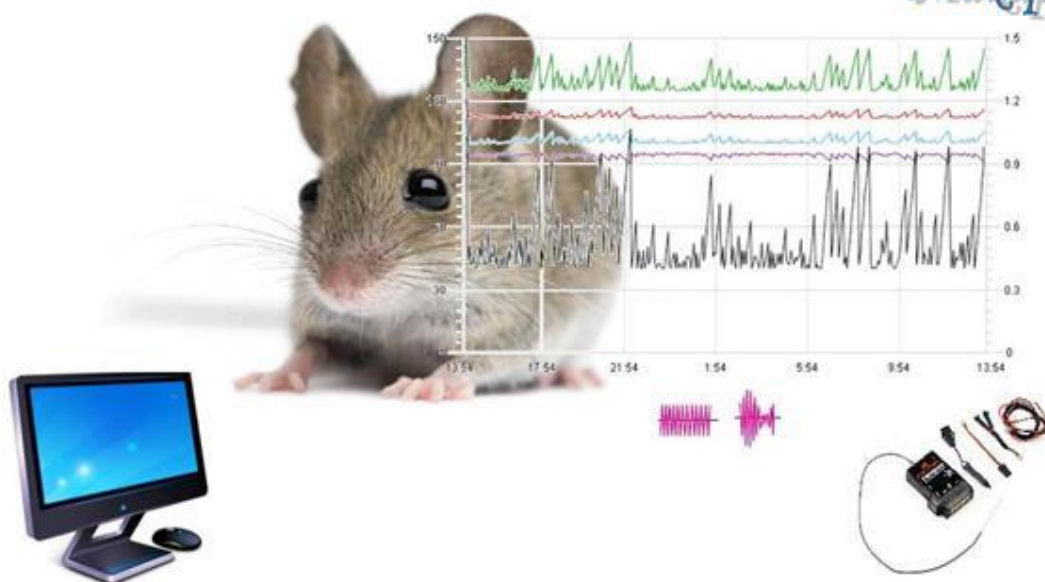


Практикум

Биотелеметрические

системы

Макаров А.М.



Оглавление

1. Телеметрические системы.....	2
1.1 Понятия и определения.....	2
Телеметрическая система ZET 7172.....	5
Интерфейс передачи данных.....	7
2. Измерительные системы.....	10
ТЕЛЕИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ.....	13
Системы контроля.....	16
Цифровые преобразователи.....	18
3. Применение преобразователей - сенсор.....	22
Информационные телеметрические системы.....	36
Биотелеметрия.....	39
Процессор малой мощности.....	48

1. Телеметрические системы

1.1 Понятия и определения

Стандарт ГОСТ 19619-74

Стандарт устанавливает применяемые в науке, технике и производстве термины и определения основных понятий в области радиотелеметрии и радиотелеметрического оборудования.

Телеметрия E. Telemetry

Область науки и техники, занимающаяся вопросами разработки и эксплуатации комплекса автоматизированных средств, обеспечивающих получение, преобразование, передачу по каналу связи, прием, обработки и регистрацию измерительной информации и информации о событиях с целью контроля на расстоянии состояния и функционирования технических и биологических систем различных объектов и изучения явлений природы

Радиотелеметрия

Телеметрия, использующая радиоканалы связи

Телеметрирование E. Telemetry

Совокупность операций, включающих в себя формирование, передачу на расстояние и регистрацию телеметрических сообщений

Телеметрический канал связи

Совокупность устройств и (или) составных частей с одним входом и одним выходом, обеспечивающих передачу групповых телеметрических сигналов на расстояние и их прием

Телеметрическая линия связи

Совокупность устройств, обеспечивающих формирование телеметрических сигналов, передачу их по каналу связи, прием и формирование оценок передаваемых сообщений.

Примечание. В отличие от канала связи линия связи может обслуживать несколько источников сообщений, образуя многоканальную линию

Телеметрическая радиолиния

Телеметрическая линия связи, передача сигналов в которой производится по радиоканалу связи

Телеметрическая система

Совокупность устройств, обеспечивающих сбор сигналов со средств первичного преобразования, формирование телеметрических сигналов, передачу их по каналу связи, регистрацию и отображение телеметрических сообщений на приемной стороне

Аналоговая телеметрическая система

Телеметрическая система, в которой передача сообщений по каналу связи производится аналоговыми или дискретно-аналоговыми, сигналами

Цифровая телеметрическая система

Телеметрическая система, в которой передача сообщений по каналу связи производится цифровыми сигналами

Телеметрическая информация

Информация, передаваемая телеметрической системой.

Примечание. Включает в себя информацию о результатах измерения физических параметров, состояния контролируемых объектов, изучаемых явлениях или событиях, а также информацию, обеспечивающую работу наземных средств телеметрической системы

Измерительная телеметрическая информация

Часть телеметрической информации, которая после обработки ее на приемной стороне представляется совокупностью масштабированных чисел, сопоставимых с единицами соответствующих физических величин

Телеметрическое сообщение

Сообщение, передаваемое телеметрической системой, несущее информацию о контролируемых событиях и процессах, а также служебную информацию

Данные телеметрирования

Телеметрическое сообщение, представляемое в дискретной форме, описываемой совокупностью величин со значениями, изменяющимися в непрерывном интервале или конечным числом квантованных уровней

Телеметрируемый параметр

Показатель физического процесса, события или изучаемого явления, значения или поведение которого подлежат измерению или контролю телеметрической системой

Телеметрируемый объект

Объект, на котором с помощью телеметрической системы осуществляется автоматизированный контроль или исследование состояния и функционирования его технических и биологических систем или явлений окружающей природы

Программа телеметрирования

Документ, определяющий перечень контролируемых параметров на объекте, состав средств телеметрических измерений и режимы их работы

Пропускная способность телеметрической системы

Максимально возможный объем сообщений, который телеметрическая система способна передавать, принимать и регистрировать в единицу времени

Дальность связи телеметрической системы

Максимальное расстояние, при котором обеспечивается требуемая вероятность связи

Максимальная погрешность телеметрирования

Абсолютное значение погрешности телеметрирования, вероятность превышения которой определяется приемлемым для потребителя уровнем значимости

Бортовая информационная телеметрическая система

Совокупность подсистем и устройств, обеспечивающих сбор телеметрической информации на борту подвижного объекта, ее обработку, запоминание, представление экипажу, формирование и ввод в канал связи для передачи

Передающая часть радиотелеметрической системы

Оборудование, включающее бортовую информационную телеметрическую систему и передающие устройства телеметрической линии связи

Приемно-регистрирующее оборудование радиотелеметрической системы

Телеметрическое оборудование, обеспечивающее прием, регистрацию и отображение телеметрической информации для последующей выдачи ее различным потребителям

Кодирование телеметрического сообщения

Процесс формирования цифрового телеметрического сигнала в соответствии с передаваемыми телеметрическими сообщениями и принятой системой кодирования

Регистратор телеметрической информации

Устройство, осуществляющее регистрацию телеметрической информации на каком-либо носителе

Декодирование телеметрического сообщения

Процесс получения оценки переданного телеметрического сообщения по принятой кодовой комбинации

Модуляция телеметрического сигнала

Процесс изменения параметров гармонических или импульсных поднесущих или несущих колебаний в соответствии с передаваемыми телеметрическими сообщениями

Демодуляция телеметрического сигнала

Процесс формирования телеметрического сигнала, воспроизводящего закон модуляции принятых гармонических или импульсных несущих или поднесущих колебаний

Отображение телеметрической информации

Представление телеметрических сообщений в форме, удобной для восприятия человеком

Масштабирование телеметрической информации

Процесс преобразования полученных телеметрических сообщений в результате измерений, описываемые числами или функциями, значения и аргументы которых определены в соответствующих физических величинах

Обработка телеметрической информации

Процесс уточнения оценок телеметрируемых параметров, масштабирования, анализа результатов измерений и приведения их к виду, удобному для дальнейшего использования

Телеметрическая система ZET 7172

Рассмотрим пример. Телеметрическая система ZET 7172 предназначена для организации беспроводного доступа к фрагменту измерительной линии с использованием радиоканала.

Телеметрическая система состоит из двух модулей: ZET 7172-M и ZET 7172-S.

Модуль ZET 7172-S устанавливается со стороны измерительных модулей и выполняет функцию передатчика информации, конвертируя интерфейс CAN в радиоканал. В свою очередь модуль ZET 7172-M принимает данные по радиоканалу и преобразует в интерфейс CAN для последующей передачи измеренной информации на ПК, где осуществляется дальнейшая обработка и анализ. Выполняет функцию приёмника и устанавливается со стороны преобразователя интерфейса.

Передача измеренной информации осуществляется только в одну сторону от передатчика ZET 7172-S на приёмник ZET 7172-M, но служебная информация передаётся в оба направления, что позволяет производить настройку измерительных модулей со стороны передатчика ZET 7172-S.

Модуль ZET 7172-S имеет встроенный датчик линейного ускорения. Данная опция удобна при проведении испытаний вращающихся конструкций, поскольку позволяет минимизировать состав измерительной системы и организовать беспроводную передачу данных.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Интерфейс передачи данных	CAN 2.0 → Радиоканал → CAN 2.0
Радиус действия при прямой видимости	10 м
Максимальная суммарная частота передачи данных	600 Гц
<i>Интерфейс проводной</i>	
Интерфейс приёма передачи данных	CAN 2.0
Скорость обмена данными, кбит/с	100, 300, 1000
<i>Интерфейс радиоканала</i>	
Протокол обмена	IEEE 802.15.4
Радиодиапазон	2,4 ГГц
Мощность излучения	1 мВт

Датчики крепятся на объекте измерений, а модули которые обеспечивают передачу информации располагаются в электротехнических шкафах. Преимуществом модулей ZETSENSOR является легкий монтаж и демонтаж, а так же индикация питания и передача сигнала, что в свою очередь облегчает диагностику системы на объекте. На рисунке представлена структурная схема измерительной сети на базе цифровых датчиков с передачей данных по радиоканалу.



Телеметрическая система ZET 7172 применяется при проведении динамических испытаний различных вращающихся элементов конструкции в реальном времени.

Применение системы обеспечивает беспроводную передачу информации от измерительной части на ПК для дальнейшей обработки и анализа полученных данных. Дополнительная комплектация представлена на рисунке ниже

Интерфейс передачи данных

Адресация сообщений CAN

CAN использует относительно короткие сообщения – максимальная длина информационного поля составляет 94 бита. В сообщениях отсутствует явный адрес, их можно назвать контентно–адресованными: содержимое сообщения имплицитно (неявным образом) определяет адресата.



Типы сообщений

существует 4 типа сообщений (или кадров), передающихся по шине CAN:

- кадр данных (Data Frame);
- удаленный кадр (Remote Frame);
- кадр ошибки (Error Frame);
- кадр перегрузки (Overload Frame).



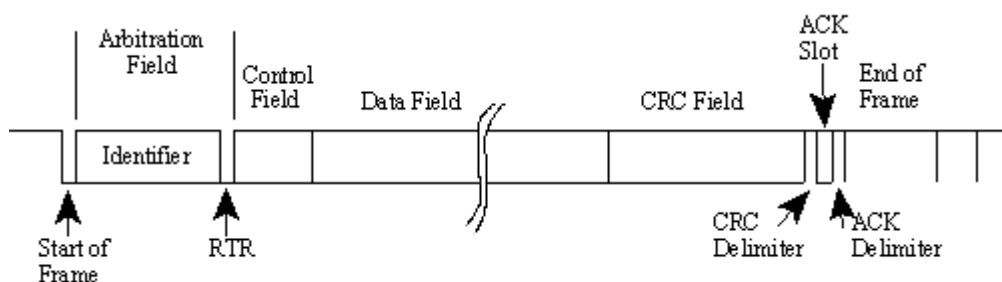
Кадр данных

Кадр данных – самый распространенный тип сообщения. Он содержит в себе следующие основные части (некоторые детали не рассматриваются для краткости):

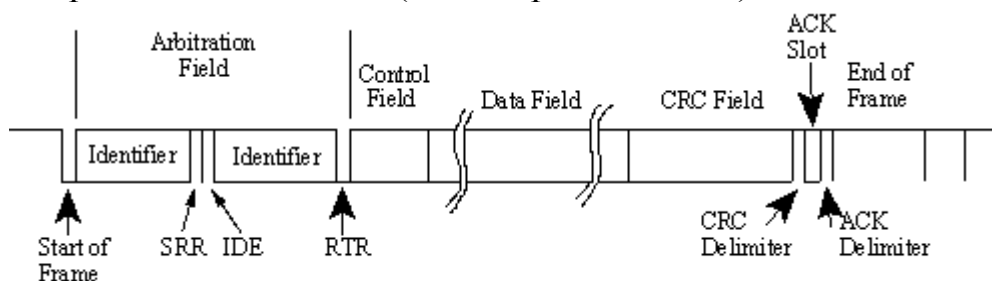
- Поле арбитража (Arbitration Field), которое определяет очередность сообщения в том случае, когда за шину борются два или более узла. Поле арбитража содержит:
 - В случае CAN 2.0A, 11–битный идентификатор и один бит, бит RTR который является определяющим для кадров данных.
 - В случае CAN 2.0B, 29–битный идентификатор (который также содержит два рецессивных бита: SRR и IDE) и бит RTR.
- Поле данных (Data Field), которое содержит от 0 до 8 байт данных.
- Поле CRC (CRC Field), содержащее 15–битную контрольную сумму, посчитанную для большинства частей сообщения. Эта контрольная сумма используется для обнаружения ошибок.
- Слот распознавания (Acknowledgement Slot). Каждый контроллер CAN, способный корректно получить сообщение, посылает бит распознавания (Acknowledgement bit) в конце каждого сообщения. Приемопередатчик проверяет наличие бита распознавания и, если таковой не обнаруживается, высылает сообщение повторно.

Примечание 1: Присутствие на шине бита распознавания не значит ничего, кроме того, что каждый запланированный адресат получил сообщение. Единственное, что становится известно, это факт корректного получения сообщения одним или несколькими узлами шины.

Примечание 2: Идентификатор в поле арбитража, несмотря на свое название, необязательно идентифицирует содержимое сообщения.



Кадр данных CAN 2.0B («стандартный CAN»).



Кадр данных CAN 2.0B («расширенный CAN»).

Удаленный кадр

Удаленный кадр очень похож на кадр данных, но с двумя важными отличиями:

- он явно помечен как удаленный кадр (бит RTR в поле арбитража является рецессивным), и
- отсутствует поле данных.

