

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)
Кафедра «Автотранспортная и техносферная безопасность»

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «АВТОМАТИЧЕСКОЕ
УПРАВЛЕНИЕ, ДАТЧИКИ И ПРИБОРЫ»

Составитель:
П.С. Сабуров

Владимир 2016

УДК 658.012
ББК 32.965

Рецензент

Доктор технических наук, профессор кафедры «Мехатроника и электронные системы автомобилей» Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых (ВлГУ)
Веселов О.В.

Учебное пособие к курсу лекций по дисциплине «Автоматическое управление, датчики и приборы» (часть 1) / Сост. П.С. Сабуров., Владим. гос. ун-т., Владимир, 2014. – с. .

Подготовлено в соответствии с рабочей программой дисциплины «Автоматическое управления, датчики и приборы», содержит материал для подготовки к экзамену.

Предназначены для инженерно–технических специальностей Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых.

Ил. 43. Библиогр. 4 назв.

УДК 658.012
ББК 32.965

© Владимирский государственный университет
имени А.Г. и Н.Г. Столетовых (ВлГУ)

Аннотация

Данное учебное пособие предназначено для студентов IV курса, обучающихся по дисциплине “ Автоматическое управления, датчики и приборы ”, может быть применено в качестве лекционного курса и для самостоятельной работы. В пособии изложены основные понятия и определения теории автоматического управления, классификация автоматических систем регулирования и их элементов, статические и динамические характеристики систем, метод линеаризации дифференциальных уравнений, примеры типовых звеньев, их соединений и правил преобразования, понятие передаточной функции и частотных характеристик и др.

1 ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1.1 Основные понятия

Системы управления современными химико-технологическими процессами характеризуются большим количеством технологических параметров, число которых может достигать нескольких тысяч [1]. Для поддержания требуемого режима работы, а в конечном итоге – качества выпускаемой продукции, все эти величины необходимо поддерживать постоянными или изменять по определенному закону.

Физические величины, определяющие ход технологического процесса, называются параметрами технологического процесса. Например, параметрами технологического процесса могут быть: температура, давление, расход, напряжение и т.д.

Параметр технологического процесса, который необходимо поддерживать постоянным или изменять по определенному закону, называется регулируемой величиной или регулируемым параметром.

Значение регулируемой величины в рассматриваемый момент времени называется мгновенным значением.

Значение регулируемой величины, полученное в рассматриваемый момент времени на основании данных некоторого измерительного прибора называется ее измеренным значением.

Пример 1. Схема ручного регулирования температуры сушильного шкафа.

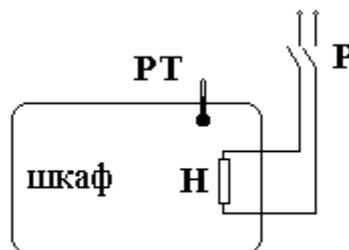


Рис.1.1. Схема ручного регулирования температуры сушильного шкафа

Требуется вручную поддерживать температуру в сушильном шкафу на уровне $T_{зад}$.

Человек-оператор в зависимости от показаний ртутного термометра РТ включает или выключает нагревательный элемент Н с помощью рубильника Р.

На основе данного примера можно ввести следующие определения.

Объект управления (объект регулирования, ОУ) – устройство, требуемый режим работы которого должен поддерживаться извне специально организованными управляющими воздействиями.

Управление – формирование управляющих воздействий, обеспечивающих требуемый режим работы ОУ.

Регулирование – частный вид управления, когда задачей является обеспечение постоянства какой-либо выходной величины ОУ.

Автоматическое управление – управление, осуществляемое без непосредственного участия человека.

Входное воздействие (X) – воздействие, подаваемое на вход системы или устройства.

Выходное воздействие (Y) – воздействие, выдаваемое на выходе системы или устройства.

Внешнее воздействие – воздействие внешней среды на систему.

Структурная схема системы регулирования к примеру 1 изображена на рис. 1.2.

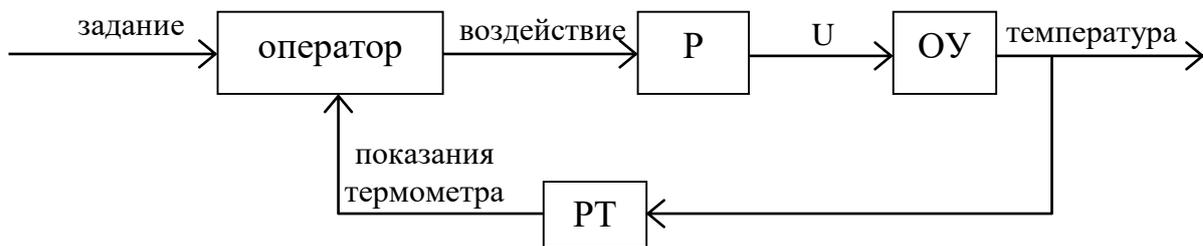


Рис.1.2. Структурная схема системы регулирования

Пример 2. Схема автоматического регулирования температуры сушильного шкафа.

В схеме используется ртутный термометр с контактами РТК. При повышении температуры до заданной контакты замыкаются столбиком ртути, катушка релейного элемента РЭ возбуждается и цепь нагревателя Н размыкается контактом РЭ. При понижении температуры контакты термометра размыкаются, реле обесточивается, возобновляя подачу энергии на объект как показано на рисунке 1.3.

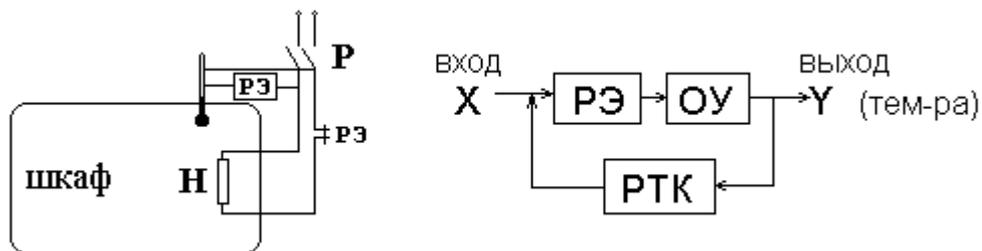


Рис.1.3. Схема автоматического регулирования температуры сушильного шкафа

Пример 3. Схема АСР температуры с измерительным мостом.

При температуре объекта, равной заданной, измерительный мост M как изображено на рисунке 1.4, уравновешен, на вход электронного усилителя ЭУ сигнал не поступает и система находится в равновесии. При отклонении температуры изменяется сопротивление терморезистора R_T и равновесие моста нарушается. На входе ЭУ появляется напряжение, фаза которого зависит от знака отклонения температуры от заданной. Напряжение, усиленное в ЭУ, поступает на двигатель Д, который перемещает движок автотрансформатора АТ в соответствующую сторону. При достижении температуры, равной заданной, мост сбалансирован и двигатель отключится.

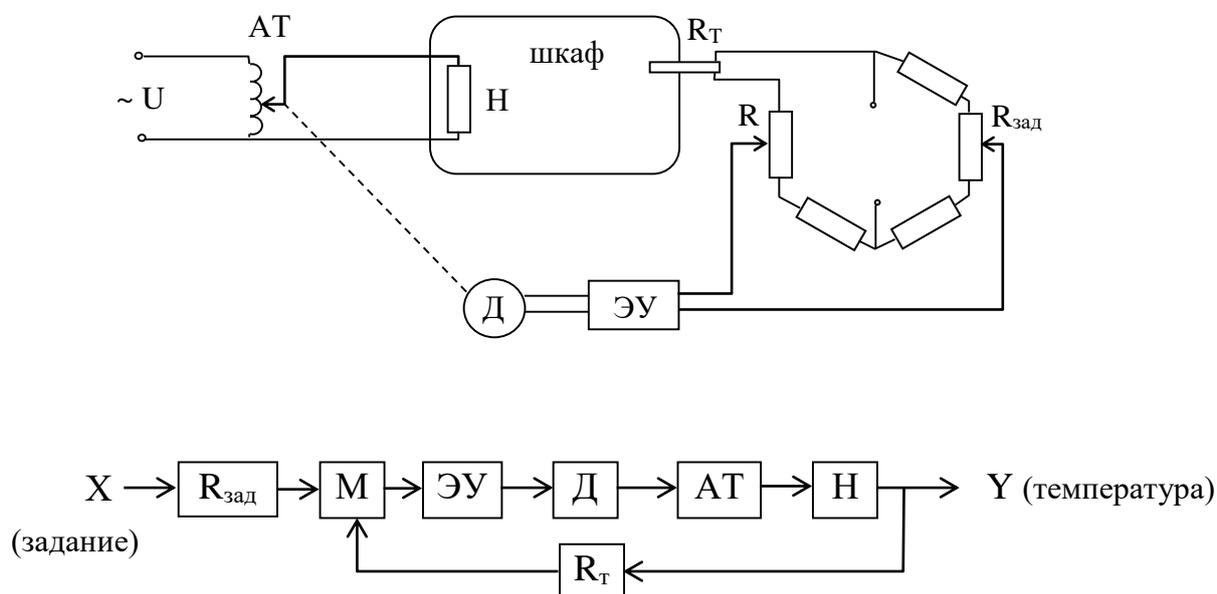


Рис.1.4. Схема АСР температуры с измерительным мостом

Величина заданного значения температуры устанавливается с помощью резистора $R_{\text{зад}}$.

Исходя из описанных примеров, можно определить типовую структурную схему одноконтурной АСР, показанную на рисунке 1.5. Принятые обозначения, используемые в структурной схеме:

x - задающее воздействие (задание);

$e = x - y$ - ошибка регулирования;

u - управляющее воздействие;

f - возмущающее воздействие (возмущение).

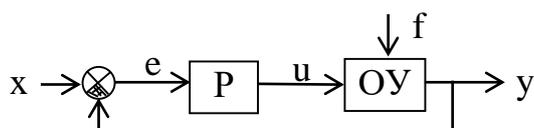


Рис.1.5. Типовая структурная схема одноконтурной АСР

Введем следующие определения.

Задающее воздействие (то же, что входное воздействие X) - воздействие на систему, определяющее требуемый закон изменения регулируемой величины.

Управляющее воздействие (u) - воздействие управляющего устройства на объект управления.

Управляющее устройство (УУ) - устройство, осуществляющее воздействие на объект управления с целью обеспечения требуемого режима работы.

Возмущающее воздействие (f) - воздействие, стремящееся нарушить требуемую функциональную связь между задающим воздействием и регулируемой величиной.

Ошибка управления ($e = x - y$) - разность между предписанным (x) и действительным (y) значениями регулируемой величины.

Регулятор (Р) - комплекс устройств, присоединяемых к регулируемому объекту и обеспечивающих автоматическое поддержание заданного значения его регулируемой величины или автоматическое изменение ее по определенному закону.

Автоматическая система регулирования (АСР) - автоматическая система с замкнутой цепью воздействия, в которой управление (u) вырабатывается в результате сравнения истинного значения (y) с заданным значением (x).

Дополнительная связь в структурной схеме АСР, направленная от выхода к входу рассматриваемого участка цепи воздействий, называется обратной связью (ОС). Обратная связь может быть отрицательной или положительной.

1.2 Принципы регулирования

Первый промышленный регулятор [3], был изобретен в 1765 г. И. Ползуновым для созданной им паровой машины. Принципиальная схема регулятора приведена на рисунке 1.6.

Задачей регулирования является поддержание в паровом котле постоянного уровня. Регулятор представляет собой поплавок 1, связанный системой рычагов с регулирующей заслонкой 2. При увеличении уровня поплавок поднимается вверх, в результате чего заслонка опускается, перекрывая трубопровод и уменьшая подачу воды в котел. При уменьшении уровня поплавок опускается, что приводит к увеличению подачи воды и, следовательно, к повышению уровня.

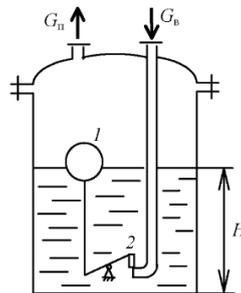


Рис.1.6. Регулятор Ползунова

Практически одновременно с И. Ползуновым в 1784 г. Джеймс Уатт сконструировал центробежный регулятор числа оборотов вала паровой машины (рис. 1.7.)

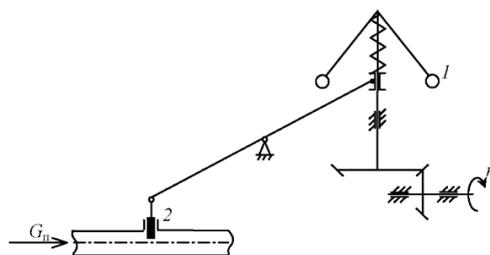


Рис.1.7. Регулятор Уатта

При изменении числа оборотов вала грузы 1 под действием центробежной силы изменяют свое положение, что приводит к перемещению регулирующего органа 2 и изменению подачи пара. Это в свою очередь вызывает изменение числа оборотов вала, но в направлении, противоположном исходному.

Сравнительный анализ рассмотренных регуляторов показывает, что оба они построены по единому принципу, который наглядно проявляется на структурной схеме, представленной на рисунке 1.8.

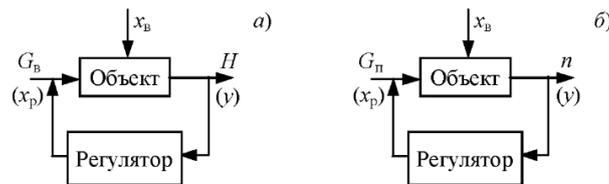


Рис.1.8. Структурные схемы систем регулирования: a - Ползунова; b - Уатта

В рассматриваемых примерах основными элементами системы автоматического регулирования являются: объект - паровой котел и паровая машина; регулирующее устройство - поплавков и центробежная муфта с регулирующими заслонками, соответственно, в регуляторах Ползунова и Уатта.

Выходные координаты, они же и регулируемые переменные - уровень H и число оборотов n ; регулирующие переменные - подача воды в паровой котел - G_b и расход пара в паровую машину - G_n возмущающие воздействия - давление пара в котле, расход топлива, его теплотворная способность в первом случае и во втором - нагрузка на валу паровой машины, давление пара в трубопроводе.

Принцип, по которому построены регуляторы Ползунова и Уатта, состоит в том, что регулятор изменяет регулирующее воздействие при отклонении регулируемой переменной от заданного значения независимо от причин, вызвавших это отклонение. Таким образом, в зависимости от значения выходного сигнала объекта регулятор изменяет его входной сигнал. Для реализации алгоритма регулирования в конструкцию системы вводится связь, получившая название обратной связи, потому что по ней происходит передача сигнала с выхода объекта на его вход по направлению, обратному направлению передачи основного воздействия на объект. Объект и регулятор образуют замкнутую систему, называемую автоматической системой регулирования (АСР). Если сигнал обратной связи складывается с основным сигналом, то связь называется *положительной*, если вычитает-

ся - отрицательной. В автоматических системах управления связь всегда отрицательна.

Схемы с обратной связью осуществляют *управление по отклонению* (рис. 1.9) показателя процесса - выходной координаты $y(t)$ от заданного значения $u_{зад}$; $\Delta y = y(t) - u_{зад}$ - называется *отклонением* или *ошибкой* управления.

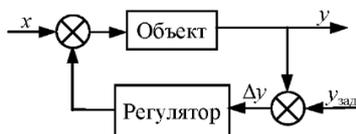


Рис.1.9. Структурная схема регулирования по отклонению

Рассмотренная система управления с обратной связью относится к классу систем *автоматического регулирования по отклонению*.

Таким образом, автоматической системой регулирования по отклонению называют систему, в которой измеряется отклонение регулируемой величины от заданного значения и в зависимости от измеренного отклонения подается такое воздействие на регулирующий орган, которое уменьшает величину отклонения так, что $\Delta y \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

Кроме регулирования по отклонению возможен другой способ регулирования - это регулирование по возмущению или компенсация возмущений. В этом случае регулирующее воздействие вырабатывается регулятором в зависимости от величины возмущения. Системы регулирования по возмущению являются разомкнутыми системами, так как в них отсутствует обратная связь. Идея этого способа заключается в том, что, если мы сможем компенсировать все возмущения в системе, то регулируемая величина не будет отклоняться от заданного значения. Следует заметить, что компенсация достигается только по измеряемым возмущениям.

Рассматриваемый принцип регулирования впервые был предложен в 1830 г. французским инженером Ж. Понселе при разработке теории центробежных регуляторов хода машин по нагрузке на валу машины, являющейся одним из основных возмущений в объекте, но реализовать свое предложение на практике ему не удалось, так как динамические свойства машины не допускали непосредственного использования принципа компенсации.

В 1940 г. был предложен принцип инвариантности - достижение независимости управляемой координаты от возмущений, практическая реализация которого была получена только в 50-е годы.

Недостаток систем, построенных по принципу компенсации возмущений, очевиден. Компенсировать все возможные возмущения в объекте удастся крайне редко, а наличие таких возмущений, как колебание состояния атмосферы, старение катализатора, отложение солей в аппарате, т.е. произвольное изменение свойств объекта, вообще не подлежит компенсации. Например, опасность использования принципа Понселе при регулировании уровня жидкости в емкости, когда приток жидкости соотносится с ее расходом, заключается в том, что вследствие изменения расходных характеристик вентилей на притоке и расходе, испарения жидкости, ее дренажа и т. п., емкость может переполниться, либо опустеть.

Регулирование по отклонению лишено этого недостатка, здесь компенсация отклонения регулируемой координаты от заданной происходит независимо от того, какими причинами вызвано это отклонение, но выполнить одновременно условия точности и быстродействия трудно. Часто повышение точности и быстродействия системы приводит к ее неработоспособности.

Наиболее эффективными системами регулирования являются комбинированные АСР, сочетающие оба рассматриваемых принципа. В этих системах наиболее сильные возмущения компенсируются специальным регулятором, а контур регулирования по обратной связи устраняет отклонения регулируемой координаты, вызванные другими возмущениями.

Таким образом, в основе построения системы автоматического регулирования лежат общие фундаментальные принципы регулирования, определяющие, каким образом осуществляется поддержание регулируемой величины на заданном уровне в соответствии с причинами, вызывающими ее отклонение от этого уровня. В настоящее время известно и используют два фундаментальных принципа регулирования: *принцип регулирования по отклонению* и *принцип регулирования по возмущению*.

1.3 Классификация систем автоматического управления

Все системы автоматического управления и регулирования делятся по различным признакам на следующие основные классы [3].

1. По основным видам уравнений динамики процессов управления:

а) линейные системы;

б) нелинейные системы.

2. В зависимости от коэффициентов уравнений и вида уравнений как линейные, так и нелинейные системы подразделяются на:

а) системы, описываемые обыкновенными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами;

б) системы, описываемые обыкновенными дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами;

в) системы, описываемые уравнениями в частных производных;

г) системы с запаздыванием, описываемые уравнениями с запаздывающим аргументом.

3. По характеру представления сигналов различают:

а) непрерывные системы;

б) дискретные системы, среди которых выделяют импульсные, релейные, цифровые.

4. По характеру процессов управления:

а) детерминированные системы - системы с определенными переменными и процессами;

б) стохастические системы - системы со случайными переменными и процессами.

5. По характеру функционирования.

В зависимости от того, по какому закону изменяется заданное значение регулируемой величины, системы автоматического управления подразделяются на:

а) системы стабилизации, поддерживающие постоянство регулируемой величины, т.е. $y_{зад}(t) = const$;

б) системы программного регулирования, в которых заданное значение регулируемой величины изменяется по определенной заранее временной программе;

в) следящие системы, в которых заданное значение регулируемой величины изменяется в соответствии с состоянием некоторого заданного вектора переменных во времени;

г) системы оптимального управления, в которых показатель эффективности зависит не только от текущих значений координат, как в экстремальном регулировании, но также от характера их изменения в прошлом, настоящем и будущем, и выражается некоторым функционалом. Нахождение оптимального управления предполагает решение достаточно сложной

математической задачи соответствующими методами, кроме того органической составной частью системы является компьютер;

д) адаптивные системы, в которых автоматически изменяются значения $y_{зад}$, собственные параметры или структура при непредвиденных изменениях внешних условий на основании анализа состояния или поведения системы так, чтобы сохранялось заданное качество ее работы. Системы с изменением заданного значения регулируемой величины называют экстремальными, с изменением параметров - самонастраивающимися, с изменением структуры - самоорганизующимися.

6. По количеству контуров:

- а) одноконтурные - содержащие один контур;
- б) многоконтурные - содержащие несколько контуров.

7. По числу регулируемых величин:

- а) одномерные - системы с 1 регулируемой величиной;
- б) многомерные - системы с несколькими регулируемыми величинами.

Многомерные АСР в свою очередь подразделяются на системы:

а) несвязанного регулирования, в которых регуляторы непосредственно не связаны и могут взаимодействовать только через общий для них объект управления;

б) связанного регулирования, в которых регуляторы различных параметров одного и того же технологического процесса связаны между собой вне объекта регулирования.

8. По функциональному назначению:

- а) АСР температуры;
- б) давления;
- в) расхода;
- г) уровня;
- д) напряжения и т.д.

7. По виду используемой для регулирования энергии:

- а) пневматические;
- б) гидравлические;
- в) электрические;
- г) механические и др.

8. По принципу регулирования:

- а) по отклонению;
- б) по возмущению;

в) комбинированные - сочетают в себе особенности предыдущих АСР.

1.4 Классификация элементов автоматических систем

1. По функциональному назначению:

- измерительные,
- усилительно-преобразовательные,
- исполнительные,
- корректирующие.

2. По виду энергии, используемой для работы:

- электрические,
- гидравлические,
- пневматические,
- механические,
- комбинированные.

3. По наличию или отсутствию вспомогательного источника энергии:

- активные (с источником энергии),
- пассивные (без источника).

4. По характеру математических соотношений:

- линейные
- нелинейные.

5. По поведению в статическом режиме:

- статические, у которых имеется однозначная зависимость между входным и выходным воздействиями (состояние статики). Примером является любой тепловой объект.

- астатические - у которых эта зависимость отсутствует. Пример: Зависимость угла поворота ротора электродвигателя от приложенного напряжения. При подаче напряжения угол поворота будет постоянно возрастать, поэтому однозначной зависимости у него нет.

2 ХАРАКТЕРИСТИКИ И МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ

2.1 Основные модели

Работу системы регулирования можно описать словесно [1]. Так, в п. 1.1 описана система регулирования температуры сушильного шкафа. Словесное описание помогает понять принцип действия системы, ее назначение, особенности функционирования и т.д. Однако, что самое главное, оно не дает количественных оценок качества регулирования, поэтому не пригодно для изучения характеристик систем и построения систем автоматизированного управления. Вместо него в ТАУ используются более точные математические методы описания свойств систем:

- статические характеристики,
- динамические характеристики,
- дифференциальные уравнения,
- передаточные функции,
- частотные характеристики.

В любой из этих моделей система может быть представлена в виде звена, имеющего входные воздействия X , возмущения F и выходные воздействия Y .

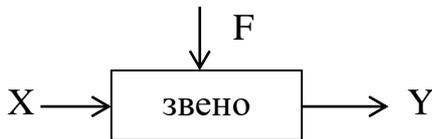


Рис.2.1. Типовое звено

Под влиянием этих воздействий выходная величина может изменяться. При этом при поступлении на вход системы нового задания она должна обеспечить с заданной степенью точности новое значение регулируемой величины в установившемся

режиме.

Установившийся режим - это режим, при котором расхождение между истинным значением регулируемой величины и ее заданным значением будет постоянным во времени.

2.2 Статические характеристики

Статической характеристикой элемента называется зависимость установившихся значений выходной величины от значения величины на входе системы, т.е. $y_{уст} = \varphi(x)$.

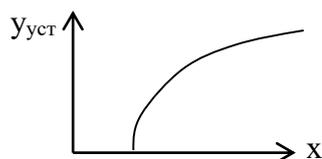


Рис.2.2. Статическая характеристика

Статическую характеристику (рис.2.2) часто изображают графически в виде кривой $y(x)$.

Статическим называется элемент, у которого при постоянном входном воздействии с течением времени устанавливается постоянная выходная величина. Например, при подаче на вход нагревателя различных значений напряжения он будет нагреваться до соответствующих этим напряжениям значений температуры.

Астатическим называется элемент, у которого при постоянном входном воздействии сигнал на выходе непрерывно растет с постоянной скоростью, ускорением и т.д.

Линейным статическим элементом называется безинерционный элемент, обладающий линейной статической характеристикой:

$$y_{уст} = K \cdot x + a_0.$$

Как видно, статическая характеристика элемента в данном случае имеет вид прямой с коэффициентом наклона K .

Линейные статические характеристики, в отличие от нелинейных, более удобны для изучения благодаря своей простоте. Если модель объекта нелинейна, то обычно ее преобразуют к линейному виду путем линеаризации.

САУ называется статической, если при постоянном входном воздействии ошибка управления e стремится к постоянному значению, зависящему от величины воздействия.

САУ называется астатической, если при постоянном входном воздействии ошибка управления стремится к нулю вне зависимости от величины воздействия.

2.3 Динамические характеристики

Переход системы от одного установившегося режима к другому при каких-либо входных воздействиях называется переходным процессом. Переходные процессы могут изображаться графически в виде кривой $y(t)$.

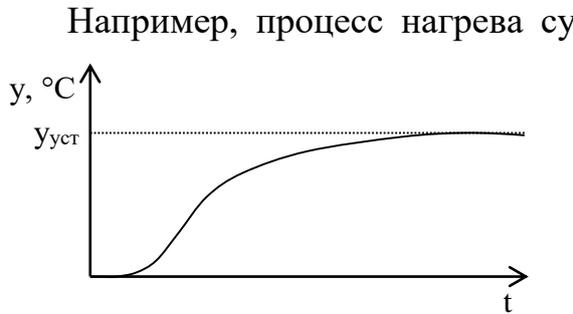


Рис.2.3. Динамические характеристики

значения может иметь вид, представленный на рисунке 2.3.

То есть, переходный процесс характеризует динамические свойства системы, ее поведение.

Поскольку входные воздействия могут изменяться во времени, то и переходные характеристики будут каждый раз разные. Для простоты анализа систем входные воздействия приводят к одному из типовых видов (рис.2.4).

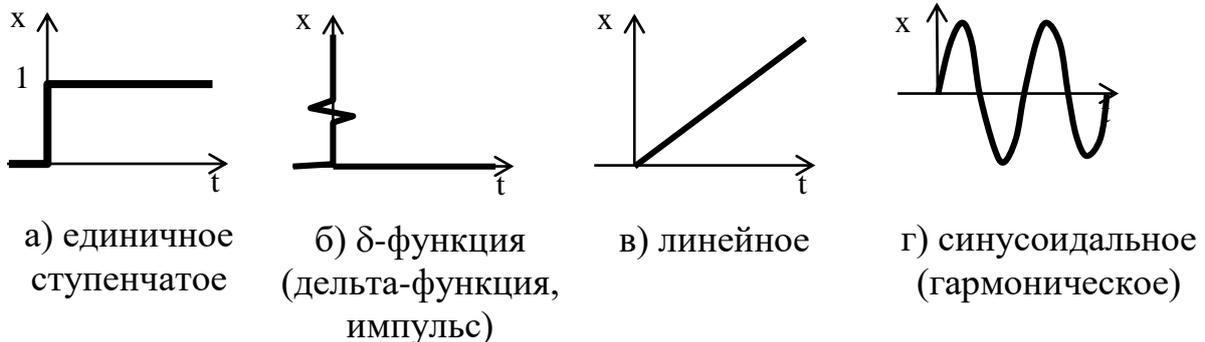


Рис.2.4. Типовые входные воздействия

В зависимости от вида входного воздействия функция $y(t)$ может иметь разное обозначение:

Переходной характеристикой $h(t)$ называется реакция объекта на единичное ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях, т.е. при $x(0) = 0$ и $y(0) = 0$.

Импульсной характеристикой $\alpha(t)$ называется реакция объекта на δ -функцию при нулевых начальных условиях.

При подаче на вход объекта синусоидального сигнала на выходе, как правило, в установившемся режиме получается также синусоидальный сигнал, но с другой амплитудой и фазой: $y = A_{\text{ВЫХ}} * \sin(\omega * t + \varphi)$, где $A_{\text{ВЫХ}}$ - амплитуда, ω - частота сигнала, φ - фаза.

Частотной характеристикой (ЧХ, АФХ и др.) называется зависимость амплитуды и фазы выходного сигнала системы в установившемся режиме при приложении на входе гармонического воздействия.

2.4 Дифференциальные уравнения. Линеаризация

Известно, что любое движение, процессы передачи, обмена, преобразования энергии и вещества математически можно описать в виде дифференциальных уравнений (ДУ). Любые процессы в АСР также принято описывать дифференциальными уравнениями, которые определяют сущность происходящих в системе процессов независимо от ее конструкции и т.д. Решив ДУ, можно найти характер изменения регулируемой переменной в переходных и установившихся режимах при различных воздействиях на систему.

Для упрощения задачи нахождения ДУ, описывающего работу АСР в целом, систему разбивают на ее отдельные элементы, переходные процессы в которых описываются достаточно простыми ДУ. Так как ДУ описывают работу системы независимо от физической сущности протекающих в ней процессов, то при разбивке системы нет необходимости учитывать их физическую целостность. Для каждого элемента структурной схемы необходимо составить ДУ, определяющее зависимость изменения выходной величины от входной.

Так как выходная величина предыдущего элемента является входной для последующего, то, определив ДУ отдельных элементов, можно найти ДУ системы.

Однако, такой метод применим только в частных случаях. Дело в том, что в большинстве случаев в реальных элементах системы связь между входной и выходной величинами является нелинейной и часто задается в графической форме. Поэтому, даже если ДУ системы и будет получено, оно будет нелинейным. А аналитическое решение нелинейных ДУ возможно далеко не всегда.

Для решения этой проблемы учитывают, что в процессе регулирования отклонения всех изменяющихся величин от их установившихся значений малы, и поэтому возможна замена нелинейных ДУ приближенными линейными ДУ, то есть возможна линеаризация дифференциальных уравнений.

Рассмотрим сущность процесса линейризации на примере сушильного шкафа. Зависимость температуры объекта от подаваемого напряжения в большинстве случаев нелинейна и имеет вид, представленный на рисунке.

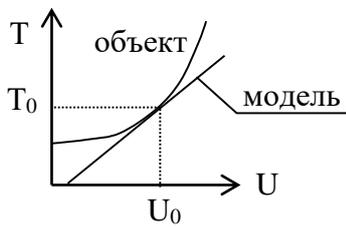


Рис.2.5. Линейризация

Графически линейризацию некоторого уравнения от двух переменных $F(x,y) = 0$ в окрестности некоторой точки (x_0, y_0) можно представить как замену рассматриваемого участка кривой на касательную (рис.2.5), уравнение которой определяется по формуле:

$$\frac{\partial F}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial F}{\partial y} \Delta y = 0,$$

где $\frac{\partial F}{\partial x}$ и $\frac{\partial F}{\partial y}$ - частные производные от F по x и y . Данное уравнение называется уравнением в приращениях, поскольку значения x и y здесь заменены на приращения $\Delta x = x - x_0$ и $\Delta y = y - y_0$.

Линейризация ДУ происходит аналогично, отличие состоит только в том, что необходимо искать частные производные по производным ($\frac{\partial F}{\partial x'}$, $\frac{\partial F}{\partial x''}$, $\frac{\partial F}{\partial x'''}$ и т.д.).

Пример. Линейризация нелинейного ДУ.

$$3xy - 4x^2 + 1,5 \frac{dx}{dt} y = 5 \frac{dy}{dt} + y$$

Данное ДУ является нелинейным из-за наличия произведений переменных x и y . Линейризуем его в окрестности точки с координатами $x_0 = 1$, $x'_0 = 0$, $y_0 = 0$. Для определения недостающего начального условия y_0 подставим данные значения в ДУ:

$$3y_0 - 4 + 0 = 0 + y_0 \quad \text{откуда} \quad y_0 = 2.$$

Введем в рассмотрение функцию

$$F = 3xy - 4x^2 + 1,5x'y - 5y' - y$$

и определим все ее производные при заданных начальных условиях:

$$\left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_0 = (3y - 8x)|_0 = 3 \cdot 2 - 8 \cdot 1 = -2,$$

$$\left. \frac{\partial F}{\partial y} \right|_0 = (3x + 1,5x' - 1)|_0 = 3 \cdot 1 + 1,5 \cdot 0 - 1 = 2,$$

$$\left. \frac{\partial F}{\partial x'} \right|_0 = (1,5y)|_0 = 1,5 \cdot 2 = 3,$$

$$\left. \frac{\partial F}{\partial y'} \right|_0 = -5.$$

Теперь, используя полученные коэффициенты, можно записать окончательное линейное ДУ:

$$-5 \cdot \Delta y' + 2 \cdot \Delta y + 3 \cdot \Delta x' - 2 \cdot \Delta x = 0.$$

2.5 Преобразования Лапласа

Исследование АСР существенно упрощается при использовании прикладных математических методов операционного исчисления. Например, функционирование некоторой системы описывается ДУ вида

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x, \quad (2.1)$$

где x и y - входная и выходная величины. Если в данное уравнение вместо $x(t)$ и $y(t)$ подставить функции $X(s)$ и $Y(s)$ комплексного переменного s такие, что

$$X(s) = \int_0^{\infty} x(t) e^{-st} dt \quad \text{и} \quad Y(s) = \int_0^{\infty} y(t) e^{-st} dt, \quad (2.2)$$

то исходное ДУ при нулевых начальных условиях равносильно линейному алгебраическому уравнению

$$a_2 s^2 Y(s) + a_1 s Y(s) + a_0 Y(s) = b_1 X(s) + b_0 X(s).$$

Такой переход от ДУ к алгебраическому уравнению называется преобразованием Лапласа, формулы (2.2) соответственно формулами преобразования Лапласа, а полученное уравнение - операторным уравнением.

Новые функции $X(s)$ и $Y(s)$ называются изображениями $x(t)$ и $y(t)$ по Лапласу, тогда как $x(t)$ и $y(t)$ являются оригиналами по отношению к $X(s)$ и $Y(s)$.

Переход от одной модели к другой достаточно прост и заключается в замене знаков дифференциалов $\frac{d^n}{dt^n}$ на операторы s^n , знаков интегралов $\int \dots dt$ на множители $\frac{1}{s}$, а самих $x(t)$ и $y(t)$ - изображениями $X(s)$ и $Y(s)$.

Для обратного перехода от операторного уравнения к функциям от времени используется метод обратного преобразования Лапласа. Общая формула обратного преобразования Лапласа:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(j\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (2.3)$$

где $f(t)$ - оригинал, $F(j\omega)$ - изображение при $s = j\omega$, j - мнимая единица, ω - частота.

Эта формула достаточно сложна, поэтому были разработаны специальные таблицы (табл. 1.1 и 1.2), в которые сведены наиболее часто встречающиеся функции $F(s)$ и их оригиналы $f(t)$. Они позволяют отказаться от прямого использования формулы (2.3).

Таблица 1.2 - Преобразования Лапласа

| Оригинал $x(t)$ | Изображение $X(s)$ |
|--------------------------|----------------------------|
| δ -функция | 1 |
| 1 | $\frac{1}{s}$ |
| t | $\frac{1}{s^2}$ |
| t^2 | $\frac{2}{s^3}$ |
| t^n | $\frac{n!}{s^{n+1}}$ |
| $e^{-\alpha t}$ | $\frac{1}{s + \alpha}$ |
| $\alpha x(t)$ | $\alpha X(s)$ |
| $\sum_{i=1}^n x_i(t)$ | $\sum_{i=1}^n X_i(s)$ |
| $x(t - \alpha)$ | $X(s) \cdot e^{-\alpha s}$ |
| $\frac{d^n x(t)}{dt^n}$ | $s^n X(s)$ |
| $\int_0^t x(\tau) d\tau$ | $\frac{X(s)}{s}$ |

Таблица 1.2 - Формулы обратного преобразования Лапласа (дополнение)

| Изображение $X(s)$ | Оригинал $x(t)$ |
|------------------------|---|
| $\frac{M}{s + \alpha}$ | $M \cdot e^{-\alpha t}$ |
| $\frac{M}{s + \alpha}$ | $2 \cdot e^{-\alpha_1 t} \cdot [M_1 \cdot \cos(\alpha_2 t) - M_2 \cdot \sin(\alpha_2 t)]$ |

Закон изменения выходного сигнала обычно является функцией, которую необходимо найти, а входной сигнал, как правило, известен. Некоторые типовые входные сигналы были рассмотрены в п. 2.3. Здесь приводятся их изображения:

- единичное ступенчатое воздействие имеет изображение $X(s) = \frac{1}{s}$,
- дельта-функция $X(s) = 1$,
- линейное воздействие $X(s) = \frac{1}{s^2}$.

Пример. Решение ДУ с использованием преобразований Лапласа.

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 5\frac{dy}{dt} + 6y = 2\frac{dx}{dt} + 12x$$

Допустим, входной сигнал имеет форму единичного ступенчатого воздействия, т.е. $x(t) = 1$. Тогда изображение входного сигнала $X(s) = \frac{1}{s}$.

Производим преобразование исходного ДУ по Лапласу и подставляем $X(s)$:

$$s^2Y + 5sY + 6Y = 2sX + 12X,$$

$$s^2Y + 5sY + 6Y = 2s\frac{1}{s} + 12\frac{1}{s},$$

$$Y(s^3 + 5s^2 + 6s) = 2s + 12.$$

Определяется выражение для Y :

$$Y = \frac{2s + 12}{s^3 + 5s^2 + 6s}.$$

Оригинал полученной функции отсутствует в таблице оригиналов и изображений. Для решения задачи его поиска дробь разбивается на сумму простых дробей с учетом того, что знаменатель может быть представлен в виде $s(s + 2)(s + 3)$:

$$\begin{aligned} Y &= \frac{2s + 12}{s^3 + 5s^2 + 6s} = \frac{2s + 12}{s(s + 2)(s + 3)} = \frac{M_1}{s} + \frac{M_2}{s + 2} + \frac{M_3}{s + 3} = \\ &= \frac{(M_1 + M_2 + M_3)s^2 + (5M_1 + 3M_2 + 2M_3)s + 6M_1}{s(s + 2)(s + 3)}. \end{aligned}$$

Сравнивая получившуюся дробь с исходной, можно составить систему из трех уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{cases} M_1 + M_2 + M_3 = 0 \\ 5M_1 + 3M_2 + 2M_3 = 2 \\ 6M_1 = 12 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} M_1 = 2 \\ M_2 = -4 \\ M_3 = 2 \end{cases}$$

Следовательно, дробь можно представить как сумму трех дробей:

$$Y = \frac{2s+12}{s^3+5s^2+6s} = \frac{2}{s} - \frac{4}{s+2} + \frac{2}{s+3}.$$

Теперь, используя табличные функции, определяется оригинал выходной функции:

$$y(t) = 2 - 4 \cdot e^{-2t} + 2 \cdot e^{-3t}.$$

2.6 Передаточные функции

2.6.1 Определение передаточной функции

Преобразование ДУ по Лапласу дает возможность ввести удобное понятие передаточной функции, характеризующей динамические свойства системы.

Например, операторное уравнение

$$3s^2Y(s) + 4sY(s) + Y(s) = 2sX(s) + 4X(s),$$

можно преобразовать, вынеся $X(s)$ и $Y(s)$ за скобки и поделив друг на друга:

$$Y(s) \cdot (3s^2 + 4s + 1) = X(s) \cdot (2s + 4)$$

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{2s + 4}{3s^2 + 4s + 1}.$$

Полученное выражение называется передаточной функцией.

Передаточной функцией называется отношение изображения выходного воздействия $Y(s)$ к изображению входного $X(s)$ при нулевых начальных условиях.

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (2.4)$$

Передаточная функция является дробно-рациональной функцией комплексной переменной:

$$W(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_0 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_ms^m}{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n},$$

где $B(s) = b_0 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_ms^m$ - полином числителя,

$A(s) = a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n$ - полином знаменателя.

Передаточная функция имеет порядок, который определяется порядком полинома знаменателя (n).

Из (2.4) следует, что изображение выходного сигнала можно найти как:

$$Y(s) = W(s) \cdot X(s).$$

Так как передаточная функция системы полностью определяет ее динамические свойства, то первоначальная задача расчета АСР сводится к определению ее передаточной функции.

2.6.2 Примеры типовых звеньев

Звеном системы называется ее элемент, обладающий определенными свойствами в динамическом отношении. Звенья систем регулирования могут иметь разную физическую основу (электрические, пневматические, механические и др. звенья), но относятся к одной группе. Соотношение входных и выходных сигналов в звеньях одной группы описываются одинаковыми передаточными функциями.

Простейшие типовые звенья:

- усилительное,
- интегрирующее,
- дифференцирующее,
- апериодическое,
- колебательное,
- запаздывающее.

Усилительное звено.

Звено усиливает входной сигнал в K раз. Уравнение звена $y = K \cdot x$, передаточная функция $W(s) = K$. Параметр K называется коэффициентом усиления.

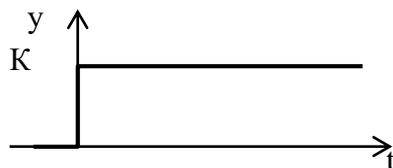


Рис.2.6. Переходная характеристика усилительного звена

Выходной сигнал такого звена в точности повторяет входной сигнал, усиленный в K раз (рис.2.6).

Примерами таких звеньев являются: механические передачи, датчики, безынерционные усилители и др.

Интегрирующее.

Идеальное интегрирующее.

Выходная величина идеального интегрирующего звена пропорциональна интегралу входной величины.

$$y = K \int_0^t x(t) dt; \quad W(s) = \frac{K}{s}$$

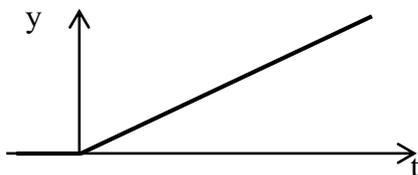


Рис.2.7. Переходная характеристика идеального интегрирующего звена

При подаче на вход звена воздействия выходной сигнал постоянно возрастает (см. рис. 1.16).

Это звено астатическое, т.е. не имеет установившегося режима.

Реальное интегрирующее.



Рис.2.8. Переходная характеристика реального интегрирующего звена

Передаточная функция этого звена имеет вид:

$$W(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)}$$

Переходная характеристика в отличие от идеального звена является кривой (рис.2.8).

Примером интегрирующего звена является двигатель постоянного тока с независимым возбуждением, если в качестве входного воздействия принять напряжение питания статора, а выходного - угол поворота ротора.

Дифференцирующее.

Идеальное дифференцирующее.

Выходная величина пропорциональна производной по времени от входной:

$$y = K \frac{dx(t)}{dt}; \quad W(s) = K*s.$$

При ступенчатом входном сигнале выходной сигнал представляет собой импульс (δ -функцию).

3.2) Реальное дифференцирующее.

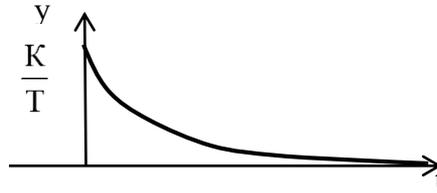


Рис.2.9. Переходная характеристика реального дифференцирующего звена

Идеальные дифференцирующие звенья физически не реализуемы. Большинство объектов, которые представляют собой дифференцирующие звенья, относятся к реальным дифференцирующим звеньям. Переходная характеристика и передаточная функция этого звена имеют вид:

$$W(s) = \frac{Ks}{Ts + 1}.$$

Апериодическое (инерционное).

Этому звену соответствуют ДУ и ПФ вида:

$$T \frac{dy}{dt} + y = Kx; \quad W(s) = \frac{K}{Ts + 1}.$$

Определим характер изменения выходной величины этого звена при подаче на вход ступенчатого воздействия величины x_0 .

Изображение ступенчатого воздействия: $X(s) = \frac{x_0}{s}$. Тогда изображение выходной величины:

$$Y(s) = W(s) X(s) = \frac{K}{Ts + 1} \frac{x_0}{s} = K x_0 \frac{1}{s(Ts + 1)}.$$

Разложим дробь на простые:

$$\frac{1}{s(Ts + 1)} = \frac{A}{Ts + 1} + \frac{B}{s} = \frac{As + BTs + B}{s(Ts + 1)} = \frac{1}{s} - \frac{T}{Ts + 1} = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{T}}$$

Оригинал первой дроби по таблице: $L^{-1}\left\{\frac{1}{s}\right\} = 1$, второй:

$$L^{-1}\left\{\frac{1}{s + \frac{1}{T}}\right\} = e^{-\frac{t}{T}}.$$

Тогда окончательно получаем: $y(t) = K x_0 (1 - e^{-\frac{t}{T}})$.

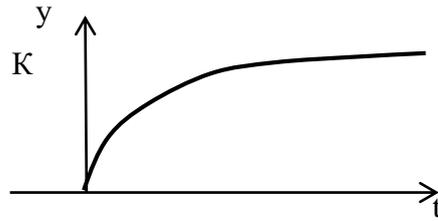


Рис.2.10. Переходная характеристика аperiodического звена

Постоянная T называется постоянной времени.

Большинство тепловых объектов являются аperiodическими звеньями. Например, при подаче на вход электрической печи напряжения ее температура будет изменяться по аналогичному закону (рис. 2.10).

Колебательное звено.

Колебательное звено имеет ДУ и ПФ вида:

$$T_2^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_1 \frac{dy}{dt} + y = Kx, \quad W(s) = \frac{K}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}.$$

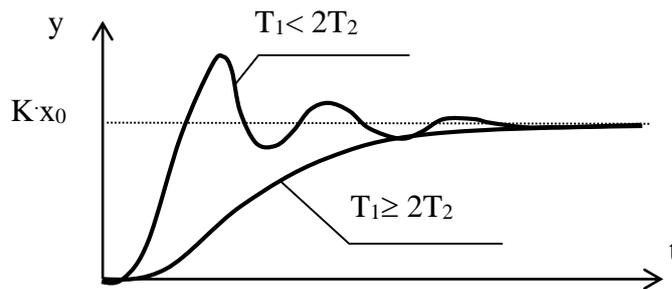


Рис.2.11. Переходная характеристика колебательного звена

При подаче на вход ступенчатого воздействия амплитудой x_0 на переходная кривая будет иметь один из двух видов: аperiodический (при $T_1 \geq 2T_2$) или колебательный (при $T_1 < 2T_2$).

Запаздывающее.

$$y(t) = x(t - \tau), \quad W(s) = e^{-\tau s}.$$

Выходная величина y в точности повторяет входную величину x с некоторым запаздыванием τ . Примеры: движение груза по конвейеру, движение жидкости по трубопроводу.

2.6.3 Соединения звеньев.

Поскольку исследуемый объект в целях упрощения анализа функционирования разбит нами на звенья, то после определения передаточных функций для каждого звена встает задача объединения их в одну передаточную функцию объекта. Вид передаточной функции объекта зависит от последовательности соединения звеньев:

1. Последовательное соединение.

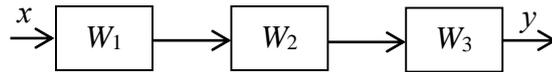


Рис. 2.12. Последовательное соединение звеньев

$$W_{об} = W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \dots$$

При последовательном соединении звеньев их передаточные функции перемножаются.

