалистов по контролю и диагностике неисправностей навигационного оборудования.

Фирма Westhouse ведет исследования по применению средств искусственного интеллекта для обслуживания сложной электронной аппаратуры. Предполагается, что ЭС будет обладать возможностью взаимодействия с оператором на английском языке.

Применение средств искусственного интеллекта для повышения возможности автоматизации контрольно-испытательного оборудования рассматривается фирмой Grumman (США) в совместных исследованиях с Римским научно-исследовательским центром по программе создания "разумных" систем встроенного контроля, начатой в 1984 г. Контракт предусматривал разработку диагностической ЭС Smart BIT для обнаружения и локализации отказов аппаратуры, упрощения процесса поиска и снижения частоты возникновения неисправностей контрольно-измерительного оборудования, которые приводят к появлению сигналов ложной тревоги или отказам аппаратуры. В декабре 1985 г. фирма Grumman заключила контракт с фирмой Honeywell (США) для создания ЭС для диагностики бортового радиоэлектронного оборудования самолета F-16.

Фирма Ford (США) разрабатывает средства искусственного интеллекта для проведения контроля и ремонта сложного оборудования на борту космического аппарата. Диагностическая система Star-Plan во время сеанса связи со спутником контролирует всю поступающую телеметрическую информацию. Появление ошибочной информации может быть вызвано сбоями бортовой спутниковой аппаратуры, неисправностью контрольно-измерительного оборудования либо неисправной передачей последовательности команд. В этом случае ЭС сопоставляет параметры с заданными или полученными в предварительных экспериментах и вырабатывает гипотезы оценки

состояния подсистем. Затем делается попытка подтвердить гипотезы, после чего ЭС сообщает оператору о наличии неисправности и дает рекомендации, как изменить последовательность команд или перестроить соответствующую подсистему с тем, чтобы устранить причину отказа.

Средства ЭС Star-Plan предусматривают моделирование процесса контроля и оценки в реальном масштабе времени состояния подсистем, используя программную модель замкнутого контура управления борт - Земля. Генератор сигналов модели имитирует поступление телеметрической информации о состоянии подсистем спутника. Если значения параметров превышают допустимые пределы, ЭС анализирует возникшие ситуации и формирует гипотезы о причине неполадок. Команды коррекции передаются оператору, который может получить от ЭС ответы на вопрос: "почему и как подтверждается гипотеза?" В процессе создания ЭС разработана процедура для автоматизации процесса пополнения базы знаний.

ВЫВОДЫ

* *
*

Проведенный анализ показывает, что:

1. Внесение элементов искусственного интеллекта возможно и целесообразно практически для всех видов средств измерений, начиная от ПИП и кончая автоматизированными измерительными системами, а также для средств контроля и испытаний.
2. Интеллектуализация средств измерений и контроля способствует улучшению метрологических и эксплуатационных характеристик, расширению функциональных возможностей, однако основное преимущество применения интеллектуальных средств заключается в повышении производительности труда, поскольку измерительный эксперимент всегда связан не только с выполнением физических усилий, но, главным образом, с проведением вычислений, интерпретацией результатов измерений и принятием решений на основе получаемой измерительной информации.
3. Центральным и определяющим моментом для интеллектуальной измерительной техники является наличие в ее составе необходимых вычислительных средств и памяти, хранящей

программу работы, базу данных, необходимых для реализации функций искусственного интеллекта. Последние становятся реальностью лишь при наличии соответствующего программного обеспечения, поэтому интеллектуальная измерительная техника представляет собой симбиоз измерительных, вычислительных и программных средств.

4. Указанные особенности интеллектуальной измерительной техники вызывают определенные проблемы при ее создании, разработке и эксплуатации. Эти проблемы связаны с рациональным выбором средств, необходимых для построения интеллектуальной измерительной техники, определением методов измерения, технических и программных решений, применения, метрологического обслуживания и поверки.

5. Особой проблемой является создание специальных вычислительных средств, ориентированных на решение интеллектуальных задач, - ассоциативных вычислительных устройств.

Решение перечисленных проблем возможно лишь при взаимодействии специалистов по приборостроению, вычислительной технике и прогнозированию, а также при качественном изменении в подготовке метрологов, расширении круга знаний, которые они получают при облучении или переподготовке.

прогресс и развитие науки

1. Бобровников Г.Н. Метрологическое обеспечение производства – материальная основа стандартизации и управления качеством продукции: Учебное пособие. – М.: АНХ СССР, 1982. – 48 с.
2. Тарбеев Ю.В. Проблемы метрологического обеспечения в робототехнике и гибких производственных системах // Измерительная техника. – 1985. – № 5. – С. 58–59.
3. Birke M. Methoden für Rechner – unterstütztes Messen // Messen, prüfen, automatisieren. – 1987. – № 3. – P. 128–133. См. также РЖ, 1987, 9.32.54*)
4. Kovalerov G.I., Solopchenko G.N. Metrological problems of intelligent measurement // 5th Int. IMEKO Symp. Intell. Meas., Jena, June 10–14, 1986, № 1, vol. 1. [Budapest]–S.a. – P. 46–47. См. также РЖ, 1987, 10.32.25.
5. Kovalerov G.I., Solopchenko G.N. Urgent metrological problems of intelligent measurement // 5th Int. IMEKO Symp. Intell. Meas., Jena, June 10–14, 1986, Suppl. [Budapest]–S.a. – P. 4–9. См. также РЖ, 1987, 10.32.24.
6. Von Biesen L., Bakx P. Expert systems for intelligent measurement // 5th Int. IMEKO Symp. Intell. Meas., Jena, June 10–14, 1986, № 1, vol. 2, [Budapest]–S.a. – P. 297–300. См. также РЖ, 1987, 10.32.26.
7. Gaszczak Jaroslaw, Domańska Anna. Trendy rozwojowe w tworzeniu modeli matematycznych obserwatora do alow pomiarow inteligentnych // Pr. nauk Inst. metrol. elek. prroct. – 1986. – № 28. – P. 14–17. См. также РЖ, 1987, 7.32.14.
8. Мелик–Шахназаров А.М. и др. Измерительные приборы со встроенными микропроцессорами / А.М. Мелик–Шахназаров, М.Г. Маркатун, В.А. Дмитриев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с., ил.
9. Мирский Г.Я. Микропроцессоры в измерительных приборах. – М.: Радио и связь, 1984. – 160 с., ил.
10. Favennec I.M. Smart sensors in industry. // J. Phys. E. Sci. Instrum. – 1987. – 20, № 9. – P. 1087–1090. См. также РЖ, 1988, 2.35.2.
11. Mordt Helge. Intelligent Instrumentation // Autom. Safety Shipp. and Offshore Petrof. Oper.: IFIP/IFAC Int. Conf., Trondheim, 24–28 June, 1985. – Amsterdam e.a. – 1986. P. 281–287. См. также РЖ, 1987, 12.32.4.
12. Марс Элексион. Внедрение технологии интегральных схем в производство датчиков // Электроника. – 1986. – 59, № 11. – С. 49–56.
13. Van Zanten M. Meßtechnik und Sensoren in der flexiblen Automatisierung // Feinwerktechnik und Meßtechnik. – 1986. – № 8. – S. 3–4.
14. Schilz I.M., Weiß W.D. Intelligenz in Meßwandler // Elektronik. – 1985. – 34, № 18. – S. 69–73. См. также ЭИ, 1987, № 14, 81.
15. Fuchs H., Zecha M. Stand und Entwicklung von Sensoren für Industrieroboter // Mess. – Steueru – Regelu. – 1985. – 28, № 11. – P. 482–485. См. также ЭИ, 1986, № 40, 246.
16. Wochni Eugen–Georg. Problems of real-time intelligent measurement // 5th Int. IMEKO Symp. Intell. Meas., Jena, June 10–14, 1986, № 1, vol. 2. [Budapest]. – S.a. – P. 40–44 (См. также РЖ, 1987, 10.32.27).
17. Muche Walter. Development of appropriate measurement standards for the progress of intelligent measurement // 5th Int. IMEKO Symp. Intell. Meas., Jena, June 10–14, 1986, № 1, vol. 2 [Budapest]–S.a. – P. 301–306. См. также РЖ, 1987, 11.32.5.
18. Иванов В.М. Интеллектуальные средства измерений // Приборы и системы управления. – 1986. – № 2. – С. 21–23.
19. Уильямс Дж. Линейный 20–разрядный интегрирующий АЦП // Электроника США. – 1980. – № 24. – С. 55.
20. Сантис Т. Цифровой мультиметр автономного и системного назначения // Электроника США. – 1980. – № 24. – С. 41.
21. Персин М. Введение средств сбора данных в одноплатный компьютер // Электроника США. – 1980. – № 14. – С. 65.
22. Фредриксен Т., Сесил Дж. ЦАПы, сопрягающиеся с микропроцессорами // Электроника США. – 1980. – № 14. – С. 50.
23. Bremmann H.–B., Rabe J. Anwendung adaptiver Analog–Digital –Umsetzer in der Meßtechnik // Nachrichtentechn. – Electron. – 1987. – 37, № 1. – P. 10–12. См. также ЭИ, 1987, № 38, 221.

*) РЖ означает Реферативный журнал ВИНТИ, выпуск "Метрология и измерительная техника"; далее следуют год издания, номер и индекс выпуска, а также номер реферата.

**) ЭИ означает Экспресс–информацию ВИНТИ, серия "Контрольно–измерительная техника"; далее следуют год издания, номер серии и номер реферата.

24. Stanislaw Zmudzyn, Adam J., Fiek, Jacek Cichochi. Use of a-priori information for intelligent testing of multiresonance elements // 5th Int. IMEKO Symp. Intell. Meas., Jena, June 10-14, 1986, № 1, vol. 1. [Budapest]- S.a.- P. 111-114.
25. Tsvetkov E.I. Error characteristics of intelligent measuring instrument // 5th Int. IMEKO Symp. Intell. Meas., Jena, June 10-14, 1986, Suppl. [Budapest].- S.a., - P. 21-25. См. также РЖ, 1987, 10.32.29.
26. Jones' Instrument Technology. Vol. 4. Instrumentation Systems / Edit. by B.E. Naltingk, Butterwarths, 1987.- 168 pp.
27. Мирский Г.Я. Электронные измерения.- 4-е изд., перераб. и доп.- М.: Радио и связь, 1986.- 440 с., ил.
28. Manfred Stecher. Intelligente Meßempfänger in Stormeßsystemen // Neues von Rohde und Schwarz Special, № 1.- 1986.- S. 54-57.
29. Miltze Klans. Impact of precision mechanics and optics on intelligent measurement // 5th Int. IMEKO Symp. Intell. Meas., Jena, June 10-14, 1986, № 1, vol. 1. [Budapest]-S.a.- P. 26-31.
30. Baga B., Dobrowiecki T., Papp Z., Pataki B. Intelligent measurement and EEG recording // 5th Int. Symp. IMEKO Intell. Meas., Jena, June 10-14, 1986, № 1, vol. 1. [Budapest].- S.a.- P. 62-67. См. также РЖ, 1987, 10.32.46.
31. Harper Alice M., Liebman Shirley A. Intelligent Instrumentation // J. Res. of the Nat. Bureau of Standards. - 1985.- 90, № 6.- P. 454-464. См. также ЭИ, 1987, № 8, 45.
32. Neidig M. Intelligence Grenzwertverfahren // Elektronik. - 1987.- 36, № 2.- P. 87-88. См. также ЭИ, 1987, № 45. 271.
33. Науман Г., Майлинг В., Шербина А. Стандартные интерфейсы для измерительной техники: Пер. с нем.- М.: Мир. 1982.- 302 с., ил.
34. Wardeszko Tomasz, Kosicka Malgorzata, Piatkowski Adam, Mirkowski Jacek. Intelligent measurement in CAMAC system using ZX Spectrum // 5th Int. IMEKO Symp. Intell. Meas., Jena, June 10-14, 1986, № 1, vol. 1. [Budapest] - S.a., P. 138-141. См. также РЖ, 1987, 11.32.58.
35. Winiecki Wieszaw, Sokoloweki Piotr. Software-based interface for intelligent measurement with personal computer // 5th Int. IMEKO Symp. Intell. Meas. Jena, June 10-14, 1986, № 1, vol. 2. [Budapest]-S.a.- P. 103-106.
36. Trenóive Jaromir. Intelligent test stands for multifunktional use // 5th Int. IMEKO Symp. Intell. Meas., Jena, June 10-14, 1986, № 1, vol. 1. [Budapest]-S.a.- P. 73-80. См. также РЖ, 1987, 10.32.47.
37. Warnecke H.-J., Melchier K.W. Impact of information technology an measurement and quality assurance // 5th Int. IMEKO Symp. Intell. Meas., Jena, June 10-14, 1986, № 1, vol. 1. [Budapest]- S.a.- P. 32-37.
38. Джерри Лаймен. Повышение надежности электронных систем военного назначения // Электроника.- 1985.- № 6.- С. 40-50.
39. Handelman David A., Stengel Robert F. Combining quantitative and qualitative reasoning in aircraft failure diagnosis // AIAA Guid, Nav. and Contr. Conf., 1985, Snowmass, Col., Collect. Techn. Pap. - New York, N.Y.- S.a. - P. 366-375. См. также ЭИ "Авиастроение", 1986, № 36, реф. 210.
40. Джон Маклеод. Активное внедрение методов и средств искусственного интеллекта в автоматизированное испытательное оборудование // Электроника.- 1986.- № 18.- С. 51-54.
41. Intelligenter Datenlogger // Kontrolle.- 1986.- № 3-4.- S. 77-78. См. также РЖ, 1986, 9.32.31.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА
ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦ ОСНОВНЫХ
ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Корнеева Т.В.

ВВЕДЕНИЕ

Достижения в области измерительной техники, технологии, микроэлектроники, квантовых приборов, и, соответственно, контроля изделий микроэлектроники, квантовой техники и др., а также необходимость проведения измерений с высокой точностью во многих областях науки и техники, внедрение средств измерений высокой точности непосредственно в производство и даже в технологические линии определяют и задачи метрологии.

Метрология всегда развивается в направлении обеспечения измерений предельных значений различных физических величин с наименьшей возможной погрешностью. Время квантовых систем еще не наступило, но в предверии предстоящих технических преобразований следует особое внимание уделять вопросам, связанным с измерениями физических величин в так называемой "предельной" и сверхтонкой технологии, а также с измерениями, разъясняющими динамику различных физических процессов. Согласно прогнозам японских специалистов на конец XX-го и начало XXI-го века [1] измерительная техника на базе микроэлектроники и квантовой техники будет развиваться в направлении разработки новых материалов, освоения биотехнологии и повышения уровня информативности.

Предполагается, что в 1995-2000 гг. будут созданы ЭВМ на основе логических элементов Джозефсона, а также интегральные схемы, работающие при температуре 300°С [1]; будут освоены оптоэлектронные быстродействующие элементы (с быстродействием 10^{-12} с), элементы памяти с большой плотностью записи и др. При этом основной проблемой метрологии с учетом достижений науки и техники и перспектив их развития остается обеспечение единства измерений, включая совершенствование системы обеспечения стабильности и воспроизводимости единиц физических величин.

Важными факторами, способствующими совершенствованию такой системы, являются использование средств измерений, имеющих погрешность на уровне погрешности эталонов единиц физических величин, а также необходимость в гибкой оперативной структуре организации воспроизведения и передачи размера единиц физических величин, реализуемой в различных условиях. Такая система обеспечения единства измерений может быть создана при частично децентрализованном воспроизведении единиц физических величин, которое осуществимо на основе широкого использования согласованных значений фундаментальных физических постоянных и стабильных квантовых эффектов.

Кроме того, развитие эталонов физических единиц на основе физических постоянных и квантовых эффектов в известной степени определяется и использованием современной квантовой теории при разработке измерительных приборов высокой точности, в частности, на основе микроэлектроники, а также при оценке точности и чувствительности измерительных приборов.