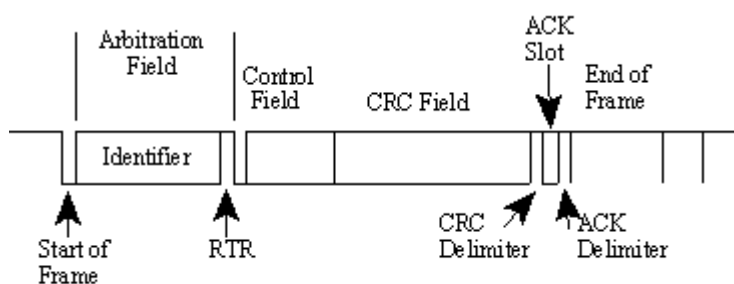
Основной задачей удаленного кадра является запрос на передачу надлежащего кадра данных. Если, скажем, узел А пересылает удаленный кадр с параметром поля арбитража равным 234, то узел В, если он должным образом инициализирован, должен выслать в ответ кадр данных с параметром поля арбитража также равным 234.

Удаленные кадры можно использовать для реализации управления трафиком шины типа «запрос–ответ». На практике, однако, удаленный кадр используется мало. Это не так важно, поскольку стандарт CAN не предписывает действовать именно так, как здесь обозначено. Большинство контроллеров CAN можно запрограммировать так, что они будут автоматически отвечать на удаленный кадр, или же вместо этого извещать локальный процессор.

Есть одна уловка, связанная с удаленным кадром: код длины данных (Data Length Code) должен быть установлен длине ожидаемого ответного сообщения.

В противном случае разрешение конфликтов работать не будет.

Иногда требуется чтобы узел, отвечающий на удаленный кадр, начинал свою передачу как только распознавал идентификатор, таким образом «заполняя» пустой удаленный кадр. Это другой случай.

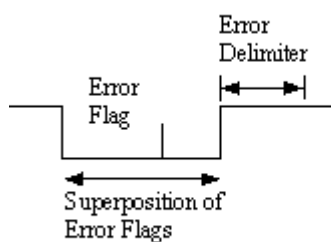


Кадр ошибки (Error Frame)

Кадр ошибки (Error Frame) – это специальное сообщение, нарушающее правила формирования кадров сообщения CAN. Он посылается, когда узел обнаруживает сбой и помогает остальным узлам обнаружить сбой – и они тоже будут отправлять кадры ошибок. Передатчик автоматически попытается послать сообщение повторно. Существует продуманная схема счетчиков ошибок, гарантирующая, что узел не сможет нарушить передачу данных по шине путём повторяющейся отсылки кадров ошибки.

Кадр ошибки содержит флаг ошибки (Error Flag), который состоит из 6 бит одинакового значения (таким образом нарушая правило вставки битов) и разграничителя ошибки (Error Delimiter), состоящего из 8 рецессивных бит. Разграничитель ошибки предоставляет некоторое пространство, в котором другие узлы шины могут отправлять свои флаги ошибки после того, как сами обнаружат первый флаг ошибки.

Вот флаг ошибки:



Кадр перегрузки (Overload Frame)

Кадр перегрузки упоминается здесь лишь для полноты картины. По формату он очень похож на кадр ошибки и передается занятым узлом. Кадр перегрузки используется нечасто, т.к. современные контроллеры CAN достаточно производительны, чтобы его не использовать. Фактически, единственный контроллер, который будет генерировать кадры перегрузки – это ныне устаревший 82526.

2. Измерительные системы

Общие понятия. К измерительным системам (ИС) относят ИИС, в которых преобладает функция измерения, а функции обработки и хранения незначительны или отсутствуют совсем. Измерительные системы делят на системы ближнего действия и системы дальнего действия — телеизмерительные системы

На вход ИС поступает множество величин, изменяющихся во времени и (или) распределенных в пространстве. На выходе ИС получают результаты измерений в виде именованных чисел или отношений измеряемых величин. Такие системы могут выполнять прямые, косвенные, совместные и совокупные измерения. Наиболее распространены измерительные системы для прямых измерений.

Для всех ИС характерным является наличие воспринимающих элементов — первичных измерительных преобразователей, в дальнейшем именуемых датчиками (Д), элементов сравнения (С), мер М и элементов выдачи результата ВР. Перечисленные элементы являются основой для построения ИС. В зависимости от вида и числа различных элементов в структуре ИС делят на многоканальные ИС, или ИС с параллельной структурой; сканирующие ИС, или ИС с последовательной структурой; мультиплицированные ИС, или ИС с общей мерой; многоточечные ИС, или ИС с параллельно-последовательной структурой.

Многоканальные ИС. Эти системы представляют собой один из самых распространенных видов ИС и содержат в каждом измерительном канале полный набор элементов. Многоканальные ИС обладают наиболее высокой надежностью, наиболее высоким быстродействием при одновременном получении результатов измерений, возможностью индивидуального подбора средств измерений к измеряемым величинам, что исключает иногда необходимость унификации сигналов. Недостаток таких

систем — повышенная сложность и стоимость. Имеются также трудности в организации рационального представления измерительной информации оператору.

Сканирующие ИС. Эти системы последовательно во времени выполняют измерения множества величин с помощью одного канала измерения и содержат один набор элементов и так называемое сканирующее устройство (СкУ). Сканирующее устройство перемещает датчик, называемый в этом случае сканирующим датчиком, в пространстве, причем траектория движения датчика может быть заранее запрограммирована (пассивное сканирование) либо может изменяться в зависимости от полученной в процессе сканирования информации (активное сканирование).

Сканирующие ИС применяют в случае, когда измеряемая величина распределена в пространстве. При исследовании параметрических полей (температур, давлений, механических напряжений и т. д.) такие ИС дают количественную оценку значений параметров полей в заданных точках. Иногда с помощью сканирующих ИС определяют экстремальные значения параметров исследуемых полей либо находят места равных значений этих параметров. Недостатком этих ИС является относительно малое быстродействие из-за последовательного выполнения операций измерения для всех измеряемых величин.

Мультиплицированные ИС. Эти системы позволяют в течение одного цикла изменения известной величины (развертки) выполнить сравнение со всеми измеряемыми величинами, т. е. определить множество величин без применения коммутирующих узлов. Мультиплицированные системы содержат в каждом измерительном канале элементы Д, С, ВР и общий для всех каналов элемент М. Мультиплицированные ИС называют еще системами с развертывающим уравниванием.

Если измеряемые величины сравниваются со ступенчато изменяющейся величиной x_k , то значительно упрощается получение результата измерения в цифровом виде. Мультиплицированная ИС содержит цифро-аналоговый преобразователь ЦАП, пересчетную схему ПС, генератор импульсов Г, входы останова и запуска которого через логические элементы ИЛИ, реализующие операцию логического сложения, соединены соответственно с выходами элементов сравнения С и выдачи результатов ВР. В момент равенства измеряемой величины одного или нескольких измерительных каналов и известной величины на выходе ЦАП соответствующие элементы сравнения срабатывают и генератор Г останавливается. На выходе ПС окажется значение измеренных величин в коде, подаваемое на элементы ВР (индикаторы, регистраторы и т. п.). По окончании выдачи результата генератор вновь запускается и работа системы продолжается. При общем для всех измерительных каналов элементе ВР (например, при вводе информации в ЭВМ) одновременно с регистрацией значений измеряемой величины необходимо фиксировать номер датчика или применять иные способы, позволяющие относить полученные результаты измерения к соответствующим датчикам.

Мультиплицированные системы имеют меньшее число элементов по сравнению с

ИС параллельного действия и при наличии индивидуальных элементов ВР могут обеспечить практически такое же быстродействие. Недостатком мультиплицированных ИС является большое число элементов сравнения, равное числу измеряемых величин. При измерениях сигналов низкого уровня элементы сравнения обычно значительно усложняются.

Многоточечные ИС. Эти системы применяют для исследований сложных объектов с большим числом измеряемых величин. Число измерительных каналов в таких системах может достигать нескольких тысяч. Многократное последовательное использование отдельных узлов измерительного тракта приводит к последовательно-параллельному принципу действия таких систем и к минимальной сложности ИС.

Для согласования действия узлов ИС, работающих параллельно и последовательно во времени, в таких системах применяют измерительные коммутаторы ИК для коммутации аналоговых сигналов датчиков Д. Измерительные коммутаторы должны обладать заданными метрологическими характеристиками (погрешность коэффициента передачи, быстродействие коммутатора и др.).

Погрешность определяется, главным образом, остаточными параметрами ключевых элементов, используемых в коммутаторе, а именно остаточными ЭДС и сопротивлениями замкнутого и разомкнутого ключей. Погрешность зависит также от числа измерительных каналов и от выходного сопротивления датчика и входного сопротивления следующего после коммутатора узла (например, элемента С).

Быстродействие коммутатора обычно определяется допустимым числом переключений в секунду и зависит прежде всего от применяемых элементов. Наибольшее распространение получили электронные коммутаторы, состоящие из ключей и устройства управления. Коммутаторы могут быть одноступенчатые и многоступенчатые. Число ступеней коммутации зависит от числа датчиков, а также от условий эксплуатации ИС.

Достоинством многоточечных ИС является меньшее количество оборудования по сравнению с многоканальными системами, возможность наращивания числа измерительных каналов за счет коммутатора. Недостатком этих систем по сравнению с рассмотренными выше ИС является пониженное быстродействие при большом числе опрашиваемых датчиков и некоторое снижение точности за счет остаточных параметров ключей коммутатора.

ТЕЛЕИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Общие понятия. В различных областях науки и техники возникает необходимость осуществлять измерения на объектах, находящихся на значительном расстоянии от средств представления или последующей обработки (например, с помощью ЭВМ) информации. Такая необходимость возникает при измерениях параметров движущихся объектов, при измерениях параметров объектов, рассредоточенных по площади (большие промышленные предприятия, газо- и нефтепроводы), а также при измерениях параметров объектов, непосредственное нахождение человека около которых является невозможным (например, объекты атомной энергетики). Все эти, а также многие другие задачи решают телеизмерительные системы (ТИС).

Отличие ТИС от измерительных систем ближнего действия заключается в наличии у ТИС специального канала связи. Под каналом связи понимают совокупность технических средств, необходимых для передачи информации от различных источников. Одной из основных частей канала связи является линия связи, под которой понимается физическая среда, по которой передается информация на значительное расстояние. Различают проводные линии связи, радиолинии и оптические линии связи. Основная характеристика канала связи — полоса пропускания частот, которая зависит от вида канала связи и наличия помех.

Для передачи информации от нескольких источников по одной линии связи применяют различные принципы разделения каналов. Наиболее часто используют временное и частотное разделение каналов.

При временном разделении происходит последовательная передача по линии связи значений отдельных измеряемых величин. В таких ТИС разделение измерительных каналов производится с помощью коммутаторов.

При частотном разделении возможна одновременная (параллельная) передача по линии связи значений нескольких измеряемых величин. Для передачи каждой величины используют определенную, для каждой величины свою, полосу частот.

В зависимости от информативного параметра сигнала, которым передается значение измеряемой величины по линии связи, ТИС делят на токовые, частотные, время-импульсные и цифровые системы.

^ Токовые телеизмерительные системы. В токовых ТИС, называемых еще системами интенсивности, размер измеряемой величины передается по проводным линиям связи постоянным током (0—5 мА), вырабатываемым преобразователем. На принимающей стороне такой ТИС обычно устанавливается магнитоэлектрический миллиамперметр. Токовые ТИС являются наиболее простыми, а потому дешевыми и надежными. В одноканальной ТИС миллиамперметр на принимающей стороне не реагирует на помехи в линии связи, так как среднее значение помех обычно равно нулю.

В многоканальных ТИС применяют временное разделение каналов, т. е. на передающей и принимающей сторонах ТИС устанавливают измерительные коммутаторы, а принимающие приборы, кроме того, снабжают блоками памяти для хранения показания до очередного подключения коммутатора. При этом система значительно усложняется, а быстродействие ее ограничивается необходимостью усреднения помехи. Поэтому в многоканальных токовых ТИС применяют только спорадическую коммутацию измерительных каналов, т. е. коммутацию по вызову оператора.

Дальность действия токовых ТИС ограничивается погрешностью, вносимой непостоянством параметров линии связи (сопротивления проводов и изоляции между проводами). Практически по воздушным линиям связи дальность действия ТИС составляет 7—10 км, по кабельным каналам — 20—25 км.

Частотные телеизмерительные системы. В частотных ТИС значения измеряемых величин передаются по линии связи частотой синусоидального тока или импульсов постоянного тока. Передача «частотных» сигналов может осуществляться как по проводным линиям связи, так и по другим линиям. Возможна параллельная передача нескольких значений измеряемых величин по одной линии связи путем частотного разделения измерительных каналов.

Частота переменного тока (или импульсов постоянного тока) f , на выходе передающего устройства ПУ обычно зависит от измеряемой величины: $f^* = f_m m + k_1 x$ или $fz = f_m i_a + k_2 (I_{\max} - I_{\min}) x$, где I_{\min} и I_{\max} — минимальная и максимальная частоты сигнала; k_1 и k_2 — коэффициенты преобразования. Переданный по линии связи ЛС частотный сигнал преобразуется приемником Пр либо в аналоговый сигнал (ток или напряжение) для получения значения измеряемой величины аналоговым прибором, либо в код для выдачи результата измерения в цифровой форме. Воспроизведение результатов измерения в той или иной форме осуществляется блоком выдачи результатов ВР.

В настоящее время частотные системы широко распространены как системы дальнего действия — сотни километров. Из-за перекрестных искажений и помех по соседнему частотному каналу число одновременно передаваемых сообщений в настоящее время не превышает 18.

Время-импульсные телеизмерительные системы. В таких ТИС значение измеряемой величины передается по линии связи длительностью импульсов постоянного тока или интервалами между импульсами.

Структурная схема многоканальной время-импульсной системы с временным разделением каналов, содержит на передающей стороне измерительный коммутатор ИК и время-импульсный преобразователь ВИП, т. е. преобразователь унифицированного напряжения (или тока) во временной интервал. На принимающей стороне система содержит преобразователь временного интервала в код, кодовый переключатель, ре-

гистры, запоминающие коды каждого канала, узел выдачи результатов *ВР*, который может быть единым многоканальным блоком либо представлять собой набор индивидуальных средств представления информации (индикация, регистрация).

Время-импульсные ТИС относят к системам дальнего действия; с радиоканалом дальность действия такой системы составляет сотни и даже тысячи километров.

^ Цифровые телеизмерительные системы. В цифровых ТИС, называемых еще кодово-импульсными системами, значение измеряемой величины передается по линии связи кодовой комбинацией в виде комбинации импульсов. Наиболее часто применяется двоичный код, который на принимающей стороне преобразуется в единично-десятичный код, более удобный для цифрового воспроизведения измеряемой величины.

