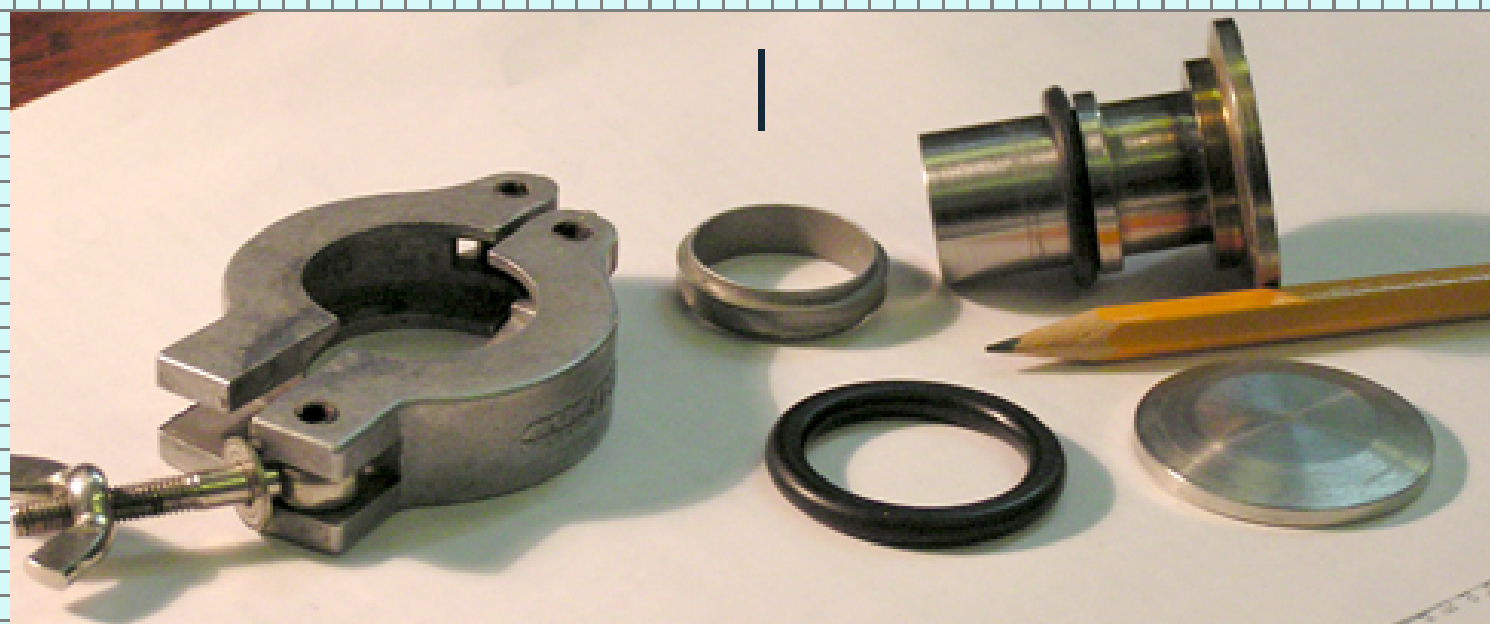


В.Т. Долгополов

# ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ



2022

В 378

Д 64

Долгополов, В.Т. Основы измерений : лекции. – Черноголовка: ИФТТ РАН, 2022. – 73 с.

Утверждено Ученым советом Института физики твердого тела РАН. Рекомендовано студентам высших учебных заведений, аспирантам, обучающимся по направлениям: «Физика конденсированного состояния». Может быть полезным пособием при подготовке студентов и аспирантов других специальностей с частично совпадающей программой обучения.

Данная книга является дополненным и переработанным вариантом лекций, читавшихся студентам МФТИ в течение ряда лет, на кафедре физики твердого тела в ИФТТ РАН, и может быть использована в качестве учебного пособия для студентов, магистрантов, аспирантов, а также инженерно-технических работников. В книге содержатся вопросы и задачи по изложенному курсу.

© Долгополов, В.Т., 2022  
© ИФТТ РАН, 2022

## Предисловие

Приведенный ниже текст является записью лекций, прочитанных автором в 2001-2005 годах студентам четвертого семестра МФТИ. В этом семестре студенты Кафедры физики твердого тела впервые появляются в стенах научного института, поэтому курс, в значительной мере, имеет ознакомительный характер.

В следующих двух семестрах студенты знакомятся с экспериментальной техникой как в лабораториях, так и на семинарах по технике эксперимента значительно более детально. Следует отметить, что лабораторное оборудование, внешний вид лабораторий и навыки, необходимые экспериментатору, радикально изменились на жизни одного поколения. Из лабораторий практически полностью исчезли стеклянные приборы, медь в низкотемпературном оборудовании заменена нержавеющей сталью, пайку заменила сварка, появилась и исчезла ламповая измерительная радиотехника. Скорее всего, прогресс лабораторной техники и далее будет происходить столь же быстро. Поэтому лекции, подобные приведенным ниже, в принципе, не могут служить долго в неизменном виде.

## 1. Введение

Мы помним, что физика – это наука экспериментальная. Слова эти означают, что любое теоретическое предсказание, особенно в областях еще мало исследованных, должно быть проверено в эксперименте. Даже, если это предсказание базируется на законах давно и надежно установленных. Причина подобного «недоверия» к теории базируется на том основании, что в любом расчете приходится делать некоторые предположения об объекте (моделировать объект) и пренебрегать мелкими особенностями реального объекта или, казалось бы, незначительным его взаимодействием с другими объектами. Поэтому справедливость теоретических предсказаний, их точность и пределы их применимости должны быть изучены экспериментально.

Учившие марксистско-ленинскую философию в обязательном порядке должны были знать фразу: «Практика является критерием истины». Чем же отличается практика от эксперимента и почему физика базируется на эксперименте, а не на практике?

И в своей практической деятельности, и в эксперименте человечество задает природе вопросы и пытается получить от нее ответы. В практической деятельности вопросы имеют прагматическую направленность, а потому далеко не всегда четко поставлены и почти всегда бессистемны. Отличительной особенностью эксперимента является осмысленность постановки вопроса, направленность на получение ясного ответа, воспроизводимость результата и, наконец, проверка независимым экспериментом (контрольным опытом).

В качестве примера можно привести механику Аристотеля, возникшую как обобщение практических знаний, продержавшуюся тысячелетие и сравнительно недавно замененную Ньютоновой механикой. Аристотелева механика описывала движение с трением (вязкое движение), сила в ней, на современном языке, была пропорциональна скорости установившегося равномерного прямолинейного движения. Как мы помним, в Ньютоновой механике сила пропорциональна ускорению. Однако установить этот факт из практической жизни оказалось не просто. Когда же возник эксперимент в современном его понимании? По-видимому, в 17 веке. Рассмотрим, в качестве примера, одни из самых древних, эксперименты Галилео Галилея (см. рис.1) по исследованию закона всемирного тяготения.

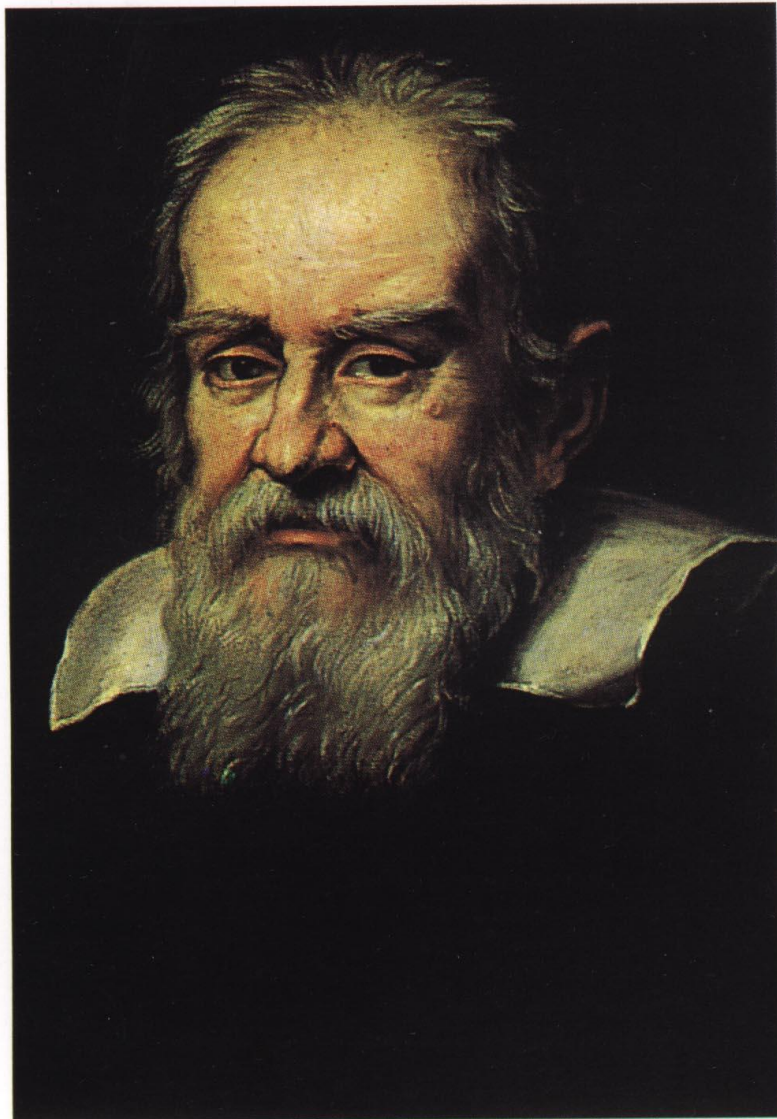


Рис. 1. Галилео Галилей (1564-1642)

Этот эксперимент проводился на знаменитой Пизанской башне, которая имела значительный наклон уже сразу после завершения строительных работ (см. Рис.2). Галилей сбрасывал с различных этажей башни специально изготовленные сферические тела (рис. 3).

*Задача. Сформулируйте проблемы, ответ на которые мог быть получен Галилеем в ходе экспериментов.*

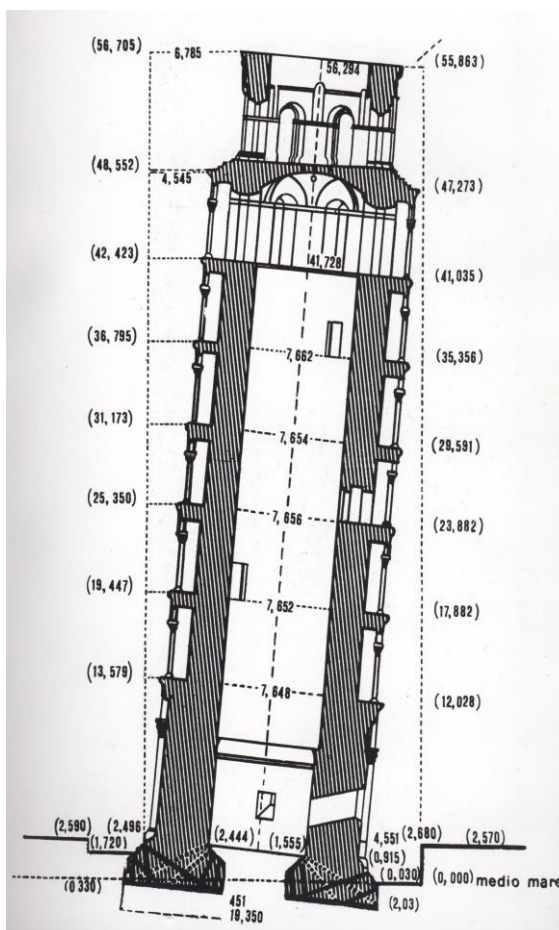


Рис. 2. Фотография и схема башни.



Рис. 3. Сферические тела, использовавшиеся Галилеем.

Обратите внимание на эти тела, фотографии которых приведены на рис. 3. Их поверхность покрыта довольно сложным рисунком, абсолютно не нужным для проведения опыта. Зачем же понадобился рисунок? Исключительно для того, чтобы произвести впечатление на профанов. Здесь мы сталкиваемся с любопытнейшей проблемой, сохранившейся и до нашего времени. Дело в том, что человек или коллективный орган, выделяющий деньги на исследования, как правило, не может оценить ни степени важности исследований, ни их практической значимости, ни квалификации того, кто исследования предлагает. Важнейшую роль при этом приобретает популяризация достигнутого и демонстрационные опыты. Демонстрация, с одной стороны, должна реально отражать достигнутое, а с другой, производить на неподготовленного зрителя достаточное впечатление. Пренебрегать этой частью работы ни в коем случае нельзя, поскольку при отсутствии реальных достижений нишу якобы научных демонстраций занимают всякого рода шарлатаны.

В качестве несколько более современного примера я могу привести фильм, в котором был снят П.Л. Капица, и где показывалось, как он берет цветок, на минуту опускает его в жидкий азот, после чего хрупкий цветок разбивает молотком. В сущности, ничего удивительного в показанном сюжете нет, но демонстрация сверхбыстрого охлаждения производит на неподготовленного зрителя большое впечатление, также как и демонстрация жидкого «воздуха». Популяризация процесса получения фундаментальных знаний со временем, к сожалению, становится все более сложной, но не менее необходимой, чем во времена Галилея.

Кстати, экспериментальной наукой физика была не всегда, а некоторые ее разделы не являются экспериментальными и поныне. Так, астрономия – это не экспериментальная, а наблюдательная наука, хотя по мере развития космических исследований положение и здесь меняется.

Несомненно, изучать экспериментальные методы и технику измерений нужно не по книге, не в аудитории, а в лаборатории. Основная работа по этой части для каждого из вас еще впереди. Ниже мы обсудим только ряд общих понятий, принципов и подходов, не требующих работы с оборудованием.

## 2. Наука фундаментальная и прикладная

По цели исследований, довольно условно, науку можно разделить на прикладную и фундаментальную. Прикладная наука имеет своей целью получение практически значимого результата, поиск оптимального решения практически значимой проблемы (создание новых материалов с заданными свойствами, разработка сенсоров, новых источников энергии или новых способов шифровки информации, например). В промышленно развитых странах прикладная наука получает значительную поддержку от промышленности, а научные сотрудники, работающие в этом секторе науки, являются наиболее обеспеченными и уважаемыми.

Единственной целью фундаментальной науки является получение новых знаний, то есть в конечном счете, написание новых разделов учебника или справочника. Легко себе представить сколько стоит каждая новая строчка учебника! Проблема исследователя, работающего в этой области науки заключается в том, чтобы определить, какие разделы учебника еще не написаны. Другими словами, для работы в фундаментальной науке необходимо определенное чутье на новое и довольно высокая квалификация. Для поддержания квалификации удобно наряду с исследованиями заниматься преподавательской деятельностью. Поэтому во многих странах фундаментальная наука сосредоточена исключительно в университетах. Соединение университетского преподавания с фундаментальными исследованиями позволяет к тому же оправдать занятие фундаментальной наукой в глазах

налогоплательщика и привить каждому из университетских выпускников навыки к исследовательской работе.

Среди физических наук имеется сектор, промежуточный между фундаментальными и прикладными исследованиями. Это, так называемая, наука о материалах. Этот раздел, как и раздел прикладных исследований, посвящен изучению конкретных материалов, в конечном счете ориентирован на практические нужды, но не ставит своей целью получение быстрого конкретного результата, что сближает его с фундаментальными исследованиями.

***Запомним: Не всякое исследование, не имеющее практической значимости, относится к фундаментальной науке!***

### **3. Что «лучше», подтвердить или опровергнуть теорию?**

Вопрос, вынесенный в заголовок кажется бессмысленным, поскольку «лучше» знать истину. И все же этот вопрос не так прост.

*В студенческие времена, начиная с четвертого курса, мы посещали заседания Ученого совета Института физических проблем. Вел заседание, как правило, П.Л. Капица. В конце каждого доклада он высказывал свое суждение о прослушанной работе.*

*По экспериментальным работам таких суждений было три: во-первых, работа не доделана, если Капица обнаруживал недостаток экспериментальных данных или слабо аргументированные выводы. Во-вторых, работа добротная, средняя. Этой оценки удостоивались работы, в которых наблюдалось полное согласие с теорией. Капица считал, что такая работа закрывает вопрос и потому малоинтересна. Высшей оценки удостоивались исследования, в которых эксперимент расходился с теоретическими предсказаниями, если, конечно, экспериментальные выводы имели солидную базу.*

Действительно, экспериментальная работа, подтверждающая теорию, не вызывает желания у других экспериментаторов проверить ее результаты еще раз. Ее место в обзорных статьях. Экспериментаторы вспомнят о ней только в том редком случае, если в проверявшейся теории будет найден какой-либо дефект, если она окажется неполной или ошибочной.

Совершенно другая ситуация с публикацией, опровергающей теорию. Она сразу же получает оппозицию в лице авторов и приверженцев теории. Все ее данные и выводы несомненно будут тщательно проанализированы с целью выявления возможной ошибки. Более того, такая работа обязательно будет перепроверена независимыми исследователями.

Как видно, публикация работы, опровергающей теорию, требует, вообще говоря, более тщательных исследований, более высокой квалификации исследователя и определенной отваги, наконец.

### **4. Что такое «измерение», и какие измерения бывают**

Для проведения любого эксперимента нужно, во-первых, определить физические величины, во-вторых, уметь их измерить. Поскольку любая физическая величина задается способом ее измерения, в сущности, необходимо только умение и аппаратура для измерений. В следующих главах курса мы рассмотрим вопросы, связанные с измерением физических величин более подробно.

Наивно кажется, что измерение – это сравнение исследуемого тела, характеристики, величины с эталоном. На самом деле, это более общий процесс.

Определим измерение как отображение элементов эмпирического множества на элементы абстрактного воображаемого множества, осуществляемое по определенным правилам преобразования. Соотношения, существующие между элементами исходного множества, должны сохраняться и в воображаемом множестве. Например, два элемента могут быть эквивалентны или неэквивалентны. Как правило, пространство образов не является единственным, то есть отображение может быть по «законным» правилам перенесено на другое множество образов. Простейшим примером такой операции является смена масштаба в измерениях.

Все возможные измерения разбиваются на несколько групп.

(1) Номинальное измерение.

Если измеряются элементы множества  $S$ , то измерительная система должна быть способна определить  $s_1=s_2$  или  $s_1 \neq s_2$ . Допустимое преобразование множества результатов измерений осуществляется взаимно-однозначным преобразованием.  $g(i_1)=g(i_2)$ , если  $i_1=i_2$ , и  $g(i_1) \neq g(i_2)$ , если  $i_1 \neq i_2$ . Примеры номинальных измерений нам хорошо известны из ботаники и биологии, как разделение по классам, отрядам и т.д.

*Пример номинального измерения. Какой символ здесь лишний?*

**Л, D, R, 4, Ф, ы, Ъ**

(2) Порядковое измерение.

$s_1 > s_2$  или  $s_1 < s_2$ . Допустимое преобразование осуществляется произвольной монотонно возрастающей функцией  $g(i_1) > g(i_2)$ , если  $i_1 > i_2$ , и  $g(i_1) < g(i_2)$ , если  $i_1 < i_2$ . Измерение такого типа производят, например, солдаты при построении по росту.

(3) Интервальное измерение.

В интервальном измерении помимо условия  $s_1 > s_2$  или  $s_1 < s_2$  должно быть выполнено  $|s_1-s_2| > |s_3-s_4|$  или  $|s_1-s_2| < |s_3-s_4|$ . Допустимое преобразование осуществляется линейно возрастающей функцией  $g(i) = mi + n$ ,  $m > 0$ . Примером интервального измерения является измерение температуры по Цельсию или Фаренгейту.

(4) Пропорциональное измерение.

$s_1 > ms_2$  или  $s_1 < ms_2$ . Допустимое преобразование с помощью функций вида  $g(i) = mi$ ,  $m > 0$ .

Примером пропорциональных измерений являются измерения в произвольных единицах или, как в известном мультфильме, измерение длины удава в попугах.

(5) Кардинальное измерение.

$S = mU$ , где  $U$  есть единица измерений. Допустимо только тождественное преобразование  $g(i)=i$ .

Такие измерения встречаются в физике чаще всего и мы все с ними знакомы.

**Вопрос: К какому типу измерений относится выставление оценок в школе или на фигурном катании? Можно ли сравнивать средние баллы в различных школах?**

## 5. Определения и эталоны

Как уже упоминалось, определить физическую величину – значит задать способ ее измерения. В этом смысле сила – это то, что измеряет динамометр,

а разность электрических потенциалов – то, что измеряет вольтметр. Для кардинальных измерений таких определений не достаточно. Нужно определить единицу измерений. На протяжении веков определение единиц изменялось. Скажем метр, определялся как доля гринвичского меридиана, а в настоящее время определяется как путь, проходимый светом в вакууме за  $1/299792458$  сек. Уже из этого примера видно стремление определить единицу измерений так, чтобы на базе определения можно было построить так называемый первичный эталон.

Пожалуй, самым любопытным определением единицы измерений является определение единицы массы (1 кг). Килограмм определяется как физический артефакт (предмет, сделанный искусственно человеком), а именно как изделие из платино-иридиевого сплава, объявленное в 1901 году генеральной конференцией по мерам и весам первичным эталоном массы. Он хранится в международном бюро по мерам и весам во Франции.

Мерой времени является секунда, определяемая как длительность 9192631770 периодов электромагнитных колебаний, соответствующих переходу между уровнями сверхтонкой структуры атома цезия 133.

В системе СИ к упомянутым трем механическим величинам добавлена в качестве независимой четвертая электрическая величина, имеющая независимую размерность. Это – ампер, определяемый как ток, при протекании которого по каждому из двух параллельных проводов, разнесенных на расстояние в 1 метр в вакууме, действует сила  $2 \cdot 10^{-7}$  ньютона на метр длины. Реализуется это определение в виде первичного эталона, «токовых» весов, схематически изображенных на рис. 4. Как легко видеть из рисунка, этот эталон не вполне отвечает определению, поэтому в настоящее время проводятся попытки создания более удобного первичного эталона, основанного на одноэлектронном транспорте.

Число физических величин, подлежащих измерению, гораздо выше, чем число величин, имеющих независимые размерности, и для каждой величины должен быть построен свой первичный эталон. Рассмотрим некоторые из них.

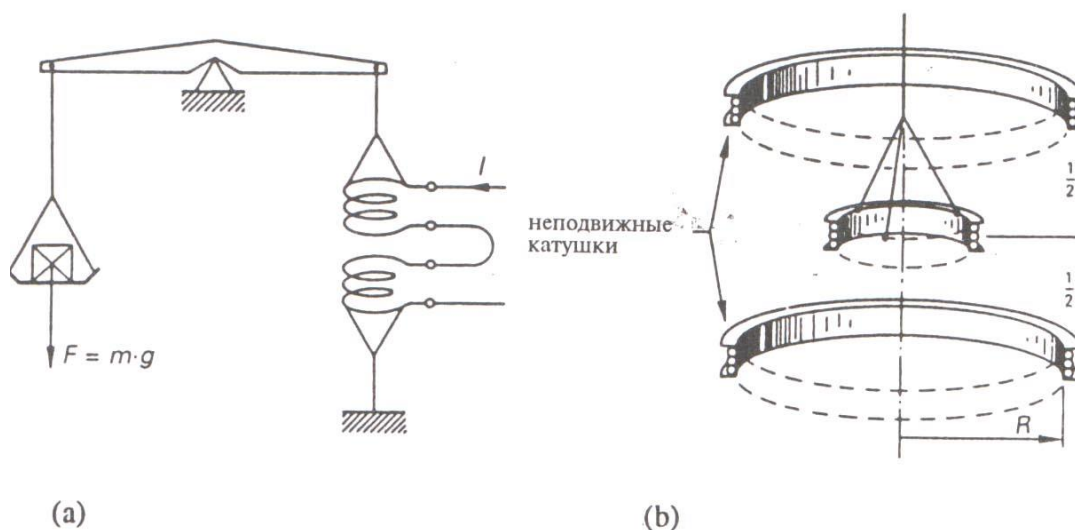


Рис.4. Эталон разности электрических потенциалов.

Основан на использовании нестационарного эффекта Джозефсона (см. рис. 5). В этом эффекте два сверхпроводника, связанных туннельной связью, облучают электромагнитным излучением высокой частоты. На вольт-амперных характеристиках появляются ступеньки, соответствующие условию  $n\hbar f = 2eV$ , где  $n$  –

целое число,  $h$  – постоянная Планка,  $e$  – заряд электрона, а  $V$  – соответствующая разность потенциалов. Эталон позволяет свести измерение потенциала к измерению частоты – одному из самых точных измерений.

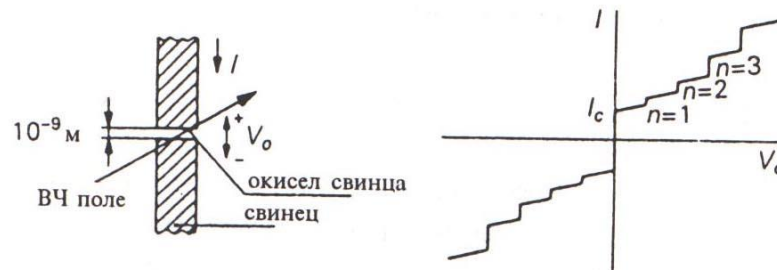


Рис. 5. Эталон сопротивления.

