

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

В.Н. Алферов

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Учебное пособие

Москва 2008

УДК 539.1.07(075)

ББК 22.38я7

А 53

Алферов В.Н. Системы управления электрофизическим оборудованием: Учебное пособие. М.: МИФИ, 2008. – 184 с.

В учебном пособии излагаются основы построения систем управления средними и крупными физическими и промышленными установками, в том числе ускорителями.

Последовательно анализируются все составные части систем управления: датчики физических параметров, электроника первичной обработки данных, полевые магистрали, ЭВМ обработки данных и локальные сети. Особое внимание уделяется практическим аспектам, таким как корректность измерения, подавление помех, оптимальный выбор аппаратных и программных средств.

Предназначено для студентов МИФИ, обучающихся по специальности «Электроника и автоматика физических установок» по курсу «Автоматизация научных исследований и электрофизических установок».

Пособие подготовлено в рамках Инновационной образовательной программы.

Рецензент *В.И. Зайцев* (ТРИНИТИ, г. Троицк).

ISBN 978-5-7262-0934-9

© *Московский инженерно-физический институт
(государственный университет), 2008*

Редактор *Шумакова Н.В.*

Оригинал-макет изготовлен *Тяпиной С.В.*

Подписано в печать 02.10.2008 Формат 60×84 1/18

Печ. л. 11,5 Уч.-изд. л. 12,0 Тираж 150 экз. Изд. №4/122 Заказ № 1-2067

Московский инженерно-физический (государственный университет) 115409, Москва,
Каширское шоссе, 31.

Типография «Тровант», г. Троицк, Московской обл.

Оглавление

Введение	5
Глава 1. Основные параметры электрофизического и промышленного оборудования и анализ требований к системам управления	12
1.1. Основные параметры и характеристики исследуемого и управляемого электрофизического оборудования	12
1.2. Анализ требований к системам управления электрофизическим и промышленным оборудованием	16
Глава 2. Измерение физических величин	20
2.1. Измерение характеристик магнитов	20
2.2. Акселерометры	26
2.3. Измерение давления	34
2.4. Измерение вакуума	35
2.5. Измерения относительной влажности	40
2.6. Измерения линейных перемещений	45
2.7. Измерения угловых перемещений	49
2.8. Измерение уровня	52
2.9. Ультразвуковые методы измерений	53
2.10. Измерения расхода жидкости и газа	63
2.11. Измерение химического состава	71
2.12. Оптоволоконные методы измерений	82
2.13. Нанодатчики и актюаторы	92
2.14. Проблема достоверности измерений	99
Глава 3. Заземление. Помехи в измерительных цепях	101
3.1. Заземление аппаратуры	101
3.2. Гальваническая развязка	107
3.3. Помехи в измерительных цепях	108
3.4. Методы заземления	116
Глава 4. Обработка аналоговых сигналов микроконтроллерами. Выбор и задачи микроконтроллеров	125

4.1.	Простые программируемые логические контроллеры	128
4.2.	Контроллеры Analog Device	134
Глава 5.	Полевые магистрали.....	138
5.1.	Стандарт CAN.....	139
5.2.	Стандарт RS-485	147
5.3.	Стандарт PROFIBUS	147
5.4.	Стандарт MIL-STD-1553	149
5.5.	Беспроводные магистрали	153
Глава 6.	Архитектура систем управления.....	158
6.1.	Конфигурация системы.....	158
6.2.	Операционные системы управляющей ЭВМ.....	161
6.3.	Прикладное программное обеспечение системы	165
6.4.	Открытые системы управления.....	177
6.5.	Тенденции развития систем управления	178
	Список литературы	181

ВВЕДЕНИЕ

Предмет данного курса – системы управления электрофизическим оборудованием. Масштаб объекта – от отдельных интеллектуальных измерительных приборов до средних объектов (1 000 – 10 000 точек контроля) и крупных (свыше 10 000 точек).

Рассматриваются только системы, связанные с компьютерной обработкой сигналов. Можно выделить основные свойства таких систем:

- многоуровневая структура с тремя явно выраженными уровнями: информационный, системный и коммуникационный;
- обширный набор разнообразных, адекватных задачам контроллеров;
- взаимодействие с другими системами, например, диспетчерскими системами более высокого уровня или аналогичными системами других цехов и т.д.;
- развитое программное обеспечение (ПО), включающее операторский интерфейс, набор технологических языков с типовыми программными модулями, типовые пакеты программ для контроля и управления типовыми агрегатами, диспетчерское управление, технический учет и планирование, системы автоматизированного проектирования, архив и др.

Поскольку современные датчики различных физических величин, как правило, формируют выходной электрический сигнал, пропорциональный величине (или логарифму величины) измеряемого сигнала, системы управления не несут отпечатка свойств объекта, они различаются количеством и параметрами измеряемых сигналов и сложностью обработки. В этом смысле мало отличаются друг от друга системы управления электрофизическим и технологическим оборудованием. Это сходство зачастую усугубляется и сходством объектов управления, например, набор оборудования для получения жидкого гелия для сверхпроводящего ускорителя мало отличается от оборудования завода по ожижению природного газа.

Опыт показывает, что в реальных системах управления на один канал управления приходится не менее десяти измерительных каналов, т.е. система управления осуществляет, главным образом, сбор, обработку и целевой контроль данных. Более того, как пра-

вило, заказчик на этапе формирования технического задания на систему управления еще не способен сформулировать алгоритмы автоматического управления, и зачастую закладывается только управление с клавиатуры ЭВМ на основе анализа данных, которое впоследствии заменяется программой автоматического управления данным контуром обратной связи. Поэтому большое внимание в курсе уделено измерениям электрических и неэлектрических величин, особенно тех, которые не рассматривались в других курсах. При этом рассматриваются не только распространенные в настоящее время измерения, но и перспективные измерительные технологии, такие как волоконная оптика и нанотехнологии. Приведенные в этом разделе материалы представляют, в основном, компиляцию из опубликованных технических источников.

Подбор и расположение глав соответствует движению от источника сигнала к оператору, поэтому после главы об измерениях идет глава о доставке сигнала к контроллеру, затем глава о работе контроллеров, о связи их с ЭВМ и так далее.

Определение системы управления. Границы системы

В последние десятилетия сформировалась «стандартная модель» системы управления. Именно в соответствии с ней и составлен курс. За развитием этой модели можно проследить по материалам международных конференций по системам управления ускорителями и большими физическими установками ICALEPCS, проводимыми каждые два года, а также по публикациям в ряде профессиональных журналов.

Если мысленно проследить за траекторией сигнала от датчика через центр обработки и принятия решений до управляющего сигнала на исполнительном механизме, то можно сказать, что все это время сигнал обрабатывался системой управления. Граница снизу, т.е. граница между оборудованием и системой управления (СУ), иначе говоря, граница ответственности между заказчиком и исполнителем СУ определяется по договоренности. Разработчик СУ заинтересован в правильном выборе датчика, а также типе и способе прокладки соединительного кабеля, но не заинтересован нести ответственность за сохранность датчика и кабеля. В этом случае границей между оборудованием и СУ может быть кросс-панель шка-

фов управления. С другой стороны, часто бывает целесообразно располагать контроллеры непосредственно у датчиков, иметь цифровую связь с контроллерами, особенно в условиях сильных помех. В этом случае граница смещается в сторону оборудования. То же касается и границы с оборудованием на стороне управляющих сигналов.

Что касается границы сверху, то она представляет собой операторскую консоль управления, т.е. операторскую ЭВМ с дополнительными экранами, если необходимо, а также всякие демонстрационные табло, пульта местного управления, машинный интерфейс с верхним, например, диспетчерским уровнем управления.

Краткий исторический обзор развития систем управления ускорителями в зарубежных центрах

Европейский центр ядерных исследований (ЦЕРН) и ускорительные лаборатории США начали разработки своих систем управления сразу после появления первых мини-ЭВМ в начале 70-х годов прошлого века.

В ЦЕРН работы начались с автоматизации источников питания различных магнитных элементов комплекса протонного синхротрона CPS [1-3]. Таких источников насчитывалось около 1200, они были территориально разнесены, отличались большим разнообразием, частично поставлялись фирмами, частично изготовлены в ЦЕРН. В числе первых разработок была и аларм-система (аварийная система) для контроля отказов ускорителя [4].

При автоматизации комплекса PS использовались в основном мини-ЭВМ семейства DEC [5]. В качестве интерфейсной аппаратуры применялся, в основном, широко распространенный к тому времени КАМАК [6-8].

В ходе работ были созданы коммуникационные системы STAR [9] и DTS [10]. Применялась также и последовательная магистраль на основе международного стандарта КАМАК [11].

Эти коммуникации еще не были прообразом будущей полевой магистрали, они только реализовывали функцию связи компьютера с удаленным оборудованием с помощью минимального количества фидеров. Соответственно, эта система управления не являлась системой с распределенным интеллектом, так как даже отнесенные на

расстояние сателлитные ЭВМ выполняли роль всего лишь мультиплексоров головной ЭВМ.

Были сформулированы понятия о различных группах пользователей систем управления и требования к системам со стороны этих пользователей.

Одновременно с автоматизацией комплекса PS ЦЕРН приступил к созданию системы управления ускорительным комплексом на базе суперпротонного синхротрона SPS и большого электрон-позитронного коллайдера LEP. Обе эти работы велись одним коллективом разработчиков и базировались на единых, но несколько отличных от применяемых на комплексе PS принципах. Система контроля SPS показала себя очень удачной разработкой и стала образцом, от которого стартовали разработчики систем управления многими другими ускорителями [12–14].

Здесь уже использовалась иная вычислительная техника – мини-ЭВМ фирмы Norsk Data Nord-100 со специализированным языком программирования NODAL.

Разработчики под руководством Crowley-Milling создавали систему уже с распределенной обработкой данных [15], аналогичную системе, впервые созданной в BNL, США.

Базовый набор аппаратно-программных средств включал в себя: микропроцессоры серии Motorola 68000; шину VME; систему Модула-2 [16], которая использовалась как язык системного программирования на верхнем уровне; стандарт G-64; микропроцессоры Motorola 6809; язык Паскаль [17] на уровне управления аппаратурой.

Система включала в себя 30 мини-ЭВМ NORD-100, две из которых использовались только для передачи сообщений между остальными. Сеть простиралась на 5 км и работала на частоте 1 МГц. Система обеспечивала контроль 60 000 параметров и 6 100 управляющих воздействий. В составе интерфейсной аппаратуры впервые были применены микропроцессоры, что потребовало совершенствования коммуникационного протокола.

Опыт эксплуатации систем управления SPS и PS позволил провести четкую декомпозицию по элементам системы, и на ее основе предложить идею использования вместо мини-ЭВМ сборки микропроцессоров, составляющих узел в сети управления (Process Con-

trol Assembly, PCA). В PCA сосредоточены функции трех уровней системы управления:

- уровень сети,
- уровень управления процессом,
- уровень оборудования.

Каждая из этих функций реализуется одним или несколькими аппаратными блоками, содержащими микропроцессор М 68000. Принципиальной проблемой явилось объединение почти 60 PCA в единую систему. Поскольку в то время не существовало распределенной операционной системы, был использован существующий в NODAL аппарат пересылки задач из одной ЭВМ в другую для обращения к системным переменным.

При решении задачи контроля систем диагностики выведенных пучков была разработана и применена концепция баз данных оборудования, режимов, обработки и хранения данных [18].

Распределение данных по уровням представлено следующим образом:

- таблица характеристик (атрибутов) аппаратуры на уровне микропроцессора управления аппаратурой (нижний уровень системы управления);
- директории оборудования в PCA;
- библиотечные PCA;
- центральная база данных на мощной ЭВМ.

В качестве центральной базы данных принята база ORACLE [19], остальные базы данных – File Server, Name Server – были написаны.

Весьма важным моментом в определении структуры системы управления, основанной на распределенных процессорах, объединенных в сеть, является связь между элементами системы. Предусмотрены три категории связей:

- взаимодействие внутри одной сети (на уровне PCA);
- взаимодействие с другой сетью, принадлежащей этой же системе управления;
- взаимодействие с другими системами ускорительного комплекса.

Для связи между сетями была использована коммерческая сеть IBM Token Ring [20], а для связи с оборудованием использован

американский военный бортовой стандарт MIL-STD-1553B [21]. Внедрение этой магистрали потребовало значительных усилий по ее изучению и внедрению. Опыт эксплуатации показал правильность этого выбора. Эта магистраль была также применена для интеграции в систему управления покупного оборудования.

Распределенная система управления, т.е. система с распределенной обработкой данных, впервые была применена в США для автоматизации ускорителя AGS, Brookhaven в 1974 году, когда восемь микро-ЭВМ PDP-8 были присоединены к мини-ЭВМ PDP-10 [22].

В лаборатории Lawrence, Berkley в конце 70-х годов 20 в. применили новый подход к использованию вычислительной техники. Вместо построения системы управления вокруг покупной мини-ЭВМ строился набор 16-разрядных микропроцессоров под конкретные задачи. Эти процессоры совместно с электроникой ввода/вывода размещались в модулях магистрально-модульной системы MULTIBUS 1, допускающей многопроцессорную организацию [23]. Была применена также волоконная оптика для коммуникаций, это обеспечивало хорошую гальваническую развязку, хотя высокие скорости передачи не требовались.

Этим же путем создания микропроцессорных кластеров пошли и разработчики системы управления линейного ускорителя SLAC [24].

Учитывая размеры ускорителя, число таких кластеров уже достигало 100. Там также использовались каркасы MULTIBUS в качестве стандартной интерфейсной аппаратуры. В качестве головных ЭВМ применялись машины семейства VAX. Кластеры и ЭВМ соединялись между собой магистралью с протоколом, аналогичным протоколу Ethernet.

Наиболее широким фронтом были развернуты работы по автоматизации в лаборатории FNAL в связи с созданием сверхпроводящего ускорителя Tevatron [25]. Разработка его системы управления потребовала и модернизации СУ действующего комплекса, состоящего из линейного ускорителя 200 МэВ, синхротрона-бустера 8 ГэВ и синхротрона Main Ring 500 ГэВ.

Старая система управления комплексом базировалась на пяти ЭВМ XEROX 530, ответственных за управление отдельными уско-

рителями комплекса. Такое построение системы затрудняло периферийные связи между ускорителями. В начале 80-х годов она была заменена системой из 12 ЭВМ PDP 11-34, соединенных с двумя мощными ЭВМ VAX-780. Чтобы избежать чрезмерной централизации управления, затрудняющей реализацию рутинных процессов управления, в первую очередь, защиту СП-магнитов от перехода в резистивную фазу, реализовано распределенное микропроцессорное управление процессами на местах [26].

Была создана коммуникационная среда – скоростная (10 Мбит/с) малошумящая сеть с двухфазным манчестерским кодом в качестве переносчика информации [27].

Основой интерфейсной аппаратуры для связи центрального вычислительного комплекса с распределенным интеллектом являлся КАМАК. Каркасы КАМАК в 29 зданиях связываются магистралью последовательной передачи данных. Магистраль управляется одной из ЭВМ PDP-11/23. Был разработан интеллектуальный контроллер каркаса КАМАК на основе процессора Zilog-80 [28], на основе этого же процессора были автоматизированы почти все технологические системы, в частности, основа криогенной системы – сателлитный рефрижератор, а также вакуумная система.

Опыт показал, что для быстрых систем производительности 8-разрядного процессора недостаточно, поэтому для систем квенч-защиты был разработан контроллер на базе 16-разрядного процессора Motorola 68000 [29].

Приведенные данные показывают, что уже в 80-годы архитектура систем управления в основном сформировалась, хотя на всех уровнях системы ощущался дефицит качества: низкая разрядность АЦП/ЦАП, малая скорость систем передачи данных, малая мощность микропроцессоров, вынуждающая передавать серьезную обработку данных в ЭВМ, малая мощность самих ЭВМ, неспособная обеспечить сложную обработку и визуализацию данных.

Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОГО И ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ И АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ

Современная ускорительная техника характеризуется большим разнообразием типов ускорителей, в первую очередь, по принципу действия и по назначению, а также по основным параметрам, таким как энергия, интенсивность и пр. Ввиду ограниченности объема настоящего пособия рассматриваются только аспекты так называемого медленного контроля, не охватывающие системы диагностики пучка, ускоряющие структуры электронных и протонных ускорителей. Рассмотрены также измерения наиболее распространенных промышленных параметров.

1.1. Основные параметры и характеристики исследуемого и управляемого электрофизического оборудования (на примере Серпуховского протонного синхротрона У-70)

К основным приборам и системам современных ускорителей относятся:

- магнитные диполи, квадруполь и корректоры теплые и сверхпроводящие;
- коллиматоры пучка частиц;
- каналы транспортировки частиц;
- стенды исследования и испытания магнитов, линз и мишеней;
- криогенное оборудование;
- вакуумное оборудование.

Одним из главных приборов, применяемых при ускорении заряженных частиц и формировании пучков выведенных частиц, является магнитный диполь. К числу параметров, измеряемых при исследовании вновь созданных магнитов, относятся:

- величина магнитного поля;
- отклоняющая сила магнита, т.е. интеграл магнитного поля вдоль магнитной дорожки;
- краевые поля;
- линейность зависимости поля от тока;
- пространственные гармоники поля;

- электрическая постоянная времени;
- накопленная энергия;
- положение медианной плоскости относительно геодезических реперных знаков.

В СП-магните, кроме того, исследуются механические напряжения между слоями обмотки, температура сверхпроводника, динамические потери, регистрируется и изучается квенч-переход, т.е. срыв сверхпроводимости и появление нормальной фазы. При квенч-переходе с целью предохранения от разрушения магнит отключается от источника тока, шунтируется, и из него эвакуируется запасенная энергия.

Как в режиме исследования, так и в эксплуатации допустимая погрешность поддержания тока возбуждения магнита составляет примерно 10^{-4} .

В магнитном квадруполе важной характеристикой также является положение магнитной оси и главных плоскостей, и привязка их к геодезическим реперам. Допустимая погрешность измерения и стабилизации возбуждаемого тока составляет около 10^{-3} .

Коллиматоры пучка предназначены для ограничения поперечных размеров пучка и выделения импульсного интервала при магнитном анализе пучка. Щеки коллиматора снабжаются отдельными приводами с системами измерения положения объекта управления. Требуемая точность позиционирования составляет 0,1 мм, ход одной щеки около 100 мм.

Магнитные диполи, квадруполь, коллиматоры составляют основной инструментарий для формирования выведенных из ускорителя и вторичных пучков частиц.

Заряженные частицы ускоряются и каналируются в вакуумированных ионопроводах. Глубина вакуума составляет для теплых ускорителей величину порядка 10^{-7} Па. В задачи системы управления входит измерение токов магниторазрядных насосов и управления клапанами, перекрывающими вакуумпровод.

Необходимость точных знаний о процессах в сверхпроводящем магните, чувствительность его к качеству криопродукта, т.е. жидкого гелия, длительность захолаживания и отогрева СП-магнита в процессе работы, механические напряжения в нем, сложные процедуры управления при переходе магнита в резистивное состояние, высокая цена простоев ускорителя с СП-магнитами обусловили

необходимость автоматизации криогенного комплекса, обеспечивающего СП-магнит жидким гелием и жидким азотом и соответствующих исследовательских стендов.

Для описания режимов перечисленного оборудования требуется точное измерение десятков разнообразных физических параметров, а для управления этим оборудованием – формирование различных управляющих воздействий.

В табл. 1.1 приведены основные физические параметры, измерение которых требуется при работе с ускорительной техникой, на примере Серпуховского протонного синхротрона У-70, и требуемые при этом точности.

В табл. 1.2 приведен перечень основных управляющих воздействий, которые должны были обеспечивать соответствующие системы управления.

Измерения физических величин, часто встречающихся в промышленности:

- перемещения, линейные и угловые;
- ускорения и вибрация;
- давление и усилия, уровень жидкости, сыпучих тел и газа;
- расход жидкости и газа;
- температура;
- химический состав.

Таблица 1.1

№ по пор.	Измеряемый параметр	Допустимая погрешность измерения	Единицы измерения и диапазон	Примечания
1	Напряжение низкое медленноменяющееся	10^{-4}	0 – 10 В	
2	Напряжение высокое медленноменяющееся	10^{-3}	0 – 50 кВ	
3	Напряжение импульсное высокое	10^{-3}	100 – 300 кВ	Амплитуда и форма
4	Ток постоянный	10^{-4}	0 – 6 кА	
5	Ток импульсный	10^{-4}	0 – 6 кА	Амплитуда и форма
6	Магнитное поле с высокой однородностью	10^{-4}	0 – 6 Т	
7	Краевые магнитные поля	2×10^{-4}	0 – 6 Т	
8	Электрическое сопротивление	10^{-4}	10 – 1000 Ом	

Продолжение табл. 1.1

№ по пор.	Измеряемый параметр	Допустимая погрешность измерения	Единицы измерения и диапазон	Примечания
9	Частота	10^{-5}	$10^{-2} - 10^8$ Гц	
10	Время	10^{-5}	$10^{-5} - 10$ с	
11	Давление газа	10^{-3}	0 – 5 атм	Вторичный прибор
12	Линейное перемещение	0,1 мм	200 мм	
13	Угол	0,1 мрад	360 град	
14	Давление жидкости	10^{-3}	0 – 10^5 Па	Вторичный прибор
15	Дифференциальное давление газа	10^{-3}	0 – 10^5 Па	Вторичный прибор
16	Давление твердых тел	10^{-2}	20 – 800 кг/см ²	Между слоями обмотки магнита
17	Вакуум	10^{-3}	$10^{-11} - 10^5$ Па	
18	Уровень жидкого гелия	10^{-3}	0 – 2 м	Сопротивление СП-провода
19	Расход газа	10^{-3}	0 – 2 м ³ /с	Вторичный прибор
20	Температура	0,1 К	15 – 400 К	Тремя способами
21	Температура	0,01 К	1,8 – 7 К	

Таблица 1.2

№ по пор.	Вид формируемого воздействия	Допустимая погрешность	Динамический диапазон	Примечания
1	Опорное напряжение медленноменяющееся	10^{-4}	0 – 5 В	
2	Опорное напряжение сложной формы (генератор функций)	10^{-4}	0 – 5 В	
3	Постоянный ток стабильной амплитуды	10^{-4}	0 – 10 мА	
4	Регулируемая временная задержка	10 нс		
5	Имитация синхросигналов ускорителя	100 нс	0 – 10 с	

№ по пор.	Вид формируемого воздействия	Допустимая погрешность	Динамический диапазон	Примечания
6	Линейное перемещение	0,1 мм	0 – 200 мм	
7	Угловое перемещение	0,1 град	360 град	
8	Стабилизация температуры датчика	0,1 мрад	4 – 300 К	
9	Управление электродвигателями постоянного, переменного тока, шаговыми		0,1 – 5 кВт	

1.2. Анализ требований к системам управления электрофизическим и промышленным оборудованием

Система управления должна обеспечивать:

- сбор и обработку данных;
- выполнение функций непосредственного управления оборудованием и поддержания режимов;
- оперативную корректировку алгоритмов управления;
- автоматическую защиту и блокировку оборудования в аварийных ситуациях;
- выдачу аварийных сигналов о выходе параметров за допустимые пределы;
- вычисление обобщенных параметров и представление их в удобном для различных пользователей виде;
- обеспечение доступа к элементам оборудования;
- обмен информацией с другими пользователями;
- документирование и ведение архива.

Кроме того, надо учитывать:

- распределенность объектов контроля и управления;
- удаленность объектов;
- количество входов/выходов системы;
- количество и параметры каналов связи;
- обмен данными с другими системами;
- условия эксплуатации, такие как вибрация, диапазон температур, влажность, электромагнитные помехи;
- режим работы (непрерывный, с отключениями);

- необходимость дублирования;
- возможные аларм-ситуации.

Как уже упоминалось, в состав аппаратуры современных СУ входят вычислительные средства, коммуникационные средства, средства сопряжения с объектом измерения и управления (интерфейсная аппаратура).

Вычислительные средства составляют покупные ЭВМ с устройствами ввода/вывода, отображения информации и системного программного обеспечения. Эти средства довольно часто меняются, средний срок жизни их можно оценить в 5–7 лет.

Прикладное ПО чаще всего подвергается изменениям, однако, будучи написанным на универсальных языках (например, С), легко переносится при замене самой ЭВМ или ее системного ПО и может таким образом «пережить» среду своего функционирования.

Средства сопряжения ЭВМ с объектом обеспечивают преобразование измеряемых параметров в форму, удобную для математической обработки. При генерации управляющего воздействия средства сопряжения обеспечивают обратное преобразование, т.е. преобразование команды ЭВМ в форму, необходимую для объекта управления. Функционально они включают в себя следующие основные узлы:

- усилители и нормализаторы сигналов датчиков физических величин;
- мультиплексоры;
- аналого-цифровые преобразователи (АЦП);
- тракты управления исполнительными механизмами;
- цифроаналоговые преобразователи (ЦАП)), усилители;

Интерфейсная аппаратура в составе СУ является наиболее консервативной ее частью со сроком жизни 10-15 лет, а иногда и более, например, на многих ускорителях мира до сих пор работают каркасы КАМАК, установленные в 70-е годы прошлого века с модернизированными контроллерами и коммуникационной частью.

Задачи исследования характеристик электрофизического облучения и управления им во многом совпадают. Например, для того чтобы изучить гармонический состав магнитного поля, необходимо иметь не только набор измерительных индукционных катушек с соответствующей электроникой, приводами, вычислитель-

ной техникой и программами обработки, но и управляемый источник тока с генератором функций, имитирующим цикл ускорителя, систему синхронизации, т.е. почти все, что входит в состав системы управления кольцевым электромагнитом реального ускорителя.

Понятно, что оптимальным решением такого широкого круга задач по исследованию и управлению группами электрофизического оборудования в различных сочетаниях с частично совпадающими требованиями, притом требующих зачастую одновременного решения, было бы создание унифицированного комплекта средств управления с набором электроники, вычислительной техники и программного обеспечения, тиражируемого на разных объектах и дополняемого компонентами, отражающими специфику объекта.

При проектировании конкретной системы управления, прежде всего, вырабатываются требования к ней. Основной задачей СУ является как обеспечение заданных режимов работы объекта в течение всего времени его функционирования, так и обеспечение удобного интерфейса персонала с оборудованием. Отсюда вытекает перечень основных характеристик СУ.

1. Количество измеряемых параметров: оно меняется от единиц при магнитных измерениях до сотни тысяч в СУ УНК.

2. Допустимая погрешность измерения: она колеблется от 10 % при измерении вакуума до 10^{-6} при измерениях токов отклоняющих магнитов.

3. Временные характеристики сигналов колеблются от наносекунд в быстрых АЦП до секунд при измерении криогенных температур.

4. Частота опроса и необходимое время реакции на события: она может колебаться от микросекунд до минут в криогенике или вакуумной технике.

5. Территориальная протяженность объекта, длительность коммуникаций: она может меняться от единиц метров до десятков километров.

6. Потоки данных между частями системы управления в разных режимах работы. Опыт показывает, что наиболее интенсивные потоки данных в коммуникациях вызываются запросами операторов. Именно на такой режим работы должны рассчитываться коммуникационные системы.

7. Время непрерывной работы. Характерным временем непрерывной работы современных ускорителей в течение сеанса являются месяцы.

8. Пользователями системы управления являются:

- физики-исследователи;
- дежурный персонал;
- инженерный персонал, ответственный за оборудование.

Требования к системе управления со стороны этих групп не одинаковы. Для физиков-исследователей результаты измерений должны быть представлены в физических единицах, им необходимы вычислительные средства для обработки данных, обширная база данных, архив. Дежурному персоналу необходима простота управления, не требующая знаний деталей СУ. Инженерному персоналу необходим доступ к самым мелким частям оборудования, иногда местное ручное управление.

Предполагаемые режимы работы:

- «крейсерский», когда СУ в течение длительного времени осуществляет свои функции по управлению установкой,
- тестовый, применяемый при пуско-наладке или поиске неисправности, когда оператор вмешивается в режим работы, беря при необходимости управление на себя,
- исследовательский, когда возможны выходы за границы штатных режимов под контролем физика-исследователя.

Глава 2. ИЗМЕРЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

(Использованы материалы из [30–40])

Весь спектр измерений в современных системах управления включают в себя многие сотни параметров. Измерения любой физической величины возможно, как правило, несколькими, а иногда и многими способами. Современный рынок предлагает датчики от многих производителей. Разработчик систем управления должен ориентироваться в этом разнообразии для того, чтобы сделать правильный выбор. Настоящая глава дает первичное представление о критериях при выборе типа датчика, о возможных искажениях при измерении и о способах избежания таких искажений.

Рассмотрены только основные, наиболее часто встречающиеся в промышленности и электрофизическом оборудовании датчики. Кратко рассмотрены также перспективные технологии при разработке датчиков, даже если сегодня они и не очень распространены. К таким технологиям можно отнести оптоволоконную и нанотехнологию. Не рассматриваются датчики, описанные в других курсах, например, датчики температуры, а также методы измерений, связанные с ручной работой, т.е. не применяемые в системах управления.

2.1. Измерение характеристик магнитов

Магнитооптические элементы обеспечивают функции поворота и фокусировки заряженных частиц. К основным задачам по исследованию характеристик магнитов относятся:

- зависимость индукции поля в зазоре магнитного диполя и градиента поля для фокусирующих линз;
- определение эффективной длины магнитов, в частности, в зависимости от поперечных координат и токов;
- измерение топографии магнитного поля и определение рабочей области магнитооптических устройств, определение гармонического состава поля;
- калибровка различного рода преобразователей с помощью магнитометра, основанного на принципе ядерно-магнитного резонанса (ЯМР);
- температура и внутренние напряжения в магнитах;

- определение долговременной стабильности параметров линз и магнитов, ресурсные характеристики;
- измерения токов магнитов.

Система управления должна обеспечить измерения магнитных полей следующими методиками:

- измерения с использованием ЯМР-магнитометра;
- измерения с помощью датчиков Холла;
- измерения поля индукционными катушками;
- измерения методом натянутой струны.

2.1.1. Измерения с использованием ЯМР-магнитометра

Методика измерений величины магнитного поля с помощью датчика ЯМР является наиболее точной, поэтому она применяется как для измерений однородных полей, главным образом для измерений эффективной длины магнита, так и для калибровки датчиков Холла на специальных калибровочных магнитах. Для измерения магнитного поля с помощью датчика ЯМР необходима подвижная платформа, на которой смонтированы: измерительная головка с датчиком и высокочастотной частью магнитометра, блок управления и блок частотомера. Устройство управления приводами разработано на базе унифицированного замкнутого привода с использованием шаговых двигателей средней мощности. Система управления ЯМР датчиком должна обеспечивать:

- управление высокочастотным модулем датчика с автоматическим поиском резонанса и слежением за ним;
- измерение частоты ЯМР с погрешностью не выше 0,001 % и вычисление соответствующего магнитного поля;
- управление платформой и измерение координат датчика;
- привязку величины поля к координатам датчика.

Ограничением на использование ЯМР-методики является относительная неоднородность поля $2 \times 10^{-4} \text{ мм}^{-1}$.

2.1.2. Измерения с помощью датчика Холла

Датчики Холла применяются для измерения топографии магнитного поля на концах дипольных магнитов, в полях сложной формы, например, в отверстии сплиттер-магнита. Для получения

объемной картины поля датчик Холла перемещается шаговыми двигателями на специальной платформе по четырём координатам. Точность линейного позиционирования 0,1 мм при диапазоне движения по двум координатам, точность углового позиционирования 0,1 мрад. Система управления приводом аналогична системе, описанной в предыдущем разделе.

Система управления должна обеспечивать:

- стабилизацию тока для питания датчика;
- стабилизацию температуры датчика с точностью 0,1 градуса;
- управление перемещением платформы;
- измерение ЭДС датчика с погрешностью не более 0,001 %;
- вычисление значений магнитного поля и привязку их к координатам датчика.

2.1.3. Измерения полей с помощью гармонических катушек

Измерения полей с помощью гармонических катушек (ГК) служат для определения интегральных характеристик магнита. В постоянных магнитах измеряется амплитуда сигнала с вращающихся радиальных ГК при повороте катушки в магнитном поле (до 8 оборотов, 64 или 128 положений на оборот, и 15 уровнях тока). В случае импульсных магнитов измеряется интеграл поля по времени также для ряда угловых ориентаций катушки и ряда значений тока. Система управления должна обеспечивать:

- управление вращением и перемещением ГК;
- измерение угла поворота ГК;
- измерение амплитуды сигнала с ГК;
- интегрирование сигнала по времени.

При «теплых» измерениях СП-диполей катушка не вращается непрерывно. Здесь обмотка диполя питается переменным током с частотой 11 Гц, и измеряется наведенная в катушках при разных их угловых ориентациях ЭДС с синхронным детектированием слабого сигнала.

При измерениях поля измерительная катушка обычно совершает полный поворот от медианной плоскости по и против часовой стрелки. При этом регистрируется изменение магнитного потока с шагом 180 градусов, на каждом уровне выполняется пять

циклов. Автоматически учитывается температура измерительной катушки.

2.1.4. Метод натянутой струны

Методом натянутой струны измеряется эффективная длина, отклоняющая сила магнита, интегральная неравномерность поля, положение медианной плоскости для диполей, оптической оси для многополюсных магнитов, для СП-магнитов измеряются динамические потери и мультипольные динамические добавки. Измерения проводятся методом перемещения струны в медианной плоскости на расстояние, измеренное с высокой точностью.

2.1.5. Магнитные микроскопы на основе сверхпроводящих квантовых интерферометров

Скви́ды (сверхпроводящие квантовые интерферометры) – приборы, принцип работы которых основан на эффекте Джозефсона, – это сверхчувствительные магнитометры. Чувствительность скиндов к слабым магнитным полям в широком диапазоне частот можно использовать в сканирующих магнитных микроскопах, которые позволяют с высоким пространственным разрешением регистрировать магнитные поля, генерируемые вихревыми токами, токами утечки в интегральных схемах или магнитотактильными бактериями. В настоящее время уже созданы коммерческие версии таких магнитных микроскопов. Чувствительный элемент скивда представляет собой кольцо из сверхпроводящего материала, содержащее один или два джозефсоновских контакта. Возможность регистрации магнитных полей подобным устройством основана на том факте, что ток, текущий в кольце, зависит от магнитного потока через этот замкнутый контур. Первые сверхпроводящие магнитометры были созданы уже через несколько лет после открытия эффекта Джозефсона, в настоящее время предельная чувствительность скиндов превышает 10^{-14} Тл/Гц^{1/2}. В магнитном микроскопе образец сканируется близко расположенным скивдом, в то время как компьютер регистрирует сигнал со скивда в зависимости от его положения по отношению к образцу. Первые варианты магнитных микроскопов использовали скивды на базе традиционных, низкотемпературных сверхпроводников. Они работали при температуре

жидкого гелия и предназначались для исследования образцов, также находящихся при низкой температуре. Необходимость поддерживать скивид при гелиевой температуре сдерживала широкое применение скивид-микроскопов. Пользователи таких микроскопов испытывали значительные трудности со совмещением и позиционированием скивида относительно образца, а также при загрузке и перезагрузке образцов. Замена низкотемпературного скивида на скивид на базе высокотемпературных сверхпроводников, сделавшая возможной работу устройства при азотных температурах, значительно расширила круг исследований и стимулировала коммерческие применения скивидов.

Еще один шаг к коммерческому применению скивид-микроскопов был сделан, когда появились варианты этих устройств, в которых образец может находиться при комнатной температуре. В них вакуумный объем с охлажденным скивидом отделяется от образца тонким окном из немагнитного материала, например, сапфира; достижимое пространственное разрешение – около 10 мкм. Наиболее совершенным устройством подобного рода на основе высокотемпературного скивида является американский магнитный микроскоп CryoTiger. Скивид постоянного тока изготовлен из YBaCuO , его площадь – $1,2 \times 10^{-9} \text{ м}^2$, полевая чувствительность – $17,5 \text{ пТл/Гц}^{1/2}$. Сканирующая система позволяет перемещать скивид относительно исследуемого образца со скоростью 0,5–1 мм/с на площади сканирования $5 \times 5 \text{ мм}^2$. Достоинства микроскопа являются малые размеры, удачная конструкция и большой срок службы (500 тысяч часов). Данный микроскоп хорошо показал себя при исследовании вихревых токов в металлических слоях, закороток между контактными выводами в сборке интегральной схемы в корпусе, однородности намагниченности пленок магнитных материалов и т.д. Сейчас фирма Neosega Inc. выпускает на рынок его коммерческую версию. Стоит заметить, что и в России разработана собственная версия скивид-микроскопа.

2.1.6. Феррозонд

Феррозондовый магнитометр – прибор для измерения и индикации магнитных полей (в основном постоянных или медленно меняющихся) и их градиентов. Действие его основано на изменении

магнитного состояния ферромагнетика под воздействием двух магнитных полей разных частот. В простейшем варианте феррозонд состоит из стержневого ферромагнитного сердечника и находящихся на нём двух катушек: катушки возбуждения, питаемой переменным током, и измерительной (сигнальной) катушки. В отсутствие измеряемого магнитного поля сердечник под действием переменного магнитного поля, создаваемого током в катушке возбуждения, перемагничивается по симметричному циклу. Изменение магнитного потока, вызванное перемагничиванием сердечника по симметричной кривой, индуцирует в сигнальной катушке ЭДС, изменяющуюся по гармоническому закону. Если одновременно на сердечник действует измеряемое постоянное или слабо меняющееся магнитное поле, то кривая перемагничивания изменяет свои размеры и форму и становится несимметричной. При этом изменяется величина и гармонический состав ЭДС индукции в сигнальной катушке. В частности, появляются чётные гармонические составляющие ЭДС, величина которых пропорциональна напряжённости измеряемого поля и которые отсутствуют при симметричном цикле перемагничивания.

Как правило, феррозонд состоит из двух сердечников с обмотками, которые соединены так, что нечётные гармонические составляющие практически компенсируются. Тем самым упрощается измерительная аппаратура и повышается чувствительность. Наиболее распространённые феррозондовые установки имеют следующие основные узлы: генератор переменного тока, питающий обмотку возбуждения; фильтр для нечётных гармонических составляющих ЭДС, подключенный на выходе измерительной катушки; усилитель чётных гармоник и выходной измерительный прибор. Феррозонды обладают очень высокой чувствительностью к магнитному полю (до 10^{-4} – 10^{-5} А/м).

Феррозонд применяют для измерения земного магнитного поля и его вариаций (в частности, при поисках полезных ископаемых, создающих локальные аномалии геомагнитного поля); для измерения магнитных полей Луны, планет, межпланетного пространства; для обнаружения ферромагнитных предметов и частиц в неферромагнитной среде (в частности, в хирургии); в системах контроля за качеством выпускаемой продукции (магнитная дефектоскопия и др.).

2.2. Акселерометры

Акселерометры представляют собой датчики линейного ускорения и в этом качестве широко используются для измерения углов наклона тел, сил инерции, ударных нагрузок и вибрации. Они находят широкое применение на транспорте, в медицине, в промышленных системах измерения и управления, в инерциальных системах навигации. Промышленность изготавливает много разновидностей акселерометров, имеющих различные принципы действия, диапазоны измерения ускорений, массу, габариты и цены. На рис. 2.1 показаны области, занимаемые акселерометрами различного типа на диаграмме «цена–качество».

Современные технологии микрообработки позволяют изготовить интегральные акселерометры, имеющие малые габариты и низкую цену. В настоящее время изготавливаются ИМС акселерометров трех типов: пьезопленочные, объемные и поверхностные.

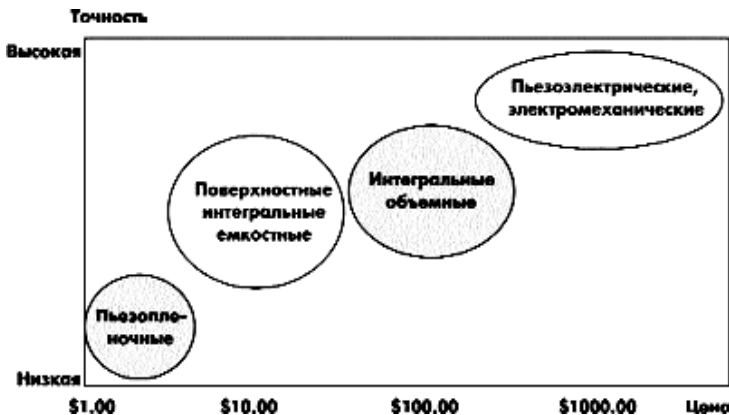


Рис. 2.1. Диаграмма «цена–качество» для различных типов акселерометров

Пленочные пьезоэлектрические акселерометры. Пленочные пьезоэлектрические датчики ускорения выполняются на основе многослойной пьезоэлектрической полимерной пленки. Многослойная пленка закреплена на подложке из окиси алюминия, и к ней присоединена инерционная масса из порошкового металла. При изменении скорости движения датчика в результате действия инерционных сил происходит деформация пленки. Благодаря пьезо-

зоэффекту возникает разность потенциалов на границах слоев пленки, зависящая от ускорения. Чувствительный элемент датчика обладает чрезвычайно высоким выходным сопротивлением, поэтому на подложке датчика АСН-01 компании Atochem Sensors имеется также полевой транзистор с малым током затвора, который представляет собой усилитель напряжения. Это позволяет измерять переменные ускорения со сравнительно низкой частотой. Датчики этого типа имеют плохую повторяемость характеристик в серийном производстве, высокую чувствительность к изменению температуры и давления. Они не могут контролировать постоянные ускорения и гравитационные силы. Основная область применения – схемы управления надувными подушками безопасности.

Объемные интегральные акселерометры. Примером объемного датчика может служить NAC-201/3 компании Lucas NovaSensor, предназначенный для применения в системах управления надувными подушками безопасности автомобилей. Этот датчик состоит из двух пластин кремния, которые сплавлены друг с другом (рис. 2.2). Тремя тонкими кремниевыми балками, имеющимися в пластине, инерционная масса соединена с кремниевой рамкой на пластине. Эта масса соединяется с кремниевой рамкой механически с одного края. Каждая из коротких внешних (изгибных) балок содержит пару имплантированных пьезорезисторов, образующих полумост. Два полумоста соединяются в мостовую схему. Когда происходит столкновение автомобиля с препятствием, масса движется вниз, изгибая балки и вызывая деформацию пьезорезисторов.

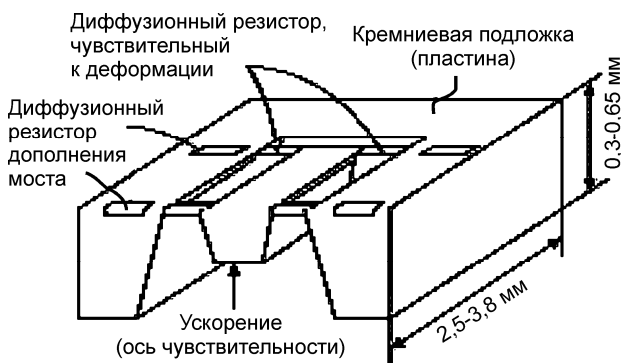


Рис. 2.2. Интегральный акселерометр объемной конструкции

Таким образом, датчик и расположенная вне кристалла электронная схема обработки сигналов создают при работе выходной сигнал напряжением от 50 до 100 мВ полной шкалы, вызываемый деформацией пьезорезисторов, включенных по схеме моста Уитстона.