2. Параллельное соединение.

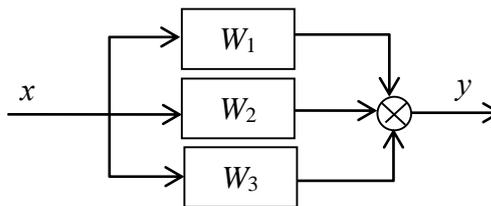


Рис. 2.13. Параллельное соединение звеньев

$$W_{об} = W_1 + W_2 + W_3 + \dots$$

При параллельном соединении звеньев их передаточные функции складываются.

3. Обратная связь

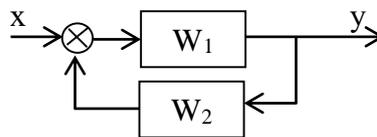


Рис. 2.14. Соединение звеньев с обратной связью

Передаточная функция по заданию (x):

$$W_3(s) = \frac{W_1}{1 \pm W_1 W_2},$$

где: «+» соответствует отрицательной ОС,

«-» - положительной.

Для определения передаточных функций объектов, имеющих более сложные соединения звеньев, используют либо последовательное укрупнение схемы, либо преобразуют по формуле Мезона.

2.6.4 Передаточные функции АСР

Для исследования и расчета структурную схему АСР путем эквивалентных преобразований приводят к простейшему стандартному виду «объект - регулятор».

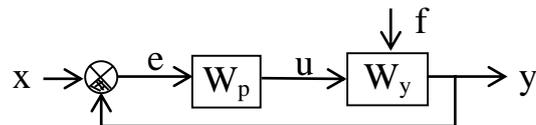


Рис. 2.15. Структурная схема АСР.

Это необходимо, во-первых, для того, чтобы определить математические зависимости в системе, и, во-вторых, как правило, все инженерные методы расчета и определения параметров настройки регуляторов применены для такой стандартной структуры.

В общем случае любая одномерная АСР с главной обратной связью путем постепенного укрупнения звеньев может быть приведена к такому виду.

Если выход системы y не подавать на ее вход, то мы получим разомкнутую систему регулирования, передаточная функция которой определяется как произведение:

$$W_{\infty} = W_p \cdot W_y$$

(W_p - ПФ регулятора, W_y - ПФ объекта управления).

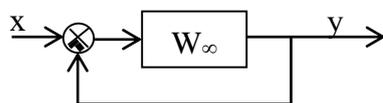


Рис. 2.16. АСР, охваченная обратной связью

То есть последовательность звеньев W_p и W_y может быть заменена одним звеном с W_{∞} . Передаточную функцию замкнутой системы принято обозначать как $\Phi(s)$. Она может быть выражена через W_{∞} :

$$\Phi_3(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{W_{\infty}(s)}{1 + W_{\infty}(s)}.$$

Далее будем рассматривать только системы с обратной отрицательной связью, поскольку они используются в подавляющем большинстве АСР).

Данная передаточная функция $\Phi_3(s)$ определяет зависимость y от x и называется передаточной функцией замкнутой системы по каналу задающего воздействия (по заданию).

Для АСР существуют также передаточные функции по другим каналам:

$$\Phi_e(s) = \frac{E(s)}{X(s)} = \frac{1}{1+W_\infty(s)} \text{ - по ошибке,}$$

$$\Phi_B(s) = \frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{W_y(s)}{1+W_\infty(s)} \text{ - по возмущению.}$$

Поскольку передаточная функция разомкнутой системы является в общем случае дробно-рациональной функцией вида $W_\infty = \frac{B(s)}{A(s)}$, то передаточные функции замкнутой системы могут быть преобразованы:

$$\Phi_3(s) = \frac{\frac{B}{A}}{1 + \frac{B}{A}} = \frac{B}{A+B}, \quad \Phi_e(s) = \frac{1}{1 + \frac{B}{A}} = \frac{A}{A+B}.$$

Как видно, эти передаточные функции отличаются только выражениями числителей. Выражение знаменателя называется характеристическим выражением замкнутой системы и обозначается как $D_3(s) = A(s) + B(s)$, в то время как выражение, находящееся в числителе передаточной функции разомкнутой системы W_∞ , называется характеристическим выражением разомкнутой системы $B(s)$.

2.6.5 Определение параметров передаточной функции объекта по переходной кривой

Процесс получения передаточной функции объекта, исходя из данных о переходном процессе, называется идентификацией объекта.

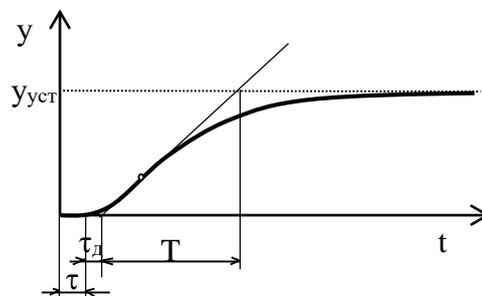


Рис. 2.17. Переходная характеристика при подаче ступенчатого воздействия на вход некоторого объекта

Предположим, что при подаче на вход некоторого объекта ступенчатого воздействия была получена переходная характеристика (рис. 2.17). Требуется определить вид и параметры передаточной функции.

Предположим, что передаточная функция имеет вид (инерционной звено с запаздыванием):

$$W(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s},$$

Параметры передаточной функции:

K - коэффициент усиления,

T - постоянная времени,

τ - запаздывание.

Коэффициентом усиления называется величина, показывающая, во сколько раз данное звено усиливает входной сигнал (в установившемся режиме), и равна отношению выходной величины y в установившемся режиме ко входной величине x :

$$K = \frac{y_{уст}}{x},$$

Установившееся значение выходной величины $y_{уст}$ - это значение y при $t \rightarrow \infty$.

Запаздыванием τ называется промежуток времени от момента изменения входной величины x до начала изменения выходной величины y .

Постоянная времени T может быть определена несколькими методами в зависимости от вида передаточной функции. Для рассматриваемой передаточной функции 1-го порядка T определяется наиболее просто: сначала проводится касательная к точке перегиба, затем находятся точки пересечения с осью времени и асимптотой $y_{уст}$; время T определяется как интервал времени между этими точками.

В случае, если на графике между точкой перегиба имеется вогнутость, определяется дополнительное запаздывание $\tau_{доп}$, которое прибавляется к основному: $\tau = \tau + \tau_{доп}$.

2.7 Частотные характеристики

Определение частотных характеристик.

Известно, что динамические процессы могут быть представлены частотными характеристиками (ЧХ) путем разложения функции в ряд Фурье.

Предположим, имеется некоторый объект и требуется определить его ЧХ. При экспериментальном снятии ЧХ на вход объекта подается синусоидальный сигнал с амплитудой $A_{\text{вх}} = 1$ и некоторой частотой ω , т.е.

$$x(t) = A_{\text{вх}} \sin(\omega t) = \sin(\omega t).$$



Рис. 2.18. Получение частотных характеристик

Тогда после прохождения переходных процессов на выходе мы будем также иметь синусоидальный сигнал той же частоты ω , но другой амплитуды $A_{\text{вых}}$ и фазы φ :

$$y(t) = A_{\text{вых}} \sin(\omega t + \varphi).$$

При разных значениях ω величины $A_{\text{вых}}$ и φ , как правило, также будут различными. Эта зависимость амплитуды и фазы от частоты называется частотной характеристикой. Виды ЧХ:

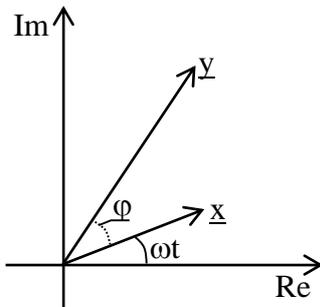


Рис. 2.19. Комплексная плоскость

- АФХ - зависимость амплитуды и фазы от частоты (изображается на комплексной плоскости);
- АЧХ - зависимость амплитуды от частоты;
- ФЧХ - зависимость фазы от частоты;
- ЛАХ, ЛАЧХ - логарифмические АЧХ.

На комплексной плоскости входная величина $x = A_{\text{вх}} \sin(\omega t)$ для каждого момента времени t_i определяется вектором \underline{x} на комплексной плоскости. Этот вектор имеет длину, равную $A_{\text{вх}}$, и отложен под углом ωt_i к действительной оси. (Re - действительная ось, Im - мнимая ось)

Тогда величину x можно записать в комплексной форме

$$\underline{x}(t) = A_{\text{вх}} (\cos(\omega t) + j \sin(\omega t)),$$

где $j = \sqrt{-1}$ - мнимая единица.

Или, если использовать формулу Эйлера $e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha$, то можно записать

$$\underline{x}(t) = A_{\text{вх}} \cdot e^{j\omega t}.$$

Выходной сигнал $y(t)$ можно аналогично представить как вектор

$$\underline{y}(t) = A_{\text{вых}} \cdot e^{j(\omega t + \varphi)}.$$

Рассмотрим связь передаточной функции и частотной характеристики. Определим производные по Лапласу:

$$\begin{aligned} y &\rightarrow Y \\ y' &\rightarrow sY \end{aligned}$$

$$y'' \rightarrow s^2 Y \text{ и т.д.}$$

Определим производные ЧХ:

$$y'(t) = j\omega A_{\text{ВЫХ}} e^{j(\omega t + \varphi)} = j\omega y,$$

$$y''(t) = (j\omega)^2 A_{\text{ВЫХ}} e^{j(\omega t + \varphi)} = (j\omega)^2 y \text{ и т.д.}$$

Отсюда видно соответствие $s = j\omega$. Вывод: частотные характеристики могут быть построены по передаточным функциям путем замены $s = j\omega$.

Пример: $W(s) = \frac{K}{Ts + 1}$.

При $s = j\omega$ имеем:

$$W(j\omega) = \frac{K}{Tj\omega + 1} = \frac{K}{1 + jT\omega} = \frac{K(1 - jT\omega)}{(1 + jT\omega)(1 - jT\omega)} = \frac{K - j\omega KT}{1 + \omega^2 T^2} = \frac{K}{1 + \omega^2 T^2} - j \frac{j\omega KT}{1 + \omega^2 T^2} = \text{Re}(\omega) + j \text{Im}(\omega).$$

Изменяя ω от 0 до ∞ , можно построить АФХ (рис. 2.20).

Для построения АЧХ и ФЧХ используются формулы:

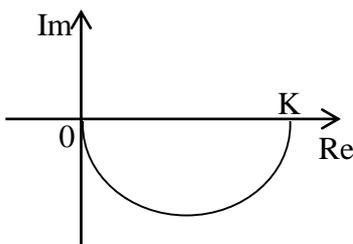


Рис. 2.20. АФХ

$$A(\omega) = \sqrt{\text{Re}^2(\omega) + \text{Im}^2(\omega)},$$

$$\varphi(\omega) = \text{arctg} \frac{\text{Im}(\omega)}{\text{Re}(\omega)}.$$

Формулы получения АФХ по АЧХ и ФЧХ:

$$\text{Re}(\omega) = A(\omega) \cos \varphi(\omega),$$

$$\text{Im}(\omega) = A(\omega) \sin \varphi(\omega).$$

Логарифмические частотные характеристики

Логарифмические частотные характеристики (ЛЧХ) используются довольно часто для описания динамических параметров различных устройств. Существуют два основных вида ЛЧХ, которые, как правило, используются совместно и изображаются в виде графиков:

1. ЛАЧХ - логарифмическая АЧХ.

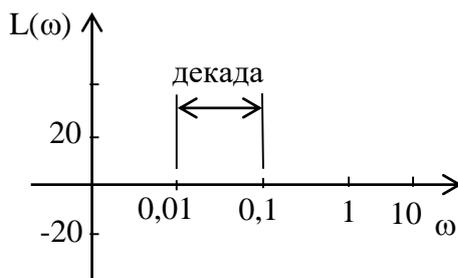


Рис. 2.21. ЛАЧХ

Формула для построения ЛАЧХ: $L(\omega) = 20 \lg A_{\text{ВЫХ}}(\omega)$.

Единица измерения - децибел (дБ).

На графике ЛАЧХ по оси абсцисс откладывается частота в логарифмическом масштабе. Это означает, что равным вели-

чинам отрезков по оси ω соответствуют кратные значения частоты. Для ЛЧХ кратность = 10.

По оси ординат откладываются значения $L(\omega)$ в обычном масштабе.

2. ЛФЧХ - логарифмическая ФЧХ. Представляет из себя ФЧХ, у которой ось частоты ω проградуирована в логарифмическом масштабе в соответствии с ЛАЧХ. По оси ординат откладываются фазы φ .

Примеры ЛЧХ.

1. Фильтр низких частот (ФНЧ)

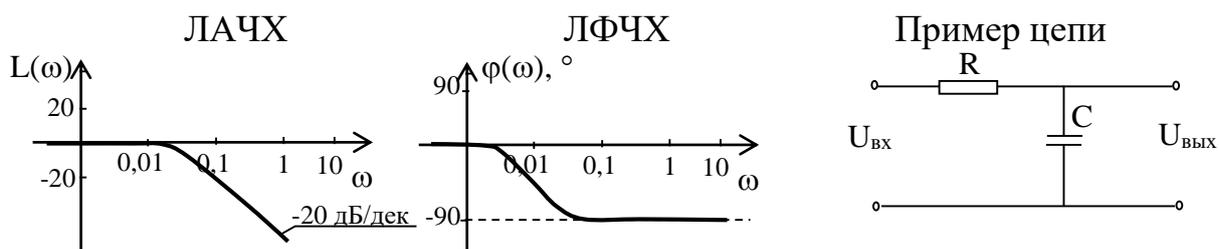


Рис. 2.22. Фильтр низких частот

Фильтр низких частот предназначен для подавления высокочастотных воздействий.

2. Фильтр высоких частот (ФВЧ)

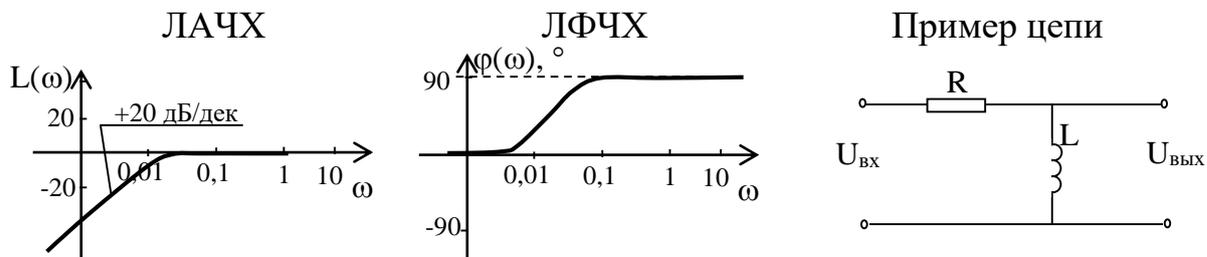


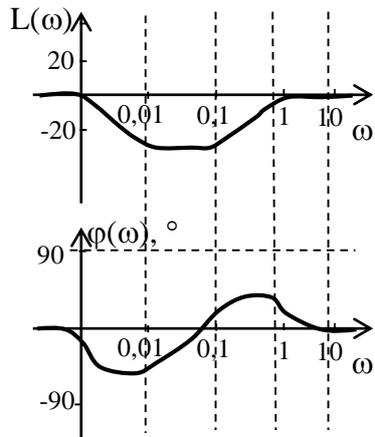
Рис. 2.23. Фильтр высоких частот

Фильтр высоких частот предназначен для подавления низкочастотных воздействий.

3. Заградительный фильтр.

Заградительный фильтр подавляет только определенный диапазон частот.

ЛАЧХ и ЛФЧХ



Пример цепи

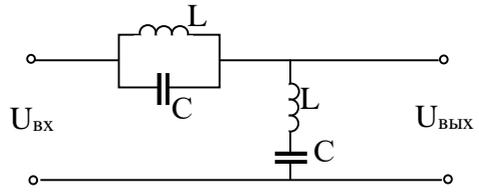


Рис. 2.24. Заградительный фильтр

3 КАЧЕСТВО ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ

3.1 Критерии устойчивости

Устойчивость.

Важным показателем АСР является устойчивость, поскольку основное ее назначение заключается в поддержании заданного постоянного значения регулируемого параметра или изменение его по определенному закону. При отклонении регулируемого параметра от заданной величины (например, под действием возмущения или изменения задания) регулятор воздействует на систему таким образом, чтобы ликвидировать это отклонение. Если система в результате этого воздействия возвращается в исходное состояние или переходит в другое равновесное состояние, то такая система называется устойчивой. Если же возникают колебания со все возрастающей амплитудой или происходит монотонное увеличение ошибки e , то система называется неустойчивой.

Для того, чтобы определить, устойчива система или нет, используются критерии устойчивости:

- 1) корневой критерий,
- 2) критерий Стодолы,
- 3) критерий Гурвица,
- 4) критерий Найквиста,
- 5) критерий Михайлова и др.

Первые два критерия являются необходимыми критериями устойчивости отдельных звеньев и разомкнутых систем. Критерий Гурвица является алгебраическим и разработан для определения устойчивости замкнутых систем без запаздывания. Последние два критерия относятся к группе частотных критериев, поскольку определяют устойчивость замкнутых систем по их частотным характеристикам. Их особенностью является возможность применения к замкнутым системам с запаздыванием, которыми является подавляющее большинство систем управления.

3.1.2 Корневой критерий

Корневой критерий определяет устойчивость системы по виду передаточной функции. Динамической характеристикой системы, описывающей основные поведенческие свойства, является характеристический по-

лином, находящийся в знаменателе передаточной функции. Путем приравнивания знаменателя к нулю можно получить характеристическое уравнение, по корням которого определить устойчивость.

Корни характеристического уравнения могут быть как действительные, так и комплексные и для определения устойчивости откладываются на комплексной плоскости (рис. 2.25).

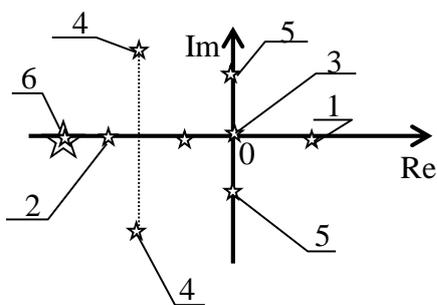


Рис. 3.1. Корни характеристического уравнения на комплексной плоскости

Виды корней характеристического уравнения:

- действительные:
 - положительные (корень № 1);
 - отрицательные (2);
 - нулевые (3);
- комплексные
 - комплексные сопряженные (4);
 - чисто мнимые (5);
- по кратности корни бывают:

- одиночные (1, 2, 3);
- сопряженные (4, 5): $s_i = \alpha \pm j\omega$;
- кратные (6) $s_i = s_{i+1} = \dots$

Корневой критерий формулируется следующим образом:

Линейная АСР устойчива, если все корни характеристического уравнения лежат в левой полуплоскости. Если хотя бы один корень находится на мнимой оси, которая является границей устойчивости, то говорят, что система находится на границе устойчивости. Если хотя бы один корень находится в правой полуплоскости (не зависимо от числа корней в левой), то система является неустойчивой.

Иными словами, все действительные корни и действительные части комплексных корней должны быть отрицательны. В противном случае система неустойчива.

Пример 3.1. Передаточная функция системы имеет вид:

$$W(s) = \frac{3s + 4}{s^3 + 2s^2 + 2.25s + 1.25}.$$

Характеристическое уравнение: $s^3 + 2s^2 + 2.25s + 1.25 = 0$.

Корни: $s_1 = -1$; $s_2 = -0,5 + j$; $s_3 = -0,5 - j$.

Следовательно, система устойчива.

3.1.3 Критерий Стодолы

Этот критерий является следствием из предыдущего и формулируется следующим образом: Линейная система устойчива, если все коэффициенты характеристического полинома положительны.

То есть, передаточная функция из примера 3.1 по критерию Стодола соответствует устойчивой системе.

3.1.4 Критерий Гурвица

Критерий Гурвица работает с характеристическим полиномом замкнутой системы. Как известно, структурная схема АСР по ошибке имеет вид (рис. 2.26):

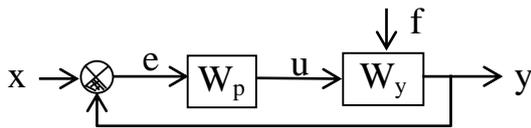


Рис.3.2. Замкнутая САУ

где: W_p - передаточная функция регулятора,

W_y - передаточная функция объекта управления.

Определим передаточную функцию для прямой связи (передаточную функцию разомкнутой системы): $W_\infty = W_p W_y$.

Далее с учетом наличия отрицательной обратной связи получаем передаточную функцию замкнутой системы:

$$W_3(s) = \frac{W_\infty}{1 + W_\infty}.$$

Как правило, передаточная функция разомкнутой системы имеет дробно-рациональный вид:

$$W_\infty(s) = \frac{B(s)}{A(s)}.$$

Тогда после подстановки и преобразования получаем:

$$W_3(s) = \frac{B(s)}{A(s) + B(s)}.$$

Отсюда следует, что характеристический полином замкнутой системы (ХПЗС) можно определить как сумму числителя и знаменателя W_∞ :

$$D_3(s) = A(s) + B(s).$$

Для определения устойчивости по Гурвицу строится матрица таким образом, чтобы по главной диагонали были расположены коэффициенты

ХПЗС с a_{n+1} по a_0 . Справа и слева от нее записываются коэффициенты с индексами через 2 ($a_0, a_2, a_4 \dots$ или $a_1, a_3, a_5 \dots$). Тогда для устойчивой системы необходимо и достаточно, чтобы определитель и все главные диагональные миноры матрицы были больше нуля.

Если хотя бы один определитель будет равен нулю, то система будет находиться на границе устойчивости.

Если хотя бы один определитель будет отрицателен, то система неустойчива не зависимо от числа положительных или нулевых определителей.

Пример. Дана передаточная функция разомкнутой системы

$$W_{\infty}(s) = \frac{2s^3 + 9s^2 + 6s + 1}{2s^4 + 3s^3 + s^2} = \frac{B(s)}{A(s)}.$$

Требуется определить устойчивость замкнутой системы по критерию Гурвица.

Для этого определяется ХПЗС:

$$D(s) = A(s) + B(s) = 2s^4 + 3s^3 + s^2 + 2s^3 + 9s^2 + 6s + 1 = 2s^4 + 5s^3 + 10s^2 + 6s + 1.$$

Поскольку степень ХПЗС равна $n = 4$, то матрица будет иметь размер 4×4 . Коэффициенты ХПЗС равны $a_4 = 2, a_3 = 5, a_2 = 10, a_1 = 6, a_0 = 1$.

Матрица имеет вид:

$$\begin{pmatrix} 5 & 6 & 0 & 0 \\ 2 & 10 & 1 & 0 \\ 0 & 5 & 6 & 0 \\ 0 & 2 & 10 & 1 \end{pmatrix}$$

(обратите внимание на сходство строк матрицы: 1 с 3 и 2 с 4). Определители:

$$\Delta_1 = 5 > 0,$$

$$\Delta_2 = \begin{pmatrix} 5 & 6 \\ 2 & 10 \end{pmatrix} = 5 \cdot 10 - 2 \cdot 6 = 38 > 0,$$

$$\Delta_3 = \begin{pmatrix} 5 & 6 & 0 \\ 2 & 10 & 1 \\ 0 & 5 & 6 \end{pmatrix} = (5 \cdot 10 \cdot 6 + 6 \cdot 1 \cdot 0 + 2 \cdot 5 \cdot 0) - (0 \cdot 10 \cdot 0 + 5 \cdot 5 \cdot 1 + 2 \cdot 6 \cdot 6) = 209 > 0$$

$$\Delta_4 = 1 \cdot \Delta_3 = 1 \cdot 209 > 0.$$

Поскольку все определители положительны, то АСР устойчива.

3.1.5 Критерий Михайлова

Описанные выше критерии устойчивости не работают, если передаточная функция системы имеет запаздывание, то есть может быть записана в виде

$$W_{\infty}(s) = \frac{B(s)}{A(s)} e^{-\tau s},$$

где τ - запаздывание.

В этом случае характеристическое выражение замкнутой системы полиномом не является и его корни определить невозможно. Для определения устойчивости в данном случае используются частотные критерии Михайлова и Найквиста.

Порядок применения критерия Михайлова:

1) записывается характеристическое выражение замкнутой системы:

$$D_3(s) = A(s) + B(s) \cdot e^{-\tau s}.$$

2) подставляется $s = j\omega$. $D_3(j\omega) = Re(\omega) + Im(\omega)$.

3) записывается уравнение годографа Михайлова $D_3(j\omega)$ и строится кривая на комплексной плоскости.

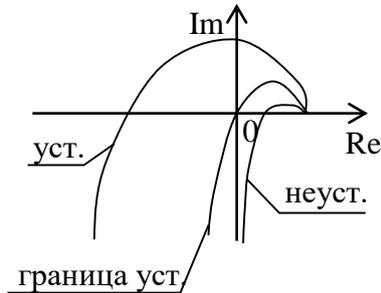


Рис.3.3. Годограф Михайлова

Для устойчивой АСР необходимо и достаточно, чтобы годограф Михайлова (см. рис.), начинаясь при $\omega = 0$ на положительной вещественной полуоси, обходил последовательно в положительном направлении (против часовой стрелки) при возрастании ω от 0 до ∞ n квадрантов, где n - степень характеристического полинома.

Если годограф Михайлова проходит через начало координат, то говорят, что система находится на границе устойчивости.

3.1.6 Критерий Найквиста

Данный критерий аналогичен критерию Михайлова, но работает с АФХ системы, поэтому более сложен для расчетов.

Последовательность:

1. Определяется передаточная функция разомкнутой системы $W_{\infty}(s) = \frac{B(s)}{A(s)}$.
2. Определяется число правых корней m .
3. Подставляется $s = j\omega$. $W_{\infty}(j\omega)$.
4. Строится АФХ разомкнутой системы.

Для устойчивости АСР необходимо и достаточно, чтобы при увеличении ω от 0 до ∞ АФХ $W_{\infty}(j\omega)$ m раз охватывала точку $(-1; 0)$, где m - число правых корней разомкнутой системы.

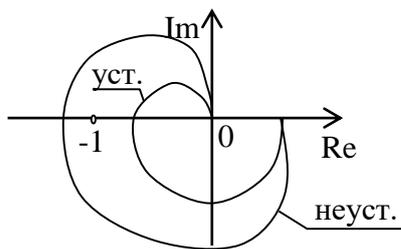


Рис.3.4. Критерий Найквиста

Если АФХ проходит через точку $(-1; 0)$, то замкнутая система находится на границе устойчивости.

В случае, если характеристическое уравнение разомкнутой системы $A(s) = 0$ корней не имеет (т.е. $m = 0$), то критерий, согласно критерию, замкнутая система является устойчивой, если АФХ разомкнутой системы $W_{\infty}(j\omega)$ не охватывала точку $(-1; 0)$, в противном случае система будет неустойчива (или на границе устойчивости).

3.2. Показатели качества

Если исследуемая АСР устойчива, то может возникнуть вопрос о том, насколько качественно происходит регулирование в этой системе и удовлетворяет ли оно технологическим требованиям. На практике качество регулирования может быть определено визуально по графику переходной кривой, однако, имеются точные методы, дающие конкретные числовые значения.

Показатели качества разбиты на 4 группы:

- 1) прямые - определяемые непосредственно по кривой переходного процесса,
- 2) корневые - определяемые по корням характеристического полинома,
- 3) частотные - по частотным характеристикам,
- 4) интегральные - получаемые путем интегрирования функций.

Прямые показатели качества.

К ним относятся: степень затухания ψ , перерегулирование σ , статическая ошибка $e_{ст}$, время регулирования t_p и др.

Предположим, переходная кривая, снятая на объекте, имеет колебательный вид (рис. 2.29).

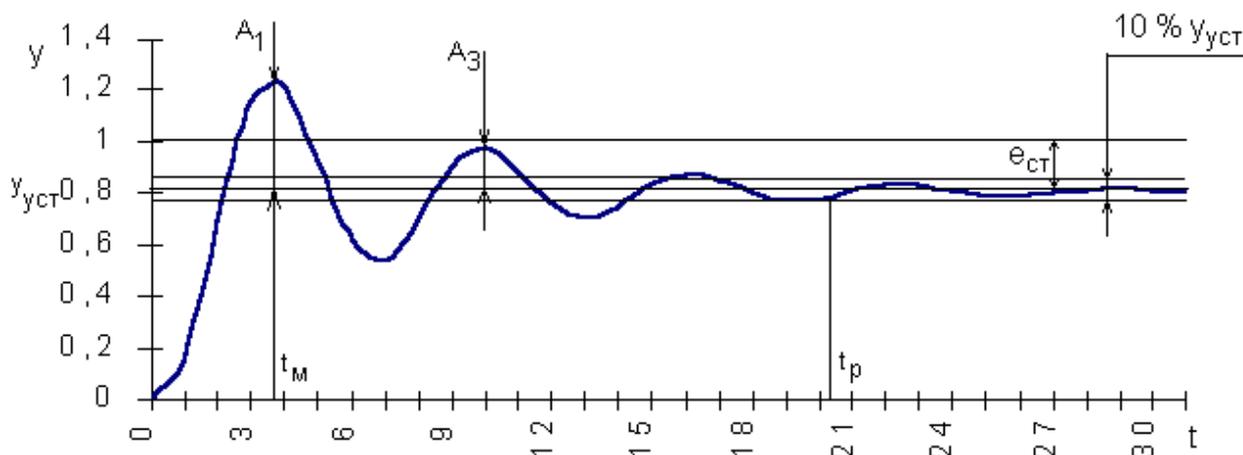


Рис. 3.5. Переходная характеристика некоторого объекта

Сразу по ней определяется установившееся значение выходной величины $y_{уст}$.

Степень затухания ψ определяется по формуле

$$\Psi = 1 - \frac{A_3}{A_1},$$

где A_1 и A_3 - соответственно 1-я и 3-я амплитуды переходной кривой.

Перерегулирование $\sigma = \frac{A_1}{y_{уст}} = \frac{y_{max} - y_{уст}}{y_{уст}}$, где y_{max} - максимум переходной кривой.

Статическая ошибка $e_{ст} = x - y_{уст}$, где x - входная величина.

Время достижения первого максимума t_M определяется по графику.

Время регулирования t_p определяется следующим образом: Находится допустимое отклонение $\Delta = 5\% y_{уст}$ и строится «трубка» толщиной 2Δ . Время t_p соответствует последней точке пересечения $y(t)$ с данной границей. То есть время, когда колебания регулируемой величины перестают превышать 5% от установившегося значения.

Корневые показатели качества.

К ним относятся: степень колебательности m , степень устойчивости η и др.

Не требуют построения переходных кривых, поскольку определяются по корням характеристического полинома. Для этого корни полинома откладываются на комплексной плоскости и по ним определяются:

Степень устойчивости η определяется как граница, правее которой корней нет, т.е.

$$\eta = \min |\operatorname{Re}(s_i)|,$$

где $\operatorname{Re}(s_i)$ - действительная часть корня s_i .

Степень колебательности m рассчитывается через угол γ . $m = \operatorname{tg} \gamma$. Для определения γ проводятся два луча, которые ограничивают все корни на комплексной плоскости. γ - угол между этими лучами и мнимой осью. Степень колебательности может быть определена также по формуле:

$$m = \min \left| \frac{\operatorname{Re}(s_i)}{\operatorname{Im}(s_i)} \right|.$$

Частотные показатели качества.

Для определения частотных показателей качества требуется построение АФХ разомкнутой системы и АЧХ замкнутой системы.

По АФХ определяются запасы: ΔA - по амплитуде, $\Delta \varphi$ - по фазе.

Запас ΔA определяется по точке пересечения АФХ с отрицательной действительной полуосью.

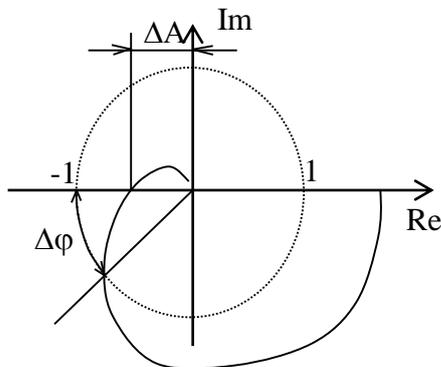


Рис. 3.6. Частотные показатели качества

Для определения $\Delta \varphi$ строится окружность единичного радиуса с центром в начале координат. Запас $\Delta \varphi$ определяется по точке пересечения с этой окружностью.

По АЧХ замкнутой системы определяются показатели колебательности по заданию M и ошибке M_E как максимумы соответственно АЧХ по заданию и АЧХ по ошибке.

Связи между показателями качества.

Описанные выше показатели качества связаны между собой определенными соотношениями:

$$\Psi = 1 - e^{-2\pi m}; \quad t_p = \frac{3}{\eta}; \quad \Psi = 1 - M^{-\frac{\pi}{m}}; \quad M = \frac{m^2 + 1}{2m}.$$

3.3 Типы регуляторов

Для регулирования объектами управления, как правило, используют типовые регуляторы, названия которых соответствуют названиям типовых звеньев:

- 1) П-регулятор (пропорциональный регулятор)

$$W_{\text{П}}(s) = K_1.$$

Принцип действия заключается в том, что он вырабатывает управляющее воздействие на объект пропорционально величине ошибки (чем больше ошибка e , тем больше управляющее воздействие u).

- 2) И-регулятор (интегрирующий регулятор)

$$W_{\text{И}}(s) = \frac{K_0}{s}.$$

Управляющее воздействие пропорционально интегралу от ошибки.

- 3) Д-регулятор (дифференцирующий регулятор)

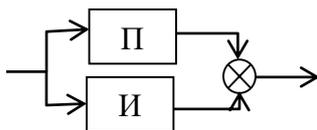
$$W_{\text{Д}}(s) = K_2 s.$$

Генерирует управляющее воздействие только при изменении регулируемой величины:

$$u = K_2 \frac{de}{dt}.$$

На практике данные простейшие регуляторы комбинируются в регуляторы вида:

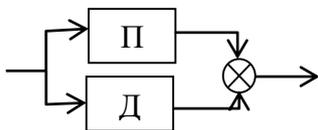
- 4) ПИ-регулятор (пропорционально-интегральный регулятор)



$$W_{\text{ПИ}}(s) = K_1 + \frac{K_0}{s}.$$

Рис.3.7. ПИ-регулятор

- 5) ПД-регулятор (пропорционально-дифференциальный регулятор)



$$W_{\text{ПД}}(s) = K_1 + K_2 s.$$

Рис.3.8. ПД-регулятор

- 6) ПИД-регулятор.

$$W_{\text{ПИД}}(s) = K_1 + \frac{K_0}{s} + K_2 s.$$

Наиболее часто используется ПИД-регулятор, поскольку он сочетает в себе достоинства всех трех типовых регуляторов.

3.4 Определение оптимальных настроек регуляторов

Регулятор, включенный в АСР, может иметь несколько настроек, каждая из которых может изменяться в достаточно широких пределах. При этом при определенных значениях настроек система будет управлять объектом в соответствии с технологическими требованиями, при других может привести к неустойчивому состоянию.

Поэтому стоит задача определить настройки, соответствующие устойчивой системе, но и выбрать из них оптимальные.

Оптимальными настройками регулятора называются настройки, которые соответствуют минимуму (или максимуму) какого-либо показателя качества. Требования к показателям качества устанавливаются непосредственно, исходя из технологических. Чаще всего накладываются требования на время регулирования (минимум) и степень затухания ($\Psi \geq \Psi_{\text{зад}}$).

Однако, изменяя настройки таким образом, чтобы увеличить степень затухания, мы можем прийти к слишком большому времени регулирования, что нецелесообразно. И наоборот, стремясь уменьшить время регулирования, мы получаем более колебательные процессы с большим значением Ψ .

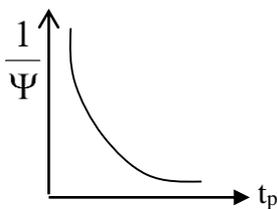


Рис.3.9. Зависимость Ψ от t_p

Зависимость Ψ от t_p в общем случае имеет вид, изображенный на графике (рис.2.33).

Поэтому для определения оптимальных настроек разработан ряд математических методов, среди которых метод D-разбиения.

Кривой D-разбиения называется кривая в плоскости настроек регулятора, которая соответствует определенному значению какого-либо показателя качества.

Например, требуется обеспечить степень затухания $\Psi \geq \Psi_{\text{зад}}$. Имеется формула, связывающая Ψ со степенью колебательности m : $\Psi = 1 - e^{-2m}$. Далее строится кривая D-разбиения равной степени колебательности m . Последовательность построения:

1. Определяется ХПЗС $D_3(s)$ с неизвестными настройками.
2. Делается подстановка $s = j\omega - m\omega$ и разделение $D_3(j\omega - m\omega) = Re(\omega) + Im(\omega)$.
3. Полученное выражение приравнивается к нулю и получается система

$$\begin{cases} Re(\omega) = 0 \\ Im(\omega) = 0 \end{cases}$$

Данная система имеет несколько неизвестных: ω и настройки регулятора.

4. Далее, изменяя ω от 0 до ∞ эта система решается относительно настроек регулятора.

5. По полученным данным строится кривая, по которой определяются оптимальные настройки.

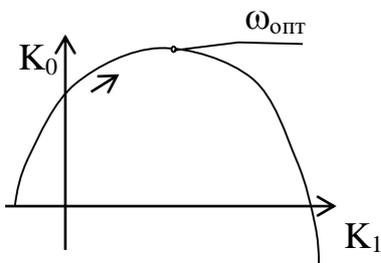


Рис.3.10. Кривая D-разбиения

Например, для ПИ-регулятора кривая D-разбиения может иметь вид представленный на рисунке 2.34.

Оптимальные настройки соответствуют максимальному значению K_0 (для ПИ- и ПИД-регуляторов) или K_1 (для ПД-регулятора).

Библиографический список

1. Кирюшин О.В. Управление техническими системами: курс лекций. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2003. – 80 с.
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория автоматического регулирования. -М.: Наука, 1966.
3. Лазарева Т. Я., Мартемьянов Ю. Ф. Основы теории автоматического управления: Учебное пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн.ун-та, 2003. 308 с. ISBN 5-8265-0149-9.
4. Теория автоматического управления: Учебник. В 2-х частях / Под ред. А.А. Воронова. -М.: Высш.шк., 1986. -Ч.1. - 367 с. - Ч.2. -504 с.

Оглавление

| | |
|--|----|
| Аннотация..... | 3 |
| 1. Введение. Основные термины и определения..... | 4 |
| 1.1. Основные понятия..... | 4 |
| 1.2. Принципы регулирования..... | 8 |
| 1.3. Классификация систем автоматического управления..... | 11 |
| 1.4. Классификация элементов автоматических систем..... | 14 |
| 2. Характеристики и модели элементов и систем..... | 15 |
| 2.1. Основные модели..... | 15 |
| 2.2. Статические характеристики..... | 15 |
| 2.3. Динамические характеристики..... | 17 |
| 2.4. Дифференциальные уравнения. Линеаризация..... | 18 |
| 2.5. Преобразования Лапласа..... | 20 |
| 2.6. Передаточные функции..... | 23 |
| 2.6.1. Определение передаточной функции..... | 23 |
| 2.6.2. Примеры типовых звеньев..... | 24 |
| 2.6.3. Соединения звеньев..... | 28 |
| 2.6.4. Передаточные функции АСР..... | 29 |
| 2.6.5. Определение параметров передаточной функции объекта по переходной кривой..... | 30 |
| 2.7. Частотные характеристики..... | 31 |
| 3. Качество процессов управления..... | 36 |
| 3.1. Критерии устойчивости..... | 36 |
| 3.1.2. Корневой критерий..... | 36 |
| 3.1.3. Критерий Стодолы..... | 38 |
| 3.1.4. Критерий Гурвица..... | 38 |
| 3.1.5. Критерий Михайлова..... | 40 |
| 3.1.6. Критерий Найквиста..... | 40 |
| 3.2. Показатели качества..... | 41 |
| 3.3. Типы регуляторов..... | 44 |
| 3.4. Определение оптимальных настроек регуляторов..... | 45 |
| Библиографический список..... | 47 |

ВВЕДЕНИЕ

Английское название датчика – «sensor» произошло от латинского слова «sensus» – ощущение, чувство, способность воспринимать «раздражение», которое является одним из наиболее универсальных свойств систем живой и неживой природы, проявляющееся в способности реагировать на внешнее воздействие. Данная реакция может быть чрезвычайно слабой, носить линейный, нелинейный или пороговый характер, поэтому функцию первичных преобразователей внешних воздействий: термо-, механо-, опто-, хемо- и акусторецепторов успешно выполняют как естественные природные материалы и системы, так и искусственно синтезированные объекты неорганической и органической природы. В настоящее время сенсорика – наука о датчиках – это целое системное направление, интегрирующее явления, эффекты, процессы и алгоритмы из таких областей знаний, как физика, химия, биология, информатика, электротехника, теплотехника, электроника, оптика и других дисциплин.

Использование микропроцессорной техники позволяет создавать очень сложные инструменты, находящие свое применение в различных областях повсеместной жизни. Микропроцессоры являются цифровыми устройствами, работающими с двоичными кодами. В виде двоичных кодов можно представить практически любые электрические сигналы. Однако мы живем в аналоговом мире, где большинство устройств не являются цифровыми, и более того, сигналы окружающего нас мира в общем случае не являются электрическими. Для того чтобы сложные интеллектуальные системы могли воспринимать информацию из внешнего мира, необходимы интерфейсные устройства, преобразующие разнообразные физические величины и процессы в электрические сигналы. Такими интерфейсными устройствами и являются датчики. Другими словами, датчики – это глаза, уши и органы обоняния кремневых кристаллов. В настоящее время датчики стали неотъемлемой частью жизни любого человека.

Наиболее часто используемое определение датчика звучит так: «датчик – это устройство, воспринимающее сигналы и внешние воздействия и реагирующее на них». Однако это очень широкое определение. Оно настолько широкое, что охватывает почти все: от человеческого глаза до спускового курка в пистолете. Окружающий нас мир можно разделить на две части: природа и объекты, созданные человеком. Естественные сенсоры, которыми снабжен любой живой организм, обычно реагируют на электрохимические сигналы, т.е. их физический принцип действия основывается на передаче ионов в нервных тканях. В системах же, созданных людьми, в передаче сигналов в подавляющем большинстве случаев участвуют электроны. Датчики в таких системах «разговаривают» с устройствами, с которыми они связаны, на одном языке. Язык общения – электрические сигналы, в которых информация передается при помощи электронов.

Исходя из вышеизложенного, можно дать более строгое определение датчика. *Датчик* – это устройство, воспринимающее внешние воздействия и реагирующее на них изменением электрических сигналов. Под *внешним воздействием* понимается количественная характеристика объекта, его свойство или качество, которые необходимо воспринять и преобразовать в электрический сигнал. В некоторых случаях для этих целей используется термин *измеряемая величина*, имеющий аналогичное значение, однако в этом термине делается акцент на количественной характеристике сенсорной функции.

Датчик (sensor) состоит из двух частей – *чувствительного элемента* (detector) и *преобразователя* (transducer), как показано на рис. 1. Чувствительный элемент иногда называют измерительной головкой (sensor head). Результат работы датчика – это реакция чувствительного

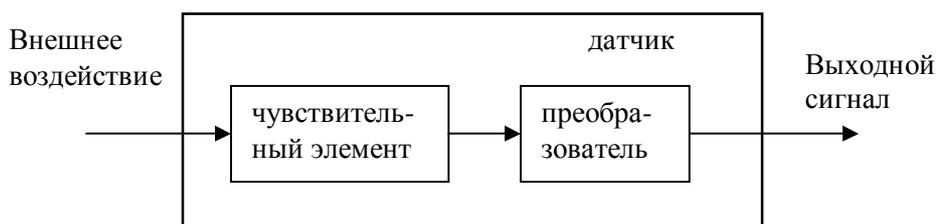


Рис. 1. Составные элементы датчика

элемента на внешнее воздействие, которая на выходе преобразователя представляет собой электрический сигнал, распространяющийся далее по проводнику, т.е. этот сигнал является выходным сигналом датчика.

Назначение датчиков – реакция на внешнее воздействие и преобразование его в электрический сигнал, совместимый с измерительными схемами. Другими словами можно сказать, что датчик – это преобразователь физической величины в электрический сигнал. Под термином электрический сигнал понимается сигнал, который может быть преобразован при помощи электронных устройств, например, усилен или передан по линии передачи. Выходными сигналами датчиков могут быть напряжение, ток или заряд, которые описываются следующими характеристиками: амплитудой, частотой, фазой или цифровым кодом. Этот набор характеристик называется форматом выходного сигнала. Таким образом, каждый датчик характеризуется набором входных параметров любой физической природы и набором выходных электрических параметров.

Любой датчик является преобразователем энергии. Вне зависимости от типа измеряемой величины всегда происходит передача энергии от исследуемого объекта к датчику. Работа датчика – это особый случай передачи информации, а любая передача информации связана с передачей энергии. Очевидным является тот факт, что передача энергии может проходить в двух направлениях, т.е. она может быть как положительной, так и отрицательной, например, энергия может передаваться от объекта к датчику, и, наоборот, от датчика к объекту. Особым случаем является ситуация, при которой энергия равна нулю, но и в этом случае происходит передача информации о существовании именно такой особой ситуации. Например, инфракрасный датчик температуры вырабатывает положительное напряжение, когда объект теплее датчика (инфракрасное излучение направлено в сторону датчика), или отрицательное напряжение, когда объект холоднее датчика (инфракрасное излучение направлено от датчика на объект). Когда датчик и объект имеют одинаковую температуру, инфракрасный поток равен нулю, и выходное напряжение также равно нулю. В этой ситуации и заключена информация о равенстве температур датчика и объекта.

Понятие датчик необходимо отличать от понятия преобразователь. Преобразователь конвертирует один тип энергии в другой, тогда как датчик преобразует любой тип энергии внешнего воздействия в электрический сигнал. Примером преобразователя может служить громкоговоритель, конвертирующий электрический сигнал в переменное магнитное поле для последующего формирования акустических волн. Здесь речь не идет ни о каком восприятии внешней информации. Интересно отметить тот факт, что если громкоговоритель подключить к входу усилителя, он будет работать как микрофон. В этом случае его можно назвать акустическим датчиком. Преобразователи могут выполнять также функции приводов. Привод можно определить как устройство, противоположное датчику, поскольку он преобразует электрическую энергию, как правило, в неэлектрическую энергию. Примером привода является электрический мотор, преобразующий электрическую энергию в механическую.

Преобразователи могут быть частью составных датчиков. Например, в состав химического датчика могут входить два преобразователя, один из которых конвертирует энергию химических реакций в тепло, а другой, термоэлемент, преобразовывает полученное тепло в электрический сигнал. Комбинация этих двух преобразователей представляет собой химический датчик – устройство, вырабатывающее электрический сигнал в ответ на химическую реакцию. Отметим, что в рассмотренном примере химический датчик является составным датчиком, состоящим из преобразователя и еще одного датчика – датчика температуры. В структуру составных датчиков, как правило, входит хотя бы один датчик прямого действия и несколько преобразователей. Датчиками прямого действия называют датчики, которые построены на физических явлениях, позволяющих проводить непосредственное преобразование энергии внешнего воздействия в электрические сигналы. Примерами таких физических явлений являются фотоэффект и эффект Зеебека.