В настоящее время первичный эталон электрического сопротивления базируется на явлении квантового эффекта Холла. В последней половине прошлого века удалось реализовать двумерную электронную жидкость, составленную из электронов, свободно передвигающихся в плоскости  $XY$  и находящихся на одном квантовом уровне по отношению к движению в  $Z$  направлении. При помещении такой системы в очень сильное магнитное поле, нормальное плоскости свободного движения, при низких температурах наблюдается квантовый эффект Холла. Холловское сопротивление (отношение разности потенциалов в направлении, перпендикулярном магнитному полю и току, к величине тока) обычно пропорциональное величине магнитного поля, демонстрирует ступени, расположенные на уровне  $h/e^2 i$ , где  $h$  – постоянная Планка,  $e$  – заряд электрона, а  $i$  – целое число. (В принципе, существует и дробный квантовый эффект Холла, в котором  $i$  – является рациональной дробью с нечетным знаменателем.) Оказалось, что точность реализации числа  $h/e^2$  в квантовом эффекте Холла очень велика (до 7 знаков) и не зависит от системы, в которой реализован двумерный электронный газ, от степени совершенства структуры и очень слабо зависит от формы и размеров образца. Поэтому величина  $h/e^2 = 25812,68$  Ом может быть использована как легко воспроизводимый первичный эталон сопротивления.

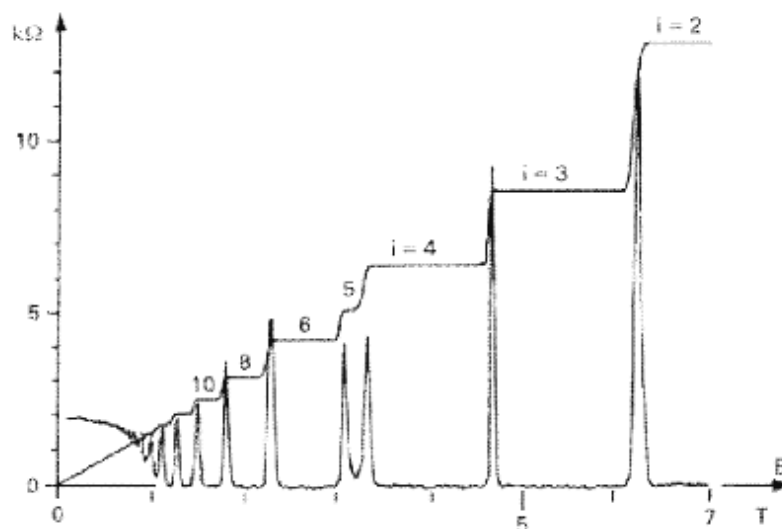


Рис. 5а. Вторичные эталоны.

В практической работе, конечно же, мы не пользуемся первичными эталонами, поскольку обладание таким эталоном и поддержание его в рабочем состоянии слишком дорогое удовольствие для отдельной лаборатории. В практической работе мы пользуемся вторичными эталонами, калиброванными по первичному: магазинами сопротивлений и емкостей, нормальными катушками индуктивности, кварцевыми генераторами и синтезаторами частоты для частотных и временных измерений, цифровыми вольтметрами с автокалибровкой и т.д.. В качестве эталонов длины используются, например, так называемые плитки Иогансона. Один из таких эталонов (вторичный лабораторный эталон сопротивления на 1000 Ом показан на рис. 5b.

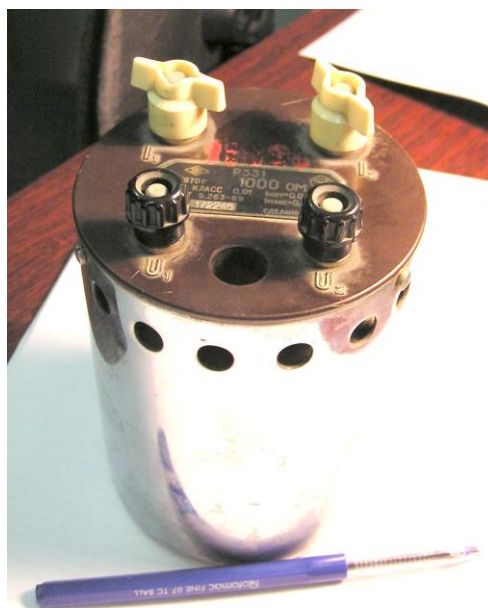


Рис. 5b.

## 6. Единицы и системы единиц

Как ясно из сказанного выше, для проведения кардинальных измерений необходимо для всякой физической величины задать единичное значение. Результат кардинального измерения может быть записан в виде:

*Величина* = {численное значение}[единица]

$$X = \{x\}[x]$$

Различные физические величины связаны между собой физическими законами. В простейшем случае такой закон имеет вид:

$$X = f A^a B^b C^c$$

Следовательно, между размерностями физических величин имеется соотношение

$$[X] = [A]^a [B]^b [C]^c.$$

Если в этом соотношении, как в приведенном выше примере, не возникает никаких дополнительных численных множителей, то единицы считаются согласованными (когерентными). Если  $k$  – число независимых соотношений между физическими

величинами, а  $n$  - число физических величин, входящих в эти соотношения, то  $n-k$  величин можно выбрать в качестве независимых. «основных» величин. Остальные величины будут «производными». Выбор числа основных величин (а, следовательно, числа физических законов, рассматриваемых как независимые) определяет систему единиц. Отнесение той или иной единицы к основным определяется легкостью измерения этой величины, простотой реализации эталона и логической структурой системы единиц. В международном масштабе в настоящее время общепринятой является система единиц СИ, в которой семь основных единиц: метр, килограмм и секунда для измерений длины, массы и времени, ампер, в качестве единицы электрического тока; моль, как единица количества вещества и канделла в качестве единицы силы света. Есть еще две безразмерных единицы: радиан для измерения угловых интервалов на плоскости и стерadian, для измерения пространственных углов. Система СИ является согласованной и рационализированной. Последнее означает, что множители, содержащие  $\pi$ , появляются только в задачах с круговой или сферической симметрией.

Следует отметить и важнейший недостаток этой системы, состоящий в том, что компоненты единого электромагнитного поля имеют в этой системе различную размерность. Поэтому в физике часто используется лишенная этого недостатка Гауссова система единиц.

## 7. Работа в лаборатории. Что меняется?

Хотя общие принципы экспериментальной работы остаются неизменными в течение длительного времени, требования к экспериментатору-профессионалу постоянно претерпевают значительные изменения. Если еще в прошлом веке непременным и обязательным условием экспериментальной работы было личное умение придумать и построить измерительную установку, если всякий экспериментатор был обязан быть рукоделом, то сейчас это требование заметно ослабло, хотя еще и не исчезло полностью. Прежде всего изменился стиль работы. Практически в каждую работу вовлечена группа исследователей. Индивидуальная работа постепенно вытесняется работой групп. Во-вторых, поиск задач для исследования превратился в серьезную проблему. Все легко решаемые задачи уже решены. Поэтому среди необходимых качеств экспериментатора появилось как обязательное умение поставить задачу.

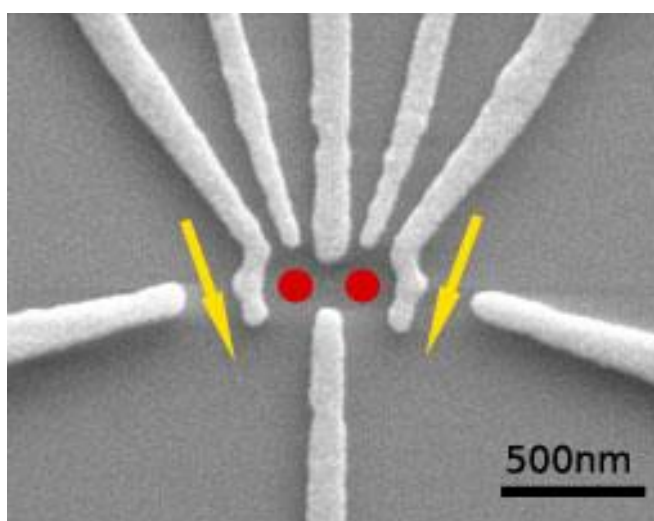


Рис.6.

Естественно, сильно изменились и образцы для исследований. В качестве примера на рис. 6 приведена фотография части образца, сделанная с помощью электронного микроскопа. Изготовление подобных структур невозможно в обычных условиях, потому что размер структуры меньше размера пылинки. Их изготовление проводится в специальных помещениях – чистых зонах (см. рис. 7).



Рис.7.

Столь же сильно изменилось лабораторное оборудование (в качестве примера на рис. 7 мы приводим фотографию туннельного микроскопа в момент юстировки образца). Актуальными стали измерения в экстремальных условиях: при сверхнизких температурах, в очень сильных магнитных полях, при сверхмалых токах, при высоких давлениях, в «трудных» диапазонах частот».

## 8. Методы измерений

Теперь нам предстоит обсудить вопрос о том, как производить сравнение какой-либо характеристики исследуемого объекта с (вторичным) эталоном. Самое простое измерение осуществляется методом отклонений, в котором вторичным эталоном является сам измерительный прибор.

### Метод отклонений

В методе отклонений показание измерительного прибора полностью определяет измеряемую величину. Используется обычно для не точных, но быстрых измерений. Этот метод знаком всем по стрелочным электротехническим приборам, бытовым весам, или приборному щитку автомобиля.

### Разностный метод

В этом методе отклонение измеряет разность между неизвестной величиной и близким к ней эталоном. При условии точного эталона, существенно повышает аккуратность измерений по сравнению с методом отклонений. Знаком нам по бытовым гиревым весам, используется также, например, в аналитических весах при отсчете последнего знака по отклонению. Если при измерении использован эталон значением  $p$  с погрешностью  $\Delta p$  и отклонение  $r$  с точностью  $\Delta r$ , то будем считать измерение оптимальным, если  $\Delta p = \Delta r$ . Для оптимального измерения необходимо  $p \gg r$  и  $\Delta p/p < \Delta r/r$ .

### Нулевой метод

Результат при использовании этого метода полностью определяется точностью эталона. Измерительное устройство служит только для регистрации того факта, что величина эталона сравнялась с измеряемой величиной. (Реализуется в мостовых и потенциометрических схемах.) Отклонение регистрирующего устройства не обязано быть пропорциональным измеряемой величине. Основное требование к измерительному устройству – способность детектировать малые отклонения или, другими словами, высокая чувствительность.

*Неверные веса – мерзость пред Господом, но правильный вес угоден Ему.  
(Притчи Соломона, глава 11, стих 1). Не ВЕСЫ, а гири!!*

*Мерзость пред Господом - неодинаковые гири, и неверные веса - не добро.  
(Притчи Соломона, глава 20, стих 23).*

*Как правильно взвесить на неверных весах?*

### Методы чередования и подстановки

В каждом из этих методов последовательно проводится два измерения. В методе чередования в каждом из измерений участвует неизвестная величина и (почти) равный ей эталон. После первого измерения неизвестная величина и эталон меняются местами, после чего проводится второе измерение. В сущности, этим методом проводится проверка симметрии измерительной системы, например, равноплечность весов.

В методе подстановки во втором измерении используются только эталоны. После проведения первого измерения фиксируется значение использованного в измерении эталона и показание измерительного прибора. Затем неизвестная величина заменяется другим эталоном, величина которого подбирается так, чтобы добиться того же показания измерительного прибора. В качестве результата измерений приводится величина второго эталона. Ясно, что все погрешности измерительного прибора из результата выпадают при наличии у прибора высокой чувствительности, а точность измерений определяется качеством использованного эталона. Точность весов не влияет на результат измерений.

### Повторные измерения

Если точность измерения имеет особое значение, например при измерении мировых констант, то есть смысл проводить повторные независимые измерения другими экспериментальными группами и, что особенно важно, другими методами. При этом, как правило, изменяется вклад обсуждаемой ниже систематической погрешности в ошибку измерений.

### Перечисление

Иногда удается свести измерение физической величины к подсчету каких-либо объектов, например импульсов. В качестве примера можно привести измерение частоты, с помощью подсчета числа периодов более высокочастотного сигнала стабильной известной частоты за один или несколько периодов измеряемой частоты.

*Задача. Ньютон измерил скорость звука хлопая в ладоши в Кембридже между двумя параллельно стоявшими зданиями. Расстояние между зданиями было примерно 200 м. Где он располагался? Считая, что у него был точный отсчет до 0.1сек, оценить точность его измерения.*



Рис. 8. И. Ньютон. (1643 -1727) и внутренний дворик Тринити колледжа в Кембридже.

## 9. Стратегия измерений

Существует несколько примеров использования измерительной техники, в которых для измерений используется специальная стратегия измерений. Обычно проблемы возникают из-за сильного расхождения в полосе пропускания измерительной системы и частотном спектре измеряемого сигнала.

### Когерентные выборки

Представим себе, что измеряемый сигнал является периодическим с периодом  $T$  и мы с помощью некоторого измерительного устройства умеем измерять величину сигнала за время  $t_1 \ll T$  (осуществлять выборку). Будем производить выборку с периодом  $T+\delta$  и строить ее результаты как функцию времени (см. рис. 9). Как легко догадаться, наши действия приведут к преобразованию периода сигнала до  $(T+\delta)T/\delta$  с сохранением относительной формы сигнала. Подобное понижение частоты используется, например, в стробоскопических осциллографах (рис. 10.).

### Случайные выборки

При некоторых измерениях нас не интересует форма сигнала, а интересует только его среднее или, скажем, среднеквадратичное значение. В этом случае выборка должна быть случайной. В принципе, если исходный сигнал периодичен, то случайная выборка может быть смоделирована выборкой на частоте не связанной с частотой сигнала. Однако при этом можно попасть на частоту скоррелированную с частотой измеряемого сигнала и результаты будут искажены.

Оба типа выборок позволяют исследовать сигналы, частотный спектр которых значительно шире частотного спектра измерительной системы.

### Мультиплексирование

Временное мультиплексирование применяется тогда, когда измеряемые сигналы изменяются медленно, а измерительная система проводит измерение и обработку быстро. При этом с помощью одной измерительной системы можно измерять много сигналов (с разных датчиков, например) последовательно подключая измерительную систему к каждому датчику. Существуют цифровые вольтметры, имеющие множество входов (до 18).

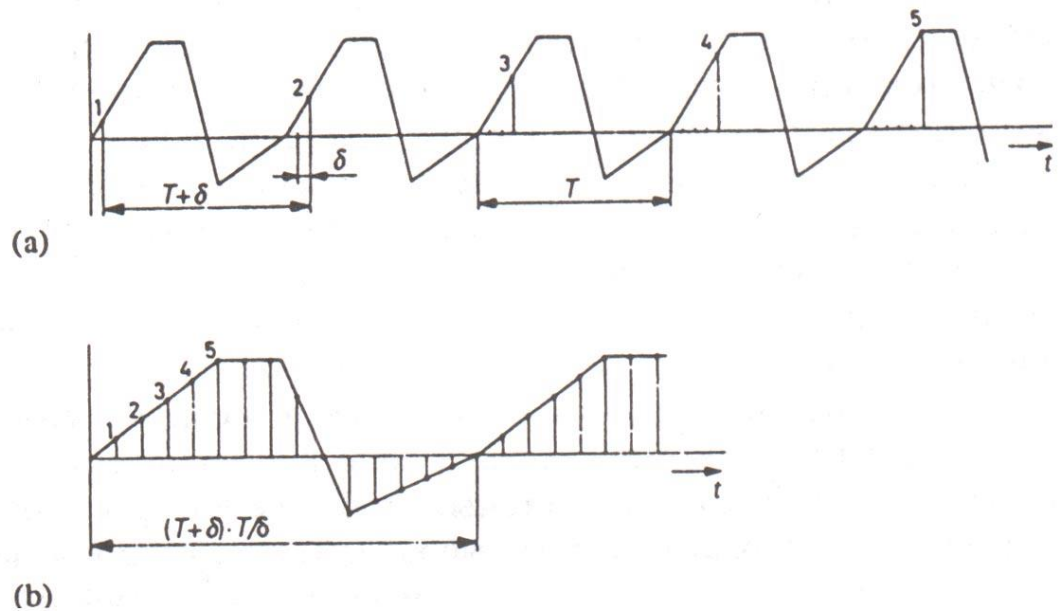


Рис. 9.

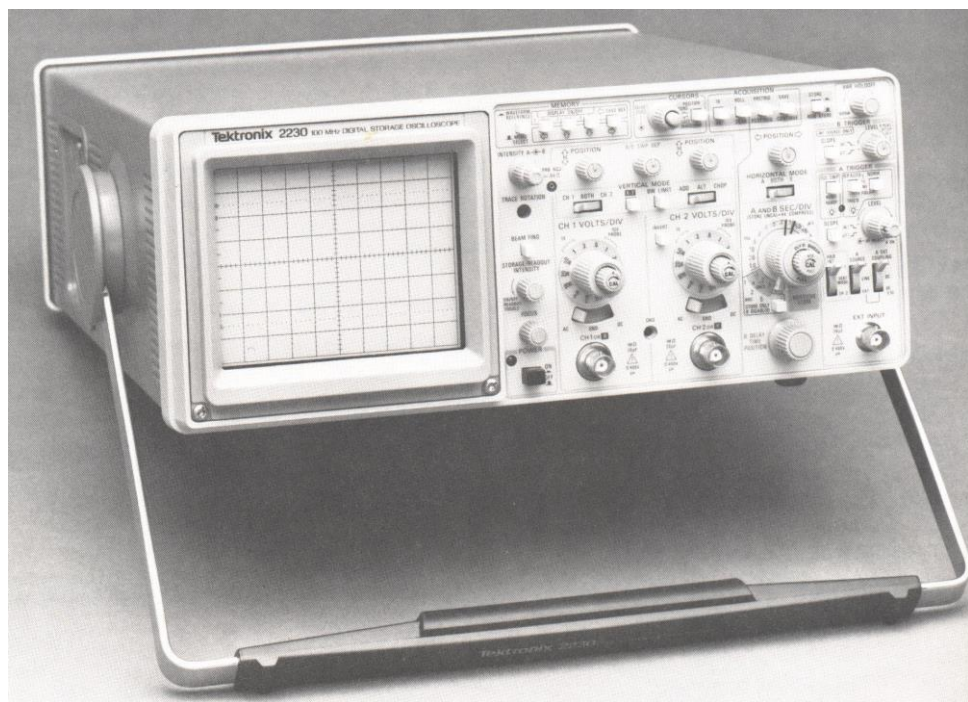


Рис.10. Стробоскопический запоминающий осциллограф.

При частотном мультиплексировании узкополосный сигнал служит для модуляции более высокочастотного несущего сигнала и, тем самым, сдвигается в другую область частот. При этом можно сделать так, что несколько низкочастотных сигналов будут занимать соседние интервалы частот без перекрытия. Такая процедура позволяет, например, передавать несколько сигналов по одной линии. Прием сигнала, разумеется предполагает демодуляцию несущего сигнала в каждом из использованных частотных интервалов.

## 10. Ошибки измерений

Мы будем исходить из того, что теория ошибок хорошо известна студентам МФТИ по лабораторным работам, поэтому ниже ограничимся только несколькими замечаниями.

Каждое измерение имеет ограниченную точность – сопровождается определенной погрешностью. Поэтому всегда имеется различие между истинным значением измеряемой величины и измеренным значением. Информация о результате измерения осмыслена только тогда, когда указана точность измерения. Результат измерения, не сопровождающийся указанием ошибки, не содержит *никакой* информации. На графиках зачастую не показывают погрешность, имея в виду, что экспериментальная погрешность отвечает размеру точки на графике. Величину погрешности точно можно узнать только проводя более точные измерения. Не проводя таких измерений, погрешность можно только оценить. Основная и часто встречающаяся ошибка экспериментаторов состоит в переоценке точности своих результатов.

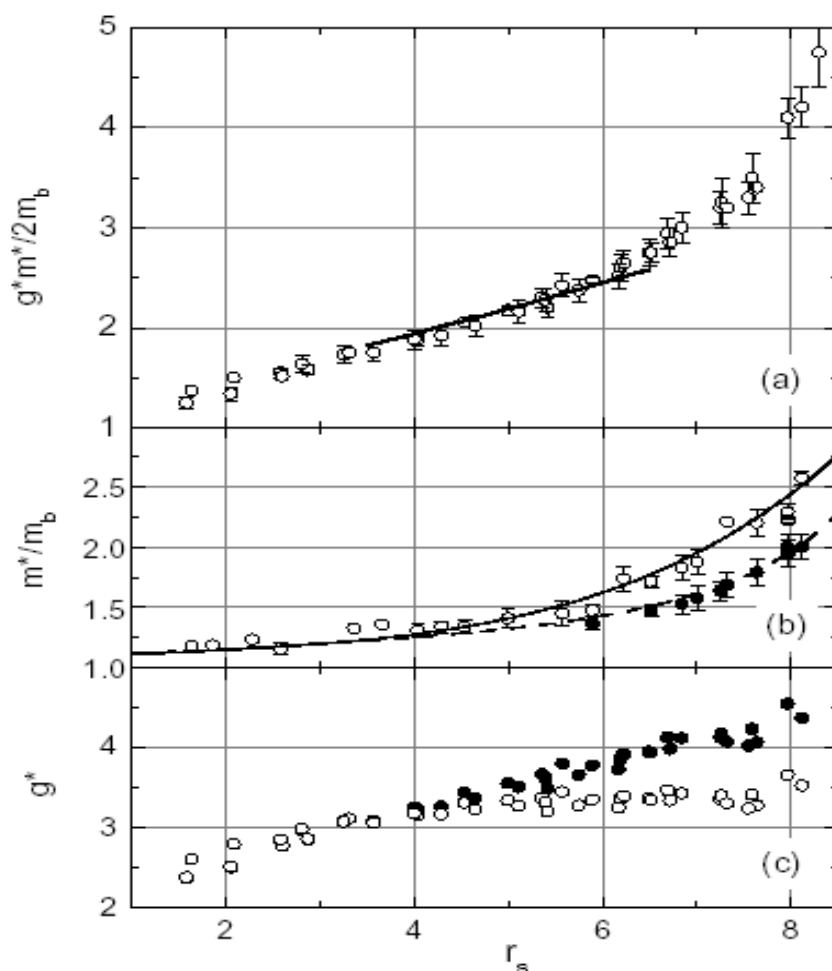


Рис. 11. Экспериментальные результаты из статьи Phys. Rev. Lett. **88** 196404 (2002).

*Задание. Посмотрите на экспериментальные точки на Рис. 11(a) и 11(b). Все экспериментальные точки на этих графиках получены на одном образце с помощью одной и той же процедуры и на одной измерительной установке. Правильно ли произведена оценка погрешности? Дайте подробное обоснование своему мнению.*

Как мы помним, погрешности измерений бывают систематическими и случайными.

Первые прекрасно воспроизводятся при повторных измерениях на одном и том же объекте при тех же условиях и с помощью той же измерительной установки. Их обнаружение и оценка наиболее сложны. Систематические ошибки могут возникать из-за влияния измерительной системы на объект измерений, из-за неточности используемых вторичных эталонов (неправильной или слишком грубой калибровки измерительных приборов), наконец, из-за влияния неконтролируемых параметров. Наиболее надежным путем для устранения систематических ошибок являются повторные измерения со сменой метода измерений.

Случайные ошибки не воспроизводимы при повторных измерениях. Обычно предполагается, что они возникают из-за влияния многих и независимо действующих факторов. Мы полагаем, что студенты знакомы с понятием стандартной погрешности и знают принципы теории распространения ошибок. Поэтому приведем только одну полезную таблицу:

| $x$ находится вне интервала              | Вероятность |
|------------------------------------------|-------------|
| $(\bar{x} - \sigma, \bar{x} + \sigma)$   | 0,32        |
| $(\bar{x} - 2\sigma, \bar{x} + 2\sigma)$ | 0,045       |
| $(\bar{x} - 3\sigma, \bar{x} + 3\sigma)$ | 0,0026      |

Как видно из таблицы, при указании на графике стандартной погрешности и ожидаемой кривой примерно 30% экспериментальных точек будут удалены от кривой на расстояние, превышающее стандартную погрешность.