Поскольку к надежности системы управления надувными подушками безопасности предъявляются чрезвычайные требования, датчик снабжен системой самоконтроля. Ключевую роль в системе самоконтроля играет резистор-возбудитель, который нагревается пропусканием через него электрического импульса с силой тока 50 мА, напряжением 9 В и длительностью 50 мс. Когда балка, расположенная в средней части пластины, нагревается, происходит ее удлинение, поскольку температурный коэффициент расширения кремния положителен. А так как концы ее закреплены, она прогибается, отклоняет инерционную массу и изгибает балку, содержащую пьезорезисторы. Эта балка смещается примерно на 3 мкм в том же направлении, что и масса при столкновении автомобиля с препятствием.

Интегральные датчики ускорения объемной конструкции имеют ряд недостатков. Во-первых, они сложны в производстве, поскольку операции формирования объемных структур не очень просто совмещаются со стандартными поверхностными интегральными технологиями. Во-вторых, желательно иметь датчик минимально возможных размеров на схемном кристалле также минимально возможных размеров. Уменьшение размеров кристалла дает повышение его механической прочности и снижение стоимости. В то же время в датчике объемной конструкции только на размещение чувствительного элемента требуется от 6,5 до 16 мм² площади кристалла. Размещение на кристалле схем формирования сигнала может увеличить эту площадь еще в два раза.

Поверхностные интегральные акселерометры. Компания Analog Devices изготавливают семейство акселерометров ADXLxxx поверхностной конструкции. Весь кристалл акселерометра размером 3,05×3,05 мм занят, главным образом, схемами формирования сигнала, которые окружают миниатюрный датчик ускорения размером 1×1 мм, расположенный в его центре. Датчик представляет собой дифференциальную конденсаторную структуру с воздушным диэлектриком, обкладки которого вырезаны (вытравлены) из плоско-

го куска поликремниевой пленки толщиной 2 мкм. Неподвижные обкладки этого конденсатора представляют собой простые консольные стержни, расположенные на высоте 1 мкм от поверхности кристалла в воздухе на поликремниевых столбиках-анкерах, приваренных к кристаллу на молекулярном уровне.

На рис. 2.3 показан основной конструктивный блок элементарной ячейки датчика. Фактически датчик имеет 54 элементарных ячейки для измерения ускорения, но для простоты рисунок показывает только одну ячейку. Инерционная масса датчика ускорения при изменении скорости перемещения кристалла смещается относительно остальной части кристалла. Ее пальцеобразные выступы образуют подвижную обкладку конденсатора переменной емкости. С каждого конца эта структура опирается на столбики-анкеры, аналогичные по конструкции держателям неподвижных обкладок.

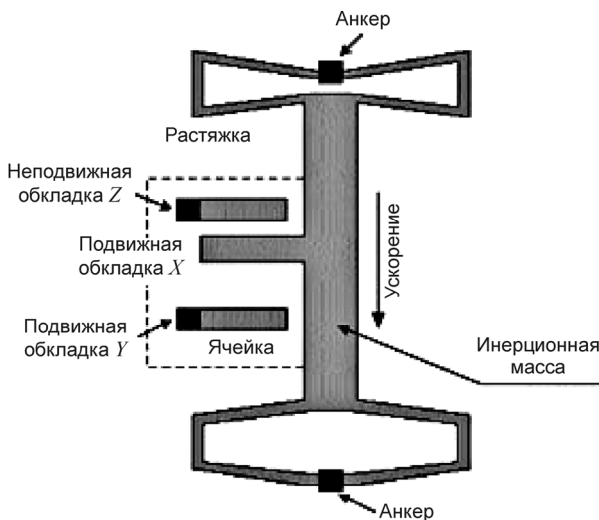


Рис. 2.3. Основной конструктивный блок элементарной ячейки датчика ускорения

Растяжки по концам инерционной массы, удерживающие ее на весу, являются как бы механическими пружинами постоянной упругости, ограничивающими перемещение пробной массы и ее возврат в исходное положение. Иными словами, сила инерции при воздействии ускорения

$$F = ma \text{ уравнивается силой упругости пружины } F = kx,$$

где m – масса, a – ускорение, k – жесткость пружины, x – перемещение массы относительно исходного состояния. Отсюда следует, что $a = x (k/m)$, причем k/m – конструктивный параметр датчика. Поскольку перемещение инерционной массы должно происходить в плоскости поликремниевой пленки, ось чувствительности датчика лежит в этой плоскости, и, следовательно, она параллельна плоскости печатной платы, к которой припаивается датчик.

Каждый набор неподвижных обкладок конденсатора (Y и Z) электрически соединен параллельно внутри схемного кристалла. В результате получается пара независимых конденсаторов $X-Y$ и $X-Z$, подвижная обкладка которых образована всей совокупностью пальцеобразных выступов инерционной массы. Внутри кристалла эти три обкладки подключены к встроенным схемам формирования сигнала акселерометра. В спокойном состоянии (движение с постоянной скоростью) все «пальцы» подвижной обкладки X благодаря растяжкам находятся на одинаковом расстоянии от пар пальцев неподвижных обкладок. При каком-либо ускорении подвижные пальцы приближаются к одному из наборов неподвижных пальцев и удаляются от другого набора. В результате этого относительного перемещения соответствующие расстояния становятся неодинаковыми, как и емкости между подвижной обкладкой и каждой из неподвижных.

Интересное применение акселерометров с малым значением максимального измеряемого ускорения (и, соответственно, высокой чувствительностью) – определение угла наклона относительно горизонта. Это можно использовать в охранных системах автомобилей, для определения местоположения бура при бурении наклонных скважин и др. Выходное напряжение акселерометра пропорционально синусу угла наклона оси его чувствительности относительно горизонта. Для того чтобы определить этот угол однозначно, необходимо использовать двухосный акселерометр. Для этой цели почти идеально подходит ADXL202. Зависимости выходных сигналов этого датчика, приведенных к 1 g, от угла его наклона показаны на рис. 2.4.

Акселерометры семейства ХММА компании Motorola состоят из планарной емкостной ячейки датчика ускорения и КМОП-схемы нормализации сигнала, выполненных на одном кристалле. Чувствительный элемент (G -ячейка) занимает большую часть кристалла.

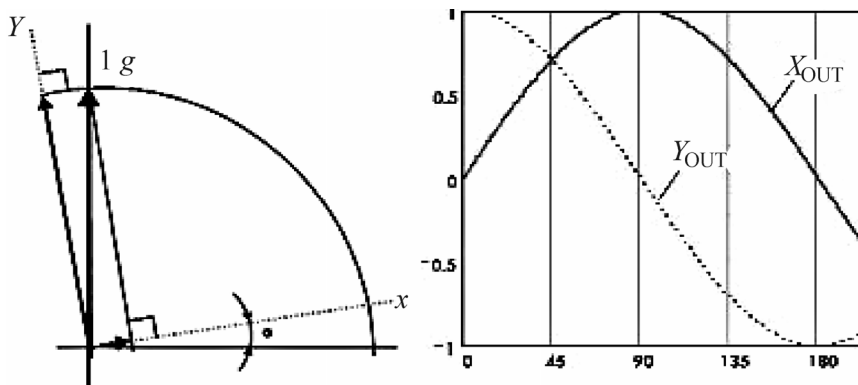


Рис. 2.4. Использование акселерометра для измерения наклона

Он сформирован из поликристаллического кремния посредством поверхностной микрообработки и состоит из двух неподвижных пластин, между которыми расположена пластина, закрепленная на упругом подвесе и способная перемещаться под действием инерционных сил (рис. 2.5).

Когда центральная пластина отклоняется от среднего положения в результате ускорения, расстояние от нее до одной из неподвижных пластин увеличится на ту же самую величину, на которую расстояние до другой пластины уменьшится. Изменение расстояний

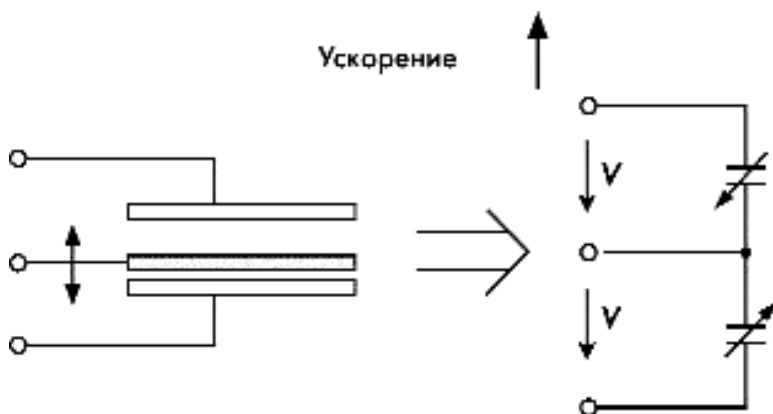


Рис. 2.5. Упрощенная конструкция датчика ускорения микросхемы семейства ХММА

характеризует ускорение. Ось чувствительности к ускорению направлена перпендикулярно к поверхности пластинки кремния (чипа), поэтому датчики, изготавливаемые в DIP-корпусе, измеряют ускорение, направленное нормально к печатной плате. Для того чтобы сделать возможным измерение ускорений, направленных параллельно печатной плате, фирма выпускает эти датчики также и в корпусах SIP, в которых чип расположен перпендикулярно к печатной плате.

Пластины G -ячейки формируют два противовключенных конденсатора. При движении датчика с ускорением, направленным перпендикулярно к плоскости пластин, подвижная пластина отклонится в направлении, противоположном ускорению, и произойдет перераспределение расстояний между пластинами. Емкости обоих конденсаторов изменятся в соответствии с формулой

$$C = S / x,$$

где S – площадь пластин; e – диэлектрическая постоянная; x – расстояние между пластинами. Как видно, эта зависимость нелинейна. На рис. 2.6 приведен график зависимости разности емкостей этих конденсаторов ($C_1 - C_2$) от перемещения подвижной пластины.

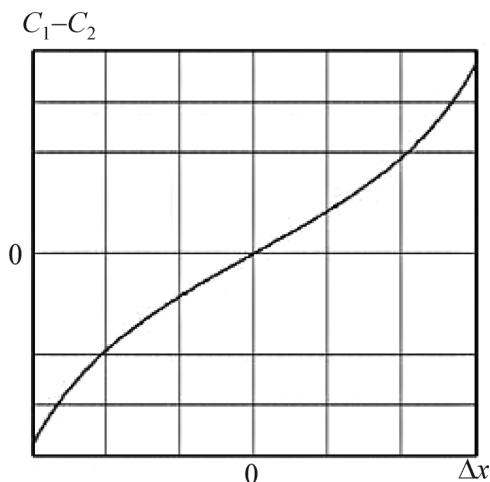


Рис. 2.6. График зависимости разности емкостей конденсаторов из ячейки датчика ускорения от перемещения подвижной пластины

Схемы определения рассогласования емкостей конденсаторов G -ячейки измеряют изменение напряжения на подвижной пластине (MMAS40G, MMAS250G, MMAS500G) или заряда на ней (XMMA1000, XMMA2000). Напряжение измеряется электрометрическим усилителем, а заряд – усилителем заряда. Судя по техническим описаниям этих микросхем, представленным фирмой-изготовителем, постоянное ускорение они не воспринимают. На рис. 2.7 приведена блок-схема акселерометра XMMA500G, имеющего диапазон измеряемых ускорений 500 g. Сигнал с выхода электрометрического усилителя поступает на фильтр нижних частот четвертого порядка, а с него – на схему температурной компенсации.

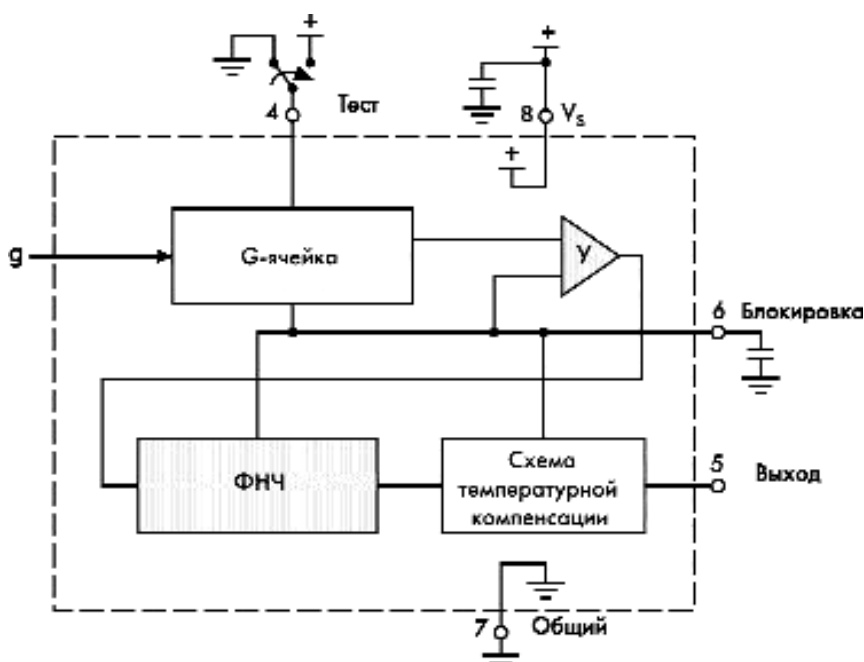


Рис. 2.7. Блок-схема акселерометра MMAS500G

2.3. Измерение давления

2.3.1. Тензометрический датчик давления

Для преобразования давления в электрический сигнал используется пьезоэффект. Ключевым элементом здесь является кремниевый чип, представляющий собой относительно гибкую диафрагму, вокруг которой располагаются в форме моста четыре резистора. Давление на эту кремниевую диафрагму вызывает изменение сопротивления резисторов, что создает на выходе напряжение, пропорциональное приложенному давлению. Датчики разделяются на две основные группы – открытые и изолированные. В открытых давление воздействует непосредственно на кремниевую диафрагму, а в изолированных кремниевый чип отделен от среды дополнительной диафрагмой из нержавеющей стали. Большинство открытых датчиков содержит защитное покрытие поверх кремниевого чипа для защиты его от влаги и пыли. Такие датчики рекомендуется использовать для воздуха и сухих газов. Типичное применение открытых датчиков: пневматическое управление, измерительное оборудование, вентиляция и кондиционирование воздуха. Изолированные датчики предназначены для использования в коррозионных жидких или газообразных средах. Типичное применение изолированных датчиков: управление производственным процессом, газовая и химическая промышленность, гидравлика, регулирование горения.

Существует много способов (рис. 2.8), при помощи которых тензометрические датчики деформации могут использоваться для измерения перемещения диафрагмы. В одном способе (рис. 2.8, а) они приклеены к консоли, прогибающейся при перемещении центральной части диафрагмы. В другом – они непосредственно наклеены на диафрагму. Еще один способ (рис. 2.8, б) состоит в использовании полупроводниковых тензодатчиков. Такие датчики могут быть скреплены с поверхностью диафрагмы. Они более удобны при использовании кремниевой подложки как диафрагмы. При любой форме тензодатчиков они включаются в мост Уитстона, где напряжение разбаланса является мерой перепада давления на диафрагме. Типичные приборы с металлическими проволочными тензодатчиками применяются в диапазоне давлений 100 кПа ...

100 МПа. С интегрированными полупроводниковыми датчиками диапазон измерения давления составляет 0 ... 100 кПа. Погрешность измерения – до $\pm 0,1\%$. Полоса частот – до 1 кГц.

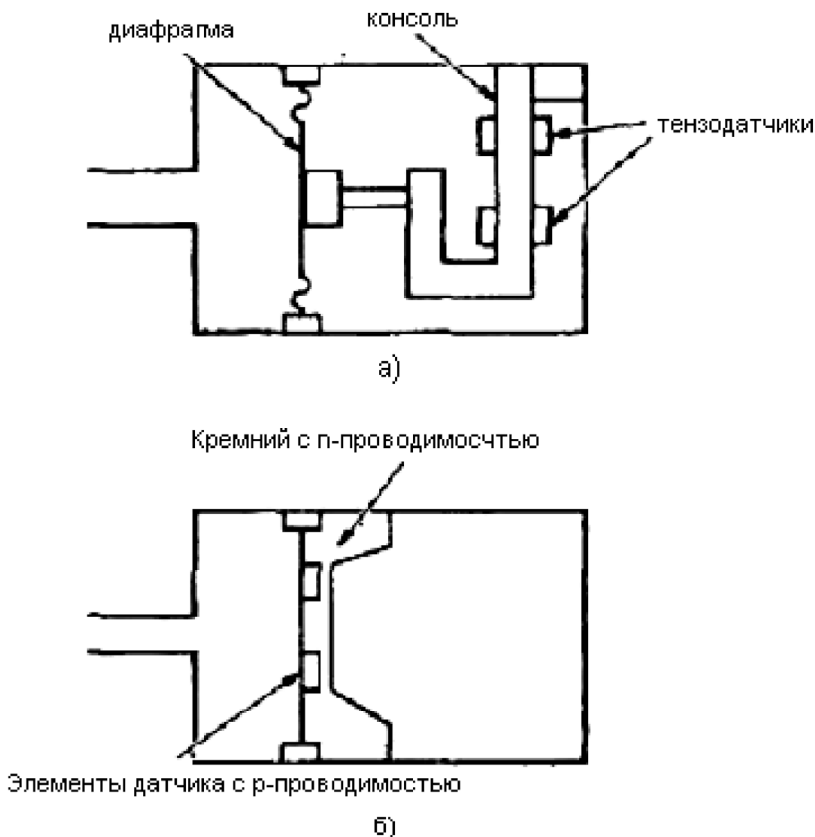


Рис. 2.8. Тензометрические диафрагменные датчики

2.4. Измерение вакуума

Понятие «вакуум» обычно используется для обозначения давления, величина которого значительно ниже атмосферного (100 кПа). В табл. 2.1 приведен список измерительных приборов, которые могут быть использованы для измерений низких давлений.

Таблица 2.1

Принцип действия	Система	Характеристики
Закон Бойля–Мариотта	Измеритель Маклауда	Диапазон измерений $5 \times 10^{-4} \dots 5 \times 10^{-5}$ Па, точность $\pm 5 \dots 10\%$
Теплопроводность	Измеритель Пирани	Диапазон измерений $10^{-2} \dots 10^3$ Па, точность $\pm 10\%$
	Термисторный измеритель	Диапазон измерений $10^{-2} \dots 10^3$ Па, точность $\pm 20\%$
	Термопарный измеритель	Диапазон измерений $10^{-1} \dots 10^3$ Па, точность $\pm 10\%$
Ионизация	Газоразрядная трубка	Грубое измерение
	Измеритель Пеннинга	Диапазон измерений $10^{-1} \dots 1$ Па, точность $\pm 10 \dots 20\%$, существует гистерезис
	Измеритель с подогреваемым катодом	Диапазон измерений $10^{-1} \dots 10^2$ Па, точность $\pm 10 \dots 30\%$
	Измеритель Баярда–Альперта	Диапазон измерений $10^{-8} \dots 1$ Па, точность $\pm 10 \dots 30\%$

2.4.1. Измерители давления по теплопроводности

Величина температуры нагрева проволоки или резистора при прохождении через них электрического тока зависит от того, насколько быстро окружающий газ отводит тепло от этого элемента, а это, в свою очередь, определяется давлением этого газа.

Измеритель Пирани. Измеритель такого типа состоит из платиновой или вольфрамовой проволоки, размещенной в стеклянной или металлической трубке. Электрическое сопротивление этой проволоки зависит от давления в трубке. Для уменьшения влияния изменений температуры окружающей среды используют дополни-

тельную точно такую же трубку, но с запаянным концом, в которой давление всегда будет постоянным. Эти две трубки (рабочая и дополнительная) включаются в два соседних плеча моста Уитстона (рис. 2.9). По величине разбаланса токов моста определяют значение давления в рабочей трубке измерителя. Измеритель Пирани используется для измерения давления в диапазоне $10^{-2} \dots 10^3$ Па с точностью порядка $\pm 10\%$.



Рис. 2.9. Мостовая схема Уитстона с измерителем Пирани

2.4.2. Термисторный измеритель

Принцип действия такого прибора аналогичен принципу действия измерителя Пирани, только вместо металлической проволоки здесь используется термистор. Так как термисторы обладают довольно большим интервалом изменения сопротивления и к тому же очень малы, то и чувствительность термисторных измерителей гораздо выше, чем у измерителей, использующих металлическую проволоку.

Время реакции на изменение давления у таких измерителей значительно меньше, чем у измерителей Пирани. Термисторный измеритель используется для измерения давления в диапазоне $10^{-2} \dots 10^3$ Па с погрешностью $\pm 10\%$.

2.4.3. Термопарный измеритель

Термопарный измеритель состоит из проволоки, нагреваемой электричеством. Температура проволоки измеряется при помощи термопары, прикрепленной к ней. По выходной разности потенциалов этой термопары определяют давление газа. Термопарный измеритель используется для измерения давления в диапазоне $10^{-1} \dots 10^3$ Па с погрешностью порядка $\pm 20\%$.

2.4.4. Ионизационные измерители

Если электроны начнут «бомбардировать» молекулы газа, то может возникнуть его ионизация, в результате этого между двумя электродами появится электрический ток. Степень ионизации зависит от числа молекул газа, а, следовательно, и от его давления. Ионизационные измерители можно разделить на две группы:

- измерители с «холодным» катодом (здесь электроны образуются от столкновения ионов с «холодным» катодом);
- измерители с «горячим» катодом (здесь электроны испускаются в результате нагрева катода).

2.4.5. Газоразрядная трубка

Газоразрядная трубка относится к типу измерителей с «холодным» катодом. Она состоит из стеклянной трубки с двумя впаянными электродами (рис. 2.10). К этим двум электродам прикладывается высокое напряжение. В результате этого в трубке появляется тлеющее свечение, цвет которого зависит от присутствующих там газов. Свечение появляется при давлениях в интервале $10^3 \dots 10^{-1}$ Па. Верхняя граница давлений обусловлена тем, что электроны, многократно сталкиваясь с молекулами газа, каждый раз теряют свою энергию, и наступает такой предел, когда их энергии уже не хватает для ионизации этих молекул. Нижняя граница объясняется тем, что молекул газа становится так мало, что основная часть электронов пролетает всю длину трубки без столкновений с ними. Газоразрядные трубки обычно используются только для грубого определения состояния вакуума.



Рис. 2.10. Газоразрядная трубка

2.4.6. Измеритель Пеннинга

Измеритель Пеннинга также относится к типу измерителей с «холодным» катодом. Он состоит из двух параллельных плоских катодов, отстоящих друг от друга примерно на 20 мм, которые помещены в стеклянный или металлический корпус (рис. 2.11). Посередине между катодами находится проволочный анод. Измеритель расположен между полюсами постоянного магнита или электромагнита, который создает магнитное поле, направленное под прямым углом к плоскостям катодов. Электроны, испускаемые катодами, двигаются к аноду. Их путь направлен скорее по спирали, чем вдоль силовых линий. Вследствие этого повышается вероятность столкновения между электронами и молекулами газа. Чем больше степень ионизации газа, тем больший ток появляется между электродами. Таким образом, по величине тока можно судить о давлении газа в измерителе. Зависимость между величинами тока и давления близка к линейной. Измеритель Пеннинга используется для измерения давления в диапазоне $10^{-5} \dots 1$ Па с точностью порядка $\pm 10 \dots 20$ %. Недостаток такого измерителя – наличие гистерезиса, здесь ток зависит от того, увеличивается давление или уменьшается.

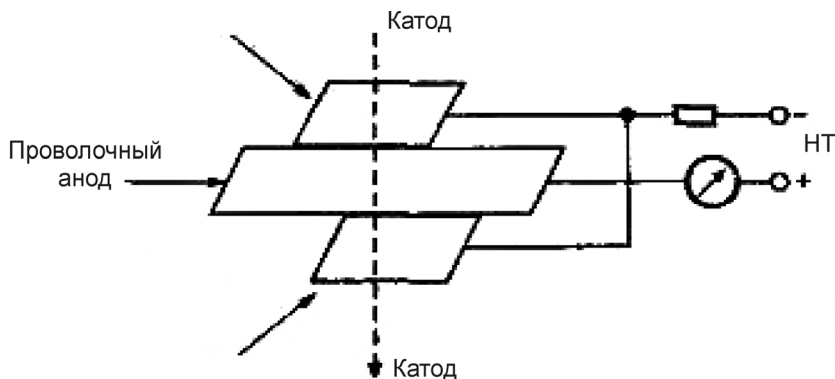


Рис. 2.11. Измеритель Пеннинга

Измеритель с «горячим» катодом. В данных приборах электроны испускаются нагретой нитью. Вокруг нити находится специальная сетка для улавливания электронов, а вокруг сетки расположен цилиндрический электрод коллектора ионов (рис. 2.12). Сетка

имеет положительный потенциал относительно нити, и поэтому улавливает электроны, возникающие в результате столкновений между испускаемыми нитью электронами и молекулами газа. Внешний электрод имеет отрицательный потенциал относительно нити и сетки и, следовательно, притягивает положительные ионы. Давление газа P пропорционально отношению тока ионов i_+ к току электронов i_- . Поэтому справедливо:

$$i_+ = kPi_-,$$

где k – это постоянная величина, называемая коэффициентом измерителя. Этот коэффициент обычно вычисляется для азота. Для других газов он умножается на коэффициент относительной чувствительности C по вычислению вероятности возникновения ионов. Если ток электронов L поддерживать постоянным, то ионный ток i_+ будет прямо пропорционален давлению газа. Измеритель с подогреваемым катодом используется для измерения давления в диапазоне $10^{-6} \dots 10^2$ Па с погрешностью порядка $\pm 10 \dots 30$ %.

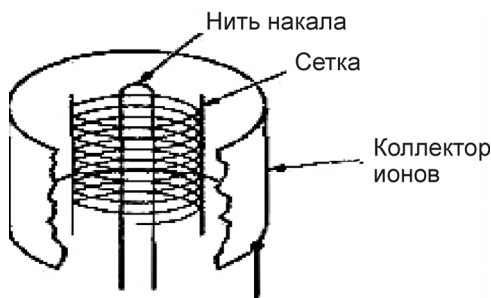


Рис. 2.12. Ионизационный измеритель с «горячим» катодом

2.5. Измерение относительной влажности

В настоящее время на практике для измерения относительной влажности применяется несколько технологий, использующих свойство различных структур изменять свои физические параметры (емкость, сопротивление, проводимость и температуру) в зависимости от степени насыщения водяным паром. Каждой из этих технологий свойственны определенные достоинства и недостатки (точность, долговременная стабильность, время преобразования и т.д.).

2.5.1. Емкостные датчики

Среди всех типов датчиков емкостные датчики, благодаря полному диапазону измерения, высокой точности и температурной стабильности, получили наибольшее распространение как для измерения влажности окружающего воздуха, так и применения в производственных процессах. Наиболее распространенными можно считать датчики компании Honeywell. Компания производит семейство емкостных датчиков влажности, применяя метод многослойной структуры (рис. 2.13), образуемой двумя плоскими платиновыми обкладками и диэлектрическим термореактивным полимером, заполняющим пространство между ними. Термореактивный полимер, по сравнению с термореактивной пластмассой, обеспечивает датчику более широкий диапазон рабочих температур и высокую химическую стойкость к таким агрессивным жидкостям и их парам, как изопропил, бензин, толуол и аммиак. В дополнение к этому датчики на основе термореактивного полимера имеют самый большой срок службы в этиленоксидных стерилизационных процессах.

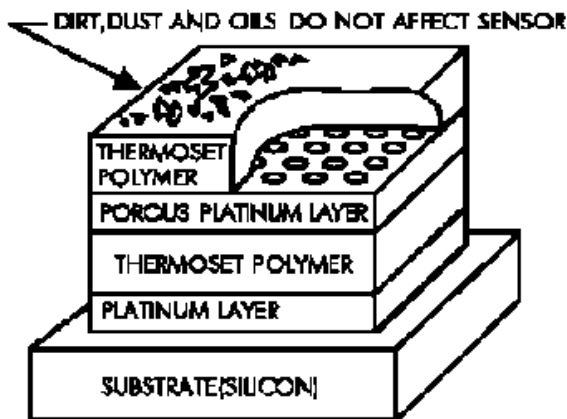


Рис. 2.13. Метод многослойной структуры, применяемый при изготовлении датчиков влажности

В процессе работы водяной пар проникает через верхнюю пористую обкладку конденсатора и уравнивается с окружающим газом. Одновременно эта обкладка защищает электрические процессы, протекающие в полимерном слое, от внешних физических

воздействий (света и электромагнитного излучения). Слой полимера, покрывающий пористый платиновый электрод сверху, служит защитой конденсатора от пыли, грязи и масел. Такая мощная фильтрационная система, с одной стороны, обеспечивает датчику длительную бесперебойную работу в условиях сильной загрязненности окружающей среды, с другой – снижает время отклика. Выходной сигнал любого (емкостного или резистивного) абсорбционного датчика влажности представляет собой функцию от температуры и влажности, поэтому для получения высокой точности измерения в широком диапазоне рабочих температур требуется температурная компенсация характеристики преобразования. Компенсация особенно необходима, когда датчик используется в промышленном оборудовании для измерения влажности и точки росы. Именно для этих целей некоторые модели датчиков Honeywell имеют встроенный платиновый терморезистор сопротивлением 1000 Ом, который расположен с обратной стороны подложки (рис. 2.14).

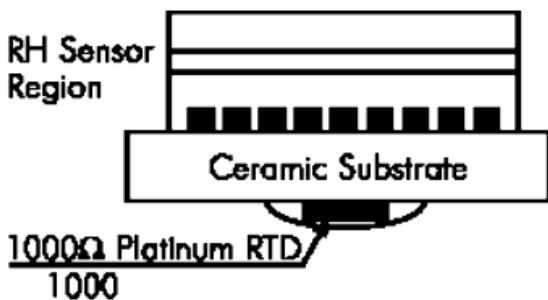


Рис. 2.14. Структура датчика влажности со встроенным платиновым датчиком температуры

Помимо чувствительного элемента и термосенсора, на той же подложке расположена схема обработки сигнала, которая обеспечивает преобразование сигнала, его усиление и линеаризацию. Для примера на рис. 2.15 приведены характеристики преобразования реального датчика Honeywell при различных температурах.

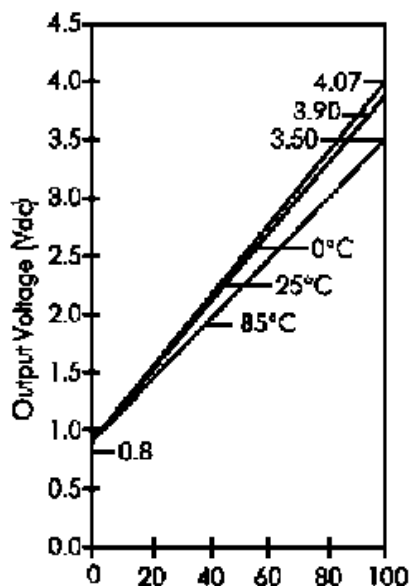


Рис. 2.15. Характеристики преобразования датчика влажности Honeywell при различных температурах

2.5.2. Конденсационный датчик

Сущность конденсационного метода заключается в определении температуры, до которой необходимо охладить прилегающий к охлаждаемой поверхности слой влажного газа, для того чтобы довести его до состояния насыщения при рабочем давлении. Измерение точки росы конденсационным методом сводится к выполнению трёх операций: охлаждение поверхности (конденсационного зеркала), фиксация момента появления на зеркале конденсата (оптическим способом по принципу рассеяния) и измерение температуры поверхности зеркала, соответствующей этому моменту.

Предложенный оптоволоконный способ фиксации момента появления конденсата основан на принципе нарушения полного внутреннего отражения внутри оптического волокна (рис. 2.16).

В качестве конденсационного зеркала используется оптическое волокно, по которому свет распространяется от источника к приёмнику. Оптическое волокно должно быть чувствительно к изме-

нению коэффициента преломления внешней среды на ограниченном участке, т.е. в том месте, где происходит его охлаждение. В этом случае, при отсутствии на охлаждаемом участке волокна влаги, в волокне сохраняется эффект полного внутреннего отражения. Тогда как при выпадении влаги происходит нарушение принципа полного внутреннего отражения света и значительная часть света выходит наружу, что приводит к снижению тока приёмника света. Измеряемая в этот момент термодатчиком температура в непосредственной близости от волокна и принимается за температуру точки росы.

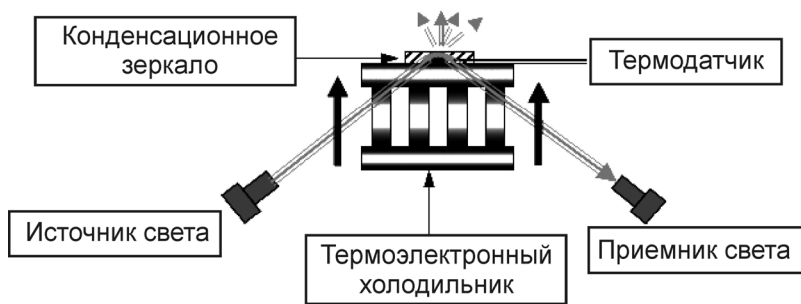


Рис. 2.16. Оптическая схема гигрометра, построенная по принципу нарушения полного внутреннего отражения

Для обеспечения чувствительности оптоволокна к изменению показателя преломления внешней среды на определенном участке необходимо изогнуть оптоволокно с радиусом меньше критического:

$$R_{\text{кр}} = \frac{r_1}{2 \cdot n_1 \cdot \Delta n},$$

где r_1 – радиус изгиба сердцевины; n_1 – коэффициент преломления сердцевины; n – разница показателей преломления сердцевины и оболочки.

На практике минимально допустимый радиус изгиба определяется механическими свойствами кварцевого оптоволокна и составляет 31,25 мм. Для решения задачи уменьшения механических напряжений при изгибе оптоволокна была разработана оригинальная технология, позволяющая избежать появления микротрещин. Объ-

единение основных элементов – изгиба оптоволоконна и термодатчика в единый измерительный узел оптоволоконный преобразователь информации позволило получить миниатюрное конденсационное зеркало площадью менее $0,25 \text{ мм}^2$, что на два порядка меньше, чем у других конденсационных приборов. В качестве охлаждающего элемента выбрана трёхкаскадная термоэлектронная батарея.

Полученные с использованием оптоволоконной модификации конденсационного метода экспериментальные данные на различных объектах газового комплекса позволили разработать алгоритм измерения точки росы по влаге в природном газе с любым компонентным составом. Алгоритм измерения точки росы по влаге в присутствии ранее конденсирующихся углеводородов основывается на следующих положениях:

- охлаждение и нагрев конденсационного зеркала со скоростью $1^\circ\text{C}/\text{с}$;
- охлаждение (переохлаждение) конденсационного зеркала до снижения уровня фотосигнала на 50 %, что соответствует процессу конденсации влаги;
- определение точки росы по влаге в результате математической обработки кривой испарения.

2.6. Измерения линейных перемещений

Существует много видов электрических датчиков, которые могут быть использованы для получения реакции на перемещение. Например, линейный потенциометр, конденсаторы, изменяемое магнитное сопротивление, линейно-регулируемый дифференциальный трансформатор.

2.6.1. Конденсатор

Конденсаторные системы для измерения перемещений имеют высокий выходной импеданс (поэтому они очень подвержены воздействию шумов). Такие системы обладают хорошим разрешением (могут достигать порядка нанометров) и погрешностью вплоть до $\pm 0,01 \%$.

2.6.2. Переменное магнитное сопротивление

На рис. 2.17 показана одна из разновидностей датчика с изменяющейся индуктивностью. Движение плунжера вызывает перемещение ферромагнитной пластинки между двумя катушками, при этом магнитное сопротивление в одной из них увеличивается, а в другой – уменьшается.

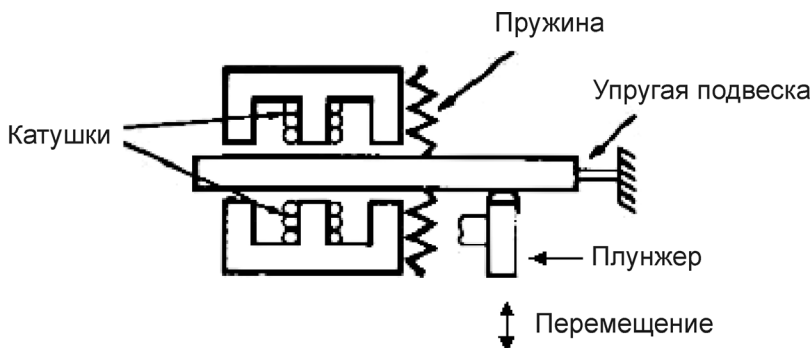


Рис. 2.17. Компаратор с изменяющейся индуктивностью

2.6.3. Перестраиваемый дифференциальный трансформатор

Линейно перестраиваемый дифференциальный трансформатор (ЛПДТ) – это трансформатор с одной первичной обмоткой и двумя вторичными обмотками (рис. 2.18). Обе вторичные обмотки соединены последовательно так, что их выходные сигналы направлены навстречу друг другу. Переменное напряжение поступает на первичную обмотку и наводит переменную ЭДС во вторичных обмотках. Обе вторичные обмотки идентичны, поэтому, когда сердечник находится в центральном положении, ЭДС, наведенные в них, будут одинаковы. Но так как они соединены противоположно друг другу, результирующий выходной сигнал оказывается равным нулю. Изменение положения сердечника приведет к тому, что в обмотках будут находиться его участки разной длины. Как результат, наведенная ЭДС в одной из обмоток становится больше, чем в другой, и появляется ненулевой выходной сигнал.

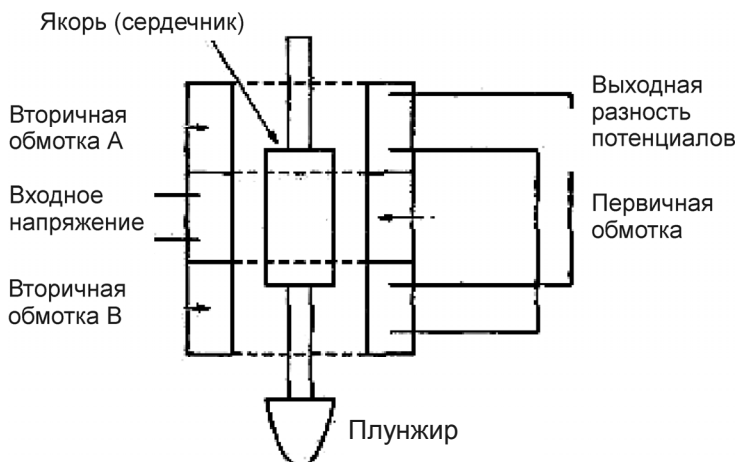


Рис. 2.18. Линейно перестраиваемый дифференциальный трансформатор

2.6.4. Оптические измерения линейных перемещений

Времяпролетный метод. Во времяпролетном методе для определения расстояния обычно используются импульсы излучения от лазера и измеряется время их прохождения до отражателя и обратно. Так как скорость света высока, в воздухе она равна 3×10^8 м/с, этот метод пригоден только для больших расстояний, когда время пролета света достаточно велико, чтобы быть измеренным с приемлемой точностью.

Позиционно-чувствительные фотоэлементы. В позиционно-чувствительном фотоэлементе разделенного типа луч света падает на фотоэлемент, который поделен посередине. Когда луч находится в центральной части, одинаковые сегменты обоих фотоэлементов будут освещены. Смещение луча света приводит к большей доле освещенности одного элемента по сравнению с другим. В результате на выходе дифференциального усилителя возникает сигнал. Диапазон измерения перемещений для такого инструмента составляет несколько миллиметров. Такие приборы могут определять изменение смещения порядка 1 мкм и обладают хорошей стабильностью.

Интерферометры. На рис. 2.19 показана одна из разновидностей лазерного интерферометра для измерения перемещений.

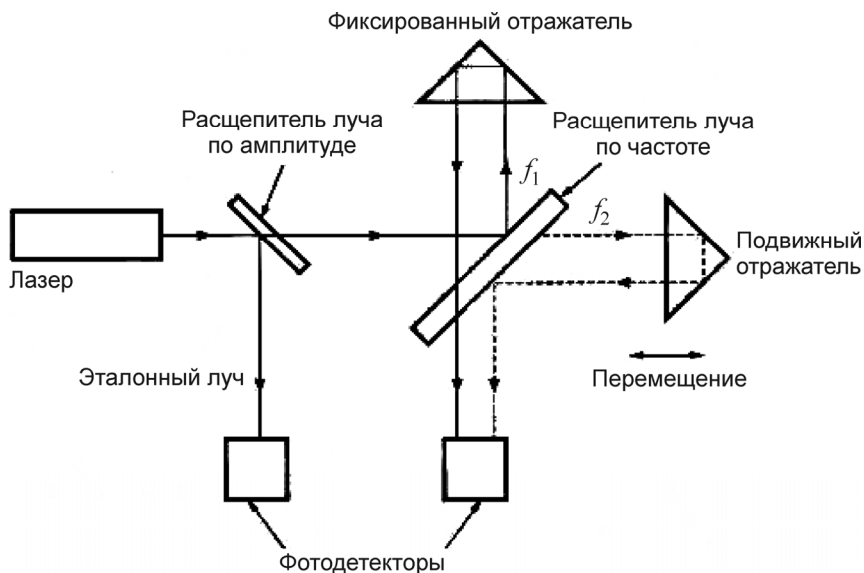


Рис. 2.19. Интерферометр

Гелий-неоновый лазер генерирует две световые волны, отличающиеся по частоте на 2×10^6 Гц и имеющие плоскости поляризации под прямым углом друг к другу. На первом лучевом расщепителе луч света каждой частоты разделяется на две части, одна из которых используется как опорная и подается на фотодетектор *A*. На нем обе частоты комбинируются, создавая биение колебаний с частотой 2×10^6 на выходе. Второй лучевой расщепитель также разделяет свет на две частоты. Свет с частотой f_1 поступает на фиксированный отражатель уголкового типа и возвращается назад через лучевой расщепитель на фотодетектор *B*. Свет с частотой f_2 поступает на подвижный отражатель уголкового типа и возвращается назад к лучевому расщепителю и далее попадает также на фотодетектор *B*. При стационарном режиме подвижного отражателя выходной сигнал от фотодетектора *B* равен сигналу от фотодетектора *A*. Однако при возникновении движения появляется доплеровский сдвиг частоты f_2 , и тогда выходной сигнал *B* будет отличаться от сигнала *A*. Выходные сигналы *A* и *B* вычитаются. В результате появляется колебательный сигнал, количество пиков которого связа-

но с перемещением, а частота связана со скоростью. Такой метод обладает исключительно высокой точностью, несколько частей на миллион, и может использоваться в широком диапазоне измерений вплоть до 2 м.

2.7. Измерения угловых перемещений

2.7.1. Кольцевой и спиральный потенциометры

Кольцевой и спиральный потенциометры дают на выходе изменение сопротивления при вращении оси подвижного контакта, скользящего по треку резистора. Кольцевые потенциометры имеют трек длиной не более одного оборота, т.е. не более, чем угловое перемещение на 360° , и погрешность примерно 1 %. Спиральные потенциометры часто имеют многооборотный трек и могут обеспечить погрешность, не превышающую 0,002 %.