Помехи в линии связи могут привести к искажению кода, а следовательно, и к погрешности измерения. Для повышения помехозащищенности ТИС применяют специальные коды — коды с обнаружением и исправлением ошибок, вызванных помехами. Принцип построения таких кодов базируется на создании избыточности кодовых комбинаций, и из всех возможных кодовых комбинаций выбирается та часть, которая подчиняется определенному закону. Остальные комбинации считаются запрещенными. Это позволяет исключать некоторые кодовые комбинации, подвергшиеся действию помех. При таком построении кодов может быть выявлена лишь часть ошибок, так как не исключена возможность перехода под действием помех одной разрешенной комбинации в другую разрешенную комбинацию.

Унифицированные сигналы, например напряжения от измерительных преобразователей поступают на входы измерительного коммутатора *ИК*, поочередно подключающего эти сигналы к аналого-цифровому преобразователю *АЦП*. Параллельный код с выхода *АЦП* подается на преобразователь *ПК* параллельного кода в последовательный, который управляет также формирователем контрольных символов *ФКС* для образования помехозащищенного кода и переводит *ИК* в следующее положение, а также формирует так называемую синхросерию — код, используемый для цикловой синхронизации приемника. Частота опроса измеряемых величин задается генератором тактовых импульсов *ГТИ*. Последовательный код от *ПК* и *ФКС* через выходное устройство *ВУ* поступает в линию связи.

Приемное устройство цифровой ТИС в качестве средств представления информации может содержать столько аналоговых приборов, сколько измеряемых величин, либо цифровые приборы. При использовании аналоговых приборов устройство существенно проще.

Наиболее существенными достоинствами цифровых ТИС являются высокие метрологические характеристики, возможность работы по различным каналам связи, высокая помехозащищенность и возможность вывода информации в ЭВМ. Относительная сложность — недостаток цифровых ТИС.

Системы контроля

Общие понятия. Системы автоматического контроля (САК), системы технической диагностики (СТД) и биотелеметрические системы являются разновидностями ИИС, с помощью которых осуществляется контроль за состоянием различных объектов.

Отличием СТД от САК является то, что СТД не только выдает информацию о исправности или неисправности контролируемого объекта, но и указывает место неисправности. Практически любая СТД имеет в своем составе устройство воздействия на объект в виде генераторов стимулирующих воздействий, в то время как САК может не иметь таких устройств.

^ Системы автоматического контроля. Современные САК делят на системы, в которых осуществляется непрерывный контроль параметров объекта, и системы с дискретным последовательным контролем этих параметров.

Системы автоматического контроля с дискретным последовательным контролем являются наиболее распространенными. Они требуют меньшего количества оборудования и потому более дешевы. Контролируемые величины, преобразованные в унифицированные сигналы, например напряжения $U_1 \dots U_n$, через измерительный коммутатор ИК поочередно поступают на сравнивающее устройство СУ, где сравниваются с нормами. При наличии нескольких норм у одного контролируемого параметра норма может меняться во время контроля данного параметра. Изменение норм и переключение ИК осуществляется с помощью устройства управления УУ. Средство представления информации СПИ может содержать устройства индикации отклонений (общие, групповые или индивидуальные) и устройства цифровой регистрации. Кроме суждений о состоянии контролируемого параметра, СПИ также выдает и регистрирует номер контролируемого канала (от УУ) и время наступления события (от устройства формирования сигналов времени УФВ).

Недостаток этих систем — большая избыточность операций контроля, так как частота проведения контроля выбирается с учетом экстремальных динамических свойств контролируемых параметров. В то же время из-за недостаточности предварительных сведений о динамических свойствах объекта или невозможности построения САК в соответствии с этими экстремальными свойствами может возникнуть ситуация, когда один или несколько параметров выйдут за пределы норм вследствие ожидания обслуживания и может быть пропущен предаварийный или даже аварийный режим работы объекта.

Выпускаемые промышленностью САК обычно являются комбинированными, т. е. наиболее важные параметры контролируются непрерывно, а по всем остальным параметрам осуществляется дискретный последовательный контроль.

^ Системы технической диагностики. По целевому назначению системы технической диагностики (СТД) делят на собственно диагностические и прогнозирующие. Собственно диагностические системы предназначены для установления диагноза, т. е. для обнаружения неисправности или подтверждения исправности проверяемого объекта. Прогнозирование является более трудной задачей и заключается в том, что по результатам проверки в предыдущие моменты времени предсказывается поведение объекта в будущем.

По характеру процедуры выработки оценки состояния объекта диагностики СТД делят на статистические и детерминированные. При статистической оценке состояния объекта решение выносится на основании измерений или проверок сигналов, характеризующих объект, а при детерминированной — параметры проверяемого объекта сравнивают с параметрами объекта, принятого за образцовый. Обычно вместо образцового объекта используют сигналы, имитирующие его поведение. Эти сигналы хранятся в соответствующих устройствах СТД.

Существуют следующие виды проверок: функциональная, алгоритмическая и логически-комбинационная. При функциональной проверке выявляют наличие сигнала на выходе объекта при поступлении сигнала на его вход; отсутствие выходного сигнала является отказом. При алгоритмической проверке в соответствии с алгоритмом работы объекта проверяется последовательность выполнения функций. Логически-комбинационная проверка, называемая также тестовой, позволяет обнаруживать неисправности на любом уровне. На вход проверяемого объекта в этом случае подают специальный диагностический тест, специальные стимулирующие сигналы.

Наиболее сложной задачей, возникающей при диагностике, является задача отыскания узла, вызвавшего неисправность. При этом каждая очередная проверка должна выполняться с учетом функциональной значимости каждого узла, относительных вероятностей возможных причин неисправности, относительных затрат времени, необходимого для осуществления проверки, а также полученной ранее информации. Существуют различные методы оптимизации программ диагностики, разработанные на основе указанных принципов.

Информация от объекта диагностики через датчики с унифицированными выходными сигналами и измерительный коммутатор поступает на устройство контроля параметров, содержащее устройства измерения и сравнения параметров с нормами. Результаты контроля поступают в устройство обработки, где могут сравниваться с образцовыми результатами, получаемыми из оперативного запоминающего устройства ОЗУ. Кроме того, в ОЗУ может быть записана программа проверки, поступающая от устройства ввода программы через устройство распределения информации, которое управляет также работой генератора стимулирующих сигналов ГСС и измерительного коммутатора, на вход которого подаются напряжения от ГСС. Эти напряжения преобразуются преобразователями в соответствующие сигналы, воздействующие на ОД. Такими сигналами могут быть как электрические сигналы, так и неэлектрические. Представление информации оператору О осуществляется сред-

ством представления информации СПИ. В зависимости от полученной информации оператор через устройство управления УУ может воздействовать на УВП, изменяя программу проверки.

Цифровые преобразователи

Основные понятия и определения. В настоящее время широко применяют цифровые измерительные приборы (ЦИП), имеющие ряд достоинств по сравнению с аналоговыми электроизмерительными приборами. Цифровыми называют приборы, автоматически вырабатывающие дискретные сигналы измерительной информации, показания которых представляются в цифровой форме. В цифровых приборах в соответствии с размером измеряемой величины образуется код, а затем в соответствии с кодом значение измеряемой величины представляется на отсчетном устройстве в цифровой форме. Применительно к цифровым приборам код — условные сигналы (обычно электрические). Код может подаваться в цифровое регистрирующее устройство, вычислительную машину или другие автоматические устройства.

Неавтоматические лабораторные компенсаторы и мосты с декадными магазинами сопротивлений по существу являются цифровыми приборами (неавтоматическими), так как в них положение ручек декадных магазинов сопротивления после уравнивания (оператором) образует код и результат выражается в цифровой форме. Развитие электроизмерительной техники, а также других смежных областей привело к созданию автоматических цифровых приборов, которые рассматриваются в этой главе.

Цифровой прибор включает в себя два обязательных функциональных узла: аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и цифровое отсчетное устройство (ЦОУ).

АЦП выдает код в соответствии со значением измеряемой величины, а цифровое отсчетное устройство отражает это значение в цифровой форме. АЦП являются не только составной частью ЦИП, они также используются в измерительных информационных, управляющих и других системах. АЦП выпускаются промышленностью и в качестве автономных устройств. Автономные АЦП в отличие от ЦИП не имеют десятичного отсчетного устройства, т. е. они дают на выходе только код; обычно они выполняются более быстродействующими, чем ЦИП, но менее точными; чаще всего они имеют один диапазон для одной измеряемой величины.

Кроме АЦП, к цифровым преобразователям относят цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), предназначенные для преобразования кода в аналоговую квантованную величину. В настоящее время промышленность выпускает АЦП и ЦАП не только в виде автономных средств измерений, но и в виде интегральных микросхем.

Кроме АЦП и ЦОУ, ЦИП может содержать предварительные аналоговые преобра-

зователи, преобразующие измеряемую величину в другую величину, более удобную для преобразования в код. Например, аналоговыми преобразователями могут быть делители напряжения, усилители, преобразователи и т. п.

При рассмотрении вопросов, общих для ЦИП, АЦП и АДИП, вводится понятие цифровое измерительное устройство (ЦИУ), под которым понимается любое из указанных средств измерений. Для образования кода непрерывная измеряемая величина в ЦИУ дискретизируется во времени и квантуется по уровню.

Дискретизацией непрерывной во времени величины $x(t)$ называется операция ее преобразования в прерывную во времени, т. е. величину, значения которой отличны от нуля и совпадают с соответствующими значениями $x(t)$ только в определенные моменты времени. Промежуток между двумя соседними моментами времени дискретизации называют шагом дискретизации, который может быть постоянным или переменным.

Квантованием по уровню непрерывной по уровню величины x называют операцию ее преобразования в квантованную величину. Фиксированные значения квантованной величины называют уровнями квантования, разность между двумя ближайшими уровнями — ступенью, или шагом квантования, или квантом.

Код в ЦИУ вырабатывается в соответствии с квантованной величиной, принимаемой равной измеряемой величине. При преобразовании измеряемой величины в квантованную имеет значение правило установления равенства (способ отождествления) измеряемой и квантованной величины. Отождествление может производиться с ближайшим большим или равным, ближайшим меньшим или равным, а также с ближайшим уровнем квантования.

При аналого-цифровом преобразовании происходит определение отождествляемого уровня квантования, т. е. происходит преобразование непрерывной измеряемой величины в квантованную и образование кода, причем образование кода происходит, как правило, одновременно с преобразованием измеряемой величины в квантованную.

По способу преобразования выделяют три основных метода.

Метод последовательного счета. При этом методе происходит последовательное во времени сравнение измеряемой величины x с известной квантованной величиной x_k , изменяющейся (возрастающей или убывающей) во времени скачками, причем каждый скачок соответствует шагу (ступени) квантования по уровню. Число ступеней, при котором наступает равенство $x_k(t_N) = x$ (с некоторой погрешностью), равно номеру отождествляемого уровня квантования. В процессе сравнения образуется единичный код, соответствующий номеру отождествляемого уровня квантования. Возможно инверсное преобразование, при котором известная постоянная величина сравнивается с равномерно квантуемой величиной, функционально связанной с

измеряемой величиной.

^ Метод последовательного приближения (сравнения и вычитания, поразрядного уравнивания). При этом методе происходит последовательное во времени сравнение измеряемой величины x с известной квантованной величиной x_k , изменяющейся во времени скачками по определенному правилу (исключая единичную систему счисления). Значение известной величины, при которой наступает равенство $x_k (\text{/,}) = x$, соответствует номеру отождествляемого уровня квантования. Код, образуемый в процессе этой операции, соответствует отождествляемому уровню.

^ Метод считывания. При этом методе происходит одновременное сравнение измеряемой величины x с известными величинами, значения которых равны уровням квантования. Известная величина, равная измеряемой, дает номер отождествляемого уровня квантования, в соответствии с которым образуется код.

КЛАССИФИКАЦИЯ ЦИУ.

В зависимости от способа преобразования непрерывной величины в код выделяют следующие группы ЦИУ.

ЦИУ последовательного счета. Эти ЦИУ основаны на использовании метода последовательного счета. Отличительный признак таких приборов состоит в том, что измеряемая величина сначала преобразуется в число-импульсный код, который затем преобразуется в другие коды, удобные для управления отсчетным устройством и для выдачи кода в другие устройства.

^ ЦИУ последовательного приближения (поразрядного уравнивания, кодово-импульсные) основаны на использовании метода последовательного приближения.

^ ЦИУ считывания строятся с использованием метода считывания.

Известны ЦИУ, в которых применяется комбинация способов преобразования.

По измеряемой величине ЦИУ разделяют на вольтметры, частотомеры, фазометры, омметры, вольтметры и т. д. В зависимости от наличия усреднения измеряемой величины ЦИУ делят на приборы, измеряющие мгновенное значение, и приборы, измеряющие среднее значение за определенный интервал времени (интегрирующие). Кроме того, все ЦИУ делят на группы по точности, быстродействию, надежности. По режиму работы ЦИУ разделяют на циклические и следящие.

В циклических ЦИУ весь процесс преобразования протекает всегда независимо от размера измеряемой величины по заданной программе от начала до конца. В следящих ЦИУ процесс преобразования начинается только при отклонении измеряемой величины от ранее измеренного размера на определенное приращение. Характер процесса преобразования зависит от приращения измеряемой величины.

Характеристики устройств

Статические погрешности. Основная погрешность ЦИУ складывается обычно из следующих четырех составляющих: 1- погрешности дискретности; 2 -погрешности реализации уровней квантования, возникающей из-за того, что измеряемая величина квантуется в соответствии с реальными значениями уровней, а отсчет производится в соответствии с принятыми значениями (номерами); 3 - погрешности от наличия порога чувствительности сравнивающего устройства, возникающей при сравнении неизвестной величины с известной погрешности, 4 - от действия помех на ЦИУ.

Составляющие 2, 3, 4 обусловлены несовершенством ЦИУ, и поэтому их называют составляющими инструментальной погрешности. Погрешность дискретности — методическая погрешность.

^ Диапазон измерений, вид кода и число разрядов кода, значение единицы младшего разряда, разрешающая способность. Для ЦИУ указывают диапазон измерений или поддиапазоны измерений, если прибор многопредельный.

^ Входное сопротивление. Оно влияет на потребляемую от исследуемого объекта мощность и в конечном итоге на результат измерения. Чтобы влияние было минимальным, например у вольтметров, входное сопротивление делают по возможности большим. У современных цифровых вольтметров постоянного тока на некоторых поддиапазонах входное сопротивление достигает 1010 Ом и более, а при использовании входного делителя — 10⁶—10⁷ Ом.

Входная цепь ЦИУ может являться источником тока. Поэтому для ЦИУ нормируют предельное значение входного тока.