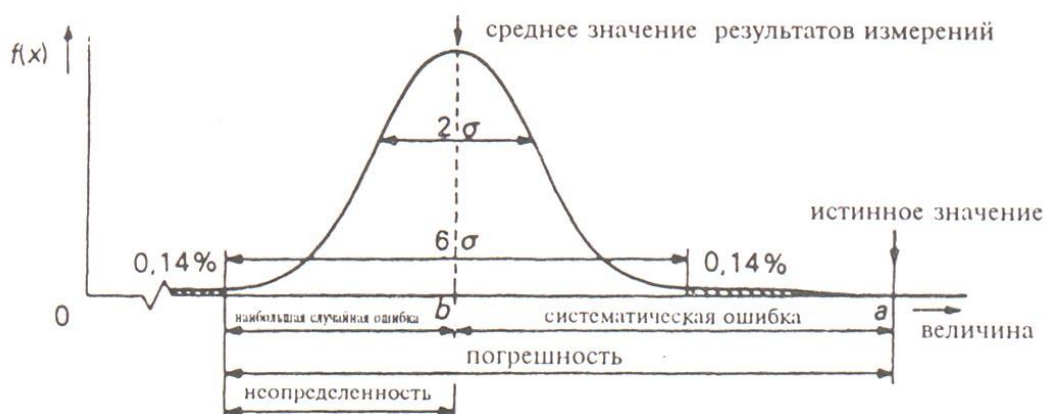


Рис. 12. Случайная и систематическая погрешность.

Для понимания вклада в результирующую погрешность результата измерений от случайной и систематической погрешности достаточно взглянуть на Рис. 12.

Если знак и величина систематической ошибки из каких-либо соображений известны, никогда проводят коррекцию систематической ошибки. Метод борьбы со случайными ошибками только один – накопление, то есть многократные повторные измерения в каждой точке.

## 11. О роли технического прогресса в истории человечества

Существует забавный факт, обнаруженный наблюдением над стаями обезьян. В стае имеется жесткая иерархия. Все лучшее достается паре  $\alpha$  – обезьян. Следующий обезьяний слой образуют  $\beta$  – обезьяны, время от времени пытающиеся свергнуть  $\alpha$  – обезьян и самим занять их место и так далее. Но вот одна из самых низших обезьян нашла железную банку и научилась стучать по ней палкой, извлекая громкие звуки, пугающие сородичей. Статус этой обезьяны в стае сразу же поднялся. К сожалению, в человеческом обществе автоматической связи между статусом индивида и его способностью к освоению нового не наблюдается. Тем не менее, технический прогресс человечества охватывает много веков и играет самую важную роль.

*Приведем лишь один поразительный пример роли технического прогресса. В тринадцатом веке войска монгольского хана Темучина завоевали Китай, Индию, Среднюю Азию, Сибирь, Поволжье и Киевскую Русь. Возникла одна из величайших мировых империй и хан был переименован в Чингиз-хана. Что же сделало монгольские войска неукротимыми в век, когда воевали копьями, стрелами и мечами? Ответ: открытие принципа резания и мясных консервов. Напомним, что изначально оружие было колющим, и защитой против него служила мощная броня. Однако, воин в латах и конь в броне были медленны и малоподвижны. Сабля прорезала латы и кольчуги, делая их бесполезными. Одетый для защиты от стрел в кожу, всадник монгольской армии был подвижен, способен на скаку стрелять из лука и совершать длинные броски. Изменилась тактика боя и сроки движения армий, к чему противники монголов не были готовы.*

*Вывод состоит в том, что обладающий техническим преимуществом способен подчинить себе и контролировать остальных.*

*Нечто подобное наблюдается и в современном мире. Все больше военных и гражданских систем управляется компьютерами. При этом контроль, в конечном итоге, находится у производителя процессоров. Он легко может заставить всех обладателей компьютеров в течение нескольких лет заменить старые вычислительные машины на новые просто сменив конфигурацию ножек у новых типов процессора.*

Следует иметь в виду еще одно важное обстоятельство. Невозможно научиться что-либо производить только по учебникам. Страна или регион, желающие производить высокотехнологичные товары, обречены вкладывать деньги в исследовательскую работу, поскольку для производства нужен практический опыт и подготовленные кадры.

Есть еще один забавный вопрос – это вопрос о темпах технического прогресса. До сих пор каждое из живших на земле поколений считало свое время временем максимальной скорости технического прогресса. Вместе с тем крайне трудно судить, что явилось более важным и стимулирующим для истории человечества, изобретение двигателя внутреннего сгорания и создание автомобиля, или одомашнивание лошади и изобретение телеги.

## 12. Характеристики измерительных систем

### Чувствительность

Чувствительность линейной измерительной системы определяется как отношение величины выходного сигнала к величине входного сигнала.

$$S=y/x$$

В общем случае чувствительность **размерна** и зависит от частоты. У усилителей чувствительность именуют еще коэффициентом усиления. В случае нелинейных систем пользуются дифференциальной чувствительностью

$$S_{\text{diff}}(x_0) = (dy/dx)_{x_0}$$

Величина, обратная чувствительности называется масштабным коэффициентом. В качестве характеристики нелинейных систем используют еще коэффициент чувствительности, равный

$$S_x^y = d(\ln(y))/d(\ln(x)).$$

*Задача. Определить зависимость коэффициента чувствительности регулятора Уатта от величины угловой скорости (См. рис. 13) Считать тяги невесомыми, длину тяг, равной  $l$ , массы шаров равными  $M$ , массу скользящей втулки — равной  $m$ .*



Д. Уатт

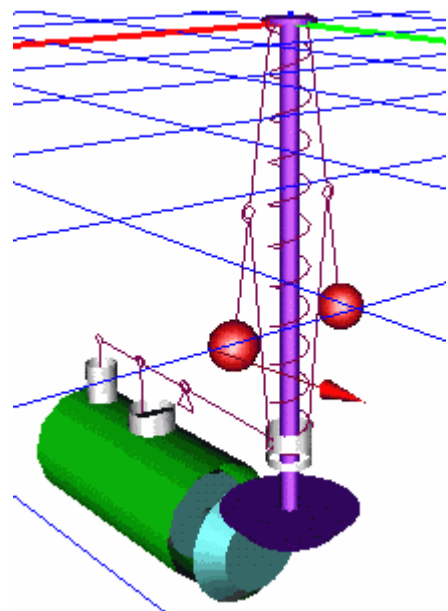


Рис.13.

### Порог чувствительности

Чрезмерная чувствительность измерительной системы бессмысленна, поскольку рано или поздно на выходе полезный сигнал будет меньше шума. Порог чувствительности измерительной системы определяется как наименьший обнаруживаемый входной сигнал. Принципиальный порог чувствительности определяется случайными флуктуациями в измеряемом объекте и измерительной

системе. Пусть измеряемая величина  $x$  остается постоянной, а шум, приведенный ко выходу, имеет гауссово распределение  $f_n(y)$  с  $\langle y \rangle = 0$ . При наличии полезного сигнала на входе плотность распределения сигнала на выходе будет иметь вид  $f_{sn}(y) = f_n(y) + \langle y \rangle$  (см. рис. 14.). Представим себе, что мы имеем единственное выборочное значение выходного сигнала  $y$ . Введем критерий обнаружения, сравнивая  $y$  с величиной  $f_n(y)$ . Будем считать сигнал обнаруженным, если  $y > 0.5 \langle y \rangle$ . Общепринятой мерой порога чувствительности является такой сигнал на входе, для которого отношение сигнал-шум на выходе равно единице. Вероятность обнаружения сигнала различной амплитуды в единичном измерении приведена ниже в таблице.

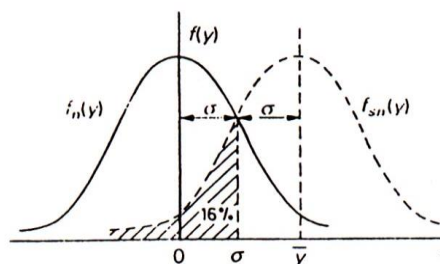


Рис. 14.

| Сигнал $\bar{y}$ | Вероятность обнаружения | Отношение сигнал/шум |
|------------------|-------------------------|----------------------|
| $1\sigma$        | 69,15%                  | 1                    |
| $1,4\sigma$      | 76,11%                  | 2                    |
| $2\sigma$        | 84,13%                  | 4                    |
| $3\sigma$        | 93,32%                  | 9                    |
| $4\sigma$        | 97,72%                  | 16                   |
| $5\sigma$        | 99,38%                  | 25                   |
| $6\sigma$        | 99,87%                  | 36                   |
| $8\sigma$        | 99,9968%                | 64                   |
| $10\sigma$       | 99,999971%              | 100                  |

Таким образом, если характеристики шума нам известны, то величину сигнала измеренного в единичном опыте нужно сравнивать с величиной стандартного отклонения функции  $f_n(y)$ . На первый взгляд кажется что при  $y = 0.5 \langle y \rangle = \sigma$  сигнал обнаруживается довольно надежно (вероятность обнаружения 84%), однако следует помнить, что при вероятности обнаружения 50% судить о наличии сигнала вообще невозможно. Следовательно, для обнаружения сигнала в единичном измерении необходимо, чтобы  $y > 1.5 \sigma$ , или чтобы отношение сигнал-шум было примерно 10.

Стандартными методами повышения порога чувствительности являются накопление с последующим усреднением и сужение полосы измерительной системы. В первом случае, например, если сделано  $n$  выборок, то

$$\sigma_{avg} = \sigma/n^{1/2}.$$

Соответственно, в корень из числа выборок возрастает порог чувствительности. Если сигнал, не имеющий частот выше некоторого значения  $B$  интегрируется в течение

времени  $T > B^{-1}$  и, затем, вычисляется его среднее значение, то такая процедура приводит к повышению порога чувствительности в соответствии с

$$\sigma_{avg} = \sigma_0 T^{1/2},$$

где  $\sigma_0$  шум измерительного устройства в полосе 1 Гц (Размерность  $\sigma_0$  имеет вид  $[y]/[Гц^{1.2}]$ ). Аналогично, изменение ширины полосы  $B$  измерительного устройства ведет к изменению порога чувствительности, согласно  $\sigma = \sigma_0 B^{1/2}$

### Разрешающая способность

Разрешающая способность  $R$  определяется наименьшим интервалом  $\Delta x$  измеряемой величины  $x$ , который все еще вызывает изменение результата измерений  $y$ .

$$R = x / \Delta x.$$

Мы уже неоднократно встречались с этим понятием. В связи с распространением цифровой индикации и регистрации возникла забавная проблема: во многих приборах  $\Delta x$  — шаг оцифровки, не совпадает, а зачастую и значительно превышает величину последнего индуцируемого и регистрируемого разряда. Вера в то, что последний регистрируемый цифровой разряд определяет разрешающую способность измерительного устройства, неоднократно подводила экспериментаторов.

### Чувствительность к форме сигнала

Если измеряемый сигнал не является статическим, а зависит от времени, то встает вопрос *значение какого параметра сигнала измеряется?* Возможны следующие варианты:

Пиковое значение  $x_p = \max[x(t)]$ .

Полный размах (сигнал пик-пик)  $x_{pp} = \max[x(t)] - \min[x(t)]$ .

Среднее по времени значение  $x_{avg}$

$$x_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt.$$

Среднее от модуля

$$|x|_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt.$$

Действующее значение

$$x_{RMS} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt \right]^{1/2}.$$

Обычно, если на измерительной установке не указано иное, измеряется именно действующее значение.

### Нелинейность измерительных систем

Измерительная система не вносит искажений в обрабатываемый сигнал, если независимо от частоты  $y = ax + b$ . Если же связь между входным и выходным сигналами осуществляется с помощью линейного интегродифференциального уравнения, (динамическая линейная система) то сигналы на входе и на выходе имеют разную форму, но соблюдается принцип суперпозиции: сигналу на входе  $x_1$  соответствует сигнал на выходе  $y_1$ , а  $x_2 \rightarrow y_2$ , то сигналу  $x_1 + x_2$  будет соответствовать выходной сигнал  $y_1 + y_2$ .  
Ниже, на рис. 15, 16 и 17 приведены типичные примеры нелинейности измерительных систем.

### Пределы измерений и динамический диапазон

Пределы измерений определяются как интервал значений ( $x_{\min}$ ,  $x_{\max}$ ), внутри которого можно произвести измерение с требуемой точностью. Динамический диапазон определяется как отношение  $x_{\max} / x_{\min}$ . Как мы увидим в дальнейшем, в современных измерениях очень часто используются устройства с расширенным динамическим диапазоном.

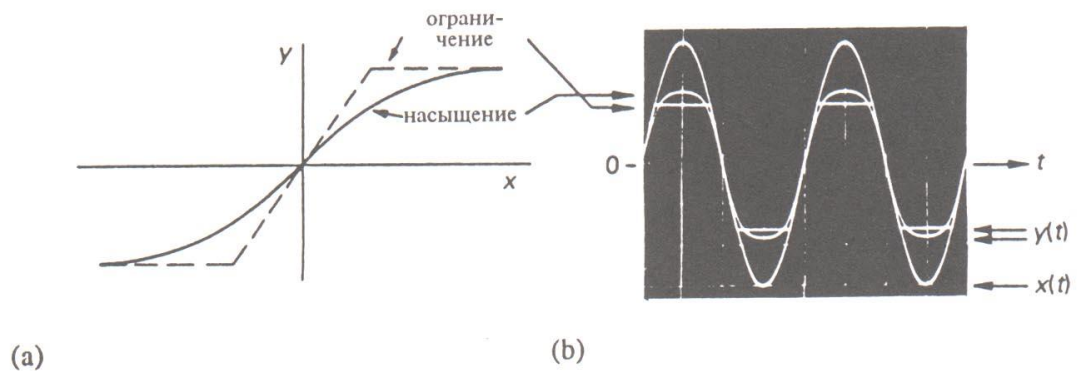


Рис. 15. Ограничение.

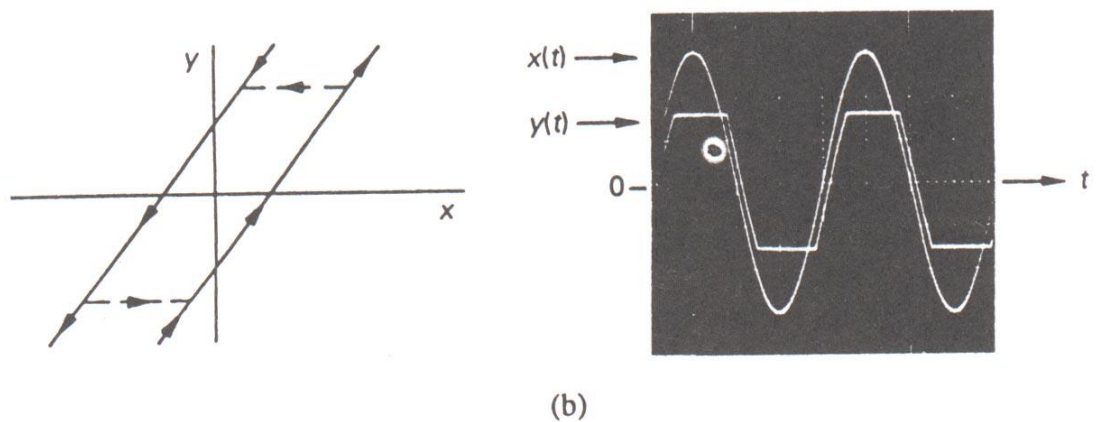


Рис. 16. Гистерезис.

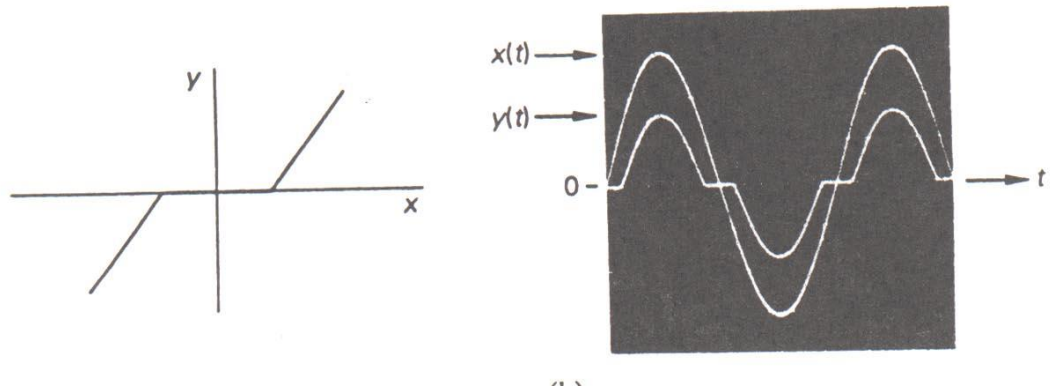


Рис. 17. Мертвая зона.

**Задача.** Вольтметр переменного тока показывает 10 В. Вы обнаружили, что в Вашей измерительной схеме на входе стоит полевой транзистор, пробиваемый постоянным напряжением в 13 В. Можно ли подключить измерительную схему параллельно вольтметру? Что будет, если после этого отключить вольтметр?

**Описание измерительных систем с помощью дифференциальных уравнений**

*Системы первого порядка.* В общем случае описываются уравнением:

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = x$$

Типичным примером измерительной системы первого порядка является градусник. Действительно, изменение температуры ртути определяется количеством подведенного тепла

$$\Delta Q = C \Delta T.$$

Где  $C$  – теплоемкость ртути. С другой стороны, количество подведенного тепла определяется тепловым сопротивлением

$$\Delta Q = (T_i - T)/R \cdot \Delta t.$$

Здесь  $T_i$  – измеряемая температура. В итоге имеем уравнение:

$$RC \frac{dT}{dt} + T = T_i.$$

Переходная характеристика системы первого порядка (т.е. реакция системы на скачкообразное изменение входного сигнала) имеет вид

$$y = y_0 (1 - \exp(-t/\tau)).$$

*Системы второго порядка.* Описываются уравнением:

$$a \frac{d^2 y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + y = x(t).$$

Подобные системы хорошо нам известны по случаю баллистического гальванометра. Переходные характеристики таких систем при различных значениях относительного коэффициента затухания  $z = b/(2a^{1/2})$  показаны на рисунке 18.

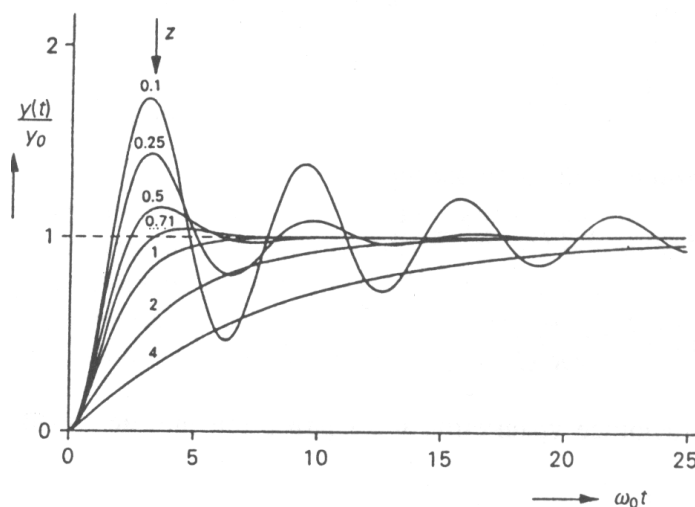


Рис. 18.  $\omega_0 = a^{-1/2}$ .

*Нелинейные системы* описываются нелинейными интегро-дифференциальными уравнениями. Использование таких систем для измерений нежелательно.

### 13. Обратное влияние измерительной системы на измеряемый объект: согласование

Измерительная система, для того, чтобы получить информацию об измеряемом объекте, либо отбирает у него часть энергии, либо, наоборот, вводит избыточную энергию и исследует отклик объекта. И в том и в другом случае система возмущает измеряемый объект, что приводит к ошибкам в измерении. Для уменьшения этого влияния или для достижения максимальной чувствительности выгодно специальным образом подстроить входной каскад измерительной системы, как говорят, произвести согласование.

#### Анэнергетическое согласование

Если стремиться к минимальному возмущению измеряемого объекта, то необходимо обеспечить минимальный обмен энергией между измеряемым объектом и измерительной системой, т.е. анэнергетическое согласование. Для анэнергетического согласования при измерении напряжения, например, нужно сделать внутреннее сопротивление вольтметра максимально большим, а при измерении тока – внутреннее сопротивление амперметра минимальным.

#### Энергетическое согласование

Применяется для извлечения из измеряемого объекта максимально возможной мощности. (Критично в случае использования пассивных измерительных систем, т. е. систем, в которых нет усиления мощности.) Рассмотрим в качестве примера схему,

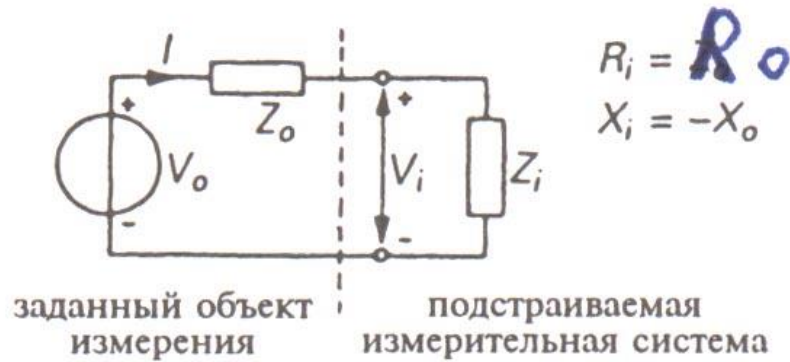


Рис. 19 .

изображенную на рис. 19. Потребляемая измерительным устройством мощность равна  $P = I^2 R_i$ . Действующее значение тока равно:

$$I = V_o / ((R_i + R_o)^2 + (X_i + X_o)^2)^{1/2}$$

Соответственно, мощность, поступающая в измерительное устройство равна:

$$P = R_i V_o^2 / ((R_i + R_o)^2 + (X_i + X_o)^2)$$

Эта мощность максимальна при  $X_i = -X_o$  и  $R_i = R_o$ . Ее величина составляет  $P_{max} = V_o^2 / 4R_o$ .

### Согласование по отсутствию отражения

Этот вид согласования применяется при передаче высокочастотных сигналов по длинным линиям или кабелям (длина кабеля больше или равна четверти длины волны передаваемого сигнала. См. Рис. 20 .)



Рис. 20.

Отражений от концов кабеля не будет, если  $Z_o = Z_c = Z_i$ . Для кабеля без потерь  $Z_c = (L/C)^{1/2}$ . Здесь  $L$  - индуктивность единицы длины кабеля, а  $C$  - емкость единицы длины.

Полезно знать типичные импедансы: коаксиальный кабель - 50 Ом, 75 Ом; скрученная пара проводов - 100-120 Ом, проводники на печатной плате 50-150 Ом.

## 14. Шумы и помехи

Представим себе, что на вход измерительной системы не подано никакого сигнала. Это еще не означает, что никакого сигнала не будет и на выходе: входное сопротивление измерительной схемы (также, как и измеряемый объект) производят тепловой шум. Он возникает из-за броуновского движения частиц в механических системах, из-за флуктуаций числа электронов во входном сопротивлении и т.д. Шум усиливается измерительной системой и передается на выход. Среднеквадратичное значение теплового шума у источников напряжения и тока равны, соответственно:  $V = (4kTR\Delta f)^{1/2}$  и  $I = (4kT\Delta f/R)^{1/2}$ . Приведем вывод первого из этих выражений (формулы Найквиста).

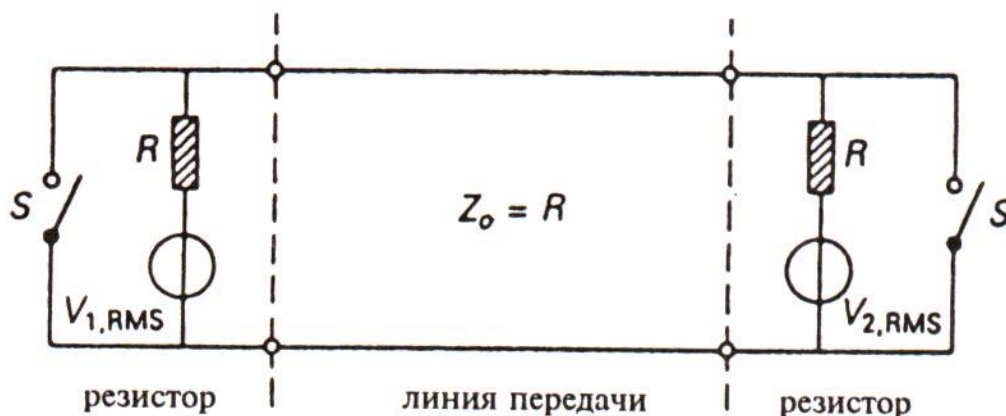


Рис. 21.

Рассмотрим схему с двумя эквивалентными источниками шума  $V_1$  и  $V_2$ , двумя ключами  $S$  и сопротивлениями  $R$ , соединенными согласованным по отражению кабелем (рис. 21). Каждое из сопротивлений постоянно генерирует и посылает к другому сопротивлению волну напряжения со среднеквадратичным значением  $1/2V_{RMS}$ , распространяющуюся по кабелю со скоростью  $v$ . Замкнем оба ключа  $S$ . Система превратилась в резонатор с резонансными частотами  $f_n = n v / 2l$ . Число частот в интервале  $\Delta f$  равно  $\Delta f / (v/2l)$ . На каждую резонансную частоту приходится две степени свободы, а на каждую степень свободы в среднем энергия  $1/2kT$ . Когда ключи разомкнуты, то за время  $2l/v$  каждый из резисторов вкачивает в кабель энергию, равную накопленной в кабеле,  $(2l/v) \cdot V_{RMS}^2 / 4R$ .  $1/2kT \cdot 2 \cdot \Delta f / (v/2l) = (2l/v) \cdot V_{RMS}^2 / 4R$ , или  $V_{RMS} = (4kTR\Delta f)^{1/2}$ .