Таким образом, все датчики можно разделить на две группы: датчики прямого действия и составные датчики. Датчики прямого действия преобразуют внешнее воздействие

непосредственно в электрический сигнал, используя для этого соответствующее физическое явление, в то время как в составных датчиках, прежде чем получить электрический сигнал на выходе оконечного датчика прямого действия, необходимо осуществить несколько преобразований энергии.

На практике датчики не работают сами по себе. Как правило, они входят в состав измерительных и других систем, часто довольно больших, объединяющих много разных детекторов, преобразователей сигналов, сигнальных процессоров, запоминающих устройств и приводов. Датчики в таких системах могут быть как наружными, так и встроенными. Часто их располагают на входах измерительных приборов для того, чтобы они реагировали на внешние воздействия и сообщали системе об изменениях в окружающих условиях. Также они размещаются внутри измерительных систем для мониторинга их функционирования, что необходимо для поддержания корректной работы всех внутренних устройств. Датчики являются неотъемлемой частью систем сбора данных, которые, в свою очередь, могут входить в состав больших измерительных комплексов с множеством обратных связей.

На рис. 2 показана блок-схема автоматизированного измерительного комплекса, состоящего из системы сбора данных и управляющего устройства. Из этого рисунка хорошо видна роль датчиков в таких системах. Субъектами измерений могут быть любые материальные объекты: автомобили, космические корабли, человеческие тела, различные жидкости и газы.

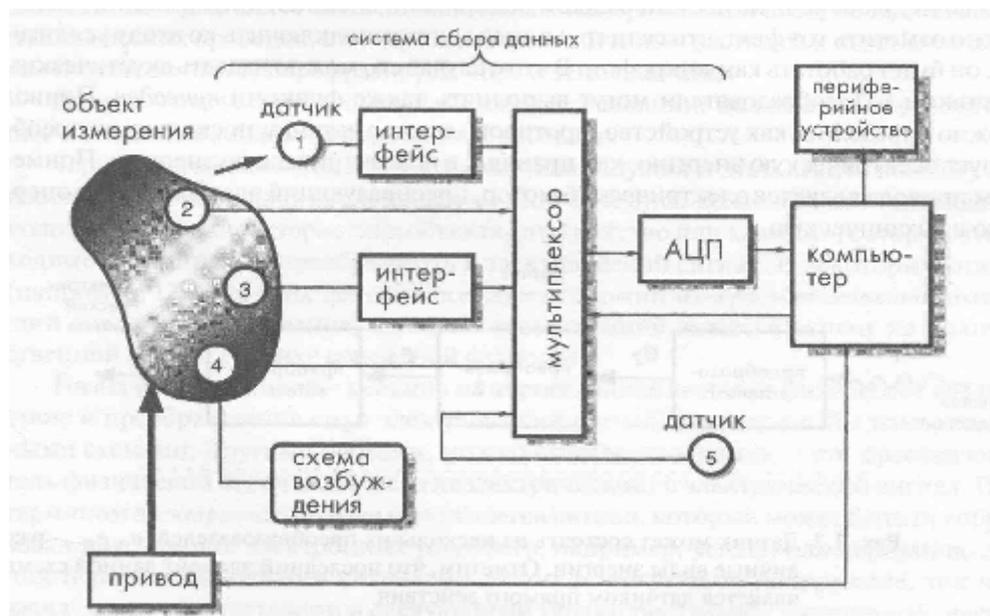


Рис. 2. Блок-схема автоматизированного измерительного комплекса.

Данные об измеряемом объекте собираются при помощи датчиков, часть из которых, (2, 3 и 4), располагается на поверхности или внутри объекта. Датчик 1 не имеет непосредственной связи с объектом, т.е. является бесконтактным. Телевизионные камеры и детекторы излучений служат примерами таких датчиков. Даже когда датчик называется бесконтактным, всегда между ним и объектом происходит передача энергии.

Датчик 5 может выполнять различные функции. Часто он служит для контроля за условиями внутри самой системы сбора данных. Датчики 1 и 3 не могут быть напрямую подсоединены к стандартным электронным схемам из-за несоответствия форматов выходных сигналов. Для их подключения требуются специальные интерфейсные устройства - преобразователи сигналов. Датчики 1, 2, 3 и 5 являются пассивными, поскольку для формирования выходных сигналов им не требуется дополнительная электрическая энергия. Датчик 4 - представитель активных устройств. Для обеспечения его работы необходим вспомогательный сигнал, получаемый от схемы возбуждения. При этом датчик модулирует

этот сигнал в соответствии с изменением измеряемого параметра. Примером активных датчиков является температурно-чувствительный резистор, который часто называется термистором. Такой датчик работает от источника постоянного тока, являющегося в данном случае схемой возбуждения. Измерительный комплекс может включать в себя либо один датчик (домашний термостат), либо несколько тысяч (космический корабль).

Электрические сигналы с выходов датчиков поступают на мультиплексор, выполняющий роль переключателя. Если выходные сигналы датчиков являются аналоговыми, они поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), если цифровыми - непосредственно на компьютер, который синхронизирует работу мультиплексора и АЦП, а также посылает управляющие сигналы на привод, воздействующий непосредственно на объект. В качестве приводов могут использоваться электрические моторы, соленоиды, реле и пневматические клапаны. В состав измерительной системы также входят периферийные устройства (накопители данных, дисплеи, сигнализаторы и т.д.) и другие компоненты, не показанные в блок схеме. Такими компонентами могут быть фильтры, схемы выборки и хранения, усилители и прочие преобразователи.

Входные сигналы датчиков (внешние воздействия) могут иметь практически любую физическую или химическую природу. Поток света, температура, давление, колебания, перемещение, положение, скорость, концентрация ионов - все это примеры внешних воздействий. Конструкция датчиков меняется в зависимости от их предназначения. Для особых условий применения может потребоваться разработка специальных корпусов и схем монтажа. Например, пьезорезистивный датчик для измерения кровяного давления внутри аорты монтируется в герметичном корпусе и имеет очень миниатюрные размеры для возможности прохождения через микрокатетер. Корпус того же самого датчика будет совсем другим для случая применения внутри надувной манжеты медицинского тонометра. Иногда от датчиков требуется, чтобы они реагировали только на определенный диапазон входных сигналов. Например, детектор движения в охранной системе должен срабатывать только на перемещение людей и никак не реагировать на передвижение маленьких животных, таких как собаки и кошки.

Классификация датчиков

Системы классификации датчиков могут быть очень разными: от очень простых до сложных. Критерий классификации всегда выбирается в зависимости от цели проведения классификации.

Все датчики можно разделить на две категории: *пассивные* и *активные*. Пассивный датчик не нуждается в дополнительном источнике энергии и в ответ на изменение воздействия на его выходе всегда появляется электрический сигнал. Это означает, что такой датчик преобразует энергию внешнего сигнала в выходной сигнал. Примерами пассивных датчиков являются термопары, фотодиоды и пьезоэлектрические чувствительные элементы. Большинство пассивных датчиков являются устройствами прямого действия. В отличие от пассивного собрата активный датчик для своей работы требует внешней энергии, называемой *сигналом возбуждения*. При формировании выходного сигнала активный датчик тем или иным способом воздействует на сигнал возбуждения. Поскольку такие датчики меняют свои характеристики в ответ на изменение внешних сигналов, их иногда называют *параметрическими*. Фактически, в активных датчиках происходит преобразование изменения их внутренних характеристик в электрические сигналы, т.е. определенные параметры активных датчиков модулируют сигналы возбуждения, и эта модуляция несет в себе информацию об измеряемой величине. Например, термисторы являются температурно-чувствительными резисторами. Сами по себе термисторы не производят никаких электрических сигналов, но при прохождении через них электрического тока (сигнала возбуждения), их сопротивление может быть определено по изменению тока и/или падению напряжения на них. Значение сопротивления отражает измеряемую температуру, которая может быть найдена по известным зависимостям. Другим примером активных датчиков является резистивный тензодатчик, чье электрическое сопротивление зависит от величины его деформации. Для определения

сопротивления датчика через него также необходимо пропустить электрический ток от внешнего источника питания.

В зависимости от выбора точки отсчета датчики можно разделить на *абсолютные* и *относительные*. Абсолютный датчик определяет внешний сигнал в абсолютных физических единицах, не зависящих от условий проведения измерений, тогда как выходной сигнал относительного датчика в каждом конкретном случае может трактоваться по-разному. Примером абсолютного датчика является термистор. Его электрическое сопротивление напрямую зависит от абсолютной температуры по шкале Кельвина. Другой же популярный датчик температуры - термопара – является относительным устройством, поскольку напряжение на его выходе является функцией градиента температуры на проволочках термопары. Поэтому определить конкретную температуру по выходному сигналу термопары можно только относительно известной базовой точки отсчета. Другим примером абсолютных и относительных датчиков является датчик давления. Показания абсолютного датчика соответствуют значениям давления относительно абсолютного нуля по шкале давлений, т.е. относительно полного вакуума. Относительный датчик определяет давление относительно атмосферного давления, которое не является нулевым.

Другой подход к классификации датчиков заключается в рассмотрении их характеристик. Для того, чтобы отнести датчик к той или иной группе, необходимо знать, какие величины он может измерять, его характеристики, на каком физическом принципе он реализован, какой механизм преобразований он применяет, из какого материала он изготовлен, какая область его применения.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ

Может потребоваться несколько этапов преобразований, прежде чем входной сигнал, поступающий на датчик, превратится в выходной электрический сигнал. Для примера рассмотрим оптоволоконный датчик давления. Внешнее давление, действующее на датчик, вызывает деформацию волоконного световода, что в свою очередь приводит к изменению его показателя преломления, из-за чего меняются характеристики оптической линии передач и происходит модуляция плотности фотонов. Результирующий поток фотонов детектируется и преобразуется в электрический ток. Далее будут рассматриваться общие характеристики датчиков, вне зависимости от их физической природы и количества необходимых промежуточных этапов преобразований. При этом датчики будут представлены в виде «черных ящиков», где важными будут только соотношения между сигналами на их входах и выходах.

Статические характеристики

Передаточная функция

Для каждого датчика можно вывести *идеальное* или *теоретическое* соотношение, связывающее сигналы на его входе и выходе. Если была бы возможность идеально спроектировать датчик, изготовить его из идеальных материалов и идеальными инструментами, при этом все работы выполнялись бы идеальными работниками, то сигнал на выходе такого датчика всегда бы соответствовал *реальному* значению внешнего воздействия. Выведенное идеальное соотношение между входным и выходным сигналом можно выразить в виде либо таблицы, либо графика, либо математического выражения. Это идеальное (теоретическое) выражение часто называют *передаточной функцией*. Передаточная функция устанавливает взаимосвязь между выходным электрическим сигналом датчика S и внешним воздействием s : $S = f(s)$. Эта функция может быть как линейной, так и нелинейной (например, логарифмической, экспоненциальной или степенной). Во многих случаях передаточная функция является одномерной (т.е. связывает выходной сигнал только с одним внешним воздействием). Одномерную линейную функцию можно представить в виде выражения:

$$S = a + bs, \quad (1)$$

где a - постоянная составляющая (т.е. значение выходного сигнала при нулевом входном воздействии), b - наклон прямой, который часто называют *чувствительностью* датчика.

Параметр S - эта та характеристика электрического сигнала, которую системы сбора данных воспринимают в качестве выходного сигнала датчика. В зависимости от свойств датчика это может быть амплитуда, частота или фаза.

Логарифмическая передаточная функция имеет вид:

$$S = a + b \ln s,$$

экспоненциальная -

$$S = a e^{ks},$$

степенная -

$$S = a_0 + a_1 s^k,$$

где k - постоянное число.

Однако датчик может иметь передаточную функцию, которую невозможно описать вышеприведенными аппроксимационными выражениями. В таких случаях применяются полиномиальные аппроксимации более высоких порядков.

Для нелинейных передаточных функций чувствительность не является константой, как это было в случае линейных зависимостей. Для каждого конкретного значения входного сигнала s_0 ее можно определить в виде:

$$b = \frac{dS(s_0)}{ds} \quad (2)$$

Во многих случаях нелинейные датчики могут считаться линейными внутри ограниченного диапазона значений. Для более широкого диапазона значений нелинейная передаточная функция представляется в виде отрезков нескольких прямых линий. Это называется кусочно-линейной аппроксимацией. Для того, чтобы определить, может ли данная передаточная функция быть представлена в виде линейной зависимости, наблюдают за

изменением выходных сигналов в линейной и реальной моделях при постепенном увеличении входного сигнала. Если разность сигналов не выходит за допустимые пределы, передаточную функцию данного датчика можно считать линейной.

В случаях, когда на выходной сигнал датчика оказывают влияние несколько внешних воздействий, его передаточная функция становится многомерной. Примером датчика с двумерной передаточной функцией является инфракрасный датчик температуры. Его передаточная функция связывает две температуры (T_b - абсолютную температуру объекта измерения и T_s - абсолютную температуру поверхности сенсорного элемента) с выходным напряжением V :

$$V = G(T_b^4 - T_s^4) \quad (3)$$

где G - константа. Из выражения видно, что зависимость между температурой объекта и выходным напряжением (передаточная функция) является не только нелинейной (параболой четвертого порядка), но она также зависит от температуры поверхности чувствительного элемента. Для определения чувствительности такого датчика по отношению к температуре объекта, надо взять частную производную от выражения (3):

$$b = \frac{\partial V}{\partial T_b} = 4GT_b^3$$

На рис. 1 передаточная функция (3) показана графически. Из рисунка видно, что каждое значение выходного напряжения однозначно определяется по двум входным температурам. Следует отметить, что, как правило, передаточные функции представляются в виде зависимости «выход от входа». Однако когда датчик используется для количественного определения внешнего воздействия, необходимо получить инверсную зависимость - «вход от выхода». При линейной передаточной функции получить обратную зависимость несложно. Но в случае присутствия в системе нелинейностей эта задача сильно усложняется, и во многих случаях аналитического выражения, пригодного для вычислений, получить не удастся. Тогда снова привлекаются аппроксимационные методы.

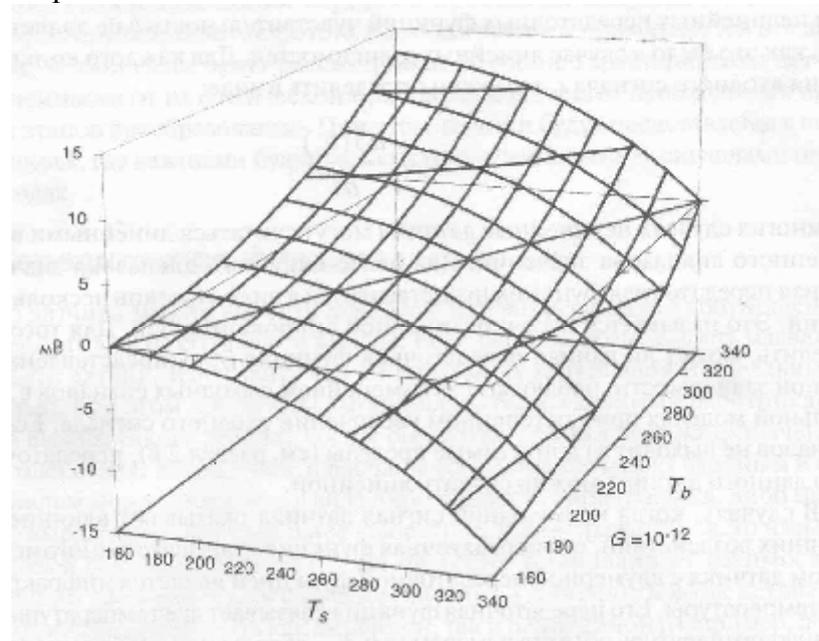


Рис. 1. Двумерная передаточная функция инфракрасного датчика температуры

Диапазон измеряемых значений

Динамический диапазон внешних воздействий, который датчик может воспринять, называется диапазоном измеряемых значений (FS – full scale). Эта величина показывает максимально возможное значение входного сигнала, которое датчик может преобразовать в

электрический сигнал, не выходя за пределы допустимых погрешностей. Для датчиков с очень широкой и нелинейной амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) динамический диапазон внешних воздействий часто выражается в децибелах, которые являются логарифмической мерой отношений либо мощности, либо напряжений. Всегда необходимо помнить, что децибелы выражают не абсолютные значения, а только отношения величин. Сигналы, отображенные в логарифмическом виде, имеют гораздо меньшие значения, чем исходные, что на практике в ряде случаев бывает очень удобно. Поскольку логарифмическая шкала является нелинейной, сигналы низкого уровня в ней представляются с большим разрешением, тогда как сигналы высокого уровня претерпевают большее сжатие. Другими словами, логарифмическая шкала для малых сигналов работает как микроскоп, а в случае больших сигналов - как телескоп. По определению децибел равен десяти логарифмам отношения мощности двух сигналов (см. таблицу 1), т.е.:

$$1\text{дБ} = 10 \log \frac{P_2}{P_1}.$$

Исходя из этого, можно утверждать, что децибел в двадцать раз превышает логарифмы отношений силы, тока и напряжений, т.е.:

$$1\text{дБ} = 20 \log \frac{S_2}{S_1}.$$

Таблица 1. Отношение между мощностью, силой (напряжением, током) и децибелами.

| | | | | | | | | | | | |
|----------------------|------|------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------|-----------|
| Отношение мощности | 1,26 | 10 | 100 | 10^3 | 10^4 | 10^5 | 10^6 | 10^7 | 10^8 | 10^9 | 10^{10} |
| Отношение напряжения | 1,12 | 3,16 | 10 | 31,6 | 100 | 316 | 10^3 | 3162 | 10^4 | $3 \cdot 10^4$ | 10^5 |
| Децибелы | 1 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |

Диапазон выходных значений

Диапазон выходных значений (FSO) - алгебраическая разность между электрическими выходными сигналами, измеренными при максимальном и минимальном внешнем воздействии. В эту величину должны входить все возможные отклонения от идеальной передаточной функции.

Точность

Точность - очень важная характеристика любого датчика. Правда, когда говорят о точности датчика, чаще всего подразумевают его неточность или *погрешность* измерений. Под погрешностью измерений, как правило, понимают величину максимального расхождения между показаниями реального и идеального датчиков. Считается, что измеренное значение соответствует реальному с определенной степенью достоверности.

Погрешность датчика можно также представить в виде разности между значением, вычисленным по выходному сигналу датчика, и реальным значением поданного входного сигнала. Например, рассмотрим линейный датчик перемещений. В идеальном случае, если его чувствительность b равна 1 мВ/мм, при смещении объекта на 1 мм напряжение на выходе должно измениться на 1 мВ. Однако на практике при перемещении объекта на расстояние $S = 10$ мм выходное напряжение изменилось на 10,5 мВ. Т.е. $S = 10,5$ мВ. Преобразовав это значение при помощи инверсной передаточной функции, получим, что при таком напряжении перемещение объекта должно быть равным $S_x = S/b = 10,5$ мм, т.е. на 0,5 мм больше действительного. Вот эти 0,5 мм и являются погрешностью измерений. Следовательно, можно утверждать, что в пределах диапазона 10 мм абсолютная погрешность измерений данного датчика составляет 0,5 мм, а в относительных единицах она равна: $(0,5 \text{ мм}/10 \text{ мм}) \cdot 100\% = 5\%$. Если при отсутствии случайных ошибок каждый раз при повторении этого эксперимента будет наблюдаться погрешность, равная 0,5 мм, говорят, что датчик в диапазоне 10 мм имеет систематическую погрешность, равную 0,5 мм. Но, как правило, случайные ошибки всегда

присутствуют, поэтому на практике систематическая погрешность чаще всего представляется в виде среднего значения из множества экспериментальных значений.

На рис. 2А показана идеальная или теоретическая передаточная функция. В реальной

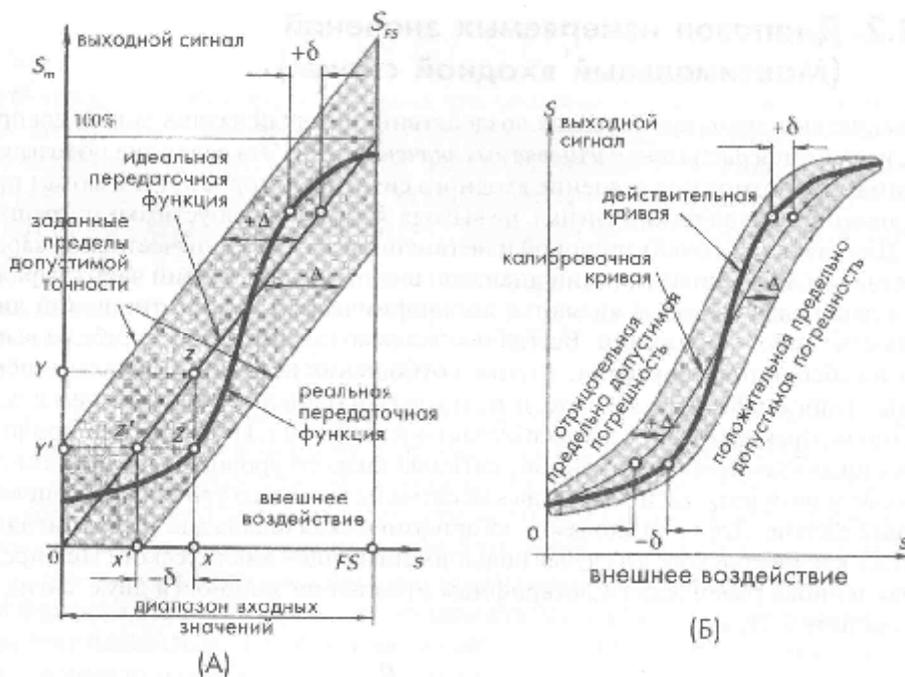


Рис.2. Передаточная функция и пределы допустимой погрешности

жизни любой датчик обладает теми или иными недостатками. Толстой линией на рисунке выделена одна из реальных передаточных функций, которые не обязательно являются линейными и монотонными. Реальная функция почти никогда не совпадает с идеальной. Даже когда датчики изготавливаются в идентичных условиях, из-за разницы в материалах, в мастерстве работников, ошибок разработчиков, производственных допусков и т.п., их передаточные функции всегда будут различаться друг от друга. Однако все они не должны выходить за пределы определенной зоны, лежащей в границах предельно допустимых погрешностей, которые находятся от линии идеальной передаточной функции на расстоянии $\pm\Delta$. Следовательно, разница между реальной и идеальной передаточной функцией δ всегда должна быть меньше или равна Δ . Для примера рассмотрим ситуацию, когда входной сигнал датчика равен x (рис. 2А). В идеальном случае при этом выходной сигнал должен быть равен Y , что соответствует точке z на передаточной функции. Вместо этого по реальной функции при значении x мы попадем в точку Z , и, следовательно, получим выходной сигнал, равный Y' , соответствующий точке z' . На идеальной передаточной функции, которой, в свою очередь, должен соответствовать входной сигнал x' . Поскольку $x' < x$, погрешность измерений в данном случае будет равна $-\delta$.

На точность датчиков влияют такие характеристики как: гистерезис, мертвая зона, параметры калибровки, повторяемость датчиков от партии к партии и воспроизводимость погрешностей, которые будут рассмотрены далее. Предельно допустимые погрешности обычно соответствуют самым худшим рабочим характеристикам датчиков. Из рис. 2Б видно, что при более корректном проведении калибровки (например, при проведении калибровки на большем количестве точек), калибровочная кривая проходит ближе к реальным передаточным функциям, что означает повышение точности измерений. На практике пределы допустимых погрешностей устанавливаются не вокруг идеальной передаточной функции, а относительно калибровочной кривой. Допустимые пределы становятся меньше, если они не включают в себя погрешности, связанные с различиями датчиков от партии к партии, а также когда они относятся только к одному специально откалиброванному датчику. Все это повышает точность

измерений, однако значительно повышает стоимость, из-за чего во многих ситуациях эти методы не могут быть применены.

Погрешность датчиков может быть представлена в следующих видах:

1. Непосредственно в единицах измеряемой величины (Δ),
2. В процентах от значения максимального входного сигнала,
3. В единицах выходного сигнала.

В современных датчиках точность часто характеризуется величиной *статистической ошибки измерений*, учитывающей влияние как систематических, так и случайных погрешностей, и независящих от ошибок, допущенных при определении передаточных функций.

Калибровка

Если производственные допуски на датчик и допуски на интерфейс (схемы преобразования сигналов) превышают требуемую точность системы, всегда необходимо проводить калибровку. Например, требуется измерить температуру с точностью ± 0.5 °С датчиком, по справочным данным обладающим погрешностью ± 1 °С. Это можно сделать только после проведения калибровки конкретного датчика, что необходимо для нахождения его индивидуальной передаточной функции, а также после проведения полной калибровки системы. В процессе проведения полной калибровки определяются коэффициенты, описывающие передаточную функцию всей системы в целом, включая датчик, интерфейсное устройство и АЦП. Математическое описание передаточной функции необходимо знать до начала проведения калибровки. В процессе калибровки необходимо определить коэффициенты передаточной функции, проводя калибровочные измерения в нескольких точках в зависимости от вида передаточной функции.

Для проведения калибровки датчиков важно иметь точные физические эталоны, позволяющие моделировать соответствующие внешние воздействия. Например, при калибровке контактного датчика температуры его необходимо помещать либо в резервуар с водой, либо в «сухой колодец», в которых есть возможность точно регулировать температуру. При калибровке инфракрасных датчиков требуется наличие черного тела, а для калибровки гигрометров - набор насыщенных растворов солей, используемых для поддержания постоянной относительной влажности в закрытом контейнере и т.д. Отсюда ясно видно, что точность последующих измерений напрямую связана с точностью проведения калибровки.

Гистерезис

Гистерезис – это разность значений выходного сигнала для одного и того же входного сигнала, полученных при его возрастании и убывании (рис. 3). Например, пусть показания датчика перемещений при движении объекта слева направо отличаются на 20 мВ от его показаний при движении в той же самой точке справа налево. Если чувствительность датчика составляет 10 мВ/мм, ошибка гистерезиса будет равна 2 мм. Типичной причиной возникновения гистерезиса является трение и структурные изменения материалов.

Нелинейность

Нелинейность определяется для датчиков, передаточную функцию которых возможно аппроксимировать прямой линией (уравнение (1)). Под нелинейностью понимается максимальное отклонение L реальной передаточной функции от аппроксимирующей прямой линии. Под термином «линейность» на самом деле понимается «нелинейность».

При проведении нескольких циклов калибровки выбирается худшее из полученных



Рис. 3. Передаточная функция с гистерезисом

значений нелинейности. Нелинейность обычно выражается либо в процентах от максимального входного сигнала, либо в единицах измеряемых величин (например, в кПа или °С). В зависимости от способа проведения аппроксимирующей линии различают несколько типов линейризации. Один из способов – проведение прямой через конечные точки передаточной функции (рис. 4А). Для этого сначала определяются выходные значения, соответствующие наибольшему и наименьшему внешним воздействиям, а потом через эти точки проводится прямая линия (линия 1). При такой линейризации ошибка нелинейности минимальна в конечных точках и максимальна где-то в промежутке между ними.

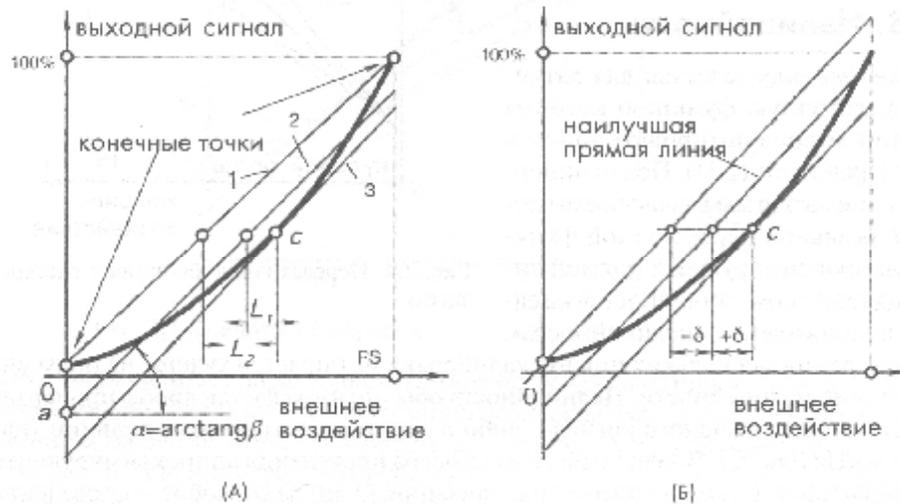


Рис.4. Линейная аппроксимация нелинейной передаточной функции (А) и независимая линейризация (Б)

Другой способ линейризации основан на применении метода наименьших квадратов (линия 2 на рис. 4А). Для этого в широком диапазоне измеряемых величин (лучше в полном диапазоне) для ряда значений (n) внешних воздействий s измеряются выходные сигналы S . После чего, применяя формулу линейной регрессии, определяют значения коэффициентов a и b :

$$a = \frac{\sum S \sum s^2 - \sum s \sum sS}{n \sum s^2 - (\sum s)^2} \quad b = \frac{n \sum sS - \sum s \sum S}{n \sum s^2 - (\sum s)^2}$$

где Σ - это сумма n чисел.

На практике, в некоторых случаях, может потребоваться большая точность линейризации в узком диапазоне входных сигналов. Например, медицинские термометры должны обладать повышенной точностью в диапазоне 37 °С...38 °С. Вне этой зоны точность может быть несколько ниже. В этом случае калибровку проводят в узкой области, где требуется повышенная точность, после чего через калибровочную точку c проводится аппроксимирующая линия (линия 3 на рис. 4А). В результате такой процедуры наименьшее значение нелинейности достигается в зоне калибровочной точки, а ближе к концам диапазона измерения линейность значительно ухудшается. Как видно из рисунка, в данном методе аппроксимирующая линия часто является касательной к передаточной функции в точке калибровки c . Если известно выражение для реальной передаточной функции, наклон этой линии может быть найден по уравнению (2).

Метод независимой линейризации часто называется «методом наилучшей прямой» (рис. 4Б). Он заключается в нахождении линии, проходящей посередине между двумя параллельными прямыми, расположенными, как можно, ближе друг к другу и охватывающими все выходные значения реальной передаточной функции.

В зависимости от метода линейризации аппроксимирующие линии будут иметь разные коэффициенты a и b . Следовательно, значения нелинейности, полученные разными способами, могут серьезно различаться друг от друга.

Насыщение

Каждый датчик имеет пределы рабочих характеристик. Даже если он считается линейным, при определенном уровне внешнего воздействия его выходной сигнал перестанет отвечать линейной зависимости. В этом случае говорят, что датчик вошел в зону нелинейности или в зону насыщения.

Воспроизводимость

Воспроизводимость – это способность датчика при соблюдении одинаковых условий выдавать идентичные результаты. Причинами плохой воспроизводимости результатов часто являются: тепловой шум, поверхностные заряды, пластичность материалов и т.д.

Мертвая зона

Мертвая зона – это нечувствительность датчика в определенном диапазоне входных сигналов. В пределах этой зоны выходной сигнал остается постоянным (часто равным нулю).

Разрешающая способность

Разрешающая способность характеризует минимальное изменение измеряемой величины, которое может почувствовать датчик. При непрерывном изменении внешнего воздействия в пределах диапазона измеряемых значений выходные сигналы датчиков не будут всегда абсолютно гладкими, даже при отсутствии шумов. На них всегда будут видны небольшие ступеньки. Особенно отчетливо это видно в потенциометрических датчиках, инфракрасных датчиках контроля территории с сетчатой маской и других устройствах, в которых выходные сигналы меняются только при определенных изменениях внешних воздействий. В дополнение к этому при преобразовании любого сигнала в цифровой код происходит его разбивка на маленькие ступеньки, каждой из которых приписывается конкретное значение. Величина изменения входного сигнала, приводящая к появлению минимальной ступеньки на выходном сигнале датчика при определенных условиях, называется его разрешающей способностью. Например, для инфракрасного датчика контроля территории можно дать следующее определение разрешающей способности: «разрешающая способность - возможность обнаружения объекта на расстоянии 5 м при его перемещении на 20 см». Для проволочного потенциометрического датчика, используемого для измерения углов, разрешающая способность - это минимальный угол, равный, допустим, $0,5^\circ$. Иногда разрешающая способность определяется в процентах от полной шкалы FS (максимального значения входного сигнала). Например, для датчика измерения углов, у которого полный диапазон измеряемых значений равен 270° , разрешающую способность $0,5^\circ$ можно представить как 0,181 % от FS. Следует отметить, что размер ступени может меняться внутри диапазона измеряемых значений, поэтому, как правило, разрешающая способность определяется либо как средняя, либо как наихудшая величина. Разрешающая способность датчиков с цифровыми выходными сигналами часто задается числом бит слова данных. Например, в описании может быть информация, что разрешение датчика равно 8 бит. Отсюда можно получить либо полный диапазон входных сигналов, либо оценить величину младшего значащего разряда (МЗР).

Специальные характеристики

Для некоторых датчиков необходимо указывать *специальные характеристики входных сигналов*. Например, для детекторов освещенности такой характеристикой является его чувствительность в пределах ограниченной оптической полосы. Следовательно, для таких датчиков необходимо определять спектральные характеристики.

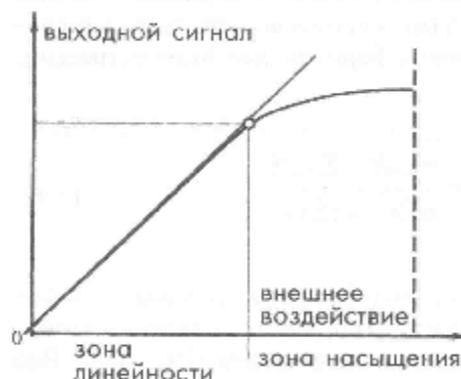


Рис.5. Передаточная функция с насыщением

Выходной импеданс

Выходной импеданс Z_{out} является характеристикой, указывающей насколько легко датчик согласовывается с электронной схемой. Сопротивление, соответствующее выходному импедансу датчика, подключаются параллельно сопротивлению, характеризующему входной импеданс электронной схемы Z_{in} (потенциальное соединение) или последовательно с ним (токовое соединение). Оба варианта соединений показаны на рис. 6. Обычно входные и выходные импедансы представляются в комплексном виде, поскольку они, как правило, включают в себя активные и реактивные компоненты. Для минимизации искажений выходного сигнала датчик с токовым выходом (рис. 6Б) должен иметь максимально возможный выходной импеданс, а его интерфейсная схема - минимальный входной импеданс. В случае потенциального соединения (рис. 6А) датчику следует иметь низкий выходной импеданс, а интерфейсной схеме – высокий входной.

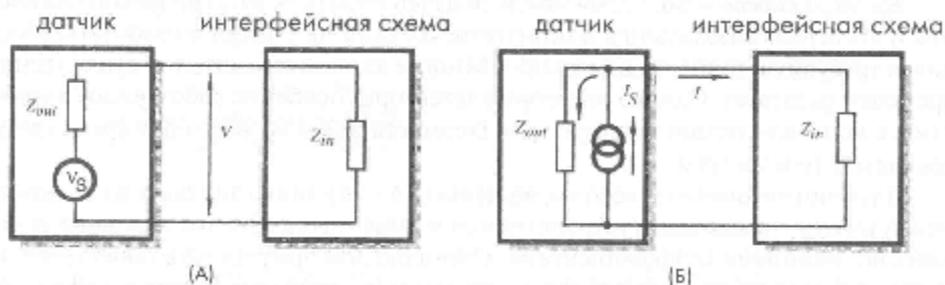


Рис.6. Соединение датчика с интерфейсной схемой

Сигнал возбуждения

Сигнал возбуждения - это электрический сигнал, необходимый активному датчику для работы. Сигнал возбуждения описывается интервалом напряжений и/или тока. Для некоторых типов датчиков также необходимо указывать частоту сигнала возбуждения и его стабильность. Выход сигнала возбуждения за приведенные пределы может привести к изменению передаточной функции датчика, и, следовательно, к искажению выходного сигнала.

Динамические характеристики

В стационарных условиях датчик полностью описывается своей передаточной функцией, диапазоном измеряемых значений, калибровочными коэффициентами и т.д. Однако на практике выходной сигнал датчика не всегда достаточно точно отслеживает изменение внешнего сигнала. Причины этого заключаются как в самом датчике, так и в его соединении с источником внешних воздействий, не позволяющем сигналам распространяться с бесконечно большой скоростью. Другими словами можно сказать, что любой датчик обладает параметрами, зависящими от времени, называемыми *динамическими характеристиками*. Если датчик имеет ограниченное быстродействие, он может регистрировать значения внешних воздействий, отличающиеся от реальных. Это означает, что датчик работает с динамической погрешностью. Отличие между статическими и динамическими погрешностями заключается в том, что последние всегда зависят от времени. Если датчик входит в состав измерительного комплекса, обладающего определенными динамическими характеристиками, внесение дополнительных динамических погрешностей может привести, в лучшем случае, к задержке отображения реального значения внешнего воздействия, а, в худшем случае, - к возникновению колебаний.

Время разогрева - это время между подачей на датчик электрического напряжения или сигнала возбуждения и моментом, когда датчик начинает работать, обеспечивая требуемую точность измерений. Многие датчики обладают несущественным временем разогрева. Однако некоторые детекторы, особенно работающие в устройствах с контролируемой температурой (термостатах), для своего разогрева требуют секунды, а то и минуты.

В теории автоматического управления принято описывать взаимосвязь между входами и выходами устройства в виде линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Очевидно, что при решении таких уравнений можно определить

динамические характеристики устройства. В зависимости от конструкций датчиков, уравнения, описывающие их, могут иметь разный порядок.

Датчики нулевого порядка, имеющие линейную передаточную функцию (уравнение (1)), можно описать следующими зависимостями от времени t :

$$S(t) = a + bs(t)$$

Коэффициент a называется смещением, а b - статической чувствительностью. Из вида уравнения видно, что оно описывает датчики, в состав которых не входят энергонакопительные элементы, такие как конденсаторы или массы. Датчики нулевого порядка относятся к устройствам мгновенного действия. Иными словами, у таких датчиков нет необходимости определять динамические характеристики.

Дифференциальные уравнения первого порядка описывают поведение датчиков, в состав которых входит один энергонакопительный элемент. Такие уравнения имеют вид:

$$b_1 \frac{dS(t)}{dt} + b_0 S(t) = s(t)$$

Типичный пример датчика первого порядка - датчик температуры, в котором роль энергонакопительного элемента играет теплоемкость. Для описания датчиков первого порядка существует несколько способов. Но производители датчиков для этого чаще всего используют *частотные характеристики*, показывающие насколько быстро датчик может среагировать на изменение внешнего воздействия. Для отображения относительного уменьшения выходного сигнала при увеличении частоты применяется амплитудно-частотная характеристика, показанная на рис. 7А. Для описания динамических характеристик датчиков часто используется граничная частота, соответствующая снижению выходного сигнала на 3 дБ, показывающая на какой частоте происходит 30% уменьшение выходного напряжения или тока.

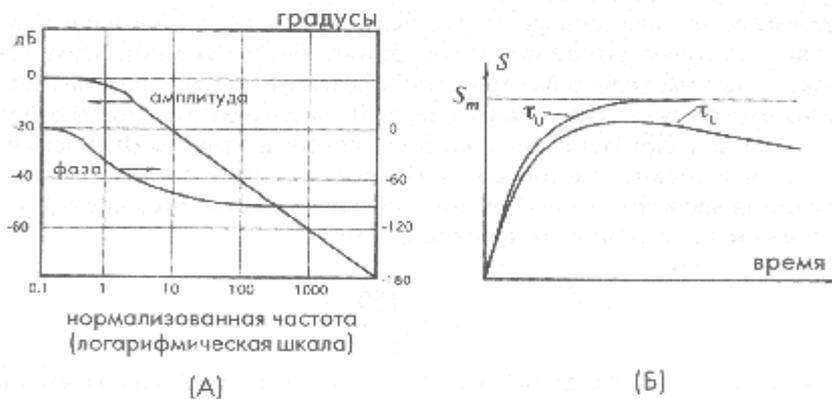


Рис.7. Частотные характеристики: А - частотная характеристика датчика первого порядка, Б - частотная характеристика датчика с ограничениями по верхней и нижней частоте среза, где τ_U и τ_L соответствующие постоянные времени.

Эта граничная частота f_u , часто называемая верхней частотой среза, считается предельной частотой работы датчика. Частотные характеристики напрямую связаны с быстродействием датчика, выражаемого в единицах внешнего воздействия на единицу времени. Какие характеристики: АЧХ или быстродействие, используются для описания датчика, зависит от его типа, области применения и предпочтений разработчика.

Другой способ описания быстродействия заключается в определении времени, требуемого для достижения выходным сигналом датчика уровня 90% от стационарного или максимального значения при подаче на его вход ступенчатого внешнего воздействия. Для датчиков первого порядка очень удобно использовать параметр, называемый *постоянной времени*. Постоянная времени τ является мерой инерционности датчика. В терминах электрических величин она равна произведению емкости на сопротивление: $\tau = CR$. В тепловых терминах под C и R

понимаются теплоемкость и тепловое сопротивление. Как правило, постоянная времени довольно легко измеряется. Временная зависимость системы первого порядка имеет вид:

$$S = S_m (1 - \mathbf{I}^{-t/t})$$

где S_m - установившееся значение выходного сигнала, t - время.

Заменяя t на τ , получаем:

$$\frac{S}{S_m} = 1 - \frac{1}{\mathbf{I}} = 0,6321.$$

Другими словами можно сказать, что по истечении времени, равного постоянной времени, выходной сигнал датчика достигает уровня, составляющего приблизительно 63% от установившегося значения. Аналогично можно показать, что по истечении времени, равного двум постоянным времени, уровень выходного сигнала составит 86.5%, а после трех постоянных времени - 95%.

Частота среза характеризует наименьшую или наибольшую частоту внешних воздействий, которую датчик может воспринять без искажений. Верхняя частота среза показывает насколько быстро датчик реагирует на внешнее воздействие, а нижняя частота среза - с каким самым медленным сигналом он может работать. На рис.7Б показана характеристика датчика, который имеет ограничения как по верхней, так и по нижней частоте среза. На практике для установления связи между постоянной времени датчика первого порядка и его частотой среза f_c , как верхней так и нижней, используют простую формулу:

$$f_c = \frac{0,159}{t}$$

Фазовый сдвиг на определенной частоте показывает насколько выходной сигнал отстает от внешнего воздействия (рис. 7А). Сдвиг измеряется либо в градусах, либо в радианах и обычно указывается для датчиков, работающих с периодическими сигналами. Если датчик входит в состав измерительной системы с обратными связями, всегда необходимо знать его фазовые характеристики. Фазовый сдвиг датчика может снизить запас по фазе всей системы в целом и привести к возникновению неустойчивости.

Дифференциальные уравнения второго порядка описывают поведение датчиков с двумя энергонакопительными элементами:

$$b_2 \frac{d^2 S(t)}{dt^2} + b_1 \frac{dS(t)}{dt} + b_0 S(t) = s(t)$$

Примером датчика второго порядка является акселерометр, в состав которого входит масса и пружина.

На выходах датчиков второго порядка после подачи на их входы ступенчатого воздействия практически всегда появляются колебания. Эти колебания могут быть очень кратковременными, тогда говорят, что датчик демпфирован, или они могут длиться продолжительное время, а то и постоянно. Продолжительные колебания на выходе датчика являются свидетельством его неправильной работы, поэтому их надо стараться избегать. Любой датчик второго порядка характеризуется *резонансной (собственной) частотой*, которая выражается в герцах или радианах в секунду.

На собственной частоте происходит значительное увеличение выходного сигнала датчика. Обычно производители указывают значение собственной частоты датчика и его коэффициент затухания (демпфирования). От резонансной частоты зависят механические, тепловые и электрические свойства детекторов. Обычно рабочий частотный диапазон датчиков выбирается либо значительно ниже собственной частоты (по крайней мере на 60%), либо выше ее.

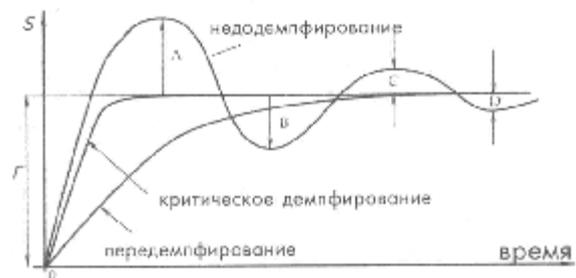


Рис.8. Виды выходных сигналов в датчиках с разным коэффициентом демпфирования

Однако для некоторых типов датчиков резонансная частота является рабочей. Например, детекторы разрушения стекла, используемые в охранных системах, настраиваются на узкую полосу частот в зоне частоты резонанса, характерную для акустического спектра, производимого разбивающимся стеклом.

Демпфирование - это значительное снижение или подавление колебаний в датчиках второго и более высоких порядков. Когда выходной сигнал устанавливается достаточно быстро и не выходит за пределы стационарного значения, говорят, что система обладает критическим затуханием, а ее коэффициент демпфирования равен 1 (рис. 8). Когда коэффициент затухания меньше 1, и выходной сигнал превышает установившееся значение, говорят, что система недодемпфирована. А когда коэффициент затухания больше 1, и сигнал устанавливается гораздо медленнее, чем в системе с критическим затуханием, говорят, что система передемпфирована.

Для колебательного выходного сигнала, показанного на рис. 8, коэффициент затухания или демпфирования определяется абсолютным значением отношения большей амплитуды к меньшей пары последовательно взятых полуволн колебаний относительно установившегося значения, т.е. можно записать:

$$\text{коэффициент демпфирования} = \frac{F}{A} = \frac{A}{B} = \frac{B}{C} = \dots$$

На рис. 9 приведены возможные варианты выходных сигналов датчиков в ответ на ступенчатое внешнее воздействие: А – бесконечные верхняя и нижняя частоты; В – система первого порядка с ограниченной верхней частотой среза; С – система первого порядка с ограниченной нижней частотой среза; D – система первого порядка с ограниченными верхней и нижней частотами среза; E – система с узкой полосой частот (резонансная система); F – широкополосная система с резонансом.

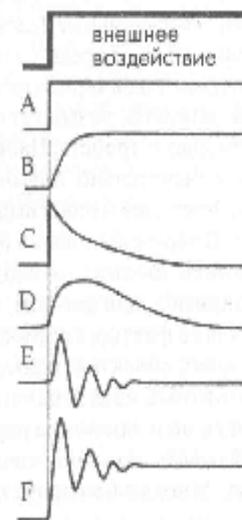


Рис. 9. Варианты выходных сигналов

Факторы окружающей среды

Условия хранения - совокупность предельных значений факторов окружающей среды, воздействующих на датчик в течение определенного промежутка времени, при которых не происходит существенного изменения его рабочих характеристик и обеспечивается поддержание его работоспособности. Обычно условия хранения устанавливают: максимальную и минимальную температуры хранения, а также максимальную относительную влажность при этих температурах. К значению относительной влажности необходимо добавить такую характеристику, как «отсутствие конденсата». В зависимости от физической природы датчика могут указываться дополнительные условия хранения, например, максимальное давление, присутствие некоторых газов или отсутствие вредных испарений.