Для ЦИУ переменного тока эквивалентную схему входной цепи принимают как параллельно включенные резистор и конденсатор, сопротивление и емкость которых указывают отдельно.

Помехозащищенность. Помехи, действующие на ЦИУ, делятся на помехи нормального вида и помехи общего вида. Рассмотрим действие помех на примере вольтметров. Помехи нормального вида (например, наводки на соединительные провода) — помехи, эквивалентный генератор которых включается последовательно с источником измеряемого напряжения. Помеха общего вида возникает из-за разности потенциалов между источником измеряемого напряжения U_x и точкой заземления. Ток от источника помехи общего вида, создает падение напряжения — помеху нормального вида.

Для уменьшения действия помех нормального вида в виде переменного напряжения (главным образом, частотой 50 Гц) применяют фильтры или ЦИУ с принципом действия, включающим в себя интегрирование входного сигнала.

Для борьбы с помехами общего вида схему прибора и его конструкцию выбирают так, чтобы сопротивление контура для тока помехи было максимальным. Это достигается, например, изолированием входной цепи прибора от корпуса прибора.

Надежность. Для характеристики надежности ЦИУ используют показатели надежности. Для ЦИУ напряжения, тока и сопротивления устанавливают следующие показатели надежности: безотказность, долговечность и ремонтпригодность.

3. Применение преобразователей - сенсор

Применение электрических приборов и преобразователей для измерения неэлектрических величин.

Измерительный преобразователь — техническое средство с нормируемыми метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации и передачи, но непосредственно не воспринимаемый

Среди множества величин, которые необходимо измерять, значительное их число являются неэлектрическими. Поэтому промышленность выпускает разнообразные приборы и преобразователи для измерения неэлектрических величин, причем среди них значительную долю составляют электрические средства измерений.

Причины широкого применения электроизмерительных приборов для измерения неэлектрических величин заключаются в следующем:

- 1) приборы позволяют осуществлять дистанционные измерения, т. е. измерения, когда результат измерения может быть получен на значительном расстоянии от объекта исследования;
- 2) в приборах возможны автоматические преобразования как информативных параметров сигналов, так и результатов измерений, с целью, например, введения поправок;
- 3) эти приборы более удобны, чем неэлектрические, для решения задач автоматического управления;
- 4) приборы дают возможность регистрировать как очень медленно меняющиеся величины, так и быстро меняющиеся (например, с помощью электронного осциллографа), могут иметь широкий диапазон измерений.

^ Структурные схемы электрических приборов для измерения неэлектрических величин. Особенностью электрических приборов для измерения неэлектрических величин является обязательное наличие измерительного преобразователя неэлектри-

ческой величины в электрическую.

Измерение неэлектрических величин электрическими методами получило широкое применение и развитие вследствие возможности непрерывного измерения, измерения на расстоянии, высокой точности и чувствительности.

В большинстве случаев измерение неэлектрической величины сводится к преобразованию ее в однозначно зависимую от нее электрическую величину, измеряя которую и определяют неэлектрическую величину.

Элемент измерительного устройства, выполняющий это преобразование, называется измерительным преобразователем или датчиком.

Измерительные преобразователи делятся на две группы: параметрические, преобразующие неэлектрическую величину в один из параметров электрической цепи r , L или C , и генераторные, в которых неэлектрическая величина преобразуется в э. д. с.

К наиболее распространенным параметрическим преобразователям относятся:

1. Реостатные преобразователи. Работа их основана на изменении сопротивления реостата, движок которого перемещается под воздействием измеряемой неэлектрической величины, например уровня жидкости, линейного перемещения детали и т. д.
2. Проволочные преобразователи (тензо сопротивления). Работа их основана на изменении сопротивления проволоки при ее деформации.
3. Преобразователи — терморезисторы (термо сопротивление). Работа их основана на зависимости сопротивления преобразователя от температуры.
4. Индуктивные преобразователи. Изменение индуктивности преобразователя от изменения положения одной из его частей под действием измеряемой величины. используется для измерения силы, давления, линейного перемещения детали.
5. Емкостные преобразователи. Изменение емкости преобразователя под действием измеряемой неэлектрической величины: силы, давления линейного или углового перемещения, содержания влаги и т. д. используется для измерения этих величин.
6. Фотоэлектрические преобразователи. Получение фототока, зависящего от измеряемой величины, или получение импульсов фототока, частота которых зависит от измеряемой неэлектрической величины, используется для измерения освещенности, температуры, прозрачности и мутности жидкости, линейных размеров и других величин.

Генераторные преобразователи по принципу работы делятся на группы:

1. Индукционные преобразователи. Работа их основана на преобразовании измеряемой неэлектрической величины, например скорости, линейных или угловых перемещений, в индуктированную э. д. с.
2. Термоэлектрические преобразователи. Возникновение термо-э. д. с. и ее зависимость от температуры используется для ее измерения.
3. Пьезоэлектрические преобразователи. Пьезоэлектрический эффект, т. е. возникновение э. д. с. в некоторых кристаллах под действием механических сил, используется для измерения этих сил, давления и других величин.
4. Фотоэлектронные преобразователи .

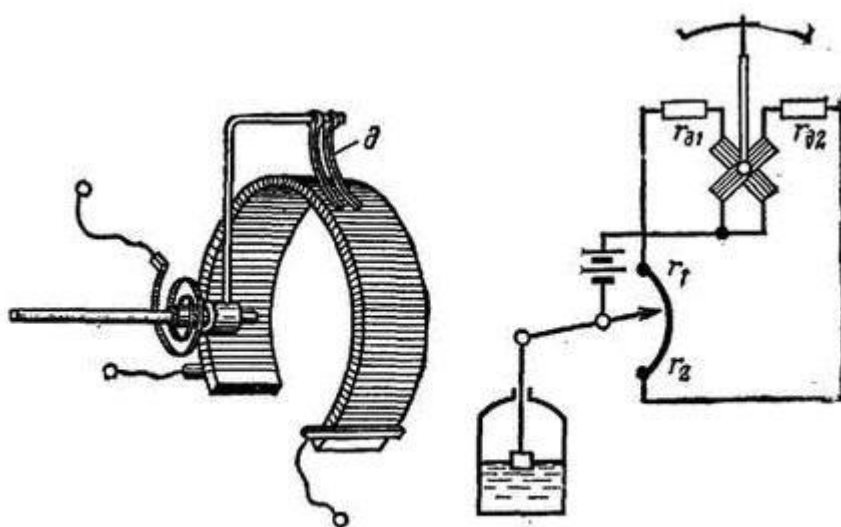
Устройства для измерения неэлектрических величин, принципиально состоящие из

преобразователя, соединительных проводов и измерителя, проградуированного в значениях измеряемой величины, в действительности усложняются применением сложных схем, источников питания, стабилизаторов, выпрямителей, усилителей и т. д.

Рассмотрим в качестве примеров некоторые из методов измерения неэлектрических величин.

а) Реостатные преобразователи

Реостатный преобразователь представляет собой реостат (рис. ниже), движок которого перемещается под действием измеряемой неэлектрической величины x , так что сопротивление реостата r зависит от x : $r = f(x)$. Измерив r , находят x .

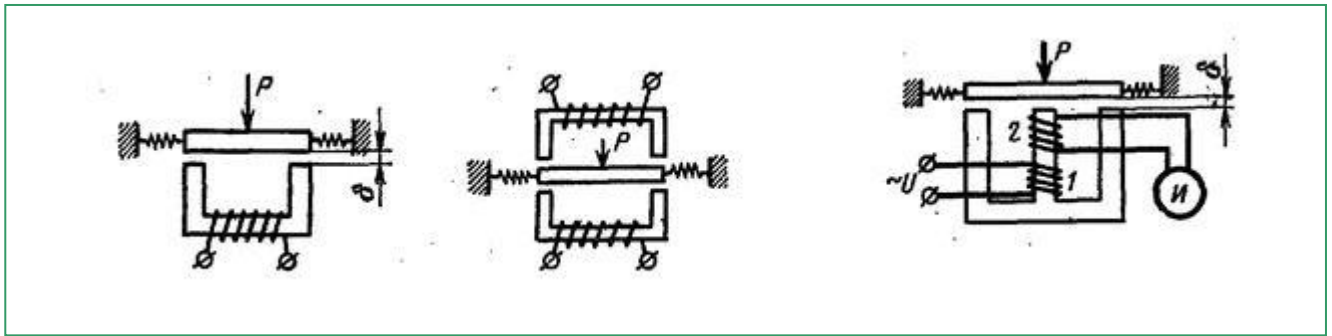


Пример применения реостатного преобразователя для измерения уровня (объема) жидкости показан на рис. выше.

Изменение положения поплавка, зависящего от уровня жидкости, изменяет сопротивления r_1 и r_2 соединенные последовательно с катушками логометра; изменение отношения токов в катушках вызывает изменение показаний измерителя.

б) Индуктивные преобразователи

Индуктивный преобразователь (рис. ниже) представляет собой электромагнит, якорь которого перемещается под действием измеряемой величины P : силы, давления, линейного перемещения.



При изменении положения якоря изменяются воздушный зазор, индуктивность катушки и ее сопротивление z , так что $z = f(p)$.

У дифференциального преобразователя (рис. выше) изменение положения якоря увеличивает индуктивность одной катушки и уменьшает индуктивность другой, что повышает чувствительность преобразователя. Включение катушек в смежные плечи измерительного моста повышает точность измерения.

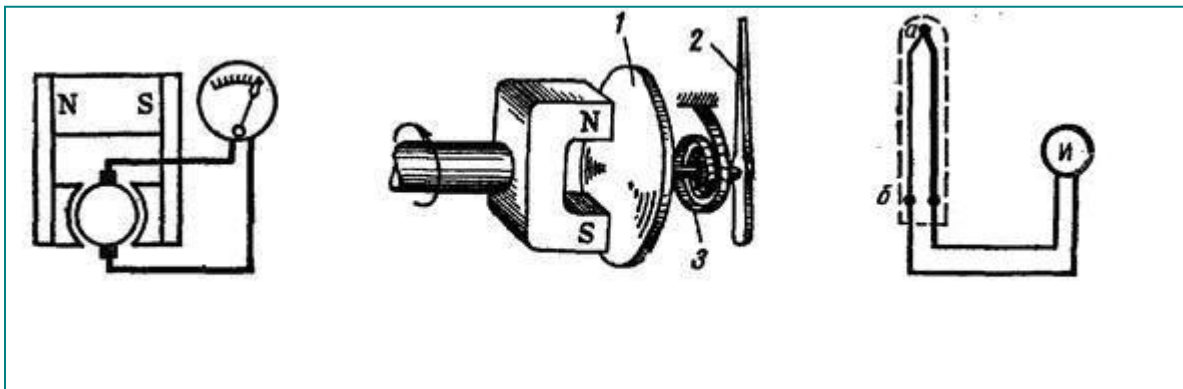
В индуктивном преобразователе трансформаторного типа (рис. выше) по первичной обмотке проходит переменный ток с постоянным действующим значением.

Измеряемая неэлектрическая величина p , изменяя воздушный зазор, изменяет магнитное сопротивление цепи и магнитный поток. В результате изменяется индуцированная во вторичной обмотке э. д. с. E_2 , и показания вольтметра U_2 зависят от измеряемой величины,

т. е. $E_2 \approx U_2 = f(p)$

в) Индукционные преобразователи

Индукционный тахометр — это прибор для измерения частоты вращения, в котором измеряемая величина преобразуется в пропорциональную ей э. д. с. Тахометр представляет собой маленький магнитоэлектрический генератор (рис. ниже), якорь которого вращается в магнитном поле постоянного магнита и, следовательно, э. д. с. которого пропорциональна частоте вращения якоря. Якорь механически связан с валом машины, скорость которой измеряется, поэтому показания вольтметра, соединенного с зажимами якоря, пропорциональны измеряемой частоте вращения.



В индукционном тахометре с постоянным магнитом NS (рис. выше) последний механически связан с валом машины, частота вращения которой измеряется. При его вращении в алюминиевом диске 1, расположенном на одной оси со стрелкой 2, ин-

дуктируются вихревые токи. Взаимодействие этих токов с полем постоянного магнита создает вращающий момент, вызывающий поворот диска и указательной стрелки на угол, при котором этот момент уравнивается моментом пружины 3. На шкале тахометра наносятся деления, соответствующие различным частотам вращения.

г) Термоэлектрические преобразователи

Сочетание магнитоэлектрического измерителя с термопарой (рис. выше), предназначенное для измерения температур, называется термоэлектрическим пирометром. Нагревание рабочего конца термопары вызывает термо-э. д. с. и ток в цепи измерителя, по отклонению подвижной части которого и определяется искомая температура. Провода термопары должны быть достаточно длинными, чтобы их свободные концы находились в среде с температурой, при которой градуировался пирометр. Материалами для термопар служат: медь — константан (до 300°C), медь — копель (до 600°C), железо — копель (до 800°C), хромель — копель (до 800°C), хромель — алюмель (до 1300°C), платина — платинородий (до 1600°C).

Для защиты от механических повреждений и действия газов термопары помещают в защитные трубки из латуни, стали, фарфора и других материалов.

Измерительный преобразователь неэлектрической величины устанавливает однозначную функциональную зависимость выходной электрической величины от входной измеряемой неэлектрической величины.

Например, в приборе для измерения угла поворота применен индуктивный ДИП. Катушка / питается от источника переменного тока. Изменение положения ферромагнитного подвижного якоря *A* относительно неподвижного сердечника *B* в процессе измерения вызывает изменение магнитного сопротивления сердечников катушек 2 и 2' на одинаковые значения с противоположными знаками, в результате чего ЭДС, наводимые переменным магнитным потоком в катушках, получают приращения. Разность ЭДС на выходе получается встречным включением катушек 2 и 2' и измеряется милливольтметром *mV*.

В настоящее время находят применение приборы уравнивающего преобразования неэлектрических величин. В таких приборах могут быть получены более высокая точность, большее быстродействие и меньшее потребление энергии от объекта исследования. В качестве узлов обратной связи используют обращенные преобразователи, преобразующие электрическую величину в неэлектрическую (электромеханические преобразователи, лампы накаливания).

^ Характеристики измерительных преобразователей неэлектрических величин. Важнейшими метрологическими характеристиками преобразователей являются: номинальная статическая характеристика преобразования, чувствительность, основная погрешность, дополнительные погрешности, или функции влияния, вариация выходного сигнала, выходное полное сопротивление динамические характеристики и т. д.

К важнейшим неметрологическим характеристикам относят габариты, массу, удобство

монтажа и обслуживания, взрывобезопасность, устойчивость к механическим, тепловым, электрическим и другим перегрузкам, надежность, стоимость изготовления и эксплуатации и т. п.