### Помехи и методы борьбы с ними

Кроме шумов измерения осложняют так называемые помехи. В сущности, то что мы называем помехами является влиянием внешних факторов, в простейшем случае, влиянием окружающей среды. Например, чувствительность измерительной установки может зависеть от температуры и влажности, а оба эти параметра во время измерений изменяются. Или сигнал на выходе зависит от вибраций, или же от напряжения питания. Во всех этих случаях мы и говорим о помехах.

Помеха может быть аддитивной и/или мультипликативной. В первом случае сигнал помехи на входе просто складывается с полезным сигналом. Примером аддитивной помехи может служить термо ЭДС. При мультипликативной помехе без полезного сигнала на входе нет и выходного сигнала. Так бывает, если помеха влияет на чувствительность. Часто влияние различных факторов на измерительную систему

задают словесными определениями. Например, приводят чувствительность измерительной системы к напряжению питания или температурный коэффициент чувствительности измерительной системы  $C_T = S^{-1} dS/dT$ .

Самый надежный метод борьбы с помехами состоит в изоляции измерительной схемы от внешних воздействий. Этой цели служит термостатирование, использование при измерениях специальных экранированных помещений, использование стабилизаторов напряжения сети или источников бесперебойного питания, использование «плавающих» фундаментов для установки измерительной системы, отделенных от источников вибраций, правильное заземление измерительной схемы, наконец.

В случае, если возможности изоляции измерительной системы исчерпаны, то используют различные системы автоматической компенсации помех..

*Параллельная компенсация* состоит в расщеплении измерительной системы на две параллельные части, каждая из которых подвергается действию одной и той же помехи. Компенсация по отношению к аддитивной помехе будет достигнута, если  $S_{d1} = dy_1/dd = -S_{d2}$ . Мультипликативная помеха будет скомпенсирована, если  $dS_1/dd = -dS_2/dd$ . Реализуется и параллельная компенсация, например в дифференциальных транзисторных предусилителях, с общим резистором в эмитерной цепи. Выпускаются для этой цели даже специальные пары полевых транзисторов в общем корпусе (см. схему на рис. 22.).

Последовательная компенсация состоит в разбиении измерительной системы на две последовательно включенные части, подверженные влиянию одной и той же помехи. Аддитивная помеха подавляется, если  $S_1^{-1} dS_1/dd S_2 = C_{1d}S_2 = -S_{2d}$ . Для подавления мультипликативной помехи необходимо  $C_{1d} = -C_{2d}$ .

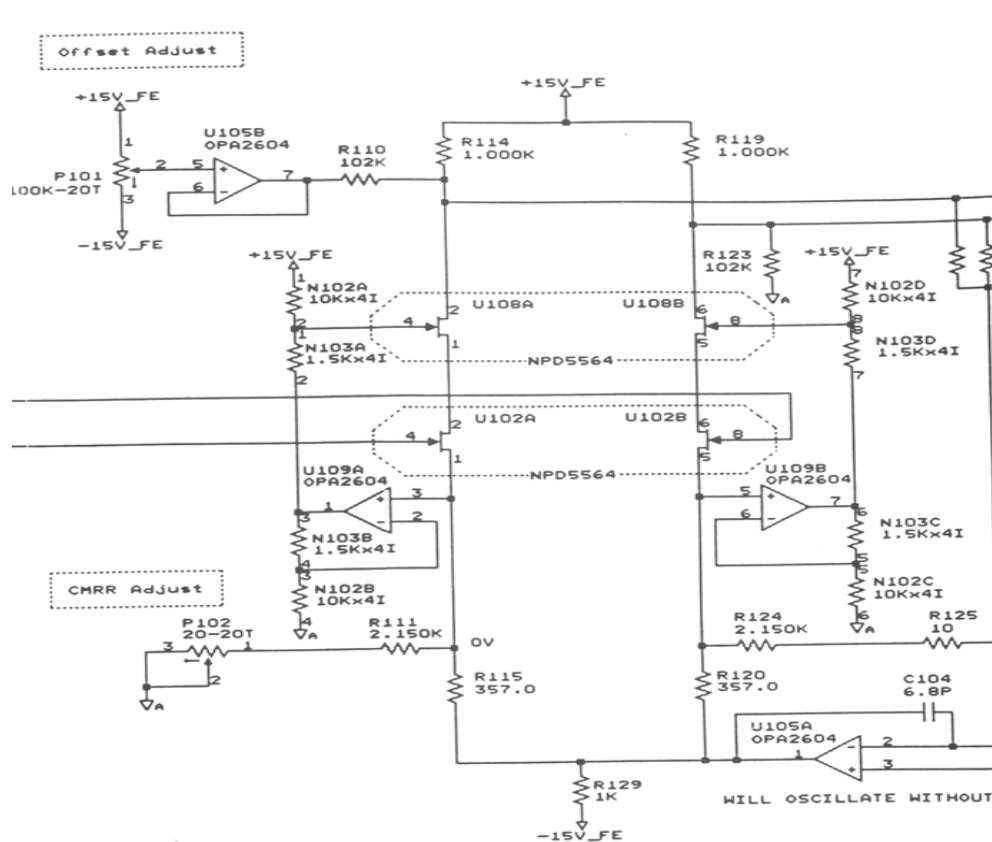


Рис. 22. Часть схемы, на которой элемент, обведенный пунктиром, соответствует специально подобранной паре полевых транзисторов в одном корпусе.

## 15. Источники помех

**Термоэлектричество.** Возникает, если имеются два контакта, находящиеся при различных температурах и проводник, соединяющий контакты отличен от проводников, идущих к внешней цепи. Например, медный провод от измерительного прибора в криостат с жидким гелием соединен с алюминиевым проводом идущим из криостата, который в свою очередь соединен с медной клеммой измерительного прибора. Один из контактов медь-алюминий находится при температуре жидкого гелия, второй при комнатной температуре. Ориентировочное значение термо ЭДС составляет 0.1 мВ. Простейший метод борьбы – все проводники, входящие в холодное или горячее место должны быть сделаны из одного материала. Для контроля отсутствия термо ЭДС в сигнале используется переполусовка (смена знака) измерительного тока.

**Токи утечки.** Токи утечки возникают из-за несовершенства изоляции. Они проявляются на высокоомных по входу измерительных схемах. Зависят от материала изолятора, количества пыли и влажности. Токи утечки приводят к возникновению мультипликативной помехи, поскольку они эквивалентны подключению сопротивления параллельно входу измерительной системы. Сопротивление между двумя точками на печатной плате, разделенными расстоянием в 1 см, через некоторое время после изготовления не превосходит  $10^8$  Ом. Пассивные способы борьбы состоят в очистке от жира, пыли и уменьшении влажности. Однако существует и активный способ борьбы с токами утечки. Рассмотрим его более подробно. Соответствующая схема показана на рис. 23.

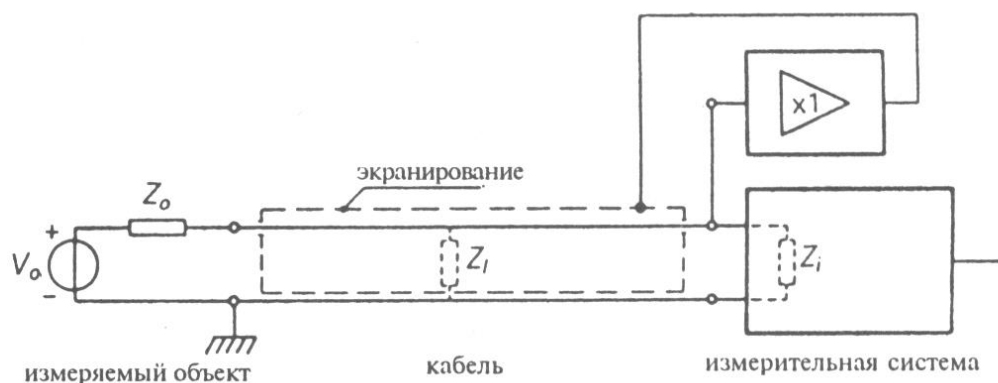


Рис. 23.

Для активной защиты используется дополнительный экран, поддерживаемый с помощью цепи обратной связи под потенциалом центрального проводника. Соответствующие кабели с двумя экранами называются триаксиалами. Если, например, исходный импеданс утечки составлял  $Z_i$ , а обратная связь осуществляется повторителем напряжения с коэффициентом 1-ε, то эффективный импеданс утечки будет равен  $Z_i/\epsilon$ . На печатных платах вблизи защищаемого проводника создают две защитные дорожки, по обе стороны от проводника.

**Емкостная наводка.**

Всегда существует небольшая емкость между входом измерительной системы и каким-либо источником переменного напряжения. В качестве последнего часто выступают провода сетевого напряжения с переменным напряжением частотой 50 Гц. При прочих равных параметрах аддитивная емкостная наводка тем больше, чем

больше импеданс входной цепи. Способы борьбы с емкостной наводкой: уменьшение емкости между входом и источником наводки, понижение входного импеданса, экранирование входных цепей медным или алюминиевым экраном. Экран лучше использовать только в качестве защиты от наводки, а не в качестве внешнего проводника входной линии. Соединять экран с землей и внешним проводником следует на том конце, импеданс которого меньше. Правильное подключение экрана при измерении напряжения показано на рис. 24.

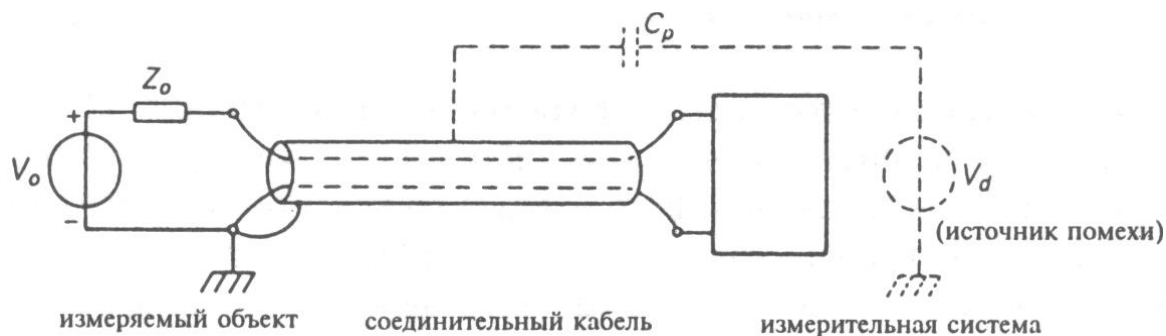


Рис. 24.

*Индуктивная наводка.* Возникает, если во входной цепи имеется петля, и петлю эту пронизывает переменный поток магнитной индукции. Напряжение индуктивной наводки пропорционально частоте изменения магнитного потока и площади петли. Наводка представляет собой аддитивный сигнал помехи. Отношение индуктивной наводки к полезному сигналу невозможно уменьшить выбором входного импеданса. Простейший способ борьбы состоит в устранении петель во входной цепи (скручивание проводов, использование коаксиального кабеля) или в изменении ориентации входа и проводов измерительной системы. Особенно неприятна индуктивная наводка на низких частотах, на которых глубина проникновения электромагнитного поля значительно превышает типичную толщину экранов. Одним из радикальных способов борьбы с низкочастотной индуктивной наводкой является использование толстостенных экранов из магнитомягкого материала. В этом случае поток магнитной индукции концентрируется в толще стенок экрана и не достигает измерительной цепи.

*Сетевые наводки.* Часто бывает, что измеряемый объект подключен к земляной шине не в том месте, что измерительная система. При этом на вход измерительной системы подается сигнал сетевой наводки из-за токов, протекающих по земляной шине между местами подключения измеряемого объекта и измерительного прибора (см. рис. 25.).

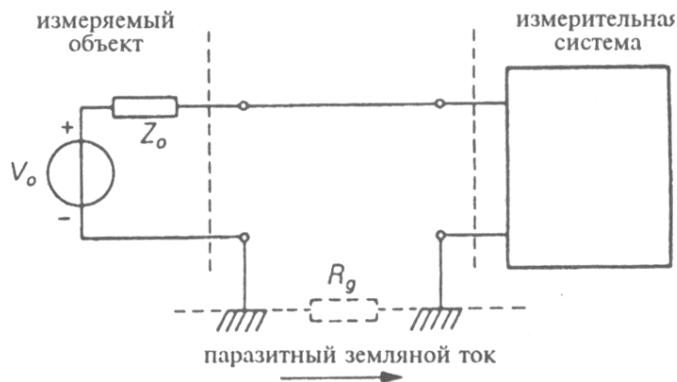


Рис. 25.

Сопротивление  $R_g$  обычно имеет порядок величины 0.1 ом/м, поэтому даже сравнительно небольшие токи по земляной шине создают наводку порядка сотен мВ. Простейший способ борьбы с сетевой наводкой состоит в заземлении в одной точке (рис. 26).

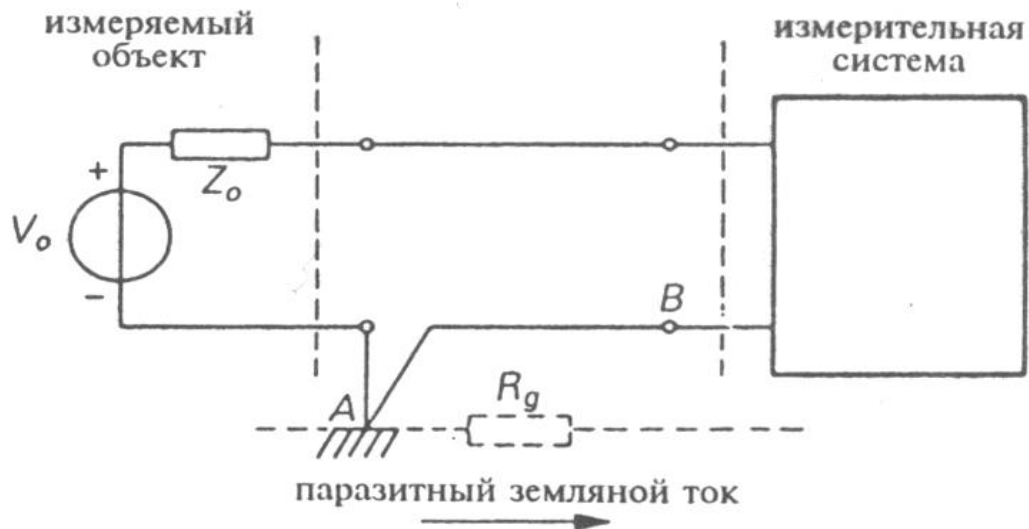


Рис. 26.

Падение напряжения на сопротивлении  $R_g$  теперь уже не подается на вход, однако полностью сетевая наводка не исключается. Дело в том, что между точками А и В текут токи, индуцированные самой измерительной системой. Обычно такие инструментальные наводки на вход значительно ниже чем устраненные за счет заземления в одной точке.

Многие приборы имеют, так называемый плавающий или дифференциальный вход. При подключении к такому прибору происходит измерение разности двух сигналов между двумя клеммами, помеченными как “Hi” и “Low” (см. рис. 27).

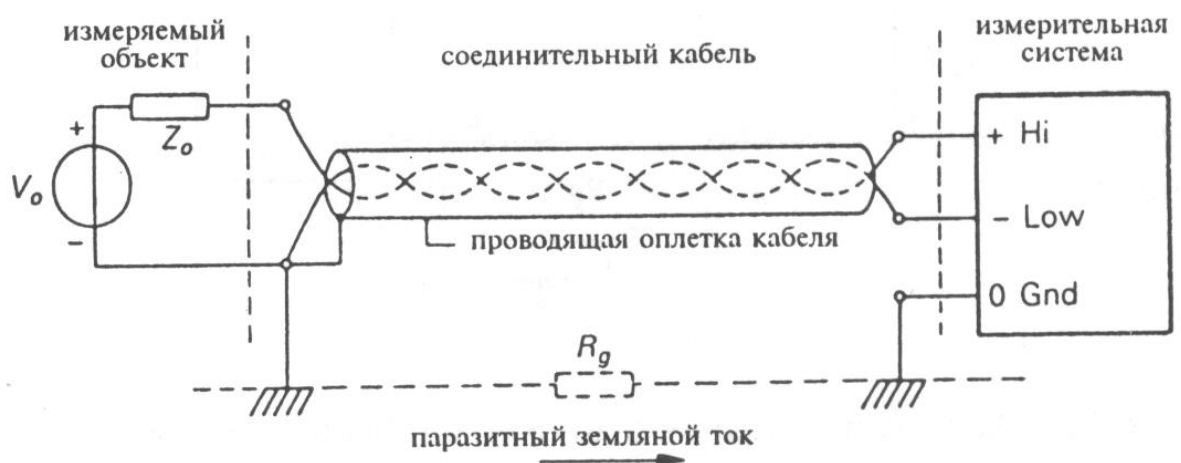


Рис. 27.

Теперь напряжение с сопротивления  $R_g$  подается одновременно на два входа, а измерительная система сконструирована так, чтобы быть минимально чувствительной к таким напряжениям.

*Роль экспериментатора.*

*Где должен находиться экспериментатор во время регистрации данных? Пока регистрация производилась вручную, такого вопроса не было – у измерительной установки. Сейчас, за редчайшими исключениями, регистрация производится автоматически. Можно ли и имеет ли смысл включить, например, автоматику на ночь и утром вернувшись из дома просмотреть полученные результаты. Или же трудолюбиво просидеть десяток часов, глядя как записываются весьма схожие кривые. Универсального ответа на этот вопрос нет. Однако я склоняюсь обычно ко второму варианту. Если контролируется каждая отдельная запись, то, в случае сомнений, можно сразу же повторить запись интересной кривой. Можно, также отфильтровать грубые внешние воздействия: такие как снижение напряжения в сети, нестабильность температуры, тряска и т.д.*

*Вместе с тем, вклад экспериментатора в результат может быть и произвольно отрицательным. Такое случается, как правило, при поиске сигнала незначительно превышающего уровень шума. В этом случае, особенно если параметры ожидаемого сигнала предварительно известны, возможна произвольная необъективная выборка. Она возникает примерно следующим образом. Если в нужном месте нет ожидаемого максимума, а есть минимум, экспериментатор находит причину, почему именно эту запись не нужно учитывать. (Оказывается, например, что на ней шум побольше, чем на предыдущей.) Таким способом отбираются записи, имеющие в предполагаемом месте исключительно максимумы и, после усреднения, в результате вмешательства экспериментатора «на нужном месте» обнаруживается ожидаемый сигнал с неплохим отношением сигнала к шуму. Будьте бдительны!*

## 16. Структура измерительных систем

Структура измерительной системы зависит от того, является измеряемый объект активным или пассивным. В первом случае для измерений параметров объекта не нужно внешнего возбуждения. Во втором, используется источник возбуждения и регистрируется отклик на возбуждение (как правило, линейный) измеряемого объекта. В последнем случае, измерительная система должна обладать источником возбуждения. Поскольку в большинстве случаев удобно работать с электрическими сигналами достаточно большой мощности, измерительная система должна содержать блок преобразования сигнала. После преобразования сигнал должен быть подвергнут обработке, соответственно, измерительная система должна иметь блок обработки. Далее сигнал может быть использован для регистрации, для индикации (и доведения до сведения экспериментатора) и/или для управления. Соответственно, измерительная система может включать в себя на выходе три блока, включенных в параллель: регистрации, индикации и управления.

### Измерительные датчики

В последние годы, в связи с развитием автоматизированных систем производства в промышленности, разработка датчиков (часто их называют сенсорами) стала бурно развивающейся областью прикладной науки. Датчики могут быть основаны на специфических реакциях (химические датчики) и на использовании физических принципов. Некоторые из датчиков второго рода кратко рассмотрены ниже.

### Общие принципы

Измерительный датчик – это устройство, преобразующее сигнал одного типа (смещение, температуру, скорость, ускорение, деформацию и т.д.) в сигнал другого типа (электрический, в подавляющем большинстве случаев). Преобразование

желательно иметь линейное. Для улучшения линейности и одновременно введения параллельной компенсации используются датчики в балансной конфигурации. Представим себе, что у нас имеется два датчика с одинаковой передаточной характеристикой  $y=f(x)$ . Включим эти преобразователи таким образом, чтобы появление сигнала  $x$  на одном из них приводило к одновременному появлению сигнала  $-x$  на втором. Пусть передаточная функция представляется в виде ряда:  $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots$ . Тогда в балансном включении останутся только нечетные степени  $y = 2a_1x + 2a_3x^3 + \dots$ . Выигрыш в линейности очевиден.

Другая возможность сильно повысить линейность и нечувствительность к помехам состоит в использовании измерительных датчиков с обратной связью. Пусть у нас имеется датчик  $T_1$ , осуществляющий прямое преобразование  $y=f(x)$ , обладающий сильной нелинейностью, и второй датчик  $T_2$ , осуществляющий обратное преобразование. Второй датчик предполагается линейным и невосприимчивым к помехам. В этой ситуации использование одного первого датчика крайне невыгодно. Составим цепь обратной связи, показанную на рис. 28.

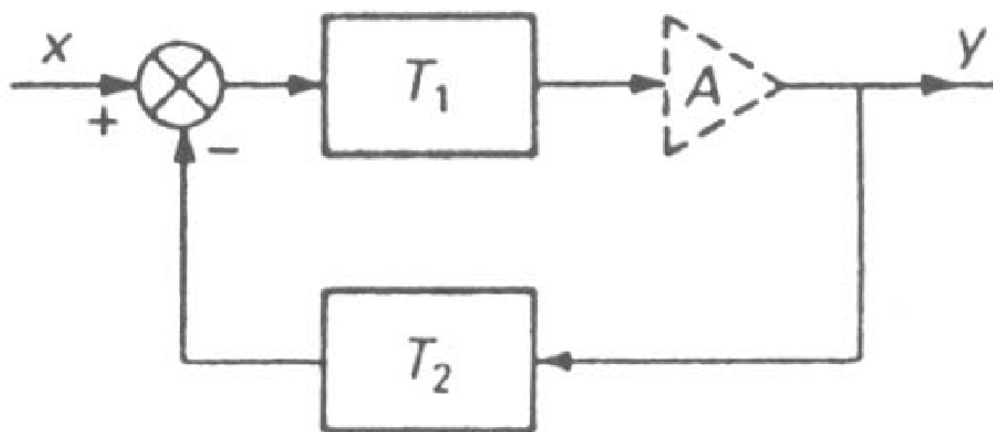


Рис. 28.

Поскольку преобразователь  $T_1$  служит в этой схеме 0-индикатором, линейность составной системы будет определяться линейностью датчика  $T_2$ .

Как правило, динамический диапазон измерительных датчиков не велик: от 3 до 10.

### **Датчики смещения**

*Резистивные датчики смещения.* Простейшим датчиком смещения является реостат с движком, в котором сопротивление между одним из контактов реостата и движком пропорционально смещению движка. Возможности такого рода датчиков ограничены конечной разрешающей способностью (обусловленной конечным диаметром провода реостата), а срок службы ограничен механическим износом движка.

В других типах резистивных датчиков смещения (тензометрах) используется тот факт, что сопротивление металлического проводника зависит от его длины и поперечного сечения. На тонкую подложку наносят металлическую фольгу так, как это показано на рис. 26. Фольгу наносят в виде меандра, чтобы увеличить чувствительность датчика. Места поворота делают существенно более широкими и короткими, чем измерительные металлические полосы, чтобы уменьшить чувствительность датчика к деформациям в перпендикулярном направлении. Проблемы таких датчиков связаны с необходимостью жесткой склейки с измеряемым объектом, в термическом расширении подложки, а также с температурной

зависимостью сопротивления металлической пленки. Последнее особенно существенно, если вместо металла используется полупроводниковая пленка.

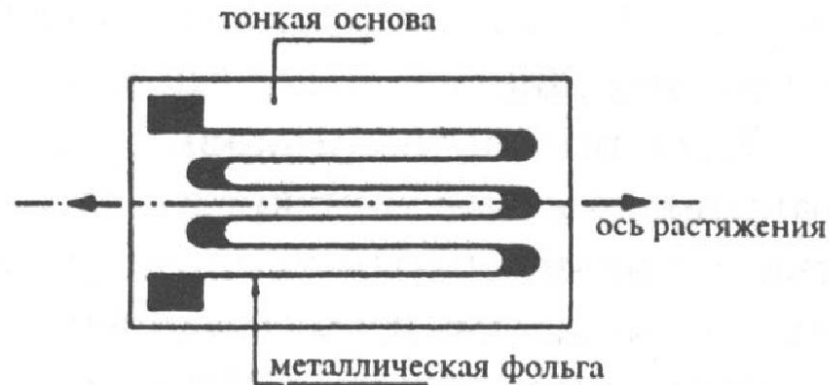


Рис. 29.