2.7.2. Синусно-косинусный вращающийся трансформатор

Синусно-косинусный вращающийся трансформатор (рис. 2.20) имеет две статорные обмотки, развернутые под прямым углом друг к другу, и ротор. Для трансформатора с выходным сигналом переменной амплитуды статор питается однофазным синусоидальным напряжением с частотой ω , поэтому амплитуды в обмотках статора сдвинуты на 90° , т.е. справедливо:

$$V_1 = V \sin \beta,$$

$$V_2 = V \sin (\beta + 90^\circ),$$

где V – мгновенное напряжение, равное $V_s \sin \omega t$.

ЭДС, индуцируемая в роторе, когда он развернут на угол θ , равна:

$$V_0 = kV \sin(\beta - \theta) = [kV_s \sin w (\beta - \theta)] \sin \omega t,$$

где k – постоянная величина, зависящая от степени магнитной связи. Выходной сигнал, таким образом, будет иметь ту же частоту, что и входной, но его амплитуда будет определяться углом θ . Возможное разрешение метода составляет около $0,4^\circ$.

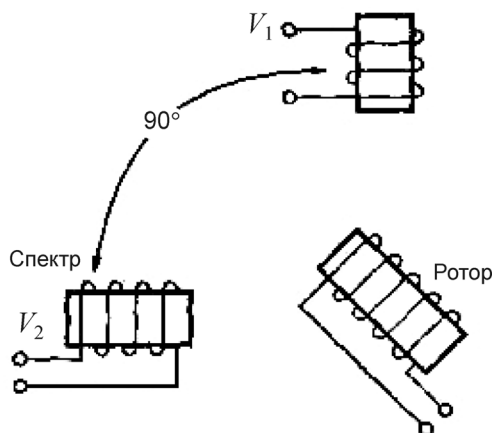


Рис. 2.20. Синусно-косинусный вращающийся трансформатор

2.7.3. Дискретный датчик положения оси

Угловое положение оси можно определить при помощи дискретного датчика положения оси. Он состоит из диска, который вращается вместе с осью. Форма диска определяется применяемым видом датчика. В одном из видов диск имеет ряд отверстий, через которые может проходить луч света (рис. 2.21). Луч света падает на светочувствительный датчик, который формирует электрический

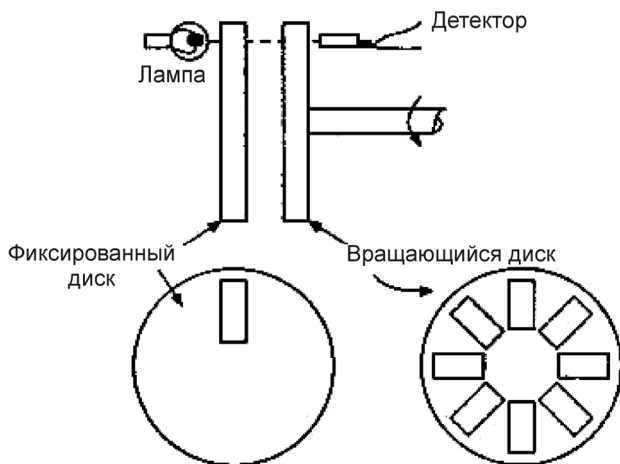


Рис. 2.21. Оптический дискретный датчик положения оси

выходной сигнал. Вращение оси создает серию световых импульсов, которые преобразуются в электрические импульсы. Подсчитывая количество произведенных импульсов от некоторой начальной позиции, можно определить угловое положение оси. Если требуется получить скорость вращения оси, то определяется частота импульсов (их количество в секунду).

2.7.4. Цифровой датчик положения оси

Для того чтобы получить величину углового перемещения и, следовательно, угловое положение оси при помощи дискретного датчика, необходимо подсчитывать количество импульсов. Цифровой датчик положения оси, в отличие от дискретного, сам выдает выходной сигнал в виде двоичного кода. Каждому угловому положению оси соответствует свой собственный уникальный двоичный код. Таким образом, двоичное число на выходе датчика соответствует абсолютному значению углового положения оси. В оптической разновидности такого датчика (рис. 2.22) вращающийся диск имеет четыре концентрических круга с прорезями и четыре фотодатчика для регистрации пульсаций света. Прорези расположены таким образом, что последовательность выходных сигналов от фотодатчиков формирует число в двоичном коде, соответствующее положению оси.

На рис. 2.22 показан кодирующий диск, который выдает выходной сигнал в обычном двоичном коде. Однако может возникнуть проблема, если при вращении диска края различных окон не точно совпадают друг с другом. Любое такое несовпадение будет означать, что выходные сигналы от каждого кольцевого трека будут включаться в различные моменты времени, в результате чего в это время и будет появляться неправильное двоичное число. Чтобы избежать такого эффекта, добавляют еще один внешний трек, называемый синхронизирующим. Этот трек имеет маленькие окошки, которые позволяют выравнивать центры прорезей в других треках и указывают, когда информация внутренних треков должна быть считана. Альтернативный метод состоит в использовании специального вида двоичного кода, называемого *кодом Грея*. В этом коде изменяется только одна двоичная цифра при угловом перемещении диска на один шаг.

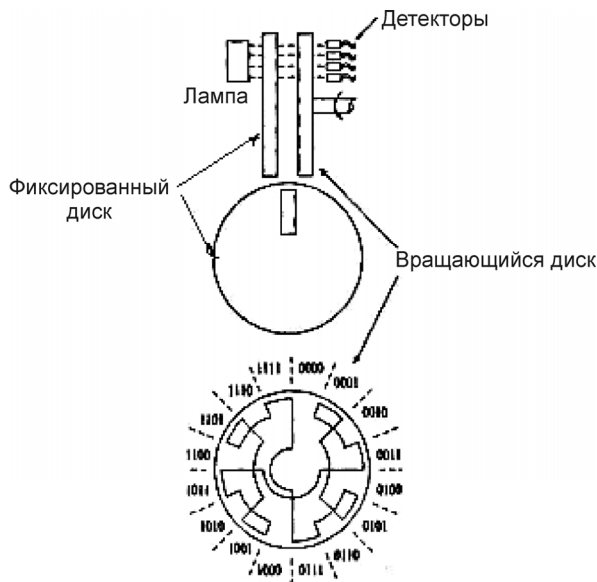


Рис. 2.22. Оптический датчик положения оси с кодирующим диском

2.8. Измерение уровня

Для измерения уровня жидких и сыпучих тел наиболее часто применяются датчики емкостного и эхолотационного типов.

2.8.1. Емкостный датчик уровня

В общем виде емкостный датчик уровня состоит из двух концентрических цилиндров или круглого стержня внутри цилиндра и жидкостью между ними (рис. 2.23). Если сама емкость с жидкостью металлическая, она также может служить в качестве одной из пластин конденсатора с металлическим стержнем в жидкости, действующим как другая пластина. Если жидкость является электрическим изолятором, то пластины конденсатора выполняются из металла. Если жидкость электропроводная, то она покрывается изолятором, например фторопластом. Принципиально такой датчик состоит из двух параллельно соединенных конденсаторов. Один образуется между пластинами внутри жидкости, другой – из части пластин в воздухе над жидкостью. Изменение уровня жидкости

меняет общую емкость системы. Ошибки измерения могут увеличиться из-за нестабильности температуры.

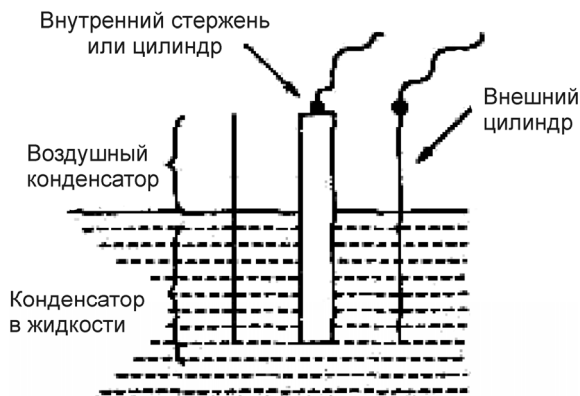


Рис. 2.23. Емкостной датчик уровня

2.8.2. Эхолотационный метод

Рассматривается в следующем параграфе.

2.9. Ультразвуковые методы измерений

Ультразвуковые волны – это волны давления с частотой, большей чем 20 кГц. Скорость таких волн зависит от упругости и плотности среды, через которую они проходят, и подвержена влиянию температуры. Когда ультразвуковые волны падают на границу раздела, часть колебательной энергии проходит через границу, а часть – отражается. Для отражаемой волны угол падения равен углу отражения.

Ультразвуковые колебания (УЗК) создают в воздухе, являющемся упругой средой, движущиеся волны давления с диапазоном частот свыше 20 кГц; в иных средах ультразвуковые волны распространяются с другими частотами. Способность УЗК распространяться в различных средах используется в системах неразрушающего контроля, эхолотах, уровнемерах, ультразвуковых медицинских диагностических установках, датчиках приближения систем автоматизации производственных процессов и т.д. Звуковые коле-

бания в отличие от электромагнитных могут распространяться только в какой-либо упругой среде. В общем случае скорость распространения звука зависит от изменений плотности упругой среды (ρ) в пространстве и времени, давления (P) и температуры среды, а также от локальных изменений скорости отдельных частиц упругой среды. Скорость распространения ультразвуковых волн в газовой среде (C) определяется следующим выражением:

$$C = (k \cdot P/\rho)^{1/2} = \lambda \cdot f,$$

где P обозначает давление газовой среды; ρ – плотность упругой среды; λ и f – соответственно, длина волны и частота ультразвуковых колебаний; k – адиабатический коэффициент для газов.

Для воздуха адиабатический коэффициент равен 1,4, а плотность имеет значение 1,29 кг/м³ при давлении 1013 Па.

Относительное изменение скорости распространения звука, как следует из этой формулы, составляет примерно 0,17 % на один градус. В табл. 2.2 представлена зависимость скорости распространения звука в воздухе от температуры. Скорость распространения звука в воздушной среде существенно зависит и от давления воздуха: с ростом давления она увеличивается, а максимальное значение относительного изменения скорости звука во всём диапазоне колебания атмосферного давления на уровне моря составляет примерно 5 %

Таблица 2.2

T °C	– 20	0	20	40	60	80
$C_{\text{в}}$ м/с	319,3	331,6	343,8	355,3	366,5	377,5

На рис. 2.24 представлена зависимость скорости звука от температуры и давления воздуха. Кроме того, скорость звука зависит от состава воздуха, например от процентного содержания CO₂ в воздухе и относительной влажности.

В составе ультразвуковых датчиков в большинстве случаев используются пьезоэлектрические керамические преобразователи, которые позволяют получать УЗК высокой частоты, обеспечивая тем самым лучшую направленность распространения ультразвуковых волн. Кроме пьезоэлектрического эффекта, для получения УЗК широко используется и электростатический метод, реализуемый электростатическими преобразователями.

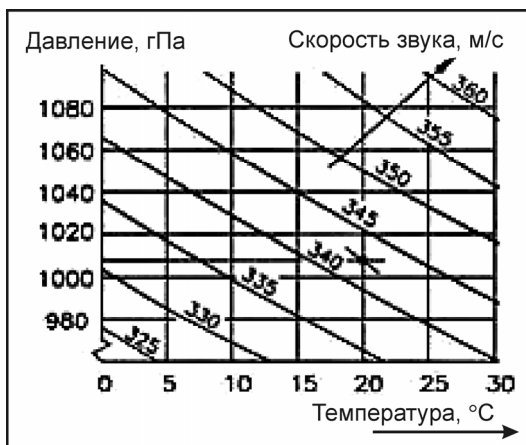


Рис. 2.24. Зависимость скорости звука от температуры и давления воздуха

Пьезоэлектрические кристаллы имеют свойство изменять размеры (деформироваться) при воздействии на определённые поверхности кристалла электрического напряжения. Таким способом электрическая энергия может быть преобразована в механическую. И наоборот, когда давление прикладывается к внешней поверхности кристалла, образуется заряд, который может быть преобразован в напряжение.

В качестве материалов для пьезоэлектрических кристаллов обычно используются титанат свинца (PbTiO_3) и цирконат свинца (PbZrO_3).

При формировании УЗК в воздухе важна корректная реализация перехода между ультразвуковым генератором и окружающей воздушной средой. Для получения эффективного излучения должна быть создана большая амплитуда колебаний, а для этого необходим «механизм» трансформации, который преобразовал бы небольшую амплитуду изменения параметров конденсатора (электростатический метод) или пьезокерамического элемента (ПКЭ) в большую амплитуду распространяющихся в воздушной среде колебаний.

Далее кратко описываются наиболее распространённые способы выполнения такой трансформации.

2.9.1. Электростатический ультразвуковой преобразователь

Основными элементами преобразователя являются тонкая металлизированная пластиковая плёнка (фольга) и бороздчатая металлическая пластина, которые вместе образуют конденсатор (рис. 2.25). В случае подключения к пластине внешнего постоянного напряжения электростатическая сила воздействует на фольгу, фольга и пластина притягиваются друг к другу. Переменное напряжение определённой частоты, которое накладывается на постоянное напряжение, вызывает вибрирование фольги с той же частотой. «Подпорка» постоянным напряжением необходима потому, что сила, действующая на фольгу, пропорциональна квадрату приложенного напряжения, и при использовании только переменного напряжения потребуется вдвое по амплитуде напряжение. Пластина удерживается под постоянным давлением посредством плоской пружины. Возможна настройка частоты УЗК до 500 кГц.

Основные характеристики:

- широкая полоса пропускания;
- малое время затухания и нарастания сигнала;
- относительно низкое акустическое давление;
- открытая конструкция.

Главным недостатком таких преобразователей является потребность в высоком внешнем напряжении.

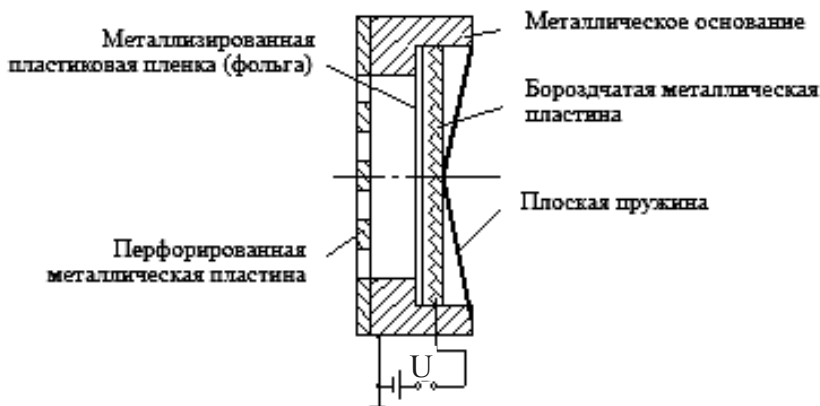


Рис. 2.25. Схематичное представление электростатического ультразвукового преобразователя

2.9.2. Преобразователь с изгибаемыми пластинами

Пьезокерамический диск приклеен к металлическому диску (рис. 2.26). При подключении внешнего напряжения диаметр пьезоэлектрического диска изменяется, что создаёт усилие сдвига и вызывает изгиб с определённой амплитудой всей системы из двух дисков. Основные характеристики:

- высокие показатели электроакустического преобразования;
- относительно низкая частота;
- низкий уровень звуковых сигналов;
- узкая полоса пропускания (резонансная система);
- большое время затухания;
- возможна герметизированная конструкция.

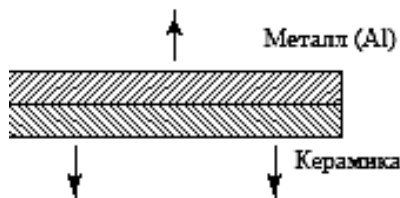


Рис. 2.26. Схематичное представление преобразователя с изгибаемыми пластинами

На рис. 2.27 приведён пример диаграммы направленности излучения ультразвукового датчика UJ4000 FP H12 фирмы Perperl+Fuchs (диаметр излучателя 50 мм, диапазон измерения до 4 м, частота излучателя 90 кГц) с указанием зон чувствительности, соответствующих измеряемым объектам с разными отражательными свойствами и размерами; диаграмма построена на основе реальных измеренных данных, нормированных по звуковому давлению при температуре 0 °С.

Электронная часть датчика. Основными компонентами электронной части ультразвуковых датчиков фирмы являются блоки излучателя и приёмного усилителя (рис. 2.28).

Излучатель включает в себя электронный ключ, генератор колебаний и усилительный выходной каскад, с выхода которого выдаётся напряжение, требуемое для возбуждения пьезокерамического элемента. Генератор предварительно настраивается на резонансную частоту ультразвукового преобразователя.

Приёмник состоит из ограничителя, усилителя с регулируемым коэффициентом усиления, селективного усилителя, выходного усилительного каскада и компаратора. Сигнал, принимаемый от

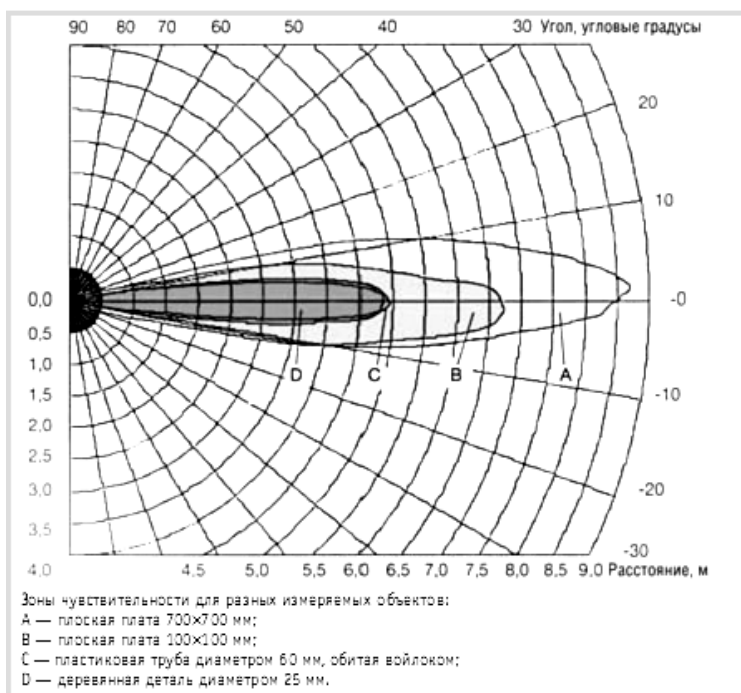


Рис. 2.27. Пример реальной диаграммы направленности излучения ультразвукового датчика UJ4000%FP%H12

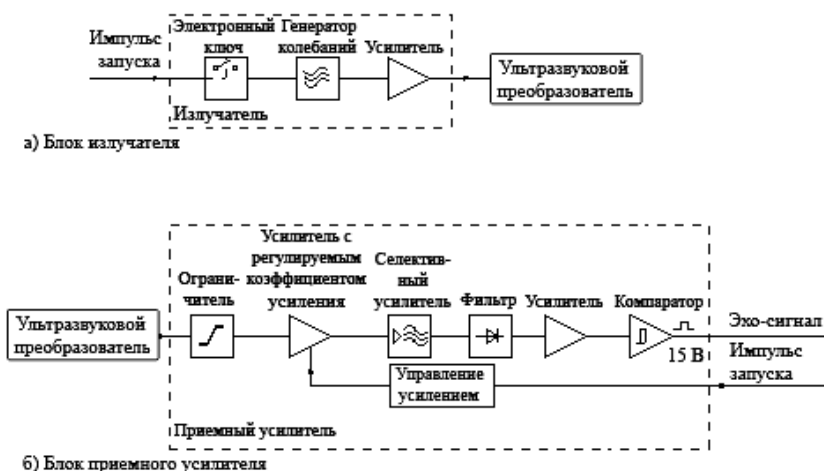


Рис. 2.28. Блок-схемы излучателя и приёмного усилителя

ультразвукового преобразователя, может иметь амплитуду в диапазоне от нескольких микровольт до нескольких вольт. Для обеспечения возможности дальнейшей обработки ограничитель отсекает амплитуды слабых принимаемых сигналов. Сигналы, отражённые от фона, подавляются на усилителе с регулируемым коэффициентом усиления. Этот же усилитель совместно со схемой управления усилением препятствует уменьшению амплитуды отражённого сигнала при увеличении расстояния между измеряемым объектом и датчиком. Назначение селективного усилителя заключается в том, чтобы отфильтровывать случайные (паразитные, побочные) ультразвуковые сигналы и пропускать к дальнейшей обработке только полезный сигнал. Этот сигнал демодулируется, детектируется и только затем полученная огибающая усиливается. Амплитуда огибающей сравнивается с предварительно установленным порогом на компараторе; в случае когда пороговое напряжение превышено, на выходе возникает импульс, равный по амплитуде напряжению питания, и передаётся для обработки в электронную схему.

Кроме излучателя и приёмника, современный ультразвуковой датчик должен иметь в своем составе электронную схему обработки сигнала и управления распределением временных интервалов и функционированием выходного каскада датчика (рис. 2.29). Так как электронная часть датчика должна решать сложные задачи управления, предпочтительнее применять микропроцессорную схему. Дополнительным преимуществом в данном случае является то, что алгоритм обработки может быть не жёстко установленным, а гибким и реализованным в виде программы. Одна и та же микропроцессорная схема может применяться для управления разнообразными выходными каскадами или выполнять обработку сигналов по разным алгоритмам.

Функциями, которые выполняются встроенным контроллером, обычно являются генерирование тактовой частоты, управление длительностью излучаемого импульса, определение времени распространения отражённого сигнала, распознавание сигналов помехового происхождения, управление выходным каскадом и самодиагностика. Кроме того, контроллер может устанавливать связь с центральным компьютером через соответствующий интерфейс.

Принцип работы. Преобразователь посылает пачку ультразвуковых импульсов и формирует напряжение, соответствующее при-

нятому отражённому сигналу. Встроенный контроллер вычисляет расстояние по времени распространения эхосигнала и скорости звука.

Длительность излучаемого импульса и время затухания колебаний (переходных процессов) ультразвукового преобразователя определяют размер «слепой» зоны, в которой датчик не может обнаружить объект.

Частота ультразвуковых колебаний лежит в диапазоне от десятков до сотен килогерц в зависимости от типа датчика; частота повторения пачек импульсов находится между единицами и сотнями герц.

Важнейшей характеристикой ультразвукового датчика является размер зоны обнаружения. Зона ограничена минимальным и максимальным расстояниями обнаружения, значения которых зависят от параметров преобразователя. В зависимости от используемых методов различают несколько типов ультразвуковых датчиков, основными из которых являются датчики, осуществляющие измерение времени, затрачиваемого звуком на распространение до измеряемого объекта и обратно (непосредственное обнаружение), и датчики, выполняющие проверку приёма переданного сигнала (ретрорефлективный, или рефлекторный метод).



Рис. 2.29. Блок-схема ультразвукового датчика

Непосредственное обнаружение системой с одним преобразователем. В этом случае излучатель и детектор располагаются в одном корпусе, что обеспечивает компактность конструкции датчика. Недостатком этого метода является относительно большое минимальное расстояние обнаружения: отражённые сигналы от объек-

тов, расположенных очень близко к датчику, поступают раньше окончания спада импульса излучателя и по этой причине не могут быть обработаны.

Непосредственное обнаружение системой с двумя отдельными преобразователями. Путем применения двух отдельных преобразователей минимальное расстояние обнаружения может быть существенно уменьшено по сравнению со случаем использования единого приёмопередатчика. Если приёмник акустически разделён с излучателем, то, в принципе, отражённый сигнал может быть принят сразу после излучения, а в реальных условиях это происходит с некоторой задержкой, определяемой переходными процессами в преобразователях.

Оба преобразователя могут располагаться в одном корпусе или устанавливаться раздельно.

Ретрорефлективный метод. Данный метод является наиболее устойчивым к помехам. Контролируется пространство между датчиком и стационарным рефлектором. Приёмник улавливает ультразвуковой сигнал, отражённый от рефлектора. При пересечении луча объектом происходит срабатывание датчика.

Метод прерывания луча. Этот метод характеризуется большой дальностью обнаружения, так как в данном случае для определения местоположения объекта ультразвуковая волна должна пройти расстояние между излучателем и приёмником только в одном направлении. Помехоустойчивость этого метода лучше, чем у метода непосредственного обнаружения, потому что обрабатывается излучённый, а не отражённый ультразвуковой импульс. Однако реализация метода прерывания луча требует более высоких затрат. Метод предпочтителен для использования внутри помещений.

Эхолокация. В одном из вариантов устройства ультразвуковой приемопередатчик размещается над поверхностью жидкости (рис. 2.30).

Ультразвуковой импульс падает на поверхность жидкости и отражается от нее к приемнику. Может быть измерено время от момента излучения до приема отраженного импульса. Это время зависит от расстояния поверхности жидкости до приемопередатчика. Таким образом, может быть определено положение уровня поверхности. На рис. 2.31 приведены осциллограммы сигналов приемопередатчика.

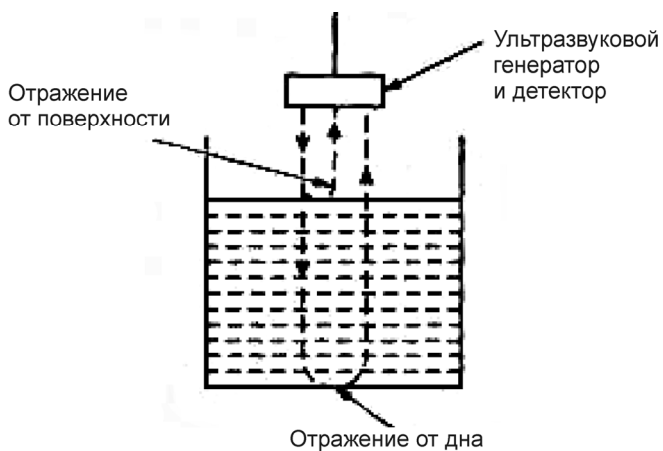


Рис. 2.30. Ультразвуковой уровнемер



Рис. 2.31. Сигналы ультразвукового приемопередатчика

2.10. Измерение расхода жидкости и газа

Термин *жидкость* используется для описания вещества, обладающего способностью течь, т.е. здесь имеются в виду и жидкости, и газы. Если движение жидкости подчинено какому-то порядку, то говорят о ее струйном движении или ламинарном потоке либо через трубу, либо по поверхности. При этом каждая частица жидкости движется строго по линиям, параллельным стенкам трубы.

Частицы жидкости, непосредственно прилегающие к стенкам, движутся медленнее, что объясняется действием вязкости, а на самых стенках их скорость падает до нуля. Вследствие этого возникает градиент скорости. Вышеописанная ситуация характерна для скоростей потока меньше критической скорости. При больших скоростях потока движение становится хаотическим, и каждая частица жидкости в этом случае перемещается по очень извилистой траектории. Такое движение жидкости называют *турбулентным потоком*. Несмотря на хаотическую природу такого потока, в среднем для всего потока по трубе получается профиль скорости, подобный показанному на рис. 2.32

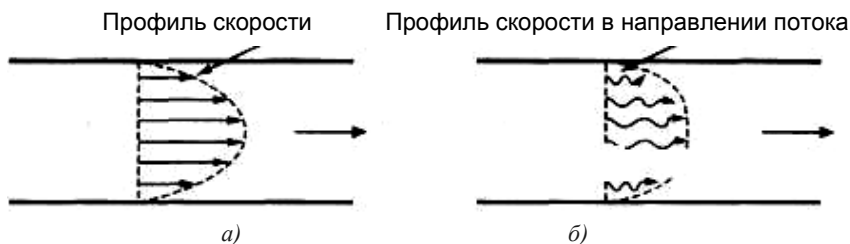


Рис. 2.32. а – ламинарное течение; б – турбулентное течение

Существует огромное количество способов измерения расхода потока. В табл. 2.3 приведены основные.

Таблица 2.3

Способ измерения расхода	Система	Характеристики
Объемный расход по перепаду давления	1. Трубка Вентури	Метод простой, точный, надежный, потери давления 10... 15 %, нелинейный, может применяться для разбавленных суспензий

Способ измерения расхода	Система	Характеристики
	2. Измерительная диафрагма	Метод простой, дешевый, точность составляет порядка ± 1.5 , потери давления 50...70 %, нелинейный
	3. Сопло	Дешевле, чем трубка Вентури, но дороже, чем измерительная диафрагма, потери давления 40...60 %, погрешность $\pm 0.5\%$
	4. Трубка Дама	Большой перепад давления и большая компактность, чем у трубки Вентури, потери давления 4...6 %
	5. Переменное сечение	Ротаметр: точность $\pm 1\%$, дешевый, диапазон измерений 30X10-6... 1 м ³ /с
	6. Переменное проходное сечение	Линейный, диапазон измерений для воды до 3 м ³ /с, до 200 бар по давлению и до 500°C по температуре
Механический	7. Мишень	Диапазон измерений приблизительно до 0.03 м ³ /с, точность $\pm 0.5\%$, может применяться для загрязненных и вязких жидкостей
	8. Турбина	Диапазон измерений примерно до 1 м ³ /с, погрешность $\pm 0.3\%$, хорошая воспроизводимость, дорогой
	9. Вращающаяся крыльчатка	Применяется для жидкостей и газов
По вытеснению объема	10. Вращающийся плунжер	Точность $\pm 1\%$, применяется для воды
	11. Поршень	Погрешность $\pm 0.1\%$, широкий диапазон измерения, применяется для жидкостей
	12. Качающийся диск	Погрешность $\pm 1\%$, используется для жидкостей
	13. Вращающийся импеллер	Профилированные пары: используются для масел в диапазоне до 1 м ³ /с и до 80 бар по давлению. Кулачковые пары: используются для газов в диапазоне 0.003...3 м ³ /с, погрешность $\pm 1\%$
	14. Вращающаяся крыльчатка	Используется для масел и горючих жидкостей, погрешность $\pm 0.1\%$

Способ измерения расхода	Система	Характеристики
	15. Дифрагменный измеритель	Используется для измерения расхода бытового газа
	16. Герметичный барабан	Применяется для измерения расхода газа
Магнитогидродинамический	17. МГД	Используется для проводящих жидкостей, скорость до 10 м/с, погрешность $\pm 1\%$
Ультразвуковой	18. Датчик Доплера	Относительно дешевый, плохая точность (хуже $\pm 5\%$), полезен как индикатор потока или его отключения
	19. Время пролета	Используется для жидкостей в трубах или открытых каналах при скоростях 0.2...12 м/с, погрешность $\pm 1\%$
	20. Корреляция	Большое время реакции
Колебательный	21. Вихри в потоке	Используется и для жидкостей, и для газов при высоких давлениях и температурах, погрешность $\pm 1\%$
	22. Закрутка потока	Используется для жидкостей в диапазоне $6 \times 10^{-4} \dots 2 \text{ м}^3/\text{с}$, погрешность $\pm 1\%$
Массовый расход Прямое измерение	23. Силы Кориолиса	Используется для жидкостей и газов, погрешность $\pm 0.5\%$
	24. Температура	Используется для газов в диапазоне $2.5 \times 10^{-10} \dots 5 \times 10^{-3} \text{ кг/с}$
Расчетный	25. Турбинно-вибрационный элемент	Используется для жидкостей и газов
Мгновенная скорость По давлению	26. Трубка Пито	Для жидкостей или газов, погрешность $\pm 1 \dots 2\%$
	27. Многозаборная трубка Пито	Для жидкостей или газов, погрешность $\pm 1\%$
Термический	28. Анемометр с нагретой проволочкой	Для газов – в диапазоне 0.1...500 м/с, жидкостей – в диапазоне 0.01...5 м/с, погрешность $\pm 1\%$

Рассмотрим подробнее несколько наиболее употребляемых методов.

2.10.1. Трубка Вентури

Трубка Вентури (рис. 2.33) имеет постепенное коническое сужение трубы от начального диаметра. Диаметр сужения должен быть не менее $0,224D$ и не более чем $0,742D$, где D – начальный диаметр. Входная конусность трубы должна быть равна $10,5 \pm 1^\circ$, а выходная – $5 \dots 15^\circ$. Перепад давления в потоке до места сужения и в самом сужении может быть измерен простым U-образным манометром или мембранным манометром. Потери давления от введения трубки Вентури составляют $10 \dots 15 \%$, т.е. незначительную величину. Прибор может применяться и для жидкостей, и для газов. Он прост в работе, способен обеспечить высокую точность (может быть выше чем $\pm 0,5 \%$), имеет хорошую надежность, но он дорог и имеет нелинейность зависимости объемного расхода от перепада давления.

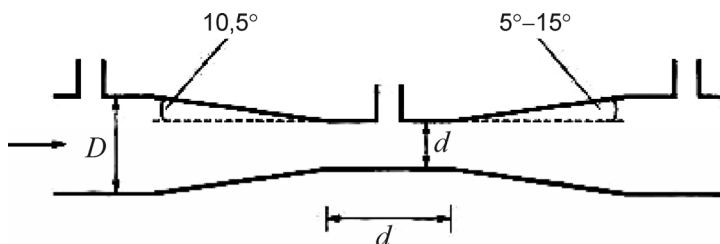


Рис. 2.33. Трубка Вентури

2.10.2. Измерительная диафрагма

Измерительная диафрагма (рис. 2.34) – это просто диск с отверстием, хотя существует большое разнообразие их форм. Наиболее широко применяется концентрическая форма диска с центральным круглым отверстием. В других разновидностях форма может быть эксцентрической со смещенным от центра круглым отверстием. Измерительные диафрагмы такой формы используются в тех случаях, когда в газовом потоке имеются конденсирующиеся жидкости или в потоке жидкости присутствуют нерастворенные газы.

В случаях, когда в потоке жидкости присутствуют частицы, полезным может оказаться диафрагма с сегментной формой центрированного круглого отверстия. Перепад давления может быть измерен между точкой, удаленной на расстояние диаметра трубы вверх по потоку, и точкой, удаленной на половину диаметра трубы вниз по потоку от диафрагмы, или же в точках на каждой стороне диафрагмы. Такие устройства имеют нелинейную зависимость объемного расхода от перепада давления. По сравнению с трубками Вентури измерительные диафрагмы являются более простыми, надежными, создают большие перепады давления (более чем в два раза), более дешевы, но и менее точны (более $\pm 1,5\%$), они дают также большие потери давления (около 50...70 %). Если в потоке жидкости имеются твердые частицы, могут появиться проблемы, связанные с их осаждением и закупоркой отверстия.

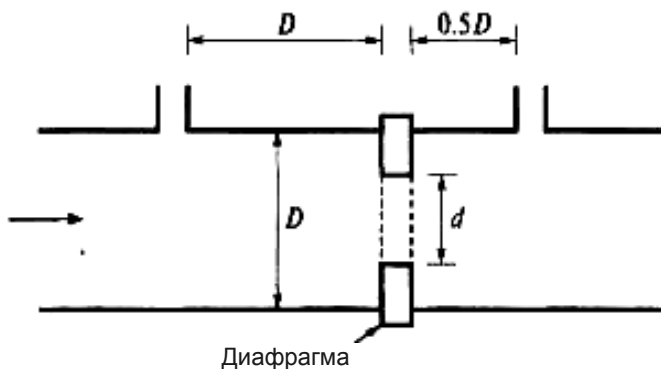


Рис. 2.34. Измерительная диафрагма

2.10.3. Анемометр с нагретой проволокой

Анемометр с нагретой проволокой состоит из небольшого проволочного сопротивления, помещенного в поток (рис. 2.35). Прохождение электрического тока через проволоку приводит к подъему ее температуры до величины, которая определяется скоростью ее теплопотерь. Последние зависят от скорости потока жидкости. В равновесном состоянии справедливо:

$$i^2 R = hA (T_s - T_f),$$

где i – ток через датчик, R – сопротивление датчика, A – эффективная поверхность, T_s – температура датчика, T_f – температура жидкости. Коэффициент теплопередачи h зависит от скорости v жидкости:

$$h = C_0 + C_1 v^{1/2},$$

где C_0 и C_1 – константы.

Обычно сопротивление, а, следовательно, и температура чувствительного элемента поддерживаются на постоянном уровне за счет регулирования тока.



Рис. 2.35. Анемометр с нагретой проволокой

2.10.4. Ультразвуковые расходомеры

В связи с необходимостью организации коммерческого учета задача измерения расхода различных жидкостей и газов с высокой точностью приобрела большую актуальность. Существует большое многообразие приборов для измерения расхода. В последние годы данная задача эффективно решается с использованием ультразвуковых расходомеров с накладными датчиками, так как, во первых, не нарушается целостность трубопровода, а во вторых, в поток жидкости не вносится никакое препятствие. Наибольшее распространение получили ультразвуковые расходомеры двух типов:

– расходомеры, в которых используется тот факт, что скорость распространения ультразвуковой волны C в движущейся среде является векторной суммой

$$C = C_{\text{ж}} + V,$$

где $C_{\text{ж}}$ – скорость распространения ультразвука в неподвижной жидкости, а V – скорость течения жидкости;

– расходомеры, основанные на эффекте Доплера, имеющем место при отражении ультразвуковой волны от некоторого отражателя или группы отражателей, движущихся в потоке жидкости.

В расходомерах, относящихся к первой группе, отклонения величины C от её значения в неподвижной жидкости определяются путем косвенных измерений следующих величин:

а) разности времен Δt (временнóй импульсный метод) прохождения ультразвуковых импульсов по потоку и против него;

б) разности фаз $\Delta \varphi$ (фазовый метод) между ультразвуковыми колебаниями, распространяющимися по потоку и против него;

в) разности частот Δf (частотный метод) двух автогенераторов, в качестве элемента обратной связи которых используется контролируемая среда.

Временнóй импульсный метод. Ультразвуковые временнóй импульсные расходомеры в основном используются для измерения расхода «чистых» жидкостей, т. е. сред, содержащих сравнительно небольшое количество твердых и газовых включений. В случае же, если необходимо проводить измерение расхода неоднородных жидкостей, таких как сточные воды и пульпы, нужно использовать доплеровские расходомеры.

На рис. 2.3.6 приведена структурная схема ультразвукового временнóй импульсного расходомера УВР-011 с накладными датчиками. Расходомер включает в себя два электроакустических преобразователя, монтируемых с внешней стороны трубопровода, и электронный блок, выполненный на базе микропроцессора.

Цикл измерения, инициируемый микроЭВМ, начинается с выбора одного из направлений излучения ультразвукового импульса (например, по потоку). При этом ЭП2 излучает сигнал, а ЭП1 принимает его. Принятый сигнал через коммутатор поступает на схему выделения полезного сигнала, где усиливается и фильтруется от помех. Здесь же принимается решение о наличии или отсутствии сигнала, что позволяет избежать ошибочных измерений при пропадании ультразвуковых колебаний, например при опустошении трубопровода. Определение времени распространения сигнала осуществляется в блоке измерения временных интервалов, с выхода которого оценка t_1 поступает в микроЭВМ. Далее по команде микроЭВМ направление излучения меняется на противоположное и повторяется описанная процедура измерения времени распространения сигнала t_2 теперь уже против потока. На этом цикл измерения завершается, и микроЭВМ осуществляет расчет текущего значения расхода жидкости в соответствии с выражением.

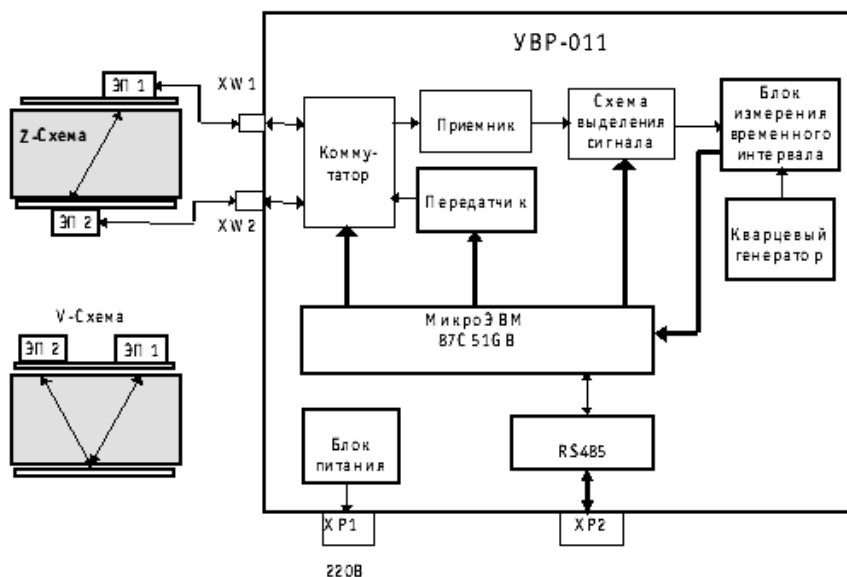


Рис. 2.36. Структурная схема ультразвукового времяимпульсного расходомера УБР-011

Ультразвуковой доплеровский расходомер с накладными датчиками УДР-011. На рис. 2.37 приведена структурная схема ультразвукового доплеровского расходомера УДР-011 с накладными датчиками. Прибор содержит два ЭП, размещенных с внешней стороны трубопровода, и электронный блок, образованный кварцевым генератором, усилителем мощности, квадратурным приемником, фазовым детектором (ФД), схемой оценки центра тяжести спектра принятого сигнала, а также микроЭВМ.

В данном приборе реализован принцип квадратурной демодуляции принятого сигнала, позволяющий определять направление движения жидкости. ЭП1, возбуждаемый непрерывными колебаниями с частотой ω_0 , поступающими с выхода усилителя мощности, создает ультразвуковую волну, излучаемую в контролируемую среду под углом к оси трубопровода. На вход приемного преобразователя ЭП2 поступает сигнал, отраженный от неоднородностей потока. Принятые колебания подаются в приемник, на выходе которого выделяется квадратурный сигнал доплеровской частоты,

поступающий, с одной стороны, на ФД, а с другой – на вход схемы оценки центра тяжести спектра.

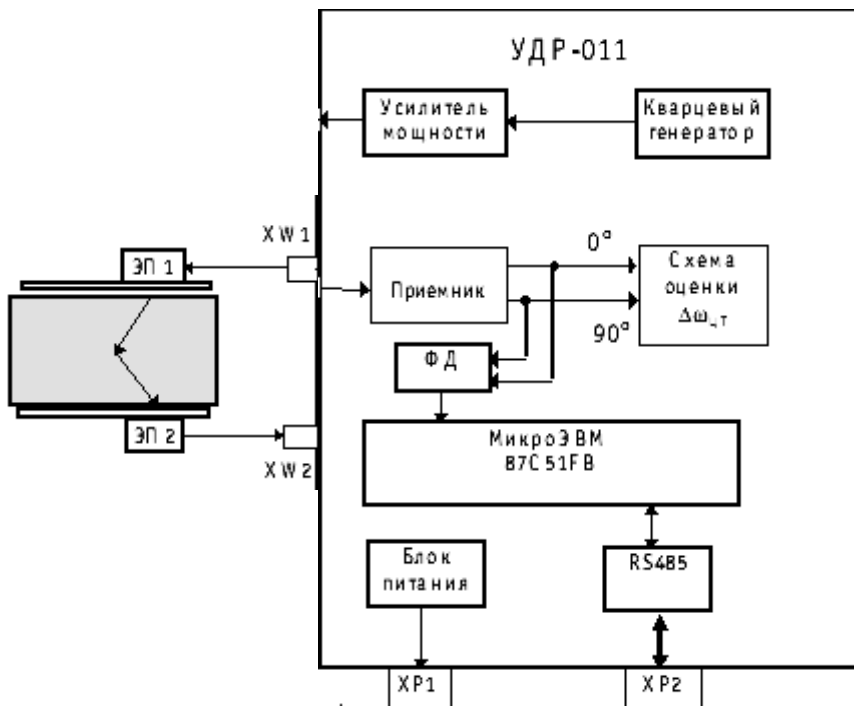


Рис. 2.37. Структурная схема ультразвукового доплеровского расходомера УДР-011 с накладными датчиками

Численное значение $\Delta\omega_{цт}$ поступает в микроЭВМ, где и осуществляется расчет значения расхода Q .