В зависимости от вида выходного сигнала все измерительные преобразователи делят на *параметрические* и *генераторные*. Их классифицируют также по принципу действия.

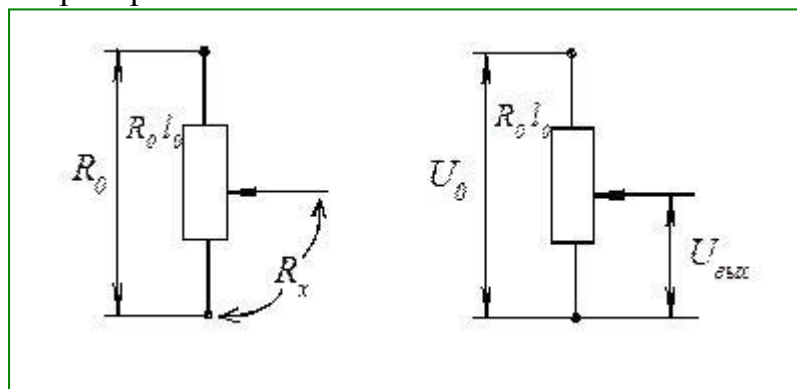
ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Общие сведения. В параметрических преобразователях выходной величиной является параметр электрической цепи (R, L, M, C). При использовании параметрических преобразователей необходим дополнительный источник питания, энергия которого используется для образования выходного сигнала преобразователя.

Реостатные преобразователи. Реостатные преобразователи основаны на изменении электрического сопротивления проводника под влиянием входной величины — перемещения. Реостатный преобразователь представляет собой реостат, щетка (подвижный контакт) которого перемещается под воздействием измеряемой неэлектрической величины. На рис. схематически показаны некоторые варианты конструкций реостатных преобразователей. Преобразователь состоит из обмотки, нанесенной на каркас, и щетки. Для изготовления каркасов применяются диэлектрики и металлы. Проволоку для обмотки выполняют из сплавов (сплав платины с иридием, константан, нихром и фехраль). Для обмотки обычно используют изолированный провод. После изготовления обмотки изоляцию провода счищают в местах соприкосновения его со щеткой. Щетку преобразователя выполняют либо из проволок, либо из плоских пружинящихся полосок, причем используют как чистые металлы (платина, серебро), так и сплавы (платина с иридием, фосфористая бронза и т. д.).

Габариты преобразователя определяются значением измеряемого перемещения, сопротивлением обмотки и мощностью, выделяемой в обмотке.

Для получения нелинейной функции преобразования применяют функциональные реостатные преобразователи. Нужный характер преобразования часто достигается профилированием каркаса преобразователя



В рассматри-

ваемых реостатных преобразователях статическая характеристика преобразования имеет ступенчатый характер, так как сопротивление изменяется скачками, равными сопротивлению одного витка. Это вызывает погрешность, максимальное значение которой $y = \Delta R/R$, где ΔR — максимальное сопротивление одного витка; R — полное сопротивле-

ние преобразователя. Иногда применяют реохордные преобразователи, в которых щетка скользит вдоль оси проволоки. У этих преобразователей отсутствует указанная погрешность. Реостатные преобразователи включают в измерительные цепи в виде равновесных и неравновесных мостов, делителей напряжения и т. п.

К достоинствам преобразователей относится возможность получения высокой точности преобразования, значительных по уровню выходных сигналов и относительная простота конструкции. Недостатки — наличие скользящего контакта, необходимость относительно больших его перемещений, а иногда и значительного усилия для перемещения.

Применяют реостатные преобразователи для преобразования сравнительно больших перемещений и других неэлектрических величин (усилия, давления и т. п.), которые могут быть преобразованы в перемещение.

Тензочувствительные преобразователи (тензорезисторы). В основу работы преобразователей положен тензоэффект, заключающийся в изменении активного сопротивления проводника (полупроводника) под действием вызываемого в нем механического напряжения и деформации.

l/l — относительная деформация проволоки. Изменение сопротивления проволоки при механическом воздействии на нее объясняется изменением геометрических размеров (длины, диаметра) и удельного сопротивления материала. $\Delta R/R = S \Delta l/l$, где S — коэффициент тензочувствительности; $\Delta R/R = s \Delta$



Если проволоку подвергнуть механическому воздействию, например растяжению, то сопротивление ее изменится. Относительное изменение сопротивления проволоки

2,1). Константан обладает малым температурным коэффициентом электрического сопротивления, что очень важно, так как изменение сопротивления преобразователей при деформациях, например, стальных деталей соизмеримо с изменением сопротивления преобразователя при изменении температуры. В качестве подложки используют тонкую (0,03—0,05 мм) бумагу, а также пленку лака или клея, а при высоких температурах — слой цемента. Для изготовления преобразователей применяют главным образом константановую проволоку диаметром 0,02—0,05 мм ($S = 1,9$

Применяют также фольговые преобразователи, у которых вместо проволоки используется фольга и пленочные тензорезисторы, получаемые путем возгонки тензочувствительного материала с последующим осаждением его на подложку.

Для наклеивания проволоки на подложку и всего преобразователя на деталь применяют клеи (раствор целлулоида в ацетоне, клей БФ-2, БФ-4, бакелитовый и т. д.). Для высоких температур (выше 200 °С) используют жаростойкие цементы, кремнийорганические лаки и клеи и т. п.

Преобразователи выполняют различных размеров в зависимости от назначения. Наиболее часто используют преобразователи с длиной решетки (базой) от 5 до 50 мм, имеющие сопротивление 30—500 Ом.

Изменение температуры вызывает изменение характеристики преобразования тензорезисторов, что объясняется температурной зависимостью сопротивления преобразователя и различием температурных коэффициентов линейного расширения материала тензорезистора и исследуемой детали. Влияние температуры устраняется обычно путем применения соответствующих методов температурной компенсации.

Наклеенный тензочувствительный преобразователь невозможно снять с одной детали и наклеить на другую. Поэтому для определения характеристик преобразования (коэффициента S) прибегают к выборочной градуировке преобразователей, что дает значение коэффициента S с погрешностью $\pm 1\%$. Методы определения характеристик тензорезисторов регламентированы стандартом. Достоинства этих преобразователей — линейность статической характеристики преобразования, малые габариты и масса, простота конструкции. Недостатком их является малая чувствительность.

В тех случаях когда требуется высокая чувствительность, находят применение тензочувствительные преобразователи, выполненные в виде полосок из полупроводникового материала. Коэффициент S у таких преобразователей достигает нескольких сотен. Однако воспроизводимость характеристик полупроводниковых преобразователей плохая. В настоящее время серийно выпускают интегральные полупроводниковые тензорезисторы, образующие мост или полумост с элементами термокомпенсации.

В качестве измерительных цепей для тензорезисторов используют равновесные и неравновесные мосты. Тензорезисторы применяют для измерения деформаций и других неэлектрических величин: усилий, давлений, моментов и т. п.

Термочувствительные преобразователи (терморезисторы). Принцип действия преобразователей основан на зависимости электрического сопротивления проводников или полупроводников от температуры.

Между терморезистором и исследуемой средой в процессе измерения происходит теплообмен. Так как терморезистор при этом включен в электрическую цепь, с помощью которой производят измерение его сопротивления, то по нему протекает ток, выделяющий в нем теплоту. Теплообмен терморезистора со средой происходит из-за теплопроводности среды и конвекции в ней, теплопроводности самого терморезистора и арматуры, к которой он крепится, и, наконец, из-за излучения. Интенсивность теплообмена, а следовательно, и температура терморезистора зависят от его геометрических

размеров и формы, от конструкции защитной арматуры, от состава, плотности, теплопроводности, вязкости и других физических свойств газовой или жидкой среды, окружающей терморезистор, а также от температуры и скорости перемещения среды.

Таким образом, зависимость температуры, а следовательно, и сопротивления терморезистора от перечисленных выше факторов может быть использована для измерения различных неэлектрических величин, характеризующих газовую или жидкую среду. При конструировании преобразователя стремятся к тому, чтобы теплообмен терморезистора со средой в основном определялся измеряемой неэлектрической величиной.

По режиму работы терморезисторы бывают перегревные и без преднамеренного перегрева. В преобразователях без перегрева ток, проходящий через терморезистор, практически не вызывает перегрева, и температуру последнего определяет температура среды; эти преобразователи применяют для измерения температуры. В перегревных преобразователях электрический ток вызывает перегрев, зависящий от свойств среды. Перегревные преобразователи используют для измерения скорости, плотности, состава среды и т. д. Так как на перегревные терморезисторы влияет температура среды, обычно применяют схемные методы компенсации этого влияния.

Для измерения температуры наиболее распространены терморезисторы, выполненные из платиновой или медной проволоки.

Стандартные платиновые терморезисторы применяют для измерения температуры в диапазоне от -260 до $+1100^{\circ}\text{C}$, медные — в диапазоне от -200 до $+200^{\circ}\text{C}$. Низкотемпературные платиновые терморезисторы (ГОСТ 12877 — 76) применяют для измерения температуры в пределах от -261 до -183°C .

Начальные сопротивления (при 0°C) платиновых стандартных терморезисторов равны 1, 5, 10, 46, 50, 100 и 500 Ом, медных — 10, 50, 53 и 100 Ом.

Допустимое значение тока, протекающего по терморезистору при включении его в измерительную цепь, должно быть таким, чтобы изменение сопротивления терморезистора при нагреве не превышало 0,1 % начального сопротивления.

Помимо платины и меди, иногда для изготовления терморезисторов используют никель.

Для измерения температуры применяют также полупроводниковые терморезисторы (термисторы) различных типов, которые характеризуются большей чувствительностью (ТКС термисторов отрицательный и при температуре 20° в 10 – 15 раз превышает ТКС меди и платины. Термисторы используют в диапазоне температур от -60 до $+120^{\circ}\text{C}$.

Для измерения температуры от -80 до $+150^{\circ}\text{C}$ применяют термодиоды и термотранзисторы, у которых под действием температуры изменяется сопротивление p — n -перехода и падение напряжения на этом переходе. Чувствительность термотранзистора

по напряжению 1,5 — 2,0 мВ/К, что значительно превышает чувствительность стандартных термопар. Эти преобразователи обычно включают в мостовые цепи и цепи в виде делителей напряжения.

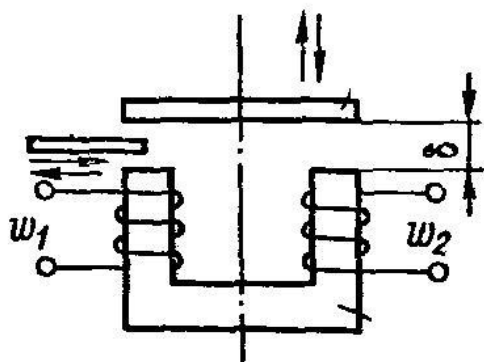
Достоинствами термодиодов и термотранзисторов являются высокая чувствительность, малые размеры и малая инерционность, высокая надежность и дешевизна; недостатками — узкий температурный диапазон и плохая воспроизводимость статической характеристики преобразования. Влияние последнего недостатка уменьшают применением специальных цепей.

Терморезисторы применяют в приборах для анализа газовых смесей. Многие газовые смеси отличаются друг от друга и от воздуха теплопроводностью. Измеряя теплопроводность газовой смеси можно судить о процентном содержании искомого компонента.

В приборах для газового анализа — газоанализаторах — для измерения теплопроводности используют перегревный платиновый терморезистор 1, помещенный в камеру 2 с анализируемым газом. Конструкция терморезистора, арматуры и камеры, а также значение нагревающего тока / выбирают такими, чтобы теплообмен со средой осуществлялся в основном за счет теплопроводности газовой среды.

Для исключения влияния внешней температуры, кроме рабочей, используют компенсационную камеру с терморезистором, заполненную постоянным по составу газом. Обе камеры выполняют в виде единого блока, что обеспечивает камерам одинаковые температурные условия. Рабочий и компенсационный терморезисторы при измерениях включают в соседние плечи моста, что приводит к компенсации влияния температуры.

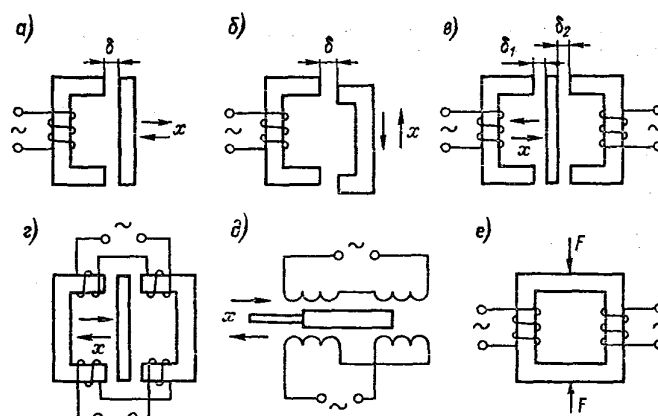
Индуктивные преобразователи. Принцип действия преобразователей основан на зависимости индуктивности или взаимной индуктивности обмоток на магнитопроводе от положения, геометрических размеров и магнитного состояния элементов их магнитной цепи.



На рис. схематически показаны различные типы индуктивных преобразователей. Индуктивный преобразователь (рис, а) с переменной длиной воздушного зазора δ характеризуется нелинейной зависимостью $L = f(\delta)$. Такой преобразователь обычно применяют при перемещениях якоря на 0,01—5 мм.

Значительно меньшей чувствительностью, но линейной зависимостью $L = f(s)$ отличаются преобразователи с переменным сечением воздушного зазора / Эти преобразователи используют при перемещениях до 10—15 мм.

Якорь в индуктивном преобразователе испытывает усилие (нежелательное) притяжения со стороны электромагнита



Индуктивные преобразователи с изменяющейся длиной зазора (а), с изменяющимся сечением зазора (б), дифференциальный (в), дифференциальный трансформаторный (г), дифференциальный трансформаторный с разомкнутой магнитной цепью (д) и магнитоупругий (е). Широко распространены индуктивные дифференциальные преобразователи (рис. в), в которых под воздействием измеряемой величины одновременно и притом с разными знаками изменяются два зазора электромагнитов. Дифференциальные преобразователи в сочетании с соответствующей измерительной цепью (обычно мостовой) имеют более высокую чувствительность, меньшую нелинейность характеристики преобразования, испытывают меньшее влияние внешних факторов и сниженное результирующее усилие на якорь со стороны электромагнита, чем недифференциальные преобразователи.

Для преобразования сравнительно больших перемещений (до 50—100 мм) применяют трансформаторные преобразователи с незамкнутой магнитной цепью (рис. д).