Краткосрочная и долгосрочная стабильность (дрейф) - характеристики точности датчиков. Краткосрочная стабильность описывает изменения рабочих характеристик датчика в течении минут, часов и даже дней. Выходной сигнал датчика может увеличиваться или уменьшаться, что может быть выражено через величину шума сверхнизкой частоты. Долгосрочная стабильность зависит от процессов старения, которые изменяют электрические, механические, химические и термические свойства материалов датчика. Долгосрочный дрейф параметров может измеряться достаточно длительными интервалами времени: месяцами и годами. Долгосрочная стабильность является очень важной характеристикой для датчиков, используемых для прецизионных измерений. Скорость старения определяется условиями хранения и эксплуатации, а также тем, насколько хорошо элементы датчиков изолированы от

окружающей среды, и какие материалы использовались для их изготовления. Интенсивное старение типично для датчиков, в состав которых входят органические компоненты, и не столь существенно для датчиков из неорганических элементов. Например, металлоксидные термисторы в стеклянных корпусах обладают лучшей долговременной стабильностью, чем такие же термисторы, покрытые эпоксидной смолой. Для повышения долговременной стабильности элементы датчиков подвергают термоциклической подготовке, моделирующей экстремальные условия работы. Например, датчик может периодически перемещаться из среды с температурой замерзания в среду с очень высокой температурой. Такая термоциклическая подготовка повышает стабильность характеристик датчиков, позволяет обнаружить скрытые дефекты и произвести отбраковку негодных устройств. Например, стабильность термисторов с эпоксидным покрытием значительно повышается, если перед калибровкой и установкой в прибор они в течение месяца выдерживались при температуре + 150 °С.

В перечень условий окружающей среды, воздействующих на датчики, практически никогда не входят физические параметры, измеряемые датчиками. Например, для датчика, определяющего давление воздуха, учитываются следующие факторы окружающей среды: температура воздуха и рядом расположенных объектов, влажность, вибрации, ионизирующая радиация, электромагнитные поля, гравитационные силы и т.п. Все эти параметры не только могут, но и влияют на рабочие характеристики датчика. При этом необходимо учитывать, как динамические, так и статические составляющие этих факторов. Многие из параметров окружающей среды имеют мультипликативную природу, т.е. они влияют на передаточную функцию датчика, например, меняют его коэффициент усиления. Одним из подтверждений этого эффекта является поведение резистивного датчика напряжений, чувствительность которого увеличивается с ростом температуры.

Очень важным требованием для современных датчиков является обеспечение их стабильной работы в разнообразных условиях окружающей среды. Поэтому разработчики, а также экспериментаторы всегда должны учитывать все возможные внешние воздействия, способные повлиять на рабочие характеристики датчиков. Например, на выходе пьезоэлектрического акселерометра могут появляться паразитные сигналы из-за: резкого изменения окружающей температуры, электростатического разряда, образования электрических зарядов, вибрации соединительных проводов, электромагнитной интерференции (ЭМИ) и т. п. Даже если производитель датчика не указал эти факторы, экспериментатор должен проверить его поведение в конкретных условиях эксплуатации и, в случае необходимости, (при реальном ухудшении рабочих характеристик от влияния внешних факторов) принять соответствующие меры, например, поместить датчик в защитный корпус, использовать электрический экран, применить теплоизоляцию или термостат.

Температура окружающей среды влияет на рабочие характеристики датчиков, поэтому всегда должна приниматься во внимание. Рабочий диапазон температур - это интервал окружающих температур, задаваемых верхним и нижним предельными значениями (например, -20... + 100 °С), внутри которого датчик работает с заданной точностью. Передаточные функции многих датчиков сильно зависят от окружающей температуры. Для снижения температурных погрешностей в состав самих датчиков или в схемы преобразователей сигналов часто встраиваются специальные компенсационные элементы. Самый простой способ определения допусков по температуре заключается в установлении интервалов внутри рабочего диапазона температур, для каждого из которых указывается индивидуальная погрешность. Например, в паспортных данных может быть указано, что в интервале температур 0...50 °С точность датчика составляет 1 %, в интервалах - 20.. .0 °С и +50...100 °С - 2%, в остальных интервалах в пределах диапазона измеряемых температур (-40... + 150 °С) -3%. Температура окружающей среды также влияет на динамические характеристики, особенно в случаях, когда применяется вязкостное демпфирование. Сравнительно быстрые изменения температур могут привести к появлению паразитных сигналов на выходах датчиков. Например, пьезоэлектрический чувствительный элемент, используемый в детекторах движения, практически не реагирует на медленное изменение окружающей температуры. Однако при

быстром скачке температуры на его выходе может появиться электрический сигнал (ток), распознаваемый электронными целями как отклик на внешнее воздействие, что приводит к ошибкам детектирования.

Погрешность саморазогрева появляется в датчиках, нагреваемых от сигнала возбуждения настолько, что это начинает влиять на его точностные характеристики. Например, через термисторный датчик температуры необходимо пропускать электрический ток, что приводит к рассеянию тепла внутри его конструкции. При этом степень саморазогрева датчика зависит от его конструктивных особенностей и от условий окружающей среды: либо это сухой воздух, либо жидкость и т.д. Саморазогрев датчика приводит к появлению ошибок при измерении температуры, поскольку термистор начинает работать как источник дополнительной тепловой энергии. Самый сильный разогрев датчиков наблюдается в среде стоячего воздуха. Для термисторов производители часто указывают погрешность саморазогрева при работе в воздухе, стоячей жидкости и других средах.

Надежность

Надежность - это способность датчика выполнять требуемые функции при соблюдении определенных условий в течение заданного промежутка времени. Если использовать статистические термины, можно дать следующее определение: надежность - это вероятность того, что устройство будет функционировать без поломок в течение указанного интервала времени или заданного количества циклов. Следует отметить, что надежность не является характеристикой дрейфа или шума. Она отражает время до выхода устройства из строя (отказа), либо временного, либо постоянного при соблюдении регламентированных условий эксплуатации.

Несмотря на то, что надежность является очень важной характеристикой, она редко указывается производителями датчиков. Возможно, причина этого заключается в отсутствии общепринятых способов ее измерения. Для многих электронных приборов в качестве способа определения эксплуатационной надежности применяется процедура вычисления среднего времени между отказами (СВМО), основанная на определении СВМО всего устройства после вычисления СВМО его отдельных элементов, при этом необходимо учитывать влияние внешних факторов: температуры, давления, механических напряжений, степени экранирования и т.д. К сожалению, процедура нахождения СВМО не позволяет оценить надежность напрямую, и такую характеристику трудно применять на практике. Поэтому часто для определения надежности датчиков их подвергают квалификационным испытаниям, которые проводятся в наихудших условиях. Например, датчики заставляют непрерывно работать при максимальной рабочей температуре в течение 1000 часов. Но этот метод не учитывает ситуации резких изменений внешних условий, например, быстрого повышения температуры. Он имитирует работу датчика в модели реального окружения, но при этом стремится сжать годы в недели. Перед такими квалификационными испытаниями стоят три задачи: оценка СВМО, определение самого уязвимого места конструкции (места первой поломки) для последующего усовершенствования датчика и нахождение эксплуатационного срока жизни всей системы.

Другим возможным способом «ускоренного старения» является использование той же самой совокупности параметров, что и в реальных режимах эксплуатации, включая максимальную нагрузку и циклы включения/выключения, но проверку системы проводить в расширенных диапазонах окружающих условий (по сравнению с регламентированными в паспортных данных). При этом допускается, чтобы рабочие характеристики датчиков выходили за пределы, указанные в их описаниях, но в нормальных условиях эксплуатации они должны возвращаться к требуемым значениям. Например, если в документации говорится, что датчик должен работать при температуре, не превышающей 50 °С, и наибольшей относительной влажности 85% при максимальном рабочем напряжении + 15 В, его следует тестировать в циклическом режиме при температуре 100 °С, относительной влажности 99% и напряжении + 18 В.

Для оценки количества циклов (n) может применяться следующая эмпирическая формула:

$$n = N \left[\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\text{test}}} \right]^{2,5}$$

где: N - приблизительное количество циклов за весь эксплуатационный период; ΔT_{\max} - максимально возможная флуктуация температуры; ΔT_{test} - максимальная флуктуация температуры, зафиксированная во время тестирования.

Например, пусть нормальная рабочая температура датчика равна 25 °С, максимальная рабочая температура, указанная в описании, составляет 50 °С, тестирование проводилось при температуре 100 °С. Также было оценено, что датчик за период своей эксплуатации (допустим, 10 лет) подвергается 20000 рабочим циклам, тогда количество тестовых циклов, определенное по вышеприведенной формуле, составит 1283.

Это значит, что для тестирования, моделирующего весь срок эксплуатации, проведенного при вышеуказанных условиях, потребуется 1300 циклов вместо 20000. Следует отметить, что коэффициент 2,5 получен для мест соединения припоем, поскольку именно эти элементы наиболее подвержены выходу из строя. Но некоторые датчики не имеют паяных соединений, а элементы других устройств обладают более высоким коэффициентом, чем 2,5 (например, соединения при помощи электропроводных эпоксидных смол), поэтому на практике этот коэффициент может либо слегка снижаться, либо слегка увеличиваться. В результате тестирования на «ускоренное старение», надежность выражается через вероятность отказов. Например, если при проведении тестирования 100 датчиков два из них вышли из строя (при оцененном сроке службы 10 лет), можно утверждать, что надежность данного типа устройств составляет 98 % в течение первых 10 лет их эксплуатации.

Датчик, в зависимости от области применения, может подвергаться воздействию и других факторов окружающей среды, которые потенциально могут менять его рабочие характеристики или помогать обнаруживать скрытые дефекты. Поэтому иногда применяются следующие виды дополнительных испытаний:

- Тестирование при высокой температуре и высокой влажности при максимальном напряжении питания. Например, датчик заставляют работать при максимально допустимой температуре и относительной влажности 85-90% в течение 500 часов. Такое тестирование является очень полезным для обнаружения загрязнений и оценки целостности корпусов устройств. Срок службы датчиков часто определяется по тесту ускоренного старения, проводимого при температуре 85 °С и относительной влажности 85%. Такую проверку часто называют «тестированием 85-85».

- Для моделирования неблагоприятных условий окружающей среды при проверке надежности соединений: проводных, клеевых и т.п., датчики часто подвергаются воздействию механических ударов и вибрациям. Для получения высоких значений ускорений моделируется падение датчика. Часто требуется проводить такие испытания относительно разных осей устройства. Частота гармонических колебаний, прикладываемых к датчику при вибрационном тестировании, должна изменяться в интервале, включающем его собственную частоту.

- Для моделирования экстремальных условий хранения и перевозок датчик, как минимум, 1000 часов выдерживается либо при очень высоких (+100 °С), либо при очень низких температурах (-40 °С). Этот вид тестирования проводится, как правило, на неработающих устройствах. Выбор верхнего и нижнего температурных пределов должен проводиться в соответствии с физической природой датчиков. Например, для пирозлектрических TGS датчиков фирмы Philips, характеризующихся точкой Кюри +60 °С, эта температура никогда не должна превышать +50 °С, что всегда должно быть четко указано на их корпусах.

- Для проверки поведения датчиков при экстремально изменяющихся внешних условиях их подвергают воздействию теплового шока или циклических температур. Например, устройство находится в течение 30 минут в среде с температурой -40 °С, после чего быстро перемещается на 30 минут в среду с температурой + 100 °С и так много раз. Количество таких циклов, как правило, лежит в пределах 100...1000. Этот тест помогает обнаруживать дефекты разных типов

соединений и проверяет целостность корпуса.

- Для моделирования условий морских перевозок датчики могут подвергаться воздействию соляных туманов в течение определенного интервала времени (например, 24 часов). Такое тестирование помогает определять устойчивость устройств к коррозии и обнаруживать дефекты корпусов.

Характеристики датчиков, диктуемые условиями их применения

Для возможности применения в различных областях важными становятся следующие характеристики датчиков: их *конструкция*, *вес* и *габариты*. Если для датчиков главными параметрами являются точность и надежность, такая характеристика, как стоимость отходит на второй план. Так если устройства предназначены для систем жизнеобеспечения, оборонных комплексов или космических кораблей, их высокая стоимость всегда оправдана предъявляемыми требованиями по точности и надежности. Однако существует ряд других областей применения датчиков, где их стоимость является основополагающей.

Статистическая ошибка

В этом мире нет ничего совершенного. Все наши знания о материалах носят весьма приблизительный характер, и, на самом деле, они представляют собой не совсем то, что мы думаем о них. Все станки тоже весьма несовершенны и никогда не производят детали в точном соответствии с чертежами. У всех компонентов любых устройств существует дрейф характеристик, связанный с окружающими условиями и старением. Внешние помехи могут влиять на рабочие параметры систем и менять их выходные сигналы. Работники также неидеальны, и всегда присутствует человеческий фактор. Производители борются за однородность и согласованность технологических процессов, но, несмотря на это, ни один из производимых элементов не является совершенным и говорить о значениях их параметров можно только с некоторой степенью определенности. Любые измерительные комплексы состоят из множества компонентов, включая датчики. Поэтому вне зависимости от того, насколько точно проводились исследования, можно говорить лишь о приблизительной оценке значения реальной физической величины, являющейся объектом измерений (т.е. внешним воздействием). Результаты измерений могут рассматриваться законченными, только когда они сопровождаются статистической оценкой полученных данных, поскольку никогда не бывает 100% уверенности в точности определенных значений.

В зашумленных условиях показания датчика s' будут отличаться от реального значения внешнего сигнала s на величину ошибки измерения, которую можно выразить в следующем виде:

$$\delta = s' - s$$

Необходимо всегда четко понимать разницу между *погрешностью* измерений, которую можно определить при помощи формул, и *статистической ошибкой* результатов. Погрешность измерений можно до некоторой степени снизить за счет корректировки систематических составляющих. Но, несмотря на достигнутую малую величину погрешности, статистическая ошибка при этом может быть очень высокой. В таком случае мы не можем считать результаты измерений достоверными. Другими словами можно сказать, что погрешность измерений - это то, что мы реально получаем во время проведения конкретных измерений, а статистическая ошибка - это то, насколько мы можем поверить полученным результатам.

Международный Комитет по Мерам и Весам считает, что статистические ошибки можно разделить на две группы, хотя между группами А и Б нет четких границ:

Группа А: погрешности, оцениваемые статистическими методами.

Группа Б: погрешности, оцениваемые другими методами.

Статистическая ошибка типа А обычно определяется по стандартному отклонению s_i , равному положительному квадратному корню из статистически определенной дисперсии Σs_i^2 , деленной на число измерений v_i . Для отдельных компонентов *стандартная* статистическая ошибка u_i обычно равна s_i . Стандартная ошибка показывает вклад каждого компонента в общую статистическую ошибку.

Для оценки дисперсии обычно применяют статистическую обработку результатов измерений. Для этого методом наименьших квадратов находят уравнение зависимости, наиболее точно описывающей полученные экспериментальные данные, и определяют отклонения каждого измеренного значения от полученной таким образом осредненной кривой.

Для определения статистической ошибки типа Б обычно используют всю доступную информацию, включающую:

- Все данные, полученные в предыдущих измерениях,
- Знания, полученные из анализа характеристик и поведения аналогичных датчиков, использования подобных материалов и инструментов,
- Спецификации, выданные производителем,
- Данные, полученные в процессе калибровки,
- Статистические данные, полученные из справочников и другой литературы.

После получения оценок всех статистических погрешностей их необходимо объединить и определить полную стандартную статистическую ошибку. Это можно сделать при помощи закона распространения статистических погрешностей, который заключается в нахождении квадратного корня из суммы квадратов всех компонентов статистических ошибок:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_i^2 + \dots + u_n^2}$$

где n - число компонентов полной стандартной статистической ошибки.

ДЕТЕКТОРЫ ПРИСУТСТВИЯ И ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

Датчики *присутствия* детектируют нахождение людей (а иногда и животных) в контролируемой зоне, тогда как *детекторы движения* реагируют только на перемещение объектов. Основным их отличием является то, что датчики присутствия вырабатывают выходной сигнал независимо от того, движется объект или замер, в то время как сигнал на выходе детектора движения появляется только в случае перемещения объекта. Такие датчики применяются в системах наблюдения и охраны, в устройствах управления энергией (например, для управления включением/выключением электрического света), в интерактивных игрушках и т.д. В зависимости от конкретной ситуации присутствие человека может определяться по некоторым параметрам его тела или характеристикам поведения. Например, датчик может реагировать на вес человека, тепло от его тела, звуки, на изменение диэлектрической проницаемости и т.д. Для определения присутствия людей и их передвижений в настоящее время применяются следующие типы датчиков:

- *Датчики давления воздуха*: детекторы перепадов давления воздуха, возникающих при открывании дверей и окон.
- *Емкостные датчики*: детекторы изменения емкости человеческого тела.
- *Акустические датчики*: детекторы звуков, производимых людьми.
- *Фотоэлектрические датчики*: детекторы пересечения луча света движущимися объектами.
- *Оптоэлектронные датчики*: детекторы уровня освещенности или оптической контрастности в охраняемой зоне.
- *Сенсоры предохранительных ковриков*: длинные полоски, располагающиеся на полу под ковриком у входной двери, реагирующие на давление, создаваемое весом непрошеного гостя.
- *Детекторы напряжений*: датчики деформации, встроенные в пол, ступени и другие конструктивные элементы.
- *Детекторы открывания*: электрические контакты, встроенные в двери и окна.
- *Магнитные детекторы открывания*: бесконтактная версия детекторов открывания.
- *Детекторы вибраций*: устройства, реагирующие на вибрации стен или других конструкций зданий; такие элементы могут также крепиться к дверям и окнам для обнаружения передвижений объектов.
- *Детекторы разбитых стекол*: датчики, реагирующие на специфические вибрации, характерные для бьющегося стекла.
- *ИК детекторы движения*: устройства, реагирующие на тепловые волны, испускаемые теплыми или холодными движущимися объектами.
- *СВЧ детекторы (микроволновые датчики)*: активные устройства, реагирующие на СВЧ электромагнитные волны, отраженные от объектов.
- *Ультразвуковые датчики*: устройства аналогичные СВЧ датчикам, только в них вместо электромагнитных волн используются ультразвуковые колебания.
- *Видеодетекторы появления новых объектов*: видео устройства, сравнивающие текущее изображение охраняемой зоны с записанным в памяти эталонным изображением.
- *Системы видеораспознавания*: анализаторы изображений, сравнивающие характерные особенности лиц людей с портретами, хранящимися в базе данных.
- *Лазерные детекторы*: устройства, подобные фотоэлектрическим детекторам. Их отличие в том, что они используют узкие лучи света и комбинацию отражателей.
- *Электростатические детекторы*: датчики, способные детектировать статические электрические заряды, переносимые движущимися объектами.

Одним из недостатков детекторов обнаружения присутствия людей или их вторжения в охраняемое пространство является ложное срабатывание. Под ложным срабатыванием понимается ситуация, когда система указывает на присутствие объектов, которых на самом деле там нет. В некоторых случаях, например, в игрушках или устройствах управления освещением, ложное срабатывание не причиняет особых проблем. Однако в охранных и военных системах одинаково опасными являются ситуации, как ложного срабатывания, так и

пропускания вторжения посторонних в контролируемую зону. Поэтому при выборе датчиков для таких применений необходимо обращать внимание на их надежность, избирательность и помехозащищенность. Для повышения надежности охранных систем часто используют несколько датчиков со своими интерфейсными схемами, работающими независимо друг от друга. Такой прием особенно эффективен в случае воздействия внешних помех. Другим способом снижения ошибок при обнаружении вторжения людей является применение нескольких датчиков, основанных на разных физических принципах (например, очень эффективна комбинация емкостных и ИК детекторов, поскольку для них критичными являются разные виды вносимых помех).

ДЕТЕКТОРЫ ПОЛОЖЕНИЯ, ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И УРОВНЯ

Определение положения физических объектов и их перемещений является важной функцией многих автоматизированных систем. Она необходима практически для всех АСУТП, систем управления транспортными потоками, охранных систем, без нее не может обойтись ни один робот. Под определением *положения* физического объекта понимается нахождение его координат (линейных или угловых) по отношению к заданной точке. Под *перемещением* объектов подразумевается их передвижение из одного положения в другое, находящееся от первого на определенном расстоянии или под определенным углом. Другими словами, перемещение всегда определяется по отношению к исходному положению объекта.

Для обнаружения опасных расстояний между двумя объектами обычно применяются детекторы *сближения*. Такие детекторы, по существу, являются пороговыми устройствами, реализованными на базе датчиков положения объекта. Датчики положения - это, как правило, линейные устройства, выходные сигналы которых соответствуют расстоянию между объектом и опорной точкой. Детекторы сближения являются более простыми устройствами, на выходе которых сигналы появляются только в случае обнаружения критического расстояния до объекта. Например, во многих роботах и движущихся механизмах автоматизированных систем применяется очень простой, но очень надежный датчик сближения - концевой выключатель, в состав которого входит пара либо нормально замкнутых, либо нормально разомкнутых контактов. Когда объект при своем движении механически размыкает или замыкает эти электрические контакты, концевой выключатель посылает сигнал в управляющее устройство. Этот сигнал указывает на то, что объект достиг своего конечного положения. Однако контактные переключатели имеют ряд недостатков: высокую механическую нагрузку на движущиеся объекты, гистерезис и т.д.

Детекторы перемещений часто являются составными частями более сложных датчиков, для которых обнаружение движущихся объектов - только одна из нескольких ступеней процесса преобразования сигнала. Пример такого составного преобразователя - датчик давления, в котором давление приводит к перемещению диафрагмы, а перемещение диафрагмы, в свою очередь, вызывает изменение выходного электрического сигнала. Из приведенных примеров видно, что датчики перемещений, не только применяются самостоятельно, но и входят в состав многих других детекторов.

Большинство датчиков положения и перемещений являются статическими устройствами, быстродействие которых, как правило, не сказывается на рабочих характеристиках систем. Однако производители таких датчиков обычно приводят в документации величину максимальной скорости реакции.

Перед тем как приступить к разработке или выбору детектора положения и перемещения, необходимо ответить на следующие вопросы:

1. Какова величина и тип измеряемых перемещений? (существует два типа перемещений: угловой и линейный)
2. Какой должна быть разрешающая способность и точность?
3. Из чего изготовлен объект, перемещение которого необходимо измерить? (из металла, пластмассы, жидкости, ферромагнитных материалов и т.д.)
4. Какой размер пространства отведен для монтажа датчика?
5. Каким должен быть диапазон измерений?
6. В каких условиях окружающей среды предстоит работать датчику? (влажность, температура, источники помех, вибрация и т.д.)
7. Какой должна быть потребляемая мощность датчика?
8. Каким может быть срок службы датчика? (этот параметр тесно связан с продолжительностью службы всей системы)
9. Какое количество датчиков необходимо изготовить? (ограниченное число, среднее количество, серийный выпуск)
10. Какой должна быть стоимость датчика?

Тщательный предварительный анализ помогает не допустить нежелательных промахов в

дальнейшем.

В настоящее время применяются следующие типы датчиков.

Потенциометрические датчики

Датчики положения и перемещений часто реализуются на основе линейных или поворотных потенциометров. Принцип действия таких устройств основан на том, что сопротивление проволочного резистора зависит от длины провода. Таким образом, если перемещение объекта будет связано с изменением положения ползунка потенциометра, получится устройство, контролирующее положение объекта, т.е. активный детектор перемещений. На рис. 1А приведена схема потенциометрического датчика перемещений. На практике процедура измерения сопротивления заменяется определением падения напряжения V на этом сопротивлении, которое для линейного датчика пропорционально величине перемещения d :

$$V = E \frac{d}{D},$$

где D - величина максимально возможного перемещения, E - напряжение, приложенное к потенциометру.

Гравитационные датчики

К хорошо известным гравитационным детекторам уровня относятся датчики, используемые в туалетных бачках. Главным элементом таких преобразователей является поплавок - устройство, обладающее меньшей, чем у воды плотностью. Поплавок напрямую связан с водопроводным краном и открывает или перекрывает его. Поплавок, по своей сути,

является детектором положения поверхности воды. Если уровень воды необходимо измерять, к поплавку можно подключить преобразователь положения: потенциометрический, магнитный, емкостной или какой-либо иной датчик прямого действия (рис. 1Б).

Уровнемеры, определяющие угол наклона объекта относительно направления к центру тяжести Земли, используются при строительстве дорог, в инерционных навигационных системах, в механических станках и других устройствах. Одним из детекторов положения является ртутный переключатель, состоящий из непроводящей трубки, двух электрических контактов и капли ртути (рис. 2). Когда датчик наклонен относительно вектора гравитационной силы в одну сторону, капля ртути перемещается в противоположном от контактов направлении, переключатель размыкается.

Для более точного определения угловых перемещений применяются электролитические датчики наклона и датчики, реализованные на основе фотодиодной матрицы. Первые состоят из небольшой, слегка изогнутой стеклянной трубки, частично заполненной электролитом, в которой размещены три электрода: два - на концах, а один - по центру (рис. 2В). Находящийся внутри трубки воздушный пузырь

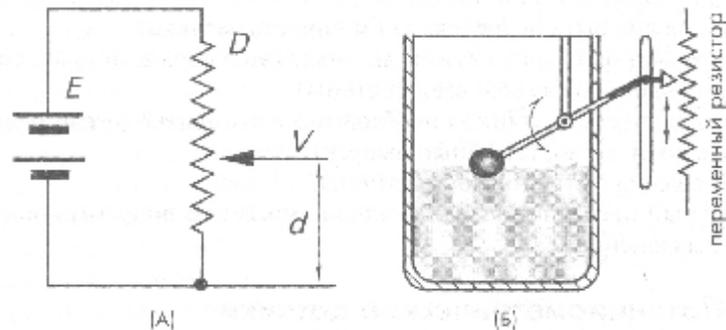


Рис. 1. Потенциометрический датчик положения (А), гравитационный датчик уровня жидкости (Б)

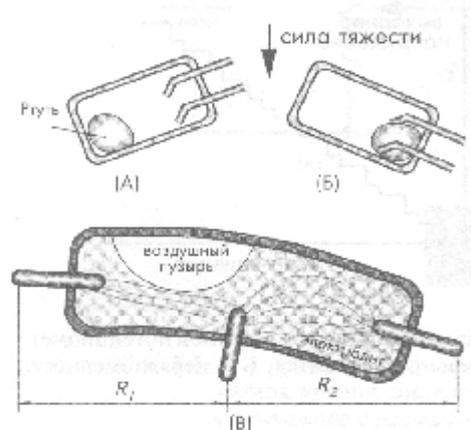


Рис. 2. Гравитационные датчики: ртутный переключатель в разомкнутом (А) и замкнутом (Б) состояниях, электролитический

перемещается вдоль нее при ее наклоне в ту или другую сторону. В зависимости от расположения пузырька меняются электрические сопротивления между центральным и боковыми электродами.

Еще более точными устройствами для измерения углов наклона являются датчики, реализованные на основе фотодиодной матрицы (Рис. 3). Устройства этого типа применяются в строительстве и на механических производствах для определения с высоким разрешением формы сложных объектов. Например, такие детекторы используются для оценки формы дорог и земельных участков, а также контроля равномерности листов стали. Оптоэлектронный датчик наклона состоит из светоизлучающего диода (СИД) и спиртового нивелира в форме полусферы, смонтированного на фотодиодной матрице p-n типа. Тень пузырька воздуха в жидкости нивелира проектируется на поверхность фотодиодной матрицы и значения токов на выходах

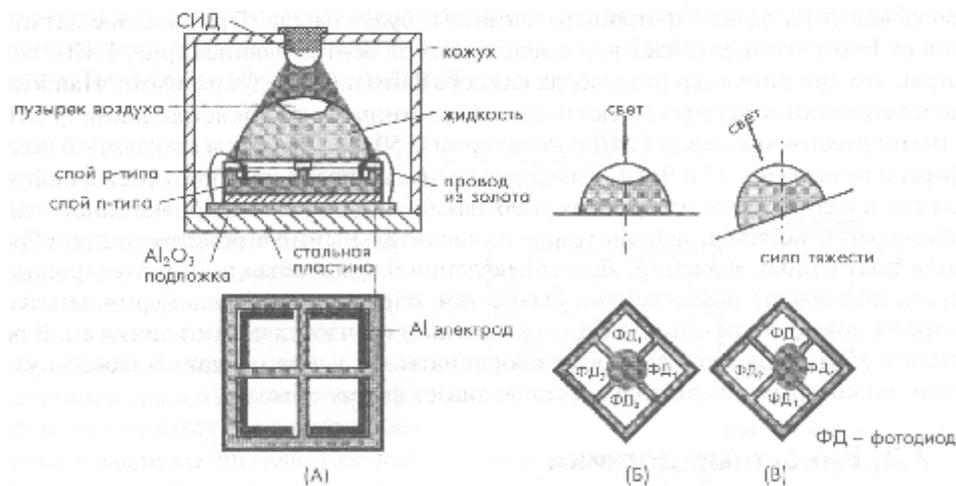


Рис. 3. Оптоэлектронные датчики наклона: конструкция (А), тень от пузырька воздуха при горизонтальном (Б) и наклонном (В) положении датчика

фотодиодов несут информацию об уровне наклона.

Емкостные датчики

Принцип действия таких датчиков основывается либо на изменении геометрии конденсатора (расстояния между пластинами), либо на изменении емкости за счет размещения между пластинами различных материалов. Изменения емкости, как правило, преобразуются в переменный электрический сигнал. Емкостные датчики могут быть однополярными (в их состав входит только один конденсатор), дифференциальными (в их состав входят два конденсатора) или мостовыми (здесь уже используются четыре конденсатора). В случае дифференциальных или мостовых датчиков, один или два конденсатора являются либо постоянными, либо переменными, включенными навстречу друг другу.

В примере, показанном на рис. 4, рассматриваются три пластины одинаковой площади A . Эти пластины формируют два конденсатора C_1 и C_2 . На две крайние пластины подаются синусоидальные сигналы одинаковой амплитуды, но с разностью фаз, равной 180° . Поскольку оба конденсатора являются одинаковыми, токи через них взаимно уничтожают друг друга, и потенциал центральной пластины практически равен нулю (А). Теперь рассмотрим ситуацию, когда центральная пластина сместилась вниз на расстояние x (Б). Это приведет к изменению емкостей конденсаторов C_1 и C_2 :

$$C_1 = \frac{eA}{x_0 + x}, C_2 = \frac{eA}{x_0 - x}.$$

При этом амплитуда сигнала на центральной пластине будет пропорциональна величине перемещения x , а фаза - направлению движения. Амплитуду выходного сигнала можно найти

из выражения:

$$V_{out} = V_0 \left(-\frac{x}{x_0 + x} + \frac{\Delta C}{C} \right)$$

При выполнении условия $x \ll x_0$ выходное напряжение практически линейно зависит от перемещения. Второй член суммы соответствует исходному рассогласованию двух конденсаторов и является основной причиной возникновения напряжения смещения выходного сигнала.

В последние годы популярными стали мостовые датчики, состоящие из двух групп плоских электродов – подвижной и стационарной, расположенных параллельно на фиксированном расстоянии. На рис. 5А показан линейный мостовой датчик перемещений, состоящий из двух групп плоских электродов, расположенных параллельно на фиксированном расстоянии d . Все шесть электродов имеют одинаковые размеры ($L \times b$). Четыре электрода стационарной группы перекрестно соединены друг с другом электрическими проводами, что делается для формирования емкостной схемы мостового типа. На мостовую схему подается синусоидальное напряжение с частотой 5...50 кГц. Дифференциальный усилитель усиливает разность напряжений между парой электродов в подвижной группе. Выходной сигнал усилителя поступает на вход синхронного детектора. Емкость конденсатора, сформированного двумя параллельными пластинами, расположенными на фиксированном расстоянии друг от друга, пропорциональна площади части подвижной пластины, расположенной напротив соответствующей области стационарной пластины. На рис. 5Б показана эквивалентная схема датчика перемещений с конфигурацией емкостного моста. Нарушение симметричности расположения пластин приводит к разбалансу моста и появлению сигнала на выходе дифференциального усилителя. Емкостная мостовая схема обладает всеми достоинствами, присущими любой мостовой схеме: линейностью и высокой помехозащищенностью. Подобные датчики могут быть реализованы не только с плоскими электродами. Такой метод построения датчиков применим к любым симметричным конфигурациям (например, для построения детекторов вращательного движения).

Индуктивные и магнитные датчики

К таким датчикам относятся линейно-регулируемые дифференциальные трансформаторы (ЛРДТ) и поворотнo-регулируемые дифференциальные трансформаторы (ПРДТ), вихрековые датчики, поперечный индуктивный датчик, датчики приближения на эффекте Холла, магниторезистивные датчики, магнитострикционный детектор. Достоинством магнитных датчиков является то, что магнитное поле может проникать через все немагнитные материалы без потери точности определения расстояния. В них используется принцип электромагнитной индукции.

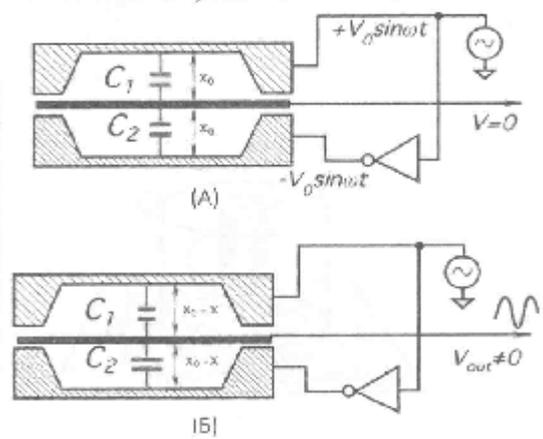


Рис. 4. Принцип действия емкостного датчика с плоскими пластинами: уравновешенное (А) и неуравновешенное (Б) состояния

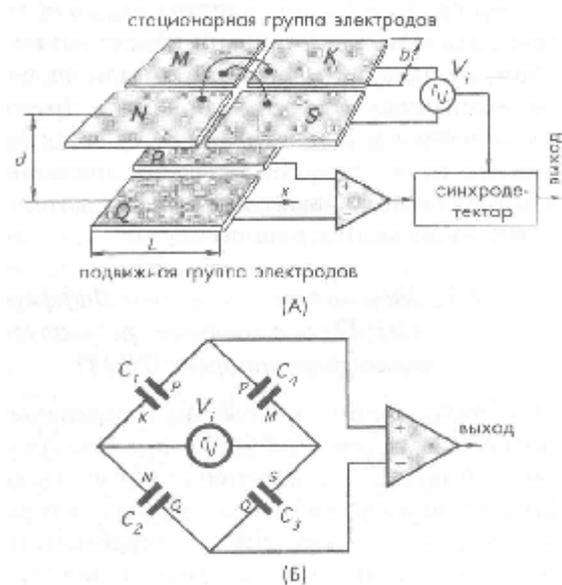


Рис. 5. Емкостной датчик мостового типа с параллельными пластинами

Оптические датчики

После механических контактных и потенциометрических датчиков оптические детекторы возможно являются наиболее популярными устройствами для определения положения и перемещений объектов. Среди их основных достоинств можно назвать простоту, отсутствие нагрузочного эффекта и относительно большие рабочие расстояния. Они нечувствительны к паразитным магнитным полям и электростатическим помехам, что делает их незаменимыми для некоторых приложений. В состав оптического датчика перемещений, как правило, входят три компонента: источник света, фотодетектор и устройства, управляющие светом (линзы, зеркала, оптические волокна и т.л.). К оптическим датчикам относятся: оптические мостовые схемы, поляризационные детекторы приближения, волоконнооптические датчики, датчики Фабри-Перо, решетчатые датчики, позиционно-чувствительные детекторы.

Ультразвуковые датчики

Принцип передачи и приема ультразвуковой энергии лежит в основе очень популярных ультразвуковых датчиков и детекторов скорости. Ультразвуковые волны являются механическими акустическими волнами, частота которых лежит за пределами слышимости человеческого уха - более 20 кГц. Однако сигналы этих частот воспринимаются некоторыми животными, а некоторые виды млекопитающих, таких как летучие мыши и дельфины, общаются друг с другом ультразвуковыми сигналами. При столкновении любых волн с объектом часть их энергии отражается. В случае ультразвуковых волн отраженная энергия рассеивается в пространстве. Это означает, что вне зависимости от направления падающего луча, все отраженные лучи почти равномерно распределяются внутри широкого пространственного угла, который может достигать значения 180° . При движении объекта частота отраженных волн не совпадает с частотой излучаемых волн, т.е. происходит так называемый эффект Доплера, который широко используется в датчиках перемещений.

Радары

Принцип действия радаров довольно классический: они посылают радиосигналы (импульсные или непрерывные) и принимают отраженные сигналы. Временная задержка между переданными и принятыми сигналами и есть величина, пропорциональная расстоянию до отражающей поверхности. Есть радары, которые измеряют расстояния до нескольких тысяч километров, а есть радары, рабочий диапазон которых составляет, в лучшем случае, сотни метров (радар для зондирования грунта, микромощные импульсные радары).

ДАТЧИКИ СКОРОСТИ И УСКОРЕНИЯ

Ускорение - динамическая характеристика объекта. Согласно второму закону Ньютона оно возникает только после приложения к объекту какой-либо силы. Перемещение объекта, его скорость и ускорение являются взаимосвязанными физическими величинами: скорость - это первая производная от перемещения, ускорение его вторая производная. Однако взять производную сильно зашумленного сигнала практически невозможно, поскольку это приводит к возникновению очень больших погрешностей даже при использовании очень сложных схем обработки. Поэтому скорость и ускорение объектов не всегда можно определять по данным, полученным при помощи детекторов перемещений, и для этого необходимо применять специальные схемы. Как правило, в низкочастотной области (в полосе частот порядка 1 Гц) довольно хорошую точность измерений обеспечивают датчики положения и перемещения объектов. В зоне средних частот (менее 1 кГц) уже предпочтительнее использовать датчики скорости. Тогда как на высоких частотах, когда перемещения соизмеримы с уровнем шума, применяются датчики ускорения.

Скорость движения может быть либо угловой, либо линейной. Она показывает, насколько быстро объект движется по прямой линии или насколько быстро он вращается. Измерение скорости зависит от размеров объекта и может выражаться, например, в мм/с или км/час. В настоящее время разработана глобальная система навигации (GPS), позволяющая определять скорость и положение крупных объектов, таких как наземные и морские транспортные средства, при помощи радиосигналов от большого количества спутников, вращающихся вокруг Земли. Определение скорости и положения таких объектов вычисляется по временным задержкам между сигналами, полученными от разных спутников. Для меньших объектов и меньших расстояний спутниковые системы не подходят. Здесь, как правило, применяется метод сравнения с эталонными величинами. Принцип действия таких детекторов часто основан на измерении перемещений объекта относительно некоторого эталонного объекта, который часто входит в состав самого детектора. Поэтому чувствительный элемент, реагирующий на перемещение объекта, является одним из компонентов многих датчиков скорости и ускорения. Иногда таких элементов в составе датчиков скорости и акселерометров нет, поскольку они сами преобразуют свое движение в электрические сигналы. Например, в соответствии с законом Фарадея, магнит,двигающийся в катушке индуктивности, приводит к возникновению в ней напряжения. Это напряжение пропорционально скорости движения магнита и силе поля. Линейные датчики скорости построены на этом принципе магнитной индукции. В их состав входит постоянный магнит и катушка индуктивности определенной формы. Выходное напряжение на катушке прямо пропорционально относительной скорости магнита в пределах рабочей зоны. Очевидно, что линейные датчики скорости детектируют скорость в пределах расстояния, ограниченного их размерами, поэтому они в основном используются для измерения скорости *вибрации* – динамического механического явления, заключающегося в периодических колебательных движениях вокруг заданного положения. Угловой датчик скорости, реализованный на этом же принципе, непрерывно меряет скорость вращения, и в них нет ограничений на количество оборотов.

Акселерометры считаются устройствами с одной степенью свободы. В состав всех акселерометров входят: специальный элемент, называемый *инерционной массой*, движение которого отстает от движения корпуса, упругая поддерживающая система (пружина) и демпфирующее устройство (Рис. 1). Независимо от конструкции датчика

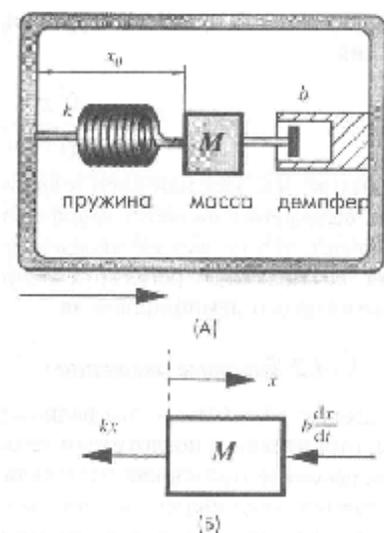


Рис. 1. Механическая модель акселерометра и диаграмма сил, действующих на тело массы

ускорений его основная цель заключается в детектировании перемещения этой массы относительно корпуса устройства и преобразовании его в пропорциональный электрический сигнал. Поэтому другой составной частью всех акселерометров является детектор перемещений, способный измерять микроскопические амплитуды вибрационных колебаний или линейных ускорений.

Емкостные акселерометры.

Емкостной метод преобразования перемещений в электрический сигнал является самым проверенным и надежным. Емкостной датчик ускорений состоит, по крайней мере, из двух пластин: стационарной, часто соединенной с корпусом, и свободно перемещающейся внутри корпуса, к которой подсоединена инерционная масса. Эти пластины формируют конденсатор, величина емкости которого зависит от расстояния между ними, а значит и от ускорения движения, испытываемого датчиком. Максимальное перемещение, определяемое емкостным акселерометром, редко превышает 20 мкм. Следовательно, в таких датчиках всегда необходимо компенсировать дрейф различных параметров, а также подавлять всевозможные помехи. Поэтому обычно акселерометры имеют дифференциальную структуру, для чего в их состав вводится дополнительный конденсатор, емкость которого должна быть близка к емкости основного конденсатора (Рис. 2). При этом напряжения на конденсаторы подаются со сдвигом фаз 180° . Тогда величина ускорения датчика будет пропорциональна разности значений емкостей конденсаторов.

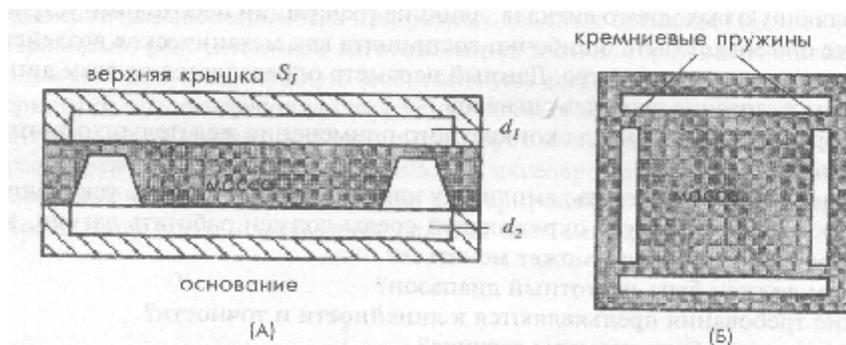


Рис. 2. Поперечное сечение (А) емкостного акселерометра с дифференциальным конденсатором и вид сверху на инерционную массу (Б), поддерживаемую пружинами

Пьезоэлектрические акселерометры.

Чувствительным элементом *пьезорезистивных акселерометров* является тензодатчик, измеряющий деформацию пьезорезистивных элементов, поддерживающих инерционную массу, путем измерения их сопротивлений, зависящих от степени деформации. Эта деформация пропорциональна величине и скорости перемещения массы, а значит и ускорению. Такие устройства могут измерять ускорения в широком частотном диапазоне: 0...13 кГц. При разработке соответствующей конструкции пьезорезистивные акселерометры выдерживают перегрузку, равную 10000g. Естественно, что интервал измерений таких датчиков гораздо уже: $\pm 1000g$ с погрешностью менее 1%. Параметр перегрузки является критическим для многих применений.

В основе *пьезоэлектрических акселерометров* лежит пьезоэлектрический эффект, заключающийся в прямом преобразовании механической энергии в электрическую в материалах, имеющих кристаллическую структуру с электрическими диполями. Для улучшения частотных характеристик пьезоэлектрический сигнал усиливается при помощи преобразователей заряд-напряжение или ток-напряжение. Эти датчики работают в широком температурном диапазоне (до $120^\circ C$) с высокой линейностью в частотном диапазоне 2 Гц \div 5 кГц.

Гироскопы

Гироскоп является самым популярным навигационным датчиком (пожалуй, он уступает первенство только компасу). Во многих ситуациях, когда геомагнитное поле либо отсутствует (как в космосе), либо по каким-либо причинам сильно нарушено, гироскоп является необходимым устройством для определения положения транспортных средств. Гироскоп в

переводе означает «хранитель направления», также как маятник в часах является «хранителем времени». Принцип действия гироскопов основан на фундаментальном законе сохранения угловых моментов: «В произвольной замкнутой системе (в которой отсутствуют внешние силы) сумма угловых моментов всех ее частей относительно любой неподвижной точки пространства всегда остается постоянной».

Роторный гироскоп. Механический гироскоп (рис. 3) состоит из массивного диска (ротора), свободно поворачивающегося вокруг основной оси вращения, которая удерживается рамкой, способной вращаться относительно одной или двух осей. Таким образом, в зависимости от количества осей вращения гироскопы имеют одну или две степени свободы. Следует отметить, что:

1. Основная ось вращения свободного гироскопа не будет менять свое пространственное положение, при отсутствии внешних сил, действующих на нее.
2. При соответствующем изготовлении крутящий момент гироскопа (его выходной сигнал) пропорционален его угловой скорости движения вокруг оси, перпендикулярной основной оси вращения.

При свободном вращении диска он всегда стремится сохранить свое осевое положение. Если платформа гироскопа вращается вокруг входной оси, у гироскопа появляется крутящий момент относительно перпендикулярной (выходной) оси, заставляющий основную ось вращения поворачиваться вокруг выходной оси. Это явление называется прецессией гироскопа. Его можно объяснить при помощи закона Ньютона для вращательного движения: *производная во времени от углового момента количества движения относительно любой заданной оси равна сумме моментов всех сил механической системы, приложенных к данной оси.* Это означает, что когда к входной оси приложен момент T и скорость ω диска поддерживается постоянной, угловой момент ротора может быть изменен только путем поворота проекции оси вращения относительно входной оси. В этом случае скорость движения оси вращения относительно выходной оси будет пропорциональна приложенному моменту:

$$T = I\omega\Omega,$$

где: Ω - угловая скорость вращения вокруг выходной оси, I - момент инерции ротора гироскопа относительно оси вращения.

Для определения направления прецессии можно воспользоваться следующим правилом: прецессия всегда имеет направление, при котором направления вращения ротора и приложенного механического момента совпадают.