**Емкостные датчики смещения.** Поскольку величина емкости пропорциональна площади пластин конденсатора, обратно пропорциональна расстоянию между ними и пропорциональна диэлектрической проницаемости среды, принципиально возможны три типа емкостных датчиков смещения, изображенные на рис. 30.

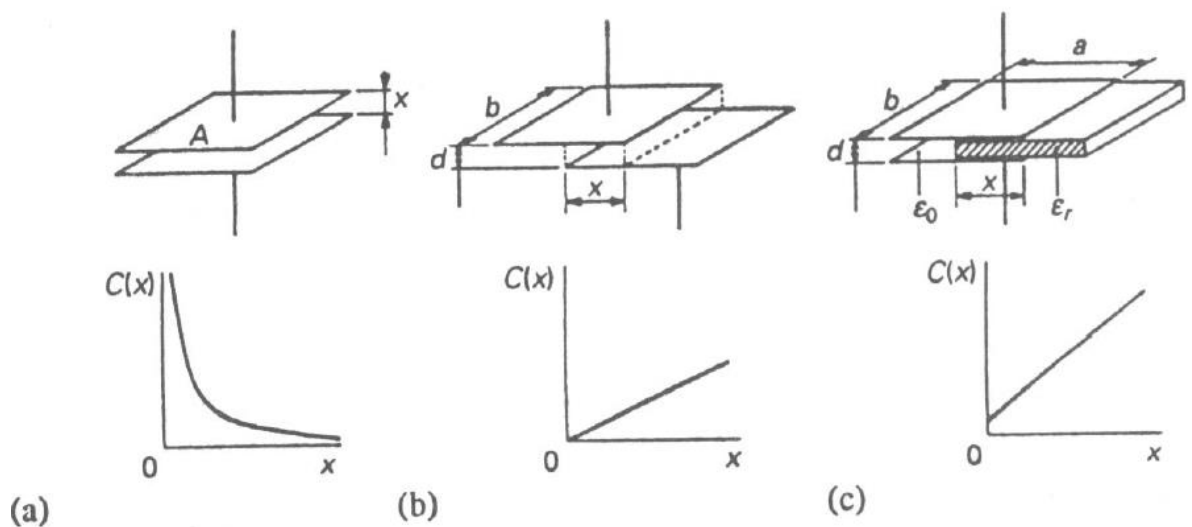


Рис. 30

Основным преимуществом емкостных датчиков является принципиально достижимая высокая чувствительность. Дело в том, что датчик может быть включен в состав резонансной радиочастотной цепи и, следовательно, измерение смещения может быть сведено к измерению частоты.

**Задача.** Считая геометрические размеры известными, определить коэффициент чувствительности емкостного датчика типа изображенного на рис. 31а.

**Индуктивные датчики смещения.** Возможность использовать катушку индуктивности в качестве датчика смещения состоит, во-первых, в использовании взаимной индукции двух катушек, во вторых, в изменении индуктивности при смещении

ферромагнитного сердечника рис. 28а, в третьих, в изменении магнитного сопротивления при смещении одного из элементов магнитного контура (Рис. 31 б).

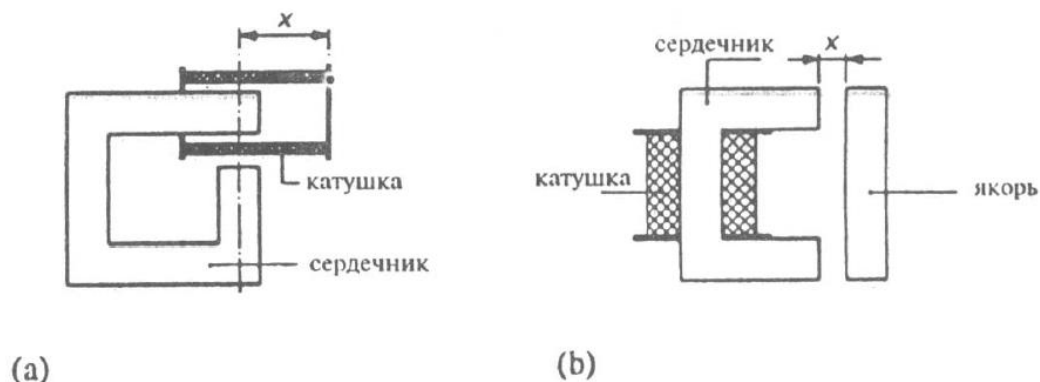


Рис. 31.

Что касается измерения индуктивности, то для этой цели используются мостовые схемы или, если индуктивность не слишком велика, как и в случае емкости, включение индуктивности в колебательный контур. Существует множество вариаций предложенной техники, дифференциальный трансформатор, например, разбалансирующийся при смещении сердечника.

*Оптические датчики смещения.* Для регистрации смещения могут быть использованы оптические датчики, состоящие из ленты с чередующимися темными и светлыми полосами, жестко прикрепленной к перемещающемуся объекту. Световой датчик при этом должен различать, темная или светлая полоса находится перед ним. Удобно для простоты отсчета нанести несколько рядов полос на одну ленту и поставить, соответственно несколько датчиков. Тогда смещение будет соответствовать изменению прозрачности старшего разряда + изменение прозрачности всех младших. Работать удобно в двоичном коде. Принципиально подобные датчики позволяют регистрировать смещения до 1мм.

#### **Датчики скорости**

*Преобразование угловая скорость – частота.* Для измерения скорости вращения удобно использовать преобразование угловая скорость – частота. Для этого на вращающемся объекте достаточно установить какие либо метки и регистрировать частоту прохождения меток мимо детектора.

*Измерение скорости путем дифференцирования и интегрирования.* Для измерения линейной скорости может быть использован любой датчик смещения с дифференцированием сигнала этого датчика или любой датчик ускорения, соответственно с интегрированием сигнала. В последнем случае будет регистрироваться разность скоростей.

*Датчик скорости может быть построен и на эффекте Доплера.* Так, например, работают всем известные милицейские измерители скорости. На движущийся объект посылается электромагнитная волна (обычно СВЧ диапазона) известной частоты. Измеряется пропорциональное скорости объекта смещение частоты отраженной волны. Используется продольный эффект

#### **Датчики ускорения**

Для построения датчика ускорения может быть использован, например, второй закон Ньютона. То есть, можно измерять силу, необходимую для придания ускорения, равного ускорению измеряемого объекта, известной массе. Для того, чтобы датчик не возмущал движение измеряемого объекта его масса должна быть сведена к минимуму. Кроме того возникают проблемы с переходными процессами

(колебаниями малой массы относительно положения равновесия). Однако, основная проблема состоит в применении подходящего датчика силы.

### Датчики силы

Простейшими датчиками силы являются пружины. Конструкции нескольких типов пружин, кольцевой, винтовой, спиральной и мембранной приведены на рис. 32. Другую возможность построения датчика силы предоставляют нам пьезоэлектрические преобразователи. Их действие основано на том, что у некоторых материалов при деформации появляется электрическая поляризация.

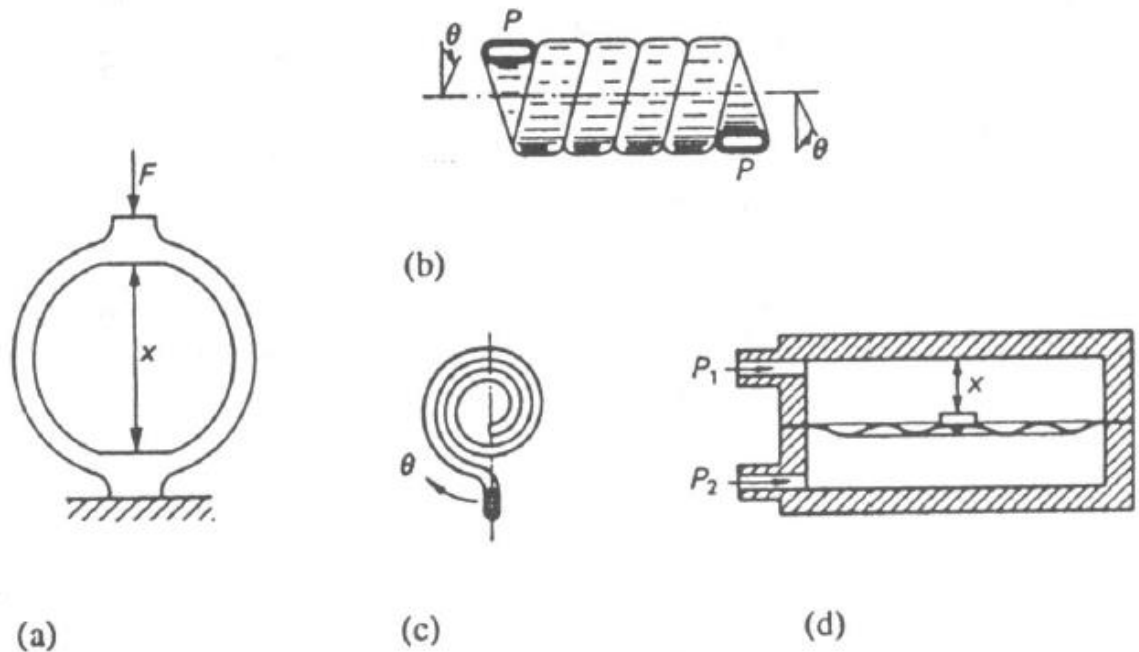


Рис.32.

Для появления пьезоэлектрического эффекта у кристалла должен отсутствовать центр симметрии. Примером такого материала является кристаллический кварц.

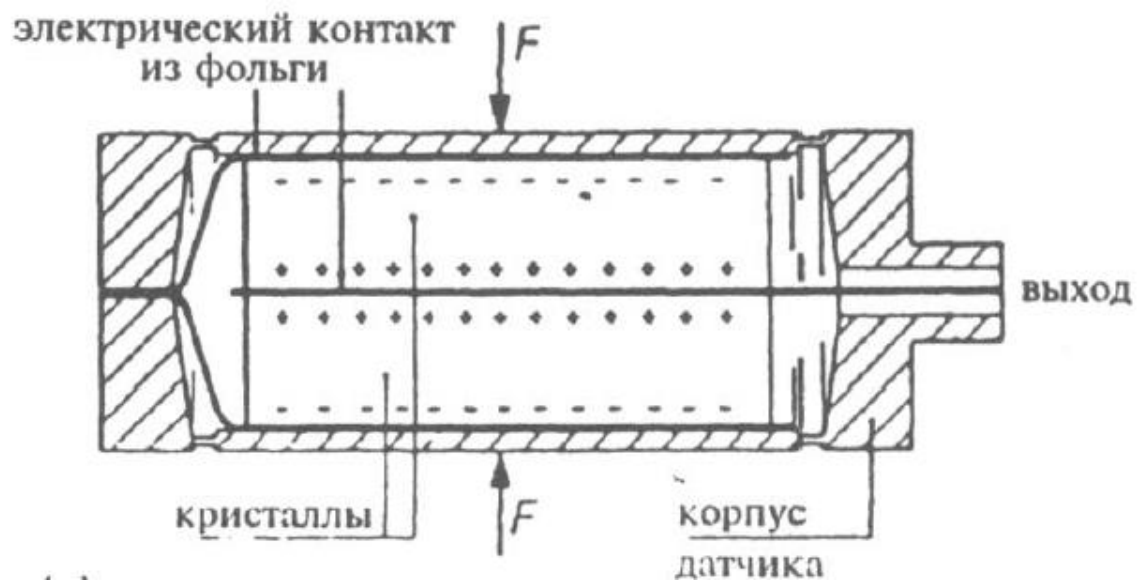


Рис. 33.

Другим примером являются так называемые ферроэлектрики, у которых симметрия нарушена спонтанным появлением электрической поляризации, например титанат бария. Датчик давления на основе монокристалла кварца показан на рис. 33. К сожалению, такой датчик, хорошо реагирующий на смену давления, мало пригоден для измерения статических давлений, поскольку заряды появившиеся на электродах постепенно стекают из-за конечности электрического сопротивления между контактами (из-за тривиального загрязнения, например).

#### **Термоэлектрические датчики**

Существует большое количество различных датчиков температуры. Однако, как уже упоминалось удобно любой сигнал перевести в сигнал электрический, поэтому особо широко распространены датчики термоэлектрического типа.

*Резистивные датчики.* Сопротивление любого материала зависит от температуры. Этот эффект может быть использован для построения резистивного датчика температуры. Для увеличения чувствительности такого датчика выгодно использовать материалы с сильной температурной зависимостью сопротивления, полупроводниковые, например.

Такие полупроводниковые датчики температуры именуют термисторами. Однако, повышение чувствительности сопровождается одновременной потерей линейности и сужением диапазона измерений. Резистивные датчики особенно часто применяются при измерении низких температур ( $T < 4\text{K}$ ). Следует помнить, что их показания сильно зависят от магнитного поля, поэтому приходится либо калибровать датчик для набора магнитных полей, либо пользоваться датчиком, вынесенным из магнитного поля.

*Термопары.* Если соединить два проводника, сделанные из различных материалов, то на концах возникнет так называемая контактная разность потенциалов. Вообще говоря, обычным вольтметром, измеряющим не электрический потенциал, а разность электрохимических потенциалов (мы более подробно будем обсуждать этот факт на 4 курсе) замерить эту разность потенциалов невозможно, несмотря на ее большую (порядка вольта) величину. Физической причиной, по которой возникает контактная разность потенциалов является диффузия электронов проводимости из того проводника, где их больше, в проводник с меньшим количеством электронов. Процесс перетекания электронов будет продолжаться до тех пор, пока не установится динамическое равновесие и обратный поток за счет электрического поля не уравнивает диффузионный поток. Именно это обстоятельство и делает невозможным измерение контактной разности потенциалов с помощью обычного вольтметра, требующего протекания тока. Поскольку в системе установлено термодинамическое равновесие, ток не потечет. Если теперь последовательно соединить три проводника в комбинации АВА, и места спаев держать при различных температурах, то на концах возникнет уже небольшая разность электрохимических потенциалов, в первом приближении пропорциональная разности температур. Наиболее популярны термопары медь-константан и хромель-алюмель. Соответствующие сплавы имеют состав;

Хромель Ni-90%, Cr -10%

Константан Cu-54%, Ni-45%, Mn-1%,

Алюмель Ni-95%, Mn-3%, Al-2%, Si-1%.

При измерениях один из спаев термопары помещают в термостат, например, погружают в жидкий азот или гелий, и измеряют разность температур термостата и измеряемого объекта. Типичная чувствительность термопар (коэффициент Зеебека) составляет  $5\text{мкВ/К}$ .

#### **Термометры излучения**

Термометры излучения (пирометры) используются в тех случаях, когда непосредственный контакт с измеряемым объектом невозможен вследствие его удаленности или экстремально высокой температуры. Одна из возможностей

измерения температуры, не требующая калибровки, состоит в анализе видимой части спектра и сравнении ее с известным спектром теплового излучения абсолютно черного тела. В ряде случаев излучение измеряемого объекта фокусируют с помощью линз или зеркал на резистивном датчике. При наличии соответствующей калибровки, температура резистивного датчика будет мерой температуры измеряемого объекта.

#### Датчики магнитного поля

Простейшим датчиком магнитной индукции может служить вращающаяся катушечка с известным количеством витков и с известной площадью сечения. Если катушка вращается с угловой скоростью  $\omega$  в однородном магнитном поле  $B$  и имеет площадь сечения  $S$  с числом витков  $n$ , то на ней возникает переменное напряжение, равное (в системе СИ)

$$V = -n B_n \omega S \cos(\omega t).$$

Еще более известны датчики, основанные на эффекте Холла. Происхождение эффекта

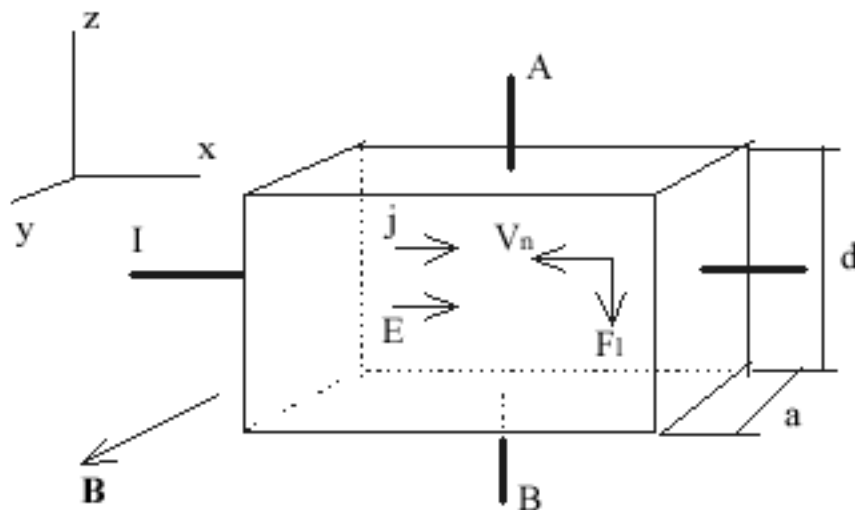


Рис. 34.

ясно из рис. 34. В скрещенных электрических и магнитных полях не рассеивающиеся электроны дрейфуют параллельно векторному произведению  $[EB]$ , что в конечном итоге и приводит к появлению напряжения между контактами  $A$  и  $B$ . Тот же эффект легко может быть объяснен в обратном предельном случае сильного рассеяния. В этом случае электроны под влиянием продольного электрического поля приобретают отличную от нуля дрейфовую скорость вдоль оси  $X$ . При этом на каждый электрон действует сила Лоренца, пропорциональная величине магнитного поля. Следовательно, вдоль  $Z$  появится разность потенциалов пропорциональная величине магнитного поля. Схема полупроводникового датчика Холла показана на рис. 35. А вид промышленного датчика на рис. 36.

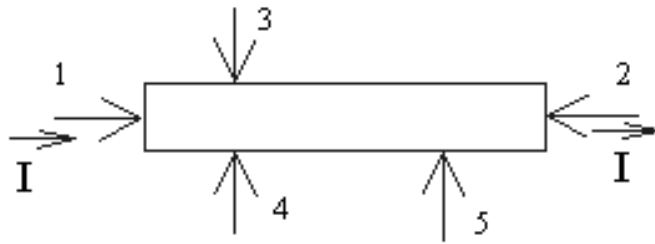


Рис.35.

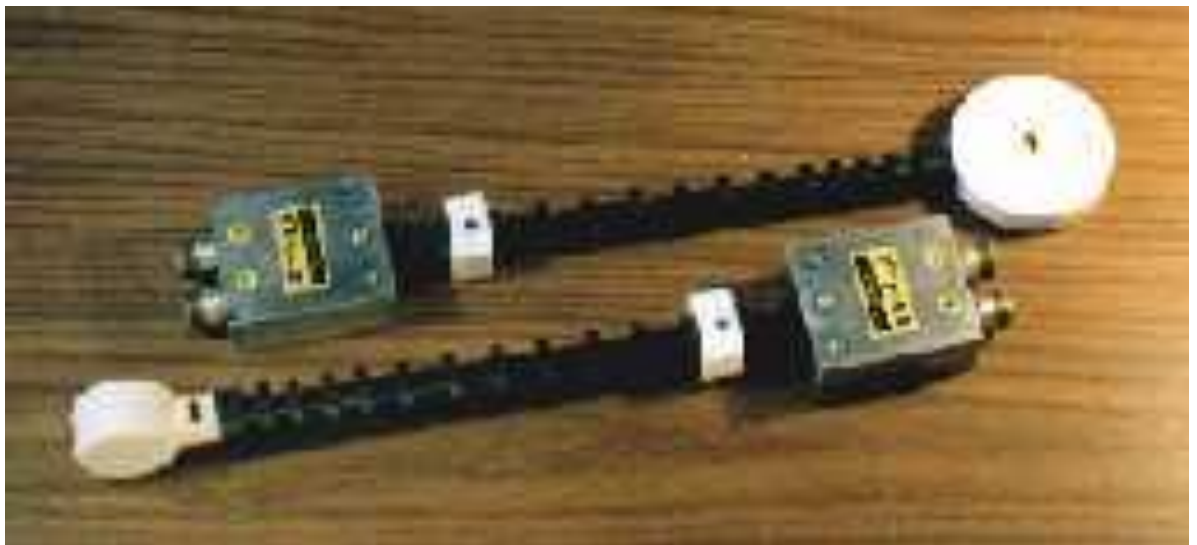


Рис. 36.

Для точных измерений магнитного поля используются датчики, основанные на явлении ядерного магнитного резонанса. Эти датчики производят преобразование поле – частота и поэтому являются наиболее точными. К сожалению, для их использования поле должно быть высокооднородным.

#### **Датчики больших постоянных токов**

Большие токи удобно измерять бесконтактным образом, пользуясь измерением магнитного поля, индуцируемого током (См. рис. 37). Используют разрезное ферромагнитное кольцо, охватывающее проводник. В каждый из разрезов помещается датчик Холла так, что напряжения датчиков суммируются. ЭДС Холла, возникающие из-за внешних магнитных полей в датчиках равны по величине и противоположны по знаку (из-за симметрии распределения потока магнитной индукции в разных плечах). Поэтому датчик малочувствителен к внешним полям.

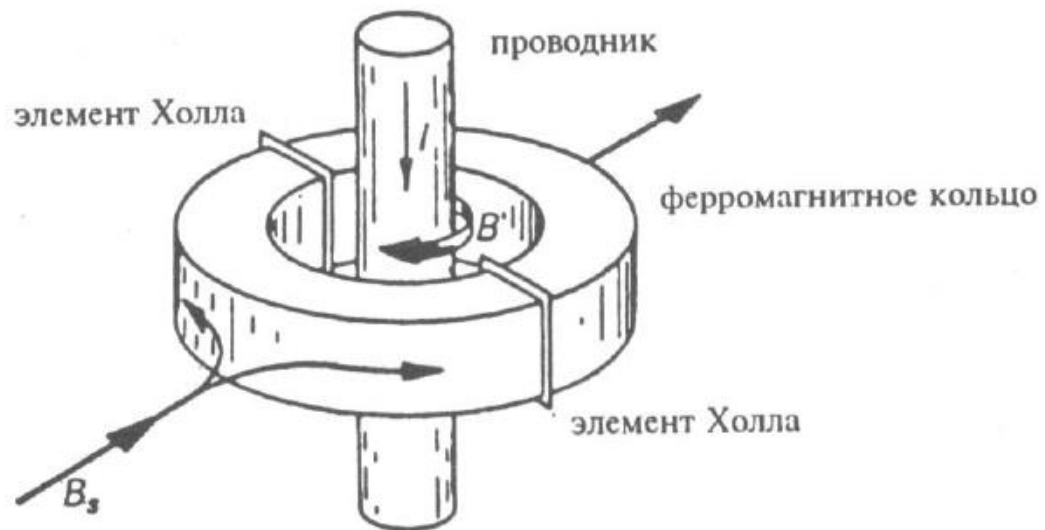


Рис. 37.

## 17. Преобразование измеряемого сигнала

### Операционные усилители

Очень часто начальное преобразование измеряемого сигнала приходится производить не стандартными, а самодельными приборами, специально созданными для конкретного эксперимента. Одним из важнейших элементов, используемым для построения подобных преобразователей является операционный усилитель. Внешний вид операционного усилителя (с увеличением) показан на рис. 38.

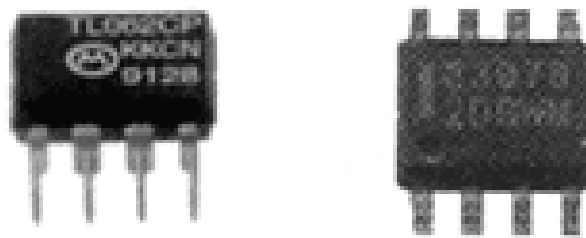


Рис. 38.

Операционные усилители представляют собой усилители постоянного тока с низкими значениями входных токов и с высоким коэффициентом усиления. По размерам и цене они практически не отличаются от отдельного транзистора. В то же время, преобразование сигнала схемой на ОУ почти исключительно определяется свойствами цепей обратных связей усилителя и отличается высокой стабильностью и воспроизводимостью. Кроме того, благодаря практически идеальным характеристикам ОУ реализация различных электронных схем на их основе оказывается значительно проще, чем на отдельных транзисторах. Поэтому операционные усилители почти полностью вытеснили отдельные транзисторы в качестве элементов схем ("кирпичиков") во многих областях аналоговой схемотехники.