2.11. Измерение химического состава

В этой главе представлены некоторые методы, используемые для химического анализа. В табл. 2.4 представлен список описываемых методов и их основные характеристики.

Таблица 2.4

Принцип	Система	Характеристики
Хромато- графиче- ский	Бумага	Простой лабораторный метод разделения молекул
	Тонкие слои адсорбента	Более чувствительный, чем предыдущий метод
	Жидкость	Лучшие воспроизводимость, разрешение и точность, чем во втором методе, но меньшая чувствительность. Используется для разделения молекул летучих и ионных веществ
	Газ	Используется для разделения молекул летучих веществ
Электро- хи- мический	Проводимость	Измерение концентрации ионов в электролитах
	Гальваническая	Измерение концентрации ионов в электролитах, включая pH
	Полярография на постоянном токе	Измерение концентрации ионов
	Полярография с очисткой анода	Более чувствительна, чем полярография на постоянном токе, измерение следов металлов
Спектро- ско- пический	Спектроскопия по поглощению в ультрафиолетовом и видимом спектре	Очень чувствительный и точный количественный метод
	Спектроскопия по поглощению в инфракрасном спектре	Используется для установления структуры и идентификации молекул, а также для проведения количественных анализов
	Атомно-эмиссионная спектроскопия	Высокочувствительный метод идентификации металлов с ограниченной чувствительностью к галогенам и неметаллам
	Спектроскопия по атомному поглощению	Быстрый количественный анализ исследуемого металла
	Флуоресцентная спектроскопия	Высокочувствительный, высокоселективный метод, используется для анализа следов соединений или элементов
Массовый	Масс-спектрометрия	Определение ионов по величине отношения их массы к заряду, высокочувствительный, высокоточный метод

Принцип	Система	Характеристики
Термический	Дифференциальный термический анализ	Определение температуры фазовых переходов и реакций, используется для исследования термической стабильности и фазовых диаграмм состояния веществ
	Термогравиметрия	Определение изменений массы вещества как функции температуры, используется для исследований термической стабильности и анализа химического состава

2.11.1. Газовая хроматография

Газовая хроматография – это широко применяемый поточный метод анализа. Тестируемый образец в виде паров или газа вводится в поток газа-носителя, например аргона, гелия или азота, который движется над стационарной фазой (рис. 2.38). Ограничения метода заключаются в том, что образец должен быть газообразным или летучим настолько, чтобы его можно было испарить без разложения. В *хроматографии с фазами газ – жидкость* стационарной фазой является тонкий слой нелетучей жидкости, покрывающей твердые частицы в колонке (твердые частицы являются лишь подложкой для жидкости). В *хроматографии с фазами газ – твердое вещество* стационарную фазу представляют твердые частицы. Хроматографическая колонка, по которой перемещается подвижная фаза, представляет собой длинную трубку, свернутую в спираль. Скорость, с которой компоненты исследуемого образца движутся по колонке, зависит от их взаимодействия со стационарной фазой: жидкой или твердой.

Газ на выходе из колонки определяется с помощью соответствующего детектора. Хроматограмма представляет собой серию пиков, каждый из которых привязан к определенному моменту времени, соответствующему конкретному компоненту исходного сложного образца.

2.11.2. Спектроскопия

Спектроскопия – это измерение и идентификация электромагнитного излучения, которое испускается, рассеивается или поглощается атомами, молекулами или другими группами атомов.

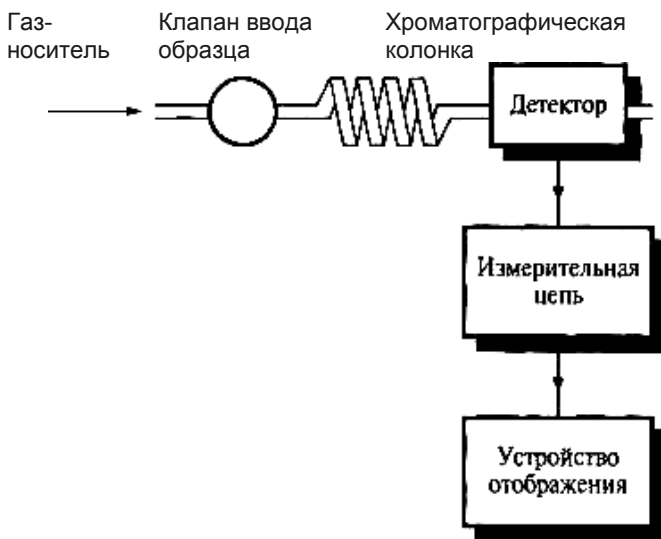


Рис. 2.38. Газовый хроматограф

Спектроскопия поглощения излучения в ультрафиолетовом и видимом спектре. Приборы для детектирования и измерения интенсивности излучения, поглощенного молекулами в ультрафиолетовой и видимой частях спектра, состоят из:

- источника ультрафиолетового или видимого света, испускающего излучение непрерывного диапазона длин волн;
- устройства выбора длины волны излучения, проходящего через образец;
- фотодетектора для определения интенсивности излучения, прошедшего через образец, и передачи сигнала на отображающее устройство.

Источник ультрафиолетового излучения – это обычно водородная или дейтериевая разрядная лампа, для видимого спектра излучения обычно используется лампа накаливания. С помощью фильтров (поглотительных или интерференционных), а также дифракционных решеток и призм может быть произведен выбор определенного узкого диапазона длин волн. В качестве детекторов могут применяться фотодиоды, фотоэмиссионные элементы или фотоумножительные трубки. Так как фотодиоды имеют небольшие

размеры, из них может быть построена фотодиодная линейка или двумерная матрица.

В простейшей форме прибора используется один луч (рис. 2.39 *а*). Поглощение определенной длины волны исследуемым образцом сравнивается с ее поглощением эталонным образцом. Например, проводятся два отдельных измерения поглощения излучения в ячейке с образцом в растворителе и в ячейке с чистым растворителем, после чего результаты этих двух измерений сравниваются.

В двухлучевом приборе (рис. 2.39 *б*) излучение расщепляется на два луча, один луч проходит через исследуемый образец, другой – через сравнительный эталонный образец. Обычно используется прерывистое излучение с переменной длиной волны. Через образец и эталон проходят световые импульсы, которые, объединяясь на выходе, дают сигнал, по которому можно определить степень поглощения веществом излучения определенных длин волн. Это дает возможность сделать сравнение поглощений при непрерывном изменении длин волн, и, таким образом, на устройстве отображения можно получить зависимость величины поглощения от длины волны, а, значит, и проанализировать состав исследуемого вещества.

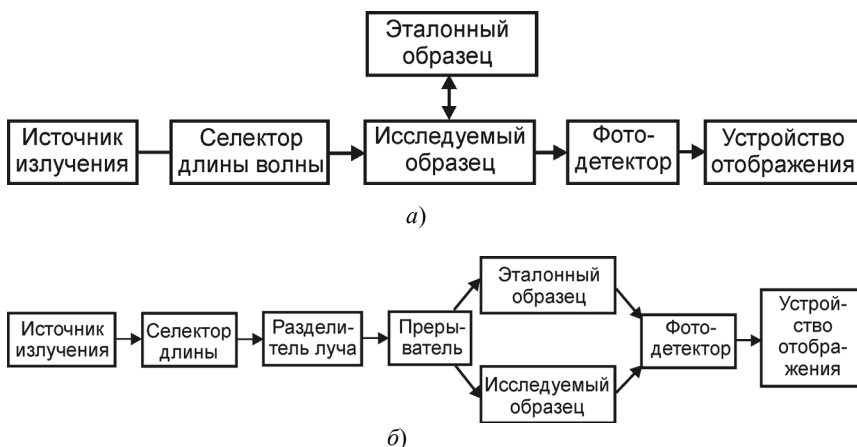


Рис. 2.39. Схемы спектрофотометров:
а – однолучевой метод; *б* – метод двойного луча

Инфракрасная спектроскопия. Инфракрасная спектроскопия поглощения дает информацию об изгибных, вращательных и колебательных движениях атомов в молекулах и используется для того, чтобы определить структуру и идентифицировать органические и неорганические соединения посредством идентификации характеристик абсорбционных спектров функциональных групп в молекулах. Метод используется для идентификации и количественного анализа.

Имеются два типа приборов с частотным разделением и без него. Приборы первого типа имеют устройство для выбора длин волн – призму или дифракционную решетку для частотного разложения излучения. Приборы этого типа аналогичны спектрофотометрам ультрафиолетового и видимого спектра с двойным лучом, как на рис. 2.39 б.

В приборах без разложения частот для выделения узкой полосы длин волн обычно используются фильтры, что необходимо для исследования узкой конкретной области волн без сканирования всего спектра поглощения. На рис. 2.40 показана блок-схема устройства таких приборов. Излучение от источника расщепляется на две части, одна проходит через исследуемый образец, другая – через сравнительный эталонный образец. Два луча затем комбинируются при помощи прерывателя так, что на выходе происходит чередование сигналов от образца и эталона. После этого сигнал пропускается через фильтр, чтобы выделить диапазон длин волн, который будет фиксироваться детектором, информация с которого поступает на устройство отображения. Такие приборы используются для серийных исследований известных веществ.

Для исследования разных частей инфракрасного спектра требуются различные источники излучения, оптические системы и детекторы. Так, для приборов с рассеянием инфракрасного излучения в диапазоне 0.8...2.5 мкм, источником излучения является вольфрамовая нить лампы накаливания. Для оптической системы используется кварцевая призма или отражающая дифракционная решетка. В качестве детектора применяется фоторезистор. Для средней области инфракрасного излучения диапазона 2.5...50 мкм источником может служить или нить накала Нернста (прут, изготовленный из сплавленной смеси оксидов), или нить накала Глобара (прут из карбида кремния), или раскаленная спираль из нихро-

мовой проволоки. В качестве оптической системы часто используется набор дифракционных решеток либо с кварцевой призмой, либо с фильтром. Детектором является термобатарея, пирокристалл (такой кристалл имеет поверхностный заряд, величина которого зависит от температуры) или термистор. Для инфракрасной области в диапазоне 50...1000 мкм в качестве источника излучения используется ртутно-дуговая лампа высокого давления, отражательная дифракционная решетка применяется для работы в нижней части спектра и интерферометр – в верхней части спектра, а детектором является пневматический детектор Голя (здесь излучение вызывает рост давления в ячейке, что, в свою очередь, приводит к деформации диафрагмы) или пирозлектрический кристалл.

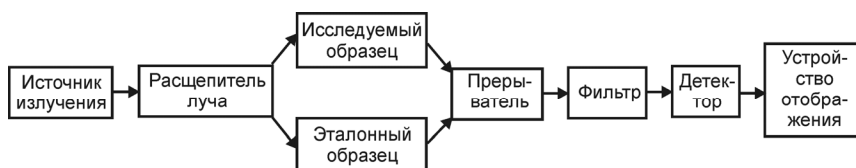


Рис. 2.40. Схема инфракрасного спектрометра с фильтрами

Атомная эмиссионная спектроскопия. Атомная эмиссионная спектроскопия имеет дело с излучением, испускаемым возбужденными электронами, входящими в состав атомов. Величины испускаемых длин волн являются характеристикой атомов определенных элементов и играет такую же роль, как отпечатки пальцев при их идентификации. Это очень чувствительный метод идентификации всех металлических элементов с ограниченной чувствительностью к галогенам и другим неметаллам.

При сжигании образца в пламени он распадается на отдельные атомы, находящиеся в возбужденном состоянии. По этой причине на этот метод часто ссылаются как на *пламенно-эмиссионную спектроскопию*. Исследуемый образец в растворенном виде вводится в высокоскоростной газовый поток, где распыляется в тонкий аэрозоль. Получающаяся тонкая смесь соединяется затем со смесью окислителя и топлива и сжигается в горелке. Излучение расщепляется на составляющие его длины волн с помощью призмы или дифракционной решетки, и характерные длины волн детектируются фотодетектором. Выходной сигнал выводится на устройст-

во отображения или регистрируется на фотографическую пластинку (рис. 2.41).

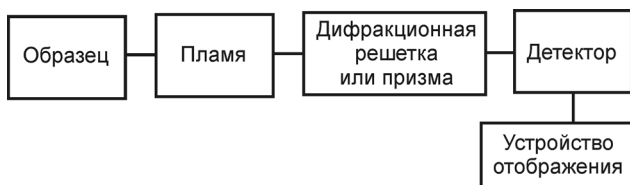


Рис. 2.41. Схема атомно-эмиссионного спектрометра

Флуоресцентная спектроскопия. Излучение, попавшее на молекулу или атом, поглощается ими и может перевести их в возбужденное состояние. Когда возбужденные атомы или молекулы возвращаются в устойчивое состояние, возникает флуоресценция, при этом испускается идентичное излучение или отличное от него. Обычно *флуорометр* состоит из источника излучения (часто это ксеноновая лампа постоянного тока и высокого давления или ртутная лампа низкого давления), фильтра или дифракционной решетки для выделения определенной длины волны этого излучения, которая затем направляется на ячейку, содержащую образец. Результирующая флуоресценция обычно детектируется в направлении 90° к исходному излучению после прохождения ее через еще один фильтр или монохроматор (рис. 2.42). Для получения флуоресценции образец предварительно сжигается в пламени, что необходимо для того, чтобы он распался на отдельные атомы. Флуоресцентная спектроскопия – это высокочувствительный метод количественного определения соединений или элементов с высокой разрешающей способностью.

Масс-спектрометрия. Масс-спектрометрия сортирует исходные виды молекул и их фрагменты-ионы в соответствии с величиной отношения массы к заряду, и, таким образом, появляется возможность их идентифицировать и количественно определять. Это очень чувствительный метод с высокой точностью.

Есть много различных типов масс-спектрометров. В общем виде такой прибор состоит из:

- устройства ввода, при помощи которого образец может быть введен в прибор, давление в котором равно 10^{-5} Па;



Рис. 2.42. Схема флуорометра

- устройства для ионизации образца;
- масс-анализатора, в котором используются электромагнитные поля для разделения ионов в соответствии с отношением масса/заряд;
- системы улавливания ионов, в которой происходит регистрация ионов в соответствии с их отношением масса/заряд (рис. 2.43).



Рис. 2.43. Блок-схема масс-спектрометра

Устройство ввода для жидкостей представляет собой шприц (аналогичный используемому для подкожных инъекций) для впрыскивания исследуемого раствора через резиновую перегородку в камеру низкого давления, где жидкость испаряется и затем напускается через маленькое отверстие в ионизационную камеру. Твердые вещества можно вводить в это устройство на зонде, испаряя их нагревом. Ионизация может проводиться при помощи бомбардировки испаренного образца электронами из электронной пушки. Полученные положительные ионы ускоряются в камере направленным электрическим полем. Имеется ряд разновидностей масс-анализаторов. Один из них включает два компонента, первый – это электрическое поле, направленное под прямым углом по отношению к потоку ионов для разделения ионов по уровню кинетической энергии, и затем магнитное поле для разделения ионов по их отношению масса/заряд. На рис. 2.44 показана схема такого устройства. Наиболее часто используемой системой для улавливания ионов является электронный умножитель, в котором ионы, ударяясь о

металлическую пластину, вызывают эмиссию ее электронов, которые затем притягиваются вторым электродом, откуда эмитируется очередная усиленная порция электронов, которые, в свою очередь, затем попадают на третий электрод и т.д. В системе может быть до 15...18 электродов. Таким образом, число электронов на каждом электроде будет умножаться. При изменении магнитного поля могут быть продетектированы ионы с различными значениями отношений масса/заряд. Альтернативным способом детектирования ионов является получение полного спектра масс на фотографической пластинке.

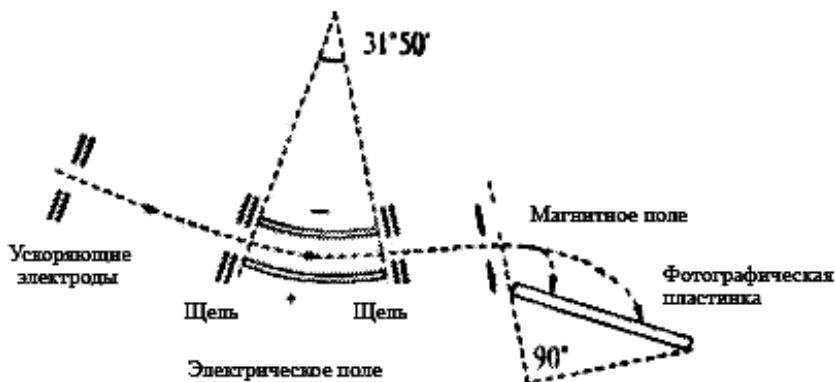


Рис. 2.44. Схема масс-анализатора

2.11.3. Акустический газоанализатор

Акустический газоанализатор содержит (рис. 2.45) измерительную камеру, выполненную в виде резонатора, представляющего собой полый цилиндр. Высота цилиндра равна нечетному числу звуковых полуволн, а диаметр приблизительно равен длине полуволны. По средней линии образующей цилиндрической поверхности, соответствующей половине высоты, где давление звуковой волны минимально, выполнены сквозные отверстия для прохода анализируемого газа, например, атмосферного воздуха.

На торцах резонатора установлен источник и приемник звука, которые соединены с электронным блоком генерации, который, в свою очередь, соединен с микропроцессорным блоком измерения частоты и управления.

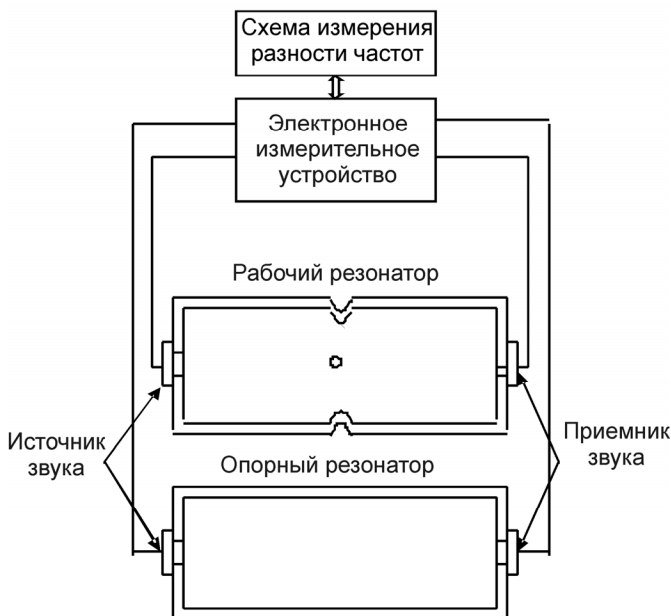


Рис. 2.45. Блок-схема акустического газоанализатора

Электронный блок генерации представляет собой автогенератор на основе схемы ГУН (генератор, управляемый напряжением), в цепь обратной связи которого включен резонатор. Генератор возбуждается на частоте резонатора или кратной ей.

Газоанализатор включает в себя дополнительный резонатор, выполненный в виде герметичного полого цилиндра, заполненного газом с известной молекулярной массой, например, чистым воздухом. Резонатор имеет высоту и диаметр, равные высоте и диаметру рабочего резонатора, размещен рядом с ним и находится в тех же температурных условиях.

Газоанализатор работает следующим образом. Автогенераторы автоматически настраиваются на частоту резонанса соответствующих резонаторов. Частота резонанса (f) определяется скоростью звука в газе, заполняющем основной и дополнительный резонаторы:

$$f = \frac{1}{K_p} \times V,$$

где V – скорость звука в газе; K_P – приведенная высота резонатора.

Скорость звука (V) рассчитывается по следующей формуле:

$$V = \sqrt{\frac{\gamma \times R \times T}{\mu}},$$

где: γ – показатель адиабаты $\left(\gamma = \frac{C_P}{C_V}\right)$; C_P – теплоемкость газа

при постоянном давлении; $C_V = C_P - R$ – теплоемкость газа при постоянном объеме; μ – молекулярная масса газа; R – универсальная газовая постоянная; T – температура газа (К).

Измерение частоты (f) производится микропроцессорным блоком. При отсутствии измеряемого газа в основном резонаторе разность частот (Δf) между основным и дополнительным резонаторами постоянна (равна нулю в частном случае). При наличии в основном резонаторе измерительной камеры примеси газа с молекулярной массой, отличной от молекулярной массы газа, заполняющего дополнительный резонатор, разность частот (Δf) резонаторов изменяется пропорционально изменению концентрации измеряемой примеси газа и измеряется с помощью микропроцессорного блока.

2.12. Оптоволоконные методы измерений

Классификация методов измерений. В настоящее время на рынке измерительных систем и датчиков доминирующее положение продолжают занимать электронные измерительные технологии, которые предполагают преобразование измеряемого параметра в электрический сигнал и последующую его обработку. В волоконно-оптических системах измеряемый параметр преобразуется в оптический сигнал, передающийся по оптоволокну.

Основные типы оптоволоконных датчиков. Оптоволоконные датчики, исходя из принципа кодирования измеряемой информации, можно условно разделить на следующие большие группы:

– фазовые – датчики, в которых используется высококогерентный источник излучения и производится измерение фазы световой волны, изменяющейся под влиянием внешнего параметра;

– со спектральным кодированием – датчики, где в отличие от чисто фазовых используется источник излучения с широким спектром с возможностью анализа всего спектра;

– амплитудные – датчики, в которых измеряемый параметр модулирует интенсивность проходящей или отраженной световой волны;

– туннельные – датчики, где используется эффект туннелирования излучения через малый зазор.

– поляризационные – датчики, использующие информацию о поляризации световой волны.

Стоит отметить, что это не единственный способ классификации оптоволоконных датчиков. Можно провести классификацию по принципу действия:

– интерференционные (Майкельсона, Фабри – Перо, Маха – Цандера и т.д.);

– распределенные (обратное и прямое рассеяние);

– люминесцентные;

– на внутриволоконных решетках;

– комбинированные.

Также можно классифицировать датчики по локализации измеряемого параметра:

– точечные;

– распределенные;

– квазираспределенные.

В табл. 2.5 приведено сравнение оптоволоконных технологий с различными видами кодирования измеряемого параметра.

Таблица 2.5

Название технологии	Принцип действия	Преимущества	Недостатки	Перспективы
Фазовая с когерентным источником излучения	На основе интерферометра Фабри–Перо, Маха – Цандера, Майкельсона, на решетке Брэгга	Чрезвычайно высокая точность	Чувствительность к флуктуациям входного излучения, возможность только относительных измерений сложность в изготовлении	Трудность массового производства

Продолжение табл. 2.5

Название технологии	Принцип действия	Преимущества	Недостатки	Перспективы
Амплитудная	Прямое и обратное рассеяние	Просты в изготовлении, дешевы	Чувствительность к флуктуациям входного излучения, возможность только относительных измерений, низкая точность	Трудность массового производства
Туннельная	Туннелирование света через малый зазор	Чрезвычайно высокая точность	Малый диапазон измерений, необходимость чувствительности к флуктуациям входного излучения, возможность только относительных измерений, необходимость точной юстировки	Неперспективен
Поляризационная	Измерение состояния поляризации	Высокая точность	Необходимость использования дорогого волокна с сохранением поляризации	Высокая себестоимость и сложность изготовления
Спектральное кодирование (с широкополосным источником излучения)	На основе внутриволоконной решетки Брэгга	Возможность мультиплексирования большого числа каналов, возможность проведения абсолютных измерений	Средняя точность, сложная система обработки сигнала	Технология отлажена, выпускаются небольшие партии
	На основе интерферометра Фабри–Перо	Высокая точность, возможность абсолютных измерений, нечувствительность к флуктуациям входного излучения, нет необходимости в многократной юстировке	Сложная схема обработки оптического сигнала	Возможен промышленный выпуск

Название технологии	Принцип действия	Преимущества	Недостатки	Перспективы
	На основе интерферометра Маха – Цандера, Майкельсона	Чувствительные элементы просты, технологичны и дешевы	Средняя точность, сложная система обработки сигнала, трудности стыковки с оптоволоконном при использовании интегральной оптики	Коммерциализация затруднена

Анализ данных позволяет сделать следующие выводы.

- Фазовые датчики, использующие лазерные источники света, являются достаточно распространенными, но скорее в лабораторных установках, чем в промышленности. Это связано с необходимостью точной юстировки приборов, наличием дополнительных фазоподстроечных схем, что сильно усложняет конструкцию. Кроме того, подобные датчики не позволяют проводить абсолютные измерения величин. Для избавления от этих недостатков используют несколько частот оптического излучения, что делает этот метод промежуточным видом измерения между фазовым и спектральным, представленным ниже.

Датчики со спектральным кодированием наиболее перспективны с точки зрения внедрения их в промышленность благодаря устойчивости к влиянию различных паразитных параметров: дрейфа мощности излучения источника, неконтролируемых потерь мощности в волокне, потерь при стыковке волокна с помощью коннекторов и пр. Кроме того, датчики этого типа позволяют проводить измерения абсолютных, а не относительных величин и не требуют перекалибровки после включения/выключения прибора. До недавнего времени этот метод измерения считался очень сложным и дорогим. Он требовал наличия спектрометра и средств обработки оптического изображения, но, как было упомянуто выше, ситуация меняется и благодаря удешевлению методов обработки оптического спектра, развитию микропроцессорной техники и технологии приема оптического изображения, удешевлению оптоэлектронных компонент цена канала измерения по себестоимости приближается к электронным аналогам.

- Амплитудные датчики имеют свою область применения, обусловленную их дешевизной, и могут использоваться там, где не требуется высокая точность измерений (например, в качестве счетчиков оборотов, микрофонов, распределенных датчиков температуры и пр.). Однако в высокоточных измерительных системах они не находят широкого приложения, ввиду сравнительно низкой точности и подверженности к дрейфу параметров.

- Туннельные датчики являются высокочувствительными приборами, однако тоже подвержены дрейфу параметров и могут найти лишь ограниченное применение, например, в высокоточных устройствах позиционирования, микрофонах, гидрофонах и др.

- Поляризационные датчики являются, по сути, аналогами интерференционных датчиков. Их коммерциализации, в основном, мешает необходимость использования дорогого волокна с сохранением поляризации.

2.12.1. Датчики со спектральным кодированием

Типовая схема построения оптоволоконной измерительной системы с использованием датчиков со спектральным кодированием представлена на рис. 2.46. Основная проблема построения подобных систем заключена в создании простого, надежного и недорогого спектрометра, не подверженного влиянию вибрации, температуры и прочих внешних внутренних параметров. До конца эта проблема не решена. Предлагаемые методы с использованием дифракционных решеток, сканирующих интерферометров, пьезоэлектриков, перестраиваемых лазеров и пр. либо не решают до конца проблему кратковременной и долговременной стабильности характеристик, либо цена такого интерферометра не позволяет говорить о его широком применении. Стоит отметить, что несмотря на сложности задача принципиально решаемая, и через некоторое время ожидается появление датчиков и систем, способных конкурировать с традиционными электрическими датчиками и системами по соотношению цена/качество.

Ниже рассмотрены несколько датчиков, использующих различные принципы преобразования.

Поляризационный датчик тока на основе эффекта Фарадея.
В датчике применяется эффект Фарадея. Среди основных компо-

нентов датчика, как видно из рис. 2.47, оптоэлектронный модуль и чувствительное оптоволокно с одним выходом, идущее вокруг проводника тока.

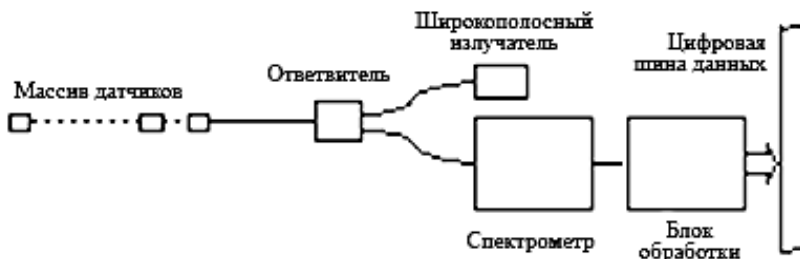


Рис. 2.46. Блок-схема датчика со спектральным кодированием

В состав оптоэлектронного модуля входит полупроводниковый источник света, цепь детектирования и цифровой сигнальный процессор. Две световые волны с ортогональной линейной поляризацией от источника света посредством промежуточного световода подаются на измерительное волокно. Оптоволоконный фазозадерживающий модуль преобразует линейные волны в волны с левой и правой круговой поляризацией на входе в измерительный световод.

В магнитном поле тока эти световые волны проходят по измерительному световоду с разной скоростью, что приводит, в свою очередь, к разности оптического пути или, что эквивалентно, разности оптических фаз. Световые волны отражаются в конце световода и возвращаются по своим оптическим путям в оптоэлектронный модуль. Две полученных световых волны затем интерferируют в цепи детектирования.

Сигнальный процессор преобразует разность оптических фаз в цифровой сигнал. Суммарная разность фаз пропорциональна линейному интегралу магнитного поля по замкнутому контуру, описанному измерительным волокном, и является, таким образом, непосредственной мерой электрического тока. Сигнал не зависит от конкретной картины распределения магнитного поля при условии, что количество витков измерительного волокна является целым числом. Система оказывается нечувствительна и к перекрестным наводкам от токов, проходящих вне витка. Ни диаметр, ни форма витка оптоволоконна не имеют значения.

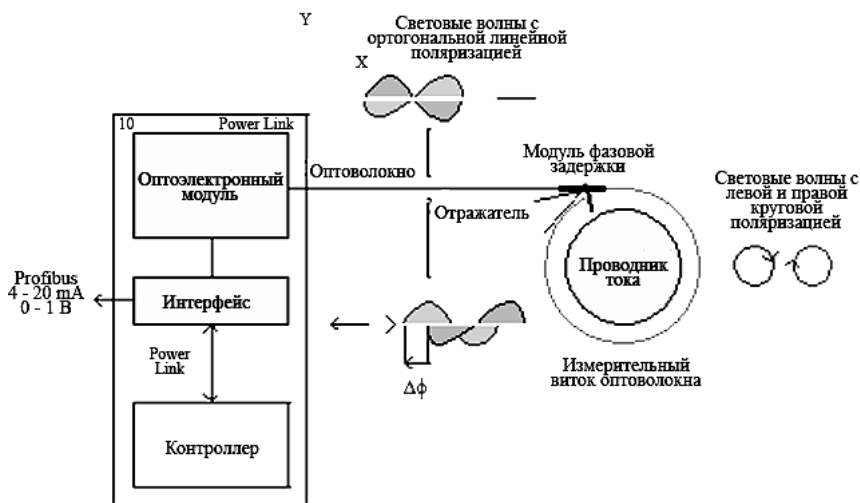


Рис. 2.47. Схематическое изображение оптоволоконного датчика больших токов

Разность времен прохождения в двух направлениях для световых волн с левой и правой круговой поляризацией составляет от 10–21 до 10–15 с в зависимости от силы тока. Непосредственное измерение таких величин нецелесообразно, поэтому с высокой точностью измеряется разность оптических путей или фаз, которая является долей длины волны света. Для этого волны подвергаются интерференции, т.е. налагают друг на друга. В зависимости от разности фаз волн, последние интерферируют с усилением или ослаблением. Наименьшая разность пути, которую удастся измерить, соответствует току 0,25 А (при измерении в течение одной секунды на одном витке).

2.12.2. Системы контроля пространственного распределения температуры/напряжения

Оптоволоконные датчики разработаны на основе технологии записи брэгговских решеток непосредственно в оптическом волокне и позволяют проводить измерения с погрешностью в единицы градусов, с пространственным разрешением до одного метра и относительных деформаций на уровне 10^{-4} . Брэгговская решетка является узкополосным селективным отражателем, положение пика ко-

того определяется температурой. Световые сигналы, отраженные от всех датчиков (каждый со своей длиной волны,) поступают по оптоволокну на декодер (анализатор спектра), который после компьютерной обработки позволяет определить температуру каждого датчика с высокой точностью, поскольку положение соответствующей спектральной компоненты зависит от температуры датчика (или деформации объекта, к которому прикреплен датчик). Погрешность определения температуры меньше 1°C (относительных деформаций меньше 10^{-4}). Диапазон рабочих температур датчиков $-100\dots+500^{\circ}\text{C}$. Количество датчиков в системе до 1000.

2.12.3. Оптоволоконный рефлектометрический датчик перемещения

Рефлектометрический принцип локации заключается в том, что мощность излученного и отраженного поверхностью светового луча модулируется с фактором, пропорциональным расстоянию до отражающей поверхности. Появление волоконных световодов позволило сконструировать приборы, пригодные, по крайней мере, для лабораторных измерений.

В простейшем варианте датчик представляет собой центральное излучающее из своего торца волокно, окруженное концентрическим кольцом приемных волокон. Излучатель – светодиод, приемник пучка приемных волокон – светодиод. На рис. 2.48 приведено схематическое изображение такой установки и геометрия оптических потоков, падающего и отраженного.

Ситуация кардинально улучшается, если излучающее волокно окружено не одним концентрическим кольцом приемных волокон, а двумя, из которых одно принадлежит опорному каналу, а другое измерительному, причем, результатом служит частное от деления разности сигналов измерительного и опорного каналов на их сумму.

На рис 2.49 приведены калибровочные кривые для такого рода установки. На кривой сигнала измерительного канала виден участок относительно большой ширины и хорошей линейности.

Принцип работы прибора основан на измерении величины мощности оптического инфракрасного излучения с длиной волны около 800 нм, отраженного от контролируемой поверхности пропорцио-

нальной в общем случае величине зазора между рабочим торцом волоконно-оптического датчика и поверхностью отражения.

Подвод и отвод световых потоков осуществляется через волоконно-оптический жгут длиной до 1 м в едином корпусе с оптоэлектронным преобразователем, выполненным по схеме открытого двухканального оптрона.

Топология оптических световодов (волокон) и последующая схема обработки фотопотока оптоэлектронным преобразователем позволяет сформировать:

- сигнал измерительного канала, обладающий максимальной чувствительностью к измеряемым перемещениям в рабочем диапазоне;
- сигнал опорного канала, инвариантный в отношении выходного сигнала к перемещению в рабочем диапазоне.

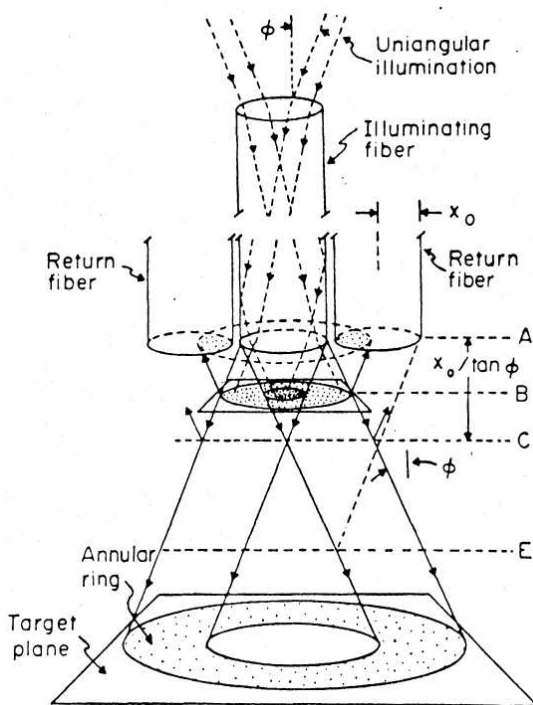


Рис. 2.48. Схема установки с центральным излучающим волокном и кольцом приемных волокон

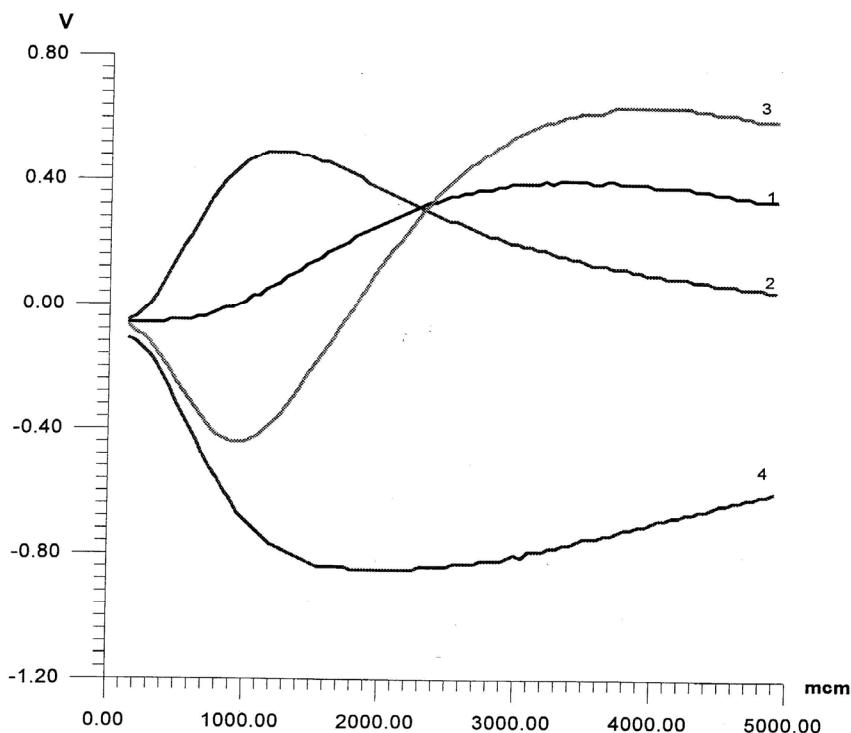


Рис. 2. 49. Калибровочные кривые каналов: 1 – измерительный канал, 2 – опорный канал, 3 – разность, 4 – сумма сигналов измерительного и опорного каналов

Аналоговый выходной сигнал кодируется преобразователем широтно-импульсной модуляции и передается в линию ко вторичному прибору в виде непрерывного импульсного сигнала переменной скважности.

Технические характеристики датчика:

Погрешность определения статического зазора, мкм	± 2
Разрешающая способность, мкм	1
Диапазон измерений, мм.....	± 0,5
Полоса частот измеряемых перемещений, кГц	0...20
Чувствительность, мВ/мкм	0,6

2.13. Нанодатчики и актюаторы

Нанотехнологии – это технологии микроэлектромеханических систем, общепринятый английский термин – MEMS (Micro-Electro Mechanical Systems). Термин «нанотехнология» означает совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами от 1 до 100 нанометров (нм), хотя бы в одном измерении. Оказывается, что привычные для нас свойства материалов начинают изменяться при уменьшении геометрических размеров материалов до 1–100 нм, причем многим наноматериалам присущи принципиально новые качества, существенно превосходящие свойства своих собратьев большего масштаба. Можно также сказать, что MEMS – это множество микроустройств самой разнообразной конструкции и назначения, в производстве которых используются модифицированные технологические приемы микроэлектроники. Действительно, микроэлектромеханические системы получаются путем комбинирования механических элементов, датчиков и электроники на общем кремниевом основании посредством технологий микропроизводства. Все элементы могут быть реализованы в виде единого изделия, причем сразу десятками или сотнями, как микросхемы на кремниевой пластине. В основе этого лежит апробированная традиционная технология производства полупроводниковых интегральных микросхем. Вообще говоря, микросистема предполагает интеграцию ряда различных технологий (MEMS, КМОП, оптической, гидравлической и т. д.) в одном модуле. Например, технологии изготовления MEMS-устройств для СВЧ-применений (катушки индуктивности, варакторы, коммутаторы, резонаторы) подразумевают традиционные технологические циклы изготовления интегральных схем, адаптированных для создания трехмерных механических структур (это, например, объемная микрообработка, поверхностная микрообработка и так называемая технология LIGA).

Кремниевая объемная микрообработка включает технологию глубинного объемного травления. При таком процессе объемная структура получается внутри подложки благодаря ее анизотропным свойствам, т.е. различной скорости травления кристалла в зависимости от направления кристаллографических осей. Объемную

структуру можно получить и методом наращивания, когда несколько подложек сплавляются и образуют вертикальные связи на атомарном уровне.

При поверхностной микромеханической обработке трехмерная структура образуется за счет последовательного наложения основных тонких пленок и удаления вспомогательных слоев в соответствии с требуемой топологией. Преимущество данной технологии – возможность многократного удаления (растворения) вспомогательных слоев без повреждения взаимосвязей базовых слоев. А главная ее особенность состоит в том, что она совместима с полупроводниковой технологией, поскольку для микрообработки используется обычная КМОП-технология. Название технологии LIGA происходит от немецкой аббревиатуры Roentgen Lithography Galvanik Abformung, что означает комбинацию рентгеновской литографии, гальванотехники и прессовки (формовки). Здесь толстый фоторезистивный слой подвергается воздействию рентгеновских лучей (засветке) с последующим гальваническим осаждением высокопрофильных трехмерных структур. Сущность процесса заключается в использовании рентгеновского излучения от синхротрона для получения глубоких, с отвесными стенками топологических картин в полимерном материале. Излучение синхротрона имеет сверхмалый угол расходимости пучка. Источником излучения служат высокоэнергетические электроны (с энергией более 1 ГэВ), движущиеся с релятивистскими скоростями. Глубина проникновения излучения достигает нескольких миллиметров. Это обуславливает высокую эффективность экспонирования при малых временных затратах. Считается, что данная технология обеспечивает наилучшее отношение воспроизводимой ширины канала к его длине (при минимальных размерах).

Важнейшая составная часть большинства MEMS-микроактюатор (рис. 2.50). Обычно данное устройство преобразует энергию в управляемое движение. Размеры микроактюаторов могут довольно сильно варьироваться. Диапазон применения этих устройств чрезвычайно широк и при этом постоянно растет. Так, микроактюаторы используются в робототехнике, в управляющих устройствах, в космической области, в биомедицине, дозиметрии, в измерительных приборах, в технологии развлечения, в автомобилестроении и в домашнем хозяйстве. Например, микроактюаторы нужны для

управления резонансными датчиками (они генерируют и передают им резонансную частоту), для управления режущими инструментами в микрохирургии. Это могут быть также различные микродвигатели, которые используются для управления микрореле, микрозеркалами и микрозажимами. Микроактюатором может быть даже микроэлектродное устройство для возбуждения мускульных тканей в неврологических протезах.