Следует также отметить, что важными предпосылками, способствующими разработке децентрализованной системы воспроизведения физических величин, являются достижения в области автоматизации и вычислительной техники, внедряемые как в процедуры измерений, так и в процессы обработки и интерпретации результатов измерений.

Исторически сложившаяся структура системы обеспечения единства измерений предусматривает назначение центральных метрологических лабораторий в качестве хранителей эталонов, которые первоначально были, как правило, "вещественной" мерой, воспроизводимой в определенных условиях. Однако в последнее время наблюдается тенденция замены "вещественных" эталонов абсолютными эталонами, воспроизводимыми с использованием фундаментальных физических постоянных посредством четко определенного эксперимента, что будет способствовать разработке децентрализованной системы воспроизведения и передачи размера единиц физических величин. Благодаря повышающейся надежности автоматизированных средств измерений появляется реальная возможность практического осуществления гибкой децентрализованной структуры организации воспроизведения единиц физических величин. Такая структура помимо упрощения системы обеспечения единства измерений в национальных и международных масштабах характеризуется высокой экономической эффективностью: исключается необходимость транспортировки средств измерений

или эталонов к месту проведения аттестации, а также появляется возможность поиска экономически выгодных для данной страны новых методов и средств воспроизведения единиц. В этом отношении представляет несомненный интерес разработка в NBS США так называемого распределенного эталона вольта [2], представляющего собой групповой эталон постоянного напряжения 10 В, распределенный между метрологическими лабораториями.

Именно такой ориентацией разработки систем обеспечения единства измерений в различных странах можно объяснить большое количество научных разработок в области так называемой фундаментальной метрологии – науке о фундаментальных процессах в физике, которые появились в течение 1983–1987 гг.

Цель настоящей работы – провести анализ методов и средств воспроизведения единиц основных физических величин, разработанных в национальных метрологических организациях промышленно развитых стран в свете современных требований науки и производства и выявить тенденции их развития.

Ввиду разнообразия единиц физических величин и невозможности в рамках этой работы проанализировать существующие методы и средства их воспроизведения, были рассмотрены методы и средства воспроизведения единиц только основных физических величин Международной системы единиц (СИ).

1. ДЛИНА

Определение и воспроизведение единицы длины метра, начиная с самого первого определения, основывалось на использовании естественных явлений и величин.

1.1. Метод, основанный на использовании длины земного (парижского) меридиана

Согласно этому методу определения "метр – есть $1 \cdot 10^{-7}$ часть 1/4 длины земного меридиана (на широте г. Парижа)". Это первое определение метра было дано при введении метрической системы мер во Франции в 1793 г. В 1799 г. на основе измерений части дуги меридиана был изготовлен эталон метра в виде платиновой концевой меры, переданной на хранение в Национальный Архив Франции и получивший наз-

вание "метр Архива". Метр Архива представляет собой платиновую линейку шириной 25 мм, толщиной 4 мм с расстоянием между концами 1 м [3, 4].

Впоследствии в 1927 г. VII Генеральной конференцией по мерам и весам было утверждено следующее определение метра, действовавшее до 1960 г.: "Единица длины – метр – определяется расстоянием при температуре 0°С между осями двух средних штрихов, нанесенных на платино-иридиевом бруске, хранящемся в Международном бюро мер и весов и принятом в качестве прототипа метра 1-ой Генеральной конференцией по мерам и весам, при условии, что эта линейка находится при нормальном атмосферном давлении и поддерживается двумя роликами диаметром не менее 1 см, расположенными симметрично в одной горизонтальной плоскости на расстоянии 571 мм один от другого".

Погрешность воспроизведения метра составляла 10^{-7} м.

1.2. Метод, основанный на использовании стабильности частоты атомных переходов

В 1960 г. XI-ой Генеральной конференцией по мерам и весам принято в качестве эталона единицы длины метр, выраженный в длинах световых волн оранжевой линии спектра криптона-86, соответствующей переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ этого атома.

Погрешность воспроизведения метра составляла 10^{-9} м. Воспроизведение метра в национальных метрологических организациях, включая ВНИИМ им. Д.М. Менделеева, осуществлялось с использованием средств оптической интерферометрии.

1.3. Метод, основанный на использовании уточненного значения скорости света в вакууме

В октябре 1983 г. XVII Генеральная конференция по мерам и весам приняла новое определение единицы длины: "Метр есть длина пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени, равный $1/299792458$ с".

Одновременно в различных национальных метрологических организациях стали интенсивно проводиться исследования по уточнению физической постоянной – скорости света в вакууме, а также по уточнению результатов измерений частоты излучения в оптическом диапазоне [5,6,7]. Например, в

NPLM (Япония) [5] была разработана система для измерения длины волны и частоты CO_2 -лазера с целью уточнения скорости света и создания эталона длины и времени. Длина волны излучения CO_2 -лазера ($\sim 9,3$ мкм) измерялась с помощью смесителя на нелинейном кристалле Ag_3AsS_3 , на который направляется излучение длин волн 0,679 и 0,633 мкм. Исходя из условия независимости скорости света в вакууме от длины волны следует: $\lambda_{9,3}^{-1} = \lambda_{0,633}^{-1} - \lambda_{0,679}^{-1}$. Длина волны $\lambda_{0,679}$ измерялась с помощью интерферометра Фабри-Перо с He-Ne лазером длиной волны 0,633 мкм, стабилизированного по 127I_2 . Излучение длиной волны 0,679 мкм и мощностью 10 нВт вводится в интерферометр вместе с сигналом He-Ne лазера. При этом с помощью соответствующих оптических средств обеспечивалось подавление основного излучения длиной волны 9,633 мкм. Благодаря одновременному сканированию оптической щели интерферометра для обоих излучений обеспечивалось исключение систематических погрешностей, вызываемых тепловым дрейфом и др. причинами. Смешанный поток излучения лазеров детектировался с помощью фотоумножителя. В результате проведенных измерений было получено $\lambda_{0,679} = 0,6771298744$ мкм со средней квадратической погрешностью $1 \cdot 10^{-9}$, $\lambda_{9,3} = 9,31724631$ мкм со средней квадратической погрешностью $1,4 \cdot 10^{-8}$ и неисключенной систематической погрешностью $3 \cdot 10^{-9}$. Были исследованы также возможности повышения мощности выходного сигнала лазера в далекой инфракрасной области спектра с целью связать излучение CO_2 -лазера с цезиевым эталоном частоты.

В связи с новым определением единицы длины весьма важной становится проблема повышения точности частотных измерений в оптическом диапазоне. Устройства для осуществления таких измерений основаны на принципе нелинейного преобразования и смешения гармонических сигналов. Преобразование сигнала позволяет создать гармонику высокого порядка. Смещение близких по частоте сигналов дает возможность выделить их биения, т.е. сформировать сигнал разностной частоты. При этом возможно измерение большей частоты в течение интервала времени, равного заданному числу периодов меньшей частоты, без смешения сигналов.

Распространение методов измерений частоты на оптический диапазон стало возможным благодаря созданию лазеров и точечно-контактных диодов типа металл-окисел-металл (МОМ). Благодаря быстрдействию, обусловленному туннельным эффектом, малой площади контактной зоны (10^{-9} мм²) и малой

емкости диод можно использовать при частотах до 200 ТГц (длина волны 1,5 мкм).

В диапазоне от 30 ТГц до частот видимого и УФ-излучений генерирование гармоник и смешение сигналов осуществляются с помощью нелинейных оптических кристаллов. Непосредственное сравнение сверхвысоких частот с частотами оптического диапазона, включая диапазон инфракрасного излучения, довольно трудно реализуемо, поскольку даже самые малые (на уровне 10^{-6}) колебания частоты в диапазоне 100 ТГц перекрывают частотный интервал 100 МГц, сравнимый с частотой биений. Сличение этих частот с помощью так называемой цепи преобразований основано на использовании лазеров на аммиаке, водяных парах, CO_2 , метане, гелии и неоне (важнейшими в цепи преобразований являются He-Ne лазер, стабилизированный по иоду, а также лазер на CO_2).

Устройства, предназначенные для измерений частоты оптических излучений, позволяют в принципе осуществить фазовую подстройку лазерных излучений по сигналу цезиевого эталона частоты. Для этого необходимо либо создать полную систему фазовой автоподстройки, либо измерять частоты биений сигналов промежуточных элементов частотной цепи. В любом случае требуются измерения стабильных опорных частот в диапазонах длин волн 0,576; 0,612; 0,633; 0,656 мкм. В оптическом диапазоне опорные точки представляют собой хорошо воспроизводимые линии поглощения или лазерные излучения, образующие частотную цепь. Другие линии и опорные точки получают с помощью цепей преобразований — измерений: частоты до 200 ТГц измеряют с помощью МОМ-диодов, разностные частоты до нескольких десятков гигагерц — непосредственно по выходному сигналу диода, частоты до 100 ТГц — с помощью клистронных генераторов, разностные частоты до 7 ТГц — с помощью двух лазеров на CO_2 , частоты до 25 ТГц — с помощью лазера на CO_2 или другого лазера [6].

Отмечается перспективность интерференционных устройств для измерения частот оптического излучения, а также интерполяции и экстраполяции данных относительно опорных точек.

Практическая реализация единицы длины в национальных метрологических организациях осуществляется с использованием в качестве источника первичного эталонного излучения для первичного эталона газового лазера. Например, в СССР таким источником является He-Ne лазер, стабилизированный по линии насыщенного поглощения в молекулярном иоде. Он воспроизводит периодический процесс с длиной волны излу-

ния 0,632991179 [8]. Передача размера единицы длины от первичного эталона на штриховые и концевые меры производится с использованием лазерного интерференционного комплекта. В состав аппаратного комплекса [8] для воспроизведения, хранения и передачи размера единицы длины в соответствии с новым ее определением входит также установка для измерения отношений длин волн источников излучений.

Среднее квадратическое отклонение результата для единицы длины, обеспечиваемое эталоном ВНИИМ, составляет $2 \cdot 10^{-11}$, неисключенная систематическая погрешность $1 \cdot 10^{-9}$ [8].

Благодаря новому определению единицы длины на основе использования одной из фундаментальных констант — скорости света, а также в результате успехов в области измерения скорости света, частоты в оптическом диапазоне и обеспечения их связи с цезиевым эталоном частоты появилась возможность практической реализации единого эталона длины, частоты и времени.

В СССР единый эталон времени, частоты, длины был утвержден в декабре 1985 г. Эталон состоит из двух аппаратных комплексов, размещенных в метрологических институтах ВНИИФТРИ и ВНИИМ. Комплекс, находящийся во ВНИИФТРИ, обеспечивает воспроизведение, хранение и передачу размеров единиц времени и частоты; комплекс, находящийся во ВНИИМ, обеспечивает воспроизведение, хранение и передачу размера единицы длины. Передача размера единицы времени от государственного первичного эталона времени и частоты к государственному первичному эталону длины осуществляется при помощи перевозимого He-Ne/CH₄ лазера, характеризованного относительной погрешностью воспроизведения частоты $2 \cdot 10^{-11}$. Действительное значение частоты измеряется при помощи радиооптического частотного моста в составе государственного первичного эталона времени и частоты и является исходным для измерения интерференционным методом частоты — длины волны излучения He-Ne/I₂ лазера, входящего в состав эталона длины [8].

С помощью единого эталона времени, частоты, длины воспроизводятся значения физических величин: времени в диапазоне от 10^{-9} до 10^8 с; частоты в диапазоне от 1 до 10^{14} Гц; длины в диапазоне от 0 до 1 м. Среднее квадратическое отклонение результата измерений для единиц времени и частоты не превышает $5 \cdot 10^{-14}$ (неисключенная системати-

ческая погрешность $2 \cdot 10^{-13}$), для единицы длины $2 \cdot 10^{-11}$ (и $1 \cdot 10^{-9}$).

Основные достоинства метода определения единицы длины, основанного на использовании уточненного значения скорости света в вакууме:

- повышение точности воспроизведения единицы длины;
- простота реализации и передачи единицы длины;
- обеспечение взаимосвязи единиц длины, времени и частоты; создание единого эталона длины, времени и частоты;
- возможность совершенствования системы воспроизведения единицы длины и повышения точности измерения длины благодаря внедрению единого эталона длины, времени и частоты (погрешность измерения длины может достигать той же величины, что и погрешность единицы времени, т.е. для существующего эталона $\sim 10^{-13}$);
- возможность совершенствования средств измерений высшей точности во многих областях науки и промышленности и проведение измерений и поверки приборов либо по частоте, либо по длине волны в соответствии с конкретными условиями и задачами, что является экономически эффективным.

2. МАССА

Единицей массы является килограмм. Определение и воспроизведение единицы массы возможно двумя методами.

2.1. Метод, основанный на использовании "вещественного" прототипа килограмма

При установлении метрической системы мер в качестве единицы массы была принята масса 1 дм³ чистой воды при температуре ее наибольшей плотности ($\sim 4^{\circ}\text{C}$). В этот период были проведены определения массы известного объема воды путем последовательного взвешивания в воздухе и в воде пустого бронзового цилиндра, размеры которого были предварительно определены. Изготовленный на основе этих исследований первый прототип килограмма представлял собой платиновую цилиндрическую гирю высотой 39 мм, равной его диаметру. Как и прототип метра, он был передан на хранение в Национальный Архив Франции [3]. Для того, чтобы не менять значения исходной единицы массы, Международной комиссией

по эталонам метрической системы в 1872 г. было решено за единицу массы принять массу прототипа килограмма Архива. Согласно решению 1-ой Генеральной конференции по мерам и весам в 1899 г. в качестве единицы массы был принят "килограмм" и установлен международный прототип килограмма, выполненный в виде цилиндра из платино-иридиевого сплава (90% платины, 10% иридия) диаметром и высотой по 39 мм (плотность сплава составляет $21\,500\text{ кг/м}^3$).

С помощью международного прототипа килограмма, хранящегося в Международном бюро мер и весов (BIPM, Франция), обеспечивается единство измерений массы путем передачи значения массы международного прототипа с требуемой точностью национальным прототипам килограмма, а также эталонным, образцовым и рабочим мерам в области измерения массы. К настоящему времени изготовлено более 60 национальных прототипов килограмма, которые хранятся в метрологических организациях различных стран мира. Например, в состав первичного эталона килограмма СССР входит копия международного прототипа килограмма – платино-иридиевый прототип № 12 и эталонные весы. Национальные прототипы массы, как правило, выполнены в виде платино-иридиевой гири, а первичные эталоны массы могут быть выполнены из других материалов, например, первичные эталоны массы ФРГ изготовлены в виде гири из платино-иридиевого сплава и специальной нержавеющей стали (плотность стали 8000 кг/м^3). Поэтому при сличении таких эталонов с платино-иридиевым национальным прототипом, которое выполняется на образцовых равноплечих весах высшей точности, необходимо в результаты измерений вводить относительно большую поправку, учитывающую различие действия аэростатических выталкивающих сил на эти эталоны и на национальный прототип.

Эталоны масс должны отличаться большой долговременной стабильностью, а к материалам, из которых изготавливаются эталонные гири, предъявляются следующие требования: высокая коррозионная стойкость, отсутствие ферромагнитных свойств, отсутствие возможности накопления электрических зарядов, минимальные газо- и водопоглощение; возможность поддержания требуемого качества поверхности. Согласно стандарту ISO-R 468 допустимая шероховатость поверхности эталонных гири должна соответствовать условию, чтобы параметр шероховатости $R_a < 0,1\text{ мкм}$. Согласно проведенным в BIPM исследованиям было установлено, что после каждого этапа чистки поверхности национального прототипа его масса

уменьшается на 2–5 мкг [9]. Это уменьшение массы национальных прототипов должно учитываться путем внесения соответствующих поправок. Кроме того, при изменении климатических условий хранения и эксплуатации эталонных гири происходит поглощение влаги их поверхностями, приводящее к увеличению массы. Например, при увеличении относительной влажности окружающей атмосферы с 40 до 80% масса эталонной гири с номинальной массой 1 кг возрастает на $\sim 20\text{ мкг}$ (при общей площади поверхности гири 134 см^2) [9].