Точность механических гироскопов сильно зависит от воздействия внешних нежелательных сил, вызывающих дополнительные моменты вращения, что приводит к дрейфу характеристик. Источниками возникновения этих сил являются: трение, несбалансированность ротора, магнитные поля и т.д. Для уменьшения сил трения стремятся избавиться от подвесной системы крепления, для чего ротор и управляющий двигатель иногда помещают в вязкую жидкость, обладающую высокой плотностью, например, во фторуглерод. В этом методе требуется строго контролировать температуру жидкости. К тому же такое устройство становится повышенно подверженным старению. Другой способ уменьшения трения - использование, так называемой, газовой опоры, это когда ось ротора удерживается газом под высоким давлением. В качестве газа может использоваться гелий, водород или просто воздух. Еще более интересным решением является поддержка ротора в вакууме при помощи электрического поля (речь идет об электростатических гироскопах). Существуют также магнитные гироскопы, в которых ротор удерживается магнитным полем. При изготовлении

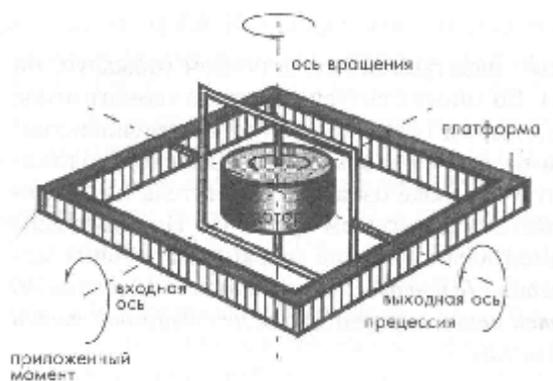


Рис. 3. Роторный гироскоп

такие устройства охлаждаются криогенным способом до температур, при которых ротор становится сверхпроводящим. После чего при помощи внешнего магнитного поля внутри ротора формируется достаточно сильное противодействующее поле, позволяющее ротору свободно вращаться в вакууме. Такие магнитные гироскопы часто называются криогенными.

Гироскопы вибрационного типа. Хотя гироскопы с вращающимся ротором в течение многих лет были практически единственными устройствами, применяемыми при построении навигационных устройств, их размеры, срок службы и стоимость в настоящее время являются сильно ограничивающим фактором. Поэтому и возникла потребность в разработке альтернативных устройств для определения направления и скорости движения объектов. Более перспективный метод построения гироскопов основан на применении микротехнологии, позволяющей реализовать миниатюрные устройства, в которых вращающийся диск меняется на вибрирующий элемент. Такой подход дает возможность использовать технологии, применяемые в электронной промышленности для налаживания серийного выпуска монолитных датчиков ускорений. В дополнение к этому гироскопы вибрационного типа имеют более прочную конструкцию и могут работать в довольно суровых окружающих условиях, поэтому они нашли широкое применение в военных и аэрокосмических приборах.

Все гироскопы вибрационного типа основаны на явлении ускорения Кориолиса. Кориолис показал, что при применении законов Ньютона к телам, перемещающимся внутри вращающейся рамки, в уравнения движения необходимо учитывать силу инерции, направленную вправо от направления движения тела, при вращении рамки против часовой стрелки, и влево - при вращении по часовой стрелке. В микрогироскопах вращение меняется на вибрацию (рис. 4), а по величине возникающего ускорения можно судить о скорости движения. В отличие от роторных гироскопов, в которых инерционная масса вращается по кругу, в вибрационных датчиках подвешенная масса движется линейно, совершая гармонические колебания.

Оптические гироскопы реализуются на основе эффекта Саньяка. Суть этого эффекта можно пояснить следующим образом (рис. 5). Два лазерных луча противоположного направления внутри вращающегося со скоростью Ω оптического кольца радиусом R проходят разные пути, что бы сделать один оборот вокруг кольца. Разница между путями Δl составляет:

$$\Delta l = \frac{4p\Omega R^2}{nc},$$

где: n – коэффициент преломления оптической среды, c – скорость света.

В оптических гироскопах для точного измерения скорости Ω путем корректного определения Δl используют три типа устройств: оптические резонаторы, интерферометры без обратной связи и интерферометры с обратной связью. Оптические гироскопы сравнительно недороги, имеют небольшие размеры и позволяют реализовывать датчики вращения с динамическим диапазоном до 10000. Оптические гироскопы используются для измерения

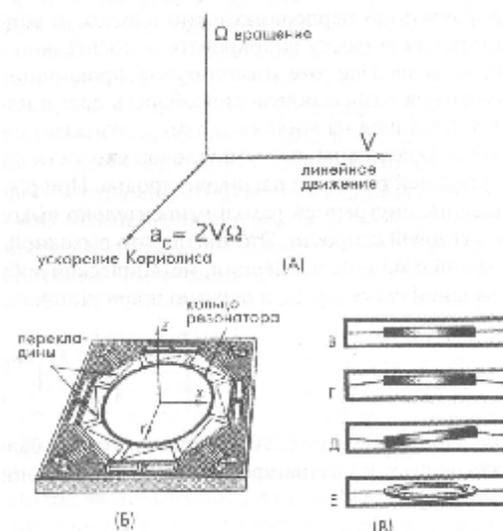


Рис. 4. А – ускорение Кориолиса, Б – микроструктура с вибрирующим кольцом, В – влияние ускорения на режимы вибрации

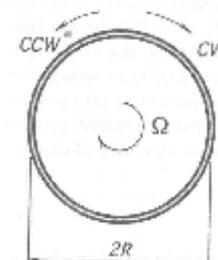


Рис. 5. Эффект Саньяка

отклонений от заданного направления движения, угла наклона, в системах стабилизации углового положения и также в системах навигации. Основным достоинством таких датчиков является их способность работать в суровых условиях окружающей среды, где не могут работать механические гироскопы.

Пьезоэлектрические кабели.

Вибрационные датчики, реализованные в виде кабелей, строятся на основе пьезоэлектрического эффекта: при сжатии внешней поверхности такого кабеля на его внутреннем проводнике появляется электрический сигнал. Пьезоэлектрические кабели используются для мониторинга вибраций лопастей компрессора в самолетных двигателях турбинного типа. Такие кабели также применяются для обнаружения насекомых в хранилищах силоса и при анализе потока транспорта на автострадах. В последнем случае пьезоэлектрические кабели монтируются в дорожное покрытие перпендикулярно движению транспорта. Эти датчики реагируют преимущественно на силы, направленные вдоль вертикальной оси.

ДАТЧИКИ СИЛЫ, МЕХАНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ПРИКОСНОВЕНИЯ

В системе СИ основными единицами считаются масса, длина и время, в то время как сила и ускорение – производными единицами. В Британской и американской системах единиц основными единицами считаются сила, длина и время. Единица измерения силы является одной из фундаментальных физических величин. Измерение сил проводится и при проведении механических исследований, и в гражданском строительстве, и при взвешивании объектов, и при изготовлении протезов и т.д. При определении давления также требуется измерение силы. Считается, что при работе с твердыми объектами измеряется сила, а при работе с жидкостями и газами определяется давление. Это значит, что сила рассматривается тогда, когда действие приложено к конкретной точке, а давление определяется тогда, когда сила распределена по сравнительно большой площади.

Датчики силы можно разделить на два класса: количественные и качественные. Количественные датчики измеряют силу и представляют ее значение в электрических единицах. Примерами таких датчиков являются динамометрические элементы и тензодатчики. Качественные датчики – это пороговые устройства, чья функция заключается не в количественном определении значения силы, а в детектировании превышения заданного уровня приложенной силы. Примером таких устройств является клавиатура компьютера, каждая клавиша которой замыкает соответствующий контакт только при нажатии на нее с определенной силой. Качественные датчики часто используются для детектирования движения и положения объектов. Коврик у двери, реагирующий на давление, приложенное к нему, и пьезоэлектрический кабель также являются примерами качественных датчиков давления.

Методы измерения силы можно разделить на следующие группы:

1. Уравновешивание неизвестной силы силой тяжести тела известной массы
2. Измерение ускорения тела известной массы, к которому приложена неизвестная сила
3. Уравновешивание неизвестной силы электромагнитной силой
4. Преобразование силы в давление жидкости и измерение этого давления
5. Измерение деформации упругого элемента системы, вызванной неизвестной силой

В современных датчиках наиболее часто применяется 5 метод, а методы 3 и 4 используются сравнительно редко.

В большинстве датчиков не происходит прямого преобразования силы в электрический сигнал. Для этого обычно требуется несколько промежуточных этапов. Поэтому, как правило, датчики силы являются составными устройствами. Например, датчик силы часто представляет собой комбинацию преобразователя сила-перемещение и детектора положения (перемещения). Это может быть простая спиральная пружина, уменьшение длины которой, вызванное приложенной силой сжатия, будет пропорционально ее коэффициенту упругости.

На рис.1А показан датчик, состоящий из пружины и детектора перемещений, реализованного на основе линейно регулируемого дифференциального трансформатора (ЛРДТ). В линейном диапазоне изменения длины пружины напряжение на выходе ЛРДТ

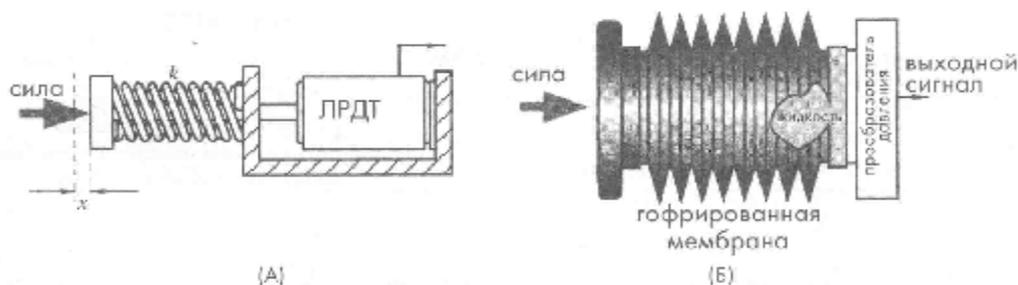


Рис. 1. Датчики силы с нагруженной пружиной и ЛРДТ (А) и на основе преобразователя давления (Б)

пропорционально приложенной силе. На рис. 1Б представлен еще один вариант датчика силы, состоящий из гофрированной мембраны, заполненной жидкостью, непосредственно на которую и действует сила, и датчика давления. Гофрированная мембрана, распределяя силу на входе по

поверхности чувствительного элемента датчика давления, играет роль преобразователя сила-давление.

Тензодатчик - это гибкий резистивный чувствительный элемент, сопротивление которого пропорционально приложенному механическому напряжению (величине деформации). Все тензодатчики построены на основе ранее упоминавшегося пьезорезистивного эффекта. Проволочный тензодатчик представляет собой резистор, наклеенный на гибкую подложку, которая в свою очередь прикрепляется на объект, где измеряется сила или напряжение. При этом должна обеспечиваться надежная механическая связь между объектом и тензочувствительным элементом, в то время как провод резистора должен быть электрически изолирован от объекта. Коэффициенты теплового расширения подложки и провода должны быть согласованы. Для получения хорошей чувствительности датчик должен иметь длинные продольные участки и короткие поперечные (рис. 2). Это делается для того, чтобы чувствительность в поперечном направлении не превышала 2% от продольной чувствительности. Для измерения напряжений в разных направлениях меняется конфигурация датчиков. Следует отметить, что полупроводниковые тензочувствительные элементы обладают довольно сильной чувствительностью к изменениям температуры, поэтому в интерфейсных схемах или в самих датчиках необходимо предусматривать цепи температурной компенсации.

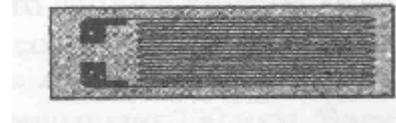


Рис. 2. Проволочный датчик напряжений на гибкой подложке

Тактильные датчики - это специальный класс преобразователей силы или давления, которые характеризуются небольшой толщиной. Эти датчики полезны в случаях, когда сила или давление измеряются между двумя поверхностями, расположенными близко друг к другу. Такие датчики часто используются в робототехнике, например, их устанавливают на «пальцы» механических приводов для обеспечения обратной связи при контакте с объектом - это напоминает то, как работают тактильные сенсоры кожи человека. Датчики касания используются в сенсорных дисплеях, клавиатурах и других устройствах, где необходимо реагировать на физическое прикосновение. Тактильные датчики широко применяются в биомедицине, для определения прикуса зубов и правильности установки коронок в стоматологической практике, а также при исследовании давления на ноги человека при ходьбе. Иногда при проведении операций протезирования их устанавливают в искусственные суставы для корректировки положения и т.д. В строительстве и на механических производствах тактильные датчики используются для определения сил, действующих на закрепленные устройства.

Для изготовления тактильных чувствительных элементов используются несколько методов. В некоторых из них на поверхности объекта формируется специальный тонкий слой из материала, чувствительного к механическим напряжениям. На рис. 3 показан простой тактильный датчик, обеспечивающий функции включения-выключения, состоящий из двух листов фольги и прокладки. Внутри прокладки сделаны круглые (или любой другой необходимой формы) отверстия. Один из листов фольги заземлен, а второй подсоединен к нагрузочному резистору. Если требуется контролировать несколько чувствительных зон, используется мультиплексор. Когда к верхнему проводнику прикладывается внешняя сила над отверстием в прокладке, он прогибается и соприкасается

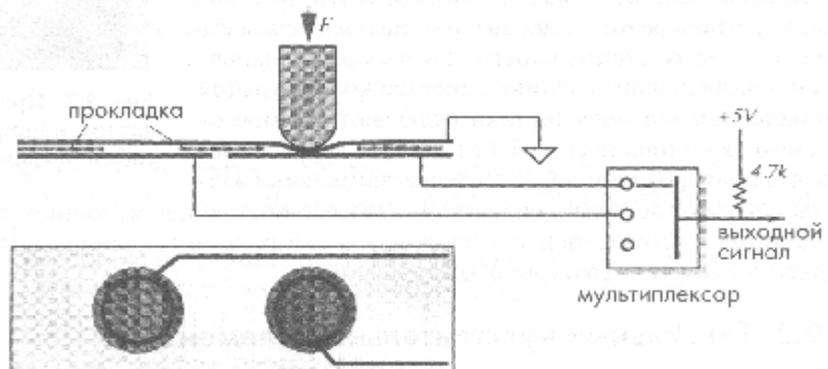


Рис.3. Тактильный элемент мембранного типа.

ется с нижним проводником, тем самым устанавливая с ним электрический контакт, заземляющий нагрузочный резистор. При этом выходной сигнал становится равным нулю, что свидетельствует о приложенной силе. Верхний и нижний проводники могут изготавливаться методом трафаретной печати проводящими чернилами на подложке. Чувствительные зоны таких датчиков определяются рядами и колонками проводников, нанесенных чернилами. Прикосновение в определенном участке чувствительной поверхности приводит к замыканию соответствующих ряда и колонки, что показывает локализацию приложенной силы. Хорошие тактильные датчики получаются на основе пьезоэлектрических пленок, которые используются как в пассивном, так и в активном режимах. Многие тактильные датчики выполняют функции сенсорных переключателей. В отличие от традиционных переключателей, надежность контактов которых сильно снижается при попадании на них влаги и пыли, пьезоэлектрические ключи, благодаря своему монолитному исполнению, могут работать в неблагоприятных условиях окружающей среды.

Другой разновидностью тактильных датчиков является *пьезорезистивный* чувствительный элемент. Он изготавливается из материалов, чье электрическое сопротивление зависит от приложенного механического напряжения или давления. К таким материалам относятся проводящие эластомеры или пасты, чувствительные изменению давления. Проводящие эластомеры изготавливаются из силиконовой резины, полиуретана и других материалов, в состав которых входят проводящие частицы или волокна. Например, проводящая резина получается при введении в обычную резину угольного порошка. Принцип действия эластомерных датчиков основан либо на изменении площади контактов при сдавливании эластомера между двумя проводящими пластинами, либо на изменении толщины эластомерного слоя. В зависимости от величины внешней силы, действующей на датчик, меняется площадь контактной зоны между прижимным устройством и эластомером, в результате чего изменяется электрическое сопротивление.

Более тонкие пьезорезистивные тактильные датчики получаются из полупроводниковых полимеров, сопротивление которых также зависит от давления. Конструкция таких датчиков напоминает мембранный переключатель. По сравнению с тензодатчиками пьезорезистивные чувствительные элементы обладают более широким динамическим диапазоном.

Пьезоэлектрические датчики силы

Рассмотренные пьезоэлектрические тактильные датчики не предназначены для проведения точных измерений силы. Однако на основе того же пьезоэлектрического эффекта можно реализовать и прецизионные датчики силы, как активные, так и пассивные. При разработке таких датчиков всегда следует помнить, что пьезоэлектрические устройства не могут измерять стационарные процессы. Это означает, что пьезоэлектрические датчики силы преобразуют изменения силы в переменный электрический сигнал, но при этом они никак не реагируют на постоянное значение внешней силы. Поскольку приложенные силы могут изменять некоторые свойства материалов, при разработке активных датчиков необходимо учитывать всестороннее влияние сигналов возбуждения. На рис. 4 показан вариант активного датчика силы. При проведении количественных измерений при помощи таких датчиков следует помнить, что его диапазон измерения зависит от частоты механического резонанса применяемого пьезоэлектрического кристалла. Принцип действия таких датчиков основан на том, что при механической нагрузке кварцевых кристаллов определенных срезов, используемых в качестве резонаторов в электронных генераторах, происходит сдвиг их резонансной частоты.



Рис. 4. Пьезоэлектрический дисковый резонатор, применяемый в диаметральной датчике силы

ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ

Понятие давления первоначально основывалось на работе Торричелли, который некоторое время был учеником Галилея. Поставив в 1643 году эксперимент с блюдцами, заполненными ртутью, он сделал вывод, что атмосфера оказывает давление на Землю. Другой великий физик Паскаль в 1647 году вместе со своим зятем Перье провели еще один опыт: они измеряли высоту ртутного столба у подножия и на вершине горы. При этом они обнаружили, что давление, действующее на столбик ртути, зависит от высоты подъема. Свой прибор, который они использовали в этом эксперименте, Паскаль назвал *барометром*. В 1660 году Роберт Бойль сформулировал закон: «Для заданной массы воздуха при известной температуре произведение давления на объем является постоянной величиной». В 1738 году Бернулли разработал теорию динамического давления газов, из которой аналитическим способом можно вывести закон Бойля. По сути Бернулли опередил закон Шарля-Гей-Люссака, сформулировав следующее утверждение: «При нагреве газа в постоянном объеме его давление увеличивается».

В общем виде, все материалы можно разделить на твердые тела и жидкие среды. Под термином жидкая среда здесь понимается все, что способно течь. Это могут быть как жидкости, так и газы, поскольку между ними не существует серьезных различий. При изменении давления жидкости превращаются в газы и наоборот. К жидким средам невозможно приложить давление ни в каком другом направлении, кроме перпендикулярного к поверхности. При любом угле кроме 90° жидкость будет просто соскальзывать или стекать. Для жидкой среды в стационарных условиях давление можно выразить через отношение силы F , действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности A :

$$p = \frac{dF}{dA} \quad (1)$$

Давление имеет механическую природу, и поэтому для его описания можно использовать основные физические величины: массу, длину и время. Хорошо известен факт, что давление сильно меняется вдоль вертикальной оси, тогда как на одинаковой высоте оно постоянно во всех направлениях. При увеличении высоты давление падает, что можно выразить следующим соотношением:

$$dp = -wdh \quad (2)$$

где w - удельный вес среды, dh - изменение высоты, а dp - соответствующее ему изменение давления.

Давление жидкой среды в замкнутом объеме не зависит от формы сосуда, поэтому при разработке датчиков давления такие параметры как форма и размеры часто бывают не очень существенными. Если на одну из сторон сосуда с жидкостью или газом действует внешнее давление, оно передается по всему объему без уменьшения его значения.

Избыточное давление - это давление газа, превышающее давление окружающей среды. В противоположном случае - речь идет о вакууме. Давление называется относительным, когда его измеряют относительно давления окружающей среды, и абсолютным - когда оно измеряется по отношению к нулевому давлению. Давление среды может быть стационарным, когда жидкая среда находится в покое, или динамическим, когда оно относится к жидкостям в движении.

В системе СИ единицей измерения давления является *паскаль*: $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$. Это значит, что давление 1 паскаль равно силе, равномерно распределенной по поверхности площадью 1 квадратный метр. Иногда в качестве технической единицы измерения давления применяется единица, называемая *атмосфера*, обозначаемая 1 атм. Одна атмосфера это давление, которое оказывает столб воды высотой 1 метр на площадку 1 квадратный сантиметр при температуре $+40^\circ\text{C}$ и нормальном гравитационном ускорении. Между единицами давления существует следующая взаимосвязь:

$$1 \text{ Па} = 9,869 \times 10^{-6} \text{ атм} = 7,5 \times 10^{-4} \text{ см ртутного столба}$$

Для грубых оценок можно запомнить еще одно соотношение: 0,1 мм воды создает давление, приблизительно равное 1 Па. В промышленности применяется другая единица

давления, называемая *торр* (это название дано в честь физика Торричелли), которая определяется как давление, создаваемое столбиком ртути высотой 1 мм при 0°C, нормальном атмосферном давлении и нормальной гравитации. Идеальное давление атмосферы Земли, равное 760 торр, называется *технической атмосферой*:

$$1 \text{ атм} = 760 \text{ торр} = 101,325 \text{ Па}.$$

В системе единиц США давление измеряется в фунтах-силы на квадратный дюйм. Эта единица там обозначается как *psi*. для перевода *psi* в единицы системы СИ можно воспользоваться соотношением:

$$1 \text{ psi} = 6,89 \times 10^3 \text{ Па} = 0,0703 \text{ атм}.$$

Принцип действия любого датчика давления заключается в преобразовании давления, испытываемого чувствительным элементом, в электрический сигнал. В конструкцию практически всех преобразователей давления входят сенсоры, обладающие известной площадью поверхности, чья деформация или перемещение, возникающие вследствие действия давления, и определяются в процессе измерений. Таким образом, многие датчики давления реализуются на основе детекторов перемещения или силы, причиной возникновения которой является тоже перемещение.

На рис.1 показан простой *ртутный датчик давления*, использующий принцип сообщающихся сосудов. Чаще всего такие датчики применяются для измерения давления газов. U-образный провод с точкой заземления в центре помещается в U-образную трубку с ртутью. Часть этого провода оказывается закороченной ртутью, в результате чего сопротивление в обеих ветвях провода всегда будет пропорционально высоте столбиков ртути. Полученные резисторы включены в схему моста Уитстона, который находится в уравновешенном состоянии пока равно нулю дифференциальное давление в трубке. Давление, приложенное к одному из концов трубки (например, левой), приводит к разбалансировке мостовой схемы и появлению на ее выходе ненулевого сигнала. Чем выше давление в левой части трубки, тем больше сопротивление соответствующего плеча и тем меньше сопротивление противоположного. Выходное напряжение пропорционально разности сопротивлений ΔR в двух плечах моста, не закороченных ртутью участков провода:

$$V_{out} = V \frac{\Delta R}{R} = Vb\Delta p \quad (3)$$

Такой датчик обычно калибруется напрямую в торрах. К сожалению, простота является практически единственным его достоинством, потому что он обладает целым рядом существенных недостатков: необходимостью прецизионного выравнивания, плохой помехозащищенностью от ударов и вибраций, большими габаритами и загрязнением газа ртутными парами. Отметим, что такой датчик может использоваться и в качестве детектора наклона, поскольку нулевой сигнал на его выходе при отсутствии внешнего давления на одно из плечей трубки свидетельствует о строго горизонтальном его расположении.

Чувствительные элементы, входящие в состав датчиков давления, являются механическими устройствами, деформирующимися под действием внешнего напряжения. Такими устройствами могут быть гофрированные и подвесные *диафрагмы*, *мембраны*, *сильфоны* и другие элементы, форма которых меняется под действием на них давления.

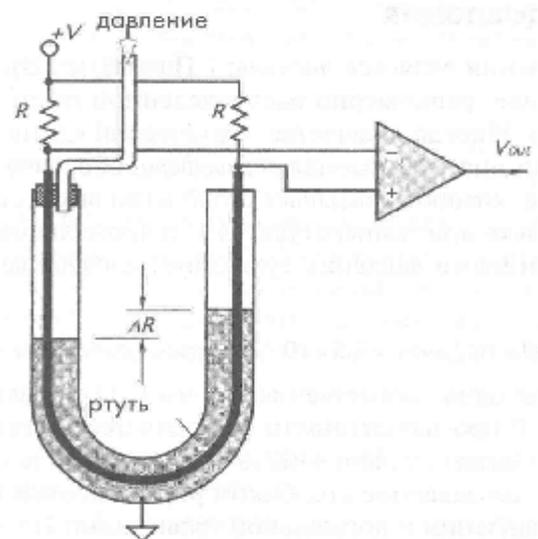


Рис. 1. Датчик давления, использующий принцип сообщающихся сосудов

На рис. 2А показан сильфон, преобразующий давление в линейное перемещение, которое может быть измерено при помощи соответствующего датчика. Таким образом, сильфон выполняет первый этап преобразований давления в электрический сигнал. Он обладает относительно большой площадью поверхности, что дает возможность получать довольно существенные перемещения даже при небольших давлениях. Жесткость цельного металлического сильфона пропорциональна модулю Юнга материала и обратно пропорциональна внешнему диаметру и количеству изгибов на нем. Жесткость сильфона также связана кубической зависимостью с толщиной его стенок.

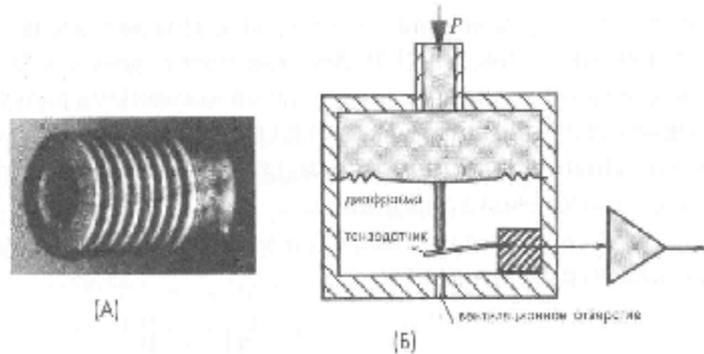


Рис. 2. А – стальной сильфон, Б - металлическая гофрированная диафрагма, применяемая для преобразования давления в линейное перемещение

На рис. 2Б показана диафрагма, применяемая в anerоидных барометрах для преобразования давления в линейное отклонение. Диафрагма, формирующая одну из стенок камеры давления, механически связана с тензодатчиком, который преобразует ее отклонения в электрический сигнал. В настоящее время большинство датчиков давления такого типа изготавливаются с кремниевыми мембранами, методами микротехнологий.

Мембрана - это тонкая диафрагма, радиальное растяжение которой S измеряется в Ньютонах на метр (рис. 3Б). Коэффициентом жесткости при изгибе здесь можно пренебречь, поскольку толщина мембраны гораздо меньше ее радиуса (по крайней мере в 200 раз). Приложенное давление к одной из сторон мембраны сферически выгибает ее. При низких значениях давления p отклонение центра мембраны z_{max} и ее механическое напряжение s_{max} являются квазилинейными функциями давления (напряжение измеряется в Н/м^2):

$$z_{max} = \frac{r^2 p}{4S}, \quad (4)$$

$$s_{max} \approx \frac{S}{g}, \quad (5)$$

где r – радиус мембраны, g – ее толщина.

При значительной толщине мембраны, когда ее отношение $r/g < 100$, речь уже идет о тонкой пластине (рис. 3А). Если такую пластину закрепить между двумя зажимными кольцами, в системе появится значительный гистерезис, вызванный силами трения между кольцами и пластиной. Поэтому пластину и поддерживающие компоненты лучше изготавливать в виде монолитной конструкции. Для пластины, также как и для мембраны, максимальное отклонение линейно связано с давлением.

В уравнениях (4)-(5) предполагается, что разрабатываемый датчик давления будет измерять отклонения мембраны или пластины. Поэтому далее необходимо выбрать метод преобразования полученного отклонения в электрический сигнал. Это можно выполнить несколькими способами, некоторые из которых будут рассмотрены ниже.

В состав датчиков давления обязательно входят два

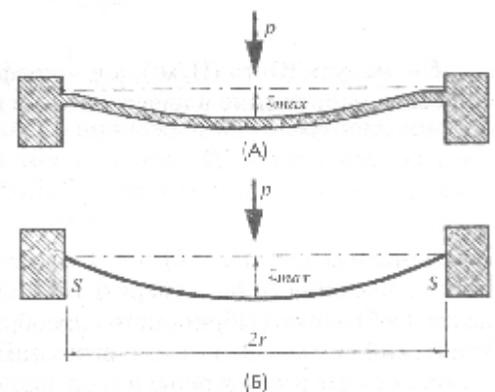


Рис.3. Деформация тонкой пластины (А) и мембраны (Б) под действием давления p

компонента: пластина (мембрана) известной площади A и детектор, выходной сигнал которого пропорционален приложенной силе F (уравнение (1)). Оба эти элемента могут быть изготовлены из кремния. Датчик давления с кремниевой диафрагмой состоит из самой диафрагмы и встроенных в нее диффузионным методом *пьезорезистивных преобразователей* в виде резисторов. Когда к полупроводниковому резистору номинала R прикладывается механическое напряжение, вследствие пьезорезистивного эффекта его сопротивление меняется на величину ΔR , что приводит к изменению выходного напряжения датчика. Поскольку монокристаллический кремний обладает очень хорошими характеристиками упругости, в таком датчике отсутствует ползучесть и гистерезис даже при высоком давлении. Коэффициент тензочувствительности кремния во много раз превышает аналогичный коэффициент тонкого металлического проводника. Обычно тензорезисторы включаются по схеме моста. Максимальное выходное напряжение таких датчиков обычно составляет несколько сот милливольт, поэтому на их выходе, как правило, ставятся усилители сигналов. Кремниевые резисторы обладают довольно сильной температурной чувствительностью, поэтому всегда при разработке датчиков на их основе необходимо предусматривать цепи температурной компенсации.

Существует несколько методов изготовления кремниевых датчиков давления. В одном из способов (рис. 4) используется подложка из кремния n -типа с ориентацией поверхности $\langle 100 \rangle$, на которой методом ионной имплантации бора формируются пьезорезисторы с поверхностной концентрацией примесей, равной 3×10^{18} в одном кубическом сантиметре. Один из них (R_1) параллелен, а другой (R_2) перпендикулярен ориентации диафрагмы $\langle 110 \rangle$. Одновременно с формированием пьезорезисторов изготавливаются и другие компоненты схемы датчика: резисторы и p - n переходы, используемые в цепях компенсации температуры, располагающиеся в сравнительно толстой зоне подложки вокруг диафрагмы. В связи с таким расположением они не реагируют на давление, действующее на диафрагму.

Другой способ изготовления диафрагм основан на методе сплавления кремния, который позволяет надежно соединять подложки из монокристаллического кремния без применения промежуточных слоев (рис. 5). Этот способ дает возможность формирования микродатчиков (более чем в восемь раз меньших обычных кремниевых датчиков давления диафрагменного типа), которые могут использоваться в преобразователях катетерного типа для проведения медицинских исследований. Такой микродатчик состоит из двух частей: верхней и нижней подложек (рис. 5А). В нижней закрепленной подложке методом анизотропного травления формируется полость по размеру диафрагмы. Толщина нижней подложки составляет 0.5 мм, а требуемая длина диафрагмы - 250 мкм, поэтому в результате анизотропного травления формируется пирамидальная полость глубиной 175 мкм. Следующий шаг заключается в соединении методом сплавления нижней подложки с верхней, состоящей из кремния p -типа с нанесенным эпитаксиальным слоем n -типа. Толщина эпитаксиального слоя соответствует заданной конечной толщине диафрагмы. После этого методом контролируемого травления удаляется часть верхней подложки, в результате чего от нее остается только тонкий слой из монокристаллического кремния, который и образует диафрагму датчика. Далее методом ионной имплантации формируются резисторы, а методом травления проделываются контактные отверстия. На последнем этапе нижняя подложка заземляется и шлифуется до получения желаемой толщины устройства - порядка 140 мкм. Несмотря на то, что размеры такого датчика более чем в половину меньше традиционного кремниевого преобразователя

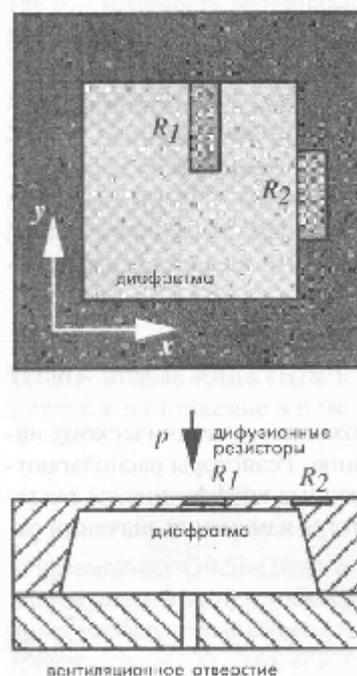


Рис. 4. Расположение пьезорезисторов на кремниевой диафрагме

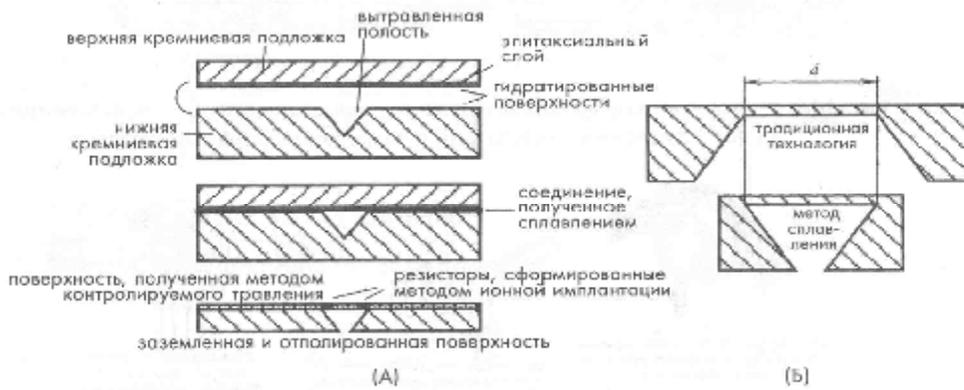


Рис. 5. Изготовление кремневой мембраны методом сплавления кремния: А – технологические этапы изготовления, Б – сравнение диафрагм различных технологий

давления, они обладают одинаковой тензочувствительностью. На рис. 9Б показано сравнение двух диафрагм, полученных по разным технологиям. При тех же самых размерах диафрагмы и толщины кристалла, устройство, полученное методом сплавления почти на 50% меньше.

Датчики давления бывают трех типов, позволяющих измерять *абсолютное, дифференциальное* и *манометрическое* давление. Абсолютное давление, например, барометрическое, измеряется относительно давления в эталонной вакуумной камере, которая может быть как встроенной (рис. 6А), так и внешней. Дифференциальное давление, например, перепад давления в дифференциальных расходомерах, измеряется при одновременной подаче давления с двух сторон диафрагмы. Манометрическое давление измеряется относительно некоторого эталонного значения. Примером может служить, измерение кровяного давления, которое проводится относительно атмосферного давления. Манометрическое давление по своей сути является разновидностью дифференциального давления. Во всех трех типах датчиков используются одинаковые конструкции диафрагм и тензодатчиков, но все они имеют разные корпуса. Например, при изготовлении дифференциального или манометрического датчика, кремниевый кристалл располагается внутри камеры, в которой формируются два отверстия с двух сторон кристалла (рис. 6Б). Для защиты устройства от вредного влияния окружающей среды внутренняя часть корпуса заполняется силиконовым гелем, который изолирует поверхность кристалла и места соединений, но позволяет давлению воздействовать на диафрагму. Корпуса дифференциальных датчиков могут иметь разную форму. В некоторых случаях при работе с горячей водой, коррозионными жидкостями и т.д. необходимо обеспечивать физическую изоляцию устройства и гидравлическую связь с корпусом датчика. Это может быть реализовано при помощи дополнительных диафрагм и сильфонов.

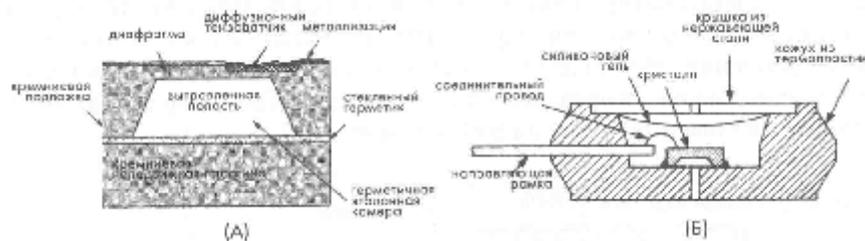


Рис. 6. Устройство корпусов датчиков: А – абсолютного, Б – относительного

Для всех кремниевых датчиков характерна зависимость их характеристик от температуры. Коэффициент температурной чувствительности таких датчиков обычно отрицательный, и для получения точных результатов его необходимо компенсировать. На практике часто достаточно бывает простой температурной компенсации, выполняемой при помощи подключения к датчику последовательного или параллельного резистора. Подбирая соответствующее значение резистора, настраивают рабочий диапазон выходного напряжения

датчика. Однако для осуществления более надежной температурной коррекции в широком диапазоне температур необходимо применение более сложных компенсационных цепей, в которых часто используются детекторы температуры. Альтернативой аппаратной коррекции температуры выступает программная. Для этого используется встроенный детектор температуры, измеряющий температуру датчика давления. Данные обоих датчиков поступают в процессорную систему, где проводится их соответствующая цифровая корректировка.

Емкостные датчики давления также реализуются на основе кремниевых диафрагм. В таких датчиках перемещение диафрагмы относительно опорной пластины меняет емкость между ними. Емкостные датчики работают наиболее эффективно при невысоких давлениях. Монолитные емкостные датчики давления, изготовленные из кремниевых кристаллов, обладают максимальной стабильностью рабочих характеристик. Перемещение диафрагмы может обеспечить 25% изменение емкости в широком диапазоне значений, что делает возможным проведение прямой оцифровки результатов измерений. В то время как для диафрагм используемых в пьезорезистивных датчиках, необходимо обеспечивать максимальное механическое напряжение на краях, для диафрагм в емкостных датчиках существенным является перемещение их центральной части. Диафрагмы в емкостных датчиках могут быть защищены от избыточного давления при помощи механических ограничителей с каждой стороны диафрагмы (для дифференциальных датчиков давления). В пьезорезистивных датчиках из-за небольших перемещений такой способ защиты, к сожалению, работает недостаточно эффективно, поэтому для них определяется давление разрыва, которое, как правило, в 10 раз превышает максимальное измеряемое давление, в то время как для емкостных преобразователей с механическими ограничителями эта величина в 100 раз больше. Это особенно важно при работе в области низких давлений, где возможны всплески высокого давления.

Для обеспечения хорошей линейности емкостных датчиков необходимо, чтобы диафрагмы обладали ровной поверхностью центральной части. Традиционно считается, что емкостные датчики обладают линейностью только тогда, когда перемещения диафрагм значительно меньше их толщины. Одним из способов улучшения линейности является использование гофрированных диафрагм, изготовленных методами микротехнологий. Планарные диафрагмы обычно обладают лучшей тензочувствительностью по сравнению с гофрированными тех же размеров и толщины. Однако при наличии в системе плоскостных растягивающих напряжений изгибы гофрированной мембран их значительно ослабляют, что приводит к существенному улучшению линейности и чувствительности таких датчиков.

При измерении низких давлений перемещение тонкой пластины или диафрагмы может быть небольшим. Фактически, оно может быть таким маленьким, что тензодатчик, прикрепленный к диафрагме или встроенный в нее, будет выдавать очень низкий выходной сигнал, недостаточный для последующей его обработки. Один из возможных способов решения этой проблемы - использование емкостного датчика, в котором отклонение диафрагмы измеряется по ее положению относительно опорной пластины, а не по напряжению внутри материала. Другим способом решения проблемы измерения очень низких давлений является применение магнитных датчиков. Датчики *переменного магнитного сопротивления* измеряют изменение магнитного сопротивления дифференциального трансформатора, вызванного перемещением магнитной диафрагмы, возникающего вследствие воздействия на нее внешнего давления. Принцип действия таких датчиков очень напоминает принцип действия магнитных детекторов приближения. На рис. 7 проиллюстрирована основная идея модуляции магнитного потока. Конструкция, состоящая из E-образного сердечника и катушки формирует магнитный поток, силовые линии которого проходят через сердечник, воздушный зазор и диафрагму. Магнитная проницаемость материала сердечника по крайней мере в 1000 раз выше проницаемости воздушного зазора, поэтому его магнитное сопротивление всегда ниже сопротивления воздуха. В связи с этим величина индуктивности всей этой конструкции определяется шириной зазора. При отклонении диафрагмы величина воздушного зазора либо увеличивается, либо уменьшается в зависимости от направления перемещения, что вызывает

модуляцию индуктивности. При возбуждении мостовой схемы высокочастотным сигналом ее выходной сигнал модулируется по амплитуде приложенным давлением. Амплитуда результирующего сигнала пропорциональна разбалансу моста, а его фаза соответствует направлению этого разбаланса. На выходе такого датчика иногда ставят демодулятор для получения не переменного, а постоянного выходного напряжения.

При измерении низких давлений или когда для повышения динамического диапазона применяются толстые мембраны, для получения заданных значений разрешения и точности величина перемещения диафрагмы может оказаться недостаточной. В дополнение к этому рабочие характеристики большинства пьезорезистивных и некоторых емкостных датчиков довольно сильно зависят от температуры, что требует использования дополнительных цепей температурной компенсации. Оптические методы измерений обладают рядом преимуществ над остальными способами детектирования давления: простотой, низкой температурной чувствительностью, высокой разрешающей способностью и высокой точностью. Особенно перспективными являются *оптоэлектронные датчики*, реализованные на основе явления интерференции света. Такие преобразователи используют принцип измерения малых перемещений Фабри-Перо. На рис. 8 показана упрощенная схема одного из таких датчиков. В состав датчика входят следующие компоненты: пассивный кристалл оптического преобразователя давления с диафрагмой, вытравленной в кремниевой подложке; светоизлучающий диод (СИД) и кристалл детектора. Детектор состоит из трех р-п фотодиодов, к двум из которых пристроены оптические фильтры Фабри-Перо, имеющие небольшую разницу по толщине. Эти фильтры представляют собой кремниевые зеркала с отражением от передней поверхности, покрытые слоем из SiO_2 , на поверхность которых нанесен тонкий слой Al . Оптический преобразователь похож на емкостной датчик давления, за исключением того, что в нем конденсатор заменен на интерферометр Фабри-Перо, используемый для измерения отклонения диафрагмы. Диафрагма, сформированная методом травления в подложке из монокристаллического кремния, покрыта тонким слоем металла. На нижнюю сторону стеклянной пластины также нанесено металлическое покрытие. Между стеклянной пластиной и кремниевой подложкой существует зазор шириной w , получаемый при помощи двух прокладок. Два слоя металла формируют интерферометр Фабри-Перо с переменным воздушным зазором w , в состав которого входят: подвижное зеркало, расположенное на мембране, меняющее свое положение при изменении давления, и параллельное ему стационарное полупрозрачное зеркало на стеклянной пластине. Поскольку величина w связана с внешним давлением линейной зависимостью, длина волны отраженного излучения меняется при изменении давления. Принцип действия датчика основан на измерении модуляции длины волны, получаемой от сложения падающих и отраженных излучений. Частота периодического интерференционного сигнала определяется шириной рабочей полости интерферометра w , а его период равен $1/2w$.

Детектор работает как демодулятор, электрический выходной сигнал которого пропорционален приложенному давлению. Он является оптическим компаратором,

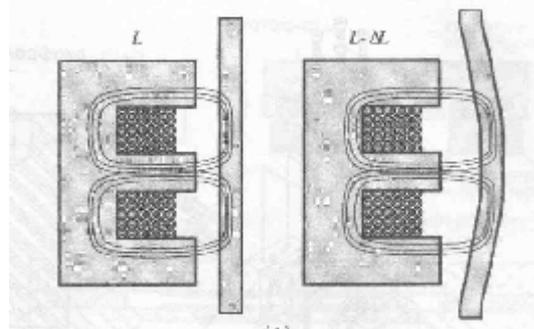


Рис. 7. Принцип действия датчика измерения давления по переменному магнитному сопротивлению

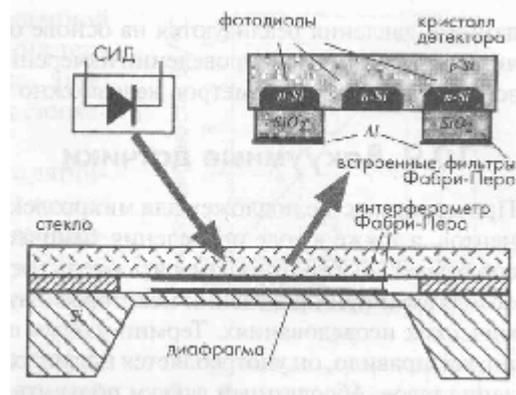


Рис. 8. Схема оптоэлектронного интерференционного датчика давления

сравнивающим высоту рабочей камеры датчика давления и толщину виртуальной камеры, сформированной за счет разности высот двух фильтров Фабри-Перо. Когда размеры этих камер равны, ток фотодетектора будет максимальным. При изменении давления происходит косинусная модуляция фототока с периодом, соответствующим половине средней длины волны источника излучения. Фотодиод без фильтра используется в качестве эталонного диода, отслеживающего полную интенсивность света, поступающего на детектор. Его выходное напряжение применяется при последующей обработке сигналов для получения нормированных результатов измерений. Поскольку рассматриваемый датчик давления является нелинейным, он обычно встраивается в микропроцессорную систему, на которую, в частности, возложены функции его линеаризации. Аналогичные оптические датчики давления реализуются на основе оптоволоконных световодов. Такие датчики незаменимы при проведении измерений в труднодоступных зонах, где использование ВЧ интерферометров невозможно.

Термин *вакуум* означает давление ниже атмосферного, но, как правило, он употребляется в случаях практического полного отсутствия давления газов. Абсолютный вакуум получить невозможно, даже в космическом пространстве нет ни одной зоны, где бы полностью отсутствовала материя.

Вакуум можно измерять и традиционными датчиками, при этом будут регистрироваться отрицательные значения давления по отношению к атмосферному, но это очень неэффективный подход. Обычные датчики давления не могут определять очень низкие концентрации газов из-за низкого отношения сигнал/шум. В отличие от традиционных датчиков давления измерители вакуума работают на совершенно других принципах, которые основываются на некоторых физических свойствах молекул газов и заключаются в определении числа молекул в заданном объеме. К таким физическим свойствам относятся теплопроводность, вязкость, ионизация и другие. В этом разделе будут даны краткие описания самых популярных датчиков давления, используемых для измерения вакуума.