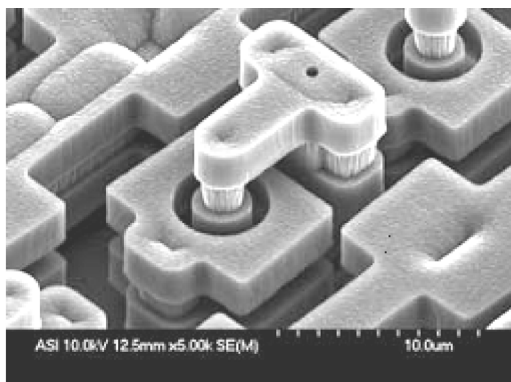


Рис. 2.50. Микроактюатор в MEMS

Все методы активации (движение, деформация, приведение в действие) в таких устройствах кратко можно свести к следующим: электростатический, магнитный, пьезоэлектрический, гидравлический и тепловой. При оценке использования того или иного метода часто применяют законы пропорционального уменьшения размеров. Наиболее перспективными методами считаются пьезоэлектрический и гидравлический, хотя и другие имеют большое значение. Электростатическая активация применяется примерно в одной трети микроактюаторов, и это, вероятно, наиболее общий и хорошо разработанный метод; главные его недостатки – износ и слипание. Магнитные микроактюаторы обычно требуют относительно большого электрического тока даже на микроскопическом уровне. При использовании электростатических методов активации получаемый выходной сигнал на относительную единицу размерности лучше, чем при использовании магнитных методов. Иными словами, при одном и том же размере электростатическое устройство выдает несколько лучший выходной сигнал. Тепловые микроактюаторы тоже

потребляют относительно много электрической энергии; главный их недостаток состоит в том, что генерируемое тепло приходится рассеивать.

2.13.1. Датчики и микроактюаторы

Одной из первых MEMS-технологий, получивших повсеместное распространение, стали датчики ускорения (акселерометры), устанавливаемые сейчас практически во все современные автомобили для детектирования столкновения и выпуска защитных воздушных подушек. Они рассмотрены в разделе 2.2. Элементы могут размещаться подобно гребням в случае линейных акселерометров или в виде ступицы колеса в случае вращающегося акселерометра. Вращающиеся акселерометры могут служить для расширения возможностей антиблокировочных систем автомобиля, так как они способны зафиксировать фактическое перемещение автомобиля, а не только блокировку колес. В накопителях на жестких дисках вращающиеся акселерометры могут использоваться для обнаружения ротационных перемещений, влияющих на позиционирование головки и способных привести к потере дорожки. Компенсация ротационных перемещений используется обычно в дорогих моделях дисководов, поскольку при затратах чуть большего времени на чтение и запись значительно меньше его требуется на восстановление позиционирования головки после удара. Сотрудники Sandia National Laboratories разработали образец датчика, который может обнаруживать перемещение в менее чем 1 нм (рис. 2.51). Основная часть прибора представляет собой решетку, изготовленную из двух перекрывающихся гребенок (поперечный размер 50 мкм): одна неподвижная, другая прикреплена к пружине. Расстояние между зубцами гребенки составляет от 600 до 900 нм, что сопоставимо с длиной волны видимого света. Даже при незначительном перемещении прибора подвижная гребенка совершает колебания, расширяя или сужая решетку, образованную пересекающимися зубцами. Изменение зазоров решетки влияет на ее оптические свойства, и лазерный луч, отражаясь от перекрывающихся зубцов, будет заметно ярким или тусклым. Считается возможным использовать такой детектор как основу навигационного прибора, который сможет рабо-

тять независимо от спутниковой сети глобальной системы позиционирования.

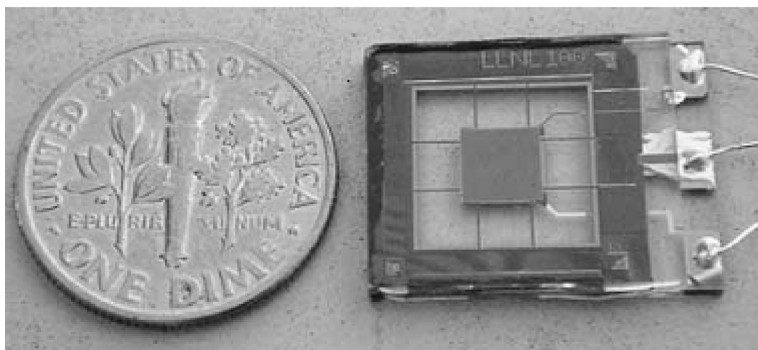


Рис. 2.51. Датчик MEMS

Традиционно системы позиционирования на базе движения страдают от накопления мелких ошибок. С течением времени эти ошибки могут привести к показаниям, отклоняющимся на мили от действительного положения. Позиционное фиксирование, характерное для прибора Sandia, обеспечивает гораздо более медленную деградацию характеристик. Кроме того, прибор может работать под водой и в туннеле, куда GPS-сигнал не проходит. В настоящее время ведется работа над созданием портативной версии прибора для того, чтобы его можно было передать другим исследователям для проведения экспериментов. Прибор на базе указанной конструкции может поступить на рынок через три-пять лет.

Создан миниатюрный магнитный датчик, который может обнаруживать изменения магнитного поля порядка 50 пТ. Прибор размером с рисовое зерно примерно в 100 раз меньше, чем современные датчики с аналогичной чувствительностью. Новый магнитный датчик можно изготовить и собрать с использованием существующих технологий микроэлектроники и MEMS. Новый магнетометр способен обнаруживать запрятанное оружие на расстоянии 12 м или стальную трубу диаметром 150 мм под землей на глубине 35 м. Датчик работает на принципе обнаружения незначительных изменений уровней энергии электронов в условиях магнитного поля. Миниатюрный рубидиевый элемент нагревается в герметичной

прозрачной ячейке до образования пара рубидия. Луч полупроводникового лазера пропускается через атомный пар. При наличии магнитного поля некоторое количество лазерного излучения абсорбируется атомами, и это обнаруживается фотоэлементом. Большие магнитные поля вызывают пропорционально большие изменения уровней атомной энергии и изменяют поглощение атома.

Микроактюаторы, работа которых основана на обратном эффекте (прикладываемое напряжение вызывает небольшие перемещения кремниевых структур), сегодня используются, например, для точной подстройки магнитных головок. Последние обычно отвечают за обнаружение сигналов в накопителях на магнитных дисках. При этом существенно повышается плотность информации, а следовательно, и емкость самого накопителя.

Есть и еще целый ряд успешных MEMS-изделий, таких, как головки микроструйных принтеров, гироскопы, датчики давления, которые сотнями миллионов поставляются медицинской и автомобильной промышленности. Назовем еще цифровые проекторы высокого разрешения, построенные на основе MEMS-массивов микрорезеркал. За последние годы удалось достичь заметных успехов в изготовлении моторов, насосов и зажимов, сенсоров давления и смещения – множества самых разных по назначению механических агрегатов, настолько малых, что их не видно невооруженным глазом.

2.13.2. Электромеханическая память

Компания Cavendish Kinetics предложила еще один подход к созданию энергонезависимых запоминающих устройств. В основе ее подхода лежат микроэлектронные механические системы с возможностью интеграции в КМОП-процессы. Память может выпускаться в двух вариантах, с возможностью однократной записи и со способностью перезаписи.

Эта технология обладает самым низким энергопотреблением среди встраиваемых типов памяти, а по скорости работы сравнима с флэш-памятью. Ее принцип действия проиллюстрирован на рис. 2.52. Запоминающая ячейка представляет собой проводящую (металлическую) пластину – кантиливер (микроэлектромеханический актюатор), закрепленный над контактом. Если между кон-

тактным электродом и пластиной создать разность потенциалов, пластина изогнется и коснется контакта, в результате чего электрическое сопротивление упадет практически до нуля. Этот эффект обладает гистерезисом, так как после касания пластинки контакта происходит "залипание" – для разрыва контакта необходима дополнительная энергия. Таким образом, возможно создать память типа ПЗУ, в которую что-либо записать можно лишь однажды. Для перезаписи над пластинкой достаточно поставить дополнительный электрод, приложив к которому потенциал можно разомкнуть контакт.

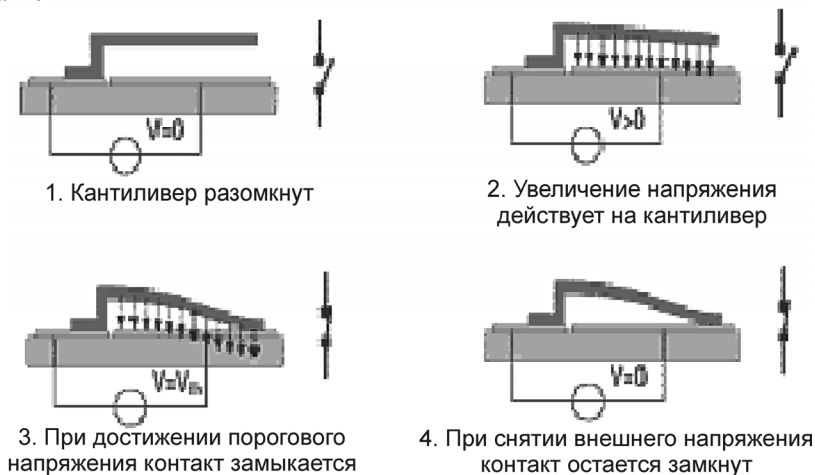


Рис. 2.52. Принцип работы технологии Nanomech

На рис. 2.53 показана наносенсорная нейроподобная система «Электронный нос», включающая в себя блок оригинальных наносенсоров, аспирационную систему, систему записи регистрации сигналов и программное обеспечение распознавания обонятельных образов. Принцип работы прибора заключается в измерении электропроводности набора химических сенсоров при их взаимодействии с парами летучих веществ. В результате адсорбции молекул исследуемого вещества электропроводность чувствительных материалов сенсоров увеличивается. Каждый сенсор не является строго селективным по отношению к какому-либо газу. Однако величина отклика каждого сенсора из набора на разные газы индивидуальна. Математическая обработка данных сенсорного массива позволяет

сформировать уникальный химический образ анализируемого вещества. Сенсорный массив обычно включает от 8 до 30 элементов.



Рис. 2.53. Электронный нос

На вживлении в тело человека микроскопических резервуаров со специальными химическими реактивами основывается необычный метод диагностики рака. В диаметре каждый такой нанодатчик составляет всего 5 нм – в тысячи раз тоньше человеческого волоса. Эти крошечные датчики проникают в лимфоциты – белые кровяные клетки, обеспечивающие защитную реакцию организма на заболевание; при подобной реакции структура клетки изменяется, а нанодатчики начинают светиться.

2.14. Проблема достоверности измерений

Проблема достоверности измерений состоит в том, что датчик измеряемой физической величины или методика измерений могут исказить сам объект измерений. Рассмотрим некоторые примеры.

При измерении температуры жидкого гелия резистором типа Аллен-Бредли мы пропускаем через него ток и измеряем падение напряжения. Но в этом случае резистор сам разогревается и разогревает жидкость в своей окрестности. Надо оценить степень разо-

грева и уменьшить питающий ток настолько, насколько позволит отношение сигнал-шум. Хорошим решением будет и питание импульсным током.

Датчик магнитного поля искажает картину поля. Необходимо оценивать габариты датчика и параметры его питания.

Ультразвуковой расходомер газа состоит, как упоминалось выше, из излучателя и приемника звука. В западных приборах они располагаются под некоторым углом к оси трубы и, таким образом, смонтированы не заподлицо с внутренней стенкой трубы, а имеют некоторый выступ. Оказалось, что на многих российских месторождениях природный газ содержит значительные примеси воды и песка, являющиеся причинами гидратообразования и износа расходно-измерительных узлов. На объектах транспорта и распределения природный газ содержит аэрозольные примеси, которые могут откладываться на первичных преобразователях расходомеров и, как следствие, приводить к неверным показаниям, вплоть до выхода приборов из строя.

Возможные причины недостоверности измерений физических величин:

- неполная характеристика условий работы датчика, выданных заказчиком, например, недооцененный уровень вибрации в оптических измерениях, недооцененный уровень стороннего магнитного поля при измерении токовых реверсивными датчиками;

- завышенные характеристики покупных электронных приборов, например, недостоверные данные о смещении нуля операционного усилителя в диапазоне температур;

- разрядность АЦП может оказаться ниже заявленной;

- заявленная погрешность расходомера газа или жидкости может оказаться реализуемой только в условиях испытательного стенда, но не реального производства.

Глава 3. ЗАЗЕМЛЕНИЕ. ПОМЕХИ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЯХ

(Использованы материалы из [40–42])

3.1. Заземление аппаратуры

Вопросы заземления тесно связаны с проблемами экранирования и методами борьбы с помехами в электронных системах. Сложность проблемы связана с тем, что источники помех, приёмники и пути их прохождения распределены в пространстве, момент их появления часто является случайной величиной, а местонахождение априори неизвестно. Сложно также провести измерения помех. Поэтому обоснование того или иного метода заземления на практике приходится делать на основании опыта и интуиции.

Неправильное заземление является причиной дорогостоящих простоев и порчи чувствительного оборудования. Следствием неправильного заземления могут быть изредка появляющиеся сбои в работе систем, повышенная погрешность измерений, выход из строя чувствительных элементов, замедление работы системы вследствие появления потока ошибок в каналах обмена, нестабильность регулируемых параметров, ошибки в собираемых данных.

Под заземлением понимают как соединение с грунтом Земли, так и соединение с некоторым "общим проводом" электрической системы, относительно которого измеряют электрический потенциал. Например, в космическом корабле или самолёте "землёй" считают металлический корпус. В приёмнике с батарейным питанием за "землю" принимают систему внутренних проводников, которые являются общим проводом для всей электронной схемы. Потенциал земли в электрической системе не всегда равен нулю относительно грунта Земли. Например, в летящем самолёте за счёт генерации электростатического заряда потенциал земли (корпуса) самолёта может составлять сотни и тысячи вольт относительно поверхности Земли. Аналогом земли космического корабля является "плавающая" земля – не соединённая с грунтом Земли система проводников, относительно которой отсчитывается потенциал в электрической подсистеме. В модуле аналогового ввода с гальванической развязкой внутренняя аналоговая земля модуля может не

соединяться с грунтом Земли или соединяться с ним через большое сопротивление.

Под защитным заземлением понимают электрическое соединение проводящих частей оборудования с грунтом Земли через заземляющее устройство с целью защиты персонала от поражения электрическим током.

Общим проводом (проводником) называют проводник в системе, относительно которого отсчитываются потенциалы. Обычно он является общим для источника питания и подключённых к нему электронных устройств.

Сигнальным заземлением называют соединение с землёй общего провода цепей передачи сигнала. Сигнальная земля делится на цифровую землю и аналоговую. Сигнальную аналоговую землю иногда делят на землю аналоговых входов и землю аналоговых выходов. Силовой землёй будем называть общий провод в системе, соединённый с защитной землей, по которому протекает большой ток.

3.1.1. Цели заземления

Защитное заземление служит исключительно для защиты людей от поражения электрическим током. Необходимость выполнения защитного заземления часто приводит к увеличению уровня помех в системах автоматизации, однако это требование является необходимым, поэтому исполнение сигнальной и силовой земли должно базироваться на предположении, что защитное заземление имеется и оно выполнено в соответствии с Правилами устройства электроустановок (ПУЭ).

Сигнальная земля служит для упрощения электрической схемы и удешевления устройств и систем промышленной автоматизации. При использовании сигнальной земли в качестве общего провода для разных цепей появляется возможность применения одного общего источника питания для всей электрической цепи вместо нескольких "плавающих" источников питания.

В зависимости от целей применения сигнальные земли можно разделить на базовые и экранные. Базовая земля используется для отсчёта и передачи сигнала в электронной цепи, а экранная земля используется для заземления экранов. Базовая сигнальная земля используется также для "привязки" потенциала изолированной час-

ти электрической цепи к земле системы. Например, если входные каскады модуля ввода сигналов термопар имеют гальваническую развязку от земли системы, то потенциал входов может быть каким угодно вследствие заряда паразитной ёмкости между землёй и входными каскадами. Во время грозы этот потенциал может составить тысячи вольт, что приведёт к пробое гальванической изоляции модуля. Для предотвращения этого явления аналоговая земля входных каскадов должна быть соединена с землёй системы, как это будет описано далее.

Экранная земля используется для заземления экранов кабелей, экранирующих перегородок, корпусов приборов, а также для снятия статических зарядов с трущихся частей транспортёрных лент, ремней электроприводов и т.п.

3.1.2. Общие вопросы заземления

Защитное заземление зданий. В качестве защитных заземляющих проводников используют естественные и искусственные заземлители. К естественным заземлителям относятся, например, стальные и железобетонные каркасы производственных зданий, металлические конструкции производственного назначения, стальные трубы электропроводок, алюминиевые оболочки кабелей, металлические стационарные открыто проложенные трубопроводы всех назначений, за исключением трубопроводов горючих и взрывоопасных веществ, канализации и центрального отопления.

Искусственные (специально изготовленные) заземлители используют, когда сопротивление заземления превышает установленные ПУЭ нормы. Конструктивно они представляют собой трубы, уголки, пруты, помещённые в землю вертикально на глубину 3 м или горизонтально на глубину не менее 50...70 см.

Виды заземлений. Одним из путей ослабления вредного влияния цепей заземления на системы автоматизации является раздельное выполнение систем заземлений для устройств, имеющих разную чувствительность к помехам или являющихся источниками помех разной мощности. Раздельное исполнение заземляющих проводников позволяет выполнить их соединение с защитной землёй в одной точке. При этом разные системы земель представляют собой лучи звезды, центром которой является контакт к шине защитного

заземления здания. Благодаря такой топологии помехи "грязной" земли не протекают по проводникам "чистой" земли. Таким образом, несмотря на то что системы заземления разделены и имеют разные названия, в конечном счёте все они соединены с Землёй через систему защитного заземления. Исключение составляет только "плавающая" земля (см. раздел "„Плавающая” земля”).

Силовое заземление. В системах автоматизации могут использоваться электромагнитные реле, микромощные серводвигатели, электромагнитные клапаны и другие устройства, ток потребления которых существенно превышает ток потребления модулей ввода/вывода и контроллеров. Цепи питания таких устройств выполняют отдельной парой свитых проводов (для уменьшения излучаемых помех), один из которых соединяется с шиной защитного заземления. Общий провод такой системы (обычно провод, подключённый к отрицательному выводу источника питания) является силовой землёй.

Аналоговая и цифровая земля. Системы промышленной автоматизации являются аналого-цифровыми. Поэтому одним из источников погрешностей аналоговой части является помеха, создаваемая цифровой частью системы. Для исключения прохождения помех через цепи заземления цифровую и аналоговую землю выполняют в виде несвязанных проводников, соединённых вместе только в одной общей точке. Для этого модули ввода/вывода и промышленные контроллеры имеют отдельные выводы аналоговой земли (AGND) и цифровой (DGND).

"Плавающая" земля. "Плавающая" земля образуется в случае, когда общий провод небольшой части системы электрически не соединяется с шиной защитного заземления (то есть с Землёй). Типовыми примерами таких систем являются батарейные измерительные приборы, автоматика автомобиля, бортовые системы самолёта или космического корабля. "Плавающая" земля может быть получена и с помощью DC/DC- или AC/DC-преобразователей, если вывод вторичного источника питания в них не заземлён. Такое решение позволяет полностью исключить кондуктивные наводки через общий провод заземления. Кроме того, допустимое синфазное напряжение может достигать 300 В и более, практически стопроцентным становится подавление прохождения синфазной помехи на выход системы, снижается влияние ёмкостных помех. Однако на

высоких частотах токи через ёмкость на землю существенно снижают последние два достоинства. Если "плавающая" земля получена с помощью устройств гальванической развязки на оптронах и DC/DC-преобразователях, то надо принять особые меры для предотвращения накопления заряда в ёмкости между Землёй и "плавающей" землёй, которое может привести к пробое оптрона (см. разделы "Гальваническая развязка" и "Статическое электричество").

Пример образования "плавающей" земли показан на рис. 3.1.

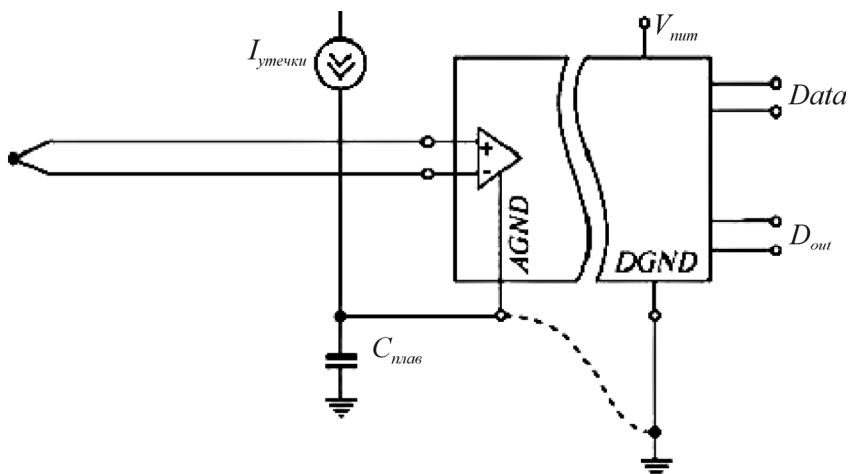


Рис. 3.1. Пример "плавающей" земли

Условные обозначения: *AGND* – аналоговая земля; *DGND* – цифровая земля; *Data* – информационный порт модуля (вход/выход данных); *D_{out}* – дискретный выход; *C_{плав}* – эквивалентная ёмкость на землю; *I_{утечки}* – ток утечки; *V_{пит}* – клемма подключения источника питания.

Вывод *AGND* модуля ввода сигналов термопар не соединён с землёй. Условно показанный разрыв в изображении модуля символизирует гальваническую развязку между его частями. Аналоговая часть модуля имеет эквивалентную ёмкость на землю *C_{плав}*, которая включает в себя ёмкость входных цепей на землю, ёмкость проводников печатной платы на землю, проходную ёмкость DC/DC-преобразователя и оптронов гальванической развязки. Величина

этой ёмкости может составлять около 100 пФ и более. Поскольку воздух и другие диэлектрики, с которыми контактирует ёмкость $C_{\text{плав}}$, имеют не бесконечное электрическое сопротивление, то ёмкость может медленно, в течение минут или часов, зарядиться током утечки $I_{\text{утечки}}$ до потенциала электризованных тел, высоковольтных источников питания или потенциала, связанного с атмосферным электричеством. Потенциал на "плавающей" земле может превысить напряжение пробоя изоляции оптронов и вывести систему из строя. В качестве защитных мер при использовании "плавающей" земли можно рекомендовать соединение "плавающей" части с землёй через сопротивление величиной от десятков килоом до единиц мегом.

Модели компонентов систем автоматизации

Для дальнейшего анализа и синтеза систем заземления необходимо представлять структуру модулей систем промышленной автоматизации. Такое представление дают модели типовых модулей аналогового и дискретного ввода и вывода, представленные на рис. 3.2, 3.3 и 3.4.

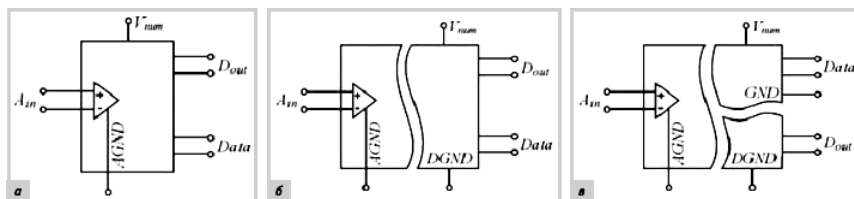


Рис. 3.2. Обобщённые модели аналоговых модулей ввода и дискретного вывода для анализа систем заземления: *а* – без гальванической изоляции; *б* – с гальванической изоляцией аналоговых входов; *в* – с изоляцией как входов, так и выходов

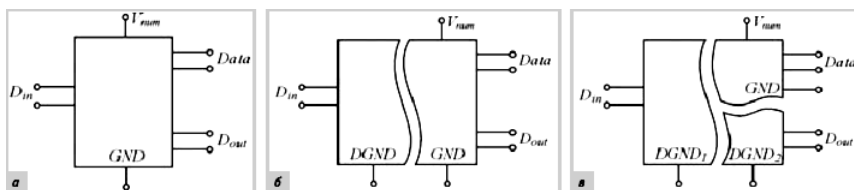


Рис. 3.3. Обобщённые модели дискретных модулей для анализа систем заземления: *а* – без гальванической изоляции; *б* – с изоляцией входов; *в* – с изоляцией и входов, и выходов

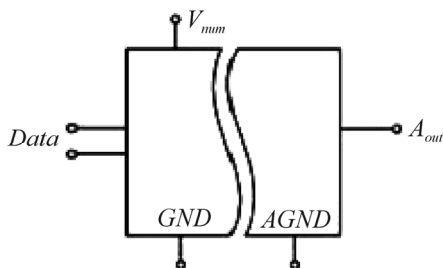


Рис. 3.4. Обобщённая модель модулей аналогового вывода для анализа систем заземления

В этих рисунках использованы следующие обозначения: AGND – аналоговая земля, DGND – цифровая земля, GND – земля источника питания порта связи, *Data* – информационный порт модуля (вход/выход данных), A_{in} – аналоговый вход, D_{out} – дискретный выход, D_{in} – дискретный вход, A_{out} – аналоговый выход,

V_{num} – клемма подключения источника питания; разрыв в изображении модуля означает гальваническую изоляцию между "разорванными" частями. Модули аналогового ввода и дискретного вывода бывают без гальванической изоляции (рис. 3.2, а), с изоляцией аналоговых входов и без изоляции дискретных выходов (рис. 3.2, б) и с изоляцией одновременно как аналоговых входов, так и дискретных выходов (рис. 3.2, в). Аналогично модули с дискретными или счётными входами и дискретными выходами могут быть без гальванической изоляции (рис. 3.3, а), с изоляцией входов (рис. 3.3, б) и с изоляцией как входов, так и выходов (рис. 3.3, в). Модули аналогового вывода делают обычно с гальванической изоляцией выходов (рис. 3.4). Таким образом, один модуль ввода/вывода может содержать до трёх различных выводов земли.

В моделях на рис. 3.2, 3.3 и 3.4 с целью упрощения не показаны входные сопротивления, которые иногда нужно учитывать.

3.2. Гальваническая развязка

Гальваническая развязка цепей является радикальным решением большинства проблем, связанных с заземлением, и её применение фактически стало стандартом в системах промышленной автоматизации. Для осуществления гальванической развязки (изоляции) необходимо выполнить подачу энергии и передачу сигнала в изолированную часть цепи. Подача энергии выполняется посредством развязывающего трансформатора (в DC/DC- или AC/DC-преобразователях) или с помощью автономных источников пита-

ния (гальванических батарей и аккумуляторов). Передача сигнала осуществляется через оптроны и трансформаторы, элементы с магнитной связью, конденсаторы или оптоволокно. Основная идея гальванической развязки заключается в том, что в электрической цепи полностью устраняется путь, по которому возможна передача кондуктивной помехи. Гальваническая изоляция позволяет решить следующие проблемы:

- исключает появление паразитных токов по земле, уравнивающих потенциалы, и тем самым снижает индуктивные наводки, вызванные этими токами;
- уменьшает практически до нуля напряжение синфазной помехи на входе дифференциального приёмника аналогового сигнала;
- защищает от пробоя вследствие синфазного перенапряжения входные и выходные цепи модулей ввода и вывода.

Для применения гальванической развязки система автоматизации делится на автономные изолированные подсистемы, между которыми отсутствуют проводники (гальванические связи). Каждая подсистема имеет свою локальную землю. Подсистемы заземляют только для обеспечения электробезопасности и локальной защиты от помех.

Основным недостатком цепей с гальванической развязкой является повышенный уровень помех от DC/DC-преобразователя, который, однако, для низкочастотных схем можно сделать достаточно малым с помощью цифровой и аналоговой фильтрации.

3.3. Помехи в измерительных цепях

Источники помех на шине Земли

Все помехи, воздействующие на кабели, датчики, исполнительные механизмы, контроллеры и металлические шкафы автоматики, в большинстве случаев протекают и по заземляющим проводникам, создавая паразитное электромагнитное поле вокруг них и падение напряжения помехи на проводниках. Источниками и причинами помех могут быть цепи питания 220 В с частотой 50 Гц, переключаемые сетевые нагрузки, трибоэлектричество, гальванические пары, термоэлектрический эффект, электролитические процессы, движение проводника в магнитном поле и др.

При конструировании электронной аппаратуры для снижения уровня помех используют микромощную элементную базу с минимально достаточным быстродействием, а также практикуют уменьшение длины проводников и экранирование.

Характеристики помех. Основная характеристика помехи это зависимость спектральной плотности мощности помехи от частоты. Помехи, воздействующие на системы промышленной автоматизации, имеют спектр от нулевой частоты до единиц гигагерц (рис. 3.5.). Помехи, лежащие в полосе пропускания аналоговых схем, имеют частоты до десятков кГц. На цифровые цепи воздействуют помехи в полосе до сотен мегагерц. Помехи гигагерцевого диапазона непосредственного влияния на системы автоматизации не оказывают, однако после детектирования в нелинейных элементах они порождают низкочастотные помехи, лежащие в границах воспринимаемого спектра.

В сигнальных цепях и цепях заземления систем автоматизации содержится весь спектр возможных помех. Однако влияние оказывают только помехи, частоты которых лежат в полосе пропускания систем автоматизации. Среднеквадратическое значение напряжения (или тока) помехи E помехи определяется шириной её спектра:



Рис. 3.5. Относительный уровень спектральной плотности мощности и частоты основных источников электромагнитных помех

$$E_{\text{помехи}} = \sqrt{\int_{f_{\text{н}}}^{f_{\text{в}}} e^2(f) df},$$

где $e^2(f)$ – спектральная плотность мощности помехи, в Гц; $f_{\text{н}}$ и $f_{\text{в}}$ – нижняя и верхняя границы спектра помехи. В частном случае, когда $e^2(f)$ слабо зависит от частоты, приведенное соотношение упрощается:

$$E_{\text{помехи}} = \sqrt{\int_{f_{\text{н}}}^{f_{\text{в}}} e^2(f_{\text{в}} - f_{\text{н}}) df}.$$

Таким образом, для уменьшения влияния помех на системы автоматизации нужно сужать ширину полосы пропускания ($f_{\text{в}} - f_{\text{н}}$) аналоговых модулей ввода и вывода. Например, если постоянная времени датчика τ составляет 0,3 с, что приблизительно соответствует полосе пропускания сигнала $f_{0,7} = 0,5 \text{ Гц}$ ($f_{0,7} = 0,5\pi\tau$), то ограничение полосы пропускания модуля ввода величиной 0,5 Гц позволит уменьшить уровень помехи и тем самым повысить точность измерений, снизить требования к заземлению, экранированию и монтажу системы. Однако фильтр вносит динамическую погрешность в результаты измерения, зависящую от частоты (спектра) входного сигнала.

Наиболее мощной в системах автоматизации является помеха с частотой питающей сети 50 Гц. Поэтому для её подавления используют узкополосные фильтры, настроенные точно (с помощью кварца) на частоту 50 Гц.

Помехи из сети электроснабжения. Питающая сеть 220/380 В с частотой 50 Гц и подключённые к ней блоки питания являются источниками следующих помех:

- фон с частотой 50 Гц;
- выбросы напряжения от разряда молнии (рис. 3.6, а);
- кратковременные затухающие колебания при переключении индуктивной нагрузки (рис. 3.6, б);
- высокочастотный шум (например, помеха от работающей радиостанции), наложенный на синусоиду 50 Гц (рис. 3.6, в);

– инфранизкочастотный шум, проявляющийся как нестабильность во времени величины среднеквадратического значения сетевого напряжения; долговременные искажения формы синусоиды и гармоники при насыщении сердечника трансформатора и по другим причинам.

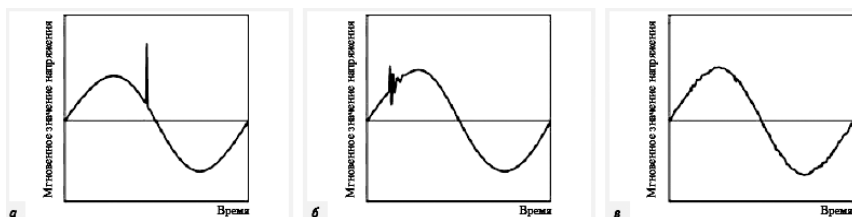


Рис. 3.6. Виды помех, проникающих из сети питания: *а* – от разряда молнии; *б* – при переключении индуктивной нагрузки; *в* – от радиостанций

Наибольшее влияние на системы промышленной автоматики оказывают первые три вида помех. Для уменьшения кратковременных выбросов напряжения используют специальные защитные диоды и варисторы.

Инфранизкочастотный шум и искажения синусоиды отфильтровываются стабилизатором и сглаживающим фильтром сетевого источника питания и не проходят сквозь паразитные ёмкости сетевого трансформатора.

Причинами и источниками сетевых помех могут быть разряды молнии при попадании в линию электропередачи, включение или выключение электроприборов, тиристорные регуляторы мощности, реле, электромагнитные клапаны, электродвигатели, электросварочное оборудование и др. Путь проникновения сетевой помехи показан на рис. 3.7. Силовой или развязывающий трансформатор включён в сеть 220 В (50 Гц). Сеть представлена эквивалентным источником напряжения сети $E \sim 220$ В и эквивалентным источником помех $E_{\text{помехи}}$, описанными ранее. Нулевой провод источника сетевого напряжения заземлён на главном щите у ввода в здание. Если выход источника питания тоже заземлён, что часто необходимо для целей электробезопасности, то возникает путь протекания тока помехи, показанный на рис. 3.7, включающий сопротивление земли между двумя заземлителями $R_{\text{земли}}$.

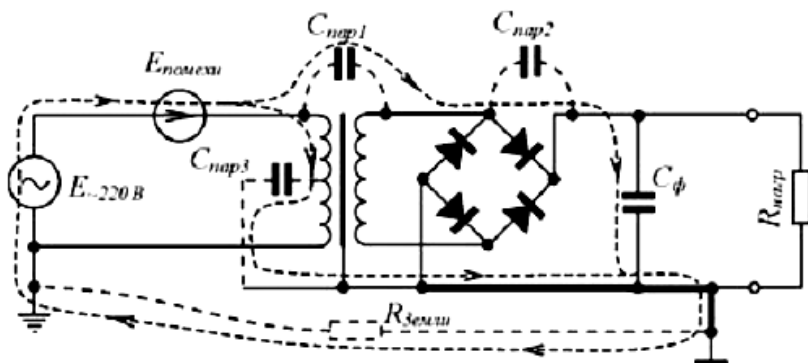


Рис. 3.7. Путь проникновения помехи из сети 220 В (50 Гц) в систему заземления и общий провод источника питания

Основным звеном в этой цепи является паразитная ёмкость между обмотками силового трансформатора $C_{\text{пар1}}$, для уменьшения влияния которой часто используют заземлённый электростатический экран. Ток помехи протекает по общему проводу источника питания и заземлителю, создавая на их сопротивлении падение напряжения помехи, о котором речь пойдёт в следующих разделах (на рис. 3.7 эти участки цепи выделены жирной линией). Ток помехи фактически может замыкаться не на подстанции, а через внутреннее сопротивление других электроприборов, подключённых к электрической сети, а также через ёмкость кабеля.

Наиболее значительной помехой, проникающей в шину заземления из сети 220 В (50 Гц), являются ёмкостные токи, протекающие через ёмкость между обмоткой двигателя и его корпусом, токи между сетевой обмоткой трансформатора и сердечником, токи через конденсаторы сетевых фильтров.

Путь тока помехи через ёмкость между первичной обмоткой трансформатора и его заземлённым сердечником $C_{\text{пар3}}$ показан на рис. 3.7. Этот ток также протекает через общий провод источника питания и заземлитель. Наличие ёмкости приводит к тому, что незаземлённые электроприборы "бьют током". При отсутствии заземления потенциал металлического корпуса приборов, подключённых к сети 220 В, составляет от нескольких десятков до 220 В в зависимости от сопротивления утечки на землю. Поэтому корпуса приборов, включённых в сеть 220 В, должны быть заземлены.

При использовании DC/DC- и AC/DC-преобразователей к источнику помехи $E_{\text{помехи}}$ добавляется ёмкостная и индуктивная наводка от собственного генератора преобразователя. Поэтому в общем случае уровень помех на общем проводе у DC/DC- и AC/DC-преобразователей выше, чем в источниках с обычным силовым трансформатором, хотя проходная ёмкость $C_{\text{пар1}}$ в преобразователях может быть уменьшена до единиц пикофард по сравнению с сотнями пикофард для обычного силового трансформатора.

Для уменьшения проникновения помехи в источниках питания используют раздельное экранирование первичной и вторичной обмоток трансформатора, а также разделение сигнальной и корпусной земли (рис. 3.8).

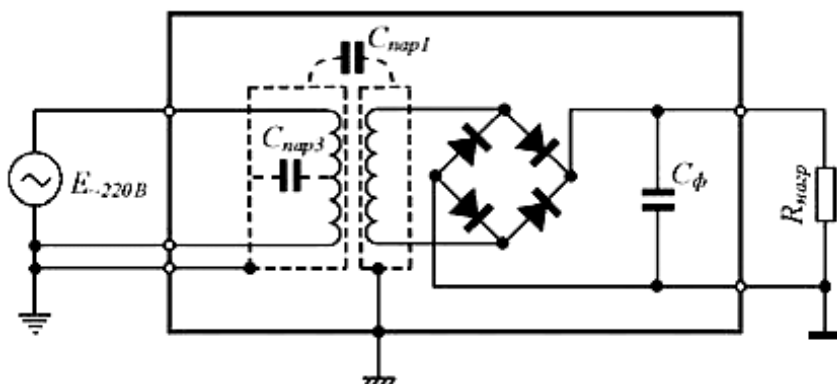


Рис. 3.8. Источник питания с тремя типами земель (слева направо): защитной, экраниющей и сигнальной

На рисунке сплошной жирной линией нарисован металлический корпус прибора, кружочки обозначают клеммные соединители. Методы соединения различных земель между собой будут описаны далее (см. раздел "Методы заземления").

Статическое электричество. Статическое электричество возникает на диэлектрических материалах. Величина заряда зависит от скорости движения трущихся тел, их материала и величины поверхности соприкосновения. Примерами трущихся тел могут быть: ременный привод; лента конвейера; синтетическая одежда и обувь на теле человека; поток непроводящих твёрдых частиц (пыли); газа или воздуха через сопло; движение непроводящей жидкости, за-

полняющей цистерну; автомобильные шины, катящиеся по непроводящей дороге; резиновые ролики под стульями, когда стулья перемещаются по непроводящему полу.

Результатом возникновения статических электрических зарядов может быть пробой входных каскадов измерительных систем, появление линий на мониторах, переход триггеров в другое состояние, поток ошибок в цифровых системах, пробой изоляции гальванически изолированных цепей с большим сопротивлением на землю, воспламенение взрывоопасной смеси.

Для защиты систем автоматизации от сбоев, вызванных статическим электричеством, используют электростатические экраны, соединённые с экранным заземлением, а также преобразователи интерфейсов с защитой от статического электричества.

Кондуктивные наводки. Кондуктивная наводка – это помеха, которая передаётся из соседних электрических цепей не через электромагнитное поле, а путём переноса электрического тока по общим для обеих цепей проводникам, в основном через общие участки цепей заземления или питания. Обычно источником кондуктивных помех являются генераторы, цепи с большим током, цифровая часть аналого-цифровой схемы, реле, DC/D- и AC/DC-преобразователи, шаговые двигатели с импульсным питанием, мощные печи с ШИМ-управлением, а также помехи из сети питания, протекающие по общему участку заземления, и помехи с частотой преобразования источника бесперебойного питания (UPS).

Наиболее типичной причиной появления кондуктивных помех в системах промышленной автоматизации является неправильно выполненное заземление.

Рассмотрим пример (рис. 3.9). Ток питания цифровой части модуля ввода $I_{\text{пом}}$ проходит по общему участку провода, который имеет сопротивление $R_{\text{общ}}$ и создаёт на нём падение напряжения помехи $V_{\text{пом}}$. При неправильном соединении аналогового входа модуля ввода с источником сигнала (на рис. 3.9, *а* показано зачёркнутой линией) ко входу модуля прикладывается сумма напряжения измеряемого сигнала и напряжения помехи $E_c + V_{\text{пом}}$.

При более правильном соединении входа "-" модуля с источником сигнала (на рис. 3.9, *а* показано штриховой линией) на вход модуля действует синфазная помеха $V_{\text{пом}}$, которая при недостаточ-

ном коэффициенте подавления синфазного сигнала может вносить погрешность в результат измерения. Для устранения обоих источников погрешности соединение аналоговой и цифровой земли необходимо выполнять в одной общей точке (рис. 3.9, б). При этом падение напряжения помехи на заземляющем проводнике никак не сказывается на аналоговой части модуля.

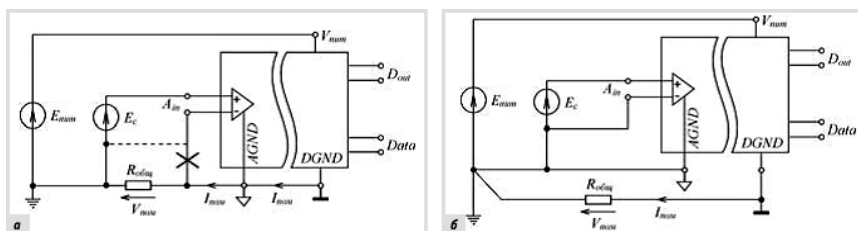


Рис. 3.9. Прохождение кондуктивной помехи при неправильном соединении земель и цепей сигнала (а) и при правильном соединении (б)

Электромагнитные наводки. Электромагнитные наводки появляются вследствие явления электромагнитной индукции: в проводящем контуре, находящемся в электромагнитном поле, возникает ЭДС индукции, если контур разомкнут, или индукционный ток, если контур замкнут. Источниками электромагнитного поля помехи могут быть радиомодем, радиотелефон, радиоретранслятор, радиостанция, сотовый передатчик на крыше здания, двигатель с искрящимися щётками, электросварочный аппарат, трамвай, люминесцентные лампы, тиристорный регулятор, компьютер, телевизионные и радиостанции, сотовые телефоны, цифровая часть измерительной системы, реле регулятора, космическое коротковолновое излучение, удар молнии и др.

Источником электромагнитной помехи может быть также и цифровая (дискретная) подсистема системы автоматизации, например, компьютер, реле, тиристоры, мощные выходы дискретных модулей. Сильными источниками электромагнитных помех являются и оптоволоконные передатчики, поскольку они потребляют большой ток и работают на высоких частотах. Излучаются помехи с помощью случайных проводников, образующих дипольную или рамочную антенну. Дипольная антенна является источником преимущественно электрического поля в её окрестности, рамочная –

источником магнитного поля. Вдали от таких источников доминирующего поля нет, есть поперечная электромагнитная волна. Реальные системы образуют множество излучающих антенн, состоящих из проводников, кабелей и различных металлических поверхностей. Наводятся электромагнитные помехи на всех проводящих предметах, которые в рассматриваемом случае играют роль антенн. Мощность наведённой помехи зависит от площади контура, охваченного проводником, или от длины провода.

Помеха, наведённая в такой антенне, кондуктивным путём может передаваться в сигнальные цепи или цепи заземления, вызывая поток ошибок в цифровых схемах или погрешность передачи сигнала в аналоговых.

Наиболее распространёнными приёмниками электромагнитных помех являются длинные провода: цепи заземления, промышленные сети (полевые шины), кабели, соединяющие датчики и модули аналогового ввода, кабели информационных коммуникаций.

"Замаскированными" приёмниками электромагнитных помех являются металлические конструкции в зданиях: металлические стеллажи, окна с металлической рамой, трубы водоснабжения и отопления здания, защитное контурное заземление здания и т.п.