Размер единицы национальных эталонов килограмма определяется методом прямого или косвенного сличения с международным прототипом килограмма [9, 10]. Международные сличения эталонов массы, а также сличения прототипов килограмма и эталонов массы осуществляются с помощью образцовых метрологических весов. В качестве метрологических весов в ряде стран (в том числе и в СССР) используются весы Рупрехта с равноплечим коромыслом, с тремя призмными опорами и двумя грузоприемными чашками. Для наиболее типичного конструктивного варианта таких весов среднее квадратическое отклонение случайной погрешности составляет 15 мкг при верхнем пределе измерения 1 кг. В течение последних 20 лет в эти метрологические весы были введены важные усовершенствования: например, в течение процесса измерения исключалось разделение призмных опор и грузоприемных чашек, колебания коромысла фиксировались с помощью фотоэлектрического измерительного преобразователя, обеспечивалась возможность использования при нагружении метрологических весов до четырех эталонных гири (при использовании метода замещения), обеспечивалось дистанционное управление весами.

Благодаря таким усовершенствованиям разработаны метрологические весы со средним квадратическим отклонением погрешности $\sim 1\text{ мкг}$. В частности, к таким приборам относятся метрологические весы типа NBS2 с верхним пределом измерения 1 кг, созданные в NBS США [8, 9]. Эти весы содержат неравноплечее коромысло, две призматические опоры и одну грузоприемную чашку. Установка и снятие гири производится автоматически. В весах NBS 2 предусмотрена возможность контроля их чувствительности перед проведением измерений, что осуществляется путем добавления к основной взвешиваемой гире небольшого груза массой 2 мг. Чувствительность весов определяется по соответствующему изменению показаний оптического индикатора. Наиболее вероятной причиной

долговременного изменения чувствительности весов является постепенное изменение отношения плеч коромысла вследствие несовершенства механических свойств используемых опор, а также влияние температуры на изменение длины коромысла.

В работе [9] подробно проанализированы конструктивные особенности метрологических весов NBS 2, вопросы градуировки этих весов, а также рассмотрены процедуры сличения эталонных гирь на весах NBS 2 с анализом погрешностей измерений и введением соответствующих поправок в результаты сличений. Показано, что наибольшее влияние на результаты сличений оказывает плотность окружающей воздушной среды, для оценки которой необходимо проводить измерения температуры, давления и влажности воздуха с наименьшими возможными погрешностями. Кроме того, согласно рекомендациям Международного комитета мер и весов (МКМВ) для точного определения плотности окружающей воздушной среды необходимо дополнительно измерять содержание CO_2 в воздухе и вносить соответствующую поправку в окончательный результат. В настоящее время в NBS США создана контрольно-измерительная система для определения влияющих величин.

В последнее время все более широкое распространение получают весы высокой точности с электромагнитным уравновешиванием. Для весов этого типа с верхним пределом измерения 1 кг достигнуто минимальное среднее квадратическое отклонение погрешности 10 мкг.

В Национальной физической лаборатории Великобритании и в МБМВ созданы коромысловые метрологические весы, в которых призмённые опоры заменены подвесками на упругих лентах. Применение упругой подвески коромысла позволяет устранить один из основных недостатков метрологических весов с призмёнными опорами, а именно, изменение эффективных длин плеч коромысла вследствие микроперемещений призм относительно подушек в процессе эксплуатации метрологических весов.

В РТВ ФРГ на основе гидростатических весов создан компаратор массы высокой точности для сличения гирь массами до 1 кг, пороговая чувствительность которого 10 мкг. Вес гири, поверяемой на этом компараторе, уравновешивается выталкивающей силой кольцевого поплавка, вертикальные перемещения которого измеряются с помощью оптического интерферометра.

Вопросам оценки погрешностей метрологических весов, а также погрешности сличений эталонных гирь уделялось и уде-

ляется большое внимание во всех метрологических национальных и международных организациях [9,10,11]. В работе [9] на примере оценки результатов определения массы эталонной гири 1 кг из нержавеющей стали плотностью 8000 кг/м^3 рассмотрены основные составляющие погрешности. При сличении платино-иридиевой и стальной эталонных гирь массами по 1 кг поправка на влияние разности аэростатических сил, определяемая разностью их объемов, составляет $\sim 100 \text{ мкг}$. Плотность атмосферного воздуха в соответствии с международными рекомендациями определяется с относительной погрешностью $2 \cdot 10^{-4}$ (в ряде работ показана возможность определения плотности воздуха с погрешностью 10^{-5} с учетом его состава, влажности и степени загрязненности микрочастицами). Соответственно, погрешность от неточности поправки на влияние разности аэростатических сил двух сличаемых гирь ~ 10 и 2 мкг. Суммарная погрешность оценки массы эталонной гири из нержавеющей стали составляет $\approx 14 \text{ мкг}$ и может достигать в будущем $\sim 4 \text{ мкг}$ [9].

Наименьшая относительная погрешность измерения, достигнутая для метрологических весов NBS 2, составляет $1 \cdot 10^{-9}$ (при абсолютной погрешности 1 мкг для верхнего предела измерения 1 кг). Наименьший порог чувствительности, составляющий $\sim 20 \text{ пг}$, достигнут для весов с чувствительным элементом в виде колеблющегося пьезокварцевого резонатора, частота колебаний которого зависит от значения массы гири. Верхний предел измерения и относительная погрешность этих весов составляют 2 мг и $\sim 1 \cdot 10^{-8}$ [9].

Анализ методов и средств воспроизведения, хранения и передачи единицы массы, основанных на использовании прототипа килограмма, выявил следующие особенности:

- нестабильность метрологических характеристик и технических параметров средств измерений, включая метрологические весы и гири, обусловленная условиями хранения и другими факторами;
- влияние различий материалов эталонных гирь на результаты международных сличений;
- необходимость расчета и введения поправок в результате измерений.

2.2. Методы, основанные на использовании фундаментальных физических постоянных

1) Метод, основанный на использовании измерений постоянной решетки, атомной массы и плотности кристалла кремния и уточнения постоянной Авогадро.

Согласно этому методу единица массы килограмм может быть определена как суммарная масса атомов углерода, общее число которых (N_A) кмоль⁻¹/12, где N_A – постоянная Авогадро. В настоящее время значение постоянной Авогадро определяется с погрешностью $1 \cdot 10^{-6}$ на основе результатов измерения плотности монокристаллического кремния. В связи с этим естественный эталон массы на основе использования постоянной Авогадро может быть реализован с относительной погрешностью $1 \cdot 10^{-6}$. Для того, чтобы получить эталон массы килограмм с погрешностью $\sim 2 \cdot 10^{-8}$ необходимо снизить погрешность определения значения постоянной Авогадро на два порядка, что в настоящее время практически трудно реализуемо.

2) Метод, основанный на использовании эффекта Джозефсона

Этот метод воспроизведения единицы массы предусматривает выражение единицы массы килограмма с помощью электростатической силы, развиваемой в электростатических весах [9]. При этом три основные физические величины – метр, секунда, килограмм – связываются с единицей электрического напряжения – вольт. На основе эффекта Джозефсона единица массы в этом случае (как и единица напряжения – вольт) может быть выражена с помощью определенного числа квантовых переходов. Однако такие электростатические весы имеют погрешность $\sim 2 \cdot 10^{-6}$, т.е. превышающую на два порядка погрешность, необходимую для реализации эталона.

Другой недостаток данного метода определения и воспроизведения единицы массы заключается в необходимости учета ускорения свободного падения. Структурная схема реализации данного метода определения и воспроизведения единицы массы с помощью фундаментальных физических постоянных показана на рис. 1, где c_0 – скорость света; μ_0 , ϵ_0 – магнитная и диэлектрическая проницаемости вакуума; h/e – постоянная Планка, отнесенная к заряду электрона; m – метр,

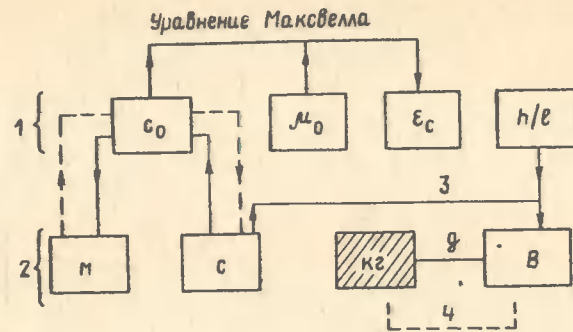


Рис. 1

определяемый с погрешностью 10^{-10} ; s – секунда, определяемая с погрешностью 10^{-13} ; kg – килограмм; V – вольт, определяемый с погрешностью 10^{-8} ; 1 – фундаментальные физические постоянные; 2 – единицы физических величин СИ; 3 – связь, основанная на использовании эффекта Джозефсона; 4 – электростатические весы, имеющие погрешность $\sim 2 \cdot 10^{-6}$; g – ускорение свободного падения.

Анализ методов определения и воспроизведения единицы массы килограмма, основанных на использовании фундаментальных физических постоянных, показывает, что в ближайшем будущем они не могут быть практически реализованы.

3. ВРЕМЯ

Определение единицы времени – секунды основывалось всегда на использовании естественных явлений.

3.1. Метод, основанный на использовании вращения Земли вокруг своей оси

Согласно этому методу секунда определялась как $1/86400$ часть средних солнечных суток. Однако ввиду нерегулярных колебаний вращения Земли вокруг своей оси средние солнечные сутки определялись только лишь с погрешностью 10^{-7} . Рассмотрение вопроса о необходимости разработки нового естественного эталона времени, обеспечивающего большую точность воспроизведения единицы времени – секунды, проведенное на Генеральных ассамблеях Международного

астрономического союза и Генеральных конференциях по мерам и весам, способствовало принятию в 1960 г. нового астрономического эталона единицы времени [3].

3.2. Метод, основанный на использовании движения Земли вокруг Солнца

Определение секунды, принятое в 1960 г. XI Генеральной конференцией по мерам и весам, было основано на использовании движения Земли вокруг Солнца. За секунду была принята $1/31\,556\,925,9747$ часть тропического года на 0 января 1900 г. в 12 ч эфемеридного времени. Практически единица времени стала доступной благодаря использованию сигналов времени, передаваемых от кварцевых часов (генераторов электромагнитных колебаний с пьезокварцевыми резонаторами), которые являются мерами частоты. Новая "эфемеридная" секунда была связана с вращением Земли вокруг Солнца и ее реализация стала более трудоемкой.

3.3. Метод, основанный на использовании измерений частоты перехода атома цезия - 133

В 1967 г. XIII Генеральная конференция по мерам и весам приняла новое определение секунды как интервала времени, в течение которого совершается $9\,192\,631\,770$ колебаний, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия - 133 при отсутствии возмущений внешними полями.

Реализованная в соответствии с этим определением секунда не нуждается в прототипе и может быть воспроизведена в любой лаборатории с точностью, обусловленной лишь инструментальной погрешностью и квалификацией исследователей. Погрешность национальных первичных эталонов единицы времени и частоты составляет 10^{-13} - 10^{-14} [12,13].

Частота цезиевого эталона зависит от ряда факторов. Например, скорость движения атомов и гравитационный потенциал Земли вызывают сдвиги частоты 10^{-13} , асимметрия резонатора Рэмси - на уровне 10^{-12} , неоднородность С-поля - 10^{-10} . Эти сдвиги частоты исследуются и корректируются только в первичных эталонах времени и частоты, которые хранятся в национальных метрологических институтах.

В работе [12] подробно описан первичный эталон времени и частоты РТВ. Первичный эталон РТВ Св1 содержит 6- и 4-полюсные магниты, предназначенные для селекции атомов цезия по состояниям. При этом С-поле параллельно пучку атомов. Неоднородность поля вблизи отверстий в магнитном экране компенсировалась с помощью дополнительных катушек. Нестабильность частоты Св 1 за 1 с не превышала $5 \cdot 10^{-12}$. С 1985 г. в РТВ введен в действие эталон Св 2, отличающийся наличием на обоих концах трубки печи и детектора, что позволяло реверсировать пучок. Неисключенные остатки систематических погрешностей обусловлены точностью коррекции систематических погрешностей. Коррекция сдвига частоты, вызванного асимметрией резонатора, приводила к остаточной погрешности $6,5 \cdot 10^{-15}$, фазовый градиент в резонаторе вызывал погрешность, скорректированную до $3 \cdot 10^{-14}$. Остаточные погрешности вследствие релятивистских эффектов и внешних магнитных полей составляли $0,2 \cdot 10^{-14}$ и $1 \cdot 10^{-14}$.

В работе [14] рассмотрены особенности цезиевого атомно-лучевого первичного эталона времени и частоты США NBS -6. Погрешность эталона $8 \cdot 10^{-14}$, долговременная нестабильность частоты $1 \cdot 10^{-14}$. Подробно проанализированы источники погрешностей. В результате проведенных исследований было установлено, что благодаря оптической накачке существенно уменьшаются систематическая погрешность и кратковременная нестабильность цезиевого первичного эталона частоты - это обусловлено повышением точности реверсирования пучка. Дополнительные источники погрешностей требуют изучения, но не являются серьезным препятствием к созданию более совершенных эталонов.

Государственный первичный эталон единицы времени и частоты СССР на основе измерений частоты перехода атома цезия-133 обеспечивает воспроизведение размера секунды с погрешностью 10^{-13} [8].

В качестве вторичных эталонов единицы времени и частоты используют цезиевые, рубидиевые и водородные эталоны. Эти устройства воспроизводят сигналы с частотой 5 и 10 МГц, которая стабилизируется с помощью атомного перехода. Цезиевые эталоны характеризуются высокой точностью, водородные - наибольшей долговременной стабильностью, рубидиевые - наибольшей кратковременной стабильностью. В последние годы основными направлениями совершенствования эталонов частоты были: использование ионных ловушек [15, 16, 17]; стабилизация частоты и повышение добротности

лазеров [18]; охлаждение частиц в атомных пучках [18,19].

В работах [16, 17] рассмотрены возможности использования ионных ловушек различной конфигурации для эталонов частоты. Известно, что нестабильность частоты эталона характеризуется средним квадратическим отклонением Аллана, равным

$$\sigma_{\Delta f/f}(\tau) \approx \frac{1}{Q} \cdot \frac{1}{S/N} \cdot \frac{1}{\sqrt{\tau}},$$

где $Q = \Delta f/f$ – добротность; Δf – ширина резонансной линии; S/N – отношение сигнал/шум. Для серийных рубидиевых и цезиевых генераторов $\sigma = 10^{-11}/\sqrt{\tau}$, а неустранимая погрешность, обусловленная частотным фликкерным шумом, составляет, соответственно, $5 \cdot 10^{-12}$ и $3 \cdot 10^{-14}$. Совершенствование эталонов направлено на повышение добротности, которая определяется временем взаимодействия атомов с высокочастотным полем, индуцирующим сверхтонкий переход. Это время при фиксированной длине области взаимодействия обусловлено скоростью атомов, составляющей несколько сотен метров в секунду. Таким образом, одним из способов увеличения добротности является замедление атомов с помощью лазерного пучка, направленного навстречу их движения. Альтернативный способ повышения добротности состоит в использовании ионных ловушек, управляемых с помощью электрического и магнитного полей.

В работах [16, 17] подробно проанализированы особенности ионных ловушек для эталонов частоты. Наибольшее распространение получили ионные ловушки, управляемые с помощью постоянных электрического и магнитного полей – ловушки Пеннинга; ловушки, управляемые с помощью постоянного и переменного электрических полей – ловушки Пауля и квадрупольные ловушки. При прохождении лазерного пучка через ловушку возникает разность заселенности сверхтонких уровней основного состояния атомов щелочного металла. С помощью высокочастотного поля возбуждается переход между сверхтонкими уровнями, который детектируется по изменению ионной флуоресценции.