Вакууметры Пирани - это датчики, измеряющие давление по теплопроводности газа. Этот тип измерителей вакуума был разработан первым. В конструкцию самого простого датчика Пирани входит нагреваемая пластина. Измерение вакуума заключается в определении количества тепла, теряемого этой пластиной, которое зависит от давления газа. В основу принципа действия вакууметра Пирани положено открытие Мариана Ван Смолчовски, который установил, что при нагревании объекта его тепловые потери формируются из следующих составляющих:

$$G = G_s + G_r + ak \frac{PP_T}{P + P_T} = G_0 + G_g$$

где G_s - теплоотдача в твердые окружающие предметы, G_r - радиационная теплопередача, a - площадь нагреваемой пластины, k - коэффициент, характеризующий свойства газа, а P_T - максимальное давление, которое можно измерить данным датчиком.

Первые два члена представляют собой паразитную теплопроводность G_0 , а третий член соответствует передаче тепла газу G_g . При отсутствии паразитных теплопотерь теплопроводность газа линейно снижается вплоть до абсолютного вакуума. Поэтому при разработке таких устройств всегда стремятся минимизировать факторы, составляющие G_0 . Для этого либо используют конструкцию с подвешенной нагреваемой пластиной для уменьшения теплового контакта с корпусом датчика, либо применяют дифференциальный метод снижения влияния G_0

Ионизационные вакуумные датчики напоминают вакуумные лампы, используемые в качестве усилителей в старых радиоприемниках. Ток ионов между пластиной и нитью накаливания почти линейно зависит от плотности молекул, т.е. давления. Лампы вакуумных датчиков имеют обратное включение: на сетку подается высокое положительное напряжение, а пластина подсоединяется к низкому отрицательному напряжению (рис. 9А). Выходным сигналом ионизационного датчика является ток ионов i_p , снимаемый с пластины, пропорциональный давлению и току электронов i_g на сетке. В настоящее время используется усовершенствованная модель этого датчика, называемая измерителем Баярда-Алперта. Он

обладает большей чувствительностью и стабильностью и может измерять более низкие давления. Его принцип действия аналогичен предыдущему датчику, но измеритель Баярда-Алперта имеет другую конструкцию, в нем пластина заменена на провод, окруженный сеткой, а нить накаливания катода вынесена наружу (рис. 9Б).

Датчик газового сопротивления.

При столкновении молекул газа с подвижным объектом, они теряют свою энергию. В этом заключена основная идея датчика с вращающимся ротором. В рассматриваемом датчике (рис. 10) маленький стальной шарик диаметром 4.5 мм при помощи магнитов удерживается в подвешенном состоянии внутри вакуумной камеры и при этом вращается с частотой 400 Гц. Магнитный момент шарика индуцирует напряжение в расположенных по бокам чувствительных катушках. Молекулы газов, сталкиваясь с шариком, замедляют его скорость вращения. По величине изменения скорости вращения судят о давлении газа в камере.

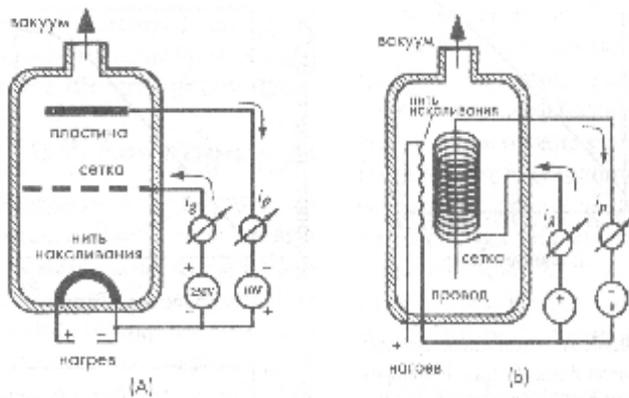


Рис. 9. Ионизационный вакуумный датчик (А) и измеритель Баярда-Алперта (Б).

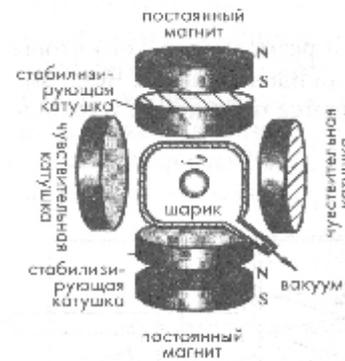


Рис. 10. Датчик газового давления

РАСХОДОМЕРЫ

На практике часто требуется измерять расход жидкостей (воды, бензина, нефти, растворителей и т.д.), а также воздуха и газов. Для этих целей используются расходомеры, основанные на законе сохранения массы, который является одним из основных постулатов физики. Масса не может ни создаваться, ни разрушаться. Если в замкнутом объеме нет никаких входных и выходных отверстий, масса вещества в нем всегда будет оставаться постоянной. Однако если на границах замкнутого объема происходит втекание и вытекание массы, для постоянства массы в объеме сумма ее прихода и расхода должна всегда быть равна нулю, т.е. должно выполняться правило: сколько массы вещества поступило, столько должно и уйти.

В стационарных потоках скорость потока в заданной точке будет всегда постоянной, поэтому в любой точке подвижной среды всегда можно нарисовать линии потока (рис. 1). Для стационарного потока распределение этих линий одинаково в любой момент времени. В любой точке z вектор скорости всегда направлен по касательной к линии потока. Рассмотрим замкнутый объем в пределах потока среды, сформированный линиями потока, и назовем его проточной трубкой. Поскольку границы такой трубки состоят из линий потока, она ведет себя как обычная трубка определенной формы: текущая среда входит в трубку на одном конце через поперечное сечение A_1 , а вытекает на другом ее конце через сечение A_2 . Очевидно, что скорость движения среды в разных точках внутри трубки необязательно будет одинаковой.



Рис. 1. Проточная трубка, поток вещества через поперечное сечение.

Объем вещества, проходящий через заданное поперечное сечение трубки площадью A в единицу времени равен:

$$\Lambda = \frac{V}{\Delta t} = \int \frac{\Delta x dA}{\Delta t} = \int v dA, \quad (1)$$

где: V – перемещаемый объем в течении времени Δt , v - скорость движущейся среды через поперечное сечение A , Δx - перемещение объема V .

На рис. 2. показано типовое распределение скоростей стационарного потока жидкости или газа внутри поперечного сечения. Средняя скорость потока в сечении A определяется следующим соотношением:

$$\bar{v} = \frac{\int v dA}{A}. \quad (2)$$

При измерении скорости потока датчиком, размеры которого существенно меньше размеров трубки, можно получить либо завышенные, либо заниженные значения скорости, а среднее значение скорости \bar{v} будет где то между ними, поэтому на практике чаще определяется не скорость потока, а расход вещества через определенное сечение.

Расход - это про изведение средней скорости потока на площадь поперечного сечения. В системе СИ он измеряется в кубических метрах в секунду ($\text{м}^3/\text{с}$). Преобразовав выражение (2), можно вывести уравнение для расхода вещества:

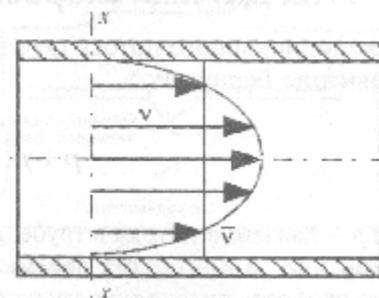


Рис. 2. Профиль скоростей потока внутри трубки

$$A\bar{v} = \int v dA. \quad (3)$$

Расходомеры обычно измеряют среднюю скорость потока \bar{v} при известной площади поперечного сечения A .

Принцип действия расходомеров, работающих с несжимаемыми средами (водой, маслом и т.д.), редко основывается на определении перемещения объемов, для этого чаще всего применяется измерение расхода массы. Для несжимаемых жидкостей справедливо следующее соотношение между их массой и объемом:

$$M = \rho V, \quad (4)$$

где ρ – плотность жидкости.

Расход массы вещества определяется соотношением:

$$\frac{dM}{dt} = \rho A \bar{v}. \quad (5)$$

Существует большое разнообразие датчиков, способных измерять скорость перемещения либо массы, либо объема. Однако независимо от типа используемого датчика определение расхода вещества всегда является сложной задачей, поскольку при этом требуется учитывать многие физические характеристики исследуемой и окружающей сред, форму труб и свойства материалов, из которых они изготовлены, температуру среды и давление и т.д. При выборе датчика всегда необходимо внимательно изучить его параметры, указанные в документации производителя, и учесть все известные практические рекомендации, относящиеся к детекторам данного типа. Далее будет дано описание датчиков, в составе которых нет подвижных компонентов, и которые не создают (или почти не создают) никаких помех потоку жидкой среды.

Датчики скорости потока по перепаду давления

Метод определения скорости потока по перепаду давлений подразумевает введение в поток жидкой среды некоторого сопротивления, которым может быть либо диафрагма, либо коническая трубка, либо пористая пробка. Для того чтобы понять суть этого метода, надо провести аналогию с законом Ома: Напряжение (давление) на фиксированном сопротивлении пропорционально току (потоку) через это сопротивление. Тогда, измерив перепад давления на известном резистивном элементе, можно определить скорость потока. На рис. 3 показаны два типа элементов, создающих сопротивление потоку. В первом случае роль сопротивления играет зауженная часть трубки, а во втором - пробка из пористого материала. Входы дифференциального датчика давления располагаются с двух сторон резистивного элемента. Когда жидкость течет через зону, оказывающую повышенное сопротивление потоку, ее скорость возрастает пропорционально увеличению этого сопротивления.

Для определения расхода массы несжимаемого вещества за единицу времени используется формула:

$$q = x A_2 \sqrt{\Delta p}, \quad (6)$$

где x - калибровочный коэффициент, Δp – перепад давления.

Поскольку коэффициент x довольно сильно зависит от температуры, калибровка должна проводиться во всем рабочем температурном диапазоне. При проведении калибровки используются жидкости и газы с известными характеристиками. Для определения перепада давлений может применяться либо один дифференциальный датчик, либо два датчика абсолютного давления. Для линеаризации выходного сигнала датчика сигнал с его выхода передается в микропроцессор, который вы-

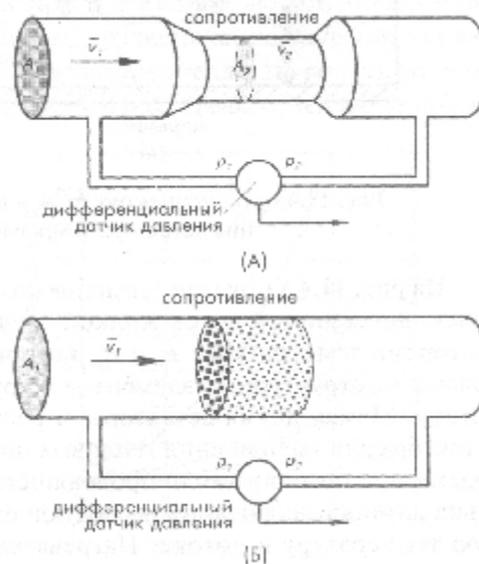


Рис. 3. Два типа элементов сопротивления потоку: узкий участок трубки (А) и пористая

Рис. 3. Два типа элементов сопротивления потоку: узкий участок трубки (А) и пористая

полняет стандартную процедуру извлечения квадратного корня. Достоинствами метода определения расхода жидкостей по перепаду давлений являются отсутствие механических компонентов и возможность использования стандартных датчиков давления, а недостатком - необходимость нарушения потока резистивными элементами.

Ультразвуковые расходомеры

Характеристики потоков могут быть определены при помощи ультразвуковых волн. Основная идея заключается в детектировании изменения частоты или сдвига фаз, вызываемых подвижной средой. Ультразвуковые датчики реализуются на основе либо эффекта Доплера, либо определения изменений эффективной скорости ультразвука в среде. Эффективная скорость звука в подвижной среде равна скорости звука в этой среде плюс скорость среды относительно источника звука. Таким образом, распространение звуковой волны против потока среды приведет к уменьшению эффективной скорости звука, а вдоль потока - к увеличению. Разность между этими двумя эффективными скоростями звука равна удвоенной скорости потока среды. Поэтому ультразвуковые датчики для определения скорости потока измеряют скорость звука вдоль и против течения.

На рис. 4А показаны два ультразвуковых генератора, расположенные на двух противоположных сторонах трубы, по которой течет поток жидкой среды. В качестве ультразвуковых генераторов, как правило, используются пьезоэлектрические кристаллы. Каждый кристалл может использоваться либо для возбуждения ультразвуковых волн, либо для их приема. Другими словами, один и тот же кристалл при необходимости работает и как «громкоговоритель», и как «микрофон».

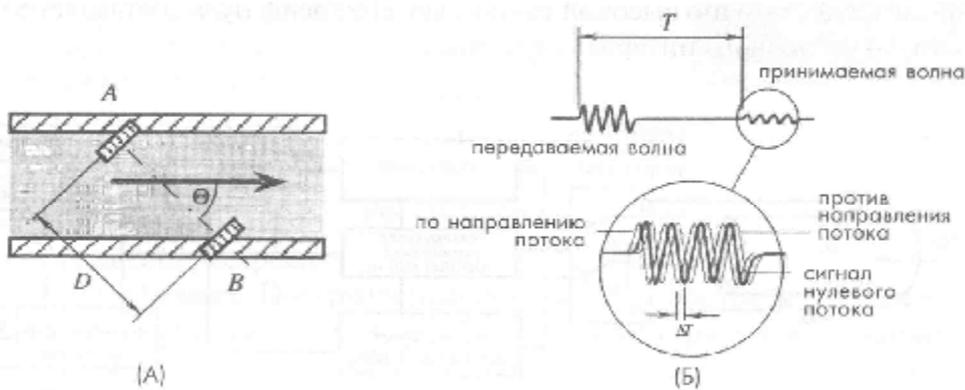


Рис. 4. Ультразвуковой расходомер. А – положение приемно-передающих кристаллов в потоке, Б – форма звуковых волн.

Кристаллы расположены на расстоянии D друг от друга под углом θ по отношению к направлению потока. Также возможно располагать небольшие кристаллы прямо внутри трубы строго по направлению потока ($\theta = 0$). Время распространения звука между двумя кристаллами А и В связано со средней скоростью потока v_c следующим соотношением:

$$T = \frac{D}{c \pm v_c \cos^2 \theta}, \quad (7)$$

где c - скорость звука в среде. Знак \pm означает направление распространения звука: вдоль потока или против него.

Для улучшения отношения сигнал/шум время распространения ультразвукового сигнала часто измеряется в двух направлениях, при этом оба пьезоэлектрических кристалла работают попеременно то приемниками, то передатчиками. Это можно реализовать при помощи переключательного устройства, который работает со сравнительно низкой частотой.

В доплеровских расходомерах используется непрерывное излучение ультразвуковых волн. На рис. 5 показан расходомер, в котором излучатель и приемник расположены внутри потока. Также как и в доплеровском радиоприемнике здесь происходит сложение частот излученного и принятого сигналов. для этого в схему включен нелинейный элемент - смеситель. Полосовой

фильтр служит для ослабления ненужных гармоник выходного низкочастотного сигнала. Частота выходного сигнала определяется выражением:

$$\Delta f = f_s - f_r \approx \pm \frac{2f_s v}{c}, \quad (8)$$

где f_s и f_r - частоты излучающего и принимающего кристаллов, а знак \pm относится к разным направлениям потока.

Из выражения (8) видно, что разность частот прямо пропорциональна скорости потока. Очевидно, что размеры кристаллов должны быть гораздо меньше поперечного сечения трубы, в которой измеряется скорость потока. Поэтому измеренная скорость является не средней, а локальной скоростью потока. На практике всегда требуется калибровать ультразвуковые датчики во всем температурном диапазоне для каждой конкретной среды и также требуется учитывать вязкость исследуемой жидкости. Ультразвуковые пьезоэлектрические преобразователи изготавливаются в виде небольших керамических дисков, встроенных в корпус расходомера. Поверхность кристалла покрывается защитным материалом (например, силиконовой резиной). Достоинство ультразвукового датчика заключается в его способности измерять поток без прямого контакта с жидкостью.

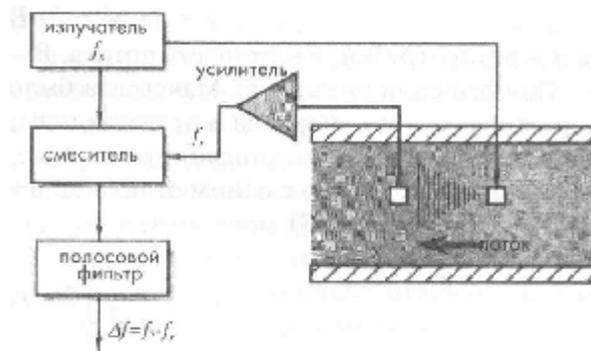


Рис. 5. Ультразвуковой доплеровский расходомер

Кориолисовские расходомеры

Расходомеры этого типа определяют массовый расход напрямую, а не через измерения скорости или объема. Кориолисовские расходомеры не зависят ни от давления жидкости, ни от ее температуры, ни от ее вязкости и плотности. Поэтому такие датчики не требуют проведения повторных калибровок и подстройки под каждый конкретный тип жидкой среды. Хотя первые расходомеры работали только с жидкостями, в настоящее время они адаптированы и для работы с газами.

Свое название такие расходомеры получили в честь французского физика Кориолса. Типовой кориолисовский измеритель состоит из одной или двух вибрирующих трубок, обычно изготовленных из нержавеющей стали. Для получения точных результатов измерений важно защищать трубки и места их креплений от механического и химического воздействия потока жидкости. Чаще всего трубки имеют U-образную форму (Рис. 6), хотя в принципе они могут быть и другого вида. Для газов применяются более тонкие трубки, чем для жидкостей. Трубки начинают вибрировать от воздействия на них внешнего электромеханического задающего устройства.

Жидкость (или газ) поступают в измеритель через впускное отверстие. Расход массы определяется по действию жидкости на вибрирующие трубки. При движении жидкости от входа к выходу, на нее действует вибрационное ускорение, все время меняющее свое направление. По-

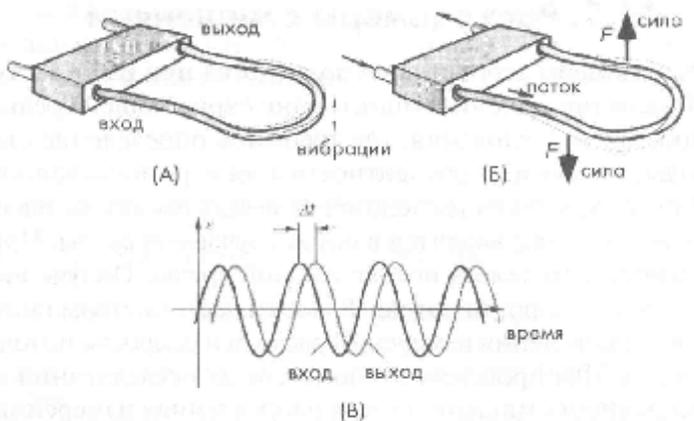


Рис. 6. Кориолисовская трубка при отсутствии в ней потока (А), изгиб трубки при потоке (Б), сдвиг фазы колебаний, вызванный силами Кориолиса (В).

сколько потоки жидкости в двух ветвях трубки имеют противоположные направления, то и возникающие там силы Кориолиса также будут направлены в разные стороны. В результате чего под действием результирующей силы две части трубки смещаются друг относительно друга в соответствии с циклом вибраций.

Величина силы Кориолиса, индуцированная потоком, определяется следующим выражением:

$$F = 2m\omega v \quad (9)$$

где m - масса, ω - круговая частота вибраций, v - вектор средней скорости жидкости.

Следовательно, величина изгиба трубки прямо пропорциональна массовому расходу через трубку. На рис. 6А показана трубка кориолисовского измерителя при отсутствии потока, а на рис. 6Б - при протекании через трубку потока жидкости или газа.

При отсутствии в трубке потока ее вибрации на входе и выходе совпадают, т.е. между ними нет никакого сдвига фаз. При появлении потока трубка изгибается пропорционально величине массового расхода, поэтому между вибрациями ее входной и выходной ветвей появляется фазовый сдвиг (рис. 6В). Основным недостатком измерителей Кориолиса является их сравнительно высокая стоимость. Однако их универсальность при работе с разными типами сред позволяет применять их при измерении расходов самых разнообразных жидкостей и газов.

Расходомеры с мишенями

Расходомеры этого типа используются при работе с турбулентными потоками. Их области применения: мониторинг окружающей среды, метеорология, гидрология, морские исследования, где требуется определение скорости потоков воздуха или воды, а также их турбулентности в зоне, расположенной рядом с поверхностью. В структуру таких расходомеров всегда входит твердое тело, часто называемое *мишенью*, которое вводится в поток изучаемой среды. При этом измеряется сила, действующая на тело в потоке жидкой среды. Полученное значение преобразуется в величину скорости потока. Важным достоинством таких датчиков является возможность проведения измерений расхода и скорости потока в двух, а то и в трех направлениях. Для проведения многомерных исследований необходимо обеспечить симметричность мишени во всех направлениях измерений. Уже почти в течение полувека такие многомерные расходомеры используются в промышленности, в коммунальной сфере, в аэрокосмических и других исследовательских лабораториях для измерения расхода однонаправленных и двунаправленных потоков жидкостей (включая криогенные), газов, паров (как насыщенных, так и перегретых).

Принцип действия таких датчиков основан на измерении механического напряжения эластичного резинового троса, вызванного силой, приложенной к мишени, прикрепленной к нему (рис. 7). Измерения механического напряжения можно выполнять при помощи тензодатчиков, но при этом им надо обеспечить физическую защиту от влияния жидкой среды.

Сила, действующая на мишень в потоке несжимаемой жидкости, определяется выражением:

$$F_D = C_D \rho A V^2, \quad (10)$$

где ρ - плотность жидкости, V - скорость потока в точке измерения, A - площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную потоку, C_D - коэффициент уноса, являющийся безразмерным коэффициентом, величина которого зависит в основном от формы тела и его ориентации относительно направления потока.

Идеальной мишенью является плоский диск, поскольку величина расхода не влияет на его коэффициент уноса. Для сферической симметричной мишени коэффициент уноса зависит от скорости потока, поэтому при использовании такой мишени датчик необходимо калибровать и оптимизировать для каждого конкретного случая применения.

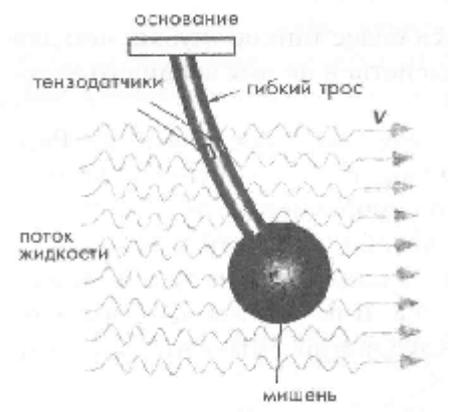


Рис. 7. Расходомер с мишенью.

АКУСТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

Датчики, работающие в слышимом диапазоне, обычно называются *микрофонами*. Однако это название может употребляться и для детекторов ультразвуковых и инфразвуковых волн. По существу, микрофон является датчиком давления, приспособленным для преобразования звуковых волн в широком спектральном диапазоне, из которого обычно исключены очень низкие частоты (ниже нескольких герц). Микрофоны обычно характеризуются: чувствительностью, направленностью, полосой частот, динамическим диапазоном, размерами, стоимостью и т.д. Для работы в разных средах используются различные конструкции акустических датчиков. Например, для детектирования волн в воздухе или вибраций в твердых телах применяются микрофоны, а для работы в жидкой среде - гидрофоны (приставка «гидра» произошла от греческого названия мифологической водяной змеи Гидры). Основное отличие между обычным датчиком давления и акустическим преобразователем заключается в том, что последнему не приходится измерять постоянное или очень медленно меняющееся давление. Его рабочий частотный диапазон начинается с нескольких герц (иногда с десятков миллигерц), а заканчивается в районе нескольких мегагерц для ультразвуковых датчиков, и даже нескольких гигагерц для устройств, реализованных на поверхностных акустических волнах (ПАВ).

Поскольку акустические волны являются механическими волнами, любой микрофон или гидрофон имеет ту же основную структуру, что и датчик давления: в его состав входит диафрагма и преобразователь перемещений, преобразующий отклонение диафрагмы в электрический сигнал. Поэтому все акустические преобразователи отличаются только конструкцией этих двух компонентов. Хотя некоторые из них могут также включать дополнительные компоненты, такие как звукопоглотители, фокусирующие отражатели или линзы и т.д.

Электростатические микрофоны

Такие устройства иногда называются конденсаторными или емкостными микрофонами. Напряжение на параллельных пластинах конденсатора определяется выражением:

$$V = q \frac{d}{\epsilon_0 A}, \quad (1)$$

где q - заряд на пластинах конденсатора, d - расстояние между пластинами, A - площадь пластин, ϵ_0 - электрическая постоянная.

Таким образом, электростатический микрофон преобразует расстояние между пластинами в электрический сигнал, который усиливается последующими электронными цепями. Очевидно, что для работы такого устройства необходим источник электрического заряда q , от величины которого зависит чувствительность микрофона. Заряд может быть получен либо от внешнего источника питания, вырабатывающего напряжение в диапазоне 20...200 В, либо от внутреннего источника, способного выдавать аналогичный заряд, для чего в подложке микродатчика формируется электретный слой, представляющий собой поляризованный диэлектрический кристалл.

В настоящее время многие емкостные микрофоны реализуются на основе кремниевых диафрагм, которые преобразуют акустическое давление в перемещение и выполняют функцию подвижной пластины конденсатора. Для повышения чувствительности датчиков напряжение смещения должно быть максимально возможным; поскольку чем выше напряжение, тем больше отклонение диафрагмы. Однако это может привести к снижению динамического диапазона и надежности устройства. Также следует отметить, что уменьшение воздушного зазора между диафрагмой и подложкой ведет к увеличению акустического сопротивления в этом зазоре, что вызывает снижение механической чувствительности микрофона на высоких частотах. Например, при воздушном зазоре 2 мкм верхняя частота среза составляет 2 кГц.

Одним из способов улучшения характеристик емкостного микрофона является применение механической обратной связи между выходом усилителя и диафрагмой. На рис. 1А показана схема такого микрофона, а на рис. 1Б - его гребенчатые электроды. Один из электродов служит для преобразования перемещения диафрагмы в напряжение на входе усилителя A_1 , а другой - для преобразования напряжения V_a в механическое отклонение диафрагмы за счет действия электростатических сил. Механическая обратная связь улучшает линейность и частотный диапазон микрофона, но при этом значительно снижает отклонение мембраны, что

приводит к уменьшению чувствительности.

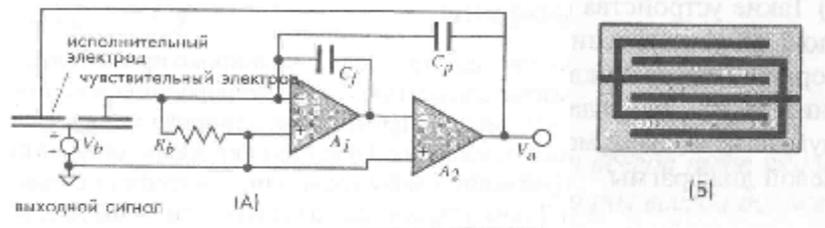


Рис. 1. Емкостной микрофон с механической обратной связью.

Опволоконные микрофоны

При проведении прямых акустических измерений в условиях агрессивной окружающей среды, например, в турбореактивных или ракетных двигателях, требуются датчики, способные выдерживать высокие температуры нагрева и сильные вибрации. Данные результатов измерений, проведенных в таких неблагоприятных условиях, необходимы для гидродинамических расчетов, акустического тестирования конструкций и определения уровня шума двигателей. Для этих целей наилучшим образом подходят опволоконные интерферометрические микрофоны. На рис. 2 приведен пример одного из таких устройств, состоящего из одномодового интерферометра Майкельсона и плоской отражающей диафрагмы. Интерферометр отслеживает отклонения диафрагмы, которые напрямую связаны с величиной акустического давления. Датчик все время охлаждается водой для обеспечения защиты от перегрева оптических материалов и для стабилизации механических свойств диафрагмы.

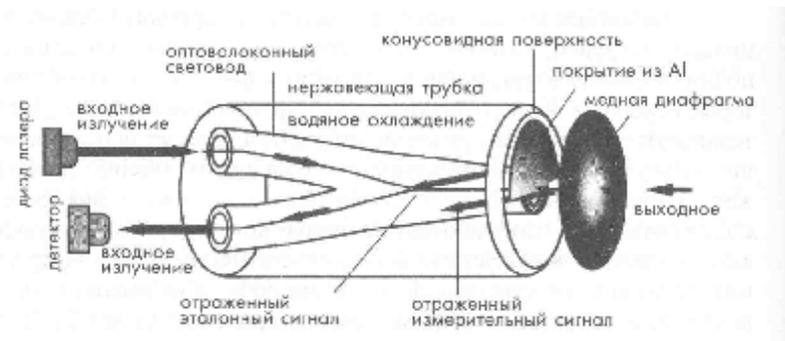


Рис. 2. Опволоконный интерферометрический микрофон.

Для получения интерференции между падающими и отраженными лучами света два световода соединяются вместе методом сплавления и на небольшом участке разъединяются, образуя клин. Световоды помещены в трубку из нержавеющей стали, охлаждаемую водой. Внутреннее пространство трубки заполняется эпоксидной смолой, а конец трубки тщательно полируется так, чтобы были видны оптоволоконна. На часть другого конца трубки (тот, на котором световоды соединены вместе) наносится слой алюминия, формирующий отражающее зеркало. Открытая половина световода является чувствительной частью микрофона, а закрытая - эталонной. Такой датчик обладает очень низкой температурной чувствительностью, что достигается близким расположением друг другу чувствительной и эталонной частей конструкции.

Излучение лазера (лазерного диода, работающего на длине волны 1.3 мкм) попадает в один из световодов и проходит через место соединения с другим оптоволоконком на конец трубки. Часть излучения отражается от алюминиевого зеркала, а часть выходит за пределы световода и частично отражается от диафрагмы. Часть отраженного излучения, попавшего в выходной световод, доходит до поверхности детектора. В зависимости от положения диафрагмы будет меняться фазовый сдвиг между сигналами, отраженными от алюминиевого зеркала и медной диафрагмы.

На пути к детектору эти две отраженных волны интерферируют друг с другом, что приводит к модуляции интенсивности света, поступающего на детектор. Таким образом микрофон преобразует перемещение диафрагмы в интенсивность света. Теоретически, коэффициент сигнал/шум такого датчика составляет порядка 70-80 дБ, что позволяет детектировать перемещение диафрагмы, равное 1 \AA (10^{-10} м).

На рис.3 показана типовая зависимость оптической интенсивности детектора от фазы интерференционного сигнала. Для получения линейной передаточной функции рабочую точку необходимо выбирать вблизи середины интервала интенсивности, где наблюдается максимальная чувствительность и наилучшая линейность. Положение рабочей точки и величина наклона регулируются при помощи подстройки длины волны лазерного диода. Для сохранения пропорциональности датчика необходимо, чтобы отклонение диафрагмы не превышало четверти рабочей длины волны.



Рис. 3. Зависимость интенсивности излучения от фазы отраженного сигнала.

Диафрагма диаметром 1.25 мм изготавливается из медной фольги толщиной 0.05 мм. Использование меди обусловлено ее хорошей теплопроводностью и сравнительно низким коэффициентом упругости. Небольшой модуль упругости позволяет изготавливать более толстые диафрагмы, обеспечивающие лучшую теплоотдачу при сохранении таких же собственных частот и отклонений. Давление 1.4 кПа приводит к отклонению центральной части диафрагмы на 39 нм, что гораздо меньше четверти рабочей длины волны (1300 нм). Максимальная частота, которая может быть принята оптическим микрофоном, ограничена 100 кГц, что намного превышает требуемый рабочий диапазон при проведении акустического тестирования конструкций.

Пьезоэлектрические микрофоны

Для разработки простых микрофонов может использоваться пьезоэлектрический эффект. Пьезоэлектрический кристалл является прямым преобразователем механического напряжения в электрический заряд. Наиболее часто используемым материалом для изготовления датчиков является пьезоэлектрическая керамика, которая может работать на очень высоких частотах. По этой причине пьезоэлектрические датчики применяются для преобразования ультразвуковых волн. Такие датчики также используются и в звуковом диапазоне, пьезоэлектрические микрофоны часто можно встретить в разнообразной аудиоаппаратуре. Примерами применения пьезоэлектрических акустических датчиков являются управляемые голосом устройства. На рис.

4 показана схема простого микрофона, подходящего для этих случаев. Он состоит из пьезоэлектрического керамического диска с двумя электродами, нанесенными на него с двух сторон. Электроды соединяются с проводами либо при помощи токопроводящей эпоксидной смолы, либо методом пайки. Поскольку такие микрофоны обладают очень высоким выходным импедансом, они должны подключаться к усилителю с высоким входным импедансом.



Рис. 4. Пьезоэлектрический микрофон.

Пьезоэлектрические пленки из поливинилидена фторида (PVDF) и сополимеров использовались в течение многих лет для производства звукоснимателей для музыкальных инструментов. Одним из первых применений пьезопленок был звукосниматель для скрипки. Позже появились звукозвукосниматели для акустических гитар. Пьезоэлектрические звукосниматели обладают очень высоким качеством воспроизведения, что послужило тому, что на их базе были разработаны датчики вибраций и акселерометры. Поскольку PVDF имеет очень низкую добротность, у таких преобразователей нет авторезонанса, как у керамических звукоснимателей.

Электретные микрофоны

Электретные материалы являются близкими родственниками пьезо- и пироэлектриков. На самом деле все они являются электретными материалами с ярко выраженными либо пьезоэлектрическими, либо пироэлектрическими свойствами. Электрет- это диэлектрический

материал кристаллической структуры с постоянной электрической поляризацией. Первое описание применения электретных материалов для изготовления микрофонов и наушников дано в 1928 году. Электретные микрофоны - это электростатические преобразователи, состоящие из металлизированной электретной диафрагмы и металлической пластины, отделенных друг от друга воздушным зазором (рис. 5).

Верхний слой металлизации и металлическая пластина соединены друг с другом через резистор R . Напряжение на этом резисторе усиливается и используется в качестве выходного сигнала микрофона. Поскольку электрет является электрически поляризованным диэлектриком, плотность заряда на его поверхности σ_1 является постоянной величиной. Этот заряд приводит к формированию в воздушном зазоре электрического поля E_1 . Когда акустическая волна ударяется о диафрагму, она отклоняется вниз, уменьшая воздушный зазор s_1 на величину Δs . Отклонение диафрагмы приводит к появлению на электродах напряжения:



Рис. 5. Структура электретного микрофона.

$$V = \frac{s\Delta s}{e_0(s + es_1)}. \quad (2)$$

Фазы изменения напряжения и отклонения диафрагмы совпадают.

Электретные микрофоны отличаются от других аналогичных устройств тем, что им для работы не требуется дополнительного источника постоянного напряжения. Тогда как при таких же размерах и чувствительности на емкостной микрофон необходимо подавать напряжение выше 100 В. Механическое напряжение диафрагмы обычно довольно маленькое (около 10 Н/м), поэтому возвратная сила определяется, в основном, сжимаемостью воздушного зазора. Для изготовления диафрагмы иногда используют Teflon. Температурная чувствительность электретных микрофонов составляет порядка 0.03 дБ/°С в диапазоне температур -10...+50 °С.

Электретные микрофоны обладают рядом достоинств: они могут работать в широком частотном диапазоне от 10^{-3} Гц до сотен МГц, у них плоская частотная характеристика (в пределах ± 1 дБ), они обладают: низким уровнем нелинейных искажений, высокой виброустойчивостью, хорошей реакцией на импульсное возмущение и нечувствительностью к магнитным полям. Чувствительность электретных микрофонов составляет порядка нескольких мВ/мкбар.

Для работы в инфразвуковом диапазоне в металлической пластине электретных микрофонов прорезаются отверстия для выравнивания давления. Также здесь часто требуется подача дополнительного напряжения смещения (как в емкостном микрофоне) для усиления поляризации.

Твердотельные акустические детекторы

В настоящее время использование акустических датчиков шире, чем просто детектирование звука. Наибольшей популярностью сейчас пользуются микровесы и устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ), реализованные на принципе детектирования механических вибраций в твердых телах. Такие датчики используются для измерения перемещений, концентраций компонентов, механического напряжения, силы, температуры и т.д. Твердотельные детекторы часто входят в состав более сложных датчиков, например, химических анализаторов, акселерометров, датчиков давления и т.д. В химических и биологических датчиках акустические каналы, по которым распространяются механические волны, иногда покрываются специальными составами, вступающими в реакцию только с исследуемым веществом.

Генераторы (обычно пьезоэлектрические) заставляют атомы твердых тел совершать вибрационные движения вокруг положения равновесия. Соседние атомы, за счет действия восстанавливающих сил, стремятся вернуть смещающиеся атомы в их исходное положение. В аку-

стических датчиках внешние воздействия влияют на такие параметры распространяющихся волн, как фазовая скорость и/или коэффициент ослабления. Например, механические напряжения в теле акустических датчиков изменяют скорость распространения в них звука. В других датчиках, называемых гравиметрическими, сорбция молекул или прикрепление к ним бактерий ведет к уменьшению скорости акустической волны. А в акустических датчиках вязкости при контакте вязкой жидкости с активной зоной детектора упругих волн происходит уменьшение амплитуды этих волн.

Существует несколько конфигураций акустических твердотельных датчиков, различающихся по типу распространения волн в материале. На рис. 6 показаны схемы двух вариантов датчиков: на основе волны изгиба (А) и на основе ПАВ (Б).

В первом случае за счет напряжения, приложенного к левой паре электродов, происходит изгибная деформация очень тонкой мембраны. Вертикальное отклонение мембраны преобразуется в электрический сигнал, снимаемый с правой пары электродов. Как правило, толщина мембраны значительно меньше длины волны колебаний. Во втором случае акустические волны формируются на поверхности относительно толстой подложки. В обоих случаях пространство между парами электродов является чувствительной зоной датчиков, реагирующей на внешние воздействия, такие как давление, вязкость жидкости, молекулы газа и микроскопические частицы.

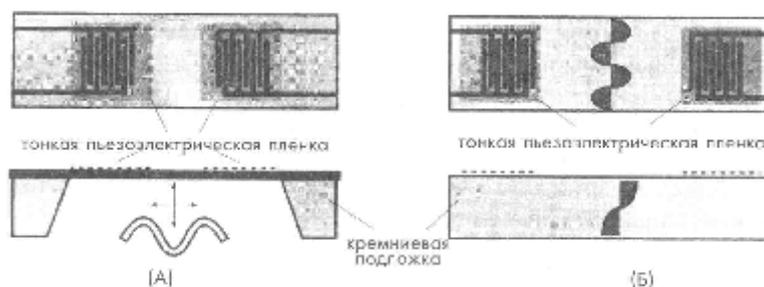


Рис. 6. Твердотельные акустические датчики мембранного типа (А) и на ПАВ (Б).

При проектировании твердотельных акустических датчиков необходимо корректно согласовывать электронную часть схемы с механической структурой, где распространяются волны. Такие датчики чаще всего реализуются на основе пьезоэлектрического эффекта. Этот эффект носит обратимый характер. Это означает, что существует в двух направлениях: механическое напряжение индуцирует электрические заряды, а приложенное электрическое поле вызывает напряжение в пьезоэлектрических кристаллах. В состав твердотельных акустических датчиков обычно входят два пьезоэлектрических преобразователя: один на передающем конце для возбуждения акустических волн, другой на принимающем для преобразования акустических волн в электрические сигналы.

Сила пьезоэлектрического эффекта в твердотельных акустических датчиках зависит от конфигурации электродов. В датчиках на ПАВ используются гребенчатые электроды, а в преобразователях, работающих на объемных акустических волнах, проходящих через все поперечное сечение устройства, - электроды достаточно большой площади, расположенные на противоположных сторонах детектора.

ПАВ-сенсоры входят в состав многих приборов, например, они используются в генераторах в качестве времязадающих устройств. Поскольку на распространение акустических волн оказывают влияние много внешних и внутренних факторов, полученные результаты измерений (изменения частоты выходного сигнала) могут быть неоднозначными и обладать большими погрешностями. Для решения этой проблемы применяют дифференциальные датчики, построенные на основе двух идентичных ПАВ преобразователей: один из которых является эталонным, а другой - чувствительным устройством, реагирующим на изменения внешних воздействий. Эталонный преобразователь экранируется от внешних сигналов, но подвергается воздействию таких общих факторов, как температура, старение и т.д. Частота выходного сигнала, равная разности частот двух ПАВ преобразователей, определяется только измеряемым сигналом и не зависит от влияния других посторонних факторов.

ДЕТЕКТОРЫ СВЕТОВЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

На рисунке 1 показан спектр электромагнитных волн. Детекторы электромагнитных волн, лежащих в спектральном диапазоне от ультрафиолетового до дальнего ИК излучений, называются световыми детекторами. С точки зрения разработчика датчиков поглощение фотонов чувствительным материалом приводит либо к повышению его температуры, либо к появлению новых квантовых частиц. Поэтому все детекторы световых излучений можно разделить на две группы: *квантовые* и *тепловые* преобразователи. Квантовые детекторы работают в интервале от УФ до среднего ИК диапазонов, в то время как тепловые датчики чаще используются в диапазонах среднего и дальнего ИК излучений, где их эффективность при комнатных температурах намного превышает эффективность квантовых преобразователей.

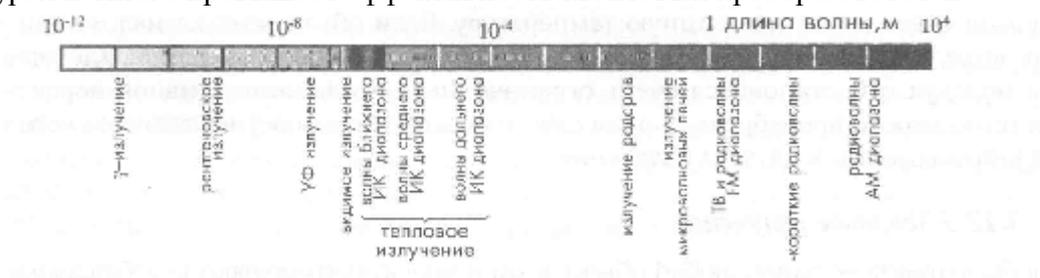


Рис. 1. Спектр электромагнитного излучения

Квантовые детекторы

В основе практически всех твердотельных квантовых детекторов (фотовольтаических и фотопроводящих) лежит квантовая теория излучения, базирующаяся на взаимодействии отдельных фотонов с кристаллической решеткой полупроводниковых материалов. Их принцип действия основан на явлении фотоэффекта, открытом А. Эйнштейном, за которое он получил Нобелевскую Премию. В 1905 году он предположил, что свет имеет квантовую природу, т.е. он состоит из потока элементарных частиц, каждая из которых обладает в заданных условиях определенной энергией. Эти частицы в дальнейшем были названы фотонами. Энергия одного фотона определяется следующим выражением:

$$E = h\nu, \quad (1)$$

где ν - частота света, а $h = 6.626075 \cdot 10^{-34}$ Дж•С - постоянная Планка, выведенная на основе волновой теории света.

Столкновение фотона с поверхностью проводника может привести к образованию свободного электрона. Часть энергии фотона ϕ используется на то, чтобы оторвать этот электрон с поверхности, а другая часть отдается электрону в виде кинетической энергии K_m . Фотоэлектрический эффект можно выразить в виде:

$$h\nu = \phi + K_m, \quad (2)$$

где ϕ называется рабочей функцией испускающей поверхности, а K_m - максимальной кинетической энергией электрона после его отрыва от поверхности.

Аналогичные процессы происходят, когда полупроводниковый p-n переход подвергается воздействию светового излучения: фотон передает свою энергию электрону, и если эта энергия достаточно большая, электрон становится свободным, что означает появление электрического поля.

Периодическая решетка кристаллических материалов определяет значения разрешенных зон энергий для электронов, находящихся внутри твердого тел. Энергия любого электрона лежит в пределах одной из разрешенных зон, которые отделены друг от друга интервалами запрещенных значений энергии (запрещенными зонами).

Если излучение определенной длины волны (с достаточно высокой энергией фотонов) падает на поверхность полупроводникового кристалла, концентрация заряженных частиц (электронов и дырок) в нем увеличивается, т.е. возрастает его удельная проводимость.

На рис. 2 показаны зоны энергий в полупроводниковом материале. Нижняя зона называется *валентной зоной*, которая соответствует электронам, связанным с кристаллической решеткой материала. В случае кремния или германия эти электроны участвуют в формировании ковалентных связей, обуславливающих внутриатомные связи внутри кристалла. Самый верхний слой называется *зоной проводимости*. Эта зона соответствует электронам, свободно перемещающимся по кристаллу. Электроны с такими энергиями участвуют в обеспечении электропроводности материала. Между этими зонами лежит *зона запрещенных энергий*, ширина которой определяется типом материала: либо полупроводника, либо диэлектрика. Количество электронов внутри кристалла соответствует полному заполнению всех возможных мест в валентной зоне. При отсутствии теплового возбуждения и у полупроводников, и у диэлектриков валентная зона является полностью заполненной, а зона проводимости - полностью пустой. В таких воображаемых условиях ни один из этих материалов не будет обладать электропроводностью.

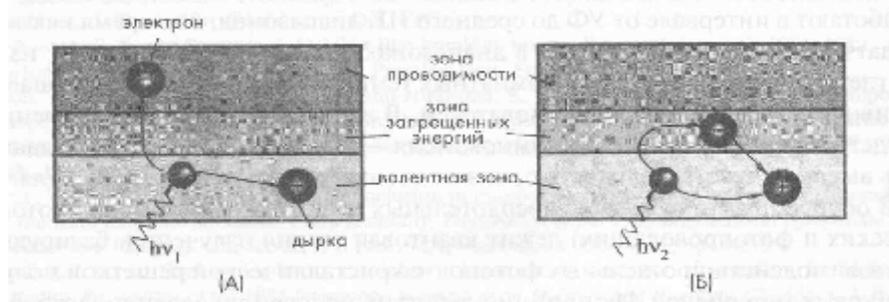


Рис. 2. Фотоэффект в полупроводниках с участием фотонов с высокой энергией (А) и низкой энергией (Б)

В металлах энергетические уровни в зоне проводимости являются не полностью заполненными. Поэтому электроны могут свободно перемещаться внутри материала, поскольку для перехода с уровня на уровень им не требуется обладать очень высокой энергией. Этим объясняется высокая электропроводность металлов. В диэлектриках и полупроводниках, для того чтобы попасть в зону проводимости, электронам приходится сначала преодолеть зону запрещенных энергий, которая для диэлектриков составляет порядка 5 эВ и более, а для полупроводников несколько ниже. Этим и объясняется тот факт, что электропроводность полупроводников (не говоря уже о диэлектриках) на несколько порядков ниже, чем у металлов.