Основными методами борьбы с электромагнитными наводками являются уменьшение площади контура, принимающего помеху, и применение дифференциального способа передачи сигнала в сочетании с витыми парами проводов.

3.4. Методы заземления

Техника заземления в системах промышленной автоматизации сильно различается для гальванически связанных и гальванически развязанных цепей. Большинство методов, описанных в литературе, относится к гальванически связанным цепям, доля которых в последнее время существенно уменьшилась в связи с резким падением цен на DC/DC-преобразователи.

Заземление гальванически связанных цепей

Рекомендуется избегать применения гальванически связанных цепей, а если другого варианта нет, то желательно, чтобы размер

этих цепей был по возможности малым и чтобы они располагались в пределах одного шкафа.

Примером гальванически связанной цепи является соединение источника и приёмника стандартного сигнала 0...5 В (рис. 3.10, 3.11). Чтобы пояснить, как корректно выполнить заземление, рассмотрим вариант неправильного (рис. 3.10) и правильного (рис. 3.11) монтажа.

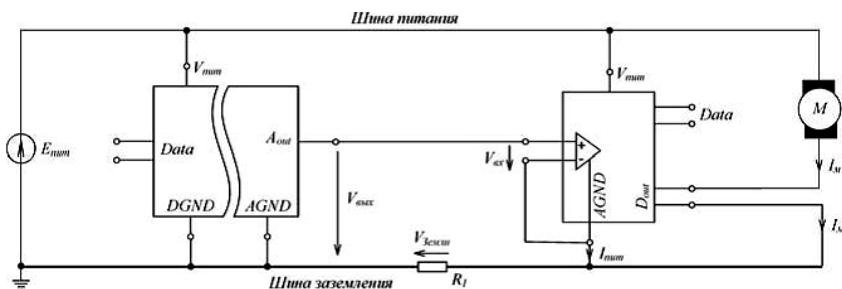


Рис. 3.10. Пример неправильного решения проблемы

На рис. 3.10 допущены следующие ошибки:

- ток мощной нагрузки (двигателя постоянного тока) протекает по той же шине заземления, что и сигнал, создавая падение напряжения $V_{\text{земли}}$;

- использовано однополярное включение приёмника сигнала, а не дифференциальное;

- использован модуль ввода без гальванической развязки цифровой и аналоговой частей, поэтому ток питания цифровой части, содержащий помеху, протекает через вывод AGND и создаёт дополнительное падение напряжения помехи на сопротивлении R_1 .

Перечисленные ошибки приводят к тому, что напряжение на входе приёмника $V_{\text{вх}}$ равно сумме напряжения сигнала $V_{\text{вых}}$ и напряжения помехи $V_{\text{земли}} = R_1 \cdot (I_{\text{пит}} + I_M)$.

Для устранения этого недостатка в качестве проводника заземления можно использовать медную шину большого сечения, однако лучше выполнить заземление так, как показано на рис. 3.11, а именно:

- все цепи заземления соединить в одной точке (при этом ток помехи I_M уже не протекает через сопротивление R_1);

Поэтому заземление в одной точке используется на частотах до 1 МГц, свыше 10 МГц заземлять лучше в нескольких точках, а в промежуточном диапазоне от 1 до 10 МГц следует использовать одноточечную схему, если наиболее длинный проводник в цепи заземления меньше $1/20$ от длины волны помехи. В противном случае используется многоточечная схема. Заземление в одной точке часто используется в военных и космических устройствах.

Заземление гальванически развязанных цепей

Радикальным решением описанных проблем (см. рис. 3.10 и 3.11) является применение гальванической изоляции с отдельным заземлением цифровой, аналоговой и силовой частей системы (рис. 3.12). Силовая часть обычно заземляется через шину защитного заземления. Применение гальванической изоляции позволяет разделить аналоговую и цифровую землю, а это, в свою очередь, исключает протекание по аналоговой земле токов помехи от силовой и цифровой земли. Аналоговая земля может быть соединена с защитным заземлением через сопротивление RAGND (подробнее см. разделы "Плывающая" земля" и "Гальваническая развязка").

Заземление экранов сигнальных кабелей

Здесь мы рассмотрим только заземление при передаче сигнала по витой экранированной паре, поскольку этот случай наиболее типичен для систем промышленной автоматизации. Так как длина сигнального кабеля обычно составляет десятки и сотни метров, он должен быть защищён от переменного магнитного поля (применением витой пары), электростатических зарядов и ёмкостных наводок (экранированием).

Если частота помехи не превышает 1 МГц, то кабель надо заземлять с одной стороны. Если его заземлить с двух сторон (рис. 3.13), то образуется замкнутый контур, который будет работать как антенна, принимая электромагнитную помеху (на рис. 3.13 путь тока помехи показан штриховой линией). Ток помехи, проходя по экрану кабеля, будет наводить на центральных жилах кабеля помеху через взаимную индуктивность.

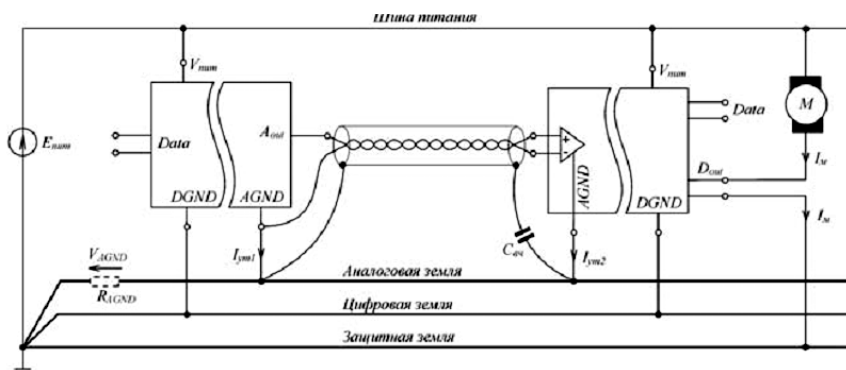


Рис. 3.12. Пример радикального решения проблемы, показанной на рис 3.10 и 3.11

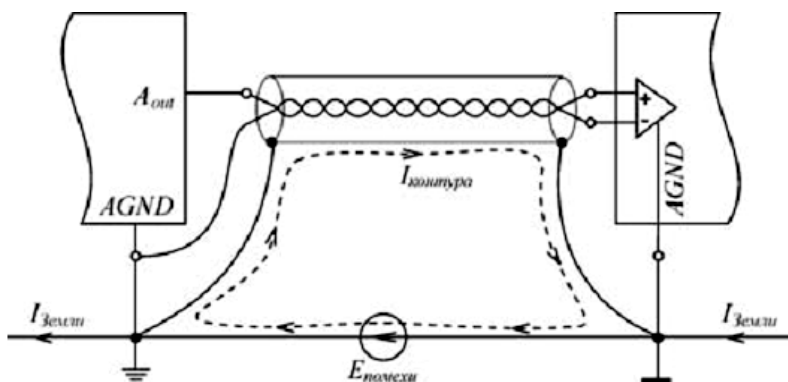


Рис. 3.13. Пример неправильного (с двух сторон) заземления экрана кабеля на низких частотах

Если точки заземления концов кабеля разнесены на значительное расстояние, между ними может существовать разность потенциалов, вызванная блуждающими токами в земле или помехами в шине заземления. Блуждающие токи наводятся электрифицированным транспортом, сварочными агрегатами, устройствами электрохимической защиты, естественными электрическими полями, вызванными фильтрацией вод в горных породах и др. Особенно большие токи возникают при ударе молнии. Блуждающие токи вызывают разность потенциалов $E_{\text{помехи}}$ между концами оплётки кабеля и паразитный ток, который также наводит в центральных жилах помеху вследствие взаимной индукции.

Оплётку кабеля надо заземлять со стороны источника сигнала. Если заземление сделать со стороны приёмника, то ток помехи будет протекать по пути, показанному на рис. 3.14 штриховой линией, то есть через ёмкость между жилами кабеля, создавая на ней и, следовательно, между дифференциальными входами напряжение помехи.

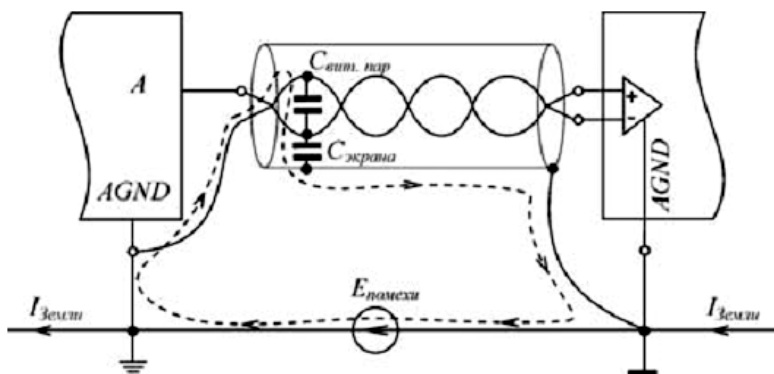


Рис. 3.14. Пример неправильного (со стороны приёмника сигнала) заземления экрана кабеля

Поэтому заземлять оплётку надо со стороны источника сигнала (рис. 3.15), в этом случае путь для прохождения тока помехи отсутствует.

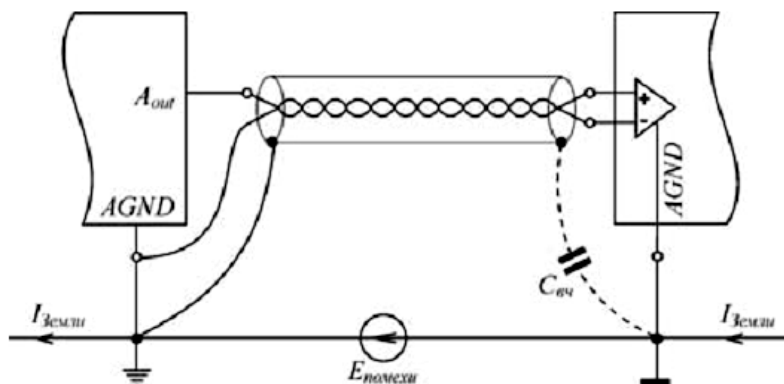


Рис. 3.15. Правильное заземление экрана (дополнительное заземление справа используется для случая высокочастотного сигнала)

Если источник сигнала не заземлён (например, термопара), то заземлять экран можно с любой стороны, так как в этом случае замкнутый контур для тока помехи не образуется. На частотах более 1 МГц увеличивается индуктивное сопротивление экрана, и токи ёмкостной наводки создают на нём большое падение напряжения, которое может передаваться на внутренние жилы через ёмкость между оплёткой и жилами. Кроме того, при длине кабеля, сравнимой с длиной волны помехи (длина волны помехи на частоте 1 МГц равна 300 м, на частоте 10 МГц – 30 м), возрастает сопротивление оплётки (см. раздел "Модель земли"), что резко повышает напряжение помехи на оплётке. Поэтому на высоких частотах оплётку кабеля надо заземлять не только с обеих сторон, но и в нескольких точках между ними (рис. 3.16). Эти точки выбирают на расстоянии $1/10$ длины волны помехи одна от другой. При этом по оплётке кабеля будет протекать часть тока $I_{\text{земли}}$, передающего помеху в центральную жилу через взаимную индуктивность. Ёмкостный ток также будет протекать по пути, показанному на рис. 3.14, однако высокочастотная составляющая помехи будет ослаблена. Выбор количества точек заземления кабеля зависит от разницы напряжений помехи на концах экрана, частоты помехи, требований к защите от ударов молнии или от величины токов, протекающих через экран в случае его заземления.

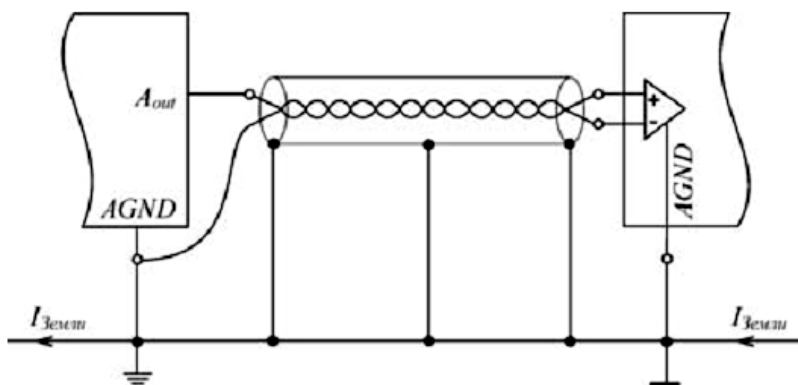


Рис. 3.16. Заземление экрана кабеля на высоких частотах

Заземление при дифференциальных измерениях

Если источник сигнала не имеет сопротивления на землю, то при дифференциальном измерении образуется "плавающий" вход. На "плавающем" входе может наводиться статический заряд от атмосферного электричества или входного тока утечки операционного усилителя. Для отвода заряда и тока на землю потенциальные входы модулей аналогового ввода обычно содержат внутри себя резисторы сопротивлением от 1 до 20 МОм, соединяющие аналоговые входы с землёй. Однако при большом уровне помех или большом импедансе источника сигнала даже сопротивление 20 МОм может оказаться недостаточным, и тогда необходимо дополнительно использовать внешние резисторы номиналом от десятков кОм до 1 МОм или конденсаторы с таким же сопротивлением на частоте помехи (рис. 3.17).

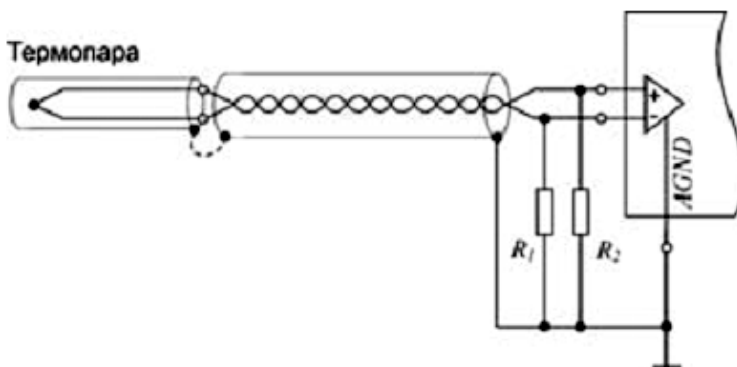


Рис. 3.17. Заземление аналоговых входов через сопротивления для уменьшения помех на "плавающем" входе

Заземление в распределённых системах управления

В системах управления, распределённых по некоторой территории с характерными размерами в десятки и сотни метров, нельзя использовать модули ввода без гальванической развязки. Только гальваническая развязка позволяет соединять цепи, заземлённые в точках с разными потенциалами.

Кабели, проходящие по открытой местности, должны быть защищены от магнитных импульсов, возникающих во время грозы. Радикальным решением для территориально распределённой сис-

темы управления является передача информации по оптическому волокну или радиоканалу. Неплохие результаты можно получить, отказавшись от передачи информации по аналоговым стандартам в пользу цифровых.

Заземление исполнительного оборудования и приводов АСУ ТП

Цепи питания двигателей с импульсным управлением, двигателей сервоприводов, исполнительных устройств с ШИМ-управлением должны быть выполнены витой парой для уменьшения магнитного поля, а также экранированы для снижения электрической составляющей излучаемой помехи. Экран кабеля должен быть заземлён с одной стороны. Цепи подключения датчиков таких систем должны быть помещены в отдельный экран и В сетях Ethernet с малой пропускной способностью (10 Мбит/с) заземление экрана следует выполнять только в одной точке. В Fast Ethernet (100 Мбит/с) и Gigabit Ethernet (1 Гбит/с) заземление экрана следует выполнять в нескольких точках, пользуясь рекомендациями раздела "Заземление экранов сигнальных кабелей".

Краткие выводы: правила заземления

Радикальные методы решения проблем заземления следующие.

1. Использовать модули ввода-вывода только с гальванической развязкой.
2. Не применять длинных проводов от аналоговых датчиков. Располагать модули ввода в непосредственной близости к датчику, а сигнал передавайте в цифровой форме.
3. Использовать датчики с цифровым интерфейсом.
4. На открытой местности и при больших дистанциях использовать оптический кабель вместо медного.
5. Использовать только дифференциальные входы модулей аналогового ввода.

Глава 4. ОБРАБОТКА АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ МИКРОКОНТРОЛЛЕРАМИ.

ВЫБОР И ЗАДАЧИ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ

(Использованы материалы из [43-45])

Современный рынок средств автоматизации предлагает широкий спектр аппаратных и программных устройств для построения надежных и удобных в эксплуатации систем. Специалистам предприятий подчас трудно правильно сориентироваться в море контроллеров, промышленных компьютеров, пакетов ПО, чтобы выбрать оптимальное по производительности оборудование и сохранить при этом одного поставщика технических средств и единую среду разработки ПО. При выборе контроллера первоочередной задачей является выбор системы критериев, а они для каждого конкретного применения должны или могут быть различными. Например, для одних применений – главное надежность, для других применений – быстродействие и т.п.

Рассмотрим основные особенности промышленных контроллеров, которые согласно зарубежной терминологии делятся на три категории: программируемые логические контроллеры (ПЛК), распределенные управляющие системы (distributed control systems DCS) и контроллеры на базе PC-технологий (PC-based).

ПЛК представляют собой устройство, предназначенное для сбора, преобразования, обработки, хранения информации и выработки команд управления. Они реализованы на базе микропроцессорной техники и работают в локальных и распределенных системах управления в реальном времени в соответствии с заданной программой. По техническим возможностям, которые определяют уровень решаемых задач, ПЛК делятся на классы: нано-, микро-, малые, средние и большие. Первоначально они предназначались для замены релейно-контактных схем, собранных на дискретных компонентах – реле, счетчиках, таймерах, элементах жесткой логики.

Принципиальное отличие ПЛК от релейных схем заключается в том, что все его функции реализованы программно. На одном контроллере можно реализовать схему, эквивалентную тысячам элементов жесткой логики. При этом надежность работы схемы не зависит от ее сложности.

Программировать ПЛК, как правило, можно на пяти языках стандарта IEC-61131.3. Современный ПЛК может обрабатывать дискретные и аналоговые сигналы, управлять клапанами, шаговыми двигателями, сервоприводами, преобразователями частоты, осуществлять регулирование (ПИД-регулятор). Высокие эксплуатационные характеристики делают целесообразным применение ПЛК везде, где требуется логическая обработка сигналов от датчиков. Применение ПЛК обеспечивает высокую надежность, простое тиражирование и обслуживание устройств управления, ускоряет монтаж и наладку оборудования, обеспечивает быстрое обновление алгоритмов управления (в том числе и на работающем оборудовании).

Другой подход основан на использовании промышленных контроллеров, представляющих собой специализированные вычислительные устройства для распределенных систем. Они также предназначены для управления процессами в реальном времени. Промышленные контроллеры имеют вычислительное ядро и модули ввода/вывода, воспринимающие информацию с датчиков, преобразователей, а также от других контроллеров, осуществляющие управление процессом или объектом путем выдачи управляющих сигналов. Программные средства, разрабатываемые для них, позволяют в удобной для оператора форме программировать и управлять ими через компьютер, находящийся на верхнем уровне системы.

В настоящее время сформировались два основных класса промышленных контроллеров в соответствии с выбором программно-аппаратной платформы низового уровня автоматизации.

1. Пользователи, считающие, что задачи АСУТП должны базироваться на классических системах реального, основой которых служат ОСРВ, такие как OS-9, VxWorks, LynxOS (UNIX PB), QNX и др., и микроконтроллерах/микропроцессорах таких производителей как Motorola (семейство MC 68***, PowerPC), Siemens и др. Этот подход реализуется в рамках открытых международных стандартов на:

- промышленные контроллеры и компьютеры VMEbus (IEC 821, IEEE 1014-87), Compact PCI (PICMGv. 2.1);
- устройства модульного (мезонинного) ввода/вывода Industry Pack (ANSI/VITA 4-95), PMC(IEEEP1386.1) и др.;

- промышленные сети Profibus (DIN 19245), Mod-bus, CANbus, LON, Ethernet (IEEE 802), Interbus-S, DeviceNet и др.;
- средства разработки IEC 61131-3, ANSI C/C++.

Для разработчика представлена широкая номенклатура промышленных контроллеров, выполненных в рамках открытых международных стандартов VMEbus (IEC 821, IEEE 1014) в механическом формате Евромеханика 3U/6U производства мировых лидеров в области промышленной автоматизации: PEP Modular Computers (Германия), Motorola Computers Group (США), VMIC и др., а также модульных контроллеров SMART и IUC производства PEP Modular Computers. Контроллеры базируются на микропроцессорах серий Motorola 68*** и OCPB фирмы Microware OS-9. Вся техника имеет среднее время наработки на отказ более 100 000 ч, двухлетний срок гарантии, десятилетний срок поддержки всей номенклатуры продукции, что решает проблемы с поставкой ЗИП, а это особенно важно с учетом срока эксплуатации подобных систем (10 и более лет).

2. Пользователи, ориентированные на технологии PC/AT (PC-based), отдающие при решении любых задач, в том числе АСУТП, предпочтение связке Intel-Microsoft. Оба подхода имеют право на существование, тем более, что в ряде случаев выбор регламентируется корпоративной политикой предприятий в области автоматизации. Предлагаемые рынком аппаратно-программные средства автоматизации позволяют сегодня удовлетворить эти подходы, отдавая право выбора заказчику или разработчику.

Это подход базируется на широкой номенклатуре PC/AT-совместимых промышленных контроллеров (PC-based контроллеры), персональных компьютеров и серверов, выполненных в том числе в рамках новейшего открытого международного стандарта CompactPCI производства PEP Modular Computers и Inova Computers (США/Германия). Этот стандарт объединяет достоинства и доступность PC/AT-совместимой техники, для которой подготовлено множество специалистов, способных грамотно ее эксплуатировать, с надежностью промышленной техники, обеспечиваемой жестким механическим форматом Евромеханика 3U/6U, новейшей конструкцией разъемов и многослойной объединительной магистрали, дополнительными мерами по защите от электромагнитных помех. Показатель надежности PC/AT-совместимых контроллеров

и компьютеров в стандарте Compaq PCI, оцениваемый параметром MTBF (среднее время наработки на отказ), превышает 100 000 ч. Широкое распространение также получили промышленные контроллеры в формате PC-104.

Основные критерии выбора контроллеров:

- функция разрабатываемого контроллера,
 - место контроллера в общей структуре системы управления, оценка возможности применения одного семейства контроллеров для всей системы,
 - наличие встроенных периферийных и связанных контроллеров, памяти, таймеров, включая сторожевой, clock-мониторов и т.д.,
 - условия работы, температурный диапазон, вибрация, агрессивные среды,
 - ПО для разработки частей контроллера и пользовательского программирования, т.е. средства разработки, отладки, средства прикладного программирования, наличие встроенных средств отладки – встроенные аппаратные отладчики,
 - надежность, простота инсталляции и установки, легкая расширяемость и перестраиваемость, согласованность со стандартами и долговечность,
 - срок жизни контроллера, это обычно 10–20 лет.
- Рассмотрим два крайних типа микроконтроллеров: простейший на ПЛК и относительно сложный Analog Device.

4.1. Простые программируемые логические контроллеры

Рассмотрим схему смесительной установки, приведенную на рис. 4.1. Алгоритм работы установки очень прост. После её запуска в работу открывается клапан *Y1*, и ёмкость начинает заполняться компонентом № 1. При достижении уровня 2 срабатывает датчик *SL2*, закрывается клапан *Y1* и открывается клапан *Y2*. В ёмкость начинает поступать компонент №2. После заполнения емкости до уровня 1 по сигналу от датчика *SL1* закрывается клапан *Y2* и включается привод мешалки *M*. Через 15 мин он выключается, смесь готова. Для её выгрузки открывается клапан *Y3*. Окончание процесса фиксируется датчиком *SL3* (уровень 3). После закрытия клапана *Y3* установка готова к новому циклу приготовления смеси.

Как поступил бы разработчик системы управления, не имея в своем распоряжении контроллера? Он использовал бы схему, подобную той, что приведена на рис. 4.2. Вся система реализуется с помощью четырёх промежуточных реле и одного реле времени. Усложним немного задачу, и добавим условие возможности приготовления на этой же установке смеси по другой рецептуре. Это означает, что в ёмкость должно загружаться иное число компонентов с индивидуальными для каждого из них дозой и порядком загрузки, а также изменено время работы мешалки. Такое условие уже не может быть реализовано с помощью релейной схемы на дискретных элементах без полной её переделки. Такая задача вполне по плечу микроконтроллеру, в котором алгоритм управления реализуется программно, а аппаратных средств имеется ровно столько, сколько необходимо для решения подобных по сложности задач. Познакомимся с данным классом устройств поближе на примере логического модуля LOGO! фирмы Siemens.

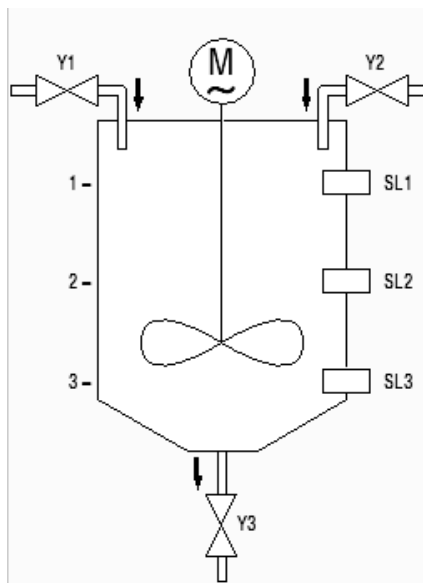


Рис. 4.1. Схема смесительной установки

Логический модуль LOGO! изначально задумывался как промежуточное звено между традиционными релейными элементами ав-

томатики (контакты, реле времени и т.п.) и программируемыми контроллерами. В нём вместо соединения проводов должно было использоваться логическое соединение функций, обычно реализуемых аппаратно с помощью отдельных устройств. Но в отличие от программируемых контроллеров сложность устройств должна была позволять работать с ними персоналу без специальных знаний в области программирования. С этой же целью ввод программы в LOGO! предполагалось осуществлять непосредственно со встроенных индикатора и клавиатуры.

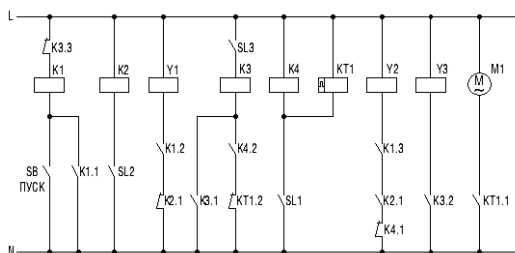


Рис. 4.2. Электрическая схема системы управления на реле.
Внешний вид модуля LOGO!

Для подключения к источникам сигналов и исполнительным устройствам модули LOGO! первых поколений имели 6 или 12 дискретных входов и 4 или 8 дискретных выходов (варианты Basic и Long соответственно). Затем к дискретным входам добавилось два аналоговых. И, наконец, в 2001 году фирма Siemens выпустила модульный LOGO!, в котором увеличение числа обслуживаемых входов и выходов обеспечивается с помощью дополнительных модулей расширения. В модульном варианте микроконтроллер LOGO! можно реализовать максимум с 24 дискретными и 8 аналоговыми входами, а также 16 дискретными выходами. Напряжение питания входных цепей в LOGO! соответствует напряжению питания модуля, которое может быть 12/24 В постоянного тока, 24 и 230 В переменного тока. Выходы могут быть транзисторными или релейными. Нагрузочная способность последних (до 10 А) обеспечивает непосредственное подключение достаточно мощных исполнительных устройств. Кроме того, к такому микроконтроллеру можно подключить коммуникационные модули.

Главной особенностью микроконтроллеров LOGO! все же является то, что схема релейной автоматики собирается из программно реализованных функциональных блоков. В распоряжении пользователя имеется восемь логических функций типа И, ИЛИ и т.п., большое число типов реле, в том числе реле с задержкой включения и выключения, импульсное реле, реле с самоблокировкой, а также такие функции, как выключатель с часовым механизмом, тактовый генератор, календарь, часы реального времени с возможностью автоматического перехода на летнее/зимнее время и др. Рассмотрим на маленьком примере, как в LOGO! представляется обычная коммутационная схема, приведенная на рис. 4.3. На ней потребитель *E1* включается и выключается с помощью выключателей *S1*, *S2* и *S3*. Реле *K1* срабатывает, когда замкнут хотя бы один из выключателей *S1* или *S2* и обязательно *S3*. В LOGO! указанная схема реализуется двумя последовательно соединёнными логическими блоками OR (ИЛИ) и AND (И). Реальный выключатель *S1* подключается ко входу *I1* модуля, выключатель *S2* – ко входу *I2*, *S3* – к *I3*, а потребитель *E1* подключается к релейному выходу *Q1*.

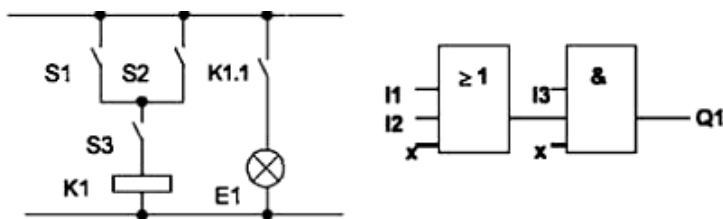


Рис. 4.3. Типовая коммутационная схема и ее реализация с помощью LOGO!

Программирование модулей LOGO!, а точнее – ввод схемы, может выполняться с помощью встроенных клавиатуры и дисплея. Оно сводится к выбору необходимых функциональных блоков, соединению их между собой и заданию параметров настройки блоков (задержек включения/выключения, значений счётчиков и т.д.). Для хранения управляющей программы в модуле имеется встроенное энергонезависимое запоминающее устройство. Создание резервной копии программы, а также перенос ее в другие LOGO! может быть осуществлён с помощью специальных модулей памяти, устанавливаемых в интерфейсное гнездо.

Однако ввод программы с панели управления может быть оправдан только для небольших по объёму программ или в случае острой необходимости внесения корректив в уже работающую программу непосредственно на объекте. А учитывая то, что программу всё равно предварительно приходится прорисовывать на бумаге, становится очевидным необходимость использования программного продукта под названием LOGO!Soft Comfort. Этот пакет позволяет разрабатывать в графической форме и документировать программы для LOGO! на компьютере и, кроме того, отлаживать их в режиме эмуляции логического модуля. Принцип работы аналогичен используемому при ручном вводе, но эффективность во много раз выше. Выбранные функциональные блоки мышью переносятся на рабочее поле, затем соединяются и параметрируются. Для каждого функционального блока может быть написан комментарий, который облегчит понимание принципа работы программы другому пользователю или поможет самому разработчику через некоторое время вспомнить собственные замыслы. Начиная работу над программой, пользователь задаёт тип используемого логического модуля. В этом случае при вводе программы будут автоматически контролироваться все имеющиеся ограничения по объёму памяти и возможности использования тех или иных функций. Часто имеет смысл разработанную программу протестировать с помощью встроенного эмулятора микроконтроллера. Если по результатам эмулирования корректировка программы не требуется, то её можно загрузить в память LOGO! с помощью специального кабеля, подключаемого к тому же интерфейсному гнезду, что и модули памяти.

В исходном варианте система управления смесительной установкой с использованием микроконтроллера LOGO! реализуется очень просто. На рис. 4.4 приведена схема подключения, а на рис. 4.5 блок-схема программы.

Теперь посмотрим, как с помощью модуля LOGO! могут быть реализованы новые функции системы управления.

Для дозирования компонентов в зависимости от их физико-химических свойств могут быть использованы различные методы, такие как, например, измерение расхода. Обработка импульсного сигнала с выхода счетчика (расходомера) в LOGO! реализуется с

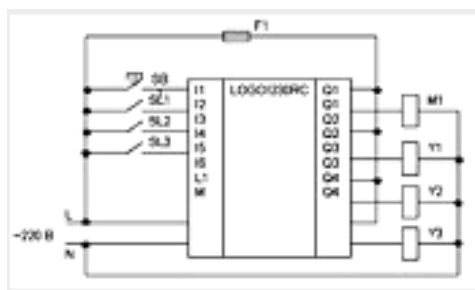


Рис. 4.4. Схема подключения

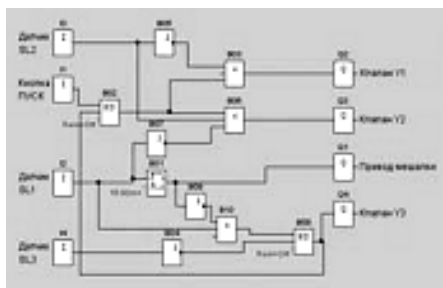


Рис. 4.5. Блок-схема программы

помощь функционального блока «реверсивный счетчик», изображение которого приведено на рис. 4.6. Значение параметра блока определяет число импульсов, соответствующее необходимому количеству компонента в смеси. Это значение может быть фиксированным или задаваемым с панели управления. Выход счетчика может быть подключен к любому дискретному входу LOGO! Время работы мешалки, как и в исходной программе, определяется функциональным блоком «таймер», параметр которого также может быть оперативно изменён обслуживающим или эксплуатирующим персоналом установки.

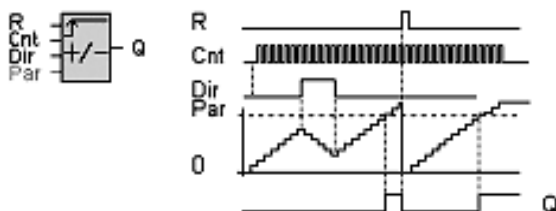


Рис. 4.6. Функциональный блок «Реверсивный счетчик»

4.2. Контроллеры Analog Device

Этот тип контроллеров рассмотрим на примере контроллера ADuC812 – 8-канальной, 12-разрядной системы сбора данных. Отличительной особенностью новейшего семейства микросхем серии ADuC8xx является сам их принцип построения. Эти микросхемы не являются «микроконтроллером со встроенными АЦП-ЦАП». Они представляют собой удачно скомбинированные АЦП и ЦАП со встроенным в них микроконтроллером и флэш-памятью. Поэтому их основным достоинством является высокая точность аналого-цифрового и цифроаналогового преобразования, удачно сочетаемая с возможностью непосредственной обработки получаемой информации. Ниже будут рассмотрены основные характеристики первых представителей семейства микросхем ADuC8xx и даны некоторые примеры их практического использования. Первой микросхемой семейства ADuC8xx, выпущенной в серийное производство в 1999 году, является ADuC812. Микросхема состоит из двух основных частей – аналоговой и цифровой. Аналоговые входы микросхемы соединены с 8-входовым мультиплексором. На выходе мультиплексора стоит усилитель выборки/хранения, фиксирующий значение аналогового сигнала на выбранном входе на время осуществления преобразования АЦП. Помимо него, к аналоговой части микросхемы относятся также два 12-разрядных ЦАП с буферными усилителями на выходе каждого из них. Источник опорного напряжения может использоваться либо внутренний, напряжением 2,5 В и температурной стабильностью 40 ppm/°C, либо внешний, напряжение которого не превышает уровень источника питания. Также к входному мультиплексору подключен внутренний датчик температуры, позволяющий оперативно измерять температуру кристалла (а значит, с определенными поправками, и температуру окружающей среды), позволяющий, к примеру, осуществлять компенсацию температуры холодного спая термодпар, подсоединенных к одному или нескольким входам микросхемы. На аналоговые входы допустима подача сигналов в диапазоне от 0 до $V_{\text{опорное}}$.

Интерфейсом между аналоговой и цифровой частями микросхемы служат регистры управления и калибровки. Цифровая часть состоит из собственно ядра микроконтроллера, полностью совместимого по системе команд с наиболее широко распространенными

в мире микроконтроллерами серии 8051, блока памяти и набора дополнительных периферийных устройств. Микросхема ADuC812 может питаться от источника напряжением 3 или 5 В и имеет несколько экономичных режимов работы.

Рассмотрим более подробно структуру АЦП, ЦАП и цифровой части микросхемы. Как уже упоминалось, первый представляет собой АЦП последовательных приближений, который может работать как в режиме единичных, так и непрерывных преобразований с максимальной скоростью 200 тысяч преобразований в секунду (одно преобразование каждые 5 мкс). Для запоминания результатов преобразования используется либо режим прерываний (как правило, его удобно использовать при невысокой частоте работы АЦП), либо режим прямого доступа, не влияющий на работу собственно контроллера и позволяющий сохранять результаты преобразования во внешнем ОЗУ с адресуемым пространством 16 Мбайт. АЦП имеет очень хорошую точность (соотношение сигнал/шум 70 дБ, что соответствует реальному разрешению на уровне 11,5 разрядов) и высокую линейность (типовая интегральная нелинейность на уровне $\pm 1/2$ МЗР). Микросхема выпускается с заводской калибровкой под оптимальную производительность. При каждом включении источника питания микросхемы эти коэффициенты записываются в соответствующие регистры.

В большинстве приложений этих коэффициентов достаточно для хорошей работы системы, однако пользователь в процессе работы может перезаписать их для избавления от дополнительных системных ошибок. Все режимы работы АЦП определяются тремя регистрами управления, находящимися во внутренней памяти микроконтроллера. Результаты преобразования могут быть считаны из двух регистров, один из которых показывает номер канала мультимплексора и старшие 4 бита результата, а второй – младшие 8 бит результата.

Что касается ЦАП, они управляются одним регистром управления и четырьмя регистрами данных. Обновление информации на выходе ЦАП может происходить отдельно для каждого из них, либо одновременно. Кроме того, каждый из них может быть сконфигурирован для работы либо в 12-разрядном, либо 8-разрядном режимах.

Микроконтроллер представляет собой «стандартное» ядро 8051 с максимальной рабочей частотой 16 МГц (12 МГц – типовая), тремя байтовыми портами ввода/вывода, один из которых, порт 3, обладает повышенной нагрузочной способностью, тремя 16-разрядными таймерами/счетчиками и расширенной периферией, которая будет описана ниже.

Блок памяти состоит из флэш-памяти программ объемом 8 кбайт, флэш-памяти данных объемом 640 байт и ОЗУ объемом 256 байт. Информация во внутреннюю флэш-память программ может быть записана как с любого внешнего программатора в «параллельном» режиме через порты микроконтроллера, так и непосредственно в системе в «последовательном» режиме через стандартный асинхронный последовательный порт.

К блоку расширенной периферии можно отнести дополнительные аппаратные возможности микросхемы, отсутствующие в оригинальной архитектуре 8051. Это дополнительные последовательные порты, дающие микросхеме возможность работы в ставших стандартными 2-проводных и 3-проводных синхронных протоколах SPI и I2C.

Также микросхема дополнена двумя мониторами, один из которых следит за отсутствием «зависания» микроконтроллера, и в случае обнаружения одного вырабатывает сигнал сброса в начальное состояние, а второй следит за тем, чтобы напряжение источника питания не падало ниже определенного, задаваемого пользователем значения (от 2,6 до 4,6 В). Он позволяет в случае, близком к потере питания, сохранить содержимое внутренних регистров, запомнить свое состояние и возобновить работу только после восстановления питания.

В заключение необходимо отметить, что данная микросхема поддерживается инструментальными средствами (EVAL-ADuC812), состоящими из эволюционной платы, соединяемой с компьютером, комплектом программного обеспечения (полная версия Ассемблера и ограниченная (2 Кбайта кода) версия C, программного симулятора, отладчика и последовательного загрузчика/программатора флэш-памяти), необходимой документации, блока питания и двух образцов микросхем.

AduC824 – микросхема для применения в промышленных интеллектуальных датчиках

Для краткости остановимся на отличительных чертах и характеристиках данной микросхемы. В аналоговой части вместо 8-канального 12-разрядного АЦП последовательных приближений применены два сигма-дельта-АЦП. Один из них (основной канал), имеющий реальное разрешение более 19 разрядов при входном сигнале $\pm 2,56$ В, снабжен программируемым усилителем, позволяющим получить реальное 13-разрядное разрешение при входном сигнале ± 20 мВ. Дополнительный канал характеризуется 16-разрядным разрешением. Кроме того, на кристалле имеются два согласованных (с разбросом не хуже 0,1 %) стабильных источника тока величиной 200 мкА, которые могут служить для запитки внешних датчиков.

Блок ЦАП состоит из одного прецизионного 12-разрядного ЦАП с вольтовым выходом, который может работать либо в 8-разрядном, либо в 12-разрядном режиме с диапазоном выходных сигналов от 0 до 2,5 В (при использовании внутреннего источника опорного напряжения), либо от 0 до напряжения источника питания на нагрузку до 10 кОм/100 пФ.

Еще одной отличительной особенностью данной микросхемы является ее малое энергопотребление (всего 3 мА при питании от 3-вольтового источника), что дает возможность ее реального использования в промышленных приложениях с питанием от токовой петли. Это стало возможным за счет применения специального тактового генератора, позволяющего «завести» микросхему от стандартного резонатора частотой 32768 кГц.

Остальные части микросхемы и комплект инструментальных средств имеют практически ту же структуру и функции, что и у вышеописанной микросхемы ADuC812.

ГЛАВА 5. ПОЛЕВЫЕ МАГИСТРАЛИ

(Использованы материалы из [46-51])

Для связи контроллеров с ЭВМ верхнего уровня необходима двунаправленная, многоточечная, коммуникационная сеть, реализующая связь функционально изолированных друг от друга устройств. Причем каждое коммуникационное устройство обладает определенными «интеллектуальными» ресурсами, обеспечивающими его самодиагностику и взаимодействие с аналогичными устройствами без привлечения устройств и дополнительных протоколов высокого уровня. Такая магистраль носит название полевой магистрали или fieldbus. Вообще говоря, архитектура fieldbus похожа на LAN, однако должна отвечать целому ряду специфических требований, среди которых жесткая детерминированность поведения, обеспечение функций реального времени, возможность работы в сильно распределенных в пространстве системах, при использовании недорогого физического уровня, высокая устойчивость физического и канального уровней к помехам различной природы, наличие высоконадежных механических коммутационных компонентов.

При реализации приведенных требований к полевым магистралям применение промышленных полевых шин позволяет существенно улучшить качество, снизить затраты и повысить эффективность конечной системы за счет возможности узлов выполнять ряд операций по самодиагностике и обслуживанию, а применение цифровой передачи данных позволяет значительно снизить количество используемых проводников. Архитектура конечной системы получается довольно простой за счет количественного уменьшения используемых компонентов.

Важной предпосылкой для использования стандартной сети из семейства современных полевых сетей в качестве межмодульной среды передачи является существенное снижение интенсивности межмодульного взаимодействия. Оценки показывают, что интенсивность обмена информацией между интеллектуальными модулями может снизиться в сотни раз. Это достигается за счет влияющих программ внутри интеллектуального модуля. Межмодульное взаимодействие в этом случае требуется только для получения инфор-

мации о значениях параметров, необходимых для функционирования собственных алгоритмов управления и заданий извне.

Наиболее распространенными стандартами в настоящее время являются: RS 485, PROFIBUS, MIL 1553, LonWorks, CAN, Ethernet и беспроводные технологии Wireless. Рассмотрим более подробно стандарт CAN.

5.1. Стандарт CAN

Промышленная сеть реального времени CAN (рис. 5.1) представляет собой сеть с общей средой передачи данных. Это означает, что все узлы сети одновременно принимают сигналы, передаваемые по шине. Невозможно послать сообщение какому-либо конкретному узлу. Все узлы сети принимают весь трафик (поток данных), передаваемый по шине. Однако CAN-контроллеры предоставляют аппаратную возможность фильтрации CAN-сообщений. Каждый узел состоит из двух составляющих. Это собственно CAN-контроллер, который обеспечивает взаимодействие с сетью и реализует протокол, и микропроцессор (CPU).