Ловушка, являясь потенциальной мерой частоты, характеризуется следующими особенностями:

– отношение сигнал/шум и, соответственно, кратковременная стабильность ниже, чем у существующих эталонов частоты, что обусловлено малым числом ионов, ограниченным пространственным зарядом и явлением разогрева;

– имеется существенный эффект Доплера 2-го порядка вследствие высокой ионной температуры $\sim 10^4$ К (благодаря охлаждению ионов доплеровский эффект 2-го порядка снижается до 10^{-15} , при этом ослабевают также эффекты Штарка и Зеемана);

– достаточно велико время когерентного взаимодействия (20 с в высокочастотной ловушке и 40 с в ловушке Пеннинга), что обуславливает также ширину резонансной линии в гигагерцевом диапазоне не более нескольких миллигерц.

В различных метрологических организациях проводятся эксперименты по исследованию стабильности эталонных установок с ловушками ионов $^{199}\text{Hg}^+$, $^{137}\text{Ba}^+$, $^9\text{Be}^+$ и др.

Разрабатываются также эталоны с ионными ловушками для оптического диапазона.

По результатам анализа эталонных установок с ионными ловушками можно сделать следующие предварительные выводы: предельно достижимые характеристики устройств с ионными ловушками превосходят соответствующие характеристики существующих эталонов, однако для реализации эталонов частоты с ловушками необходимо решить ряд проблем, одной из которых является создание сверхстабильного лазера для оптического диапазона, а другой – обеспечение увеличения числа ионов, накапливаемых в ловушке [16].

Важным направлением совершенствования эталонов частоты является эффективное использование пучков с охлажденными атомами [19]. Охлаждение атомов осуществляется с помощью лазерного пучка, направленного навстречу атомному пучку. При этом лазер настроен в резонанс с группой высокоскоростных атомов, которые получают момент от фотонов пучка и отдают момент фотонам, возникающим в результате вторичной эмиссии. Момент усиливается за счет абсорбции, в то время как средние потери за счет симметричной спонтанной эмиссии равны нулю. Эти обстоятельства приводят к необходимости решения двух проблем: 1. Выход из резонанса группы высокоскоростных атомов в результате замедления. 2. Необходимость использования двухуровневой системы охлаждающих переходов в связи с большим числом поглощений (с целью уменьшения потерь охлажденных атомов) или обеспечение компенсации потерь.

В экспериментах с атомами натрия обе проблемы были решены благодаря использованию продольного магнитного поля с уменьшающейся вдоль пучка напряженностью (при этом достигнуто охлаждение атомов натрия до температуры ниже

100 мК при плотности частиц 10^5 см^{-3}); другой путь решения проблемы предусматривал применение частотной модуляции лазерного излучения (температура атомов была снижена до 50 мК при плотности частиц 10^6 см^{-3}) [19].

Важнейшие задачи при реализации лазерного охлаждения заключаются в разделении холодных и горячих атомов, уменьшении остаточных расширений продольного и поперечного распределения скоростей и повышении плотности атомного пучка. В работе [19] рассмотрены возможности решения этих задач. Например, отделение холодных атомов заключается в использовании второго лазерного пучка, направленного под углом к оси пучка – под воздействием этого излучения холодные атомы отклоняются, что приводит к расщеплению пучка. Поперечное распределение скоростей пучка может быть сужено с помощью поперечного пучка лазера, частота которого сдвинута от центральной в сторону меньших значений на полуширину спектральной линии. Аналогичной расстройкой продольного лазерного пучка можно сузить продольное распределение скоростей [19].

Увеличение плотности охлажденных атомов возможно двумя путями: использованием поперечного лазерного пучка, интенсивность которого зависит от радиального положения, и дополнительного поперечного охлаждающего пучка; благодаря использованию "дипольной силы" в продольном лазерном пучке с красным смещением и использованию дополнительного поперечного охлаждающего пучка.

Метод охлаждения атомов может быть рекомендован при разработке эталонов для оптической области и эталонов сверхвысокой частоты [18, 19]. Эталоны частоты для оптической области могут быть разработаны с использованием двух принципов: на основе пучков охлажденных атомов для наполнения атомных ловушек, являющихся эффективными частотными дискриминаторами, и на основе монохроматического распределения скоростей охлажденных атомов. Известны также эталоны частоты в оптической области на основе резонаторных структур типа Рэмси (в экспериментах с атомами кальция достигнута добротность линии 10^{14} и доплеровский сдвиг 2-го порядка снижен до 10^{-15} за счет охлаждения атомов).

В эталонах частоты в области сверхвысоких частот благодаря охлаждению атомов существенно снижается погрешность за счет более точного определения скоростей, снижения средней скорости и уменьшения ширины распределения (при этом доплеровский сдвиг частоты 2-го порядка можно определить с погрешностью 10^{-15}).

Таким образом, благодаря использованию пучков охлажденных атомов возможно повысить на порядок и более точность и стабильность атомно-лучевых эталонов частоты в диапазоне сверхвысоких частот. Кроме того, охлаждение атомных пучков дает возможность создать атомные ловушки, что открывает перспективу разработки эталонов для оптического диапазона. Такие эталоны обеспечивают повышение добротности, снижение систематических погрешностей и повышение кратковременной стабильности частоты.

На основании краткого рассмотрения методов и средств воспроизведения единицы времени и частоты можно сделать следующие выводы:

1. Разработан легко воспроизводимый цезиевый эталон времени и частоты благодаря успехам в области квантовой техники (погрешность национальных эталонов единиц времени и частоты составляет 10^{-13} – 10^{-14}).

2. Имеются возможности расширения частотного диапазона эталона, в частности, в оптической области и сверхвысоко-частотной области.

3. Имеются потенциальные возможности повышения точности воспроизведения единицы времени и частоты.

4. СИЛА ТОКА И ДРУГИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Определение и воспроизведение основной электрической величины СИ ампера основано на использовании закона Био-Савара, согласно которому магнитная проницаемость вакуума является константой, равной $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$, и на использовании закона Ампера – закона ponderomotorного взаимодействия электрических токов. Согласно определению, принятому на IX Генеральной конференции по мерам и весам в 1948 г., ампер – сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$ на каждый метр длины.

В СИ производными единицами электрических величин являются вольт – единица электрического напряжения (электро-движущей силы), ом – единица электрического сопротивления и фарада – единица электрической емкости. В системе СИ

эти единицы определяются через ватт (и, таким образом, через три основные механические единицы – метр, килограмм, секунду) и через основную единицу электрической единицы – ампер следующим образом: вольт – разность электрического потенциала между точками проводника, который рассеивает мощность 1 Вт, когда по нему течет ток 1 А; ом – электрическое сопротивление между двумя точками проводника, к которому не прикладывается никакой другой эдс, кроме разности потенциалов 1 В, которая вызывает между этими точками ток 1 А.

Единицы напряжения и сопротивления связаны с основными единицами СИ соотношениями:

$$1 \text{ В} = 1 \text{ м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1}; \quad 1 \text{ Ом} = 1 \text{ м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-2}.$$

Создание эталонов вольта и ома высокой точности на основе приведенных соотношений весьма сложно, поэтому национальные центры метрологии принимают за основные эталоны электрических величин нормальные эталоны Вестона и образцовые катушки сопротивления, и эталон силы тока становится производным. Это не противоречит основным принципам построения СИ [20, 21]. Еще ранее было показано [21], что основные эталоны единиц СИ не обязательно должны воспроизводить единицы именно основных величин системы и что, если достижения науки и техники позволяют с более высокой точностью воспроизводить и передавать единицу электрического напряжения, а не единицу силы электрического тока, то это и следует осуществлять на практике.

При создании реальных эталонов электрических величин возникают проблемы обеспечения стабильности эталонов во времени и обеспечения соответствия эталонов единицам СИ. Известно [23, 24, 34], что параметры эталонов данного вида не остаются неизменными, а имеется дрейф напряжения и сопротивления $\sim 10^{-7}$ в год (в ряде случаев до 10^{-8}). И если не будет соответствия между эталонами электрических величин и основными единицами СИ, то не совпадут единицы силы электрического тока, мощности и энергии, полученные по измерениям механическими или электрическими методами.

Для контроля стабильности эталонов напряжения в большинстве национальных метрологических институтов используют эффект Джозефсона [25, 22]. Кроме того, Консультативным комитетом по электричеству Международного бюро мер и весов предложено установить в качестве международных констант джозефсоновское напряжение на туннельном переходе и кванто-

ванное сопротивление Холла и рекомендовано использовать эти величины как основу создания национальных эталонов единиц электрических величин. Известно, что для эталонов, основанных на механических принципах, возможности повышения точности практически исчерпаны и новые возможности обеспечиваются благодаря использованию методов и средств воспроизведения и передачи единиц электрических величин, основанных на квантовых микроскопических эффектах и фундаментальных физических постоянных [24].

Низкотемпературный квантовый эффект Джозефсона достаточно подробно рассмотрен в ряде работ [24, 25], однако следует подчеркнуть, что наиболее важным для использования эффекта Джозефсона в метрологической практике является определение с максимально возможной точностью отношения удвоенного заряда электрона к постоянной Планка, то есть $2e/h \approx 484 \text{ МГц/мкВ}$. Другая проблема реализации эталона единицы напряжения на основе эффекта Джозефсона заключается в аппаратурном осуществлении структурных схем. Теоретически с помощью эффекта Джозефсона возможна погрешность измерения напряжения до 10^{-16} [22, 29], однако имеются существенные сложности аппаратурной практической реализации. Большинство национальных эталонов вольта основано на использовании дискретного туннельного перехода Джозефсона [27, 28]. С целью повышения точности компарирования в структурные схемы эталонов стали вводиться сверхпроводящие компараторы, сверхпроводящие квантовые интерференционные приборы и т.д. Известны также эталоны, основанные на использовании тонкопленочных переходов [27], в которых возможно увеличение значения квантованного напряжения путем создания цепочек последовательно соединенных дискретных структур на одной подложке. Например, в РТВ [27] удалось создать цепочку из 1474 последовательно включенных пленочных переходов Джозефсона, работающих без смещения по постоянному току (максимальное джозефсоновское напряжение на всей цепочке составило 1,2 В и $\sim 0,8 \text{ мВ}$ на 2 перехода). Отмечается также [26] перспективность исследований, направленных на разработку интегральных джозефсоновских схем с распределенными параметрами, обладающих квантованным напряжением $\sim 1 \text{ В}$. Однако эти исследования связаны с необходимостью обеспечения высокой точности генерируемого квантованного напряжения и обеспечения воспроизводимости и стабильности параметров туннельных тонкопленочных переходов.

Квантовый эффект Холла может служить основой формирования эталона единицы электрического сопротивления [28]. Использование квантового эффекта Холла в измерительной технике и метрологии основано на следующих фактах: холловское удельное и полное сопротивление в двумерном случае равны и не зависят от геометрических параметров образца; отношение h/e^2 связано с безразмерной постоянной тонкой структуры соотношением

$$h/e^2 = R_H = \mu_0 c_0 a^{-1} / 2,$$

где c_0 — скорость света; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, $a^{-1} = 137,035993 \cdot (1 \pm 5 \cdot 10^{-8})$. Таким образом, на основании a^{-1} и холловского сопротивления

$$R_H = \frac{h}{ie^2},$$

где i — целые числа, можно воспроизводить реперное значение сопротивления $h/e^2 = i^{-1} \cdot 25,812 \text{ кОм}$, т.е. квантованное сопротивление Холла может быть известно с погрешностью, с которой экспериментально определена постоянная тонкой структуры. При этом квантованное сопротивление Холла согласуется через скорость света с единицами длины и времени, что обеспечивает взаимосвязь эталонов единиц СИ.

Метрологическими организациями разных стран проводятся работы по использованию эффекта Холла и сравнительному анализу имеющихся эталонов сопротивления и эталонов, основанных на использовании квантованного сопротивления Холла [28, 32, 33].

Таким образом, благодаря использованию эффектов Джозефсона и Холла в известной степени решается проблема обеспечения стабильности эталонов единиц электрических величин во времени.

Важной проблемой, однако, остается обеспечение взаимосвязи эталонов единиц электрических величин с единицами СИ и соответствие эталонов единицам СИ. Это должно быть решено только при условии определения независимыми методами более точных значений $2e/h$ и h/e^2 в единицах СИ [24]. Для этого принципиально возможны прямые методы экспериментального определения вольта, ома и ампера в единицах СИ, а также косвенные методы измерения различных физических постоянных с последующим вычислением по полу-

ченным данным единиц электрических величин.

Прямой метод определения абсолютного (в единицах СИ) вольта (V) состоит в измерении силы взаимодействия электродов, к которым подведено напряжение, известное в единицах национального эталона ($V_{\text{лаб}}$); емкость между электродами вычисляется в единицах СИ по расчетному конденсатору. На основании соотношения [24]

$$(K_V)_{\text{лаб}} \equiv V_{\text{лаб}} / V = (2e/h)_{\text{лаб}} / (2e/h)$$

следует, что вольт в СИ можно определить с погрешностью, с которой известно в этой системе единиц отношение $2e/h$. Погрешность прямого измерения вольта составляет в настоящее время $0,3 \cdot 10^{-6}$, что на порядок больше погрешности воспроизведения единицы напряжения, полученной по результатам периодических сравнений с элементом Джозефсона [24].

Абсолютный эталон ома реализуется на базе расчетного конденсатора Томсона-Лампарда переходом от полного сопротивления конденсатора к национальному групповому эталону на образцовых катушках сопротивления. Если обозначить отношение национального эталона сопротивления к абсолютному эталону $(K_{\text{Ом}})_{\text{лаб}}$ и допустить, что национальный эталон $\text{Ом}_{\text{лаб}}$ определяется по квантованному сопротивлению Холла $(R_H)_{\text{лаб}}$, тогда

$$(K_{\text{Ом}})_{\text{лаб}} \equiv \text{Ом}_{\text{лаб}} / \text{Ом} = R_H / (R_H)_{\text{лаб}}.$$

Таким образом, измерения сводятся в определению в единицах СИ квантованного сопротивления R_H или постоянной тонкой структуры. Погрешность такого эксперимента $3 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-7}$, однако ввиду сложности практической реализации данный метод почти не был исследован национальными метрологическими организациями [24].

Аналогичные соотношения можно получить и для абсолютного эталона ампера

$$(K_A)_{\text{лаб}} \equiv A_{\text{лаб}} / A = (K_V)_{\text{лаб}} / (K_{\text{Ом}})_{\text{лаб}},$$

где $A_{\text{лаб}}$ — национальный эталон ампера, A — абсолютный эталон ампера. На основании этого соотношения очевидно, что для получения единицы тока по СИ необходимо знать $(2e/h) R_H$, эквивалентное заряду электрона в единицах СИ. Минимальная погрешность эксперимента составляет $4 \cdot 10^{-6}$, что на два порядка больше погрешности, с которой можно под-

держивать значение единицы тока с использованием эффектов Джозефсона и Холла.

В течение последних 3–5 лет появились работы, посвященные вопросам разработки косвенных методов определения единиц электрических величин на основе использования функциональных связей между фундаментальными физическими постоянными [24, 30, 31]. В этих работах показано, что, кроме $\mu_0 \cdot c$, $(2e/h)_{\text{лаб}}$ и $(R_H)_{\text{лаб}}$, при реализации косвенных методов определения единиц электрических величин могут быть использованы постоянная Ридберга для бесконечной массы R_∞ (значение известно с погрешностью $5,5 \cdot 10^{-10}$), магнитный момент протона в боровских магнетонах μ_p'/μ_B (погрешность определения $1,1 \cdot 10^{-8}$), молярная масса протона M_p (погрешность определения $1,2 \cdot 10^{-8}$), отношение массы протона к массе электрона m_p/m_e (погрешность определения $2 \cdot 10^{-8}$), постоянная тонкой структуры α^{-1} (погрешность определения $3,8 \cdot 10^{-8}$), постоянная Фарадея $F_{\text{лаб}}$, измеренная в единицах действующих эталонов единиц электрических величин ($1,3 \cdot 10^{-6}$), гиромангнитное отношение протона γ_p' ($2,1 \cdot 10^{-7}$ в слабом поле и $1 \cdot 10^{-6}$ в сильном поле), постоянная Авогадро N_A (погрешность определения $1,3 \cdot 10^{-6}$).