Если фотон, обладающий высокой энергией (большой частотой), ударяется о кристалл (рис. 2А), он выбивает из его валентной зоны электрон и передает ему достаточное количество кинетической энергии, чтобы он мог перескочить зону запрещенных энергий и попасть в зону проводимости, т.е. на более высокий энергетический уровень. В зоне проводимости электрон является свободным носителем заряда. Недостаток электрона в валентной зоне означает появление там дырки, которая тоже может рассматриваться как свободный носитель противоположного электрону заряда. Увеличение количества дырок выражается в уменьшении удельного сопротивления материала. На рис. 2Б показано, что происходит, когда фотон обладает низкой энергией, недостаточной для преодоления электроном зоны запрещенных энергий. Как видно из рисунка, в этом случае свободные носители зарядов не образуются.

Ширина зоны запрещенных энергий служит тем порогом, ниже которого материал не является фоточувствительным. Однако не следует представлять порог в виде резкой границы. Во время фотоэффекта всегда выполняется закон сохранения моментов движения. Момент движения и плотность дырок и электронов в зонах валентности и проводимости являются максимальными в центре и падают до нуля у верхнего и нижнего краев зон. Поэтому вероятность возбужденному в валентной зоне электрону найти место в зоне проводимости гораздо выше в центре зон, чем по краям. Поэтому спектральная фоточувствительность материала начинает расти с энергии фотона, постепенно доходит до максимума и потом снова падает до нуля при энергии, соответствующей разности между нижней энергией валентной зоны и верхней энергией зоны проводимости. Типовая спектральная характеристика полупроводникового материала показана на рис. 3. При введении в материал определенных примесей можно менять фоточувствительность материала. Этот способ можно использовать для изменения формы или получения сдвига спектральной характеристики кристалла. Все

приборы, напрямую преобразующие фотоны электромагнитных излучений в носители зарядов, называются *квантовыми детекторами*. К таким устройствам относятся фотодиоды, фототранзисторы и фоторезисторы.

Фотодиоды.

Фотодиоды - это полупроводниковые оптические датчики. Это понятие включает в себя даже солнечные батареи. В упрощенном виде принцип действия фотодиодов можно описать следующим образом. При воздействии излучения соответствующей частоты на прямо смещенный р-п переход (в котором положительный вывод батареи подключен к зоне р), ток через фотодиод возрастет незначительно по сравнению с темновым током. Другими словами, ток смещения в этом случае будет намного превышать ток, генерируемый светом. При обратном смещении р-п перехода (рис. 4) ток возрастает очень сильно. Столкновение фотонов с поверхностью фотодиода приводит к образованию пар электрон-дырка на обоих концах перехода. При попадании электронов в зону проводимости, они начинают лететь в сторону положительного полюса батарей. Соответственно, созданный поток дырок направляется к отрицательному полюсу. Это означает появление в цепи фотодиода тока i_p . В темноте ток утечки i_0 не зависит от приложенного напряжения, а причиной его возникновения является тепловая генерация носителей зарядов. На рис. 5А показана эквивалентная электрическая схема обратного смещенного фотодиода, состоящая из двух источников тока и RC-цепи.

Процесс оптического детектирования заключается в прямом преобразовании оптической энергии (в виде потока фотонов) в электрический сигнал (поток электронов). Таким образом, электрический ток пропорционален оптической мощности падающего на детектор излучения.

На рис. 5Б показана вольтамперная характеристика типового фотодиода. Если к диоду при разомкнутой цепи подключить вольтметр, обладающий высоким входным импедансом, можно увидеть, что при увеличении оптической мощности, напряжение меняется по нелинейной (логарифмической) зависимости. При коротком замыкании цепи ($V = 0$) ток связан с оптической мощностью линейной зависимостью. Вольтамперную характеристику фотодиода можно описать выражением:

$$i = i_0 (e^{eV/mT} - 1) - i_s \quad (3)$$

где i_0 - обратный темновой ток, возникающий из-за тепловой генерации пар электрон-дырка,

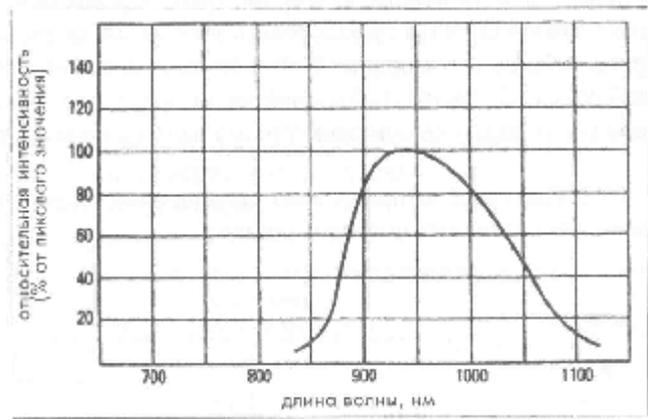


Рис. 3. Спектральная характеристика ИК фотодиода

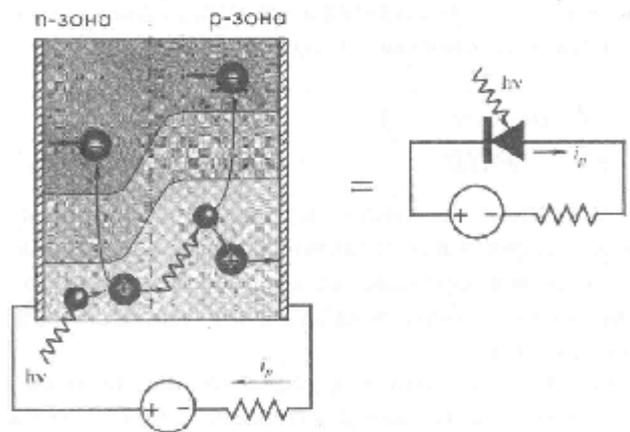


Рис. 4. Структура фотодиода

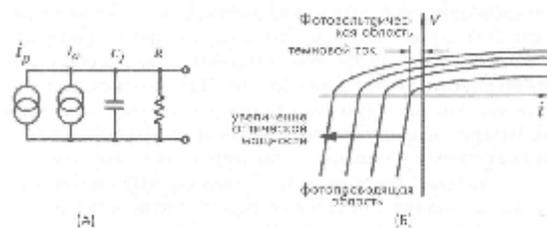


Рис. 5. Эквивалентная схема фотодиода (А) и его вольтамперная характеристика (Б)

i_s - ток, соответствующий детектируемому оптическому сигналу, m - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура.

Фототранзистор

Фотодиод напрямую преобразует фотоны в носители зарядов - один фотон образует одну пару электрон-дырка. Фототранзисторы помимо фотоэлектрического преобразования выполняют функцию усиления тока, что значительно повышает чувствительность детектора. Переход коллектор-база является обратно смещенным диодом. При включении транзистора в схему с источником питания, внутри контура, в состав которого входит переход база-эмиттер, начинает течь фотоиндуцированный ток. Усиление тока в фототранзисторе происходит также как в традиционном биполярном транзисторе. В результате этого коллекторный ток значительно возрастает.

На рис. 6 показаны энергетические зоны фототранзистора. Фотоиндуцированный ток базы возвращается на коллектор через эмиттер и внешнюю часть схемы. При этом электроны, попадающие в базовую область со стороны эмиттера, выталкиваются электрическим полем в зону коллектора. Чувствительность фототранзистора определяется эффективностью работы перехода база-коллектор и коэффициентом усиления по постоянному току транзистора. Поэтому можно утверждать, что чувствительность является функцией коллекторного тока.

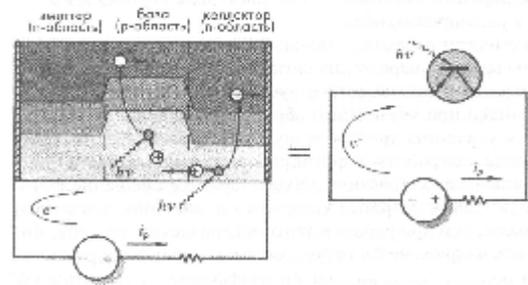


Рис. 6. Энергетические зоны фототранзистора

Вольтамперные характеристики фототранзисторов (зависимости коллекторного тока от напряжения на коллекторе) имеют тот же вид, что и у обычных транзисторов. Поэтому для расчета схем с фототранзисторами можно применять традиционные методы разработки транзисторных цепей, за исключением того, что здесь база является входом для фотоиндуцированного тока, текущего со стороны коллектора. Фотоэлектрический процесс протекает, в основном, в зоне коллектор-база, поэтому чем шире эта область, тем больше носителей зарядов будет образовано. Очевидно, что всегда надо стремиться увеличивать, насколько это возможно, площадь окошка для попадания света. Фототранзисторы бывают двух типов: с двумя и тремя выводами. В последнем случае фототранзистор может использоваться не только как фоточувствительный элемент, но и как обычный биполярный транзистор, что обеспечивает разработчику дополнительную гибкость при проектировании электронных цепей. Однако в качестве фотодатчиков чаще применяются фототранзисторы с двумя выводами.

Фоторезисторы

Также как и фотодиод, фоторезистор является фотопроводящим устройством. Для изготовления фоторезисторов, как правило, применяется сульфид кадмия (CdS) и селенид кадмия ($CdSe$). Эти материалы являются полупроводниками, сопротивление которых меняется при попадании на их поверхность света, т.е. фотоэффект здесь заключается в изменении удельного сопротивления материала. Очевидно, что фоторезисторы необходимо подключать к источникам питания. На рис. 7 показана схема фоторезистивного элемента. Из рисунка видно, что в нем на поверхности двух противоположных концов фотопроводника нанесены

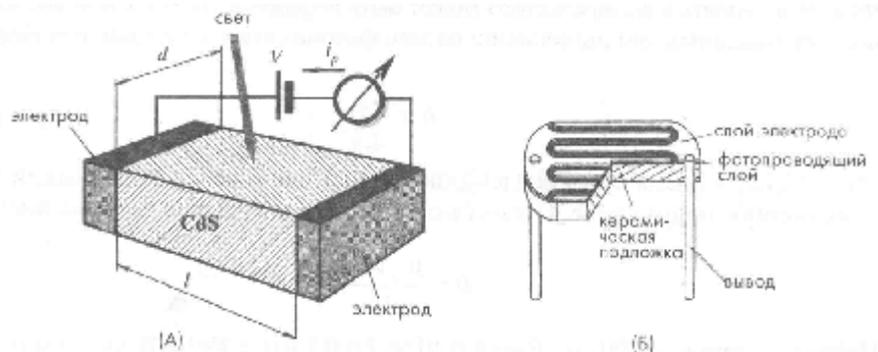


Рис. 7. Структура фоторезистора (А) и фоторезистор серпантинной формы (Б)

электроды. В темноте такой элемент имеет очень высокое сопротивление, и, следовательно, при подключении к нему источника напряжения V , темновой ток в цепи, наличие которого объясняется тепловыми явлениями, будет очень низким. При попадании света на поверхность фоторезиста, в цепи потечет ток i_p .

Причина увеличения тока заключается в следующем. Непосредственно под зоной проводимости кристалла находится донорный уровень, а над валентной зоной располагается акцепторный уровень. В условиях темноты эти уровни являются практически заполненными электронами и дырками, что объясняет высокое сопротивление полупроводникового кристалла.

При освещении фотопроводящего кристалла его материал поглощает летящие фотоны, в результате чего энергия электронов валентной зоны возрастает, что позволяет им переместиться в зону проводимости. При этом в валентной зоне остаются свободные дырки. Этот процесс и объясняет повышение удельной проводимости материала. Акцепторный уровень, расположенный рядом с валентной зоной, не может удерживать электроны, поэтому в валентном слое происходит не так много рекомбинаций пар электрон-дырка, а количество свободных электронов в зоне проводимости значительно возрастает.

Можно показать, что для улучшения чувствительности и снижения сопротивления резистивного элемента расстояние между электродами необходимо уменьшать, а ширину детектора d - увеличивать. Для выполнения этих условий детектор должен быть очень коротким и очень широким. Для этого фотодетектору часто придают форму серпантина (рис. 7Б).

Охлаждаемые детекторы

Для работы с объектами, испускающими фотоны малых ($< 2\text{эВ}$) энергий т.е. более длинных волн, требуются полупроводниковые устройства, обладающие более узкой зоной запрещенных энергий. Однако даже в квантовых детекторах с достаточно небольшой зоной запрещенных энергий при комнатной температуре собственные внутренние шумы намного превышают полезный сигнал. Другими словами, детектор в этом случае будет измерять собственное тепловое излучение. Уровень шума зависит от температуры, поэтому при детектировании фотонов с низкой энергией отношение сигнал/шум может стать таким маленьким, что о точности измерений говорить не приходится. По этой причине при работе в среднем и дальнем ИК спектральном диапазоне детектор не только должен обладать узкой зоной запрещенных энергий, но его необходимо охлаждать до температуры, при которой внутренние шумы уменьшаются до приемлемого уровня.

Принцип действия охлаждаемых детекторов почти такой же как, и у фоторезисторов, за исключением того, что они определяют излучение больших длин волн и работают при значительно более низких температурах. Поэтому конструкции охлаждаемых детекторов и фоторезисторов сильно отличаются друг от друга. Охлаждение смещает частотные характеристики в сторону больших длин волн и улучшает чувствительность детектора. Однако быстродействие детекторов при охлаждении несколько снижается. В детекторах для понижения температуры могут применяться разные методы: охлаждение сухим льдом, жидким азотом или сжиженным гелием, а также термоэлектрическое охлаждение, основанное на эффекте Пельтье.

Тепловые детекторы

Тепловые ИК детекторы первоначально использовались для определения ИК излучений среднего и дальнего ИК диапазонов и для проведения бесконтактных температурных измерений, которые в течение последних 60 лет стали называться пирометрическими. Это название произошло от греческого слова риг, обозначающего огонь. Соответствующие термометры получили название пирометров. В настоящее время бесконтактные методы измерения температуры используются очень широко: от определения минусовых температур до детектирования температуры различных пламен. Поэтому такие методы получили название радиационной термометрии.

Типовые ИК бесконтактные датчики температуры состоят из следующих частей:

1. Чувствительного элемента, реагирующего на электромагнитные излучения ИК диапазона. Основными требованиями, предъявляемыми к нему, являются: быстродействие, воспро-

изводимость, высокая чувствительность и хорошая долговременная стабильность.

2. Опорной конструкции, поддерживающей чувствительный элемент и обеспечивающей доступ к нему излучения. Конструкция должна обладать низкой теплопроводностью для снижения тепловых потерь.

3. Корпуса, защищающего чувствительный элемент от воздействия окружающей среды. Корпус должен быть герметичным. Его часто заполняют сухим воздухом или инертным газом (аргоном или азотом).

4. Защитного окошка, прозрачного для излучения исследуемого диапазона длин волн. На поверхность окна часто наносят специальное покрытие с целью улучшения его пропускающей способности для волн определенной длины и фильтрации излучений нежелательного диапазона спектра.

В областях, лежащих ниже среднего ИК диапазона спектра, чувствительность тепловых детекторов гораздо ниже, чем у квантовых датчиков. Их принцип действия основан на превращении теплового излучения в тепло с последующим преобразованием уровня тепла или теплового потока в электрический сигнал, для чего применяются традиционные методы тепловых измерений. Для детектирования теплового излучения подходит практически любой датчик температуры.

Все тепловые детекторы излучений можно разделить на два класса: пассивные ИК (ПИК) и активные ИК (АИК) детекторы. Пассивные датчики поглощают входящее излучение и превращают его в тепло, в то время как активные детекторы вырабатывают тепло при помощи специальных схем возбуждения.

Ячейки Голея

Ячейки Голея являются широкополосными детекторами ИК излучений. Они обладают очень высокой чувствительностью, но также довольно хрупкой конструкцией. Принцип действия ячеек Голея основан на детектировании теплового расширения газа, заключенного в замкнутом объеме. Поэтому такие датчики иногда называются термопневматическими детекторами. На рис. 8 показана схема детектора излучений среднего и дальнего ИК диапазонов, реализованного на базе ячейки Голея, состоящей из замкнутой камеры с двумя мембранами: верхней и нижней. На верхнюю мембрану наносится слой, поглощающий тепло, а поверхность нижней мембраны делается зеркальной.

Источник света направлен на зеркальную поверхность. Падающий луч света отражается от поверхности и попадает на детектор положения. На верхнюю мембрану действует исследуемое ИК излучение, поглощаемое ее покрытием. Поглощенное тепло приводит к повышению температуры мембраны, которая, в свою очередь, нагревает газ, заключенный в камере. Газ расширяется и его давление увеличивается. Увеличение давления приводит к деформации нижней мембраны. Изменение кривизны зеркальной поверхности мембраны оказывает влияние на направление отраженного луча света, который теперь попадает на другое место чувствительной зоны датчика положения. Величина отклонения положения отраженного луча зависит от степени деформации мембраны и, следовательно, от интенсивности поглощенного излучения. Такие датчики могут изготавливаться по технологии производства микросистем.

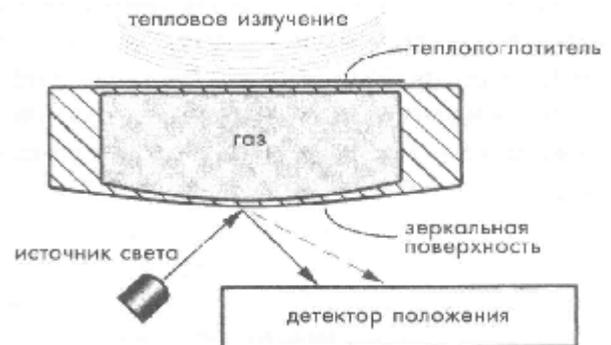


Рис. 8. Детектор излучений на основе ячейки Голея

Детекторы излучений на основе термоэлементов

Термоэлементы относятся к классу пассивных ИК детекторов. Их принцип действия аналогичен принципу термопар. Фактически, термоэлемент представляет собой несколько последовательно соединенных термопар. Первоначально такая конструкция была предложена Джоулем для увеличения выходного сигнала термоэлектрических датчиков. Он соединил

последовательно несколько термопар и термически объединил их горячие спаи. Современные термоэлементы имеют совсем другую конструкцию. Теперь их основное предназначение - тепловое детектирование излучений среднего и дальнего ИК диапазонов спектра.

На рис. 9 показана схема детектора на основе термоэлемента. Такой датчик состоит из рамы, обладающей сравнительно большой тепловой массой, на которой сформированы «холодные» спаи. Эта рама присоединена либо к термостату с известной температурой, либо к эталонному датчику температуры. На раме крепится тонкая мембрана, обладающая низкой теплоемкостью и теплопроводностью, на поверхности которой располагаются «горячие» спаи. Названия горячих и холодных спаев являются историческими, напоминая о том, что термоэлементы произошли от термопар. На самом деле в таких детекторах места соединений редко бывают горячими или холодными.

Принцип действия датчиков на основе термоэлементов ничем не отличается от принципа любого пассивного ИК детектора. ИК излучение поглощается или испускается мембраной. При этом происходит изменение ее температуры. Поскольку на мембране расположены горячие спаи, разность температур между ними и холодными спаями приводит к возникновению термоэлектрического напряжения. Температура мембраны зависит от ее теплоемкости, теплопроводности и мощности ИК излучения.

Для получения термоэлементов с высокой чувствительностью и низким уровнем шума спаи должны изготавливаться из материалов, обладающих высоким термоэлектрическим коэффициентом, низкой теплопроводностью и низким объемным удельным сопротивлением. При этом термоэлектрические коэффициенты пар соединений должны иметь противоположные знаки. К сожалению, большинство металлов, обладающих низким удельным электрическим сопротивлением (золото, медь, серебро), имеют очень низкие термоэлектрические коэффициенты. У металлов с более высоким удельным сопротивлением (висмут и сурьма) термоэлектрические коэффициенты гораздо выше, поэтому именно они и используются чаще других при производстве термоэлементов.

Термоэлементы являются устройствами, работающими на постоянном токе, выходной сигнал которых достаточно хорошо отслеживает температуру «горячего» спая. Термоэлемент можно представить в виде источника напряжения, управляемого тепловым потоком, соединенного последовательно с резистором фиксированного номинала. Датчик размещается в герметичном металлическом корпусе с прочным прозрачным окном. Выходное напряжение датчика пропорционально попадающему на него излучению. Диапазон рабочих частот детектора, зависит от теплоемкости и теплопроводности мембраны, определяющих тепловую постоянную времени.

Активный датчик излучения дальнего ИК диапазона

В активных ИК детекторах процесс измерения потока теплового излучения отличен от процесса пассивных датчиков. В отличие от пассивного ИК элемента, температура которого определяется как температурой объекта, так и окружающей температурой, в активном датчике температура поверхности чувствительного элемента в течение всего процесса измерения поддерживается на одном заданном уровне T_s . Для этого в детектор встроены нагревательный элемент, мощность которого регулируется схемой управления (рис. 10А). Процесс выработки управляющего сигнала состоит в измерении температуры поверхности элемента и сравнении ее с внутренней эталонной температурой. Иногда температура поверхности поддерживается выше максимально ожидаемой температуры объекта, однако, для большинства практических случаев

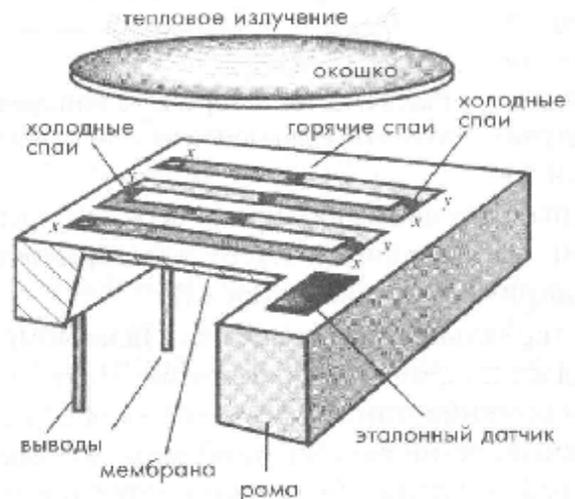


Рис. 9. Схема термоэлемента с эталонным датчиком температуры (x и y являются разными материалами)

достаточно, чтобы T_s была выше температуры окружающей среды на несколько десятых градуса. Поскольку температура элемента всегда выше температуры окружающей среды, он начинает отдавать свое тепло наружу, а не поглощать его, как это делают пассивные детекторы. Тепло от поверхности сенсора уходит тремя путями: через теплопроводность, через конвекцию и через тепловое излучение,

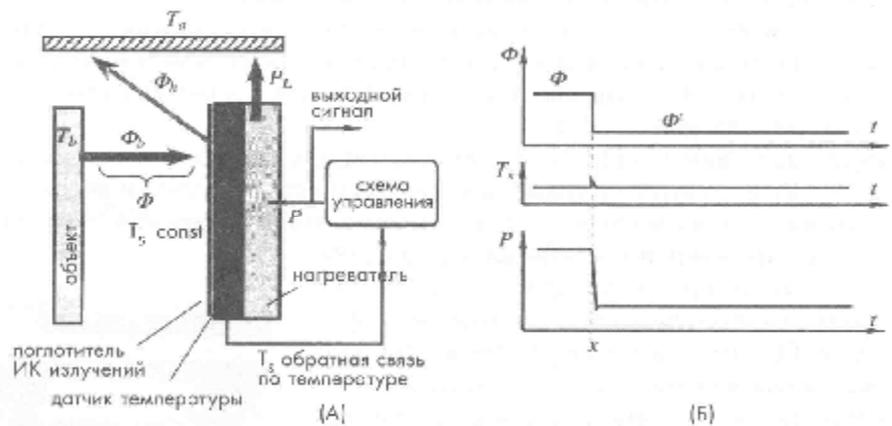


Рис. 10. Активный ИК элемент излучает тепловой поток Φ_h внутри корпуса и поглощает поток Φ_b от объекта (А), временная диаграмма для излучаемого потока, температуры поверхности и приложенной мощности (Б)

которое и необходимо измерить. В отличие от первых двух способов теплопередачи, которые всегда направлены наружу от чувствительного элемента (поскольку он всегда теплее окружающей среды), радиационная передача тепла может идти в любом направлении, которое зависит, в основном, только от температуры объекта. Часть мощности излучения уходит от элемента внутрь корпуса датчика, в то время как другая часть поступает от объекта (или уходит к нему). Важно отметить, что суммарный тепловой поток (теплопроводность + конвекция + излучение) всегда имеет направление от объекта, т.е. имеет отрицательный знак.

Динамическая температура поверхности T_s любого теплового элемента, и активного, и пассивного, может быть описана дифференциальным уравнением первого порядка:

$$cm \frac{dT_s}{dt} = P - P_L - \Phi, \quad (4)$$

где P - мощность, получаемая элементом от источника питания или цепи возбуждения (если они есть), P_L - тепловые потери за счет теплопроводности и конвекции, m и c - масса и удельная теплоемкость сенсора, а $\Phi = \Phi_h + \Phi_b$ - суммарный тепловой поток излучений. Положительный знак мощности P означает, что он направлен к элементу.

В пассивных ИК детекторах, никакой внешней мощности не подводится (т.е. $P = 0$), поэтому быстродействие датчика, характеризуемое тепловой постоянной времени τ_T , определяется только его теплоемкостью и тепловыми потерями. В активных ИК элементах после периода разогрева до температуры T_s схема управления стремится удерживать температуру поверхности датчика на том же самом уровне, что означает:

$$\frac{dT_s}{dt} = 0. \quad (5)$$

Тогда уравнение (4) становится алгебраическим:

$$P = P_L + \Phi. \quad (6)$$

В отличие от пассивных ИК детекторов активные датчики работают как бесконечные источники тепла. Из вышесказанного следует, что в идеальных условиях выходной сигнал активных детекторов не зависит от тепловой массы и не является функцией времени. При эффективной работе схемы управления в постоянных условиях окружающей среды ($P_L = \text{const}$) приложенная электрическая мощность успевает отслеживать с высокой степенью точности изменения потока излучения Φ . Амплитуда изменения этой мощности и является выходным сигналом датчика. Из уравнения (6) видно, что теоретически активные ИК детекторы являются более быстродействующими по сравнению с пассивными датчиками. Однако эффективность активных детекторов определяется как собственной конструкцией, так и устройством блока управления.

ДЕТЕКТОРЫ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В левой стороне спектра электромагнитных волн расположена зона γ -излучений. Однако существуют электромагнитные волны с еще более короткими длинами волн. В дополнение к этому спонтанные излучения некоторых веществ не всегда имеют электромагнитную природу. Речь идет о ядерном излучении, испускаемом ядрами атомов некоторых материалов, которое бывает двух типов: в виде заряженных частиц (α , β и протонов) и в виде частиц, не имеющих заряда, называемых нейтронами. Часть этих частиц являются сложными, например, α -частицы, представляющие собой ядра атомов гелия, состоящих из двух нейтронов и двух протонов, другие частицы, такие как β -частицы, устроены гораздо проще (β -частица - это либо электрон, либо позитрон). Рентгеновское и γ -излучения относятся к электромагнитным излучениям ядерного типа. В свою очередь, рентгеновское излучение в зависимости от длины волны делится на жесткое, мягкое и ультрамягкое. Ядерное излучение часто называется ионизирующим. Это название возникло из-за того, что при прохождении элементарных частиц через различные среды, поглощающие их энергию, возникают новые ионы, фотоны или свободные радикалы.

Некоторые элементы, существующие в природе, являются нестабильными. Такие элементы при своем медленном разложении испускают часть своих ядер. Это явление называется радиоактивностью. Оно было открыто в 1896 году Генри Беккерелем, который обнаружил, что атомы урана (с атомным числом $Z = 92$) вырабатывают излучение, затемняющее фотографические пластины. В дополнение к естественным радиоактивным веществам были получены искусственные. Ядра таких веществ вырабатываются в ядерных реакторах и являются очень нестабильными элементами. Вне зависимости от источника происхождения и возраста радиоактивных материалов они разлагаются по одному и тому же математическому закону, определяющему связь между количеством не распавшихся ядер N и числом ядер dN , распадающихся за короткий интервал времени dt . Было показано экспериментально, что

$$dN = -\lambda N dt, \quad (1)$$

где λ – коэффициент распада данного вещества. Из уравнения (1) можно найти, что λ – это доля ядер, распавшихся за единицу времени:

$$I = -\frac{1}{N} \frac{dN}{dt}. \quad (2)$$

В системе СИ единицей измерения радиоактивности является беккерель, равный активности радионуклида, распадающегося со скоростью одно спонтанное превращение в секунду. Таким образом, беккерель выражается в единицах времени: 1 беккерель равен 1/с. Для преобразования беккереля в старую историческую единицу Кюри беккерель необходимо умножить на коэффициент $3.7 \cdot 10^{10}$. Доза поглощения измеряется в греях. Один грей соответствует дозе поглощения, при которой энергия на единицу массы, полученная веществом за счет ионизирующего излучения, равна 1 Джоулю на килограмм, т.е. грей равен Дж/кг. При определении дозы облучения, полученной от воздействия рентгеновских и γ -излучений, используют единицу Кулон/кг, равную дозе облучения, приведшей к возникновению в 1 кг сухого воздуха заряда в 1 Кулон. В системе СИ единица Кл/кг заменила старую единицу рентген.

Принцип работы датчиков радиоактивных излучений определяется способом взаимодействия исследуемых частиц с материалом самого детектора. Существуют три основных типа детекторов радиоактивных излучений: сцинтилляционные счетчики, газовые и полупроводниковые детекторы. Также в соответствии с принципом действия все детекторы можно разделить на две группы: детекторы столкновений и дозиметры. Первые определяют наличие радиоактивных частиц, в то время как вторые измеряют мощность излучений. Поэтому существует еще одна классификация детекторов радиоактивных излучений: качественные и количественные.

Сцинтилляционные детекторы

Принцип действия этой группы детекторов основан на способности некоторых материалов преобразовывать ядерное излучение в свет. Поэтому на основе сцинтилляционного материала и оптического детектора фотонов можно реализовать датчик радиоактивных излучений. Однако следует отметить, что, несмотря на высокую эффективность преобразований, интенсивность полученного в результате облучения материала света всегда очень мала. Поэтому в

состав сцинтилляционных датчиков для усиления сигнала до требуемого уровня обычно входит фотоумножитель.

Идеальный сцинтилляционный материал должен обладать следующими свойствами:

1. Он должен эффективно преобразовывать кинетическую энергию заряженных частиц в детектируемый свет;
2. Это преобразование должно быть линейным;
3. Для обеспечения высокого быстродействия детектора время послесвечения материала должно быть коротким;
4. Коэффициент преломления материала должен быть близок к коэффициенту стекла, что необходимо для эффективного оптического согласования сцинтилляционной камеры с трубкой фотоумножителя.

В сцинтилляционных детекторах, в основном, используются три типа материалов: неорганические кристаллы галоидных соединений щелочей, органические растворы, в которых радиоактивное вещество смешивается с жидким сцинтиллятором, и органические кристаллы (например, антрацен), пластифицированные небольшим количеством других материалов. Неорганические материалы обладают не только большей чувствительностью, но и большим временем послесвечения, что не дает возможности реализовать на их основе быстродействующие детекторы. Органические материалы лишены этого недостатка, но их чувствительность, как правило, гораздо ниже.

Одним из главных недостатков сцинтилляционных счетчиков является их низкое разрешение по энергии излучения. Эффективность сцинтилляционных преобразователей является не очень высокой. Для образования одного регистрируемого носителя (фотоэлектрона) необходима энергия более 1000 эВ. При этом количество носителей, созданных за время взаимодействия излучения с материалом, редко превышает нескольких тысяч. Например, разрешение по энергии для сцинтилляторов на основе иодида натрия при детектировании γ -излучения мощностью 0.662 МэВ ограничено 6%, что, в основном, определяется статистическими флуктуациями фотоэлектронов. Единственным методом снижения данного статистического ограничения является увеличение количества регистрируемых носителей, приходящихся на одну радиоактивную частицу.

На рис. 1 показана упрощенная схема сцинтилляционного детектора, соединенного с фотоумножителем. Сцинтилляционная камера прикреплена к передней стенке фотоумножителя, в которую встроен фотокатод, на который подается нулевой потенциал (потенциал земли). Внутри трубки фотоумножителя установлено множество специальных выпуклых пластин, называемых динодами, расположение которых друг относительно друга напоминает форму жалюзей. Каждый динод подсоединен к источнику положительного напряжения. Чем дальше динод расположен от фотокатода, тем выше его потенциал. Последним элементом трубки фотоумножителя является анод, на который подан максимальный положительный потенциал, иногда достигающий нескольких тысяч вольт. Все компоненты фотоумножителя находятся внутри стеклянной вакуумной трубки, там же могут располагаться и некоторые дополнительные элементы, такие как фокусирующие электроды, экраны и т.д.

Фотоумножитель фактически является умножителем электронов, поскольку внутри его трубки нет никаких фотонов, а есть только электроны. Рассмотрим следующий пример. Считаем, что γ -частицы обладают кинетической энергией 0.5 МэВ. При их воздействии на сцинтилляционный кристалл образуются свободные фотоны. Эффективность сцинтиллятора на основе кристалла иодида натрия с примесью таллия составляет 13%. Значит, в видимый свет преобразуется энергия, равная $0.5 \times 0.13 = 0.065$ МэВ = 65 кэВ. Поскольку средняя энергия излучения ви-

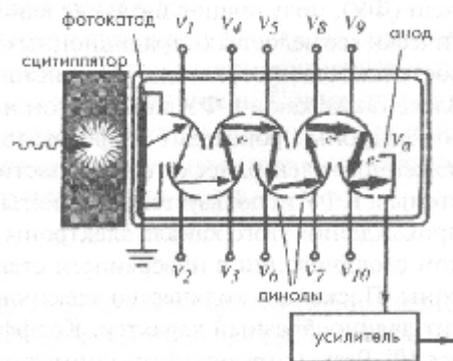


Рис. 1. Сцинтилляционный детектор с фотоумножителем

димого диапазона спектра составляет порядка 4 эВ, то, очевидно, что на одну γ -частицу приходится около 15000 фотонов. Это слишком мало для регистрации обычным фотодетектором, поэтому здесь необходимо использовать фотоумножитель. Из 15000 фотонов, как правило, только 10000 достигают фотокатода, функция которого заключается в преобразовании фотонов в малоэнергетичные электроны. Поскольку эффективность фотокатода составляет 20%, он вырабатывает порядка 2000 электронов на одну γ -частицу. Трубка фотоумножителя является линейным устройством, и ее коэффициент усиления почти не зависит от количества размноженных электронов.

Поскольку на все диоды поданы положительные потенциалы, электроны, покинувшие фотокатод, притягиваются первым диодом. При столкновении этих электронов с поверхностью диода освобождаются несколько новых электронов, улетающих навстречу второму диоду и т.д., т.е. начинается лавинное образование свободных заряженных частиц. Таким образом, процесс фотоумножения электронов происходит именно на диодах. Коэффициент умножения обычно составляет порядка 10^6 . В результате до анода доходит порядка 2×10^9 электронов, создающих довольно большой электрический ток, регистрируемый соответствующими электронными схемами.

В настоящее время используются несколько видоизмененные фотоумножители (ФУ), получившие название канальных (КФУ), в которых устранены практически все недостатки традиционных ФУ. В них как и в ФУ преобразование фотонов в фотоэлектроны происходит на фотокатоде, которые далее, ускоряясь за счет приложенного электрического поля, достигают анода. Вместо сложной диодной системы в КФУ используется извилистый тонкий полупроводниковый канал. При прохождении этого канала электроны ударяются о его стенки, и при каждом таком столкновении с поверхности стенок канала выбиваются вторичные электроны. Поскольку количество электронов все время возрастает, этот процесс носит лавинообразный характер. Коэффициент усиления такого КФУ бывает более 10^9 . Результирующий ток снимается с анода. КФУ часто изготавливаются герметичными и имеют более прочную конструкцию по сравнению с хрупкими традиционными ФУ.

Ионизационные детекторы

Детекторы этого класса основаны на способности некоторых газов и твердых тел вырабатывать ионные пары при воздействии на них ионизационного излучения. Далее положительные и отрицательные ионы при помощи электростатического поля отделяются друг от друга и их количество измеряется.

Ионизация появляется при прохождении заряженных частиц на большой скорости сквозь атомы вещества. Возникающие при этом электромагнитные силы отрывают электроны от атомов, формируя при этом пары ионов. Примечательно, что при этом одна радиоактивная частица, пока не кончится ее энергия, способна создать сразу несколько ионных пар. Незаряженные частицы (такие как нейтроны) при столкновении с ядрами также формируют пары ионов.

Ионизационные камеры

Такие детекторы являются наиболее ранними и широко распространенными датчиками ионизирующих излучений. Радиоактивные частицы при прохождении через камеру вызывают ионизацию и возбуждение молекул газа. Для запуска процесса ионизации частица должна обладать энергией, как минимум, равной энергии ионизации молекул газа. Для большинства используемых в детекторах газов энергия ионизации составляет порядка 10...20 эВ. Однако существуют и другие механизмы, при которых попадающие внутрь камеры частицы теряют свою энергию при прохождении через газ не на его ионизацию, т.е. на отделение электронов от атомов, а, например, на перемещение электронов на более высокий энергетический уровень. Поэтому средняя энергия, которую теряет частица, на образование одной электронной пары (W -энергия) всегда выше энергии ионизации газа. Величина W -энергии определяются типом газа, видом излучения и его энергией.

В присутствии электрического поля перемещение положительных и отрицательных ионов приведет к возникновению электрического тока. В заданном объеме скорость образования ионных пар является постоянной. Для этого скорость образования ионных пар должна уравнове-

шиваться скоростью либо их распада вследствие рекомбинации, либо выхода за пределы объема за счет процессов диффузии и миграции. При незначительном уровне рекомбинации и эффективном сборе всех зарядов в системе устанавливается стационарный ток, являющийся точной мерой скорости образования ионных пар. На рис. 2 показана принципиальная схема ионизационной камеры и зависимости тока от напряжения, полученные в ней. В объеме газа, расположенном между двумя электродами, создается электрическое поле. Последовательно с источником напряжения E и электродами подключен амперметр. В отсутствие процесса ионизации через полученную электрическую цепь ток не течет, поскольку между электродами находится неэлектропроводная среда. Радиоактивные частицы, попадая внутрь камеры, приводят к образованию положительных и отрицательных ионов,

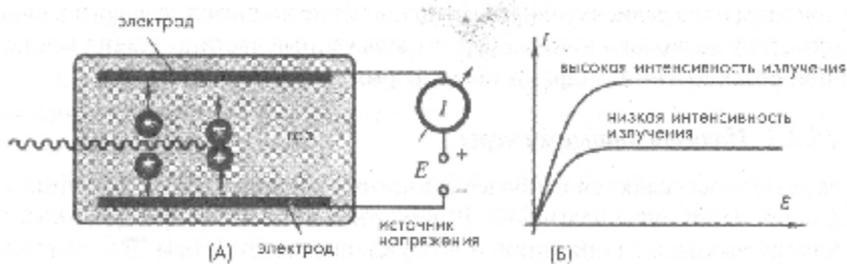


Рис. 2. Упрощенная схема ионизационной камеры (А), зависимость тока от напряжения (Б)

которые под действием электрического поля направляются к соответствующим электродам, что вызывает появление в цепи электрического тока. Как видно из рис. 2Б, при относительно низких значениях приложенного напряжения ионы рекомбинируют довольно сильно, поэтому выходной ток пропорционален напряжению. При увеличении разности потенциалов число рекомбинаций уменьшается до тех пор, пока все ионы не станут долетать до электродов, после чего ток перестает зависеть от напряжения, хотя его величина будет, по-прежнему, определяться интенсивностью излучения. Эта зона называется зоной насыщения. Именно эта зона является областью нормальной работы ионизационной камеры.

Пропорциональные камеры

Пропорциональные камеры, заполненные газом, относятся к детекторам, работающим в импульсном режиме, принцип действия которых основан на умножении электронов в газе. Поэтому такие камеры также называются пропорциональными счетчиками. Благодаря эффекту фотоумножения, выходной сигнал пропорционального детектора намного превышает сигнал обычной ионизационной камеры. Такие счетчики, в основном, используются при детектировании и спектроскопии мягкого рентгеновского излучения, а также для обнаружения нейтронов. В отличие от ионизационных камер пропорциональные счетчики работают при высоких напряжениях, значительно ускоряющих электроны, возникающие в результате столкновений. Поскольку эти электроны после ускорения обладают достаточно большой энергией, они могут вовлечь в процесс ионизации нейтральные молекулы газов, создавая при этом дополнительные ионные пары. Следовательно, процесс ионизации носит лавинный характер, что приводит к резкому возрастанию тока через электроды. Такая ионизация называется лавиной Таунсенда. В пропорциональном счетчике лавинообразный процесс заканчивается, как только электрон достигает анода. Поскольку в таком детекторе электрон должен достичь уровня ионизации газа, существует пороговое напряжение, после которого начинается этот лавинообразный процесс. Для газов, используемых в пропорциональных счетчиках при атмосферном давлении этот пороговый уровень составляет порядка 10^6 В/м.

На рис. 3 показаны зоны действия различных газовых счетчиков. При очень низких напряжениях поле не может помешать рекомбинации ионных пар. По достижении уровня насыщения все ионы достигают электродов. При дальнейшем увеличении напряжения происходит явление фотоумножения. До некоторого уровня напряжения процесс умножения фотоэлектронов будет линейным, а количество собранных зарядов пропорциональным количеству исходных ионных пар. Если приложенное напряжение продолжать увеличивать, из-за медленной скорости положительных ионов линейность процесса фотоумножения нарушится.

Счетчики Гейгера-Мюллера

Счетчик Гейгера-Мюллера (Г-М) был изобретен в 1928 году и до сих пор применяется очень широко, что объясняется его простотой, низкой стоимостью и простой эксплуатации. Счетчики Г-М отличаются от остальных ионизационных камер использованием гораздо более высоких напряжений возбуждения (рис. 3). В рабочей области счетчиков Г-М амплитуда выходных импульсов не зависит от энергии ионизирующего излучения, а является только функцией приложенного напряжения. Такие детекторы, как правило, изготавливаются в форме трубки, в центре которой расположена проволочка, выполняющая роль анода (рис. 4). Трубка заполняется инертным газом, таким как гелий или аргон, в который часто добавляются дополнительные компоненты, действующие как гасящие реагенты для предотвращения повторного запуска счетчика в процессе детектирования. Повторный запуск может привести к возникновению большого количества ложных импульсов, вместо одного желаемого. Процедуру гашения можно выполнить несколькими методами. Вот некоторые из них: сокращение времени воздействия высокого напряжения, использование высокоимпедансных резисторов, включенных последовательно с анодом, и добавление гасящего реагента в концентрации 5-10%. Молекулы многих органических газов обладают свойствами, позволяющими им быть гасителями лавинных процессов. Среди них самыми популярными являются этиловый спирт и этиловый эфир муравьиной кислоты.

Типовой лавинный процесс запускается одним первичным электроном. При этом создается большое количество вторичных ионов, а также много молекул газа переходят в возбужденное состояние. В течение нескольких наносекунд эти молекулы возвращаются в свое исходное состояние, выпуская лишнюю энергию в виде УФ излучения. Эти испущенные фотоны играют важную роль в цепных реакциях, происходящих в счетчике Г-М. При поглощении фотонов поверхностью катода или молекулами газа происходит высвобождение электронов, летящих навстречу аноду, которые при этом запускают новые лавинные процессы. Быстрое распространение цепных реакций ведет к возникновению лавинных процессов по всему объему трубки. Вторичные ионы формируют цилиндрическую область, окружающую анод, в которой запускаются все новые и новые лавинные процессы.

Такая цепная реакция продолжается до некоторого момента времени, определяемого количеством лавинных процессов и независимого от энергии частицы-инициатора. Поэтому импульсы тока на выходе счетчика Г-М имеют всегда одинаковую амплитуду. Следовательно, счетчики Г-М являются качественными, а не количественными детекторами радиоактивных излучений.

Полупроводниковые детекторы радиоактивности

Наилучшей разрешающей способностью среди современных детекторов радиационных излучений обладают полупроводниковые датчики. В полупроводниковых материалах основными носителями информации являются пары электрон-дырка, создаваемые вдоль траектории полета заряженной частицы через детектор. Заряженная частица может быть либо первичным

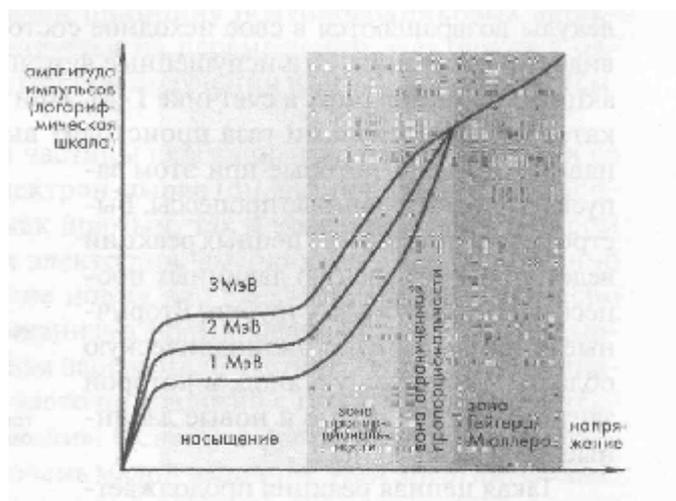


Рис. 3. Зоны рабочих напряжений для газовых детекторов

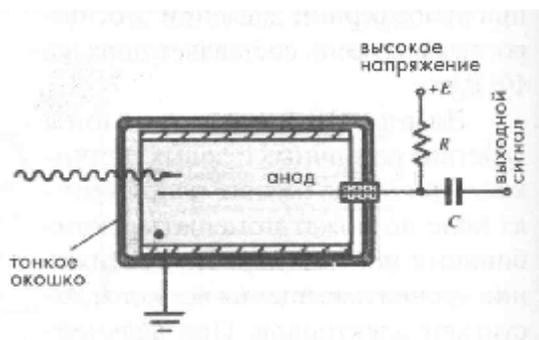


Рис. 4. Схема счетчика Гейгера-Мюллера

излучением, либо вторичной частицей. Пары электрон-дырка в некотором отношении являются аналогами ионных пар в газовых детекторах. Когда к полупроводниковому материалу приложено электрическое поле, созданные носители зарядов начинают перемещаться в определенных направлениях, что означает возникновение электрического тока. Датчики, построенные на этом принципе, называются твердотельными или полупроводниковыми диодными детекторами. Принцип действия таких детекторов аналогичен принципу полупроводниковых детекторов светового излучения. Он базируется на перемещении электронов с одного энергетического уровня на другой при получении или потере энергии.

При прохождении заряженной частицы сквозь полупроводник по пути ее следования возникает много пар электрон-дырка. Процесс образования пар может быть как прямым, так и косвенным, при котором частица участвует в формировании электронов высоких энергий, постепенно теряющих свою энергию на создание новых пар электрон-дырка. Интересно отметить, что вне зависимости от механизма формирования пар электрон-дырка на создание одной пары первичная заряженная частица затрачивает одинаковую среднюю энергию, которую часто по аналогии с газоразрядными детекторами называют «энергией ионизации». Основное достоинство полупроводниковых детекторов заключается в очень малой величине этой энергии. Ее значение для кремния и германия составляет порядка 3 эВ, тогда как в газовых детекторах энергия, необходимая для создания ионной пары, равна 30 эВ. Поэтому при одной и той же мощности исходного излучения в полупроводниковых детекторах возникнет в 10 раз большее количество носителей зарядов.