На рис. 36 дано схемное обозначение операционного усилителя. Входной каскад его выполняется в виде дифференциального усилителя, так что операционный усилитель имеет два входа. В дальнейшем будем, при необходимости, обозначать неинвертирующий вход буквой  $p$  (positive - положительный), а инвертирующий - буквой  $n$  (negative - отрицательный). Выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  находится в одной фазе с разностью входных напряжений:

$$U_{\text{вых}} = U_1 - U_2$$

Чтобы обеспечить возможность работы операционного усилителя как с положительными, так и с отрицательными входными сигналами, следует использовать двухполярное питающее напряжение. Для этого нужно предусмотреть два источника постоянного тока, которые, как это показано на рис. 39, подключаются к соответствующим внешним выводам ОУ. Обычно интегральные операционные усилители работают с напряжением питания  $\pm 15$  В. В дальнейшем, рассматривая схемы на ОУ, мы, как правило, не будем указывать выводы питания.

Наконец, **очень важное обстоятельство**: операционный усилитель почти всегда охвачен *глубокой отрицательной обратной связью*, свойства которой и определяют свойства схемы с ОУ.

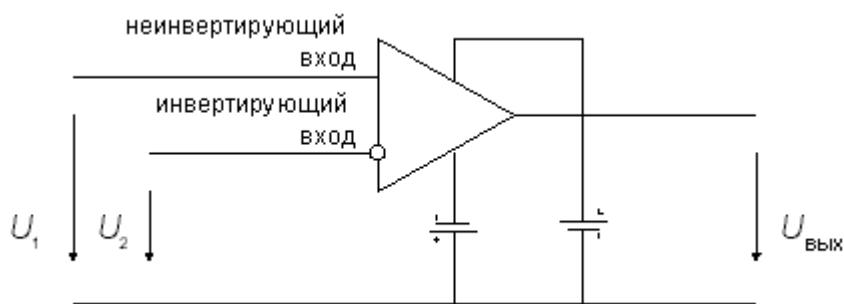


Рис.39.

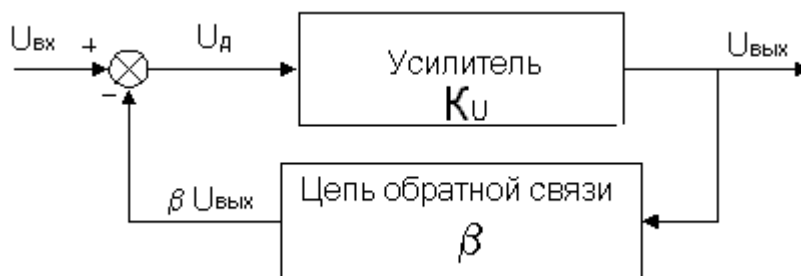


Рис. 40.

Принцип введения отрицательной обратной связи иллюстрируется рис. 40. Для физического анализа схемы, представленной на рис. 40, допустим, что входное напряжение изменилось от нуля до некоторого положительного значения  $U_{\text{вх}}$ . В первый момент выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$ , а следовательно, и напряжение обратной связи  $\beta U_{\text{вых}}$  также равны нулю. При этом напряжение, приложенное ко входу операционного усилителя, составит  $U_{\text{д}} = U_{\text{вх}}$ . Так как это напряжение усиливается усилителем с большим коэффициентом усиления  $K_{\text{у}}$ , то величина  $U_{\text{вых}}$  быстро возрастет до некоторого положительного значения и вместе с ней возрастет также величина  $\beta U_{\text{вых}}$ . Это приведет к уменьшению напряжения  $U_{\text{д}}$ , приложенного ко

входу усилителя. Тот факт, что выходное напряжение воздействует на входное напряжение, причем так, что это влияние направлено в сторону, противоположную изменениям входной величины и есть проявление отрицательной обратной связи. После достижения устойчивого состояния выходное напряжение ОУ

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_U U_{\text{Д}} = K_U (U_{\text{ВХ}} - \beta U_{\text{ВЫХ}}).$$

Решив это уравнение относительно  $U_{\text{ВЫХ}}$ , получим:

$$K = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = K_U / (1 + \beta K_U)$$

При  $\beta K_U \gg 1$  коэффициент усиления ОУ, охваченного обратной связью составит

$$K \cong 1/\beta$$

Таким образом, из этого соотношения следует, что коэффициент усиления ОУ с обратной связью определяется почти исключительно только обратной связью и мало зависит от параметров самого усилителя. В простейшем случае цепь обратной связи представляет собой резистивный делитель напряжения. При этом схема с ОУ работает как линейный усилитель, коэффициент усиления которого определяется только коэффициентом ослабления цепи обратной связи. Если в качестве цепи обратной связи применяется RC-цепь, то образуется активный фильтр. Наконец, включение в цепь обратной связи ОУ диодов и транзисторов позволяет реализовать нелинейные преобразования сигналов с высокой точностью.

Для уяснения принципов действия схем на ОУ и приближенного их анализа оказывается полезным ввести понятие идеального операционного усилителя. Будем называть идеальным операционный усилитель, который имеет следующие свойства:

- бесконечно большой дифференциальный коэффициент усиления по напряжению  $K_U = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta (U_1 - U_2)$  (у реальных ОУ от 1 тыс. до 100 млн.);
- нулевое напряжение смещения нуля  $U_{\text{см}}$ , т.е. при равенстве входных напряжений выходное напряжение равно нулю (у реальных ОУ  $U_{\text{см}}$ , приведенное ко входу, находится в пределах от 5 мкВ до 50 мВ);
- нулевые входные токи (у реальных ОУ от сотых долей пА до единиц нА);
- нулевое выходное сопротивление (у реальных маломощных ОУ от десятков Ом до единиц кОм);
- коэффициент усиления синфазного сигнала равен нулю;

мгновенный отклик на изменение входных сигналов (у реальных ОУ время установления выходного напряжения от единиц наносекунд до сотен микросекунд)

### Дифференциальное включение операционных усилителей.

Пример дифференциального включения операционного усилителя показан на рис. 41.

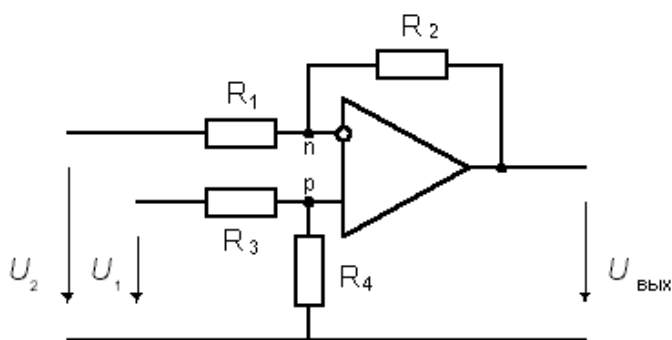


Рис.41.

На рис.41 приведена схема дифференциального включения ОУ. Найдем зависимость выходного напряжения ОУ от входных напряжений. Вследствие свойства а) идеального операционного усилителя разность потенциалов между его входами  $p$  и  $n$  равна нулю. Соотношение между входным напряжением  $U_1$  и напряжением  $U_p$  между неинвертирующим входом и общей шиной определяется коэффициентом деления делителя на резисторах  $R_3$  и  $R_4$ :

$$U_p = U_1 R_4 / (R_3 + R_4)$$

Поскольку напряжение между инвертирующим входом и общей шиной  $U_n = U_p$ , ток  $I_1$  определится соотношением:

$$I_1 = (U_2 - U_p) / R_1$$

Вследствие свойства с) идеального ОУ именно этот ток протекает по сопротивлению  $R_2$ . Выходное напряжение усилителя в таком случае равно:

$$U_{\text{вых}} = U_p - I_1 R_2$$

Подставив ранее выписанные соотношения, получим:

$$U_{\text{вых}} = \frac{(R_1 + R_2) R_4}{R_1 (R_3 + R_4)} U_1 - \frac{R_2}{R_1} U_2$$

При выполнении соотношения  $R_1 R_4 = R_2 R_3$ ,

$$U_{\text{вых}} = (U_1 - U_2) R_2 / R_1$$

Нетрудно убедиться, что последние соотношения справедливы и в случае, если вместо резисторов  $R_1$  и  $R_2$  включены двухполюсники, содержащие в общем случае конденсаторы и катушки индуктивности, с операторным входным сопротивлением, соответственно,  $Z_1(s)$  и  $Z_2(s)$ .

#### **Инвертирующее включение, преобразователь ток- напряжение.**

Рассмотрим схему, изображенную на рис. 42, в которой неинвертирующий вход ОУ соединяется с общей шиной.

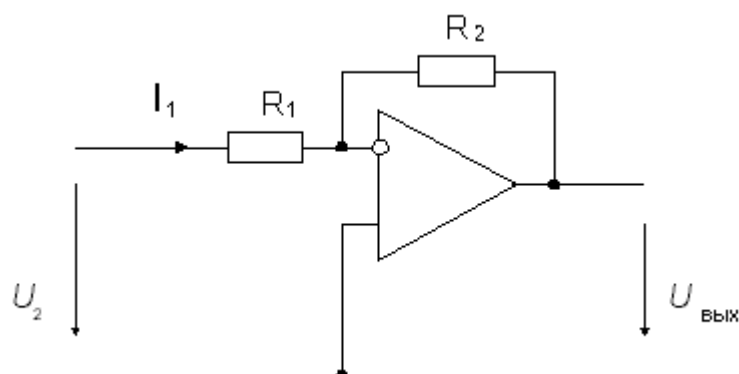


Рис. 42.

Коэффициент усиления этой схемы равен

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_2} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Выходное напряжение усилителя в инвертирующем включении находится в противофазе по отношению ко входному. Коэффициент усиления входного сигнала по напряжению этой схемы в зависимости от соотношения сопротивлений резисторов может быть как больше, так и меньше единицы.

Найдем входное сопротивление схемы. Поскольку напряжение на неинвертирующем входе относительно общей шины равно нулю, согласно свойству а) идеального ОУ входной ток схемы  $I_1 = U_2 / R_1$ . Следовательно, входное сопротивление схемы  $R_{\text{вх}} = R_1$ . Поскольку напряжение на неинвертирующем входе усилителя равно нулю, а согласно свойству а) идеального ОУ разность потенциалов между его входами равна нулю, то инвертирующий вход в этой схеме иногда называют виртуальным (т.е. воображаемым) нулем. С другой стороны, выходное напряжение равно  $U_{\text{вых}} = -R_2 I_1$ . При условии  $R_2 \gg R_1$ , ОУ в инвертирующем включении может служить преобразователем (конвертером) ток-напряжение.

#### Неинвертирующее включение.

При неинвертирующем включении входной сигнал подается на неинвертирующий вход ОУ, а на инвертирующий вход через делитель на резисторах  $R_1$  и  $R_2$  поступает сигнал с выхода усилителя (рис. 43). Здесь коэффициент усиления схемы  $K$  найдем, положив в  $U_2 = 0$ ,  $R_3 = 0$ ,  $R_4$  бесконечно велико. Получим:

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

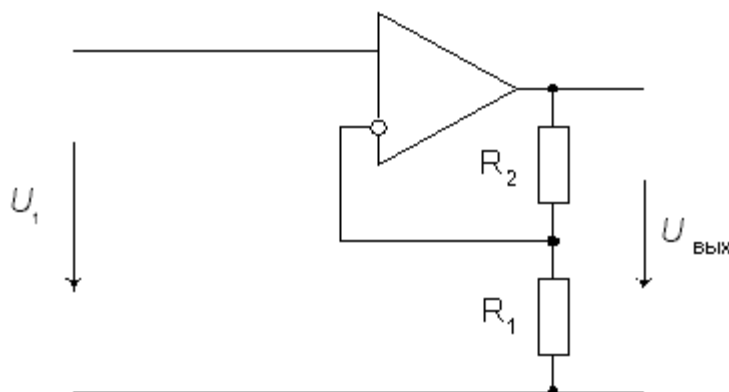


Рис. 43.

Как видно, здесь выходной сигнал синфазен входному. Коэффициент усиления по напряжению не может быть меньше единицы. В предельном случае, если выход ОУ накоротко соединен с инвертирующим входом, этот коэффициент равен единице. Такие схемы называют неинвертирующими повторителями и изготавливают серийно в виде отдельных ИМС по несколько усилителей в одном корпусе. Входное сопротивление этой схемы в идеале - бесконечно.

#### Внутренняя структура операционного усилителя.

Реальный операционный усилитель должен обладать следующими свойствами:

1. высоким коэффициентом усиления по напряжению, в том числе и по постоянному;
2. малым напряжением смещения нуля;
3. малыми входными токами;
4. высоким входным и низким выходным сопротивлением;
5. высоким коэффициентом ослабления синфазной составляющей (КОСС);
6. амплитудно-частотной характеристикой с наклоном в области высоких частот  $-20\text{дБ/дек}$  (для достижения устойчивости на высоких частотах)

Операционный усилитель должен быть усилителем постоянного тока (УПТ) с высоким коэффициентом усиления по напряжению и, следовательно, содержать несколько каскадов усиления напряжения. Однако, с ростом числа каскадов усиления напряжения увеличивается опасность нарушения устойчивости ОУ с обратными связями и усложняются цепи коррекции. Даже усилители с тремя каскадами усиления напряжения имеют сложные схемы включения, и разработчики стараются их не применять. Это вызывает необходимость применения усилительных каскадов с очень высоким коэффициентом усиления по напряжению. Большие трудности проектирования усилителей постоянного тока связаны также со смещением нуля ОУ.

Смещение нуля ОУ проявляется в том, что при входном дифференциальном напряжении, равном нулю, выходное напряжение не равно нулю. Обычно определяют смещение нуля, приведенное ко входу, как такое дифференциальное напряжение, которое нужно приложить ко входу усилителя, чтобы его выходное напряжение было бы равно нулю. Смещение нуля, по сути, является аддитивной погрешностью выполнения математических действий ОУ над входными сигналами. Смещение нуля может иметь существенные температурный и временной дрейфы. Операционные усилители на дискретных транзисторах имели неудовлетворительное смещение нуля, связанное с неидентичностью транзисторов. Только применение и усовершенствование интегральной технологии, позволившей изготавливать парные транзисторы дифференциального каскада в едином производственном цикле и на расстоянии несколько микрон друг от друга, привело к существенному снижению смещения нуля и дрейфов.

Блок-схема операционного усилителя, в большой мере удовлетворяющего требованиям, предъявляемым к ОУ, приведена на рис. 44.

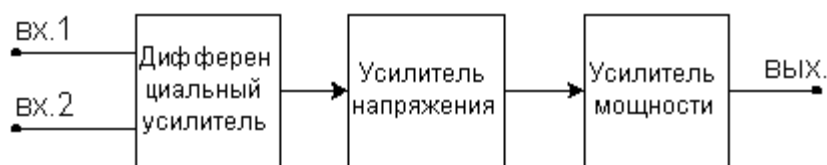


Рис. 44.

**Задача.** На рис. 45 изображена схема дифференциального входного предусилителя с высоким входным сопротивлением. Считая параметры (величины сопротивлений коэффициент усиления ОУ) известными определить входное сопротивление усилителя и коэффициент усиления.

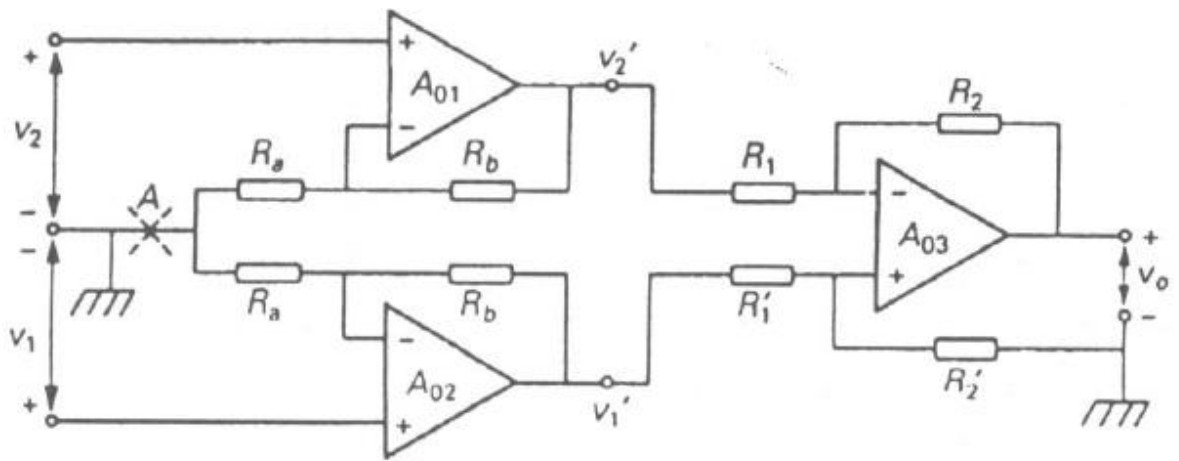


Рис.45.

## 18. Синхронный усилитель (Lock-in Amplifier)

Синхронными усилителями называются усилители, чувствительные только к определенной частоте и выходной сигнал которых пропорционален сигналу выбранной частоты, находящемуся в фазе с опорным сигналом. Синхронные усилители являются сейчас наиболее распространенным типом лабораторных усилителей. Синхронный усилитель состоит из собственно усилителя (с расширенным частотным диапазоном), синхронного детектора и генератора опорной частоты. Внешний вид передней панели одного из синхронных усилителей показан на рис. 46.

Рассмотрим подробно одну из возможных реализаций синхронного детектора. Эта реализация основана на перемножении измеряемого сигнала с опорным. Пусть измеряемый сигнал имеет вид

$$U_i = u_i \cos(\omega_i t + \phi)$$

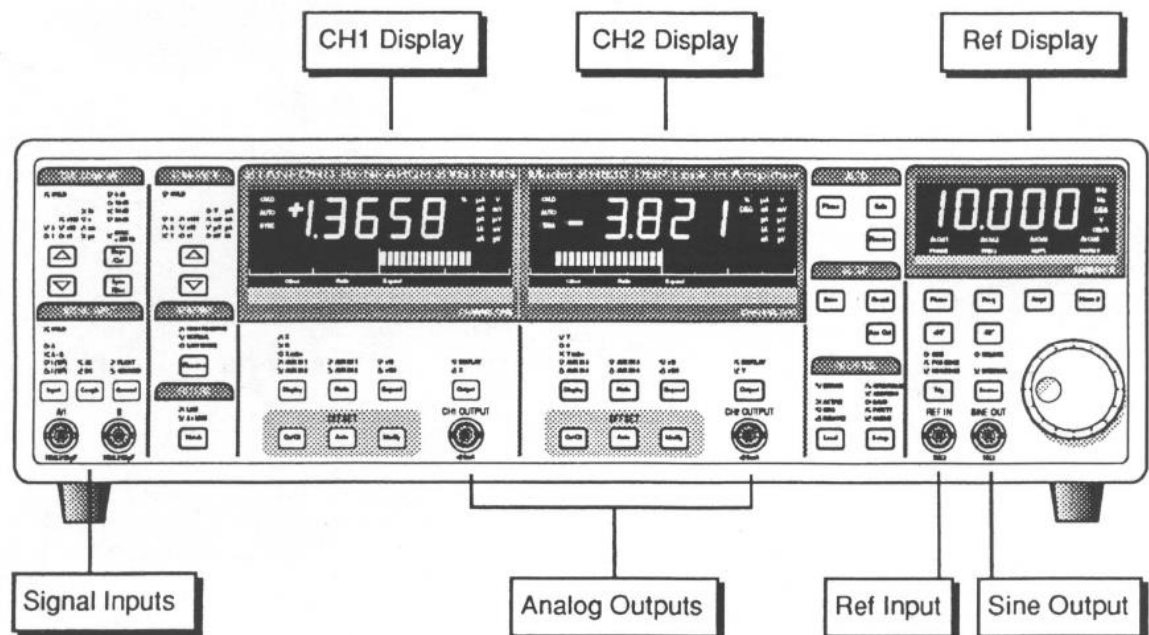


Рис.46.

А опорный сигнал равен  $U_r = u_r \cos(\omega_r t)$ . Их произведение  $U_i U_r = \frac{1}{2} [\cos(\omega_i t + \omega_r t + \phi) + \cos(\omega_i t - \omega_r t + \phi)] u_i u_r$ . Поставив фильтр нижних частот (удалив частоту  $2\omega_r$ ) и детектируя сигнал с постоянной времени  $\tau \gg \omega_r^{-1}$ , получим на выходе сигнал, пропорциональный  $\frac{1}{2} u_i u_r$ . Как мы видим, для правильной работы синхронного детектора такого типа необходимо, чтобы напряжение опорного сигнала было стабильным и чтобы характерное время изменения амплитуды измеряемого сигнала сильно превышало  $\tau$ .

Фазу опорного сигнала можно вращать, исследуя поворот фазы измеряемым объектом. Более того, синхронные усилители являются зачастую двухканальными (см. Рис.46), регистрируя сигналы двух фаз, сдвинутых на  $90^\circ$ .

## 19. Нелинейная обработка сигнала

Как правило, в качестве нелинейной обработки применяется детектирование (пиковое детектирование, детектирование среднего значения, квадратичное детектирование).

**Детекторы среднего значения.** Когда говорят о среднем значении переменного напряжения, имеют в виду среднее значение его модуля. Реализуют подобные детекторы в виде диодного моста, показанного на рис. 47. На Рис.47.a показан путь тока при положительном напряжении на входе, а на Рис.47.b приведен путь тока при отрицательном входном напряжении. Как видно из Рис.47.c, выходной ток представляет собой сумму гармоник выше удвоенной частоты входного сигнала со средним значением. Для выделения среднего значения осталось провести фильтрацию. Приведенная схема далеко не идеальна. Сигнал на выходе зависит от того, что задано, входное напряжение или ток. Недостатки предлагаемой схемы могут быть легко исправлены с помощью операционного усилителя.

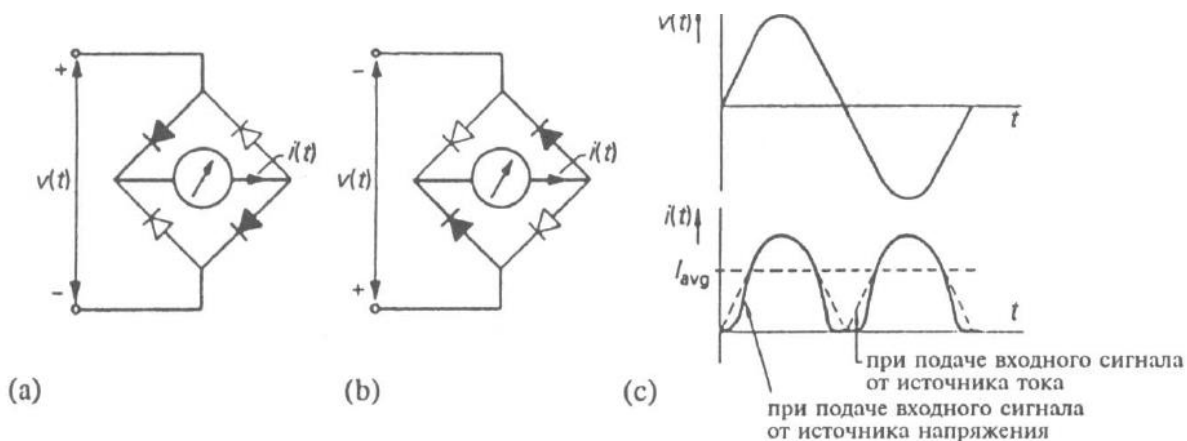


Рис. 47.

Как упоминалось ранее, при заданном напряжении, детектор среднего значения имеет погрешность, связанную с искажением формы сигнала (см. рис. 47). Чтобы устранить этот недостаток, достаточно включить диодный мостик в цепь обратной связи

операционного усилителя так, как это показано на Рис 48. Поскольку усиленный сигнал первой гармоники проходит через диодный мостик практически без искажений, схема является ни чем иным как повторителем, а ток через резистор  $R$  равен отношению входного сигнала к величине сопротивления. Тот же ток протекает через мост. Другими словами, с помощью ОУ мы перешли из режима

заданного напряжения в режим заданного тока и улучшили детекторную характеристику.

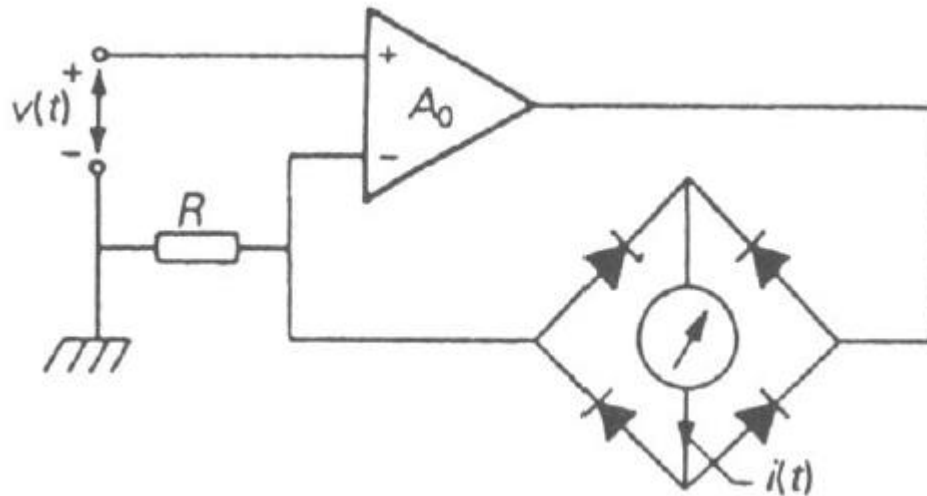


Рис.48.