В работах [24, 30, 31] приведены коэффициенты перехода от эталонов ампера, вольта, ома к единицам СИ (погрешности вычислений этих коэффициентов, соответственно, $7 \cdot 10^{-7}$, $6,5 \cdot 10^{-7}$, $7 \cdot 10^{-8}$).

Анализ результатов проведенных в течение последнего десятилетия исследований в различных национальных метрологических организациях по усовершенствованию методов и средств воспроизведения единиц электрических величин показывает, что джозефсоновское отношение $(2e/h)$, рекомендованное в 1972 г. Консультативным комитетом по электричеству, необходимо откорректировать (увеличить) и соответственно откорректировать коэффициенты, используемые в расчетах национальными метрологическими организациями [24, 31].

Корректировке подлежит также эталон сопротивления Международного бюро мер и весов (погрешность его составляет $1 \cdot 10^{-7}$). Принимая во внимание сравнительно большие расхождения между национальными эталонами напряжения и сопротивления, с одной стороны, и единицами СИ – с другой, а также успехи в исследовании квантового эффекта Холла, Международное бюро мер и весов планирует в будущем [24] установить новые, наиболее согласующиеся с единицами СИ, значения величин $2e/h$ и R_H с тем, чтобы они были введе-

ны национальными метрологическими службами в качестве обязательных при реализации и аттестации эталонов напряжения и сопротивления. Это позволит снизить взаимные отклонения национальных эталонов вольта до $1 \cdot 10^{-8}$ и сопротивления до $1 \cdot 10^{-7}$, погрешность относительно единиц СИ соответственно до $1 \cdot 10^{-7}$ и $3 \cdot 10^{-7}$ и будет способствовать обеспечению единства измерений.

На основании проведенного анализа методов и средств воспроизведения единиц электрических величин можно сделать следующие выводы:

1. Благодаря успехам в области исследования квантовых эффектов Холла и Джозефсона обеспечивается возможность существенного повышения стабильности эталонов единиц электрических величин, а также повышение точности воспроизведения единиц.

2. Благодаря созданию эталонов единиц электрических величин на основе использования единиц СИ (прямые методы) и на основе использования функциональных связей между фундаментальными физическими постоянными (косвенные методы) обеспечивается возможность разработки взаимосвязанных естественных эталонов единиц электрических величин, реализуемых с высокой точностью в любой метрологической лаборатории.

3. Косвенные методы реализации единиц электрических величин – вольта и ампера – на основе использования фундаментальных физических постоянных существенно точнее прямых методов (погрешность воспроизведения ома обоими методами одинакова).

3. Фундаментальные физические постоянные играют основную роль в воспроизведении единиц электрических величин и определяют точность их воспроизведения.

4. С целью совершенствования системы воспроизведения и передачи единиц электрических величин необходимы дальнейшие исследования в области фундаментальной метрологии, уточнения и согласования значений фундаментальных физических постоянных.

5. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА

Единицей термодинамической температуры является кельвин, определяемый как $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды. Кельвин как единица температурного интервала равна $1/273,16$ части интервала тер-

динамической температуры между абсолютным нулем и тройной точкой воды. Тройная точка воды – точка равновесия воды в твердой, жидкой и газообразной фазах. До 1954 г., до решения X Генеральной конференции по мерам и весам, размер кельвина был установлен по интервалу между точкой плавления льда и точкой кипения воды. На X Генеральной конференции была установлена термодинамическая температурная шкала с одной реперной точкой – тройной точкой воды, приписав ей значение 273,16 К. Таким образом, в термодинамической температурной шкале нижней границей является абсолютный нуль температуры (0 К) и основной реперной точкой – тройная точка воды (273,16 К).

Термодинамическая температура не может быть измерена с воспроизводимостью, достаточной для практических целей; нужны методы, обеспечивающие измерения температуры с более высокой точностью. Этим требованиям отвечает Международная практическая шкала температур МПШТ–68 [3,35].

Шкала температур, согласованная на международном уровне, необходима в настоящее время по тем же самым причинам, которые существовали ко времени принятия Международной практической шкалы 1927 г.: шкала должна обеспечивать основу научных и технических температурных измерений и гарантировать получение высокой воспроизводимости вторичных термометров (в то время – платиновый термометр сопротивления, платинародий–платиновая термопара и оптический пирометр). Воспроизводимость эти вторичных эталонных термометров была лучше, чем первичных эталонных, с помощью которых производилось измерение термодинамической температуры. Из этого следовало, что международная шкала должна быть и была так определена, чтобы температуры, измеренные с ее помощью, были более воспроизводимыми, чем термодинамическая температура [35].

Эта ситуация сохраняется и в настоящее время [35, 36], поскольку первичные эталонные термометры еще не обладают достаточно хорошей воспроизводимостью. Если появится практическая возможность измерять термодинамическую температуру с погрешностью, обеспечиваемой платиновым термометром сопротивления (с погрешностью менее 0,5 мК), то необходимость в международной шкале будет исключена.

МПШТ=68 (с исправлениями 1976 г. [35]) имеет ряд недостатков:

1. Эта шкала не распространяется на достаточно низкие температуры. Нижний предел МПШТ(68 ограничен температу-

рой тройной точки кислорода (13,81 К). В связи с необходимостью расширения пределов шкалы Консультативным комитетом по термометрии была установлена временная шкала температур ВШТ=76 в диапазоне от 0,5 до 30 К. Эта шкала перекрывает нижнюю часть шкалы МПШТ–68, но при этом шкалы не совпадают и ниже 30 К температуры МПШТ=68 существенно отличаются от термодинамических. На большей части области перекрытия две шкалы не согласуются друг с другом.

2. Температура T_{68} по МПШТ=68 в большей части шкалы отклоняется от термодинамической температуры T . При 40°C разность $(T-T_{68})$ достигает минус 10 мК; при 100°C – минус 27 мК; при 460°C – минус 80 мК. Максимальная разность + 400 мК имеет место при 800°C. Разности существуют также при температурах ниже 0°C и достигают максимума 10 мК в этой области вблизи 100 К [35].

3. Недостаточно высокая точность воспроизводимости по диапазону. Например, погрешность воспроизводимости платинового термометра сопротивления при 630°C составляет 2 мК, погрешность воспроизводимости пирометра при 1064°C – около 10 мК, тогда как погрешность воспроизводимости в пределах этой области температур платинародий–платиновой термопары составляет 200 мК.

4. Неоднозначность интерполяции. Известно, например, что в большей части низкотемпературной области шкалы (ниже 0°C) разность между значениями температуры ближайших реперных точек, получаемая двумя градуированными с высокой точностью платиновыми термометрами сопротивления, может достигать от 1 до 2 мК. Это обусловлено плохим выбором интерполяционной функции. В работе [35] утверждается, что такие погрешности могут быть уменьшены в ~ 3 раза.

5. Сложность реализации и передачи размера единицы. Это обусловлено необходимостью использования множества реперных точек, часть из которых для их воспроизведения требуют специальных условий, например, точки кипения и др.

6. Сложности аппаратного обеспечения при реализации температурной шкалы. При этом необходимо принимать компромиссные решения с учетом требований простоты реализации шкалы и высокой воспроизводимости. Эти обстоятельства приводят к предложению использовать газовый термометр для реализации шкалы в диапазоне от 4,2 до 25 К, а также газовый термометр и платиновый термометр сопротивления, обеспечивающие воспроизведение шкалы от 25 К и выше.

Определяя кельвин как $1/273,16$ температуры тройной точки воды, производится замена утверждения, что система, находящаяся в равновесии при температуре тройной точки воды, имеет такое распределение энергии по степеням свободы, которое может быть охарактеризовано выбранным числом $273,16$ [35]. При выборе этого числа одновременно устанавливаются значения двух фундаментальных физических постоянных: газовой постоянной R и постоянной Больцмана k (с учетом значения постоянной Авогадро), причем постоянная Больцмана является связующим звеном между механическими и тепловыми величинами. Для определенного термического состояния численное значение произведения kT устанавливается другими основными единицами, так что изменение в определении кельвина должно сопровождаться противоположным изменением k таким образом, чтобы произведение kT оставалось постоянным [35].

Для всех первичных эталонных термометров, т.е. термометров, воспроизводящих значение T непосредственно, уравнение состояния содержит либо R , либо k , но не содержит зависимых от температуры постоянных [35]. Такими первичными эталонными термометрами являются газовой термометр (уравнение содержит R), пирометр полного излучения (k), акустический термометр (R) и шумовой термометр (k).

Показания вторичных эталонных термометров должны сравниваться с показаниями первичных эталонных термометров.

Анализ результатов исследований в области разработки методов и средств воспроизведения и передачи единицы температуры, проведенных в последние годы [35, 36], показывает, что необходимость в международной температурной шкале будет до тех пор, пока воспроизводимость первичных эталонных термометров не станет выше, чем воспроизводимость лучших вторичных эталонных термометров [35]. Но в настоящее время в диапазоне от 30 до 1300 К воспроизводимость лучшего газового термометра и пирометра полного излучения в 10 раз ниже, чем воспроизводимость лучшего платинового термометра сопротивления [35].

В последние годы в результате исследований, проводившихся в ведущих метрологических организациях ряда стран, были существенно улучшены данные для температур ниже 27 К и выше 273 К [37, 38]. Диапазон температур между 27 и 273 К был менее исследован. Исследования в этой области температур проводились в Лейденском университете (с газовым термометром до 100 К), в Физико-техническом инсти-

туте РТВ (при 27, 54 и 90 К), в Национальной измерительной лаборатории Австралии (с газовым термометром до 287 К) [39], во ВНИИФТРИ (с газовым термометром с ртутным интерференционным манометром до 300 К) [40]. Эти данные обсуждались на очередной сессии консультативного комитета МКМВ по термометрии. Кроме того, полученные во ВНИИФТРИ данные об отклонениях шкалы МПТШ-68 в диапазоне температур 4...300 К от термодинамической температуры с воспроизводимостью $\pm 0,5$ мК будут использованы при создании нового государственного эталона, воспроизводящего шкалу температур в интервале 0,8...273,15 К, т.е. взамен трех существующих государственных эталонов температуры [40].

С 1990 г. предполагается введение новой Международной шкалы температур (МПТШ-90, которая должна быть значительно ближе (примерно на порядок) к истинной термодинамической температуре, чем шкала 1968 г.

6. СИЛА СВЕТА

Единицей силы света является кандела. Наименование происходит от латинского слова *candela* – свеча (в СССР до 1970 г. для этой единицы было введено наименование "свеча"). Для единицы силы света в 1909 г. было установлено наименование "международная свеча" и принята спецификация, в соответствии с которой международная свеча воспроизводилась с помощью эталонных электрических ламп. Затем были созданы новые световые эталоны (на основе черного тела) и возникла необходимость в уточнении значения основной световой единицы и установления нового ее определения. На IX Генеральной конференции по мерам и весам в 1948 г. было принято следующее определение силы света – свечи: "Свеча – это такая сила света, при которой яркость полного излучателя при температуре затвердевания платины равна 60 свечам на один квадратный сантиметр". Одновременно было принято предложение об изменении наименования "новая свеча" на "кандела".

В решении XIII Генеральной конференции по мерам и весам 1967 г. было уточнено определение канделы: "кандела – сила света, испускаемого с площади $1/600\,000$ м² сечения полного излучателя в перпендикулярном направлении при температуре излучателя, равной температуре затвердевания платины при давлении 101325 Па.

На XVI Генеральной конференции по мерам и весам в 1979 г. было принято новое определение единицы силы света кандели: "кандела – сила света, испускаемого в определенном направлении излучателем, который излучает монохроматическое излучение частотой 540 ТГц и энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср." Таким образом, теперь устанавливается определенное соотношение между энергетическими и световыми величинами. Частота 540 ТГц соответствует длине волны 555 нм в воздухе при показателе преломления воздуха 1,0028. На этой длине волны адаптированный к свету глаз имеет наибольшую чувствительность.

Благодаря новому определению кандели возможно представление световых величин через соответствующие энергетические величины при использовании различных методов. Энергетическая шкала оптического излучения может быть теперь воспроизведена не только с помощью полного излучателя, но также и с использованием таких фотометрических величин, как спектральная плотность излучения в пределах определенного интервала длин волн. В последние годы проводились сличения энергетических шкал оптического излучения метрологических институтов разных стран [40, 44].

В связи с новым определением основной единицы СИ силы света и разработкой стабильных средств воспроизведения силы света появились широкие возможности повышения точности и надежности эталонов в области фотометрии некогерентного и когерентного излучения. В СССР Государственный первичный эталон единицы силы света обеспечивает воспроизведение единицы со средним квадратическим отклонением не более 10^{-3} при неисключенной систематической погрешности не более $2,5 \cdot 10^{-3}$. Национальные эталоны единицы силы света обеспечивают воспроизведение единицы со средним квадратическим отклонением $(1...3) \cdot 10^{-3}$ при неисключенной систематической погрешности $(3...6) \cdot 10^{-3}$. Эталон единицы силы света МБМВ характеризуется средним квадратическим отклонением $(0,3...0,9) \cdot 10^{-3}$ при нестабильности $4 \cdot 10^{-3}$.

В СССР наряду с первичным эталоном силы света разработаны эталоны некогерентного оптического излучения: эталоны единиц спектральной плотности энергетической яркости, спектральной плотности силы излучения и спектральной плотности энергетической освещенности непрерывного оптического излучения в диапазоне длин волн 0,22...10,6 мкм; эталоны единиц силы излучения и энергетической освещенности непре-

рывного оптического излучения сплошного спектра в диапазоне длин волн 0,2...10,6 мкм; эталон единицы спектральной плотности энергетической яркости оптического излучения в диапазоне длин волн 0,005...0,25 мкм; эталон единицы потока импульсного оптического излучения в диапазоне длин волн 0,8...1,0 мкм; эталон единицы энергетической освещенности солнечным излучением, обеспечивающий воспроизведение единицы со средним квадратическим отклонением не более 0,1 % при неисключенной систематической погрешности 0,3% и др.

Значительные успехи достигнуты в создании методов и средств воспроизведения единиц некогерентного оптического излучения. Известно, что единицы некогерентного оптического излучения увязаны между собой, что выражается в виде определенных математических зависимостей [40]. В ряде случаев выбор той или иной единицы определяется возможностями практической реализации этих единиц. В связи с этим отмечается целесообразность объединения эталонов единиц некогерентного оптического излучения в единые взаимоувязанные комплексы. Например, в СССР на базе эталонов единиц некогерентного оптического излучения планируется создать государственный первичный радиометрический эталон единиц спектральной плотности энергетической яркости, спектральной плотности силы излучения, спектральной плотности энергетической освещенности, энергетической освещенности и энергетической силы излучения в диапазоне длин волн 0,2...25,0 мкм [40].

Следует отметить также достижения в области эталонной базы единиц когерентного оптического излучения. Например, в СССР разработаны эталоны единиц средней мощности лазерного излучения, эталон единицы энергии импульсного когерентного излучения, эталон единицы мощности импульсного когерентного излучения и др.

В последние годы во многих национальных метрологических организациях, включая СССР, проводятся исследования возможности использования так называемых самокалибрующихся кремниевых фотодиодов в качестве базы для создания национальных эталонов в области радиометрии и фотометрии [40]. Сличения 1986 г. показали, что результаты измерений мощности излучения He-Ne и аргоновых лазеров шести лабораторий из восьми совпали в пределах 0,1% [40]. Эти результаты эталонов единиц когерентного излучения.

Проведенный анализ состояния вопроса воспроизведения единиц оптического излучения показал, что благодаря новому

определению силы света канделы расширяются возможности повышения точности и надежности эталонов в области радиометрии и фотометрии, и появляется перспектива создания комплексов эталонов единиц некогерентного и когерентного оптических излучений, что будет способствовать упрощению поверочных схем и повышению точности передачи размеров единиц.

7. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ И ЭТАЛОНЫ

Анализ методов и средств воспроизведения единиц основных физических величин показал, что основополагающая роль в реализации эталонов единиц физических величин принадлежит фундаментальным физическим постоянным и что точность воспроизведения единиц физических величин в значительной степени зависит от точности определения значений фундаментальных физических постоянных. С целью уточнения значений фундаментальных физических постоянных в различных метрологических организациях, включая национальные и международные, проводятся согласования фундаментальных постоянных [24, 41, 42]. Целью согласования постоянных является получение согласованного множества "наилучших" значений постоянных для последующего использования при реализации эталонов единиц физических величин, в научных исследованиях, в производстве. В последнее десятилетие было выполнено большое число экспериментов по определению и уточнению значений фундаментальных постоянных. Например, в работах [24, 41] сообщается о проведении под руководством рабочей группы по фундаментальным постоянным Комитета данных для науки и техники в 1983 г. согласования фундаментальных постоянных методом наименьших квадратов. При этом все данные были разделены на две группы: стохастические данные, которые были определены неточно и должны быть уточнены в ходе согласования (например, коэффициенты, характеризующие соотношение национальных эталонов единиц, в частности, электрических величин, и эталонов единиц, поддерживаемых в МБМВ); данные, названные вспомогательными постоянными, содержащие величины, которые были определены существенно точнее стохастических данных и их уточнение в связи с этим незначительно влияло на уточнение стохастических данных (например, такие постоянные как R_H , h/e^2 , $2e/h$, F , γ'_p).

Представляет интерес работа [41], посвященная вопросу согласования трех физических постоянных, относящихся к единицам электрических величин: постоянной Фарадея F , гиромагнитного отношения протона в слабом поле γ'_p и квантового сопротивления Холла R_H . В работах [30, 33] показано, что при использовании результатов измерений, полученных в одних и тех же лабораторных единицах, для совокупности четырех фундаментальных постоянных: (h/e^2) , $(2e/h)$, постоянной Фарадея F и гиромагнитного отношения протона γ'_p можно найти их уточненные значения в СИ. На основании анализа полученных результатов показана реальная возможность снижения погрешности постоянной Фарадея до $0,5 \cdot 10^{-6}$, тогда погрешность определения джозефсоновского отношения $2e/h$ будет $0,25 \cdot 10^{-6}$ и значение постоянной Авогадро $0,5 \cdot 10^{-6}$ [41].

В работе [43] проанализированы особенности обработки данных при уточнении и согласовании значений физических постоянных. Показано, что точность согласования данных при уточнении значений физических постоянных зависит от целого ряда факторов, наиболее важными из которых можно считать следующие:

- необходимость и корректность предварительного разделения данных на основные и вспомогательные;
- выбор алгоритма обработки данных (метод наименьших квадратов, метод наименьших квадратов с коэффициентом Бэрджа, алгоритмы, основанные на методах дисперсионного анализа, и др.);
- выбор критерия сравнения численных результатов при реализации алгоритмов (сравнение усредненных отношений разностей уточненных и согласованных значений физических постоянных, сравнение средних квадратических отклонений их значений и т.д.).

В связи с успехами, достигнутыми в вопросах реализации естественных эталонов единиц физических величин, а также в вопросах повышения точности и согласования значений фундаментальных физических постоянных, становится вполне обоснованной перспектива разработки системы естественных эталонов, позволяющих вычислять размеры всех воспроизводимых единиц через фундаментальные физические постоянные, а также разработка новой или усовершенствование системы единиц физических величин СИ. Например, в работе [31] рассмотрены вопросы оптимизации выбора системы единиц основных физических величин. При выборе такой системы необходимо принимать во внимание следующие предпосылки:

1. Каждая последующая система единиц физических величин должна обеспечивать возможность более точного воспроизведения основных и производных единиц.

2. Каждая последующая система единиц физических величин должна быть связана с единицами предыдущей системы однозначными количественными соотношениями.

В работе [31] предлагается система четырех основных единиц физических величин, основанная на фундаментальных физических постоянных: 1. УИЦ – единица скорости, равна $1/299\,792\,458$ части скорости распространения в вакууме плоской электромагнитной волны, погрешность воспроизведения 10^{-9} ; 2. СЕКУНДА – в соответствии с существующим определением погрешность воспроизведения 10^{-13} ; 3. ВОЛЬТ-разность потенциалов, соответствующая возбуждению $4,83594 \cdot 10^{14}$ Гц на туннельном контакте Джозефсона, погрешность эталона 10^{-8} ; 4. АМПЕР – ток в квантованном элементе Холла, который вызывает увеличение напряжения Холла на 6453 В. Тогда определение единицы массы, килограмма, будет следующим: килограмм – масса, кинетическая энергия которой при движении с единичной скоростью (1 уиц) эквивалентная электрической энергии 0,5 вольт-ампер-секунда.

ВЫВОДЫ

1. Благодаря успехам в области "квантовой техники" и, соответственно, достижениям в области обеспечения воспроизведения фундаментальных физических постоянных с высокой точностью появились принципиально новые предпосылки реализации эталонов единиц основных физических величин, а также совершенствования всей системы воспроизведения и передачи единиц физических величин.

2. Появилась возможность реализации концепции системы взаимосвязанных эталонов единиц физических величин.

3. Благодаря внедрению легко воспроизводимых эталонов единиц физических величин и созданию децентрализованной системы эталонов обеспечивается возможность повышения точности промышленных измерений.

4. Выявлена перспективность совершенствования системы единиц физических величин на основе использования фундаментальных физических постоянных.

ЛИТЕРАТУРА

Кавагути Т.

О перспективах развития метрологии и измерительной техники.

1. "Кэйсоку гидзюцу, 'Instrum. Autom.'", 1986. – 14, № 1. – С. 61–67. См. также КИТ*), 1987, № 16, реф. 92.
2. Huntley L. A distributed drift standard of voltage.// IEEE Trans. Instrum. and Meas. – 1984. – 33., № 3. – P. 155–159. См. также КИТ, 1986, № 48, реф. 306.
3. Бурдун Г.Д. Справочник по международной системе единиц. – М.: Изд-во стандартов. – 1977. – 232 с.
4. Стоцкий Л.Р. Физические величины и их единицы. – М.: Просвещение, 1984. – 240 с.
5. Tanaka K., Sakurai T., Kurosawa T., Morinaga A., Iwasaki S. System for light velocity measurement at NRLM.// U.S. Dep. Commer. Nat. Bur. Stand., Spec. Publ. – 1984. – № 617. – P. 53–56. См. также КИТ, 1987, № 7, реф. 23.
6. Baird K.M. Frequency measurement of optical radiation.// U.S. Dep. Commer. Nat. Bur. Stand. Spec. Publ. – 1984. – № 617. – P. 35–41. См. также КИТ, 1987, № 31, реф. 186.
7. Bonhoure I. Sixth comparison of National Standards of luminous intensity and luminous flux (1985).// Metrologia. – 1987, – 24, № 4. – P. 157–162. См. также РЖ "Метрология и измерительная техника", 1988, 4.32.957.
8. В.Г. Ильин, Л.К. Исаев, В. Коробов, Ю.В. Тарбеев. К внедрению в народное хозяйство единого эталона времени, частоты, длины.// Измерит. техн. – 1986. – № 2. – С.
9. Kochsiek M. The mass unit "Kilogram", precision measurement of mass, attainable uncertainties and possibilities of a new definition.// U.S. Dep. Commer. Nat. Bur. Stand. Spec. Publ. 1984. – № 617. – P. 427–435. См. также КИТ, 1986, № 24, реф. 138.
10. Davis R.S. Recalibration of the U.S. national prototype kilogram.// J. Res. Nat. Bur. Stand. – 1985. – 90, № 4. – P. 263–287. См. также КИТ, 1987, № 36, реф. 212.
11. Schoonoker R., Taylor J. Some recent developments at NBS in mass measurements.// IEEE Trans. Instrum. and Meas. – 1986.

*) КИТ означает Экспресс-информацию ВИНТИ, серия "Контрольно-измерительная техника", далее следуют год издания, номер выпуска и номер реферата.

- 35, № 4.- P. 418-422. См. также КИТ, 1988, № 25, реф.147.
12. Dorenwendt K. Realization and dissemination of the second// Metrologia. - 1986.- 22, № 3.- P. 186-189. См. также КИТ, 1988, № 30, реф. 171.
 13. Makadan Y., Koga Y. Recent progress in Cs beam frequency standards at the NRLM// IEEE Trans. and Meas.- 1985.- 34, № 2.- P. 133-135. См. также КИТ, 1987, № 2, реф. 9.
 14. Lewis L.L., Walls F.L., Howe D.A. Prospects for cesium primary standards at the National Bureau of Standards// U.S. Dep. Commer. Nat. Bur. Stand. Spec. Publ. - 1984.- № 617. P. 25-27. См. также КИТ, 1986, № 4, реф. 20.
 15. Knab H., Niebling K.-D., Werth G. Ion trap as a frequency standard measurement of Ba⁺ HFS frequency fluctuations// IEEE Trans. Instrum. and Meas. - 1985.- 34, № 2.- P. 242-245. См. также КИТ, 1987, № 20, реф. 120.
 16. Werth G. Ion traps and frequency standards// Metrologia.- 1986.- 22, № 5.- P. 190-194. См. также КИТ, 1987, № 48, реф. 234.
 17. Werth G. Ionenfallen Für Frequenzstandards// Laser und Optoelektron. - 1984.- 16, № 4.- P. 271-277. См. также КИТ, 1986, № 26, реф. 151.
 18. Phillips W.B. Laser-cooled and trapped atoms, Proceedings of the workshop on spectroscopic applications of slow atomic beams// Nat. Bur. Stand. Spec. Publ. - 1983.- № 65
 19. Ertmer W., Penselin S. Cooled atomic beams for frequency standards// Metrologia. - 1986.- № 5.- P. 195-200. См. также КИТ, 1987, № 41, реф. 243.
 20. Коэн Е.Р., Тейлор Б.Н. Квантовая метрология и фундаментальные константы.- М.: Мир, 1981.- 368 с.
 21. Горбачевич С.В. Связь между единицами механических и электрических величин и физическими константами// Измерит. техн.- 1980.- № 9.- С. 19.
 22. Kautz R.L., Lloyd Frances L. Precision of series - array Josephson voltage standards// Appl. Phys. Lett.- 1987.- 51, № 24.- P. 2043-2045. См. также РЖ "Метрология и измерительная техника", 1988, 6. 32.1166.
 23. Sloggett G.J., Clothier W.K., Benjamin D.J., Currey M.F., Bairnsfather H. The CSIRO absolute Volt project// U.S. Dep. Commer. Nat. Bur. Stand. Spec. Publ. - 1984.- № 617.- P. 469-473. См. также КИТ, 1986, № 5, реф. 28.
 24. Taylor B.N. Electrical units, fundamental constants and the 1983 least square adjustment// IEEE Trans. Instrum. and Meas.

- 1985.- 34, № 2.- P. 155-162. См. также КИТ, 1986, № 23, реф. 133.
25. Барис А., Патерно Д. Эффект Джозефсона.- М.: Мир, 1984.- 320 с.
26. Мостепаненко В.М., Потапов С.В. Перспективы совершенствования эталона единицы напряжения на основе эффекта Джозефсона// Измерительная техника.- 1986.- № 8. P. 16-18.
27. Niemeyer J., Hiken J.H., Kautz R.L. Near-zero bias arrays of Josephson tunnel junctions providing standard voltages up to 1V// IEEE Trans. Instrum. and Meas. 1985.- 34, № 2.- P.185-186. См. также КИТ, 1986, № 5, реф. 30.
28. Taylor B.N. Possible changes in the U.S. legal units of voltage and resistance// J. Res. Nat. Bur. Stand. - 1986.- 91, № 5.- P. 299-305. См. также КИТ, 1986, № 39, реф. 230.
29. Tsai A.S., Jain A.R., Luchens L.E. High-precision test of the universality of the Josephson voltage-frequency relation// Phys. Rev. Lett. - 1983.- 51.- P. 316.
30. Taylor B.N. Impact of quantized Hall resistance on SI electrical units and fundamental constants// Metrologia. - 1985.- 21, № 1.- P. 37-39. См. также КИТ, 1986, № 39, реф. 240.
31. Kibble B.P. Realization of the electrical SI units// U.S. Dep. Commer. Nat. Bur. Stand. Spec. Publ. - 1984.- № 617.- P. 461-464. См. также КИТ, 1987, № 3, реф. 14.
32. Klitzing K., Ebert G. Application of the quantum Hall effect in metrology// Metrologia. - 1985 - 21, № 1.- P. 11-18. См. также КИТ, 1987, № 9, реф. 49.
33. Waba Tochimi, Shida Katsunori, Nishinaka Hidefumi, Igarashi Takashi. Study of the quantized Hall effect as a resistance standard at ETL// IEEE Trans. Instrum. und Meas. - 1985.- 34, № 2.- P. 306-309. См. также КИТ, 1987, № 9, реф. 53.
34. Olsen P.T., Vincent E.B., Phillips W.D., Williams E.R., Jones G.R. The NBS absolute Ampere experiment// IEEE Trans. Instrum. and Meas. 1985.- 34, № 2.- P. 175-181. См. также: КИТ, 1987, № 3, реф. 16.
35. Preston - Thomas H., Quinn T.J., Hudson R.P. The International Practical Temperature Scale// Metrologia. - 1985.- 21, № 2.- P. 75-79. См. также КИТ, 1986, № 10, реф. 50.
36. Licowski Michal. Uklady pomiarowe indukcyjnosci wzajemnej do realizacji stalych punktow termometrycznych skali EPT-76 ponizej 13, 81 K// Normalizacja. - 1987.- 55, № 7-8.- P. 36-41. См. также РЖ "Метрология и измерительная техника", 1988, 4.32.639.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ИНФОРМАЦИОННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В ОБЛАСТИ
МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Сорокин Ю.Н.

ВВЕДЕНИЕ

В статье приведен обзор становления, состояния и перспектив развития Реферативного журнала "Метрология и измерительная техника" (РЖ МИТ), его место и значение в системе информационного обеспечения этой важной области народного хозяйства.

Известна тесная связь научно-технического прогресса и уровня измерительной техники. Еще Д.И. Менделеев сказал: "Наука начинается там, где начинаются измерения". Для индустриально развитых стран всегда, а в последние годы в особенности, характерен опережающий рост производства измерительной техники. Это наглядно видно по быстрому росту объема ее продажи на мировом рынке, составляющего в среднем 15-20% в год [1]. В нашей стране со времени вступления ее на путь индустриализации производству средств измерений также удалялось первостепенное значение. При этом, с одной стороны, учитывалась большая роль измерительной техники в повышении качества промышленной продукции и, в первую очередь, машиностроительной, а также в повышении эффективности науки. С другой стороны, решалась задача уменьшения немалых затрат общественного труда на измерения. Эти затраты, включая создание средств измерений, их ремонт, метрологическое обслуживание, выполнение самих измерений превышают 10% от всех трудозатрат, доходя до 50% в отраслях, производящих наиболее сложную, например электронную, технику [2].

В различных отраслях нашей промышленности только профессионально занимаются измерениями свыше 350 тыс. человек. Повышение производительности их труда, эффективности метрологического обслуживания стали важными государственными задачами этого крупного народно-хозяйственного комп-

37. Jung H.J. A measurement of thermodynamic temperatures between 683K и 933K by an infrared pyrometer// Metrologia. - 1986.- 23.- P. 19-31.
38. Полунин С.П., Астров Д.Н. Газовый термометр для точного измерения термодинамических температур ниже 300 K// Измерит. техн.- 1987.- № 3.- С. 21.
39. Kemp R.C., Kemp W.R.C., Besler L.M. A determination of thermodynamic temperatures and measurements of the second virial coefficient of ^4He between 13, 81 K и 287 K using a constant - volume gas thermometer// Metrologia. - 1986/1987.- P. 61-86. См. также КИТ, 1988, № 32, реф. 183.
40. И.Г. Баранчик. Техническое перевооружение Государственной метрологической службы в XII пятилетке в области энергетической фотометрии, оптических и световых измерений// Метрологическая служба в СССР.- 1987.- № 11.- С. 1-9.
41. Taylor B.N. New results from previously reported NBS fundamental constant determinations// J. Res. Nat. Bur. Stand.- 1985.- 90, № 2.- P. 91-94. См. также: КИТ, 1986, № 28, реф. 162.
42. Тарбеев Ю.В., В.М. Мостапаненко, Эйдес М.И. Фундаментальные физические константы и эталоны// Измерит. техн.- 1986.- № 8.- С. 4-6.
43. Тунинский В.С. Уточнение согласованных значений фундаментальных констант// Измерительная техника.- 1986.- № 8.- С. 11-13.
44. Bonhoure J. Sixth comparison of national standards of luminous intensity and of luminous flux (1985)// Metrologia. - 1987.- 24, № 4.- P. 157-162. См. также РЖ "Метрология и измерительная техника", 1988, 4. 32.962.