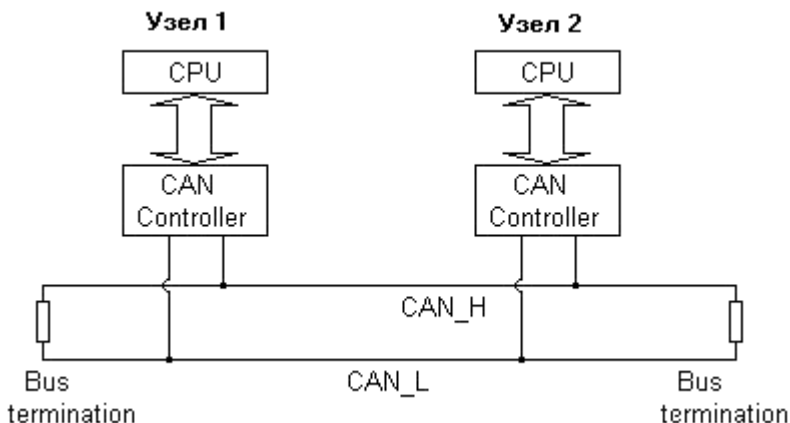


Рис. 5.1. Топология сети CAN

CAN-контроллеры соединяются с помощью дифференциальной шины, которая имеет две линии – CAN_H (can-high) и CAN_L (can-low), по которым передаются сигналы. Логический ноль регистри-

руется, когда на линии CAN_H сигнал выше, чем на линии CAN_L. Логическая единица – в случае когда сигналы CAN_H и CAN_L одинаковы – отличаются менее, чем на 0,5 В). Использование такой дифференциальной схемы передачи делает возможным работу CAN сети в очень сложных внешних условиях. Логический ноль называется доминантным битом, а логическая единица рецессивным. Эти названия отражают приоритет логической единицы и нуля на шине CAN. При одновременной передаче в шину логического нуля и единицы на шине будет зарегистрирован только логический ноль (доминантный сигнал), а логическая единица будет подавлена (рецессивный сигнал).

Типы сообщений сети CAN

Данные в CAN передаются короткими сообщениями-кадрами стандартного формата. В CAN существуют четыре типа сообщений:

- Data Frame;
- Remote Frame;
- Error Frame;
- Overload Frame.

Data Frame – это наиболее часто используемый тип сообщения. Он состоит из следующих основных частей (рис. 5.2):

- поле арбитража (arbitration field) определяет приоритет сообщения в случае, когда два или более узлов одновременно пытаются передать данные в сеть. Поле арбитража состоит, в свою очередь из:

- для стандарта CAN-2.0A, 11-битного идентификатора,
+ 1 бит RTR (retransmit),

- для стандарта CAN-2.0B, 29-битного идентификатора + 1 бит RTR (retransmit). Следует отметить, что поле идентификатора, несмотря на свое название, никак не идентифицирует само по себе ни узел в сети, ни содержимое поля данных. Для Data кадра бит RTR всегда выставлен в логический ноль (доминантный сигнал).

- поле данных (data field) содержит от 0 до 8 байт данных;
- поле (CRC field) содержит 15-битную контрольную сумму сообщения, которая используется для обнаружения ошибок;

- слот подтверждения (Acknowledgement Slot) (1 бит), каждый контроллер, который правильно принял сообщение? посылает бит подтверждения в сеть. Узел, который послал сообщение, слушает этот бит, и в случае, если подтверждение не пришло, повторяет передачу. В случае приема слота подтверждения передающий узел может быть уверен лишь в том, что хотя бы один из узлов в сети правильно принял его сообщение.

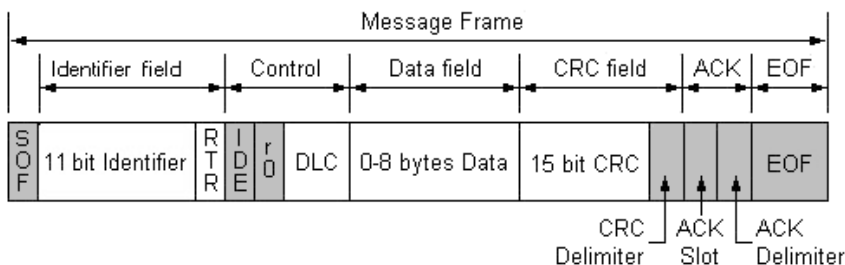


Рис. 5.2. Data Frame стандарта CAN 2.0A

Remote Frame – это Data Frame без поля данных и с выставленным битом RTR (1 – рецессивные бит). Основное предназначение Remote кадра – это инициация одним из узлов сети передачи в сеть данных другим узлом. Такая схема позволяет уменьшить суммарный трафик сети. Однако на практике Remote Frame сейчас используется редко (например, в DeviceNet Remote Frame вовсе не используется).

Error Frame – это сообщение, которое явно нарушает формат сообщения CAN. Передача такого сообщения приводит к тому, что все узлы сети регистрируют ошибку формата CAN-кадра, и, в свою очередь, автоматически передают в сеть Error Frame. Результатом этого процесса является автоматическая повторная передача данных в сеть передающим узлом. Error Frame состоит из поля Error Flag, которое состоит из 6 бит одинакового значения (и, таким образом, Error frame нарушает проверку Bit Stuffing, см. ниже), и поля Error Delimiter, состоящее из 8 рецессивных битов. Error Delimiter дает возможность другим узлам сети обнаружив Error Frame посылать в сеть свой Error Flag.

Overflow Frame повторяет структуру и логику работы Еггог-кадра, с той разницей, что он используется перегруженным узлом, который в данный момент не может обработать поступающее сообщение, и поэтому просит при помощи Overflow-кадра о повторной передаче данных. В настоящее время Overflow-кадр практически не используется.

Контроль доступа к среде передачи (побитовый арбитраж)

Поле арбитража CAN-кадра (рис. 5.3) используется в CAN для разрешения коллизий доступа к шине методом неструктивного арбитража. Суть метода неструктивного арбитража заключается в следующем. В случае, когда несколько контроллеров начинают одновременную передачу CAN-кадра в сеть, каждый из них сравнивает бит, который собирается передать на шину, с битом, который пытается передать на шину конкурирующий контроллер. Если значения этих битов равны, оба контроллера передают следующий бит. И так происходит до тех пор, пока значения передаваемых битов не окажутся различными. Теперь контроллер, который передавал логический ноль (более приоритетный сигнал), будет продолжать передачу, а другой (другие) контроллер прервёт свою передачу до того времени, пока шина вновь не освободится. Конечно, если шина в данный момент занята, то контроллер не начнет передачу до момента её освобождения.

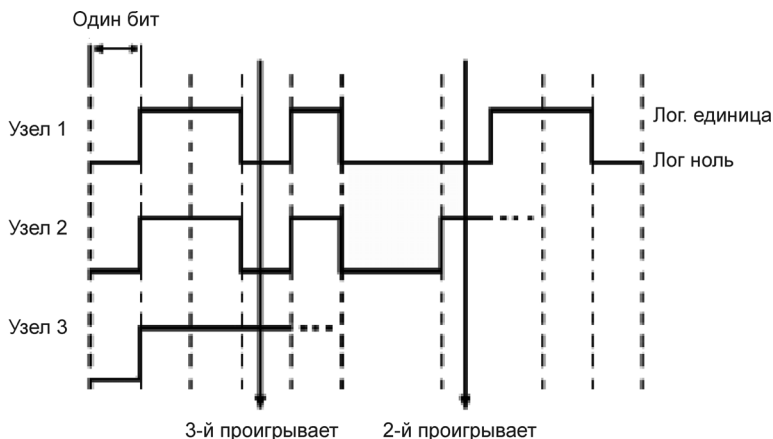


Рис. 5.3. Побитовый арбитраж на шине CAN

Методы обнаружения ошибок

CAN-протокол определяет пять способов обнаружения ошибок в сети:

- Bit monitoring;
- Bit stuffing;
- Frame check;
- ACKnowledgement Check;
- CRC Check.

Bit monitoring. Каждый узел во время передачи битов в сеть сравнивает значение передаваемого им бита со значением бита, которое появляется на шине. Если эти значения не совпадают, то узел генерирует ошибку Bit Error. Естественно, что во время арбитража на шине (передача поля арбитража в шину) этот механизм проверки ошибок отключается.

Bit stuffing. Если узел передает последовательно в шину 5 бит с одинаковым значением, то он добавляет шестой бит с противоположным значением. Принимающие узлы этот дополнительный бит удаляют. Если узел обнаруживает на шине больше 5 последовательных бит с одинаковым значением, то он генерирует ошибку Stuff Error.

Frame Check. Некоторые части CAN-сообщения имеют одинаковое значение во всех типах сообщений. Т.е. протокол CAN точно определяет какие уровни напряжения и когда должны появляться на шине. Если формат сообщений нарушается, то узлы генерируют ошибку Frame Error.

Acknowledgement Check. Каждый узел, получив правильное сообщение по сети, посылает в сеть доминантный (0) бит. Если же этого не происходит, то передающий узел регистрирует ошибку Acknowledgement Error.

CRC Check. Каждое сообщение CAN содержит CRC-сумму, и каждый принимающий узел подсчитывает значение CRC для каждого полученного сообщения. Если подсчитанное значение CRC-суммы, не совпадает со значением CRC в теле сообщения, принимающий узел генерирует ошибку CRC Error.

Механизм ограничения ошибок (Error confinement)

Каждый узел сети CAN во время работы пытается обнаружить одну из пяти возможных ошибок. Если ошибка обнаружена, узел передает в сеть Error Frame, разрушая тем самым весь текущий трафик сети (передачу и прием текущего сообщения). Все остальные узлы обнаруживают Error Frame и принимают соответствующие действия (сбрасывают принятое сообщение). Кроме того, каждый узел ведет два счетчика ошибок: Transmit Error Counter (счетчик ошибок передачи) и Receive Error Counter (счетчик ошибок приема). Эти счетчики увеличиваются или уменьшаются в соответствии с несколькими правилами. Сами правила управления счетчиками ошибок достаточно сложны, но сводятся к простому принципу: ошибка передачи приводит к увеличению Transmit Error счетчика на 8, ошибка приема увеличивает счетчик Receive Error на 1, любая корректная передача/прием сообщения уменьшают соответствующий счетчик на 1. Эти правила приводят к тому, что счетчик ошибок передачи передающего узла увеличивается быстрее, чем счетчик ошибок приема принимающих узлов. Это правило соответствует предположению о большой вероятности того, что источником ошибок является передающий узел.

Каждый узел CAN-сети может находиться в одном из трех состояний. Когда узел стартует, он находится в состоянии Error Active. Когда, значение хотя бы одного из двух счетчиков ошибок превышает предел 127, узел переходит в состояние Error Passive. Когда значение хотя бы одного из двух счетчиков превышает предел 255, узел переходит в состояние Bus Off.

Узел находящийся в состоянии Error Active в случае обнаружения ошибки на шине передает в сеть Active Error Flags. Active Error Flags состоит из 6 доминантных бит, поэтому все узлы его регистрируют. Узел в состоянии Error Passive передает в сеть Passive Error Flags при обнаружении ошибки в сети. Passive Error Flags состоит из 6 рецессивных бит, поэтому остальные узлы сети его не замечают, и Passive Error Flags лишь приводит к увеличению Error счетчика узла. Узел в состоянии Bus Off ничего не передает в сеть (не только Error-кадры, но вообще никакие другие).

Адресация и протоколы высокого уровня

В CAN не существует явной адресации сообщений и узлов. Протокол CAN (рис. 5.4) нигде не указывает, что поле арбитража (Identification field + RTR) должно использоваться как идентификатор сообщения или узла. Таким образом, идентификаторы сообщений и адреса узлов могут находиться в любом поле сообщения (в поле арбитража или в поле данных, или присутствовать и там, и там). Точно так же протокол не запрещает использовать поле арбитража для передачи данных.

Утилизация поля арбитража и поля данных и распределение адресов узлов, идентификаторов сообщений и приоритетов в сети является предметом рассмотрений так называемых протоколов высокого уровня (HLP – Higher Layer Protocols). Название HLP отражает тот факт, что протокол CAN описывает только два нижних уровня эталонной сетевой модели ISO/OSI, а остальные уровни описываются протоколами HLP.

Существует множество таких высокоуровневых протоколов. Наиболее распространенные из них это: DeviceNet, CAL/CANopen, SDS и CanKingdom.

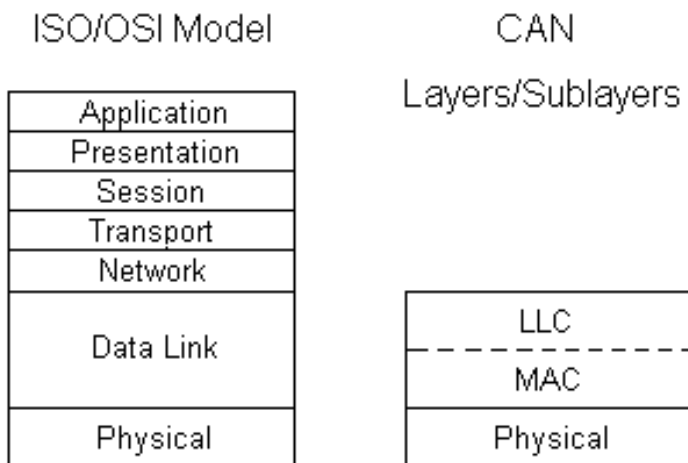


Рис. 5.4. Логическая структура протокола CAN

Физический уровень протокола CAN

Физический уровень (Physical Layer) протокола CAN определяет сопротивление кабеля, уровень электрических сигналов в сети и т.п. Существует несколько физических уровней протокола CAN (ISO 11898, ISO 11519, SAE J2411).

В подавляющем большинстве случаев используется физический уровень CAN, определенный в стандарте ISO 11898. Стандарт ISO 11898 в качестве среды передачи определяет двухпроводную дифференциальную линию с импедансом (терминаторы) 120 Ом (допускается колебание импеданса в пределах от 108 Ом до 132 Ом). Физический уровень CAN реализован в специальных чипах – CAN приемопередатчиках (transceivers), которые преобразуют обычные TTL уровни сигналов, используемых CAN-контроллерами в уровни сигналов на шине CAN. Наиболее распространенный CAN приемопередатчик – Phillips 82C250, который полностью соответствует стандарту ISO 11898.

Максимальная скорость сети CAN в соответствии с протоколом равна 1 Мбит/с. При скорости в 1 Мбит/с максимальная длина кабеля равна примерно 40 метрам. Ограничение на длину кабеля связано с конечной скоростью света и механизмом побитового арбитража. Во время арбитража все узлы сети должны получать текущий бит передачи одновременно. Сигнал должен успеть распространиться по всему кабелю за единичный отсчет времени в сети. Соотношение между скоростью передачи и максимальной длиной кабеля приведено в табл. 5.1.

Таблица 5.1.

Скорость передачи	Максимальная длина сети
1000 Кбит/с	40 м
500 Кбит/с	100 м
250 Кбит/с	200 м
125 Кбит/с	500 м
10 Кбит/с	6 км

Разъемы для сети CAN до сих пор не стандартизованы. Каждый протокол высокого уровня обычно определяет свой тип разъемов для CAN-сети.

5.2. Стандарт RS-485

RS-485 является также широко используемым промышленным стандартом, использующим двунаправленную сбалансированную линию передачи. Протокол поддерживает многоточечные соединения, обеспечивая создание сетей с количеством узлов до 32 и передачу на расстояние до 1200 м. Использование повторителей RS-485 позволяет увеличить расстояние передачи еще на 1200 м или добавить еще 32 узла. Стандарт RS-485 поддерживает полудуплексную связь. Для передачи и приема данных достаточно одной скрученной пары проводников.

Краткая характеристика стандарта RS 485

Тип передачи.....	дифференциальный
Максимальная длина кабеля, м	~1200
Минимальное выходное напряжение передатчика, В.....	± 1.5
Нагрузочное сопротивление передатчика, Ом.....	54
Входное сопротивление приемника, кОм	минимум 12
Чувствительность по входам приемника, мВ	± 200
Диапазон входных напряжений приемника, В	от -7 до $+12$
Количество приемников и передатчиков на линии.....	32/32

5.3. Стандарт PROFIBUS

Эта технология получила широкое распространение преимущественно при организации сетей, где необходимо организовать связь с fieldbus-устройствами, гарантирующими быстрый ответ, при низком уровне затрат и с поддержкой необходимых стандартов.

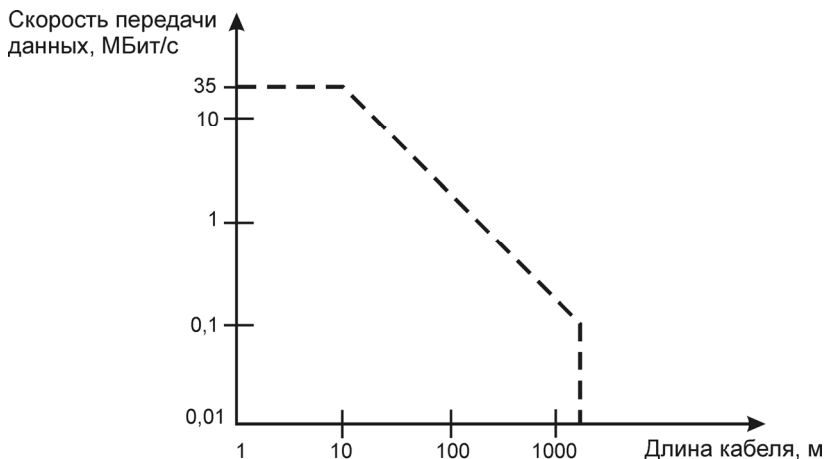


Рис. 5.5. Скорость передачи относительно длины кабеля для RS 485

PROFIBUS – это маркерная fieldbus, в которой все циклы строго регламентированы сценарием пользователя по времени и организована четкая система тайм-аутов. Все это позволяет предотвращать и разрешать разнообразные коллизии в сети.

Применение в PROFIBUS гибридного метода доступа к устройствам по структуре Master/Slave, позволяет построить сеть, содержащую до 122 узлов, из которых 32 могут быть Master-узлами. В области Master-узлов по возрастающим номерам узлов передается маркер, который предоставляет право ведения циклов I/O на шине. На производстве при построении многоуровневых систем автоматизации, как правило, сталкиваются с проблемой организации информационного обмена между уровнями. И в зависимости от сферы производства, области применения fieldbus возникает необходимость в реализации различных функций и свойств промышленной сети. В одном случае необходим обмен сложными объемными сообщениями на средних скоростях, во втором – быстрый обмен короткими сообщениями, или требуется работа в потенциально опасных участках производства. Что, в общем случае, требует применения различных технологий и протоколов.

PROFIBUS есть совокупность трех отдельных протоколов:

PROFIBUS-FMS, PROFIBUS-DP и PROFIBUS-PA, каждый из которых рассчитан на определенные задачи. Отметим, что

PROFIBUS использует 1, 2 и 7 уровни модели OSI. Все три составляющие комплексного протокола используют общий канальный уровень (второй уровень OSI-модели).

Протокол PROFIBUS-DP был спроектирован для организации быстрого канала связи с уровнем датчиков. Принципом работы этого протокола является модель циклического опроса каналов. DP-протокол позволяет организовать конфигурацию mono-master (одно устройство Class 1 Master и до 126 DP-Slave) и конфигурацию, в которой присутствует несколько Class 1 Master и DP-Slave.

Протокол PROFIBUS-FMS появился первым и был предназначен для выполнения задач, где необходима высокая степень функциональности и передача больших объемов информации, и эти условия важнее критерия скорости. FMS-протокол допускает гибридную архитектуру взаимодействия устройств, подразумевающую использование виртуальных устройств сети, объектной организации и управления устройств, логической адресации и т. д.

Протокол PROFIBUS-PA – является расширением DP-протокола в части технологии передачи, основанной не на RS485, а на реализации стандарта IEC1158-2 для организации передачи в опасных средах.

Физической основой технологии PROFIBUS может быть как RS485, так и оптоволоконный кабель, на которых одновременно могут работать устройства PROFIBUS всех трех типов. Однако PA-устройства необходимо подключать через специальные повторители. Рабочая скорость передачи может находиться в диапазоне 9,6–12000 Кбит/с.

5.4. Стандарт MIL-STD-1553

Стандарт последовательной шины MIL-STD-1553 (обозначение военного стандарта США) – это фактически первый в мире стандарт на протокол локальной вычислительной сети. MIL-STD-1553B сегодня – это практически общемировой стандарт, признанный и поддерживаемый производителями аппаратуры и элементной базы многих стран. Одно из типичных применений сетей MIL-STD-1553 – связь датчиков с регистратором событий ("черным ящиком"). Несмотря на свой почтенный возраст, стандарт не утратил актуальности и поныне, он с успехом применяется в бортовой ап-

паратуре (прежде всего, авиационной и космической) и системах гражданского и специального назначения. В нашей стране он получил достаточно широкое распространение и был утвержден как ГОСТ Р 52070–2003 (ГОСТ 26765.52–87).

Основные положения MIL-STD-1553B

Топология сети, предусмотренная стандартом MIL-STD-1553, – это последовательная шина данных (экранированная витая пара), к которой посредством шлейфов подключены устройства (рис. 5.6). Допустимые устройства – контроллер шины (в терминологии ГОСТ Р 52070–2003 – управляющий вычислитель), монитор шины и удаленные терминалы.

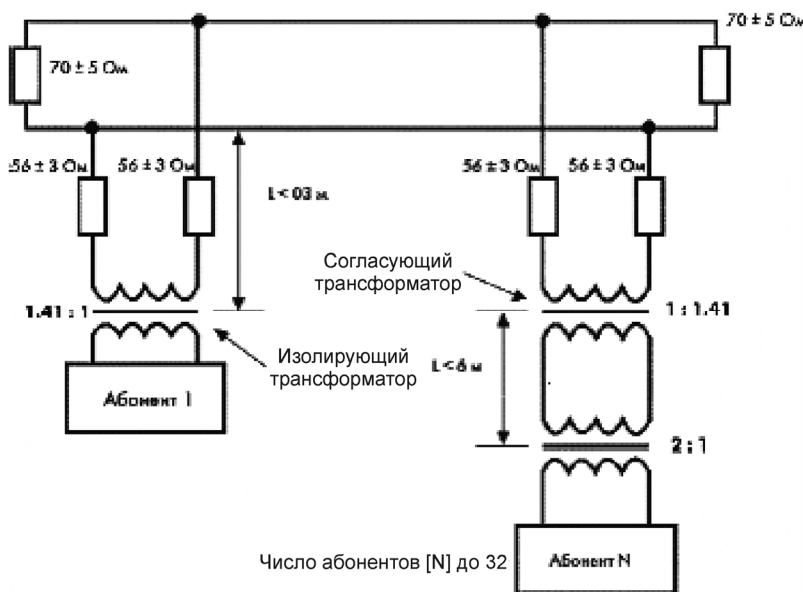


Рис. 5.6. Топология сети MIL-STD-1553

Вся работа в сети проходит исключительно под управлением контроллера шины. Он, и только он, инициирует любой обмен информацией в сети. Контроллер может обращаться к любому из 31 удаленного терминала, каждому из которых присвоен уникальный адрес (5 бит). У контроллера адреса может не быть. Монитор ши-

ны – устройство, также подключенное к шине данных. Но он ведет себя абсолютно пассивно и занимается только отслеживанием и записью передаваемой по шине информации. Монитор сети зачастую совмещают с удаленным терминалом.

Информационный поток кодируется посредством так называемого бифазного кода Манчестер-2, пожалуй, самого простого самосинхронизирующегося линейного кода. Его суть: логическая "1" кодируется импульсом длительностью T с перепадом от положительного (U) до отрицательного ($-U$) напряжения; логический "0" – таким же импульсом, но с перепадом от $-U$ до U (рис.5.7). В результате с заданной частотой, равной $1/T$, напряжение в линии оказывается равным нулю, что и определяет самосинхронизирующие свойства кода. Значение же информационного бита определяется исключительно направлением перехода сигнала через ноль (от плюса к минусу или наоборот) и не зависит от амплитуды сигналов, что существенно снижает требования к линии передачи. Достаточно сказать, что длина шины данных стандартом не нормирована и может достигать сотен метров.

MIL-STD-1553 определяет частоту следования импульсов порядка 1 МГц, соответственно, скорость обмена – 1 Мбит/с. Разумеется, реальная скорость обмена, с учетом накладных расходов на синхронизацию и служебные данные, существенно ниже.

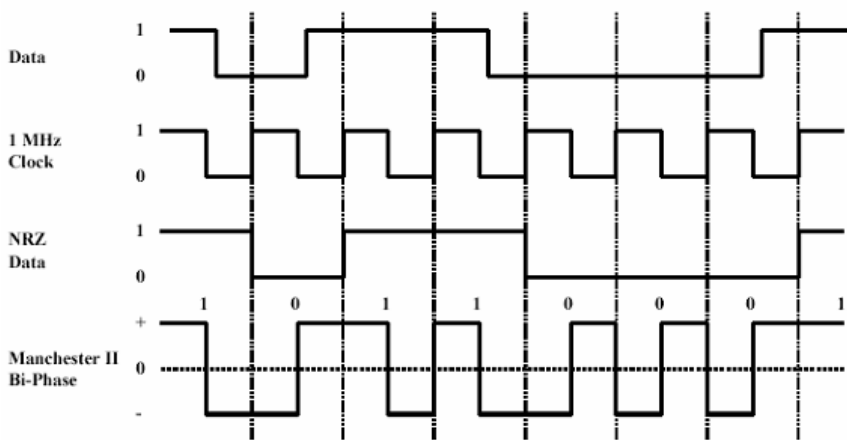


Рис. 5.7. Кодирование данных с помощью Манчестерского кода

Весь информационный обмен в сети происходит посредством слов длиной 20 битовых интервалов. Из них первые три битовых интервала предназначены для синхропоследовательности, последний – для бита контроля четности.

Синхропоследовательность (SYNC) представляет собой импульс длительностью в три битовых интервала с переходом через ноль в середине второго интервала. Направление перехода через ноль определяет тип слова: отрицательный перепад (от U к $-U$) предшествует командному слову или слову статуса, положительный – слову данных (рис.5.8).

Инициатором любой активности, как уже говорилось, выступает только контроллер шины. Он выдает в сеть командные слова (команды), посредством которых принуждает удаленные терминалы к определенным действиям, включая прием и передачу данных. Командное слово после синхропоследовательности содержит пять бит адреса удаленного терминала, которому предназначена команда. Адрес 111112 зарезервирован для широковещательной команды. За адресом размещен бит T/R , предписывающий удаленному терминалу направление предстоящего обмена – прием или передачу данных (если он равен 1, удаленный терминал должен передавать данные).

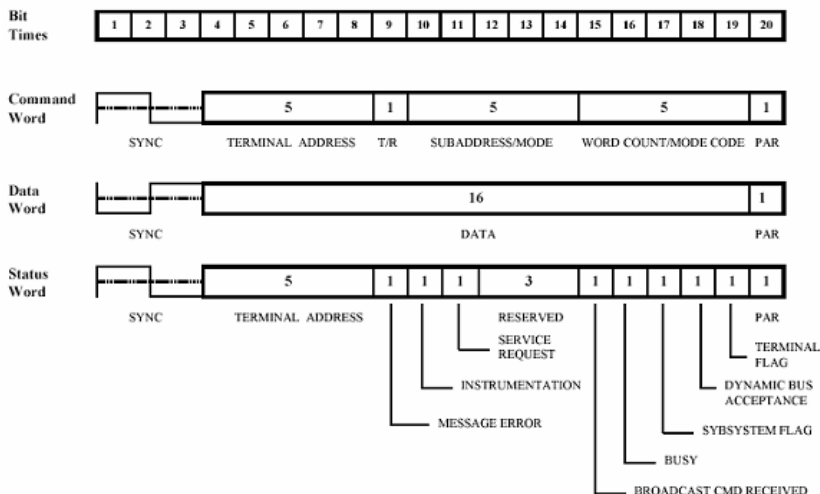


Рис. 5.8. Формат слов MIL 1553

Далее следуют пять бит поля субадреса или признака так называемого кода режима (Mode Code). В последнем случае значения этих полей – 111112 или 000002. Иные коды означают субадрес – обращение к определенным функциям или устройствам подключенной через удаленный терминал системы (например, код 000012 может означать скорость передачи данных, 000102 – тестовую информацию и т.п.).

Последние пять информационных бит командного слова – это счетчик слов/код режима (в зависимости от того, установлен в предыдущем поле признак кода режима или нет). Данные в сети передаются посредством слов данных, в которых для этого отведено 16 бит. Начало передачи слов данных возможно только после командного слова.

Слова статуса – это короткие сообщения, с помощью которых удаленные терминалы информируют контроллер шин об ошибках приема, о своем состоянии и исправности подключенного к ним оборудования, подтверждают прием команды и данных и т.п. Наборы слов (команд данных и статуса) формируют сообщения. В терминологии MIL-STD-1553 сообщения – это устойчивые формы информационного обмена. Всего предусмотрено 10 типов сообщений.

5.5. Беспроводные магистрали

Сеть WAN (Wireless Area Network) – вид вычислительной сети, использующий для связи и передачи данных между узлами и компонентами высокочастотные радиоволны, а не кабельные соединения. Преимущества данной концепции достаточно очевидны – пользователь, находясь в здании, в котором организована WAN, при наличии специального адаптера и ноутбука (или КПК) постоянно находится в сети. Этот фактор особенно полезен, например, в больницах – врачи или медсестры могут не отходя от пациента, загрузить историю его болезни и т. п. Незаменима такая сеть на контейнеровозах, складах, производственных помещениях, где проводные коммуникации могут быть нарушены.

Организация беспроводной сети сводится к установке базовых станций (точек доступа, «хот-спотов») и установке соответствующей

щих адаптеров на ПК, если они ими не оборудованы. Эта особенность выгодно отличается от кабельных систем. В качестве примера можно привести проведение выставки, когда на пустом поле был развернут в течение дня целый компьютерный городок (более 1000 компьютеров, объединенных WAN).

С помощью беспроводных адаптеров можно соединять участки LAN, построенные на кабельной основе. К примеру, два (или несколько) отделения одной компании, находящиеся в разных зданиях.

Существует множество различных спецификаций стандартов беспроводных сетей семейства 802.1х. Все они подразделяются на четыре большие категории – WPAN, WLAN, WMAN, WWAN.

WLAN (Wireless Local Area Network)

Эта категория беспроводной сети предназначена для связи между собой различных устройств, подобно LAN на основе витой пары или оптоволокну, и при этом характеризуется высокой скоростью передачи данных на относительно небольшие расстояния. Взаимодействие устройств описывается семейством стандартов IEEE 802.11, включающим в себя более 20 спецификаций (торговая марка Wi-Fi).

Семейство IEEE 802.11 можно разделить на три класса – 802.11a, 802.11b, 802.11 i/e/.../w.

IEEE 802.11a – один из стандартов беспроводных локальных сетей, описывающий принципы функционирования устройств в частотном диапазоне ISM (полоса частот 5,15–5,825 ГГц) по принципу OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, мультиплексирование с разделением по ортогональным частотам). Полоса подразделяется на три рабочие зоны шириной 100 МГц, и для каждой зоны определена максимальная излучаемая мощность – 50 мВт, 250 мВт, 1 Вт. Предполагается, что последняя зона частот будет использоваться для организации каналов связи между зданиями или наружными объектами, а две другие зоны – внутри них. Редакцией стандарта, утвержденной в 1999 г., определены три обязательных скорости – 6, 12 и 24 Мб/с и пять необязательных – 9, 18, 36, 48 и 54 Мб/с. Однако этот стандарт не принят в России вследствие использования части этого диапазона ведомственными струк-

турами. Возможным решением этой проблемы может стать спецификация 802.11h, которая дополнена алгоритмами эффективного выбора частот для беспроводных сетей, а также средствами управления использованием спектра, контроля над излучаемой мощностью, а также генерации соответствующих отчетов. Радиус действия устройств в закрытых помещениях составляет около 12 метров на скорости 54 Мб/с, и до 90 метров при скорости 6 Мб/с, в открытых помещениях или в зоне прямой видимости – около 30 метров (54 Мб/с), и до 300 метров при 6 Мб/с. Тем не менее, некоторые производители внедряют в свои устройства технологии ускорения, благодаря которым возможен обмен данными в Turbo 802.11a на скоростях до 108 Мб/с.

IEEE 802.11b – первый стандарт, получивший широкое распространение (именно он первоначально носил торговую марку Wi-Fi) и позволивший создавать беспроводные локальные сети в офисах, домах, квартирах. Эта спецификация описывает принципы взаимодействия устройств в диапазоне 2,4 ГГц (2,4–2,4835 ГГц), разделенном на три неперекрывающихся канала по технологии DSSS (Direct-Sequence Spread-Spectrum, широкополосная модуляция с прямым расширением спектра) и, опционально, PBCC (Packet Binary Convolutional Coding, двоичное сверточное кодирование). Согласно этой технологии модуляции, производится генерирование избыточного набора битов на каждый переданный бит полезной информации, благодаря этому осуществляется более высокая вероятность восстановления переданной информации и лучшая помехозащищенность (шумы и помехи идентифицируются как сигнал с неодинаковым набором битов и потому отфильтровываются). Стандартом определены четыре обязательные скорости – 1, 2, 5,5 и 11 Мб/с. Что же касается возможного радиуса взаимодействия устройств, то он составляет в закрытых помещениях около 30 метров на скорости 11 Мб/с, и до 90 метров при скорости 1 Мб/с, в открытых помещениях или в зоне прямой видимости – около 120 метров (11 Мб/с), и до 460 метров при 1 Мб/с. В условиях постоянно увеличивающихся потоков данных эта спецификация практически исчерпала себя, и на смену ей пришел стандарт IEEE 802.11g.

IEEE 802.11g – стандарт беспроводной сети, явившийся логическим развитием 802.11b, в том смысле, что использует тот же час-

тотный диапазон и предполагает обратную совместимость с устройствами, отвечающими стандарту 802.11b (другими словами, обязательна совместимость 802.11g-оборудования с более старой спецификацией 802.11b). Одновременно с этим, этот представитель семейства спецификаций, как и полагается, попытался взять все лучшее от «пионеров» – 802.11b и 802.11a. Итак, основной принцип модуляции позаимствован у 802.11a – OFDM совместно с технологией ССК (Complementary Code Keying, кодирование комлементарным кодом), а дополнительно предусмотрено использование технологии РВСС. Благодаря этому, в стандарте предусмотрены шесть обязательных скоростей – 1, 2, 5,5, 6, 11, 12, 24 Мб/с, и четыре опциональных – 33, 36, 48 и 54 Мб/с. Радиус зоны действия увеличен в закрытых помещениях до 30 метров (54 Мб/с), и до 91 метра при скорости 1 Мб/с, в пределах же прямой видимости связь доступна на расстоянии 120 метров со скоростью 54 Мб/с, а при удалении на 460 метров возможна работа со скоростью 1 Мб/с.

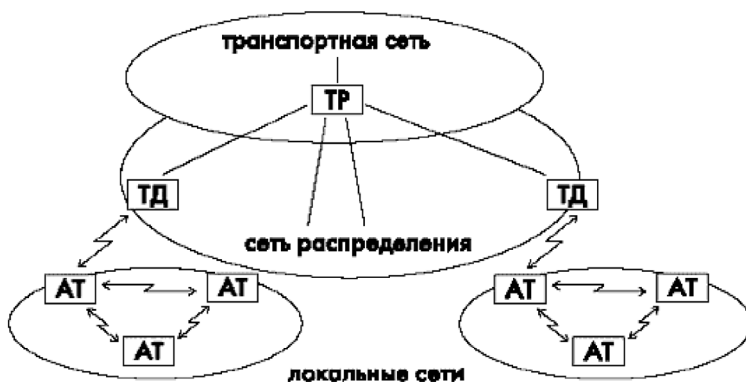


Рис. 5.9. Классификация сетей передачи данных

Выделенный в отдельный класс набор спецификаций 802.11 i/e/.../w, главным образом, предназначен для описания функционирования различных служебных компонент и разработки новых технологий и стандартов беспроводной связи. К примеру, работы бес-

проводных мостов, требований к физическим параметрам каналов (мощность излучения, диапазоны частот), спецификаций, ориентированных на различные категории пользователей и т.д. В плане надстроек и новых стандартов организации беспроводных сетей из этой группы мы уже рассмотрели 802.11.h. В качестве еще одного примера обратим внимание на 802.11n. Согласно сообщению международного консорциума EWC (Enhanced Wireless Consortium), 802.11n –высокоскоростной стандарт, в котором предусмотрена обратная совместимость с 802.11a/b/g, а скорость передачи данных будет достигать 600 Мб/с. Это позволит использовать его в задачах, где использование Wi-Fi ограничивалось недостаточной скоростью.

Сказанное выше иллюстрируется рис. 5.9.

Глава 6. АРХИТЕКТУРА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

(Использованы материалы из [52-61])

Выбор адекватной решаемым задачам архитектуры системы автоматизации является весьма актуальной проблемой. Ошибочные решения, принятые на этом этапе проектирования систем автоматизации, могут стать причиной провала всего проекта. Актуальность этой проблемы существенно возрастает, когда речь идет об автоматизации крупных промышленных объектов.

6.1. Конфигурация системы

Для решения крупной и сложной задачи ее, как правило, разбивают на совокупность более мелких и простых задач. Сложный объект автоматизации представляется совокупностью технологических подсистем, которые, в свою очередь, состоят из более мелких технологических функциональных узлов, а те из совокупности агрегатов и т.д. Определение количества уровней и их границ является несколько условным. Тем не менее можно сослаться на сложившуюся практику классификации объектов с точки зрения технологии и опыт разделения реальных объектов на технологические уровни. Выделяют пять основных технологических уровней:

- уровень предприятия (например, ускоритель или электростанция);
- уровень технологического объекта (криогенный комплекс для получения сверхтекучего гелия или энергоблока);
- уровень технологических подсистем (ожижитель, котел, турбина и т.д.);
- уровень технологических функциональных узлов (турботетандер, насосы и т.д.);
- уровень технологического оборудования внутри функционального узла (задвижки, механизмы, датчики и т.д.)

Например, на криогенном комплексе с помощью сотни интеллектуальных контроллеров измеряется около 1000 параметров и осуществляется управление сотней исполнительных механизмов. Уровень функциональных узлов наиболее адекватен уровню контроллеров в системе управления. Разбиение объекта на функциональные узлы основано на выделении отдельной технологической

задачи, либо нескольких тесно связанных задач в единый узел. Следствием этого является то, что каждый функциональный узел достаточно автономен. Интенсивность его взаимодействия с остальной системой или другими узлами на порядки ниже, чем внутри его.

Поэтому структура микропроцессорной системы управления, образованная связанными сетью автономными контроллерами, каждый из которых обслуживает свой функциональный узел, будет наиболее адекватной функционально-технологической структуре объекта и иметь минимальную интенсивность взаимосвязей между образующими ее элементами.

Крайне важна также надежность системы управления. Для крупных объектов автоматизации традиционные меры по повышению надежности, связанные с применением качественных технических средств с большим временем наработки на отказ (более 100 тыс. часов), являются недостаточными. Характеристика времени наработки на отказ является статистической вероятностной величиной, поэтому при разработке архитектурных решений, повышающих надежность системы, необходимо исходить из того, что такой отказ всегда возможен.

Основные принципы, продиктованные самой задачей автоматизации крупных объектов, из которых целесообразно исходить при проектировании архитектуры системы следующие:

- никакой единичный отказ в системе не должен приводить к потере ее функциональности;
- никакой единичный отказ не должен приводить к потере объема техпроцессов, при котором невозможно функционирование объекта.

Также существуют общие принципы, вытекающие из методов повышения надежности любых систем:

- система должна состоять из минимального числа образующих ее элементов;
- элементы и решения должны быть ортогональны, т.е. необходимый набор функций должен обеспечиваться суперпозицией минимального набора базовых элементов;
- автономность иерархических уровней в системе;
- минимальные размеры и простота прикладных программ – увеличение размеров программ ведет к экспоненциальному росту

числа ошибок и сложности проверки правильности ее функционирования;

– быстрое восстановление функций.

Для крупных объектов автоматизации предъявляются жесткие требования по времени восстановления функции. Вышедшая из строя функция должна быть восстановлена без влияния на остальную функционирующую часть системы, т.е. восстановление должно осуществляться в режиме "горячей" замены за минимальное время.

Существенны также требования к устойчивости функционирования. Речь идет, прежде всего, об отсутствии корреляций между функциями при их реализации в микропроцессорных средствах автоматизации. Любая модификация части программ не должна вносить возмущения в остальные действующие программы, в которых не производятся модификации, т.е. модификация одних не должна менять временные характеристики выполнения других программ, логики их функционирования, приоритетность выполнения и т.д. В противном случае, наладка функционирования крупного объекта может превратиться в неразрешимую задачу.

Таким образом, архитектурой системы управления, адекватной сложному объекту автоматизации, оказывается архитектура, в которой на локальный контроллер возлагается максимум задач, определяемых составом технологического оборудования и технологическим процессом. Это, в частности, означает, что в одном контроллере целесообразно совмещать функции измерения и управления процессом. Для такого проектирования системы требуется очень хорошо прописанное техническое задание. К сожалению, в экспериментальных установках заказчик не всегда видит конечную конфигурацию объекта. В этой ситуации разработчику СУ приходится подбирать микропроцессорные средства «на вырост» с учетом, что технологи «дозреют» в ходе запуска и освоения объекта. Тогда станут ясны алгоритмы управления, и дистанционное управление с клавиатуры можно будет заменить на автоматическое, если мощность и интерфейс контроллера были разработаны с запасом.

6.2. Операционные системы управляющей ЭВМ

Одно из первых решений, которое принимает разработчик системы управления – это выбор операционной системы управляющей ЭВМ. Это либо ОС общего назначения, особенно многопользовательские, такие как UNIX, Windows, либо ОС реального времени (ОСРВ).

ОС общего назначения ориентированы на оптимальное распределение ресурсов компьютера между пользователями и задачами (системы разделения времени). В ОСРВ подобная задача отходит на второй план, все отступает перед главной задачей – успеть среагировать на события, происходящие на объекте. Пример – работа компьютерной сети. Если система не успела обработать очередной принятый пакет, это приведет к тайм-ауту на передающей стороне и повторной посылке (в зависимости от протокола, конечно). Данные при этом не теряются, но производительность сети снижается.

Операционные системы реального времени (ОСРВ) предназначены для обеспечения интерфейса к ресурсам критических по времени систем реального времени. Основной задачей в таких системах является своевременность выполнения обработки данных.

В качестве основного требования к ОСРВ выдвигается требование обеспечения **предсказуемости** или **детерминированности** поведения системы в наихудших внешних условиях, что резко отличается от требований к производительности и быстродействию универсальных ОС. Хорошая ОСРВ имеет предсказуемое поведение при всех сценариях системной загрузки (одновременные прерывания и выполнение потоков).