**Пиковые детекторы.** В ряде случаев бывает необходимо фиксировать максимальное значение сигнала сложной формы. Для периодического сигнала эта задача решается с помощью пикового детектора.

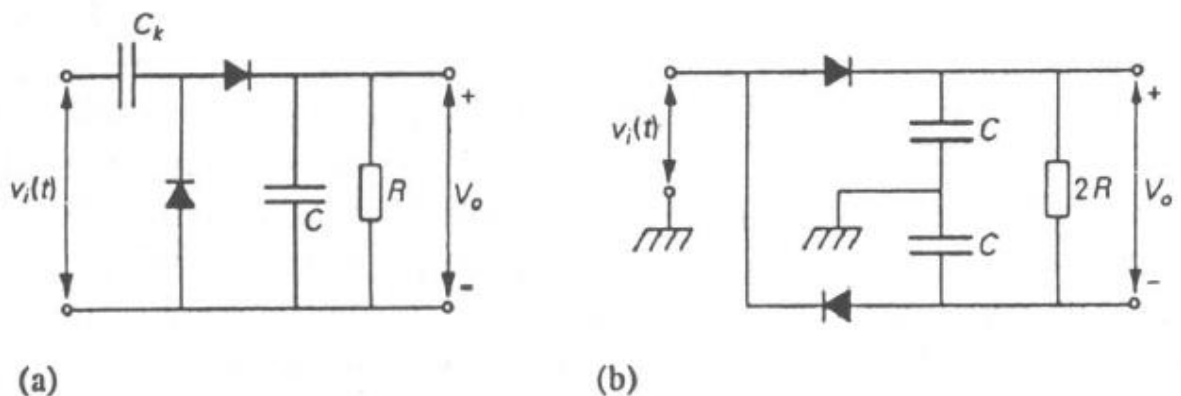


Рис. 49.

На Рис.49а показан пиковый детектор на одну полярность сигнала. Постоянная времени  $RC$  должна сильно превышать период самой низкой гармоники сигнала. Два диода ставятся для того, чтобы обеспечить примерно постоянный импеданс, стоящий параллельно емкости. Неудобством детекторов такого типа является непропорциональность выходного сигнала пиковому значению входного напряжения при малых напряжениях. Кроме того, выходной сигнал пикового детектора слегка пульсирует, с амплитудой пульсаций, определяемой постоянной  $RC$ .

Другой вариант построения пикового детектора показан на рис. 49b. В этой схеме измеряется напряжение пик-пик, то есть разность максимального и минимального сигналов на входе.

**Детекторы среднеквадратичного значения.** Напомним, что среднеквадратичное значение есть корень квадратный из среднего от квадрата измеряемой величины. Поэтому для построения детектора прежде всего следует

построить каскад, возводящий входной сигнал в квадрат. Один из примеров построения такого каскада показан на Рис. 50. Изображенная схема состоит из диодов и резисторов и называется функциональным преобразователем. Операционный усилитель работает в режиме конвертера ток-напряжение, его инвертирующий вход является «кажущимся нулем». Квадратичное преобразование осуществляется с произвольным монотонным сигналом положительной полярности при соответствующем подборе резисторов. Входное напряжение  $V_i$  подается одновременно на несколько параллельных ветвей делителя, образованного сопротивлениями  $R_{aj}$ ,  $R_{bj}$ . Когда напряжение на входе одного из диодов становится положительным, т.е.  $V_i$  превышает  $V_{ref} R_{aj}/R_{bj}$ , соответствующий диод дает вклад в общий ток и в выходное напряжение.

$$V_0 = -RI = -R \sum (V_i - V_j)/R_{aj}.$$

Ясно, что соответствующим подбором резисторов можно реализовать примерно параболическую характеристику. Ее формирование облегчается еще и тем, что диодные характеристики не идеальны и углы на сформированной характеристике будут сглажены.

В принципе, аналогичная схема позволяет реализовать квадратичное преобразование и отрицательной части входного сигнала, а также функцию взятия корня квадратного после усреднения.

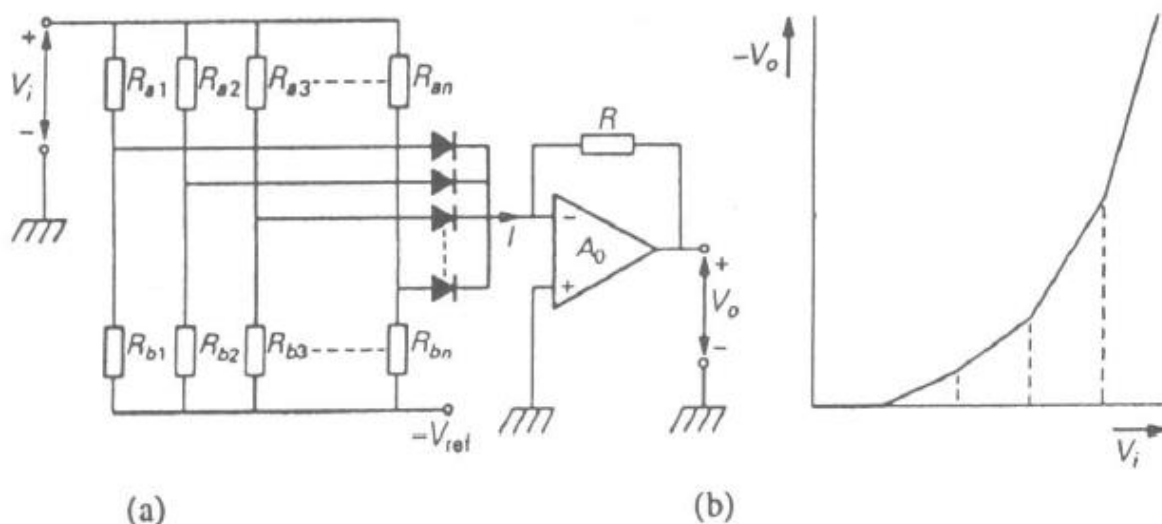


Рис. 50.

Альтернативный метод измерения среднеквадратичного значения состоит в преобразовании измеряемого сигнала в тепловую энергию и измерении, по сути, выделяемой мощности. Соответствующий преобразователь показан на рис. 51a. Входной ток течет по нити накала нагревая ее. Температура нити измеряется термопарой, соединенной с нитью стеклянной капелькой. Практическая схема подобного устройства изображена на Рис. 51b. Вначале стоит преобразователь напряжение-ток. Ток нагревает нить накала одного из идентичных близко расположенных и включенных навстречу преобразователей. Если коэффициент усиления ОУ достаточно велик, то итоговая разность показания термопар равна нулю. Следовательно, выходное напряжение  $V_0 = i_f R = \alpha I_{RMS}$ . Подобные устройства можно применять до довольно высоких частот, порядка 60 МГц. Однако они имеют и ряд недостатков: инерционность, зависимость от температуры окружающей среды и т.д.

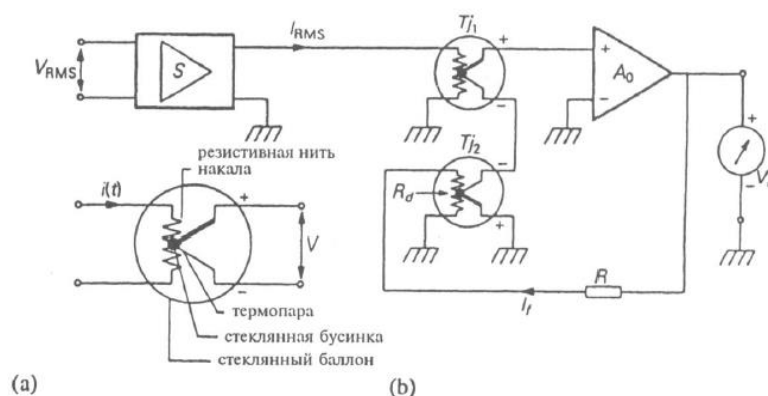


Рис. 51.

## 20. Цифро-аналоговое преобразование

Цифро-аналоговое преобразование сводится к построению напряжения, пропорционального числу, заданному в двоичном коде. Рассмотрим простейшую реализацию такого преобразователя. Пусть цифровой сигнал задан  $n+1$  битами.

$$D = (a_n a_{n-1} \dots a_1 a_0)$$

Нам требуется построить напряжение  $V = V_0 \sum a_i 2^i$ . Принципиально подобное преобразование может быть выполнено с помощью схемы, изображенной на рис. 52. Сопротивления  $R_i$  должны быть подобраны таким образом, что  $R_i = 2 R_{i+1}$ . Ключи должны работать таким образом, что при единице в соответствующем разряде резистор подключен к источнику опорного напряжения, а при нуле – сопротивление подключается к земле. Поскольку ОУ работает в режиме конвертера ток- напряжение, то инвертирующий вход является виртуальной землей и напряжение на выходе равно

$$V_A = (V_R/R) \cdot R_t \cdot \sum a_i 2^i$$

Например, для реализации преобразования цифра-аналог с точностью в три знака, можно использовать  $R_0 = 1 \text{ Мом}$ ,  $R_{10} = R_0/1024$ ,  $R_t = 1 \text{ Ком}$ .

Все ключи строятся, естественно, электронным образом. Недостатком предложенного преобразователя является необходимость точно выдерживать соотношения между сопротивлениями. Особенно точными должны быть сопротивления старших разрядов.

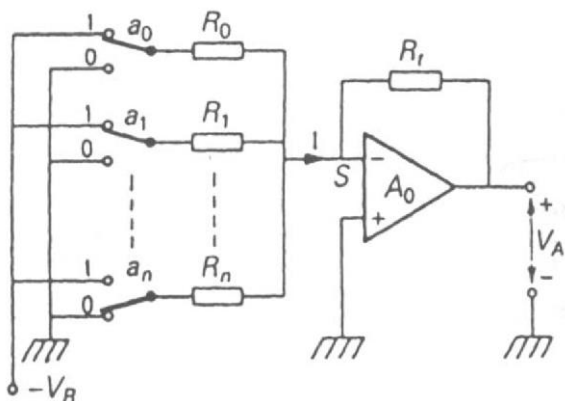


Рис. 52.

*Преобразование с помощью резисторной матрицы.*

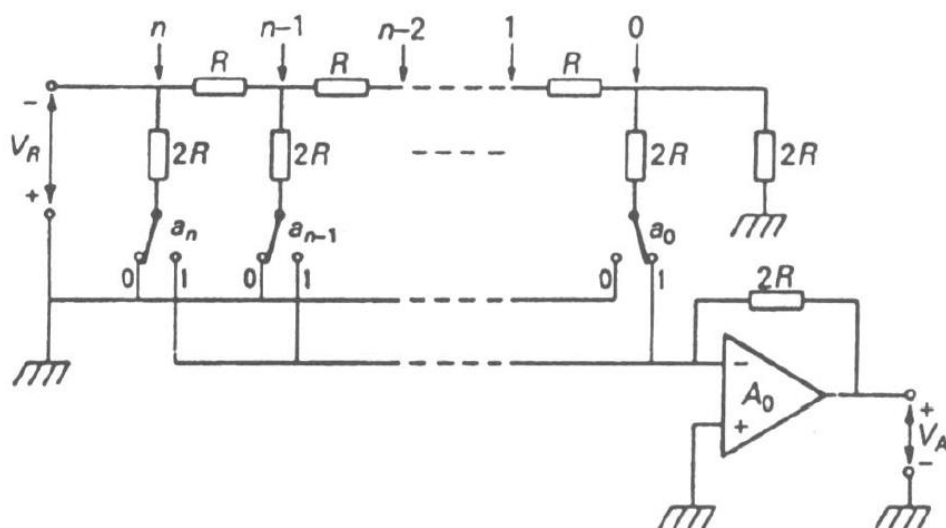


Рис. 53.

Преобразователь включает в себя резисторную матрицу и конвертер ток- напряжение. Матрица устроена таким образом, что независимо от положения ключей сопротивление справа от произвольного узла равно  $2R$ , следовательно, ток на каждом узле делится пополам. В результате, ток протекающий через сопротивление  $2R$  узла с номером  $k$  равен  $V_R/2^{n-k+1}$ , а выходное напряжение  $V_A = V_R/2^n * \sum a_i 2^i$ . Для правильной работы необходимо выдержать точное соотношение между сопротивлениями старших битов и сопротивлением в цепи обратной связи.

## 21. Аналогово-цифровые преобразователи

В информационных и управляющих системах часть (или вся) информация от датчиков бывает представлена в аналоговой форме. Для ее ввода в цифровые ЭВМ и цифровое управляющее устройство широко применяются аналогово-цифровые преобразователи (АЦП). В большинстве случаев АЦП выполняют преобразование входного напряжения или тока в двоичный цифровой код.

Преобразование, которое следует выполнить, выглядит следующим образом

$$[V_A/V_0] + Q = \sum a_i 2^i,$$

где квадратные скобки означают целую часть,  $V_A$  – преобразуемое напряжение,  $V_0$  – шаг оцифровки,  $Q$  – остаток. Задача АЦП состоит в том, чтобы найти значения битов, соответствующие наименьшему остатку. Легко догадаться, что этот остаток может оказаться равным нулю только случайно, поскольку  $V_A$  является непрерывной функцией, а шаг оцифровки конечен. Существуют различные типы АЦП. Мы остановимся лишь на тех типах, которые получили в настоящее время наибольшее распространение

**АЦП последовательного приближения (АЦППП).** Структурная схема АЦППП приведена на рисунке 54. Схема работает следующим образом. Входной аналоговый сигнал  $U_{вх}$  перед началом преобразования запоминается схемой выборки – хранения ВХ, что необходимо, так как в процессе преобразования необходимо изменение аналогового сигнала. Далее по команде “Пуск” с помощью сдвигового регистра последовательно во времени каждый триггер  $T_i$ , начиная со старшего разряда,

переводит в положение 1 соответствующий разряд ЦАП. Напряжение  $U_1$  (или ток) с выхода ЦАП сравнивается с входным аналоговым сигналом с помощью компаратора КП. Если  $U_0 > U_1$ , на выходе компаратора сохраняется низкий уровень и в триггере сохраняется единица, при  $U_0 < U_1$  срабатывает компаратор и переводит триггер в положение 0. После окончания цикла на выходах триггеров получается двоичный код, соответствующий (при идеальных элементах)  $U_0$  с точностью до половины младшего разряда. Погрешность АЦППП определяется неточностью ЦАП, зоной нечувствительности и смещением нуля компаратора, а также погрешностью схемы выборки – хранения.

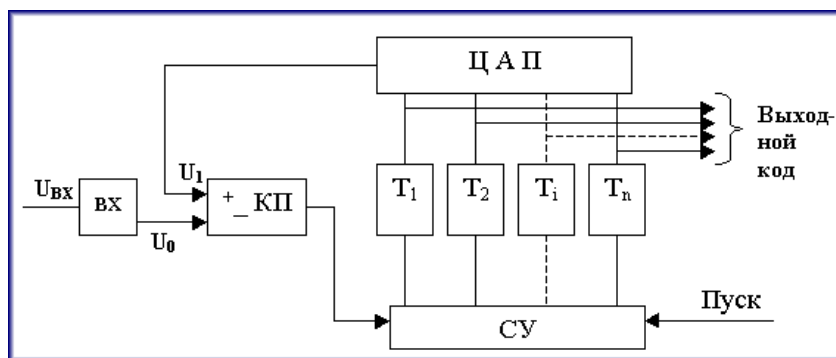


Рис. 54.

Поскольку в такой схеме ошибка в каком-либо разряде в дальнейшем не корректируется, необходимо, чтобы время на “взвешивание” каждого разряда было достаточно для затухания переходного процесса до уровня, соответствующего половине младшего разряда, и чтобы при разбалансе  $U_1 - U_0$  на это значение компаратора успел сработать. Общее время преобразования

$$t_{\text{пр}} = t_{\text{вх}} + n(t_{\text{з,к}} + t_{\text{у}} + t_{\text{ц}}) + t_{\text{сб}},$$

где  $t_{\text{вх}}$  – время, необходимое для фиксации  $U_{\text{вх}}$  схемой ВХ;  $n$  – число разрядов;  $t_{\text{з,к}}$  – время задержки, вносимое компаратором;  $t_{\text{у}}$  – время установления  $U_1$  на входе ЦАП;  $t_{\text{ц}}$  – время задержки цифровых элементов в схеме управления и срабатывания триггера;  $t_{\text{сб}}$  – время, необходимое для сброса ЦАП в исходное состояние, включая время, необходимое для синхронизации с началом такта. При 12 – разрядном АЦП и использовании быстродействующего ЦАП с  $t_{\text{у}} = 100$  нс время  $t_{\text{пр}}$  близко к 1,5 мкс. В большинстве случаев  $t_{\text{пр}}$  такого преобразователя достигает 10 – 100 мкс.

**АЦП параллельного типа (АЦПП).** Существенное уменьшение  $t_{\text{пр}}$  удается получить в АЦП параллельного типа. Его структурная схема приведена на рис. 52. Здесь входная аналоговая величина  $U_0$  с выхода схемы ВХ сравнивается с помощью  $2^{n+1} - 1$  компараторов с  $2(2^n - 1)$  эталонными уровнями, образованными делителями из резисторов равного сопротивления. При этом срабатывают  $m$  младших компараторов. Логическая схема ДШ преобразует выходные сигналы компараторов в двоичный код. Погрешность АЦПП определяется неточностью и нестабильностью эталонного напряжения, резистивного делителя и погрешностями компараторов. Значительную роль могут играть входные токи компараторов, если делитель недостаточно низкоомный. Этот метод быстрый, но очень дорогой. (Для 8 – битового преобразователя требуется 255 компараторов!)

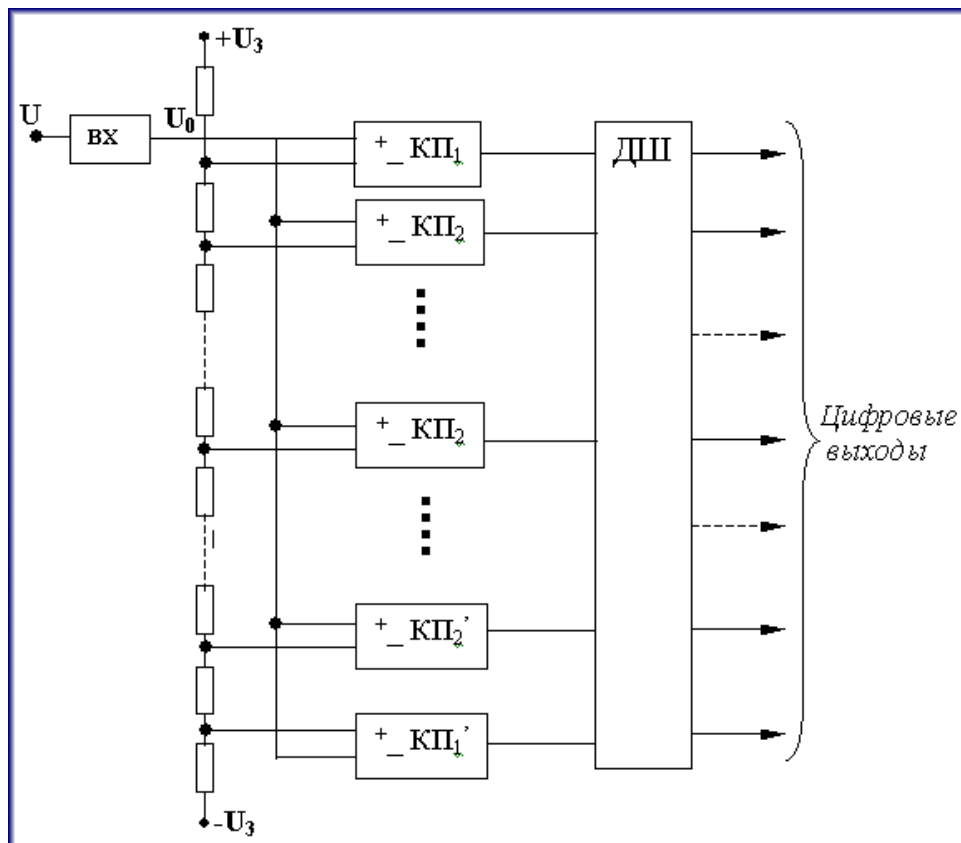


Рис.55.

## 22. Обмен информацией между отдельными приборами и/или компьютером



Рис. 56



Рис. 57.

На рисунке 56 изображен блок управления циркуляцией  $\text{He}^3$  в рабочем режиме, а на рисунке 57 – рабочее место экспериментатора в момент записи экспериментальных данных. Как мы видим, работа измерительной схемы и поддержание необходимой температуры в значительной степени автоматизированы.

Ниже мы обсудим вопрос о том как технически происходит обмен данными между компьютером и измерительными приборами.

Для обмена данными между отдельными приборами, входящими в измерительную установку, используется интерфейсный канал (канал общего пользования –КОП) в стандарте IEEE-488. Международная стандартизация шины IEEE-488 привела к тому, что в настоящее время каждый прибор снабжен такой шиной. Все устройства, снабженные шиной IEEE-488, подключаются параллельно. Допускается подключение максимум 15 устройств, каждое из которых может связываться с любым другим, передавать результаты измерений или управляющие сигналы. Каждое из подключенных устройств должно уметь выполнять по меньшей мере одну из трех функций: быть источником данных, быть приемником данных или контроллером (управляющим устройством). Приборы могут соединяться последовательно или звездой. Однако есть ограничение на длину кабеля. Он должен быть короче 20 м или при подключении многих приборов короче  $2n$ , где  $n$  – число подключенных приборов, в зависимости от того, какая из этих величин меньше. Скорость передачи данных меньше или равна 1 мегабит в секунду. Внешний вид интерфейсной платы показан на рис.58.



Рис. 58.

Интерфейсная плата компьютера соединяется с приборами специальной шиной, которая состоит из 16 линий, подразделяющихся на три подшины, каждая из которых выполняет собственную функцию.

*Шина ввода-вывода данных (DIO).* Состоит из восьми линий. Данные представлены параллельно передаваемыми битами и последовательно передаваемыми байтами. (Т. е. на каждую линию шины подается одновременно сигнал 0 или +5В, что соответствует одному байту. После того, как этот байт считан, команда, соответствующая информации байта выполнена, передается следующий байт). Передача данных осуществляется асинхронно, с помощью процедуры «квитирования», в которой участники обмениваются «квитанциями».

*Шина квитирования.* Состоит из трех линий, используемых для передачи сигналов, управляющих потоком данных по шине ввода-вывода данных DIO: линии «данные готовы» ( data valid, DAV), линии «не готов к приему данных» (not ready for data, NRFD) и линии «данные не приняты» (not data accepted, NDAC). Только после того, как самый медленный участник закончит чтение данных, шина DIO освобождается

для следующего действия. В случае, если один из участников оказывается не в состоянии выдать сигнал готовности, шина остается заблокированной. Чтобы избежать вечной блокировки, контроллер через некоторое «время ожидания» должен восстановить нормальный режим работы на шине.

*Шина управления.* Состоит из пяти линий, используемых для того, чтобы обеспечить упорядоченную передачу сообщений.

Низкое значение напряжения на линии соответствует логической единице («истина»), напряжение +5В – нулю («ложь»). Различают четыре состояния приемника, индицируемые по состоянию трех линий шины квитирования: «приемник не готов» (acceptor not ready state, ANRS), «приемник готов» (acceptor ready state, ACRS), «принимаю данные» (accept data state, ACDS) и «приемник ждет нового цикла» (acceptor wait for new cycle state, AWNS). Для источника сигнала имеется также четыре состояния: «состояние генерации» (source generate state, SGNS), «состояние задержки источника» (source delay state, SDYS), «состояние передачи» (source transfer state, STRS), и наконец, «источник ждет нового цикла» (source wait for new cycle state, SWNS). Временная диаграмма квитирования показана на рис. 59. Верхняя диаграмма соответствует состоянию шины DIO.