лекса, которые нашли отражение в "Основных направлениях социально-экономического развития СССР в 1986-1999 г. и на период до 2000 г."

Одним из важных элементов, обеспечивающих успешное функционирование метрологических служб и приборостроения в целом, является хорошо поставленная система информационного обеспечения.

В соответствии с заданием общесоюзной программы работ по проблеме создания Государственной автоматизированной системы научно-технической информации (ГАСНТИ) в XI пятилетке во ВНИИМС совместно с ведущими метрологическими НПО и НИИ Госстандарта СССР была разработана автоматизированная система научно-технической информации по метрологии и измерительной технике АСНТИМ-2 [3].

Указанная система включает в себя несколько взаимодействующих информационных центров, созданных в шести метрологических НПО и НИИ Госстандарта СССР. Каждый из информационных центров обеспечивает информационное обслуживание специалистов в соответствии со специализацией своей организации, используя современные ЭВМ и эффективные информационно-поисковые системы.

В АСНТИМ-2 документальная информация на магнитных лентах охватывает многие источники информации, среди которых машиночитаемая база данных (БД) РЖ МИТ занимает ведущее место. Создание РЖ МИТ относится к 1966 г. До этого сведения о средствах и методах измерений были рассыпаны (как впрочем и сейчас) по многочисленным отраслевым РЖ ВИНТИ (свыше 160 наименований). Такое положение к упомянутому периоду уже перестало соответствовать требованиям времени, времени быстрого развития научно-технической революции, превращения науки непосредственно в производительную силу. Разработка принципиально новой техники и технологии стала возможной лишь на основе глубоких научных исследований, а успешное проведение последних требовало опережающего развития новых методов и средств измерений [4]. Отсюда столь повышенный спрос на высокоточную измерительную технику (ее точность повышается на порядок каждое десятилетие), а эта точность не могла быть реализована с помощью традиционных методов. Только принципиально новые конструктивные решения, основанные на широком использовании вычислительной техники и микроэлектроники, дали возможность автоматизировать процесс измерений и обработку его результатов при многократном повышении производительности, точности и воспроизводимости.

На новом этапе развития измерительной техники все более важное значение стал приобретать общегосударственный подход к обеспечению единства измерений, разработке национальных эталонов и образцовых средств измерений, созданию единых методик по эксплуатации и поверке измерительной техники, подготовке кадров метрологов, широкому международному сотрудничеству и др. проблемам. И, что не менее важно отметить, метрология стала формироваться как самостоятельная научная дисциплина.

Очевидно, что освещение указанных выше проблем, носящих общенациональный характер, было возможно только вне рамок отраслевых РЖ ВИНТИ и решение вопроса было найдено в создании отдельного межотраслевого выпуска РЖ МИТ, осуществленного по инициативе известного советского метролога д.т.н. П.Н. Агалецкого, ставшего его первым научным редактором.

Целесообразность издания отдельного выпуска РЖ МИТ нашла скоро подтверждение в весьма большой подписке на него (3200-3500 экз. при средней подписке на РЖ ВИНТИ 900-1000 экз.). В двенадцати номерах журнала за год публикуется около 18 тыс. рефератов, аннотаций и библиографий, два полугодовых патентных указателя и отдельный годовой предметный указатель.

Межотраслевой характер РЖ МИТ нашел отражение в его рубрикаторе, который содержит 16 основных разделов и 769 рубрик. Он не претерпел существенных изменений при введении в действие первого варианта рубрикатора ГАСНТИ в 1982 г.

Первый раздел, отсутствующий в отраслевых РЖ ВИНТИ, дал возможность читателям РЖ МИТ получить сведения о национальных государственных метрологических службах, законодательных актах, регулирующих их деятельность, разработке национальных эталонов и образцовых средств измерений, важнейших теоретических исследованиях по повышению точности измерений и обеспечению их единства, о международном сотрудничестве и деятельности международных метрологических организаций и т.д. В последующих разделах, имеющих по существу общий характер, освещаются вопросы автоматизации и механизации в метрологии, применения ЭВМ и микроэлектроники, вопросы специфики конструирования и технологии в приборостроении, контроля качества и надежности измерительных средств.

Одиннадцать разделов рубрикатора дают информацию о методах и средствах измерения различных физических величин. Их классификация вызвала при подготовке к выпуску отдельного РЖ МИТ большую дискуссию. Часть специалистов предлагала построить рубрикатор по физическим принципам функционирования средств измерения, т.е. механическим, электрическим, оптическим, акустическим и т.д. Однако победила другая точка зрения; построить рубрикатор по измеряемым величинам. Главным аргументом здесь было то обстоятельство, что многие физические величины можно измерять приборами, работающими на самых различных физических принципах. К примеру, параметры потока можно измерять механическими, электрическими, оптическими, акустическими и др. методами, каждый из которых обладает достаточно высокой точностью для конкретных условий измерений. Несколько особое место в рубрикаторе РЖ МИТ занимает раздел "Дефектоскопия", заимствованный из основного раздела 81 рубрикатора ГАСНТИ- "Материаловедение", подрубрика - "Испытание материалов. Дефектоскопия". Однако эта обособленность лишь кажущаяся, т.к. в этой подрубрике (а в РЖ МИТ она является разделом) освещаются измерительные приборы неразрушающего контроля, по применению своему имеющие универсальный, межотраслевой, а лучше сказать всеотраслевой характер.

При разработке рубрикатора ГАСНТИ не удалось полностью избежать ведомственного влияния на его содержание и однозначности подхода к термину "измерение", что существенно затрудняет комплектование РЖ МИТ на стадии предварительной разметки потока первоисточников и работу отраслевых органов информации, формирующих свои базы данных на основе машиночитаемых БД ВИНТИ. Так, в первом варианте рубрикатора ГАСНТИ "Метрология" была включена в раздел "Стандартизация" лишь потому, что метрологические учреждения страны находятся в подчинении Госстандарта СССР. По характеру же выполняемых задач органы стандартизации и метрологические учреждения являются совершенно самостоятельными и различными. Этот сугубо ведомственный акцент был снят во втором варианте рубрикатора ГАСНТИ (1984 г.). Однако при этом осталось ненужное на наш взгляд почти полное дублирование между разделами 90 "Метрология" и 59 "Приборостроение".

В пользу устранения указанного дублирования говорит и тот факт, что рубрики 90 раздела используются для классификации документальных фондов в Государственной метрологи-

ческой службе и для ведения Государственного реестра средств измерений, кроме того, в официальных изданиях Госстандарта на основе этого реестра, а также при формировании ежегодного указателя "Нормативно-технические документы в области метрологии". Что же касается вопросов специфики конструирования и технологии приборостроения, а также экономики и организации производства, то оказывается, что и они отражаются в рубрике 90.

Таким образом, имеются все основания при дальнейшем совершенствовании рубрикатора ГАСНТИ рассмотреть возможность полного слияния разделов "Метрология и измерительная техника" и "Приборостроение".

Возвращаясь к рассмотрению рубрикатора РЖ МИТ следует отметить, что его авторы не имели намерения собрать на страницах одного журнала все огромное разнообразие измерительной техники и методов измерений, т.к. нецелесообразно лишать читателей отраслевых РЖ ВИНТИ возможности получить информацию в своем журнале о специфической применяемой только для данной отрасли измерительной технике.

Указанная проблема в определенной мере была решена системой отсылок. Так, в РЖ МИТ публикуется 29 отсылок на другие РЖ ВИНТИ. К примеру, ссылка 8 гласит - "публикации по дальномерам и геодезическим приборам. см. выпуск РЖ "Геодезия и аэросъемка"; публикации по сейсмографии см. вып. РЖ "Физика земли" и т.д.

Итак, казалось бы, намечено довольно четкое разграничение: РЖ МИТ дает информацию о средствах и методах измерений общего, универсального назначения, а отраслевые РЖ освещают только специфически отраслевую измерительную технику, сконструированную с учетом особых, присущих только отраслевой технологии, условий проведения измерений. Однако в рубрикаторе ГАСНТИ подобное, отчасти реализованное разграничение не нашло четкого отражения, т.к. его структура, в основу которой был положен принцип строгой иерархии, в ряде случаев, носит черты полииерархичности [6]. Это приводит к тому, что в ряде разделов наблюдается полное дублирование РЖ МИТ. Например, в разделе 31 "Астрономия" имеется рубрика "приборы для измерения времени". В разделе 47 "Радиотехника" аналогичная рубрика "измерение времени".

В других разделах используется рубрика - измерение (разделы 45 "Электротехника", 50 "Автоматика и телемеханика", 53 "Металлургия"), которую можно толковать в широком смысле. И только в разделе 29 "Физика" дается более

четкая дефиниция: механические измерения в физическом эксперименте, электрические и магнитные измерения в физическом эксперименте.

Приведенная выше терминологическая неопределенность приводит к неоправданному дублированию, рассеиванию публикаций, к уже упомянутым трудностям при разметке первоисточников, а также затрудняет и удорожает поиск информации по машиночитаемым БД. Так, в системе АСНТИМ-2 вследствие распыленности информации по измерительной технике по многим выпускам РЖ ВИНТИ вынуждены использовать 20БД, дублирование в которых достигает 20-25%.

Все вышесказанное приводит к выводу о необходимости дальнейшего улучшения рубрикатора ГАСНТИ с целью более четкого терминологического определения понятия отраслевой и межотраслевой измерительной техники. Поясним это предложение примером.

Так, реферат на статью, описывающую прибор для измерения силы давления валков прокатного стана, должен быть помещен в РЖ "Металлургия". Соответственно прибор для измерения усилия резания на токарном станке - в РЖ "Станкостроение" и т.д. Рефераты на приборы для измерения силы без указания их конкретного применения, т.е. универсальные, должны публиковаться только в РЖ МИТ. Это предложение может быть реализовано только в том случае если в разделах рубрикатора ГАСНТИ, а следовательно и в рубрикаторах отраслевых РЖ ВИНТИ, рубрики, касающиеся измерительной техники, будут выглядеть однообразно и читаться следующим образом: специфические отраслевые измерения (а для получения информации по универсальным средствам и методам измерений будут даваться отсылки на РЖ МИТ).

В перспективе при большем оснащении вычислительной техникой, уточнении рубрикатора ГАСНТИ, усовершенствовании системы кодирования в ВИНТИ, обладающем базой более 4 млн. документов, целесообразно было бы организовать генерирование единой проблемной БД по метрологии и измерительной технике, освободив отраслевые институты информации от необходимости создавать свои документальные банки данных. При этом только на устранении дублирования будут сэкономлены большие средства [5].

Как показывает зарубежный и отечественный опыт, обработка огромных потоков научно-технической информации с высокой оперативностью и эффективностью возможна только при максимальной автоматизации технологических процессов

на основе широкого использования ЭВМ и других достижений современной электроники и репродукционной техники. Так, например, автоматизированный вывод на микроносители сокращает затраты на получение информации на 75-95%, хранение информации на 98%. При этом существенно экономится время. За час можно снять на микрофиши до 30 тыс. строк текста, а на АППУ за это же время можно распечатать лишь до двух тысяч страниц текста.

Используя самую современную технику успешно функционируют на коммерческой основе крупнейшие информационные центры западных стран, такие как American Physical Institute - API; Institute for Scientific Information - ISI; Chemical Abstracts Service - CAS, ORBIT, DIALOG (США), INSPEK (Великобритания), Чагп (Канада), PASCAL (Франция) и др. [6].

Первые шаги по созданию ГАСНТИ (головная организация ВИНТИ) на базе использования ЭВМ были предприняты еще в IX пятилетке. За прошедшее с тех пор время проделана значительная работа. Во всесоюзных, центральных отраслевых, республиканских, территориальных отраслевых центрах создано или усовершенствовано более 100 АСНТИ. Резким скачком в автоматизации ретроспективного поиска в информационных фондах ГАСНТИ явилось создание распределенного банка данных и документов. В настоящее время работают 22 обслуживающих центра, объединенных в единый комплекс, где на дисковых накопителях сосредоточен фонд ретроспективных баз данных по различным видо-тематическим профилям, общий объем которых достиг 12 млн. записей [7].

По своей оснащенности современной техникой органы ГАСНТИ существенно отстают от зарубежных информационных служб. Тем не менее и в их практике автоматизированная обработка информации дает ощутимый эффект. Приведет в качестве примера упомянутую систему АСНТИМ-2, являющуюся одним из элементов ГАСНТИ. До ввода ее в эксплуатацию для подготовки библиографического указателя традиционным методом по теме НИР требовалось от двух недель до 1,5 месяцев и более. Использование машиночитаемых БД в АСНТИМ-2 позволило сократить эти сроки до 2-4 ч в среднем.

В начале восьмидесятых годов все РЖ ВИНТИ наряду с выпуском их в традиционном виде стали продаваться абонентами в виде записанных на магнитную ленту машиночитаемых БД. Машиночитаемая БД РЖ МИТ поступила в пользование потребителям в 1985 г.

В начале БД имела библиографические описания и ключевые слова. С 1987 г. к ним были добавлены рефераты. Для координатного индексирования документов, т.е. сопровождения их поисковыми образами, был подготовлен словник. При этом, в качестве методической основы был взят ГОСТ 7.25-80, а в качестве словарной основы Предметный указатель к РЖ МИТ и четырехтомный тезаурус по метрологии и измерительной технике, разработанный ВНИИМС.

По мере накопления опыта индексирования словник неоднократно дорабатывался и сейчас вышел в свет его четвертый вариант, содержащий около 3300 словарных единиц и представляющий собою алфавитный перечень дескрипторов и недескрипторов.

Практика использования словника показала, что его словарного запаса вполне достаточно для составления поискового образа к каждому документу в среднем от 5 до 8 ключевых и вспомогательных слов. Однако совершенное написание поискового образа вызывает определенные затруднения и вызваны они необходимостью соблюдения в его словарном составе лексико-грамматических связей. Последние же нужны для решения (наряду с поиском по магнитной ленте запрашиваемой потребителем информации) второй важной задачи – машинной подготовки предметного квазипермутационного указателя к РЖ, что позволило существенно сократить сроки его выпуска.

Возникшая проблема требует дополнительного изучения и сравнения практики индексирования, принятой в ВИНТИ, с практикой некоторых зарубежных информационных служб, использующих простой набор слов, отражающий содержание документа. Пока же несовершенство поисковых образцов документов вынуждает информационные центры при формализации запроса использовать при поиске информации кроме ключевых слов индекс рубрикации и реферат, что вызывает дополнительные затраты. Решение затронутой проблемы возможно будет найдено в автоматическом индексировании текста документа. Положительные результаты в этом направлении получены в информационной службе NASA (США). Электронная версия тезауруса NASA отличается от печатной отсутствием связей между общими и более узкими по содержанию терминами. Автоматическое индексирование заключается в выборе с помощью ЭВМ ключевых слов с использованием алгоритмов грамматического текста и перевод их в дескрипторы разработанного лексикографического словаря [8].

Применение ЭВМ в практике работы ВИНТИ позволяет не только генерировать БД, но и анализировать их, а соответственно, и РЖ по многим параметрам для принятия необходимых мер по их улучшению. В нижеприведенных таблицах 1, 2 и 3 приведены результаты машинного анализа РЖ МИТ за 1987 г.