Для получения твердотельного детектора в полупроводниковом материале необходимо сформировать, по крайней мере, два электрода. В процессе детектирования выводы этих электродов подсоединяются к источнику напряжения, обеспечивающего протекание в цепи электрического тока. Однако на практике материалы из чистого кремния или германия не используются, что связано с довольно большими токами утечек, вызванных относительно низким удельным сопротивлением этих полупроводников (например, для кремния оно составляет около 50 кОм). При приложении к электродам такого детектора внешнего напряжения, в цепи может возникнуть ток, в 3...5 раз превышающий величину тока, индуцированного излучением. Поэтому детекторы этого типа реализуются на основе p-n переходов с обратным смещением, что позволяет значительно снизить токи утечек. Фактически, детектор является полупроводниковым диодом, проводящим ток (имеющим низкое удельное сопротивление) при подключении анода (p-зоны перехода) к положительному выводу источника питания, а катода (n-зоны) - к отрицательному выводу. При обратном подключении ток через диод практически не течет (т.е. он обладает высоким удельным сопротивлением). При сильном обратном смещении диода (значительно превышающем допуски производителя) происходит его пробой, что приводит к резкому увеличению тока утечки; это вызывает катастрофическое ухудшение рабочих характеристик детектора или даже выход его из строя.

В настоящее время выпускаются кремниевые диоды нескольких конфигураций: диоды с диффузионным переходом, диоды с поверхностным запирающим слоем, ионно-имплантированные детекторы, детекторы с эпитаксиальным слоем и др. Первые два указанных типа детекторов широко применяются при детектировании α -частиц и других слабо проникающих излучений. Хорошие полупроводниковые детекторы радиоактивных излучений должны обеспечивать:

1. отличную передачу заряда,
2. линейность между мощностью излучения и количеством пар электрон-дырка,
3. отсутствие свободных носителей зарядов (низкий ток утечки),
4. генерацию максимального числа пар электрон-дырка на единицу излучения,
5. высокую эффективность детектирования,
6. хорошее быстродействие,
7. большую зону сбора зарядов,
8. низкую стоимость.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНТЕРФЕЙСНЫХ СХЕМ

Если датчик не оснащен встроенной электронной схемой, формирующей выходной сигнал в определенном формате, его практически никогда не удастся напрямую подключить к процессору, монитору или другой регистрирующей аппаратуре. Обычно сигнал на выходе датчика бывает либо слишком зашумленным, либо очень слабым, либо содержит нежелательные составляющие. В дополнение к этому его формат может не соответствовать формату системы приема данных. Для подключения датчика к процессорному устройству, как правило, требуется промежуточное согласующее устройство. Другими словами, выходной сигнал необходимо преобразовать к определенному виду (кондиционировать) перед тем как подать в устройство обработки данных (подключить к нагрузке). Для нагрузки входным сигналом обычно является либо ток, либо напряжение. Схема согласования сигналов часто называется интерфейсом между датчиком и последующими устройствами. Ее основная цель - преобразование сигнала датчика в формат, совместимый с нагрузкой. На рис. 1 показан внешний сигнал, действующий на датчик, подключенный к нагрузке через интерфейсную схему. Для эффективной работы интерфейсу приходится быть «службой двух господ»: датчика и нагрузочного устройства. Его входные характеристики должны быть совместимы с выходными параметрами датчика, а выходные - с входным форматом нагрузки.

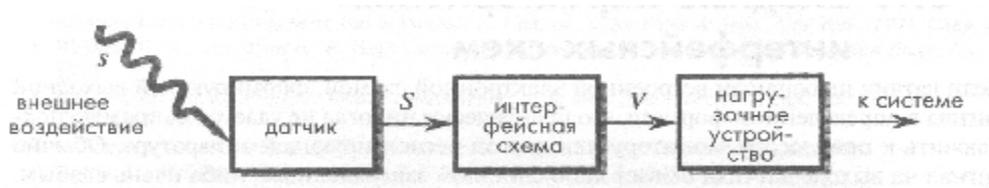


Рис. 1. Интерфейсная схема согласует форматы сигналов датчика и нагрузочного устройства.

Входная часть интерфейсной схемы характеризуется несколькими стандартными параметрами, показывающими, насколько точно схема может преобразовать сигнал датчика и какой вклад она внесет в общую погрешность.

Входной импеданс показывает, насколько сильно интерфейс нагружает датчик. Он определяется в комплексном виде:

$$Z = \frac{V}{I}, \quad (1)$$

где V и I - комплексные числа, соответствующие напряжению и току через входной импеданс.

Например, если входную часть интерфейсной схемы представить в виде параллельного соединения входного сопротивления R и входной емкости C (рис. 2А), входной импеданс в комплексном виде можно записать как:

$$Z = \frac{R}{1 + j\omega RC}, \quad (2)$$

где ω - круговая частота.

На очень низких частотах схема обладает относительно небольшой входной емкостью, и ее входной импеданс определяется сопротивлением R , поэтому можно считать, что в этом случае $Z \approx R$. Следовательно, реактивная часть уравнения (2) становится очень маленькой, т.е. выполняется следующее соотношение:

$$RC \ll \frac{1}{\omega}. \quad (3)$$

При рассмотрении входного импеданса интерфейсной схемы всегда необходимо учитывать выходной импеданс датчика. Например, если датчик имеет емкостную природу, для определения частотных характеристик входной части интерфейса емкость датчика должна быть подсоединена параллельно его входной емкости. В формуле (2) предполагается, что входной импеданс является функцией частоты внешнего сигнала. С увеличением скорости изменения сигнала входной импеданс уменьшается

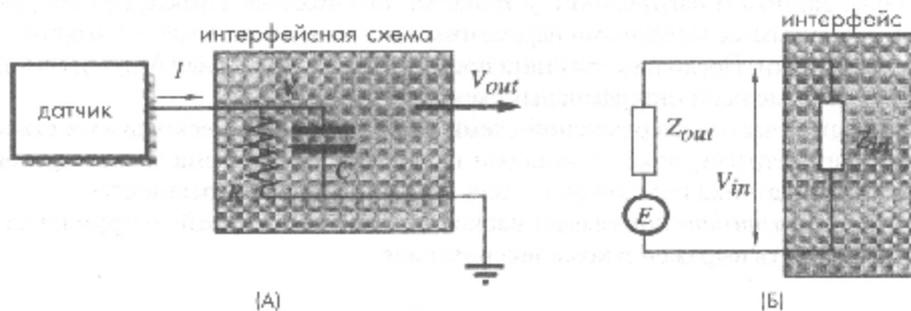


Рис. 2. Входной импеданс интерфейсной схемы (А), эквивалентная схема датчика с выходным сигналом в виде напряжения (Б)

На рис. 2Б показана эквивалентная схема датчика с выходным сигналом в виде напряжения. В состав схемы входят два импеданса: выходной импеданс датчика Z_{out} и входной импеданс интерфейса Z_{in} . Выходной сигнал датчика представлен в виде источника напряжения E , соединенного последовательно с выходным импедансом. С учетом двух импедансов входное напряжение интерфейсной схемы можно записать в виде:

$$V_{in} = E \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_{out}} \quad (4)$$

Для каждого конкретного случая необходимо определять свою собственную эквивалентную схему датчика. Это требуется для исследования частотных характеристик и фазовых задержек комбинации двух устройств: датчик-интерфейс. Например, емкостной детектор можно представить в виде конденсатора, соединенного параллельно входному импедансу интерфейса, а пьезоэлектрический датчик – в виде параллельного соединения резистора с очень большим сопротивлением (порядка 10^{11} Ом) и конденсатора с емкостью порядка 10 пФ.

Рассмотрим чисто резистивный датчик, подсоединенный к входу интерфейса, показанный на рис. 2А. Входное напряжение схемы зависит от частоты:

$$V = \frac{E}{\sqrt{1 + (f / f_c)^2}}, \quad (5)$$

где $f_c = (2\pi RC)^{-1}$ - частота среза АЧХ, т.е. частота, при которой амплитуда уменьшается на 3 дБ.

Если требуется определить амплитуду сигнала с точностью 1%, частота входного сигнала, подаваемого на вход схемы, не должна превышать следующего значения: $f_{max} \approx 0,14f_c$ или $f_c \approx 7f_{max}$.

Это значит, что входной импеданс интерфейсной схемы должен обеспечивать получение достаточно высокого значения частоты перегиба. Например, если максимальная частота внешнего сигнала составляет 100 Гц, частота перегиба должна быть не менее 700 Гц. На практике стремятся реализовать f_c как можно выше, чтобы не вносить дополнительных ограничений по ограниченную частотную полосу пропускания.

При разработке согласующих схем необходимо анализировать быстродействие их входных элементов. Обычно на входе интерфейсов стоят операционные усилители (ОУ), имеющие ограниченную частотную полосу пропускания.

На рис. 3 показана более подробная эквивалентная схема входных цепей пассивного интерфейса, состоящего из ОУ (здесь слово *пассивный* означает, что согласующая схема не генерирует никаких сигналов возбуждения). Схема состоит из входного импеданса Z_{in} нескольких генераторов, представляющих напряжения и токи, формируемые внутри схемы. Все эти сигналы являются паразитными и, если их не компенсировать, могут причинить много проблем. К тому же они меняют свои значения в зависимости от температуры.

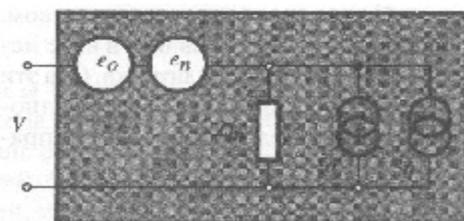


Рис. 3. Эквивалентная схема, учитывающая источники помех во входных цепях интерфейса

Напряжение e_o называется входным *напряжением смещения*. При закороченных входных выводах друг на друга это напряжение соответствует величине постоянной составляющей сигнала на входе схемы. Следует отметить, что источник напряжения смещения подключен последовательно к входу схемы, что указывает на независимость этой погрешности от величины выходного импеданса датчика.

Ток i_o называется *током смещения*. Для многих биполярных транзисторов его величина довольно велика, для полевых транзисторов с управляемым р-п переходом она гораздо ниже, а для КМОП схем - совсем незначительна. Этот ток может привести к серьезным проблемам в случаях, когда в состав датчиков и интерфейсов входят компоненты, обладающие высоким импедансом, поскольку, проходя через входные цепи интерфейса и выходные цепи датчика, он вызывает паразитное падение напряжения. Это напряжение будет тем выше, чем больше импеданс этих цепей. В некоторых случаях оно может быть довольно значительным. Например, если пьезоэлектрический датчик подсоединить к схеме с входным сопротивлением 1 ГОм (10^9 Ом), при токе смещения 1 нА (10^{-9} А) паразитное напряжение на входе интерфейса составит $1 \text{ ГОм} \times 1 \text{ нА} = 1 \text{ В}$, что довольно существенно. В отличие от напряжения смещения, ток смещения приводит к появлению ошибки, пропорциональной выходному импедансу датчика. Эта погрешность незначительна для датчиков с низким выходным сопротивлением. Например, индуктивные детекторы нечувствительны к величине или изменениям тока смещения.

При работе с высокоимпедансными схемами к большим погрешностям может привести *ток утечки*, возникающий из-за низкого поверхностного сопротивления печатных плат. Источниками возникновения тока утечки могут быть: плохое качество материала плат, загрязнение поверхности остатками припоя (плохо очищенные платы), влага и плохое покрытие. На рис. 4 показан путь тока утечки: через шину питания, сопротивление платы R_L и выходной импеданс датчика. Если датчик имеет емкостную природу, ток утечки очень быстро зарядит его выходную емкость. Паразитный ток утечки не только приводит к появлению погрешности, но и может вывести датчик из строя.

Существует несколько способов снижения токов утечки. Один из них - правильная разводка платы, когда высоковольтные проводники отделены от высокоимпедансных компонентов. Погрешностями, вызванными утечками по толщине многослойных плат, на практике можно пренебречь. Другой способ - самый старый - электрическая защита. Так называемое, активное экранирование является довольно эффективной защитой входных цепей. Для этого входные цепи окружаются проводящим экраном, подсоединенным к точке, потенциал которой равен потенциалу на входе интерфейса.

Такая защита позволяет поглощать токи утечки, возникающие на разных участках платы, и значительно уменьшать токи, способные достичь входных выводов. Для более эффективной защиты с двух сторон печатной платы иногда формируют активные экранирующие контуры.

Всегда надо стремиться располагать интерфейсные схемы, обладающие высоким импедансом, как можно ближе к датчикам. Однако избежать соединительных линий не всегда удастся. В таких случаях рекомендуется использовать коаксиальные кабели с хорошей изоляцией. Самой лучшей считается изоляция из полиэтилена или первичного (не переработанного) тефлона. Также необходимо помнить, что даже очень короткие отрезки кабеля могут значительно сократить ширину полосы пропускания.

Следует избегать подсоединения к входу усилителя любых компонентов, помимо самих датчиков, поскольку они являются потенциальными источниками помех. Например, для подавления высокочастотных помех на вход интерфейса или в цепь обратной связи входных устройств часто ставятся фильтрующие конденсаторы. Если в целях экономии либо денег, либо пространства разработчик решит использовать для этого керамический конденсатор, он может столкнуться с неожиданным эффектом. Многие конденсаторы (особенно керамические) обла-

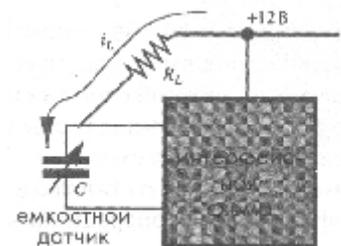


Рис.4. Ток утечки приводит к изменению характеристик входных цепей

дают, так называемым, эффектом «памяти». Если такой конденсатор подвергается воздействию всплеска напряжения: либо от датчика, либо от блока питания, либо от внешнего источника помех, он быстро заряжается, а для разряда ему может потребоваться время от нескольких секунд до многих часов. Пока этого не произойдет, он будет вести себя как маленькая батарейка, напряжение от которой будет складываться с сигналом датчика, что может привести к значительным ошибкам в результатах измерений. Если избежать использования конденсаторов во входных цепях невозможно, надо вместо керамических применять пленочные конденсаторы, в которых эффект «памяти» практически отсутствует.

УСИЛИТЕЛИ

Большинство пассивных датчиков обладают очень слабыми выходными сигналами. Их величина часто не превышает нескольких микровольт или пикоампер. С другой стороны входные сигналы стандартных электронных устройств обработки данных, таких как АЦП, частотные модуляторы, различные регистраторы и т.д. должны быть гораздо выше: порядка вольт или миллиампер. Поэтому для подключения датчиков к таким устройствам требуются промежуточные усилители с коэффициентами усиления по напряжению до 10000, а по току до 1 000000. Усилители, как правило, являются одной из составных частей интерфейсных схем. В настоящее время чаще всего используются усилители, построенные на основе ОУ и пассивных дискретных компонентах.

Операционные усилители

Составной частью практически всех современных усилительных схем являются операционные усилители (ОУ), которые могут быть интегрированными (монолитными) или гибридными (состоящими из монолитных и дискретных частей). В состав интегрированного ОУ входят сотни транзисторов, резисторов и конденсаторов. Разработчики аналоговых устройств, меняя подключение дискретных компонентов к выводам ОУ, реализовали большое количество полезных схем (не только усилительных). На основе ОУ строятся специализированные ИС, часто называемые интегральными схемами прикладной ориентации (ASIC).

На рис. 1 показано схематичное представление ОУ. Типовой ОУ, как правило, обладает следующими характеристиками:

- Двумя входами: инвертирующим (-) и неинвертирующим (+)
- Высоким входным сопротивлением (порядка сотен МОм и даже ГОм)
- Низким выходным сопротивлением (доли Ома)
- Способностью работать с емкостной нагрузкой
- Низким входным напряжением смещения e_o (несколько мВ и даже мкВ)
- Низким входным током смещения i_o (несколько пА и даже меньше)
- Очень высоким коэффициентом усиления при разомкнутой цепи обратной связи (ОС) A_{OL} ($10^4 \dots 10^6$ и даже выше). Этот коэффициент показывает, во сколько раз ОУ увеличивает разность напряжений между двумя входами
- Высоким коэффициентом ослабления синфазного сигнала (КОСС). КОСС показывает, насколько эффективно ОУ подавляет синфазные сигналы одинаковой амплитуды V_{CM} , одновременно поданные на оба входа
- Низким коэффициентом собственного шума
- Широким рабочим частотным диапазоном
- Низкой чувствительностью к помехам по шине питания
- Высокой стабильностью характеристик при изменении параметров окружающей среды

На рис. 1А показан ОУ без цепи ОС. Такой усилитель часто называют ОУ с разомкнутым контуром ОС. В справочниках приводятся значения коэффициентов усиления ОУ без ОС, которые не являются постоянными во всем частотном диапазоне. Зависимость этих коэффициентов от частоты показана на рис. 1Б. На значения коэффициентов усиления ОУ также влияют

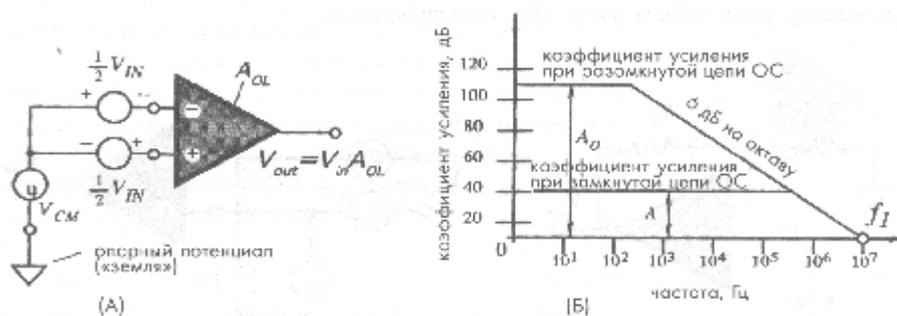


Рис. 1. А - основное символическое обозначение ОУ, Б - зависимость коэффициента усиления ОУ от частоты

сопротивление нагрузки, температура окружающей среды и флуктуации напряжения питания. ОУ без ОС практически никогда не используются, поскольку высокий коэффициент усиления приводит к не стабильной работе схемы, сильному температурному дрейфу характеристик, повышенному шуму и т.д. Например, при коэффициенте усиления ОУ без ОС, равном 10^5 , входной дрейф напряжения в 10 мкВ вызовет дрейф выходного напряжения порядка 1 В.

Произведение коэффициента усиления на ширину полосы пропускания характеризует способность ОУ усиливать высокочастотные сигналы малой амплитуды. Это произведение равно частоте f_1 , при которой коэффициент усиления ОУ становится равным 1, т.е. ОУ перестает усиливать сигнал.

На рис. 2А показан неинвертирующий усилитель. В этом усилителе цепь ОС сформирована двумя резисторами: R_1 и R_2 . Результирующий коэффициент усиления такого усилителя с ОС равен: $A = 1 + R_2/R_1$. Он будет постоянным в более широком частотном диапазоне (см. рис. 1Б), но ограничивающая частота f_1 останется такой же, как и в ОУ без ОС. Глубина ОС определяет такие параметры этой схемы, как линейность, стабильность коэффициента усиления и выходной импеданс, которые теперь в основном зависят от характеристик компонентов ОС. Для получения высокой точности необходимо обеспечить выполнение следующего правила: коэффициент усиления ОУ без ОС должен быть, по крайней мере, в 100 раз больше коэффициента усиления ОУ с ОС на самой высокой рабочей частоте. Для более высокой точности это отношение должно быть равно 1000 и даже больше.

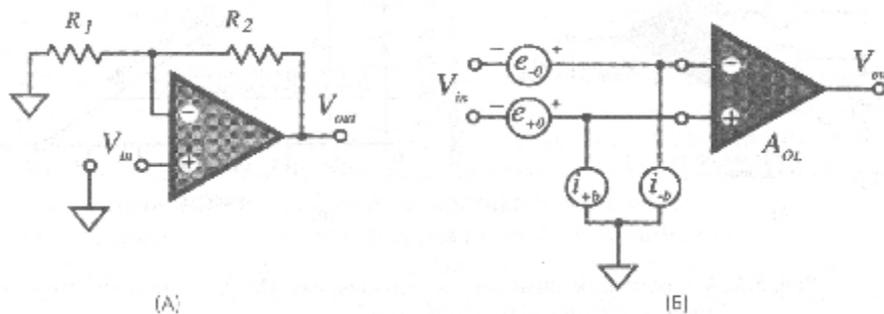


Рис. 2. А - неинвертирующий усилитель, Б - генераторы, подсоединенные ко входам ОУ, представляют напряжения и токи

ОУ усиливают не только полезные сигналы, но и паразитные напряжения и токи, попадающие на их входы (рис. 2Б). Поэтому в справочной литературе для них обычно приводятся технологические допуски на значения токов и напряжений смещения.

Из-за напряжений и токов смещения выходной сигнал интерфейсной схемы при нулевом входном сигнале практически никогда не бывает равным нулю. В схемах, работающих с постоянными или медленно меняющимися сигналами, серьезной проблемой является освобождение полезного сигнала от этих нежелательных компонентов. На практике величину напряжения смещения регулируют двумя способами: непосредственно на ОУ (если в нем предусмотрены регулировочные выводы) или при помощи независимых внешних компенсационных цепей.

Величину выходного напряжения смещения можно определить из выражения:

$$V_0 = A(e_o + i_o R_{eqv}),$$

где R_{eqv} - эквивалентное входное сопротивление, состоящее из выходного сопротивления датчика и входного сопротивления усилителя; e_o - входное напряжение смещения, а i_o - входной ток смещения.

Величина смещения тока и напряжений зависит от температуры. В схемах, где ОУ работает с большим коэффициентом усиления, выходное напряжение смещения может служить источником серьезных погрешностей. Существует несколько способов решения этой проблемы. Одним из них является выбор ОУ с низким значением тока и напряжения смещения, а также высоким входным сопротивлением. Для эффективного снижения напряжения смещения также применяются усилители постоянного тока с модуляцией и демодуляцией сигнала.

Повторители напряжения

Назначение повторителя напряжений (рис. 3) - преобразование импеданса от высокого уровня к низкому. Повторитель, как правило, обладает высоким входным импедансом (высоким входным сопротивлением и низкой входной емкостью) и низким выходным сопротивлением (выходная емкость не имеет никакого значения). Хороший повторитель имеет близкий к единице коэффициент усиления по напряжению (обычно 0.999 на низких частотах) и высокий коэффициент усиления по току. По существу, повторитель напряжения является усилителем тока и преобразователем импеданса. Высокий входной и низкий выходной импеданс повторителей делает их незаменимыми элементами при согласовании датчиков с устройствами обработки сигналов.

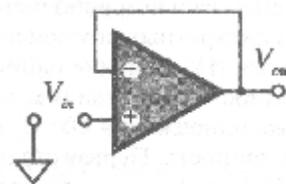


Рис. 3. Повторитель напряжений на ОУ

Повторитель, подключенный к выходу датчика, не оказывает практически никакого влияния на работу последующих цепей, поэтому его часто называют буферным устройством между сенсором и нагрузкой. При разработке повторителей следует придерживаться следующих рекомендаций:

- При подключении к датчикам с токовым выходом входной ток смещения повторителя должен быть, по крайней мере, в 100 раз меньше тока датчика
- Если невозможно полностью компенсировать входное напряжение смещения, оно не должно превышать величину младшего значащего разряда (МЗР)
- Температурный коэффициент тока и напряжения смещения не должен приводить к появлению погрешности, превышающей 1 МЗР во всем температурном диапазоне

Измерительный усилитель

Измерительный усилитель (ИУ) имеет два входа и один выход. В отличие от ОУ он обладает конечным коэффициентом усиления (его величина обычно не более 100) и возможностью подключения источников сигнала одновременно на два входа. Это означает, что все компоненты цепи ОС подключаются не к инвертирующему и неинвертирующему входам, а к другим выводам ИУ. Основная функция ИУ - формирование выходного сигнала, пропорционального разности напряжений на его входах:

$$V_{out} = A(V_+ - V_-) = A\Delta V$$

где V_+ и V_- - напряжения на инвертирующем и неинвертирующем входах, а A - коэффициент усиления.

Измерительные усилители могут быть реализованы на основе ОУ по интегральной или гибридной технологиям. Важным свойством ИУ является высокое сопротивление по обоим входам, что позволяет ему выступать в роли дифференциального усилителя и эффективно подавлять синфазные аддитивные помехи.

Хотя в настоящее время можно приобрести промышленно выпускаемые ИУ в интегральном исполнении, на практике многие применяют ИУ, реализованные из дискретных компонентов. На рис. 4 показана наиболее часто используемая схема ИУ. Падение напряжения на резисторе R_a настраивается равным входной разности ΔV , тогда ток, протекающий через него, будет равен: $I = \Delta V/R_a$. Выходные напряжения ОУ U_1 и U_2 равны друг другу по амплитуде, но имеют разную полярность. Первая стадия усиления входной разности напряжений проходит на ОУ U_1 и U_2 , которые можно представить в виде

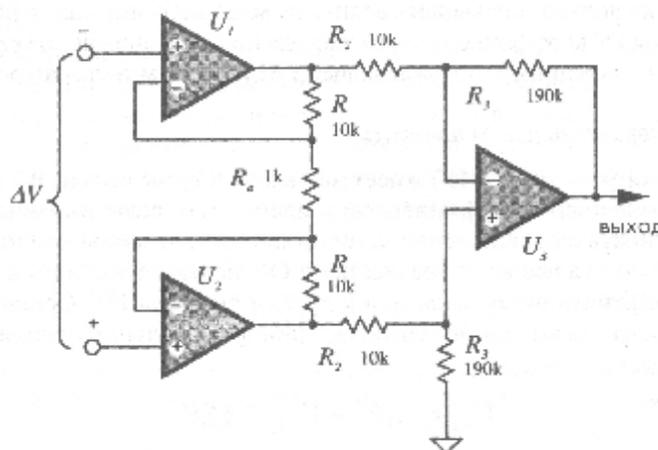


Рис. 4. Измерительный усилитель на трех ОУ с точно подобранными резисторами

одного усилителя, имеющего дифференциальные входы и дифференциальные выходы. Вторая стадия усиления осуществляется на ОУ U_3 , преобразующем дифференциальный входной сигнал в униполярный выходной. Полный коэффициент усиления ИУ можно найти из выражения:

$$A = \left(1 + \frac{2R}{R_a}\right) \frac{R_3}{R_2}.$$

Величина коэффициента ослабления синфазного сигнала (КОСС) зависит от того, насколько точно в этой схеме подобраны резисторы. Как правило, при использовании резисторов 1 % точности КОСС не превышает значения 100, тогда как для резисторов 0.1 % точности КОСС имеет на порядок более высокие значения.

Усилители заряда

Характерной чертой усилителей заряда (УЗ) является очень низкий ток смещения. Такие усилители используются для преобразования в напряжение сигналов от емкостных датчиков, квантовых детекторов, пироэлектрических чувствительных элементов и других устройств, имеющих на выходе либо очень маленькие заряды (порядка пикокулон, пКл), либо очень маленькие токи (порядка пикоампер, пА). Поэтому УЗ по своей сути является преобразователем заряда в напряжение. На рис. 5А показана принципиальная схема УЗ. В цепи ОС ОУ стоит конденсатор C , сопротивление утечки которого r должно быть значительно большим его импеданса на самой низкой рабочей частоте. В УЗ можно использовать только хорошие пленочные конденсаторы. Также необходимо уделять большое внимание качеству печатных плат и равномерному покрытию всех их компонентов.

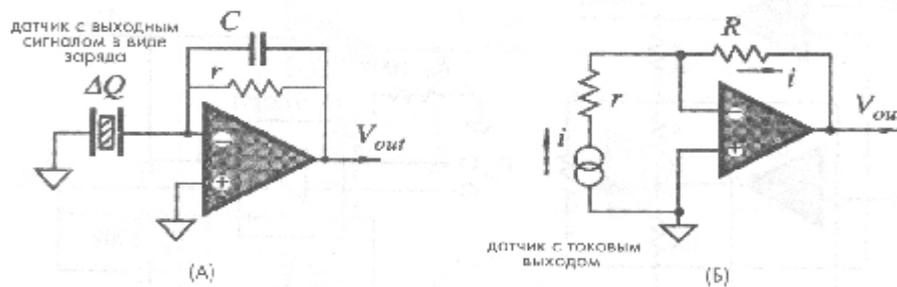


Рис. 5. Преобразователи заряда (А) и тока (Б) в напряжение

Передаточную функцию УЗ можно представить в виде

$$V_{out} = -\frac{\Delta Q}{C}.$$

Многие датчики могут быть представлены в виде конденсаторов. Часть емкостных датчиков, таких как микрофоны, емкостные датчики силы и давления, а также детекторы влажности, являются активными устройствами, т.е. для работы им требуется сигнал возбуждения. Другая часть емкостных датчиков являются пассивными устройствами, напрямую преобразующими внешнее воздействие в электрический заряд или ток. Примерами таких датчиков могут быть пьезоэлектрические и пироэлектрические детекторы. Существуют также не емкостные датчики, которые можно рассматривать как генераторы тока. Фотодиод – представитель этой группы.

Датчик с токовым выходом можно представить в виде сопротивления утечки r , соединенного параллельно с генератором тока, обладающим бесконечно большим внутренним сопротивлением (рис. 6). Датчик вырабатывает ток i , который может течь в двух направлениях: через сопротивление r внутри датчика (ток i_o) и через интерфейсную схему с входным импедансом Z_L (ток i_{out}). Поскольку ток i_o по своей сути является паразитным, следует стремиться к тому, чтобы сопротивление утечки датчика было намного больше импеданса интерфейса.

Из закона Ома следует, что для преобразования электрического тока i_{out} в напряжение ток должен пройти через нагрузку с определенным импедансом, тогда падение напряжения на этой

нагрузке будет пропорционально величине этого тока. На рис. 5Б показана принципиальная схема преобразователя тока в напряжение, в которой датчик с токовым выходом подключен к инвертирующему входу ОУ, играющему роль виртуальной земли. В этой схеме напряжение на инвертирующем входе почти равно напряжению на неинвертирующем заземленном входе ОУ. Следовательно, датчик работает при почти нулевой разности потенциалов на своих выводах, а ток, протекающий через него, определяется выходным напряжением ОУ:

$$V_{out} = -iR.$$

Для устойчивости работы схемы r должно быть намного меньше R . На высоких частотах ОУ работает практически с разомкнутой ОС, т.е. с очень большим коэффициентом усиления, что может привести к возникновению колебаний. Это особенно важно помнить при использовании датчиков с низким сопротивлением утечки. Преимуществом схем с виртуальной землей является независимость выходного сигнала от емкости датчика.

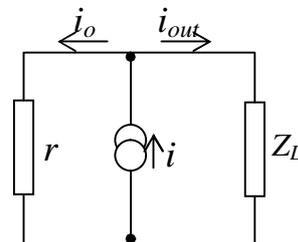


Рис. 6. Эквивалентная схема датчика с токовым выходом

МОСТОВЫЕ СХЕМЫ

Мостовая схема Уитстона является самой популярной схемой, используемой для измерения отношений. На рис.1 показана принципиальная схема измерительного моста. Импедансы Z могут быть как активными, так и реактивными, т.е. они могут быть и обычными сопротивлениями, как в случае пьезорезистивных датчиков, и конденсаторами, и индукторами. Для резисторов импеданс всегда равен R , для идеального конденсатора $Z = 1/2\pi fC$, а для индуктора $Z = 2\pi fL$, где f — частота тока, протекающего через элемент. Выходное напряжение моста определяется следующим соотношением:

$$V_{out} = \left(\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} - \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \right) V_{ref}, \quad (1)$$

где V_{ref} - опорное напряжение.

При выполнении следующего условия мост считается сбалансированным:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad (2)$$

Выходное напряжение сбалансированного моста равно нулю. При изменении импеданса в любом плече моста, он выходит из состояния равновесия, и в зависимости от того увеличился или уменьшился этот импеданс, на выходе моста появляется либо положительное, либо отрицательное напряжение. Для определения чувствительности выходного напряжения к изменению импеданса каждого плеча моста (калибровочные коэффициенты) надо найти соответствующие частные производные выражения (1):

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_{out}}{\partial Z_1} &= \frac{Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} V_{ref}, \\ \frac{\partial V_{out}}{\partial Z_2} &= -\frac{Z_1}{(Z_1 + Z_2)^2} V_{ref}, \\ \frac{\partial V_{out}}{\partial Z_3} &= -\frac{Z_4}{(Z_3 + Z_4)^2} V_{ref}, \\ \frac{\partial V_{out}}{\partial Z_4} &= \frac{Z_3}{(Z_3 + Z_4)^2} V_{ref}. \end{aligned} \quad (3)$$

Суммируя эти уравнения, получим выражение для чувствительности моста

$$\frac{\delta V_{out}}{V_{ref}} = \frac{Z_2 \delta Z_1 - Z_1 \delta Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} - \frac{Z_4 \delta Z_3 - Z_3 \delta Z_4}{(Z_3 + Z_4)^2} \quad (4)$$

Внимательный анализ уравнения (4) показывает, что для компенсации, таких явлений, как температурная нестабильность, дрейф и т.д., идентичными должны быть только импедансы соседних пар (т.е. Z_1 и Z_2 , Z_3 и Z_4). Следует также отметить, что для уравнивания моста необходимо только выполнение условия (2), импедансы при этом не обязаны быть равными. На практике, как правило, переменным делается только один импеданс моста. Этим импедансом часто является датчик. Пусть Z_2 — импеданс датчика, тогда чувствительность моста определяется выражением:

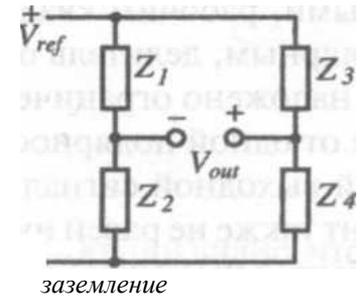


Рис.1 Принципиальная схема моста Уинстона

$$\frac{\delta V_{out}}{V_{ref}} = \frac{\delta Z_1}{4Z_1} \quad (5)$$

Резистивные мостовые схемы часто используются при работе со струнными датчиками, пьезорезистивными преобразователями давления, термисторными термометрами и другими датчиками, где необходимо компенсировать влияние факторов окружающей среды. Подобные устройства также нашли свое применение при работе с емкостными и магнитными датчиками, измеряющими давление, перемещение, влажность и т.д.

Неуравновешенный мост

Схема Уитстона (рис. 2А) часто работает в режиме несбалансированного моста. При включении в одно из плечей такого моста датчика получим измерительную систему, основанную на принципе *рассогласования*. Этот принцип заключается в определении напряжения в диагонали моста. Выходное напряжение моста является нелинейной функцией разбаланса моста Δ . Для малых значений разбаланса ($\Delta < 0.05$), довольно часто встречающихся на практике, эту функцию можно считать квазилинейной. Максимальная чувствительность моста достигается, когда $R_1 = R_2$, а $R_3 = R_4$. Когда $R_1 \gg R_2$ или $R_1 \ll R_2$, выходное напряжение моста значительно уменьшается. Считая, что $k = R_1/R_2$ можно записать следующее уравнение чувствительности

$$\alpha = \frac{V}{R} \frac{k}{(k+1)^2} \quad (6)$$

На рис. 3 показана зависимость чувствительности моста от отношения импедансов, рассчитанная по этой формуле. Из графика видно, что максимальная чувствительность достигается при $k = 1$, а в диапазоне $0.5 < k < 2$ чувствительность падает относительно медленно. Если мост питается от источника тока, а не от источника напряжения, его выходное напряжение при малых значениях Δ в мосте с одним переменным импедансом определяется выражением:

$$V_{out} \approx I \frac{k\Delta}{2(k+1)} \quad (7)$$

где I - ток возбуждения.

Уравновешенный мост

Другой метод использования мостовых схем называется *нуль-балансировкой*. В этом методе решается проблема, связанная с ограничениями, накладываемыми на величину рассогласования моста для достижения хорошей линейности. Для корректной работы в этом режиме мостовая схема в любой момент времени должна находиться в уравновешенном состоянии. Для

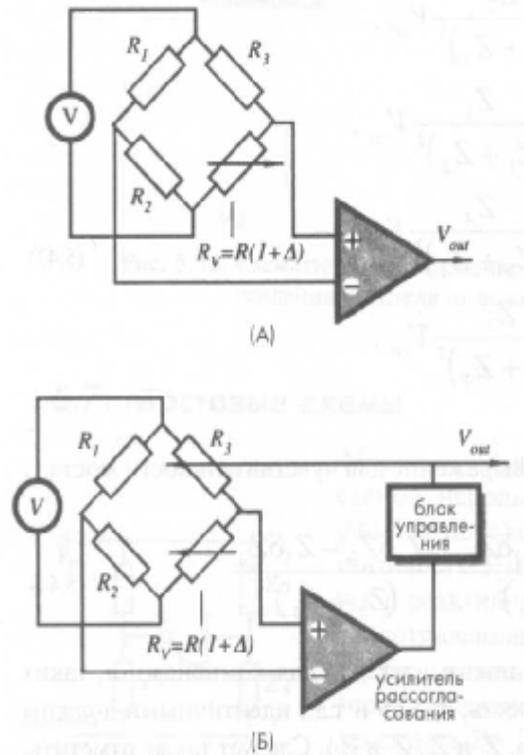


Рис. 2. А — неуравновешенный мост, Б — уравновешенный мост с управляемой ОС

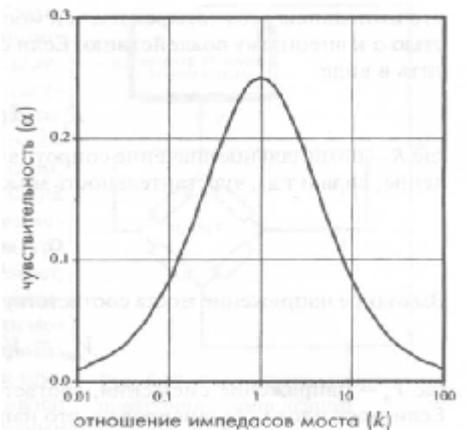


Рис. 3. Зависимость чувствительности разбалансированного моста от отношения импедансов

выполнения условия баланса моста (2) импеданс плеча моста, соседнего с плечом, в котором расположен датчик, должен меняться так же как и импеданс датчика. На рис. 2Б проиллюстрирован принцип построения такой схемы. Изменение величины сопротивления R_3 определяется сигналом усилителя рассогласования. Величина внешнего воздействия в данной системе пропорциональна выходному напряжению, задаваемому управляющим устройством. Пусть в схеме на рис. 2Б в обоих плечах стоят фоторезисторы R_v и R_3 . Величина сопротивления фоторезистора R_3 может задаваться потоком излучений от СИД, управляемого усилителем рассогласования. При этом ток, протекающий через СИД, будет мерой сопротивления R_v , а, следовательно, и мерой интенсивности света, детектируемого датчиком.

Температурная компенсация резистивного моста

Резистивный мост Уитстона широко применяется при измерении температуры, силы, давления, магнитных полей и т.д. В большинстве случаев используемые резисторы обладают температурной чувствительностью. Это приводит к появлению температурной чувствительности передаточной функции, которая может быть аппроксимирована линейной зависимостью. Для большинства датчиков, за исключением детекторов температуры, температурная зависимость является очень нежелательным эффектом, который необходимо компенсировать. Одним из способов компенсации является подключение к датчику устройства, выходной сигнал которого зависит от изменения температуры. Этот сигнал в дальнейшем используется для проведения либо аппаратной, либо программной корректировки показаний датчика. Другой способ — встраивание такого устройства в саму мостовую схему. Проанализируем связь между выходным напряжением моста Уитстона и сигналом возбуждения V_e . Будем считать, что импедансы всех четырех плечей моста обладают одинаковой чувствительностью a к внешнему воздействию. Если сопротивление каждого резистора выразить в виде:

$$R_i = R(1 \pm \alpha s), \quad (8)$$

где R — номинальное значение сопротивления и s — внешнее воздействие (т.е. давление, сила и т.д), чувствительность можно определить как:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{ds}, \quad (9)$$

Выходное напряжение моста соответствует выражению:

$$V_{out} = V_e \alpha s + V_0, \quad (10)$$

где V_0 — напряжение смещения, соответствующее начальному разбалансу моста.

Если мост плохо сбалансирован, это напряжение может стать причиной возникновения значительных погрешностей. Чтобы этого не происходило, датчик необходимо тщательно настраивать как при изготовлении, так и при эксплуатации. В дальнейших рассуждениях будем считать, что значение V_0 не зависит от температуры, т.е. $dV_0/dT=0$. Однако в широких температурных диапазонах (больших $\pm 15^\circ\text{C}$) изменение величины V_0 необходимо учитывать.

Для большинства датчиков величина чувствительности a в выражении (8) зависит от температуры, что также является источником погрешностей. Из выражения (9) следует, что a может меняться при изменении от температуры либо величины R , либо производной dR/ds . Если мост обладает положительным температурным коэффициентом сопротивления, его коэффициент a уменьшается с ростом температуры. В этом случае также говорят, что он имеет отрицательную температурную чувствительность. Взяв частную производную выходного напряжения по температуре в уравнении (10), получим следующее выражение:

$$\frac{\partial V_{out}}{\partial T} = s \left(\alpha \frac{\partial V_e}{\partial T} + \frac{\partial \alpha}{\partial T} V_e \right) \quad (11)$$

Решение этого уравнения для случая, когда выходной сигнал не зависит от температуры (т.е. $dV_{out}/dT=0$), имеет вид:

$$\alpha \frac{\partial V_e}{\partial T} = - \frac{\partial \alpha}{\partial T} V_e \quad (12)$$

Откуда получается выражение:

$$\frac{1}{V_e} \frac{\partial V_e}{\partial T} = - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial T} = -\beta, \quad (13)$$

где β — температурный коэффициент чувствительности (ТКЧ) плеча моста.

Уравнение (13) является условием идеальной температурной компенсации симметричного моста Уитстона. Из этого выражения следует, что для компенсации температурных изменений α , напряжение возбуждения V_e должно меняться с такой же скоростью, но с противоположным знаком. Существует несколько схем, используемых для регулирования V_e . Одна из них показана на рис. 4. В этой схеме используется блок компенсации температуры, управляющий напряжением V_e , питающим мост, по заранее определенной температурной зависимости. Блок температурной компенсации может быть реализован несколькими способами.

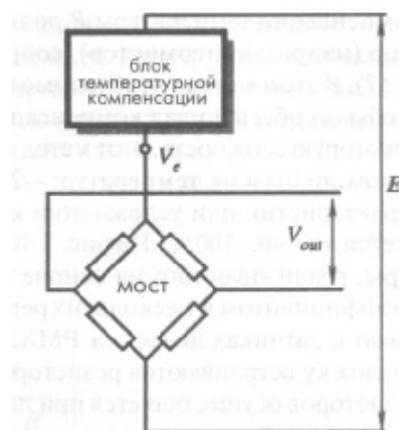


Рис. 4. Схема моста с цепью температурной компенсации

Каждый метод температурной компенсации имеет свои границы применения, и в каждом конкретном случае необходимо учитывать ряд факторов: температурный диапазон, допустимую температурную погрешность, окружающие условия, размеры, стоимость и т.д. К сожалению, универсального решения этой проблемы не существует, выбор способа температурной компенсации — это всегда компромисс между различными техническими ограничениями.

Мостовые усилители

Мостовые усилители резистивных датчиков являются одной из самых распространенных интерфейсных схем. Они могут быть нескольких конфигураций. Выбор конфигурации зависит от требуемого способа заземления и от типа используемого источника эталонного напряжения (заземленного или плавающего). На рис. 5А показан так называемый активный мост, в котором переменный резистор (датчик), включенный в цепь ОС ОУ, является плавающим (т.е. изолированным от земли). Если резистивный датчик описать функцией первого порядка:

$$R_x \approx R_0(1 + \alpha),$$

выражение для передаточной функции всей цепи будет иметь вид:

$$V_{out} = -\frac{1}{2} \alpha V.$$

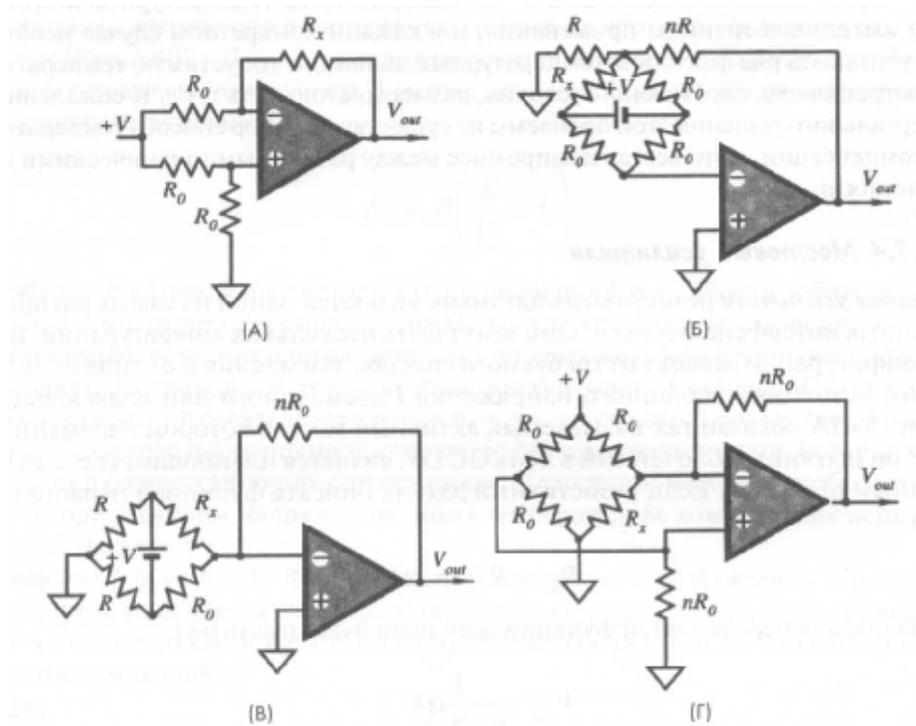


Рис. 5. Подключение ОУ к резистивному мосту.

На рис. 5Б показана схема с плавающим мостом и плавающим источником эталонного напряжения V . В этой схеме коэффициент усиления определяется резистором в цепи ОС, равным nR_0 :

$$V_{out} = (1+n)\alpha \frac{V}{4} \frac{1}{1+\alpha/2} \approx (1+n)\alpha \frac{V}{4}.$$

На рис. 5В показана схема с несимметричными резисторами ($R \neq R_0$). В этой схеме используется плавающий источник эталонного напряжения V . Передаточная функция здесь определяется выражением:

$$V_{out} = n\alpha \frac{V}{4} \frac{1}{1+\alpha/2} \approx n\alpha \frac{V}{4}.$$

При использовании заземленного резистивного датчика часто применяется схема, показанная на рис. 5Г. Выражение для передаточной функции имеет вид:

$$V_{out} = -\frac{n}{2} \frac{V}{1+1/2n} \frac{\alpha}{1+\alpha} \approx -\frac{n}{2} \frac{V}{1+1/2n} \alpha.$$