Применяют трансформаторные преобразователи угла поворота, состоящие из неподвижного статора и подвижного ротора с обмотками. Обмотку статора питают переменным током. Поворот ротора вызывает изменение значения и фазы наводимой в его обмотке ЭДС. При повороте ротора на угол $\alpha = n/p$ (p — число полюсов статора) фаза этой ЭДС изменяется на 180° . Такие преобразователи используют при измерении больших угловых перемещений.

Конструкция преобразователя определяется диапазоном измеряемого перемещения. Габариты преобразователя выбирают исходя из необходимой мощности выходного сигнала.

Для измерения выходного параметра индуктивных преобразователей наибольшее применение получили мостовые (равновесные и неравновесные) цепи, а также компенсационная (в автоматических приборах) цепь для дифференциальных трансформаторных

преобразователей.

Индуктивные преобразователи используют для преобразования перемещения и других неэлектрических величин, которые могут быть преобразованы в перемещение (усилие, давление, момент и т. д.).

По сравнению с другими преобразователями перемещения индуктивные преобразователи отличаются значительными по мощности выходными сигналами, простотой и надежностью в работе.

Недостаток их — обратное воздействие преобразователя на исследуемый объект (воздействие электромагнита на якорь) и влияние инерции якоря на частотные характеристики прибора.

Емкостные преобразователи. Емкостные преобразователи основаны на зависимости электрической емкости конденсатора от размеров, взаимного расположения его обкладок и от диэлектрической проницаемости среды между ними.

Преобразователь представляет собой конденсатор, одна пластина которого перемещается под действием измеряемой величины x относительно неподвижной пластины. Статическая характеристика преобразования $C = f_3$. Такие преобразователи используют для измерения малых перемещений (менее 1 мм). δ) нелинейна. Чувствительность преобразователя возрастает с уменьшением расстояния δ

Малое рабочее перемещение пластин приводит к погрешности от изменения расстояния между пластинами при колебаниях температуры. Выбором размеров деталей преобразователя и материалов добиваются снижения этой погрешности.

Применяют также дифференциальные преобразователи, у которых имеется одна подвижная и две неподвижные пластины. При воздействии измеряемой величины x у этих преобразователей одновременно изменяются емкости C_1 и C_2 . В этих преобразователях легко получить требуемую характеристику преобразования путем профилирования пластин.

Преобразователи с использованием зависимости $C = f$) применяют для измерения уровня жидкостей, влажности веществ, толщины изделий из диэлектриков и т. п. Для примера рассмотрим устройство преобразователя емкостного уровнемера. Емкость между электродами, опущенными в сосуд, зависит от уровня жидкости, так как изменение уровня ведет к изменению средней диэлектрической проницаемости среды между электродами. Изменением конфигурации пластин можно получить желаемый характер зависимости показаний прибора от объема (массы) жидкости.

Для измерения выходного параметра емкостных преобразователей применяют мостовые цепи и цепи с использованием резонансных контуров. Последние позволяют создавать приборы с высокой чувствительностью, способные реагировать на перемещения порядка 10^{-7} мм. Цепи с емкостными преобразователями обычно питают током повышенной частоты (до десятков мегагерц), что вызвано желанием увеличить сигнал, по-

падающий в измерительный прибор, и необходимостью уменьшить шунтирующее действие сопротивления изоляции.

Достоинствами емкостных преобразователей являются простота устройства, высокая чувствительность и возможность получения малой инерционности преобразователя, недостатками — влияние внешних электрических полей, паразитных емкостей, температуры, влажности, относительная сложность цепей включения и необходимость в специальных источниках питания повышенной частоты.

Индукционные преобразователи. Индукционные преобразователи основаны на использовании закона электромагнитной индукции.

Индукционные преобразователи применяют для измерения скорости линейных и угловых перемещений. Выходной сигнал этих преобразователей может быть проинтегрирован или продифференцирован во времени с помощью электрических интегрирующих или дифференцирующих устройств. После этих преобразований информативный параметр сигнала становится пропорциональным, соответственно, перемещению или ускорению. Поэтому индукционные преобразователи используют также для измерения линейных и угловых перемещений и ускорений.

Наибольшее применение индукционные преобразователи получили в приборах для измерения угловой скорости (тахометрах) и в приборах для измерения параметров вибраций.

Индукционные преобразователи для тахометров представляют собой небольшие (1 — 100 Вт) генераторы постоянного или переменного тока обычно с независимым возбуждением от постоянного магнита, ротор которых механически связан с испытуемым валом. При использовании генератора постоянного тока об угловой скорости судят по ЭДС генератора, а в случае применения генератора переменного тока угловую скорость можно определить по значению ЭДС или ее частоте.

Погрешности индукционных преобразователей определяются главным образом изменением магнитного поля во времени и при изменении температуры, а также температурными изменениями сопротивления обмотки.

Основные достоинства индукционных преобразователей заключаются в сравнительной простоте конструкции, надежности работы и высокой чувствительности. Недостаток — ограниченный частотный диапазон измеряемых величин.

^ Пьезоэлектрические преобразователи. Такие преобразователи основаны на использовании прямого пьезоэлектрического эффекта, заключающегося в появлении электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов (кварца, турмалина, сегнетовой соли и др.) под влиянием механических напряжений.

Из кристалла кварца вырезается пластинка, грани которой должны быть перпендикулярны оптической оси Oz , механической оси Oy и электрической оси Ox кристал-

ла. При воздействии на пластину усилия F_x вдоль электрической оси на гранях появляются заряды $Q_x = kF_x$, где k — пьезоэлектрический коэффициент (модуль).

При воздействии на пластину усилия F_y вдоль механической оси на тех же гранях x возникают заряды $Q_y = kF_y a/b$, где a и b — размеры граней пластины. Механическое воздействие на пластину вдоль оптической оси не вызывает появления зарядов. Размеры пластин и их число выбирают исходя из конструктивных соображений и требуемого значения заряда. Заряд, возникающий в пьезоэлектрическом преобразователе, «стекает» по изоляции и входной цепи измерительного прибора. Поэтому приборы, измеряющие разность потенциалов на пьезоэлектрических преобразователях, должны иметь высокое входное сопротивление ($10^{12} — 10^5$ Ом), что практически обеспечивается применением электронных усилителей с высоким входным сопротивлением.

Из-за «стекания» заряда эти преобразователи используют для измерения только быстро изменяющихся величин (переменных усилий, давлений, ускорений и т. д.).

Находят применение пьезоэлектрические преобразователи — пьезорезонаторы, в которых используются одновременно прямой и обратный пьезоэффекты. Последний заключается в том, что если на электроды преобразователя подать переменное напряжение, то в пьезочувствительной пластине возникнут механические колебания, частота которых f_p (резонансная частота) зависит от толщины h пластины, модуля упругости E и плотности ρ ее материала. При включении такого преобразователя в резонансный контур генератора частота генерируемых электрических колебаний определяется частотой f_f . При изменении значений h , E или ρ под влиянием механических или температурных воздействий частота f_f изменится и, соответственно, изменится частота генерируемых колебаний. Этот принцип используют для преобразования давления, усилия, температуры и других величин в частоту.

Гальванические преобразователи. Преобразователи основаны на зависимости ЭДС гальванической цепи от химической активности ионов электролита, т. е. от концентрации ионов и окислительно-восстановительных процессов в электролите. Эти преобразователи применяют для определения реакции раствора (кислая, нейтральная, щелочная), которая зависит от активности водородных ионов раствора.

Измерители температуры

Общие сведения. Электрические приборы, предназначенные для измерения температуры, называют электрическими термометрами. Электрический термометр представляет собой сочетание (комплект) преобразователя температуры (терморезистора, термопары и т. д.) с электрическим измерительным прибором.

В зависимости от типа используемого термопреобразователя приборы называют термометрами сопротивления, термоэлектрическими термометрами, термотранзисторными термометрами и др.

Приборы для измерения температуры, использующие энергию нагретых тел, называют пирометрами. В отличие от термометров они предназначены для бесконтактного измерения температуры.

Электрические термометры сопротивления. Прибор представляет собой терморезистор, включенный в измерительную цепь, которой в большинстве случаев является равновесный или неравновесный мост.

Усложнение современного производства, развитие научных исследований в различных направлениях привело к необходимости измерять или контролировать одновременно сотни, а иногда и тысячи физических величин. При этом наметился переход к принятию решений на основании использования результатов не отдельных измерений, а потоков измерительной информации, интенсивность которых возрастает за счет увеличения частотного диапазона и числа измеряемых величин. Например, контроль за состоянием космической станции «Салют-7» осуществляется при помощи 2100 первичных измерительных преобразователей, причем в одну секунду проводится 25 600 измерений.

Информационные телеметрические системы

Естественная физиологическая ограниченность возможностей человека в восприятии и переработке больших объемов информации привела к возникновению такого вида средств измерений, как измерительные информационные системы (ИИС). По функциональному назначению ИИС делят на измерительные системы, системы автоматического контроля, системы технической диагностики.

В последнее время получили распространение измерительно-вычислительные комплексы (ИВК) — вид ИИС, в состав которых входит свободно программируемая ЭВМ, используемая не только для обработки результатов измерения, но и для управления самим процессом измерения, а также для формирования управляющих воздействий, на объект исследования.

По организации алгоритма функционирования ИИС различают системы с жестким заранее заданным алгоритмом функционирования, программируемые системы и адаптивные системы. В системах с жестким алгоритмом функционирования алгоритм работы ИИС не меняется, в связи с чем такая система может применяться для исследования объектов, работающих в определенном режиме. В программируемых системах алгоритм работы изменяется в соответствии с заранее заданной программой, которая составляется в зависимости от условий функционирования объекта исследования. В адаптивных системах алгоритм работы, а иногда и структура ИИС изменяются, приспосабливаясь к изменениям измеряемых величин и условий работы объекта исследования, в связи с чем адаптивная система может применяться для исследований объектов, различающихся по своим характеристикам. При построении адаптивной ИИС требуется меньшее количество предварительной информации, чем при построении измерительных информационных систем с жестким алгоритмом функционирования, что имеет большое значение при исследовании новых объектов, характеристики которых еще мало известны.

Наиболее перспективным методом проектирования ИИС в настоящее время является принцип агрегатно-модульного построения различных систем из сравнительно ограниченного набора выпускаемых промышленностью унифицированных узлов.

Агрегатно-модульный принцип построения ИИС предполагает применение стандартных интерфейсов, под которыми понимают как совокупность правил протоколов и программного обеспечения процесса обмена информацией, так и технические средства сопряжения модулей в системе. Наиболее распространенными для ИИС в настоящее время являются приборный интерфейс и интерфейс КАМАК. Приборный интерфейс отличается сравнительной простотой и может использоваться при построении относительно простых и медленно действующих систем. Интерфейс КАМАК применяется в ИИС, предназначенных для исследования сложных объектов с быстропротекающими процессами.

Структурная схема ИИС, содержит следующие устройства:

- 1) устройство измерения, включающее в себя первичные и вторичные измерительные преобразователи и собственно измерительное устройство, выполняющее операции сравнения с мерой, квантование, кодирование; в это же устройство может входить и коммутатор.
- 2) устройство обработки измерительной информации, выполняющее обработку измерительной информации по определенному алгоритму (сокращение избыточности, математические операции, модуляция и т. п.);
- 3) устройство хранения информации,
- 4) устройство представления информации в виде регистраторов и индикаторов;
- 5) устройство управления, служащее для организации взаимодействия всех узлов ИИС;
- 6) устройство воздействия на объект, включающее в себя генераторы стимулирующих воздействий

Информация от ИИС может выдаваться оператору или поступать в ЭВМ. Оператор и ЭВМ могут воздействовать на устройство управления ИИС, меняя соответственно программу ее работы. В ряде ИИС некоторые устройства и связи могут отсутствовать или видоизменяться. Так, могут отсутствовать устройства воздействия на объект, хранения и обработки информации. При наличии в составе ИИС ЭВМ информация к ЭВМ может поступать непосредственно от устройств обработки или (и) хранения.

В зависимости от способа организации передачи информации между функциональными узлами (ФУ), являющимися приемниками и передатчиками информации, различают цепочечную, радиальную и магистральную структуры ИИС.

В ИИС с цепочечной структурой передача информации осуществляется последовательно от одного ФУ к другому, а все ФУ выполняют заранее заданную операцию над входным сигналом. ИИС с такой структурой относительно проста, но функциональные возможности ее ограничены.

В ИИС с радиальной структурой обмен сигналами между ФУ происходит через центральное устройство управления — контроллер, который задает режим работы ФУ, изменяет число и состав взаимодействующих ФУ, а также связи между ними, что приводит к изменению функций ИИС. В этой структуре каждый ФУ подключается к контроллеру посредством индивидуальных шин. Недостатком радиальной структуры является усложнение контроллера при увеличении числа ФУ.

В ИИС с магистральной структурой существует общая для всех ФУ магистраль, по которой передаются сигналы взаимодействия ФУ. Такая структура позволяет легко наращивать число функциональных узлов в системе.

Существует также радиально-цепочечные и радиально-магистральные структуры, представляющие собой комбинации рассмотренных структур.

Физические величины, измеряемые и контролируемые с помощью ИИС, весьма разнообразны. Для того чтобы ИИС были универсальными, т. е. пригодными для измерения и контроля разнообразных величин, измеряемые и контролируемые величины представляют унифицированными электрическими сигналами. Унификация заключается в линеаризации зависимости параметра сигнала от измеряемой величины и в приведении максимального и минимального размера информативного параметра к заданным значениям.

В ИИС применяют следующие унифицированные сигналы:

1. Непрерывные сигналы в виде постоянных и переменных токов и напряжений, параметры которых (мгновенные, средние, действующие значения, частота, период, угол фазового сдвига между двумя переменными токами или напряжениями) являются информативными параметрами. Диапазоны изменения параметров некоторых непрерывных унифицированных сигналов нормированы государственными стандартами. Эти сигналы называют нормированными. Приведение (нормирование) параметров сигналов к определенному уровню осуществляется так называемыми нормирующими измерительными преобразователями.
2. Импульсные сигналы в виде серии импульсов постоянного тока, параметры которых (амплитуда, частота, длительность импульсов или интервалов) являются информативными параметрами.
3. Кодово-импульсные сигналы, например, в виде импульсов постоянного тока или напряжения, комбинации которых передают значения кодированных измеряемых величин.

Применение тех или иных унифицированных сигналов зависит от требуемых характеристик ИИС, вида канала связи, формы представления измерительной информации (аналоговая или цифровая), используемой элементной базы и др.