Таблица 1

Распределение потока документов по типам первоисточников

Тип первоисточника	Среднегодовой, %
Статьи из журналов, препринты	43,0
Статьи из сборников	12,1
Книги, сборники, многотомники	0,8
Патентные документы	43,5
Депонированные рукописи (сборники)	1,2
Диссертации	-
Стандарты	0,3

Таблица 2

Распределение потоков документов по языкам

Язык первоисточника	Среднегодовой %
Русский	38,9
Английский	27,4
Немецкий	15,6
Французский	2,7
Японский	7,0
Прочие языки	8,4

Данные, приведенные в первой таблице, наглядно говорят о преобладающих источниках наполнения – это статьи из журналов и патенты. По поводу последних ведется многолетняя дискуссия о целесообразности публикации их реферативного изложения на страницах РЖ ВИНТИ. Противники публикации ссылаются при этом на наличие специализированной магнитно-

Таблица 3

Распределение потока документов по странам создателям документов

Страна	Среднегодовой %
СССР	38,5
США	15,8
Великобритания	11,9
Франция	2,6
ФРГ	11,4
Япония	7,1
ЧССР	2,3
ПНР	2,5
ССР	0,6
ГДР	5,1
НРБ	0,6
ВНР	0,6
прочие	0,6

ленточной службы патентной информации, являющейся одним из главных звеньев ГАСНТИ и позволяющей формировать БД отраслевых информационных органов. Эта точка зрения разделяется, в основном, абонентами машиночитаемых баз данных. Другая противоположная точка зрения единодушно высказывается читателями традиционных РЖ ВИНТИ, в том числе и читателями РЖ МИТ на многочисленных читательских конференциях, систематически проводимых в крупнейших научных и промышленных центрах страны.

На наш взгляд высказывание читателей РЖ о целесообразности публикации патентных материалов весьма аргументировано. В самом деле, одно из важнейших достоинств любого РЖ заключается в том, что он предоставляет читателю возможность следить за тенденциями развития той или иной научной идеи, научного направления, раздела или даже целой отрасли науки, а в прикладных (технических) дисциплинах сле-

дить и за конструктивным воплощением научной или технической идеи, проявляющим себя в первую очередь в патентной литературе.

Именно с целью скорейшего ознакомления заинтересованного потребителя с конструктивной реализацией научно-технических идей в Японии организовали весьма оперативную информацию о так называемых акцептированных заявках на изобретения, т.е. прошедших предварительную неполную экспертизу. Так как полная патентная экспертиза стоит довольно дорого и продолжается долго, то автор изобретения, как правило, начинает хлопоты о получении патента только в том случае, если его акцептированная заявка вызвала интерес со стороны какой-либо фирмы.

В этом успешно развивающемся начинании Японии, которое намереваются перенять и некоторые другие страны, явно видно стремление ускорить научно-технический прогресс благодаря возможности одновременно следить за траекторией движения идей в периодической научно-технической литературе, и за траекторией движения их конструктивного воплощения в акцептированных заявках. Патентная же литература, публикации которой появляются спустя 1-2 года с начала подачи заявки, будут выполнять в основном юридические функции для проверки заявок на патентную чистоту.

Принимая во внимание значительный вклад Японии во многие отрасли науки и техники и, в частности, в развитие измерительной техники, редакция РЖ МИТ сочла необходимым существенно увеличить публикацию рефератов на японские акцептированные заявки. Так, например, если за вторую половину 1987 г. их было опубликовано всего лишь 303, то за первое полугодие 1988 г. свыше 800.

Рассмотрим теперь второй, столь же представительный компонент потока, в состав которого входят статьи из журналов и который, как это следует из табл. 1, наравне с патентной литературой составляет 43% от общего поступления. К сожалению эта цифра за последние пять лет по существу не выросла и говорит о довольно тревожном положении с новыми поступлениями журнальной литературы, которые явно отстают от темпов роста потока мировой периодики.

Однако в большей мере хотелось бы обратить внимание не на количественную сторону дела, а на качественную. Научно-и особенно техническая периодика капиталистических стран заметно обеднела и причин здесь несколько. Это, во-первых, усиление цензуры (что особенно практикуется в США) с целью

воспрепятствовать публикации результатов научных и технических исследований, наиболее перспективных с точки зрения их технологического выхода, и, таким образом, преградить им доступ в социалистические страны. Во-вторых, обострение конкуренции на международных рынках вынуждает фирмы держать в строжайшем секрете производственную информацию и давать в технические журналы сведения о своей продукции в основном рекламного характера. И, наконец, третья причина заключается в финансовых трудностях издателей журналов (повышение производственных расходов, падение подписки и т.д.), что заставляет их искать новые формы подачи информации и связи с читателями. Это находит выражение во все увеличивающемся количестве журналов, переходящих на систему депонирования. За более подробную информацию по краткой публикации на страницах журнала следует платить дополнительно. Приведем лишь несколько наименований журналов практикующих депонирование: "Labor Praxis", "EDN", "Plant Engineering and Maintenance", "Elektronik praxis", "Radio Electronics", "Technik Heute" и др. Реферирование кратких рекламных сообщений (а их особенно много по измерительной технике в силу ее многообразия) нецелесообразно, т.к. для нашего читателя исключается возможность получения полных депонируемых рукописей за валюту. Очевидно, следует искать какие-либо другие пути сотрудничества с подобными журналами на безвалютной основе.

Данные таблиц 2 и 3 позволяют судить о языковой характеристике и географии потока документов, реферируемых в РЖ МИТ. Как видно, свыше 60% их публикуются на иностранных языках. Следовательно, если принять во внимание еще далекое от совершенства состояние наших служб получения фотокопий первоисточников и их перевода, то становится очевидной другая, важная роль РЖ, как инструмента в преодолении языкового барьера. В этой связи читателю РЖ, а особенно периферийному, далеко не безразличен объем реферата, позволяющий референту оптимально изложить, а читателю понять основное содержание первичного документа.

Многолетняя практика работы ВИНТИ показывает, что средний объем реферата должен составлять примерно 800-900 знаков. В ряде же случаев до 1600 знаков при особо сложных текстах. Оптимальный объем реферата оказался весьма важным и для автоматического индексирования [9]. Поэтому дальнейшее сокращение объема реферата из каких-либо соображений, например, экономии бумаги, и превращение их в

аннотации, что характерно для практики большинства зарубежных РЖ в условиях нашей страны при недостаточной языковой подготовке специалистов нецелесообразно [10].

Расширение парка ЭВМ и электронного набора в практике работы ВИНТИ и его Производственно-издательского комбината позволит, начиная с 1989 г., значительно улучшить поисковый аппарат РЖ МИТ. Так, в каждом его ежемесячном выпуске наряду с рефератами будут публиковаться указателя - авторский, патентный и использованных журналов. Последнее особенно важно, так как позволит усилить контроль за поступлением первоисточников, их информационной емкостью и правильностью разметки помещенных в них статей. В дополнение к годовому предметному указателю РЖ МИТ будет выходить авторский указатель.

Выше уже упоминались некоторые крупные зарубежные информационные службы, которые также выпускают РЖ или по отраслевым научным направлениям или по многоотраслевым (например, французская информационная служба ПАСКАЛЬ). Сравнение зарубежных РЖ ВИНТИ в области химии, приведено в работе [11]. Что же касается области метрологии и измерительной техники, то РЖ МИТ имеет преимущество по основному параметру - комплексному подходу в освещении метрологии как самостоятельной научной дисциплины и измерительной техники в ее межотраслевом понимании. Такой подход и позволил создать в свое время отдельный выпуск РЖ МИТ, в то же время как в зарубежных РЖ метрологии и измерительной техники отводятся в общем рубрикационном ряду лишь небольшие разделы.

ВЫВОДЫ

1. Более чем двадцатилетний период существования РЖ МИТ показал полную целесообразность его издания в виде самостоятельного выпуска, отвечающего своим содержанием увеличению роли метрологии и измерительной техники в эпоху научно-технической революции.

2. Имеются существенные резервы по улучшению содержания РЖ МИТ за счет более четкого определения понятия межотраслевой и отраслевой измерительной техники и введения этого определения в рубрикатор ГАСНТИ и соответственно в рубрикаторы отраслевых РЖ ВИНТИ.

3. Следует также рассмотреть вопрос о неоправданном, почти полном дублировании рубрик "Метрология" и "Приборостроение" рубрикатора ГАСНТИ.

4. Требуется специального изучения вопрос о путях получения полной информации об измерительной технике в зарубежных журналах, перешедших на систему депонирования.

1. Wo steht die Sensor-Forschung heute? //Elektronikpraxis.- 1988.- 23, № 2,- P. 28-29.
2. Комплексный прогноз развития метрологии - информационная база для разработки проекта проблемного раздела "Стандартизация и метрология" КНПТП СССР на 20 лет/ Научные основы прогнозирования и планирования метрологии. - М. 1987. - С. 4-17.
3. Пинский Ф.С. Основные результаты работ по созданию автоматизированной системы научно-технической информации по метрологии и измерительной технике. Госстандарт СССР. Метрологическая служба в СССР/Науч.-техн. реф. сб. Вып. 12. - 1987. -С. 1-10.
4. Шелест В.П. Приоритетные направления фундаментальных исследований в области метрологии // Измерит. техн. - 1987. - № 17. - С. 3.
5. Кедровский О.В. Неотложные вопросы улучшения качества информационной деятельности // НТИ. - Сер. 1. - 1987.- № 1. - С. 1-4.
6. Кедровская Г.Г., Мшвелидзе А.И., Родионов И.В. Информационное и библиотечное обслуживание на коммерческой основе в капиталистических странах // Обзор НТИ. - Сер. 1. - 1986. - № 8. - С. 13-16.
7. Михайлов А.И. Основные пути развития Государственной автоматизированной системы научно-технической информации // НТИ. - Сер. 1. - 1986. - № 1. - С. 1-4.
8. Buchan Ronald L. Computer aided indexing at NASA//Ref. Libr.- 1987. - № 18. - С. 269-277.
9. Бондарь В.В., Мельникова М.М., Устинова З.С., Черный А.И. Об оптимальном объеме реферата в реферативных журналах и машиночитаемых базах данных // НТИ. - Сер. 1. - № 8. - 1986. - С. 24.
10. Лепехов Ю.Г. Пути повышения эффективности использования зарубежной научно-технической литературы // НТИ. - Сер. 1 - 1986. - № 10. - С. 12.
11. Кочетова Э.К., Потапов В.М. Некоторые сравнительные данные о реферативных журналах "Химия" и "Chemical Abstracts" // НТИ. - Сер. 1. - 1986. - С. 24-26.

Выпуски и тома серии, опубликованные ранее:

1. Метрология и измерительная техника. 1968, М., 1969.
2. Метрология и измерительная техника. Том. 2. М., 1972.
3. Метрология и измерительная техника. Том. 3. М., 1975.
4. Метрология и измерительная техника. Том. 4. М., 1979.
5. Метрология и измерительная техника. Том. 5. М., 1982.

Сычев Е.И. <u>Интеллектуализация измерительной техники</u>	
Введение	3
1. Общие направления автоматизации измерительной техники	3
2. Интеллектуальные измерительные преобразователи . .	18
3. Интеллектуальные измерительные приборы	38
4. Использование искусственного интеллекта в измери- тельных системах	53
5. Интеллектуализация средств контроля и испытаний . .	63
Выводы	72
Литература	74
Корнеева Т.В. <u>Методы и средства воспроизведения</u> <u>единиц основных физических единиц</u>	
Введение	78
1. Длина	80
1.1. Метод, основанный на использовании длины земного (парижского) меридиана	80
1.2. Метод, основанный на использовании стабиль- ности частоты атомных переходов	81
1.3. Метод, основанный на использовании уточненно- го значения скорости света в вакууме	81
2. Масса	85
2.1. Метод, основанный на использовании "вещест- венного" прототипа килограмма	85
2.2. Методы, основанные на использовании фунда- ментальных физических постоянных	90
3. Время	91
3.1. Метод, основанный на использовании вращения Земли вокруг своей оси	91
3.2. Метод, основанный на использовании движения Земли вокруг Солнца	92
3.3. Метод, основанный на использовании измере- ний частоты перехода атома цезия - 133	92
4. Сила тока и другие электрические величины	97
5. Термодинамическая температура	103
6. Сила света	107
7. Фундаментальные физические постоянные и эталоны	110
Выводы	112
Литература	113

Сорокин Ю.Н. Состояние и перспективы развития информационного обслуживания в области метрологии и измерительной техники

Введение	117
Выводы	129
Литература	131

Технический редактор М.В. Чумак Корректор Л.Б. Окунькова

Сдано в набор 16.08.88

Подписано в печать 08.08.88	Т - 14286
Формат 60×90 1/16	Бум. офс. Печать офсетная
Усл.печ. л. 8,5	Усл.-кр.отт. 8,69 Уч.-изд.л. 7,58
Тир. 1200 экз.	Зак. 6351 Цена 90 коп.

Адрес редакции: 125219, Москва, А-219, Балтийская ул., 14
Тел. 155-43-50

Производственно-издательский комбинат ВИНТИ
140010, Люберцы 10, Московской обл.,
Октябрьский проспект, 403

УДК 681.2:681.3

Сычев Е.И. Интеллектуализация измерительной техники. // Итоги науки и техн. ВИНТИ. Сер. Метрология и измерительная техника. - 1988. - 6. - С. 3 - 77

Обзор. Приведен анализ состояния и направлений развития интеллектуальной измерительной техники, раскрыты типовые технические приемы автоматизированного решения интеллектуальных задач в измерительных преобразователях и приборах, в контрольно-измерительных системах. Прослеживается новая роль вычислительной техники в измерительной технике, построенной на принципе ее интеллектуализации. Ил. 31. Библ. 41.

УДК 389

Корнеева Т.В. Методы и средства воспроизведения единиц основных физических величин. // Итоги науки и техн. ВИНТИ. Сер. Метрология и измерительная техника. - 1988. - 6. - С. 78 - 116

Обзор. Проведен анализ методов и средств воспроизведения единиц основных физических величин, разработанных в национальных метрологических организациях промышленно развитых стран в свете современных требований науки и производства; выявлены тенденции их развития. Ил. 1. Библ. 44.

УДК 389:002.6

Сорокин Ю.Н. Состояние и перспективы развития информационного обслуживания в области метрологии и измерительной техники. // Итоги науки и техн. ВИНТИ. Сер. Метрология и измерительная техника. - 1988. - 6. - С. 117 - 131

Обзор. Рассматриваются становление, структура, состояние и перспективы развития межотраслевого Реферативного журнала ВИНТИ "Метрология и измерительная техника" и проблемы, связанные с совершенствованием рубрикатора ГАСНТИ Табл. 3. Библ. 11.

Список опечаток по сборнику Итоги науки и техники
«Метрология и измерительная техника», том 6, 1988 г.

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
9	2 сверху	него (ЧССР) разряда части схемы	всего (ПНР) разряда до момента сра- батывания компаратора и является выходом ча- сти схемы
10	11 сверху		
32	4 снизу		
41	4 снизу	рис. 20а	рис. 20 (сплошная ли- ния)
41	3 снизу	рис. 20б	рис. 20 (пунктирная ли- ния)
52	13 сверху	хроматографии	хроматограммы
52	18 сверху	хроматограммы	гипотезы
54	2 снизу	Рис. 24. Структура изме- рительных систем...	Рис. 27. Варианты по- строения измерительной системы в стандарте КАМАК: а) параллель- ная система, б) магист- ральная система, в) по- следовательная магист- ральная организация, г) индивидуальный крейт КАМАК
57	4 снизу	Рис. 27. Варианты по- строения...	Рис. 24. Структура из- мерительных систем: а) неавтоматизирован- ных, б) автоматизиро- ванных.
73	3 снизу	прогнозированию результаты эталонов	программированию результаты свидетельст- вуют о возможности усовершенствования эта- лонов...
109	3 снизу		