Применение операционной системы реального времени всегда связано с аппаратурой, с объектом, с событиями, происходящими на объекте. Система реального времени как аппаратно-программный комплекс включает в себя датчики, регистрирующие события на объекте, модули ввода-вывода, преобразующие показания датчиков в цифровой вид, пригодный для обработки этих показаний на компьютере, и, наконец, компьютер с программой, реагирующей на события, происходящие на объекте. ОСРВ ориентирована на обработку внешних событий. Именно это приводит к коренным отличиям (по сравнению с ОС общего назначения) в структуре системы, в функциях ядра, в построении системы ввода-вывода. ОСРВ может

быть похожа по пользовательскому интерфейсу на ОС общего назначения (к этому, кстати, стремятся почти все производители ОС реального времени).

Применение ОСРВ всегда конкретно. Если ОС общего назначения обычно воспринимается пользователями (не разработчиками) как уже готовый набор приложений, то ОСРВ служит только инструментом для создания конкретного аппаратно-программного комплекса реального времени. И поэтому наиболее широкий класс пользователей ОСРВ – разработчики комплексов реального времени, люди, проектирующие системы управления и сбора данных. Проектируя и разрабатывая конкретную систему реального времени, программист всегда знает точно, какие события могут произойти на объекте, знает критические сроки обслуживания каждого из этих событий. В процессе создания, например, встраиваемых приложений разработчикам приходится применять различные программные средства типа компиляторов и отладчиков, причем, как правило, из-за недостатка памяти выполнение этого ПО на целевой платформе оказывается невозможным. Разработка встраиваемых приложений предполагает использование компилятора, ассемблера и компоновщика в инструментальной системе с последующей их загрузкой в целевой компьютер для исполнения. Инструментальная и целевая платформы могут иметь процессоры разных типов. В таких случаях рассчитанные только на инструментальную систему компилятор и ассемблер на роли кросс-компилятора/кросс-ассемблера не подходят: необходимо создание собственного либо приобретение существующего кросс-компилятора, который смог бы работать в инструментальной системе и создавать машинные коды для целевой системы.

Существует различие между системами реального времени и встроенными системами. От встроенной системы не всегда требуется, чтобы она имела предсказуемое поведение, и в таком случае она не является системой реального времени. Однако даже беглый взгляд на возможные встроенные системы позволяет утверждать, что большинство встроенных систем нуждается в предсказуемом поведении, по крайней мере, для некоторой функциональности, и таким образом, эти системы можно отнести к системам реального времени.

Принято различать системы мягкого и жесткого реального времени. В системах жесткого реального времени неспособность обеспечить реакцию на какие-либо события в заданное время ведет к отказам и невозможности выполнения поставленной задачи. В большинстве русскоязычной литературы такие системы называют системами с детерминированным временем. При практическом применении время реакции должно быть минимальным. Системами мягкого реального времени называются системы, не попадающие под определение "жесткие", так как в литературе четкого определения для них пока нет. Системы мягкого реального времени могут не успевать решать задачу, но это не приводит к отказу системы в целом. В системах реального времени необходимо введение некоторого директивного срока (в англоязычной литературе – deadline), до истечения которого задача должна обязательно (для систем мягкого реального времени – желательно) выполняться. Этот директивный срок используется планировщиком задач как для назначения приоритета задачи при ее запуске, так и при выборе задачи на выполнение. Итак, можно сформулировать следующие необходимые требования для ОСРВ:

- ОС должна быть многозадачной и допускающей вытеснение (preemptable);
- ОС должна обладать понятием приоритета для потоков;
- ОС должна поддерживать предсказуемые механизмы синхронизации;
- ОС должна обеспечивать механизм наследования приоритетов;
- поведение ОС должно быть известным и предсказуемым (задержки обработки прерываний, задержки переключения задач, задержки драйверов и т.д.); это значит, что во всех сценариях рабочей нагрузки системы должно быть определено максимальное время отклика.

Среди коммерческих систем реального времени можно выделить группу ведущих систем по объемам продаж и по популярности. Это системы: VxWorks, OS9, pSOS, LynxOS, QNX, VRTX.

Как и в случае ОС для настольных компьютеров и серверов, при выборе встраиваемых операционных систем нередко решающую роль играют не предоставляемые ими функциональные возможности, а наличие готовых программных средств. Многие держат на

своих персональных компьютерах операционные системы Windows лишь потому, что необходимые этим людям текстовые процессоры и электронные таблицы созданы именно для Windows. Действительно, помимо ОС проектировщикам встроенных систем требуются и другое ПО: стеки протоколов, связующее программное обеспечение, драйверы нестандартных устройств, а иногда и готовые прикладные программы. Наличие для встраиваемой операционной системы подобного ПО устраняет проблему переноса программных средств на другую платформу и может стать решающим аргументом при выборе той или иной ОС.

Пакеты инструментальных средств компании Microsoft состоят, как правило, из компонентов с недоступными исходными текстами и отличаются огромным числом всевозможных параметров, предназначенных для настройки кодов исполняемых модулей операционных систем.

Microsoft делает OCPB. Тем не менее, Windows NT имеет ряд ограничений. Такие ее особенности, как предпочтение аппаратного прерывания программному (даже если это простое движение мыши), выполнение в подпрограмме обработки аппаратных прерываний лишь необходимых действий с выполнением последующей обработки через очередь отложенных процедур, отсутствие приоритетной обработки процессов в очереди отложенных процедур, не позволяют отнести Windows NT к категории классических ОС реального времени.

Необходимость ускорения выпуска новой продукции на рынок и снижения общей стоимости систем подвигает многих разработчиков СУ, особенно встраиваемых приложений на применение ОС Linux и других программных средств с открытыми исходными кодами. Подобное решение обусловлено тем, что, используя открытое программное обеспечение, разработчики получают возможность сконцентрировать усилия на совершенствовании своей продукции.

6.3. Прикладное программное обеспечение системы

6.3.1. SCADA

Обычно системный интегратор или конечный пользователь, приступая к разработке прикладного программного обеспечения (ППО) для создания системы управления, выбирает один из следующих путей:

- программирование с использованием "традиционных" средств (традиционные языки программирования, стандартные средства отладки и пр.);

- использование существующих, готовых (COTS – Commercial Off The Shelf) инструментальных проблемно-ориентированных средств.

Безусловно, нет ничего лучше качественного, хорошо отлаженного ППО, написанного высококвалифицированным программистом специально для некоторого проекта. Но следующую задачу этот программист вынужден решать опять практически с нуля. Процесс создания ППО для сложных распределенных систем становится недопустимо длительным, а затраты на его разработку очень высокими. Сегодня, в условиях всё более возрастающей доли ППО в затратах на создание конечной системы и, соответственно, всё большей интенсификации труда программистов, вариант с непосредственным программированием относительно привлекателен лишь для простых систем или небольших фрагментов большой системы, для которых нет стандартных решений (не написан, например, подходящий драйвер) или они не устраивают по тем или иным причинам в принципе. В любом случае процесс разработки собственного ППО важно упростить, сократить временные и прямые финансовые затраты на разработку ППО, минимизировать затраты труда высококлассных программистов, по возможности привлекая к разработке специалистов в области автоматизируемых процессов.

ПО становится всё более сложным и дорогостоящим. Разработчики операционных систем, разработчики инструментальных средств, разработчики прикладного ПО и т.п., по существу, говорят на разных языках. Таким образом, сама логика развития и разработки ППО для конечных систем управления требует использова-

ния всё более развитых инструментальных средств типа Системы диспетчерского управления и сбора данных или SCADA-систем (Supervisory Control And Data Acquisition). SCADA-системы представляют собой интегрированные программно-аппаратные комплексы промышленных систем управления и используются с середины 70-х годов. В Северной Америке принято считать, что системы SCADA являются географически распределенными на больших площадях (сотни и тысячи квадратных километров), в таких применениях как энергетические сети, нефте- и газопроводы, водоснабжение, железнодорожный транспорт. Связь центрального пульта (control center) такой системы с распределенными зонами (field sites) осуществляется с помощью средств дальней связи (модемы, радио- и спутниковая связь, глобальные сети (Wide Area Networks, WAN)). Пример такой системы показан на рис. 6.1. В то же время в Европе принято считать, что SCADA выполняет функции диспетчерского управления и сбора данных независимо от размеров и площади обслуживаемой зоны.

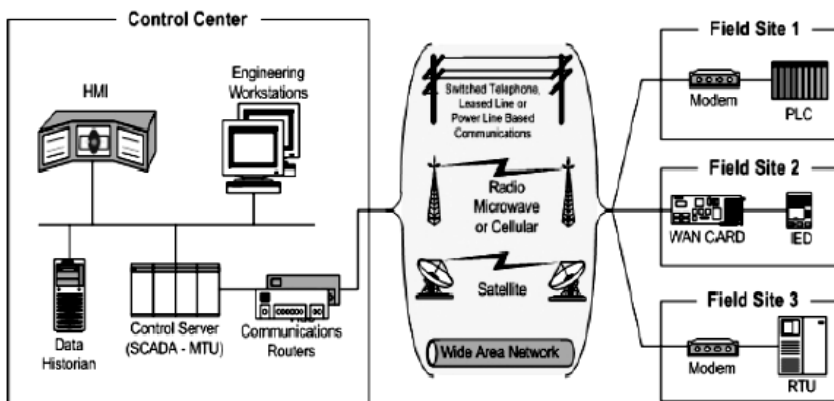


Рис. 6.1. Распределенная система SCADA

Разработка современной SCADA-системы требует больших вложений и выполняется в длительные сроки. И именно поэтому в большинстве случаев разработчикам управляющего ППО, в частности ППО для АСУ ТП, представляется целесообразным идти по второму пути, приобретая, осваивая и адаптируя какой-либо готовый, уже испытанный универсальный инструментарий.

Вопрос выбора SCADA-системы. В табл. 6.1 перечислены только некоторые из популярных на западном и российском рынках SCADA-систем, имеющих некоторую поддержку в России.

Таблица 6.1.

SCADA-система	Фирма-изготовитель	Страна
Factory-Link	United-States-DATA-Co.	США
InTouch	Wonderware	США
Genesis	Iconics	США
RealFlex	BJ-Software-Systems	США
SiteX	Jade-Software	Англия
FIX	Intellution	США
Trace-Mode	AdAstra	Россия
IGSS	Seven-Technologies	Дания
Image	Технолинк	Россия
RSView	Rockwell-Software-Inc.	США

SCADA-системы закрывают цеховой уровень автоматизации, связанный, прежде всего, с получением и визуализацией информации от программируемых контроллеров, распределенных систем управления. Поставляемая на данный уровень информация недоступна на уровне управления производством. Поэтому некоторые фирмы разрабатывают системы управления производством и обеспечивают обмен между этими уровнями.

Перечислим основные возможности и средства, присущие всем системам и различающиеся только техническими особенностями реализации:

- автоматизированная разработка, дающая возможность создания программного обеспечения (ПО) системы автоматизации без реального программирования;
- средства сбора первичной информации от устройств нижнего уровня;
- средства управления и регистрации сигналов об аварийных ситуациях;

- средства хранения информации с возможностью ее пост-обработки (как правило, реализуется через интерфейсы к наиболее популярным базам данных);
- средства обработки первичной информации;
- средства визуализации представления информации в виде графиков, гистограмм и т.п.;
- возможность работы прикладной системы с наборами параметров, рассматриваемых как единое целое.

Основу большинства SCADA-пакетов составляют несколько программных компонентов (база данных реального времени, ввода-вывода, предыстории, аварийных ситуаций) и администраторов (доступа, управления, сообщений).

Следует отметить, что технология проектирования систем автоматизации на основе различных SCADA-систем во многом схожа и включает следующие этапы:

- разработка архитектуры системы автоматизации в целом. На этом этапе определяется функциональное назначение каждого узла системы автоматизации.
- решение вопросов, связанных с возможной поддержкой распределенной архитектуры, необходимостью введения узлов с горячим резервированием и т.п.
- создание прикладной системы управления для каждого узла. На этом этапе специалист в области автоматизируемых процессов наполняет узлы архитектуры алгоритмами, совокупность которых позволяет решать задачи автоматизации;
- приведение параметров прикладной системы в соответствие с информацией, которой обмениваются устройства нижнего уровня (например, программируемые логические контроллеры) с внешним миром (датчики температуры, давления и др.).
- отладка созданной прикладной программы в режиме эмуляции и в реальном режиме.

Программно-аппаратные платформы, на которых реализована SCADA-система. Анализ перечня таких платформ необходим, поскольку от него зависит ответ на вопросы распространения SCADA-системы на имеющиеся вычислительные средства, а также оценка стоимости эксплуатации системы (прикладная программа, разработанная в одной операционной среде, может выполняться в

любой другой, которую поддерживает выбранный SCADA-пакет). В различных SCADA-системах этот вопрос решен по разному.

Подавляющее большинство SCADA-систем реализовано на платформах MS Windows. Именно такие системы предлагают наиболее полные и легко наращиваемые человеко-машинные интерфейсы (Man Machine Interface MMI) средства.

Структура типовой современной системы SCADA показана на рис. 6.2 и включает в себя три основных составляющих:

- **Клиент SCADA (SCADA Client);**
- **Сервер SCADA (SCADA Server);**
- **Среда разработки SCADA (SCADA Development Environment).**

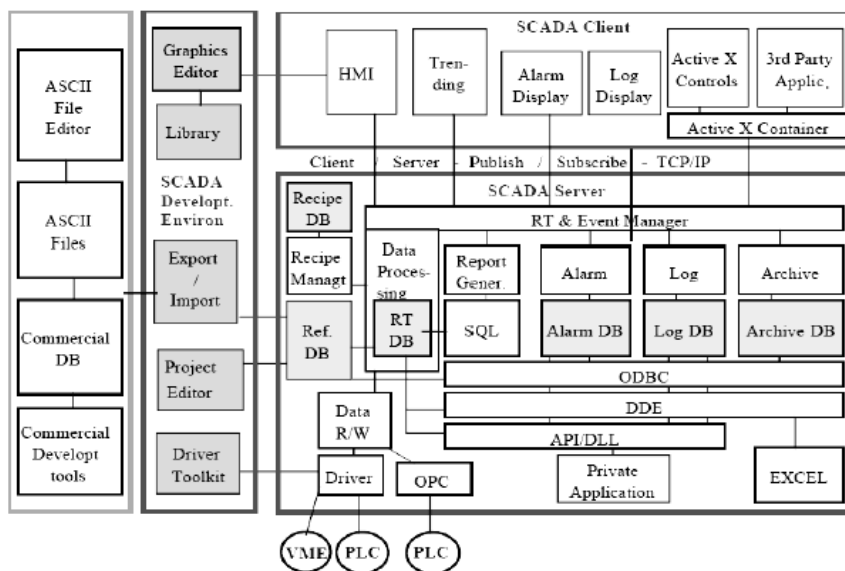


Рис.6.2. Структура типовой системы SCADA

На уровне клиента – потребителя данных – SCADA обеспечивает:

- операторский интерфейс (Human-Machine Interface, HMI) с множественными окнами-экранами для представления данных в удобной форме;

– возможности трендинга (trending), т.е. графического представления изменений параметра в реальном времени и историческом развитии;

– отображение предупреждений и тревожных сигналов;

– записи данных (data logging) и периодические отчеты (reports).

В состав клиентской части SCADA входят также объекты ActiveX, в основе которых лежит модель составных объектов Microsoft COM (Component Object Model). Технология COM определяет общую схему взаимодействия компонентов программного обеспечения в среде Windows и предоставляет стандартную инфраструктуру, позволяющую объектам обмениваться данными и функциями между прикладными программами. Большинство систем SCADA являются контейнерами (ActiveX Container), которые уведомляются ActiveX о происшедших событиях. Любые ActiveX объекты могут загружаться в систему разработки большинства систем SCADA и использоваться при создании прикладных программ. Управление объектами ActiveX осуществляется с помощью данных, методов и событийных функций, свойственных выбранному объекту. Имеющиеся в web-браузерах объекты ActiveX позволяют передавать данные из систем SCADA непосредственно на web-страницы.

На уровне сервера SCADA центральным элементом является база данных реального времени (RT DB). Механизмы записи (logging), предупреждений (alarms), архивации (archive) свои собственные базы данных, доступ к которым обеспечивается с помощью открытого стандарта ODBC (Open DataBase Connectivity). Практически все системы SCADA используют синтаксис ANSI SQL, который не зависит от типа базы данных. Таким образом, приложения виртуально изолированы, что позволяет менять базу данных без серьезного изменения самой прикладной задачи, создавать независимые программы для анализа информации, использовать уже наработанное программное обеспечение, ориентированное на обработку данных. Связь с внешними приложениями осуществляется с помощью механизмов динамического обмена данными (Dynamic Data Exchange, DDE) и динамических библиотек связи (Dynamic Link Library, DLL). Для связи с внешними устройствами широко используется метод встраивания и связывания объектов для управления процессами (Object Linking and Embedding

for Process Control, OPC). OPC является набором стандартов связи промышленного оборудования с управляющими и офисными приложениями Microsoft, упрощающим интеграцию приборов и программного обеспечения. Многие производители аппаратуры (такие как Wiener и CAEN, приборы которых широко используются в физических экспериментах) поставляют сервер OPC. Типичная система SCADA предоставляет возможность работы прикладной системы с наборами параметров, рассматриваемых как единое целое (recipe, или установки). Доступом ко всем компонентам управляет менеджер событий и реального времени (RT & Event Manager).

Взаимодействие клиента и сервера типично основано на модели издатель/подписчик (publisher/subscriber), когда прикладная программа (клиент) “подписывается” на определенный параметр (тип данных), принадлежащий конкретному серверу. В модели, ориентированной на события (event driven model), только изменения этого параметра инициируют передачу от сервера к клиенту. Для обмена используется широко распространенные протоколы TCP/IP, а также специализированные, такие как IEC 60870-5-101 и DNP3 (Distributed Network Protocol version 3).

Среда разработки SCADA включает в себя:

- один или несколько графических редакторов с библиотеками символов;
- средства конфигурации базы данных;
- возможности экспортировать и импортировать ASCII-файлы и редактировать их;
- скриптовый язык;
- прикладной программный интерфейс (Application Program Interface, API) с поддержкой языков C/C++ и Visual Basic;
- специализированные визуальные и процедурные языки для программирования алгоритмов управления (распространенными являются языки программирования PLC стандарта IEC 61131-3, такие как **SFC** (Sequential Function Chart), **LD** (Ladder Diagram), **FBD** (Function Block Diagram), **ST** (Structured Text), **IL** (Instruction List)) со средствами отладки). Эти средства позволяют создавать программное обеспечение проекта как профессиональным программистам, так и менее квалифицированным операторам с помощью простых и интуитивных средств без реального программирования.

6.3.2. EPICS

Система Управления для Промышленности и Экспериментальной Физики (Experimental Physics and Industrial Control System, EPICS) представляет собой архитектуру и набор средств (toolkit) и приложений (applications) для построения распределенных систем управления (СУ) различной конфигурации и назначения.

Разработанная в 1989 году в Лос-Аламосской (LANL) и Аргоннской (ANL) Национальных Лабораториях (США) система EPICS в настоящее время является совместным проектом нескольких американских и европейских исследовательских лабораторий (LANL, ANL, SLAC, DESY, KEK и др.) и ряда независимых компаний. Для пользователей система (исходный код, драйверы, приложения) доступна бесплатно на основе открытой лицензии (EPICS Open License).

EPICS реализует полностью распределенную модель взаимодействия “клиент–сервер”. Структура EPICS включает в себя три физических и пять программных уровней. На рис. 6.3 показаны физические уровни: нижний уровень контроллеров оборудования (процессоры VME, VXI, PCI, ISA); верхний уровень рабочих станций, и объединяющий их средний сетевой уровень (с физической реализацией Ethernet, FDDI, T1, ATM и протоколами TCP/IP).

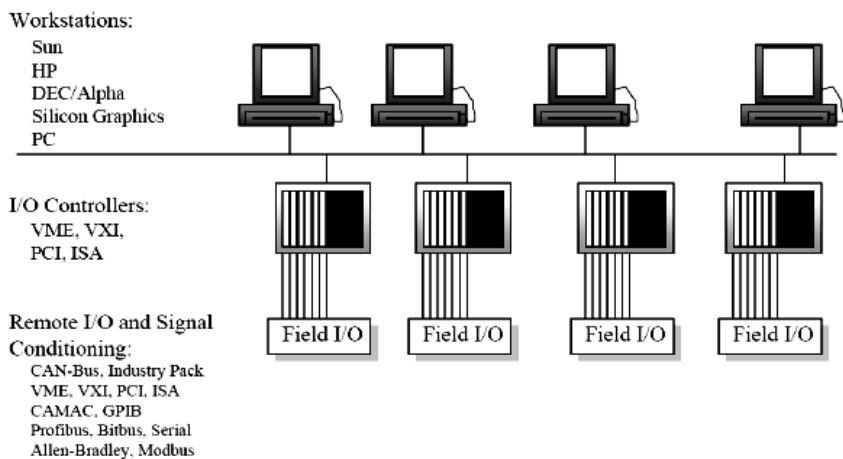


Рис. 6.3. Физические уровни системы EPICS

На рис. 6.4 показаны программные уровни, которые включает в себя, начиная с верхнего:

- **уровень клиента (Client Software)**, с графическим интерфейсом пользователя MEDM (Motif Editor and Display Manager), средствами сбора и анализа данных OAG (Operations Analysis Group), обработки сигналов предупреждений и аварии ALH (Alarm handler), конфигурирования базы данных TCL/TK, Perl Scripts и др;
- **канальный доступ (Channel Access, CA)**, являющийся интерфейсом между клиентом и сервером и скрывающим от пользователя детали их взаимодействия и представления данных;
- **уровень сервера** (сервер представляет собой приложение, выполняемое каждым процессором нижнего уровня и обеспечивающим канальный доступ CA к оборудованию);
- **база данных (Database)**;
- **драйверы приборов (Device Drivers)**.

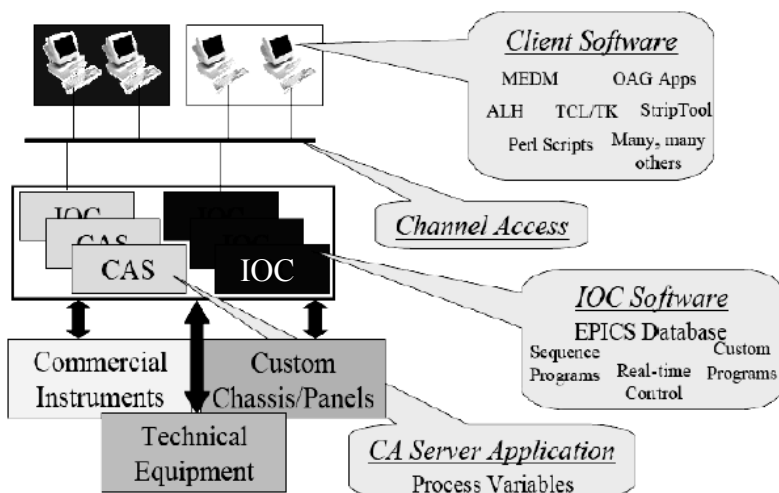


Рис.6.4. Структура программных уровней системы EPICS

Клиенты являются программами, запрашивающими Переменные Процесса (Process Variable, PV), которые им предоставляет сервер с помощью протокола CA. Один клиент может соединяться со многими серверами, и один сервер может обслуживать многих клиентов.

Клиенты могут читать, записывать и мониторить данные PV. PV является набором данных с именем, и представляет собой один из параметров контролируемого процесса. Весь набор переменных составляет распределенную базу данных реального времени для процесса или установки. Для доступа к определенному параметру пользователю (клиенту) необходимо знать только имя PV.

Доступ к оборудованию осуществляет контроллер ввода/вывода (Input/Output Controller, IOC) с помощью программы IOC Core. Таким контроллером может быть PC с операционными системами (OC) Windows или Linux, одноплатный компьютер VME с OC VxWorks, или рабочая станция с OC Solaris.

Приборы подсоединяются к IOC с помощью стандартных интерфейсов (GPIB, полевые магистрали). Сами контроллеры IOC являются как СА-клиентами, так и СА-серверами. В качестве сетевого интерфейса используются протоколы TCP/IP и UDP и любая среда передачи Ethernet.

Основным компонентом IOC Core является загружаемая при инициализации реляционная база данных, с помощью которой и осуществляется сбор, обработка и распределение данных. База данных состоит из объектов, называемых “записи” (records), которые обладают уникальными именами, свойствами (fields), содержащими данные, и способностью совершать определенные действия с этими данными. Имя переменной процесса (PV) состоит из имени записи (record) и имени поля (field), принадлежащего этой записи (рис.6.5). Записи являются активными элементами (когда обрабатываются) и могут выполнять ряд действий:

- читать данные из других записей (records) или из приборов;
- записывать данные в другие записи (records) или в приборы;
- выполнять вычисления;
- проверять, находится ли величина в разрешенных пределах, и выдавать предупреждения (alarms);

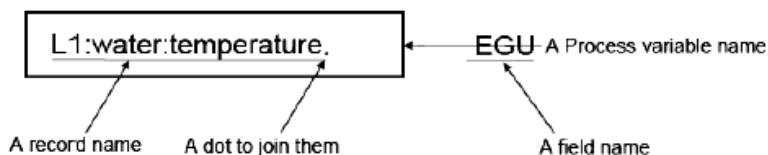


Рис. 6.5. Структура записи (record) EPICS

- разрешать или запрещать другие записи (records);
- ожидать сигналов (прерываний) от аппаратуры.

Действия записей зависят от их типа и величин их полей. Существует четыре основных типа записей: **Ввода (Input:** Analog In AI, Binary In BI, String In SI), **Алгоритмические/Управления (Algorithm/Control:** Calculation CALC, Sunroutine SUB), **Вывода (Output:** Analog Out OU, Binary Out BU), и **Заказные (Custom:** Beam Position Monitor, Multi Channel Analyzer). Общее количество записей составляет около 50.

Обработка записей может быть периодической или инициируемой событиями (event driven). Максимальная частота периодической обработки ограничивается возможностями ОС и аппаратуры. В качестве внешних событий могут выступать прерывания аппаратуры, запросы от других записей, события EPICS (EPICS events), и записи CA. Генератор последовательностей (Sequencer) выполняет программы, написанные на близком к “С” языке программирования State Notation Language (SNL). SNL обеспечивает программирование конечных автоматов (finite state machines, FSM), а Sequencer обеспечивает их исполнение в реальном времени на таких стадиях, как автоматическая инициализация, восстановление после ошибки или возврат в безопасное состояние, или автоматическая калибровка оборудования.

Исходный код системы EPICS написан на языках С и С++. Поддерживаются следующие аппаратные средства:

- процессоры PC (Windows, Linux, RTEMS), Apple (OSX), Unix workstations (Solaris), VME Motorola 680xx и Power PC (VxWorks) в качестве ИОС контроллеров;
- полевые магистрали CAN, Bitbus, MODBUS, Profibus;
- магистрально-модульная система KAMAK;
- приборные интерфейсы Allen Bradley и GPIB (IEEE-488).

Большинство операций EPICS могут запускаться из графического интерфейса пользователя (такого как MEDM или EDM (Editor/Display Manager)). Однако существует ряд расширений, таких широко применяемых программных пакетов как LabView, MATLAB, Java, Perl, ActiveX, позволяющих им взаимодействовать с канальным интерфейсом CA и получать доступ к приборам в системе EPICS.

Хотя EPICS является бесплатным продуктом для конечного пользователя, контроллеры IOC в течение многих лет использовали ядро реального времени VxWorks (разработка компании Wind Rivers), требующее лицензии. И только в последние годы для IOC было адаптировано “открытое” ядро реального времени RTEMS, не требующее лицензии.

Инструментарий программных средств доступа к оборудованию, который используется в реальном времени для контроля и мониторингирования процессов в контроллерах ввода/вывода (IOC), составляют:

- **SCPI-Tools** – инструментарий для генерации различных компонент процессных баз данных по ASCII -файлам меню и типов рекордов;

- **DM** (Manager дисплеев) – читает один или более дисплейных файлов, созданных для редактора дисплеев, устанавливает связь со всеми необходимыми IOC, устанавливает мониторы для переменных процессов, принимает запросы от оператора и обновляет дисплей;

- **ALH** (Alarm Handler) – управление алармами;

- **AR** (архиватор) программное обеспечение для сбора и хранения данных с IOC;

- **BURT** (backup and restore) – инструментарий для создания резервной копии и восстановления состояния каналов средств доступа к оборудованию. Может работать под управлением команд UNIX или графического интерфейса пользователя;

- **PROBE** – позволяет пользователю мониторить и/или изменять переменную какого-нибудь процесса, который специфицируется во время выполнения и т.д.

Инструментальные средства системы EPICS также включают в себя графические приложения, необходимые для обеспечения взаимодействия пользователя с системой. К таковым относятся MEDM и его более поздняя версия DM2K (графические построители интерфейсов, так называемых дисплеев). Эти приложения управляют исполнением дисплеев в реальном времени.

Другим мощным средством является программа StripTool, позволяющая отслеживать группы произвольно выбранных сигналов с возможностью просмотра предыстории с заданной глубиной. Эти инструментальные средства важны для специалиста-разработчика

и для специалиста-«технолога» системы автоматизации. Используемая векторная графика дает возможность осуществлять широкий набор операций над выбранным объектом.

6.4. Открытые системы управления

Мощное и массовое развитие в последние 10-летия компьютерной техники, средств связи и их ПО сделало компьютерные системы открытыми. Отдельные АСУТП обмениваются информацией и друг с другом, и с системами других типов. В рамках одной корпоративной вычислительной сети уживаются самые разные системы. Нормальным событием является модификация отдельных частей АСУТП (включая SCADA-программу). Человек (диспетчер, технический специалист) может одновременно работать с разными системами, в т.ч. на одном экране.

Причиной возникновения открытых технологий является невозможность любого поставщика в полной мере удовлетворить все требования всех потребителей в рамках одного или даже семейства приборов. Яркий пример этого – появление первой открытой системы – КАМАК, ориентированной на автоматизацию научных исследований. Эта область деятельности требует уникальных и постоянно изменяющихся средств измерений, создавать которые в темпе потребностей не способен ни один производитель. Задача была решена в рамках открытой системы КАМАК, которая развивалась большим числом производителей и насчитывала, по некоторым данным, несколько тысяч типов модулей.

Открытость разнообразных программных и технических средств разных фирм (совместимость продуктов независимых поставщиков) достигается путем унификации их интерфейсов. Фактически, унификация интерфейсов есть частный случай общей типизации и стандартизации средств автоматизации, при которой вне зависимости от внутренних свойств и характеристик средства формируются его типовые связи с внешним миром.

Открытость интерфейсов для разработчиков АСУТП позволяет им применять готовые разработки и готовые программные и технические средства сторонних фирм как части своих разрабатываемых систем. Этот путь все более широко используется не только системными интеграторами и небольшими фирмами, но и крупными

многопрофильными компаниями. Он позволяет производителям фокусироваться на разработке той части системы, которая является предметом их ключевой компетенции, и закупать остальные части проектируемых систем у других производителей.

Открытые технологии позволяют пользователю, после того как установлена поставщиком АСУТП, дальше эксплуатировать, изменять, развивать, модернизировать эту систему, подключать новые независимо разработанные компоненты без участия разработчика.

6.5. Тенденции развития систем управления

Средства измерения, вычислительная техника, коммуникации и программное обеспечение меняются так быстро, что имеет смысл говорить о тенденциях развития только ближайших нескольких лет.

В области измерительной техники появятся датчики на новых физических принципах, в частности, очевидным представляется наступление эры нанодатчиков на широчайшем поле деятельности: от медицины до контроля состояния трубопроводов.

Имеется множество разработок на базе оптоволоконной технологии, однако готовых изделий на рынке очень мало. Можно ожидать, что трудности связанные с освоением этой технологии будут преодолены.

Сами датчики, несомненно, будут интеллектуальными, экономичными, возможно, не требующими источника питания.

Как показывает опыт работы с существующими программно-аппаратными средствами, они сегодня ориентированы на компьютерную организацию вычислительного процесса и еще не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к контроллерам по обеспечению надежности процесса управления, его непрерывности при различных коллизиях (зависании, просечке питания и т.п.). Это выражается в отсутствии необходимых объемов оперативной энергонезависимой памяти, слишком долгим времени рестарта, связанном с загрузкой ПО с диска (секунды и даже десятки секунд), в течение которого объект остается без управления, что недопустимо, в отсутствии поддержки резервирования отдельных компонент или контроллеров в целом, т. е. при высокой надежности аппаратуры и ПО надежность процесса управления недостаточна. Это имеет ме-

сто на фоне все увеличивающейся нагрузки контроллера и доли его работы в общей системе. Можно ожидать устранения этого недостатка.

В области полевых магистралей следует ожидать расширения сферы беспроводных технологий ввиду ряда очевидных их преимуществ.

В области системотехники следует ожидать, что жесткие большие системы с централизованными хранилищами информации должны быть дезинтегрированы. Они должны стать условно закрытыми, а человек как обладатель знаний выведен за их границы, но в рамках новых технических информационных сред.

В области прикладного ПО мы наблюдаем энергичное развитие адаптивных систем управления. До недавнего времени естественный путь развития компьютерных систем был связан с поддержкой технологий, повышающих плотность хранения данных, а также с возможностями резервирования сетевой полосы пропускания индивидуально для каждого пользователя. В последние два десятилетия емкость дисков ежегодно увеличивалась примерно в два раза, вычислительная производительность – в 1,6 раза (закон Мура), а эффективность персональных сетевых возможностей – в 1,3 раза. Развитию приложений и одновременно росту сложности их администрирования в немалой степени способствовали преимущества, которые дает применение Internet. Адаптивный подход призван решить некоторые из проблем, связанных с ростом сложности. К числу принципов системного проектирования, которые позволяют преодолеть существующие ограничения, относят способность систем к самоконтролю, самовосстановлению, самоконфигурированию и самооптимизации. Кроме того, система должна иметь представление о своем окружении, защищаться от атак, взаимодействовать на основе открытых стандартов и предвидеть действия пользователей. Данные принципы могут применяться и к отдельным компонентам, и к системам в целом. Ориентация на системы, в которых человек выполняет наблюдательную, а не управляющую функцию, или на полностью автоматические системы – общая цель новых технологий. Пользователь не вмешивается в управление системой до тех пор, пока не потребуются его участие в принятии критически важных решений.

Один из простейших примеров, иллюстрирующих систему, где человеку отводится именно роль наблюдателя – система центрального отопления в современном доме. Подобные системы, как правило, имеют простую программу, определяющую температуру для утра, дня, вечера и ночи. Обычно система действует автономно и незаметно, однако пользователи могут быстро и в любой момент изменить эти настройки, если им станет жарко или холодно, либо в приближении энергетического кризиса. Если систему оснастить сетью датчиков и занести в нее информацию о «расписании дня» семьи, температурный режим и уровень энергопотребления можно заранее оптимизировать с учетом микроклимата в доме, позднего окончания буднего дня, семейного отпуска. Но обобщить этот пример на более сложные системы довольно трудно: большинство ситуаций не сводится лишь к выбору между «слишком жарко» и «слишком холодно».

Другой пример связан с разработкой адаптивной системы управления для протезов верхних конечностей на основе нового метода, отличающегося способностью к обучению и переобучению непосредственно в процессе управления, многокритериальностью управления, а также тем, что при создании системы управления не требуется разрабатывать точную математическую модель объекта управления. Последнее обстоятельство особенно существенно для такого сложного объекта управления, как протез, поскольку многие параметры системы "человек-протез-среда" изменяются малопредсказуемым образом в процессе функционирования, плохо поддаются формализации и предварительному определению. В этих обстоятельствах именно применение адаптивной системы может сыграть решающую роль.

Список литературы

1. The improvement project for the CPS controls, Baribaud et al, IEEE Trans., Nucl. Sci., vol. NS-26, No 2, 1979, p 3272.
2. Starting of the new CPS controls, Baribaud et al, IEEE Trans., Nucl. Sci, Vol. NS-28, No 3, 1981, p 2267.
3. An interactive alarm system for the CERN PS accelerator complex. J. Cuperus, Particle Accelerator Conference, New Mexico, 1983.
4. Фрэнк Т.С. PDP-11: Архитектура и программирование: пер. с английского. М.: Радио и связь, 1986.
5. CAMAC. A modular Instrumentation System for Data Handling. Revised Description and Specification. Eur 4100e. ESONE Committee, 1972.
6. CAMAC. Organisation of Multi-Crate Systems. Specification of the Branch Highway and CAMAC Crate Controller Type A. Eur. 4000e. ESONE Committee, 1972.
7. Multiple Controllers in a CAMAC Crate. Eur. 6500e. ESONE Committee, 1978.
8. E. Asseo, CERN Internal Note, MPS/10, Note 68-11 (1968).
9. H. Kugler and P. Pearce, CERN Internal Note PS/AE, Note 72-18 (1972).
10. Specification of the CAMAC Serial Highway and Serial Crate Controller Type L2. Eur 6100e. ESONE Committee, 1978.
11. M.C. Crowley-Milling et al. The multi-computer control system of the CERN 400 GeV accelerator, IEE Conference Publication No 127, "Trends in on-line computer control systems, England.
12. The design of the control system for the SPS. M.C. Crowley-Milling, CERN 75-20, 1975.
13. Suggested principles for the control of future accelerators .J. Altaber et al., IEEE Trans. on Nuclear Science, 1979, p. 3278.
14. The Design and Construction of a Control Centre for the CERN SPS Accelerator. F. Beck, CERN SPS0CO/76-1, 1976.
15. M.C. Crowley-Milling. The control System for LEP. Particle Accelerator Conference, Santa-Fe, 1983.
16. Вирт Н. Программирование на языке Модула-2. М.: Мир, 1987.
17. Грогано П. Программирование на языке Паскаль. М.: Мир, 1982.

18. H.W. Atherton et al. A Data Base as a Bridge Between Hardware and Software. CERN/SPS 82-13.
19. <http://www.oracle.com/>
20. IEEE Standard for local Area network: Token Ring access method and physical layer specification ISO/DIS 8802/4, 1985.-P. 91.
21. Military standard. Aircraft internal time division. Command/response multiplex data bus. MIL-STD-1553B. 1978.
22. M.Q. Barton et al. Use of a General Purpose Time Shared Computer in Accelerator Control. Proceeding 9th Int. Conf. On High Energy Accelerators, Stanford, May 1974.
23. Intel Multibus Specification Manual #9800683-02, Intel Corporation, 1979.
24. S. Magyary, et al. A High Performance/Low Cost Accelerator Control System. 6-th IEEE Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry, Denton, TX, 1980.
25. D. Boggert et al. The Tevatron Control System. FNAL, Batavia.
26. O. Calvo et al. Multiprocessor Control and Regulation of the Tevatron Power Supplies. Fermilab MS-308, Batavia, 1987.
27. R. Ducar. Tevatron Serial Data Repeater System. FNAL, Batavia, 1980.
28. J. Zagel. A Vacuum Control Subsystem for the Fermilab Tevatron. FNAL, Batavia, 1980.
29. R. Flora et al. Energy Saver/Doubler Quench protection Monitor System. IEEE Tran. On Nucl. Sci., 1981, vol NS-28, No 3.
30. Болтон У. Карманный справочник инженера – метролога. ОДЭКА, 2002.
31. Шведов С. Датчики для применения в промышленных условиях // Компоненты и технологии, 2000, №10.
32. Близнюк В, Костылев В., Сорокопут В, Стеценко А., Стеценко А. Ультразвуковые расходомеры и система учета на их основе // СТА, 1998, №2 .
33. Жданкин В. Ультразвуковые датчики для систем управления // СТА, 2003, №1.
34. Прорыв в области измерения сильных постоянных токов // АББ ревю, 2005, №1.
35. Соколов А. Н, Яцеев., В. А.. Волоконно-оптические датчики и системы: принципы построения, возможности и перспективы // Измерительная техника, 2006 №4.

36. Деревягин А.М., Селезнёв С.В., Степанов А.Р., Агальцов А.Г. Анализаторы точек росы углеводородных газов по влаге и углеводородам // Каталог продукции фирмы «Вымпел», 2006.
37. Алферов В.Н., Кренделев В.А. Система виброконтроля вращающегося вала на базе волоконно-оптического датчика перемещений // Датчики и системы, 2009, №7.
37. Алферов В.Н. Акустический анализатор // Приборы и системы. Контроль. Диагностика. Управление, 2007, №7.
38. Долгополов Н.В. Нанотехнология – инновационная основа систем безопасности // Мир и безопасность, 2007, №3.
39. Борзенко А. Технология MEMS // BYTE, 2006, №1.
40. Денисенко В. Заземление в системах промышленной автоматизации (Часть 1) // СТА, 2006, №2.
41. Денисенко В. Заземление в системах промышленной автоматизации (Часть 2) // СТА, 2006, №3.
42. Богатин Э. Как на самом деле возвращается возвратный ток? // PCD&M, 2004, September.
43. Бармин А. Устройства локальной автоматики. Микроконтроллер // СТА, 200, №4.
44. Егоров А.А. Промышленные контроллеры – это просто или не очень? // ПРОМЫШЛЕННЫЕ АСУ и КОНТРОЛЛЕРЫ, 2007, №7.
45. Analog Devices. Контроллер ADuC824.
46. Чепурнов А.С. Введение в протокол CAN, www.marathon.ru/.
47. Последовательный интерфейс RS-485. <http://www.gaw.ru/>.
48. Колесников С. Технологии и протоколы передачи данных в промышленности: WorldFIP, Foundation // Компьютер – Информ, 2003, №1.
49. Локотков А. Интерфейсы последовательной передачи данных. Стандарты EIA RS-422A/RS-485 // СТА, 1997, №3.
50. Гришин В., Еремеев П., Зубов Н., Муратов С., Шелепин Н. Микросхемы приемопередатчиков для основных типов мультимедийных каналов информационного обмена // Компоненты и технологии, 200, №5.
51. Колесников С.. Беспроволочные сети // Компьютер – Информ, 2003, №1.

52. Егоров А.А. Открытые технологии и промышленные АСУ. ПРОМЫШЛЕННЫЕ АСУ И КОНТРОЛЛЕРЫ. № 3, 2003.

53. Дискуссия. Искусственный интеллект в промышленных АСУ и контроллерах: мифы и реальность, дань моде или объективная необходимость // ПРОМЫШЛЕННЫЕ АСУ И КОНТРОЛЛЕРЫ, 2000, №2.

54. Тютюнник М. Концепция Transparent Factory: Web-технология в автоматизации производства // МКА, 200, № 2.

55. Жданов А. А. Современный взгляд на ОС реального времени // МКА, 1999, № 1.

56. Грег Роуз (Greg Rose). Вопросы успешного применения ОС Linux во встраиваемых системах // МКА, 2002, № 3.

57. Бурдонов И. Б., Косачев А.С., Пономаренко В. Н. Операционные системы реального времени // Препринт Института системного программирования РАН, 2006.

58. Куцевич Надежда. SCADA-системы, или муки выбора // МКА, 1999, № 1.

59. Куцевич Н.А SCADA-системы. Стратегия клиентских приложений // МКА, 2001, № 1.

60. Локотко А. Что должна уметь система SCADA // СТА, 1, №3.

61. L.R.Dalesio, J.O.Hill, M.Kraimer etc. "The Experimental physics and industrial control system architecture: past, present, and future", Proc. Of ICALEPCS-93, Oct.18-23, 1993, Berlin, Germany.