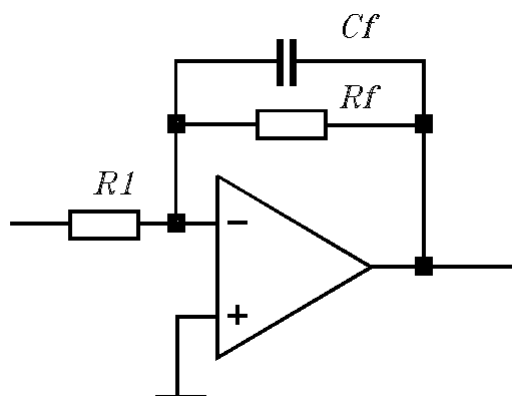
Биотелеметрия

Процесс исследования состояния биологического объекта осуществляется с использованием электронных средств сбора и анализа данных. Понятие этого процесса очень важно при формировании итогового суждения о состоянии исследуемого объекта.

Цифровая обработка сигнала – это арифметическая обработка в реальном масштабе времени последовательности значений амплитуды сигнала, определяемых через равные временные промежутки. Примерами цифровой обработки являются:

- Фильтрация сигнала;
- Свертка двух сигналов;
- Вычисление значения корреляционной функции двух сигналов;
- Усиление, ограничение или трансформация сигнала;
- Прямое или обратное преобразование сигнала.

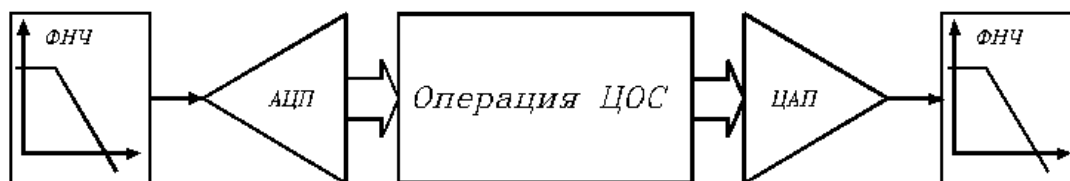
Аналоговая обработка сигнала, традиционно используемая во многих радиотехнических устройствах, является во многих случаях более дешевым способом достижения требуемого результата. Однако в том случае, когда требуется высокая точность обработки, миниатюрность устройства, стабильность его характеристик в различных температурных условиях функционирования, цифровая обработка оказывается единственным приемлемым решением.



Рисунок

Пример аналоговой фильтрации сигнала представлен на рисунке. Используемый в фильтре операционный усилитель позволяет расширить динамический диапазон обрабатываемых сигналов. Форма АЧХ фильтра определяется значениями величин Rf и Cf . Высокое значение добротности сложно обеспечить, так как параметры

фильтра сильно зависят от температурного режима. Компоненты вносят дополнительный шум в результирующий сигнал.



Рисунок

Аналогичные результаты обработки сигнала могут быть получены с помощью цифровой схемы (рисунок выше). Компонентами схемы являются фильтры нижних частот (ФНЧ), выполняющие предварительное и последующее удаление из частотного спектра дополнительных гармоник сигнала, аналого-цифровой (АЦП) и цифро-аналоговый преобразователи и собственно цифровой фильтр. Амплитудно-частотная характеристика фильтра определяется значениями коэффициентов фильтра $S(k)$. Изменяя количество коэффициентов (длину фильтра) и их значения, можно получить фильтр с любой требуемой амплитудно-частотной характеристикой. Вносимый шум (шумы квантования) зависят от частоты дискретизации и разрядности АЦП и ЦАП, а также точности вычислений.

Отличительной особенностью задач цифровой обработки сигналов является поточный характер обработки больших объемов данных в реальном масштабе времени, требующий от технических средств высокой производительности и обеспечения возможности интенсивного обмена с внешними устройствами. Соответствие данным требованиям достигается в настоящее время благодаря специфической архитектуре сигнальных процессоров, проблемно-ориентированной системе команд.

Сигнальные процессоры обладают высокой степенью специализации. В них используются методы сокращения длительности командного цикла, характерные для универсальных RISC- процессоров, такие как конвейеризация на уровне отдельных микроинструкций и инструкций, размещение большинства операндов в регистрах, использование теневых регистров, сохранения состояния вычислений при переключении контекста, разделение шин программ и данных.

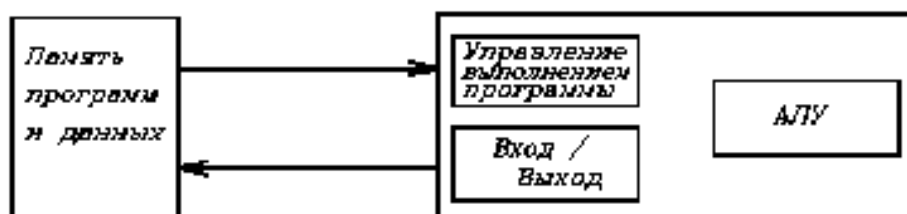
С другой стороны, сигнальные процессоры имеют аппаратное умножение, позволяющее выполнять умножение двух чисел за один командный такт. Кроме того, для эффективной реализации алгоритмов цифровой фильтрации вводится аппаратная поддержка базовых операций: умножения с накоплением (МАС), модульной адресной арифметики, нормирования результата арифметических операций.

1. Архитектура процессоров обработки сигналов

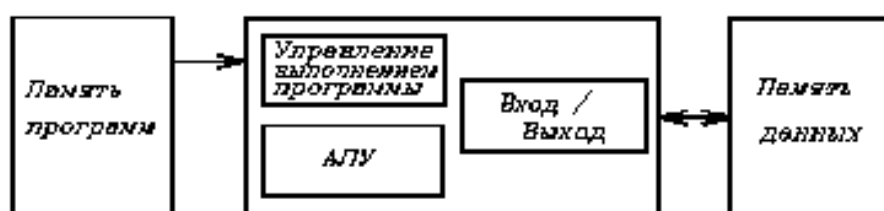
Практически все сигнальные процессоры имеют схожие базовые модули: вычислительное ядро, служащее для выполнения математических операций; память для хранения данных и программ; устройства преобразования аналоговых сигналов в цифровые и наоборот. К последним относятся не только АЦП и ЦАП, но и аналоговые компараторы и ШИМ модуляторы.

Адрес выполняемой команды отображается в адресном автомате вычислительного ядра сигнального процессора. Обычный цикл работы процессора состоит из выбора команды и данных из памяти программ и данных и сохранения результатов обработки. По отношению к памяти программ и данных различают Фон Неймановскую и Гарвардскую архитектуры процессоров. Основные особенности типов архитектур показаны на рисунке .

Фон Неймановская архитектура.



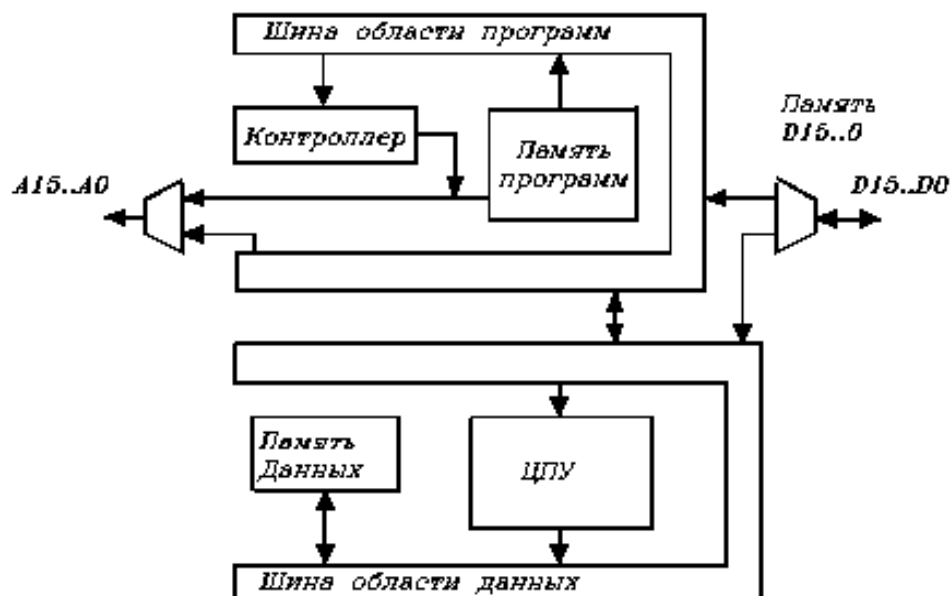
Гарвардская архитектура



Рисунок

Фон Неймановская архитектура является стандартом в развитии микропроцессорных систем. Описываемая архитектура наиболее проста, так как программа и данные располагаются в одной и той же памяти. Фон Неймановская архитектура используется для построения в основном универсальных процессоров, таких как процессоры семейства x86. Основная особенность такой архитектуры - наличие только одной шины, в результате за один цикл обращения процессор может получить доступ либо к памяти программ, либо к памяти данных.

Для быстрой обработки данных часто требуется доступа и к памяти данных, и к памяти программ в одном цикле обращения. В Гарвардской архитектуре адресные пространства программ и данных разделены, и доступ к ним процессор может осуществлять параллельно. К сожалению, расплатой за высокую скорость является высокая цена процессора. Двойное адресное пространство требует удвоенного количества адресных линий и линий данных. В результате поиска оптимального решения между ценой и высокой производительностью была создана модифицированная гарвардская архитектура. Ее особенностью является наличие только одной внешней шины. Следствием этого стало уменьшение количества внешних выводов. Внутри процессора адресные пространства программ и данных остались разделенными. Модифицированную гарвардскую архитектуру используют большинство производителей сигнальных процессоров, например фирма Texas Instruments. Структурная схема процессора, имеющего модифицированную гарвардскую архитектуру, представлена на рисунке ниже

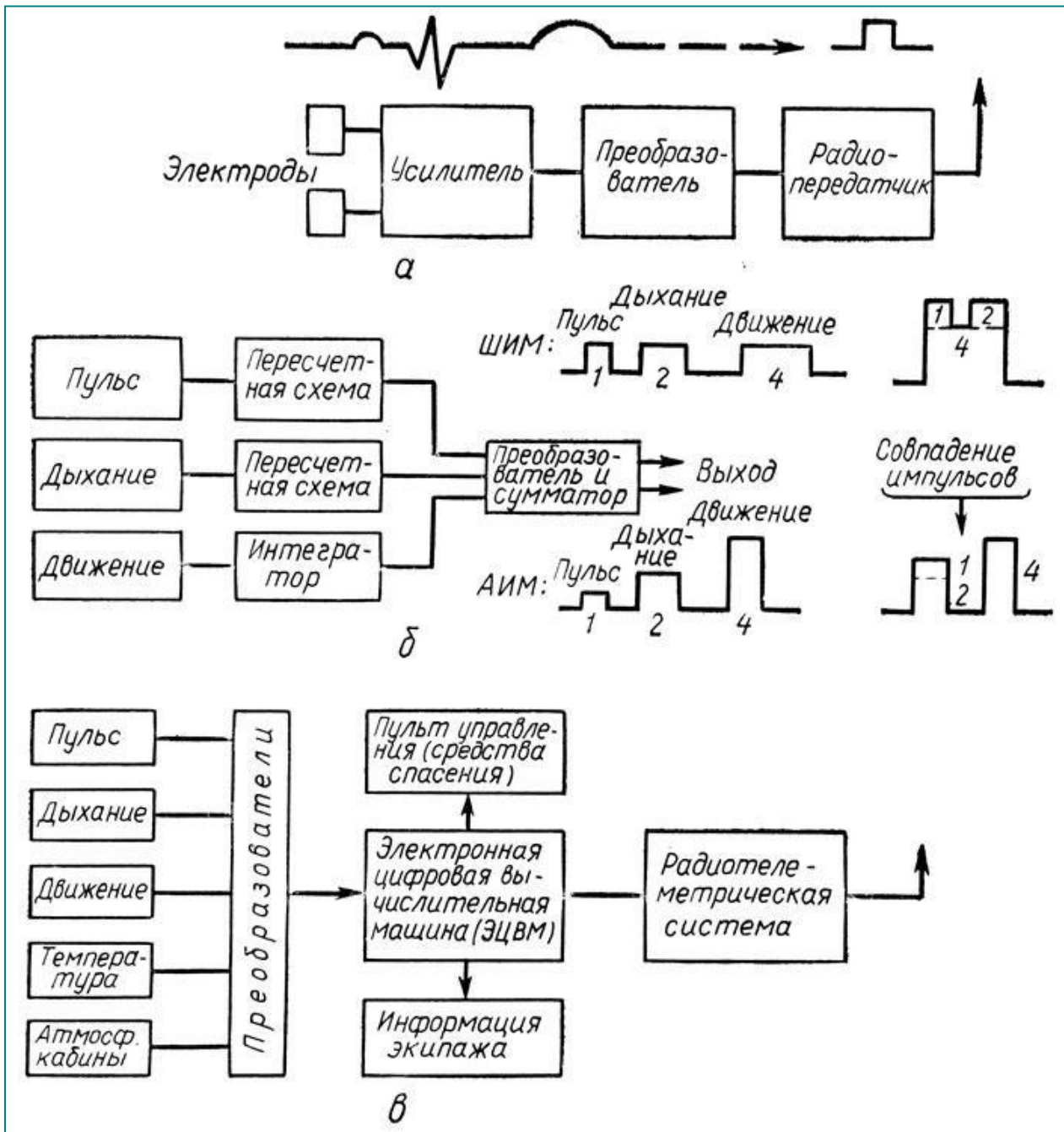


Рисунок

Цифровая обработка сигналов. Основные понятия

Введение

Пример биотелеметрических задач помещен на рис. ниже



Постановка задачи.

Пусть имеется непрерывный сигнал $x(t)$, заданный на интервале $[0, \infty)$. При переходе к оцифровке происходит следующая операция. Выбирается шаг дискретизации T , и вместо исходного сигнала получается последовательность $y[n] = x(nT), n = 0, 1, \dots$. Далее, выбирается формат оцифровки r . Обычно он бывает кратным 8, хотя это не обязательно. Предположим, что существует такое число M , что выполнены неравенства: $-M \leq y[n] \leq M$ для всех n . Интервал $[-M, M]$ разбивается на 2^r частей.

После этого каждое значение $y[n]$ заменяется номером интервала, в который попало соответствующее значение. В результате последовательность $y[n]$ заменяется новой

последовательностью $z[n]$, но теперь каждый член новой последовательности принимает значения из интервала $[0, 2^r - 1]$. При желании вместо указанного представления можно перейти к представлению сигнала целыми числами со знаком.

На каждом из упомянутых шагов происходит огрубление сигнала. Первая задача цифровой обработки заключается в оценке искажения исходного сигнала. Дальнейшая обработка состоит в извлечении из полученного сигнала нужной информации и подавлении шумов. Это осуществляется с помощью цифровой фильтрации. Даже оцифрованный сигнал занимает много места, и следующий шаг обработки заключается в сжатии сигнала. Обычно имеется в виду сжатие с потерей информации. Здесь важно установить критерии допустимой потери информации. В зависимости от выбранного критерия выбирается способ сжатия. Хотя последовательность бесконечна, в реальных условиях мы имеем дело лишь с конечными последовательностями. В этой связи нужна оценка потерь, связанных с усечением последовательностей.

Преобразование Фурье

Важнейшей характеристикой исходного сигнала является его преобразование Фурье. Если исходный сигнал задан функцией $f(t)$, заданной на всей вещественной оси, то его преобразование Фурье задается формулой

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2\pi i \omega t} f(t) dt \quad (1)$$

Функция $F(\omega)$ или ее модуль трактуется как интенсивность исходного сигнала на частоте ω . Обратное преобразование задается аналогичной формулой:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{2\pi i \omega t} F(\omega) d\omega \quad (2)$$

Справедливость указанных формул возможна лишь при определенных ограничениях на исходные функции. В зависимости от наложенных ограничений данным формулам придают различный смысл. Мы не будем уточнять данное обстоятельство, предполагая, что все выполняемые операции типа изменения порядка интегрирования законны. Однако в любом случае при обычном понимании интегрирования необходимым условием является убывание функций на бесконечности. В реальных условиях это ограничение не имеет места, поэтому предварительно нужно ознакомиться со специальным математическим аппаратом, позволяющим в некоторых случаях обойти данное ограничение.

Прежде, чем переходить к изложению этого аппарата, напомним основные свойства преобразования Фурье. Для краткости связь между функцией и ее преобразованием Фурье будем обозначать так: $f(t) \Leftrightarrow F(\omega)$.

Если $f(t) \Leftrightarrow F(\omega)$, $g(t) \Leftrightarrow G(\omega)$, то $af(t) + bg(t) \Leftrightarrow aF(\omega) + bG(\omega)$

$$f(t - a) \Leftrightarrow e^{-2\pi i \omega a} F(\omega)$$

Сверткой двух функций называется функция $h(t) = f(t) * g(t)$, заданная формулой:

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t - x)g(x)dx. \text{ Имеет место соотношение } h(t) \Leftrightarrow F(\omega)G(\omega)$$

Двойственное соотношение имеет вид $f(t)g(t) \Leftrightarrow F(w) * G(w)$.

Вообще говоря, не предполагается, что функция $f(t)$ - вещественная. Если же это

так, то $F(-w) = \bar{F}(w)$

$f'(x) \Leftrightarrow 2\pi wiF(w)$. Эта формула получается формальным дифференцированием под знаком интеграла в (2).

Обобщенные функции

Как уже отмечалось, для того, чтобы в обычном смысле существовало преобразование Фурье от функции, необходимо ее убывание на бесконечности. Очевидно, что это не выполнено для стационарного сигнала. Для того, чтобы иметь возможность работать с преобразованием Фурье и от таких функций нужен вспомогательный аппарат.

Обозначим через K множество бесконечно дифференцируемых функций с компактным носителем. По определению, последовательность $\varphi_n(x) \rightarrow \varphi(x)$, если все эти функции имеют общий компактный носитель, принадлежат K и в каждой точке имеет место обычная сходимость. Функционал это отображение $f : K \rightarrow C$, причем $f(\varphi_n) \rightarrow f(\varphi)$. Если $u(x)$ - интегрируемая функция, то ей соответствует функционал $f(\varphi) = \int \varphi(x)u(x)dx$. Однако существуют функционалы, не представимые в указанной форме. Например, $\Delta(\varphi) = \varphi(0)$. Этот функционал записывают в форме $\int \varphi(x)\delta(x)dx$.

Наряду с указанным функционалом определяют функционалы $\delta(x-a)$, $\delta(tx)$, исходя из формального правила замены переменных в интеграле. Хотя этот функционал нельзя представить с помощью обычной функции, можно ввести δ -образную последовательность. Положим $\delta_n(x) = n/2$ при $-1/n \leq x \leq 1/n$ и 0 в остальных точках.

Интеграл от нее равен 1. При больших n функция $\varphi \in K$ представима в виде

$\varphi(x) = \varphi(0) + x\varphi'(0) + O(n^{-2})$ при $-1/n \leq x \leq 1/n$, поэтому $\int_{-1/n}^{1/n} \varphi(x)\delta_n(x)dx = \varphi(0) + O(1/n)$ (второе слагаемое исчезает в силу симметричности).

Лемма. Пусть $\varphi(x)$ имеет интегрируемую производную. Тогда

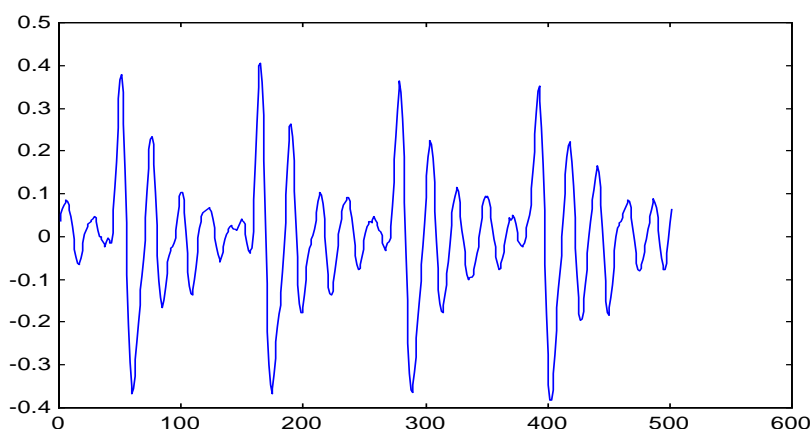
$$\int \varphi(x)\cos(nx)dx \rightarrow 0, n \rightarrow \infty$$

Доказательство проводится интегрированием по частям. Аналогичное утверждение справедливо и для $\sin(nx)$.

Автокорреляция и ее вычисление

Пусть задана бесконечная последовательность $x[n]$. По ней строится автокорреляционная функция $r(t) = \sum x[k]\bar{x}[t+k]$. Эта функция играет огромное значение в при обработке сигналов. Основное назначение - отыскание максимумов функции $r(t)$, которые интерпретируются как аналоги периодов. Из неравенства Коши следует, что $|r(t)| \leq r(0)$. В точках максимума $r(t_j), t_j \neq 0$ сдвинутая на t_j исходная последовательность "похожа" на исходную. В качестве примера рассмотрим фрагмент звукового

файла с записью звука "а". Этот сигнал не является периодическим в математическом смысле слова, однако, визуально такая периодичность просматривается. Значения периода находятся по максимумам соответствующей автокорреляционной функции. Найдем преобразование Фурье от $r(t)$.



Для непрерывного случая эта задача рассматривалась выше. Положим $y[n] = \bar{x}[-n]$. Теперь $r(t) = \sum x[n]y[-t-n] = c(-t)$, где $c(t)$ - свертка последовательностей.

$R(w) = \sum r(t)e^{-2\pi i w t} = C(-w) = X(-w)Y(-w)$. С другой стороны, $Y(w) = \sum \bar{x}[-n]e^{-2\pi i w n} = \bar{X}(-w)$.

Это означает, что $R(w) = |X(-w)|^2$. Если исходная последовательность вещественная, то $|X(w)| = |X(-w)|$ и

$$R(w) = |X(w)|^2 \quad (1)$$

Случай конечной последовательности

При практическом использовании автокорреляционной функции мы имеем дело с конечными последовательностями. Пусть дана последовательность a_0, \dots, a_{N-1} . Определим функцию $r_c(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} a_k \bar{a}_{k+t}$ (как обычно, последовательность считается периодической). Повторяя предыдущие рассуждения, получим для конечного преобразования Фурье в вещественном случае аналог (1)

$$R_c(k) = |A(k)|^2 \quad (2)$$

Если для заданного N существует схема БПФ, то выгоднее для отыскания значений $r_c(t)$ сначала найти преобразование Фурье от исходной последовательности, а затем воспользоваться (2) для отыскания значений функции.

В случае конечных последовательностей мы имеем дело с циклической сверткой. Для того, чтобы избавиться от эффекта цикличности, используется следующий прием. Вместо исходной последовательности длины N берется последовательность $(b) = a_0, \dots, a_{N-1}, 0, \dots, 0$ длины $2N$. Если используются значения $r_c(t)$, $t = 0, \dots, N-1$, то при их вычислении эффект цикличности не имеет места.

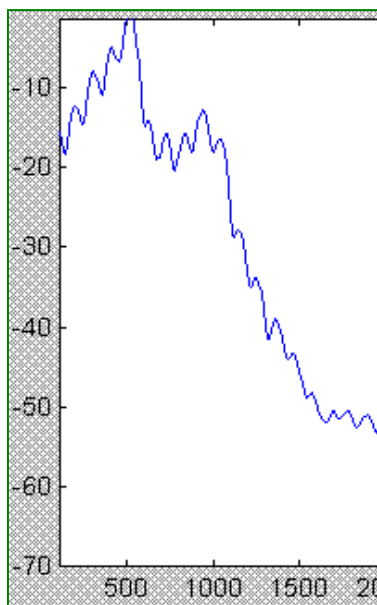
Практическое оценивание частот

В предыдущих рассмотренных случаях не учитывалась частота выборки T из исходного непрерывного сигнала. Имеем

$$A(m) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(kT) e^{-2\pi i k T m / (NT)}$$

Рассматривая последнее выражение как приближение соответствующего интеграла, получим, что данный коэффициент соответствует частоте $\frac{m}{NT}$. При выборе значения N следует учитывать следующее обстоятельство - увеличение N повышает разрешающую способность, но при этом происходит усреднение по длине окна.

Если для оценки периода использована автокорреляционная функция, то максимуму этой функции в точке m отвечает частота $\frac{1}{mT}$

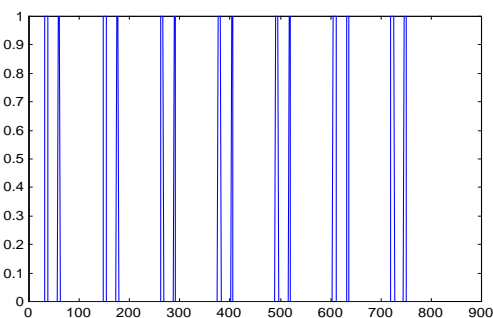


Применения автокорреляционной функции
Частота основного тона

В качестве примера укажем применение автокорреляционной функции для вычисления частоты основного тона речевого сигнала. В настоящее время нет математического определения этой частоты. В предыдущей лекции приведен пример вида сигнала, соответствующего произнесению звука "а". На рисунке просматриваются периодический характер колебаний. Фактическое значение найденной частоты

зависит от способа оценки. Простейший - подсчет с помощью преобразования Фурье. Это показано на рисунке. Основному тону соответствует частота, для которой достигается максимум. Этот способ не годится, если вблизи максимума график является пологим. Рассмотрим другие подходы.

Амплитудное ограничение. Выбирается порог, и исходный сигнал заменяется последователь-



ностью нулей и единиц: в точках, где сигнал превышает порог, ставится 1, в остальных точках - 0. Получается сигнал вида приведенного на рисунке. После этого ищут максимумы для автокорреляционной функции сигнала. При этом можно не прибегать к схемам, основанным на БПФ, поскольку в этом случае все сводится лишь к операциям сложения.

Пересечение с нулем. Рассмотрим график функции $\sin(2\pi kt)$. Значение k можно оценить по формуле $2T/p$, где T - длина интервала, а p - количество переходов через 0. Этот способ применяют к речевому сигналу. Для того, чтобы исключить из рассмотрения мелкие колебания в окрестности 0, сигнал пропускают через фильтр низких частот.

Поиск сигнала с помощью кросс корреляционной функции

К рассматриваемому кругу вопросов примыкает следующая задача. Пусть имеется входная последовательность $x[n]$ большой длины и образец $y[m]$ значительно меньшей длины M . Требуется выяснить, присутствует ли образец во входной последовательности, и если присутствует, определить его место положения. Фактически, Wavelet преобразование первоначально возникло как обобщение этой задачи. Очевидно, что при наличии искажений, задача не имеет точного решения. Можно говорить лишь о близости в некотором смысле отрезка входной последовательности и образца. В вещественном случае в качестве меры близости часто используют

функцию $r(t) = \sum_{k=0}^{M-1} x[t+k]y[k]$ и ищут значения аргумента, для которых эта функция

имеет локальный максимум. После этого, соответствующие отрезки входной последовательности подвергаются дополнительному исследованию. Наша ближайшая цель - указать методы, с помощью которых осуществляется подсчет значений $r(t)$, поскольку непосредственные вычисления требуют значительных ресурсов.

Процессор малой мощности

Предположим, что процессор быстро производит лишь операции сложения и вычитания с целыми числами. Для подсчета произведения используется следующий прием. Имеем $(a+b)^2 - (a-b)^2 = 4ab$. В памяти хранятся значения квадратов возможных значений, а деление на 4 в двоичном коде сводится к логическому сдвигу на две позиции.

Использование БПФ

Даже при наличии мощного процессора непосредственный подсчет всех нужных значений $r(t)$ является трудоемкой задачей. Для уменьшения числа умножений используется следующий подход. Образец заменяется последовательностью $Y = (y[0], \dots, y[M-1], 0, \dots, 0)$ длины $2M$. Из входной последовательности образуют последовательности длины $2M$ $X_k = (x[p], x[p+1], \dots, x[p+M-1], 0, \dots, 0)$, $p = kM$, $k = 0, 1, \dots$

После этого подсчитывается циклическая свертка $c_k(t) = \frac{1}{2M} \sum_{l=0}^{2M-1} X_k(t+l)Y(l)$

Для отыскания значений свертки используется быстрое преобразование Фурье. БПФ. Для этого число $2M$ должно обладать соответствующими арифметическими свойствами. Покажем теперь, как по найденным значениям $c_k(t)$ подсчитываются значения $r(t)$. Это проще всего продемонстрировать на примере $M = 3$. Имеем

$$c_0(0) = \frac{1}{6}(x(0)y(0) + x(1)y(1) + x(2)y(2)), \quad c_0(1) = \frac{1}{6}(x(1)y(0) + x(2)y(1))$$

$$c_0(2) = \frac{1}{6}(x(2)y(0)). \quad \text{Точно также, } c_1(2) = \frac{1}{6}(y(2)X_1(0)) = \frac{1}{6}(y(2)x(3))$$

$$c_1(1) = \frac{1}{6}(y(1)X_1(0) + y(2)X_1(1)) = \frac{1}{6}(y(1)x(3) + y(2)x(4)).$$

Теперь мы можем найти значения $r(0) = 6c_0(0)$, $r(1) = 6(c_0(1) + 6c_1(2))$, $r(2) = 6(c_0(2) + c_1(1))$