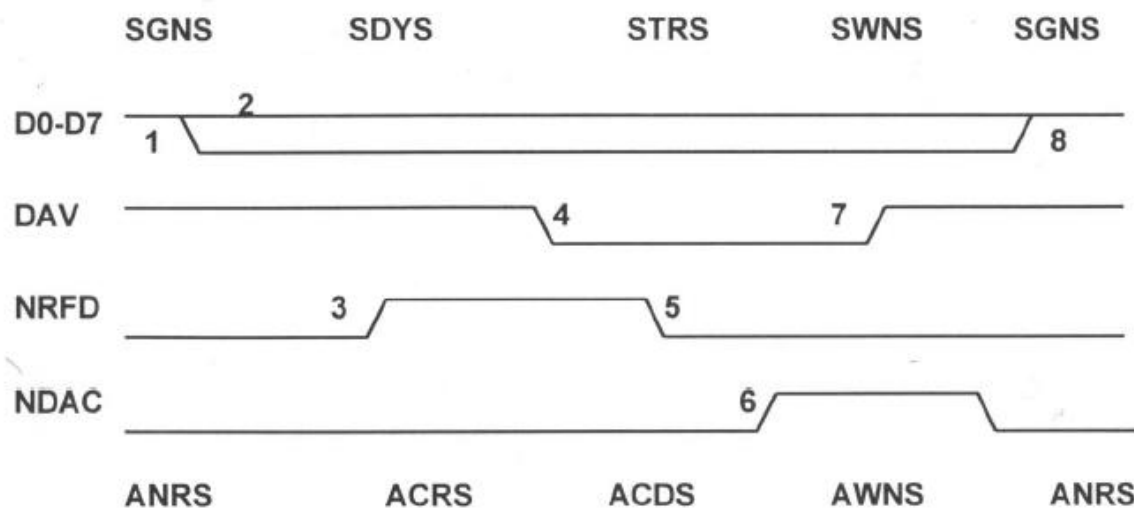


Рис.59.

Мы выделим семь шагов цикла приема-передачи данных, перенумерованных на рисунке. На восьмом шаге система возвращается в исходное состояние. Рассмотрим их более подробно.

1. Передатчик в режиме генерации данных, значения на шине DIO не установлены, на линии «данные готовы» значение –«ложь». Обе линии «не готов к приему данных» и «данные не приняты» в положении «истина». Приемники в состоянии «приемник не готов».
2. Передатчик устанавливает значения на шине данных и переходит в состояние «задержки источника». Если это последний байт сообщения, передатчик устанавливает значение «истина» на линии “end or identify, EOI” шины управления.. Состояние шины квитирования не меняется.
3. Последний (самый медленный ) из приемников переключает линию «не готов к приему данных» в состояние «ложь». Приемники в состоянии «приемник готов».
4. Когда источник видит смену напряжения на линии «не готов к приему данных», он устанавливает значение «истина» на линии «данные готовы» и переходит в состояние «состояние передачи».

5. Когда приемники видят смену значения на линии «данные готовы», они переходят в состояние «принимаю данные». Каждый из них пытается изменить потенциал на линии «не готов к приему данных» на «истина», что и делает самый медленный.
6. Когда каждый из приемников принял данные он пытается изменить потенциал на линии «данные не приняты» на значение «ложь», делает это самый медленный из них. Все приемники переходят в состояние «приемник ждет нового цикла».
7. После того, как потенциал на линии «данные не приняты» изменился на высокий, источник переходит в состояние «источник ждет нового цикла», сигнализируя об этом переключением линии «данные готовы» в положение «ложь». На это переключение реагируют приемники, переводя линию «данные не приняты» в положение «истина».
8. Источник сигнала убирает сигнал, и система возвращается в исходное состояние.

Как уже упоминалось, переключение линий «не готов к приему данных» и «данные не приняты» на высокий потенциал производится самым медленным из приемников. Как это делается технически, показано на рис. 60.

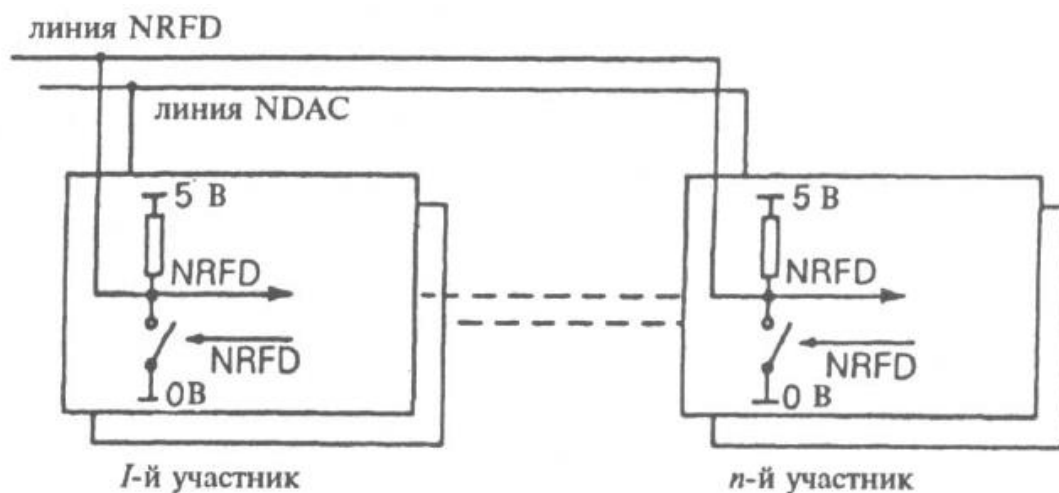


Рис.60.

Шина управления состоит из пяти линий:

ATN (Attention-внимание) используется для указания, текущие данные являются данными или командой.

EOI (End or identify) Отмечает прерывание передачи данных.

IFC (Interface clear) отмечает очистку линии при которой все источники и приемники сигнала обнуляются.

REN (Remote enable) линия позволяющая программировать подключенные устройства активным контроллером.

SRQ (Service request) линия, позволяющая прибору запросить обслуживание у активного контроллера.

Схема механического подключения проводов в разъеме кабеля приведена на рис. 61.

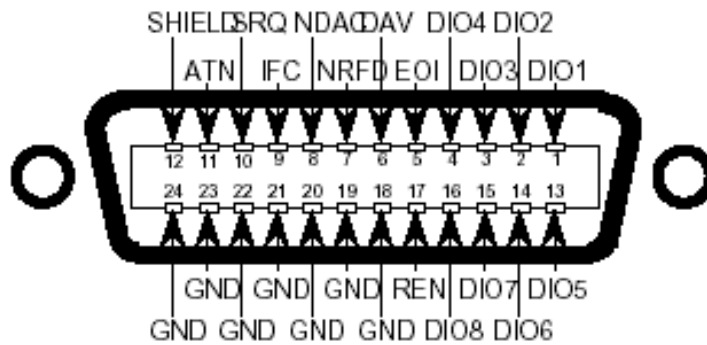


Рис. 61.

### Два слова о жаргоне (децибелы и dBm).

Децибел является логарифмической мерой отношения мощностей (а также токов и напряжений). Мощность  $P_2$  больше мощности  $P_1$  на  $a$  бел, если

$$\log_{10}(P_2/P_1) = a.$$

Соответственно,  $P_2 = 10^a P_1$ . Децибел составляет десятую часть бела, поэтому:

$$a \text{ бел} = 10 a \text{ дБ} = 10 \log_{10}(P_2/P_1) \text{ дБ}.$$

Часто, особенно в западной литературе, децибелы используют как абсолютную меру мощности устанавливая фиксированное опорное значение мощности  $P_1 = 1 \text{ мВт}$ . Соответствующие единицы обозначают как dBm. Соответственно, мощность в 0 dBm равна 1 мВт, 10 dBm отвечает мощности в 10 мВт, 20 dBm соответствует мощности в 100 мВт.

### Задания.

**Указание.** Рассмотреть работу схемы методом суперпозиции.

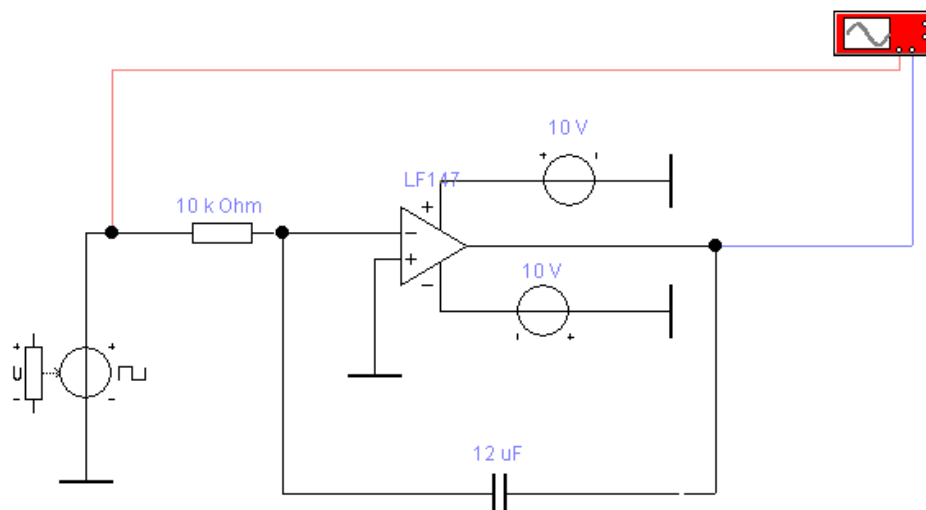


Рис. 62.

**2. Показать, что схема, изображенная на рис. 62, является интегратором.**

**Решение.**

$$U_c = \frac{1}{C} \int i_c(t) dt \quad (1)$$

$$i_c = -i_{ex} = -U_{ex}/R \quad (2)$$

Напряжение между входами ОУ равно нулю, поэтому  $U_{вых} = U_c$ . Учитывая (1) и (2), получаем

$$U_{вых} = -\frac{1}{C} \int \frac{U_{ex}(t)}{R} dt = -\frac{1}{RC} \int U_{ex}(t) dt$$

или

$$U_{вых} = U_{вых}(0) - \frac{1}{RC} \int_0^t U_{ex}(t) dt$$

Выходное напряжение  $U_{вых}$  зависит от начальных условий, т.е. от начального напряжения на конденсаторе в момент  $t = 0$ ,  $U_{вых}(0)$ .

## 23. Криогенные жидкости

Очень часто для эксперимента требуются температуры, значительно ниже комнатной. Достигаются такие температуры с помощью охлаждения криогенными жидкостями. (Мы не будем здесь рассматривать интереснейший вопрос о том, как получить сами криогенные жидкости.) Наиболее распространенными в лабораторной практике криогенными жидкостями являются жидкий азот и жидкий  $He^4$ . При атмосферном давлении температура кипения жидкого азота составляет 79К, а жидкого  $He^4$  – 4.2К. Криогенные жидкости транспортируют в специальных сосудах – сосудах Дьюара. Внешний вид такого сосуда для транспортировки жидкого гелия изображен на рис. 63, а для жидкого азота на рис. 64.



Рис.63.



Рис.64.

Принципиальное устройство металлического сосуда Дьюара для жидкого гелия показано на рис. 65.

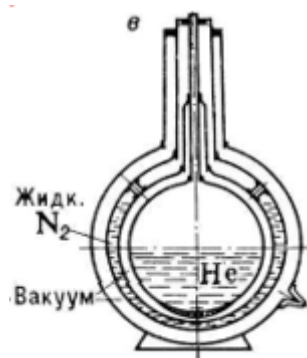


Рис. 65



Рис. 66.

Как видно из рисунка, сосуд с жидким гелием помещен в вакуумную полость и окружен азотным экраном, охлаждаемым жидким азотом. В последнее время стал популярным другой способ теплоизоляции с использованием так называемой суперизоляции. Последняя представляет собой многослойную металлизированную майларовую пленку, находящуюся в вакуумной полости и многими слоями окружающую гелиевую полость. Обратим внимание на устройство горла сосуда (см. рис 63 и 65). Горло является узким, что опять же сделано для уменьшения теплоподвода.

**Задача.** *Считая, что теплоподвод осуществляется, в основном, излучением, определить во сколько раз возрастет теплоподвод, если убрать азотный экран.*

При откачке паров гелия температура жидкости может быть понижена. Минимальная температура, достигаемая таким образом составляет примерно 1.3К.

При температуре 2.18K жидкий гелий переходит в сверхтекучее состояние. В стеклянном криостате переход было легко заметить по исчезновению кипения. Вот что по этому поводу писал открывший сверхтекучесть П.Л. Капица:

*«То количество света, которое проходит через прозрачный дьюаровский сосуд и падает на него, сообщает ему достаточное тепло, чтобы привести его в состояние кипения. Но при дальнейшем понижении температуры все эти явления внешне пропадают. Поверхность гелия становится гладкой, как зеркало. Его еще труднее заметить, потому что по пузырькам вы его видите лучше. Это явление заметил еще Камерлинг-Оннес, но стал его изучать Кеезом лет десять тому назад. Его поразило, что пропадает кипение, и он стал изучать тепловые свойства гелия.*

*Кеезом, в частности, решил выяснить, какова в гелии теплопроводность. Он взял капилляр, в одном месте его поставил термометр, в другом нагреватель и смотрел, как тепло распространяется в капилляре. Капилляр был очень тоненький. Техника эксперимента очень трудна, потому что приходится работать с вакуумными сосудами, причем один из них погружен в другой, так как малейший доступ тепла уже способен вызвать кипение и нарушить все тепловые явления. О трудностях экспериментальной техники я не имею возможности рассказать. Так вот, обнаружилась потрясающая вещь: оказалось, что жидкий гелий обладает чрезвычайной теплопроводностью. Теплопроводность меди и серебра мала по сравнению с теплопроводностью, которая наблюдалась там. Это было очень удивительно.*

*Распространение тепловых волн оказалось исключительно быстрым как раз там, где, казалось, меньше всего можно было бы ждать теплового движения. Кеезом нашел, что жидкий гелий сверхтеплопроводен.*

*Мы заинтересовались этим явлением. Нам показалось, что, может быть, это ошибка. Но я повторил опыты Кеезома и получил еще большие значения теплопроводности, чем сам Кеезом. Можно было показать, что такое количество тепла, которое фактически переносилось, лежит за пределами физических возможностей, что тело ни по каким физическим законам не может переносить больше тепла, чем его тепловая энергия, помноженная на скорость звука. А скорость звука в гелии известна - она равна 250 м/с. С помощью обычного механизма теплопроводности тепло не могло переноситься в таком масштабе, как это наблюдалось. Надо было искать другое объяснение. И вместо того, чтобы объяснить перенос тепла теплопроводностью, т.е. передачей энергии от одного атома к другому, можно было объяснить его более тривиально - конвекцией, переносом тепла в самой материи. Не происходит ли дело так, что нагретый гелий движется вверх, а холодный опускается вниз, благодаря разности скоростей возникают конвекционные токи, и таким образом происходит перенос тепла. Но для этого надо было предположить, что гелий при своем движении течет без всякого сопротивления. У нас уже был случай, когда электричество двигалось без всякого сопротивления по проводнику. И я решил, что гелий так же движется без всякого сопротивления, что он является не сверхтеплопроводным веществом, а сверхтекучим.»*

Следует запомнить, что в пределах от минимальной возможной температуры и до 2.18K температура гелиевой ванны однозначно связана с давлением насыщенных паров гелия. При более высокой температуре сверхтеплопроводность исчезает и возможно переохлаждение нижних слоев жидкости. Поэтому измерение зависимостей от температуры с регистрацией температуры по давлению насыщенных паров в интервале от 4.2K до 2.18K следует проводить только в режиме охлаждения (а не нагрева) жидкости.

Гелий является дорогим газом, поэтому свободно испаряющийся или откачиваемый форвакуумным насосом гелий не выпускают в атмосферу, а по системе

труб собирают в газгольдеры для повторного ожижения. Транспортный дьюар снабжают шаром-пилотом для сбора испарившегося газа (рис. 63). Внешний вид газгольдера с объемом в  $20\text{ м}^3$  показан на рис. 67. Напомним, что испарившийся литр жидкости дает примерно  $0.7\text{ м}^3$  газа при атмосферном давлении.

Аналогично сосудам для транспортировки гелия устроены и сосуды для транспортировки жидкого азота (см.рис.64). В них также имеется вакуумная полость для целей теплоизоляции и относительно узкое горло. Основное отличие состоит в том, что газ азот присутствует в земной атмосфере в огромном количестве, следовательно он дешев. Поэтому не требуется собирать испаряющийся газ: его можно выпускать в атмосферу. С другой стороны, следует иметь в виду, что воздух представляет кислородно-азотную смесь и у человека нет рецепторов, контролирующих долю азота в воздухе. Испаряющийся холодный азот способен вытеснять воздух из ям или подвальных помещений. При больших объемах испарения подобные помещения, заполненные азотом представляют угрозу человеческой жизни. У человека, попавшего в заполненное чистым азотом помещение, не возникает чувство тревоги, он спокойно вдыхает азот до тех пор, пока не теряет сознания.

## 24. Криостаты

Некоторые низкотемпературные измерения можно проводить непосредственно в транспортных сосудах Дьюара. К таким измерениям относятся измерения при азотной температуре и температуре в  $4.2\text{ К}$ . Часто при проведении таких измерений в транспортный сосуд требуется ввести устройство сравнительно большого диаметра (в сосуд российского производства до  $20\text{ мм}$ ). В этом случае приходится заменять стандартную верхнюю часть транспортного сосуда (головку дьюара) на нестандартную.

Тем не менее, большая часть низкотемпературных измерений проводится в специальных криостатах. Фотография металлического криостата средней величины показана на рис. 67. Специально отметим, что первое поколение криостатов было изготовлено из стекла с серебряными стенками, как это описано в цитированном выше тексте П.Л. Капицы. В серебрении оставлялась узкая вертикальная щель для визуального наблюдения уровня жидкости. В металлическом криостате никаких щелей нет и за уровнем гелия необходимо следить с помощью какого-либо датчика.

В качестве датчика можно, например, использовать нагреваемую сверхпроводящую проволоку. Часть проволоки выше уровня гелия должна оставаться в нормальном состоянии, а часть, погруженная в гелий, – быть сверхпроводящей. Тогда сопротивление проволоки будет пропорционально расстоянию между уровнем гелия и верхней частью криостата.

Возникают два естественных вопроса. Во-первых, как жидкий гелий без больших потерь переместить из транспортного сосуда в криостат. Во-вторых, как и до какого предела можно понизить температуру гелия в криостате. Первая задача решается с помощью, так называемой, переливалки – гибкого устройства, состоящего из двух коаксиальных сильфонных шлангов с вакуумированным объемом между ними.



Рис.67. Схематическое изображение разреза  
разреза части переливалки.



Рис. 68. Пример вакуумного  
соединения.

На каждом из концов к сильфонным шлангам приварены трубки из нержавеющей стали, вставляющиеся, соответственно в транспортный сосуд и криостат.

Собственно процесс перемещения жидкого гелия состоит в том, чтобы поднять давление в транспортном сосуде Дьюара (примерно на 0.1 атм), дожидаться пока охладиться внутренний сильфон переливалки и потечет жидкий гелий. На самом деле требуемую процедуру по такому краткому описанию вряд ли удастся выполнить. Имеется множество мелочей, обеспечивающих безопасность и минимальное испарение жидкости.

Прямой откачкой паров жидкого гелия температуру в криостате можно понизить. Минимальная температура, достигаемая таким способом практически, составляет 1.3 K. В большинстве крупных криостатов она еще выше (1.6 K). Причина состоит в том, что при температуре примерно 2.15K (давление насыщенных паров около 36 мм рт.ст.) гелий переходит в сверхтекучее состояние. В рамках довольно условной модели его состояние после перехода можно представить себе как смесь двух компонент нормальной и сверхтекучей, соотношение плотностей которых определяется температурой. При наличии теплого места в верхней части криостата пленка сверхтекучей жидкости поднимается вверх по стенкам и испаряется в месте, где температура выше 2.15K. В результате устанавливается динамическое равновесие, определяемое соотношением между скоростью откачки и скоростью испарения сверхтекучей пленки.

## 25. Вакуумные уплотнения. Насосы

Из сказанного выше ясно, что криостаты, газгольдеры и система труб их соединяющих (гелиевая сеть) должны быть вакуумно-плотными. Вместе с тем, необходимо предусмотреть возможность отсоединения или замены криостата. Нужны разборные вакуумные уплотнения. Чаще всего они реализуются с помощью так называемых O-рингов. Такое уплотнение в собранном и разобранном видах показано на рис. 69.



Рис.69.

Вакуумное соединение рис. 68 в разобранном виде. Показана часть вакуумной трубы, закрытая заглушкой. Собственно уплотняющим элементом является резиновое колечко. Чтобы оно не деформировалось, колечко надевается на кольцевую оправку, а затем вставляется между уплотняемыми трубами, которые стягиваются хомутиком.

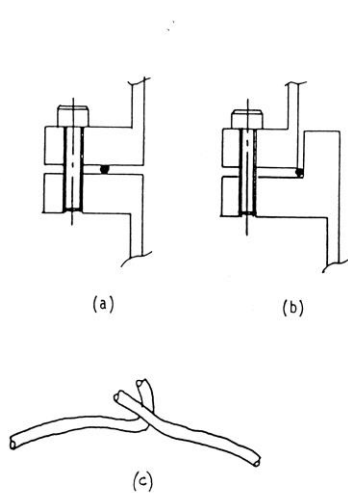


Рис. 70.

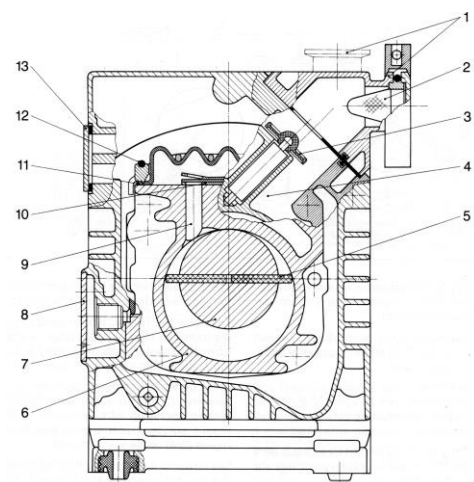


Рис. 71.

Разборные вакуумноплотные уплотнения используются и внутри криостатов, и даже в сверхтекучей жидкости. Применяются при этом чаще всего уплотнения из мягкого и пластичного металла – индия. Как показано на рис.70, колечко из индиевого прутка (диаметром 1-1.5 мм) укладывается между двумя фланцами и аккуратно раздавливается до толщины в пару десятых миллиметра при стягивании фланцев винтами. Концы индиевого прутка накладываются внахлест, как показано на рис. 70. Чтобы фланцы стягивались без перекосов используется большое количество винтов относительно малого диаметра. Следует иметь в виду, что для вакуумного уплотнения важно, чтобы прутки и фланцы были чистыми (без жира) и гладкими. Поэтому перед укладыванием новой индиевой прокладки фланцы необходимо тщательнейшим образом очистить от следов старого индия и промыть спиртом от жира.

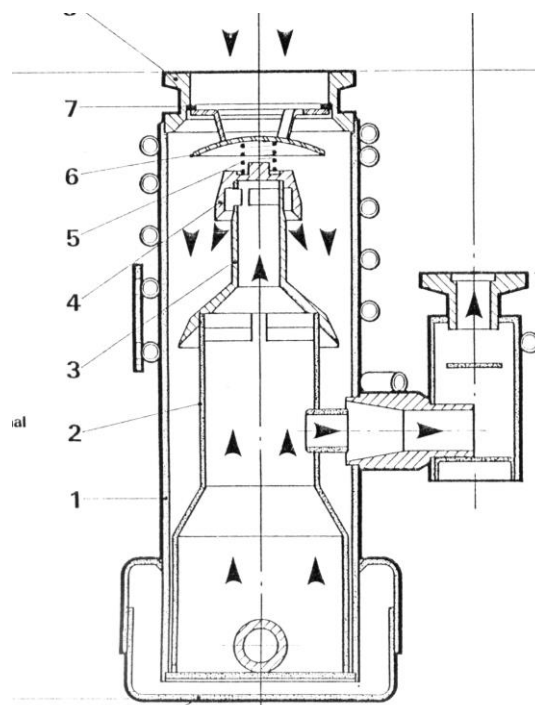


Рис.72. Схема диффузионного паромасляного насоса.

Для удаления газа и создания не очень хорошего вакуума (остаточное давление  $10^{-2}$  -  $10^{-3}$  мм рт. ст.) используются форвакуумные насосы. Схематически разрез одного из таких насосов (пластинчатого роторного насоса) показан на рис. 71. Ротор насоса включает в себя две подвижные пластины, разделяющие пространство между ротором и статором насоса на две камеры переменного объема. При вращении ротора объем каждой из камер периодически меняется. Изначально одна из камер подсоединена ко входу насоса и по мере увеличения ее объема происходит всасывание. Затем камера отделяется второй пластиной от входа происходит сжатие газа и удаление его через выходной вентиль. Последний полностью погружен в масло. На старых форвакуумных насосах было необходимо сразу после выключения насоса, во избежание всасывания масла в камеры, уравнивать давления на входе и выходе. На более современных насосах эта процедура производится автоматически.

Более высокий вакуум (до  $10^{-6}$  мм рт.ст.) может быть получен, например, с помощью диффузионных паромасляных насосов. Схематически разрез такого насоса показан на рис. 72. На дне насоса находится масло, нагреваемое электропечкой. Масло испаряется и разделяется на несколько фракций. Верхняя часть насоса снаружи охлаждается водой. В результате по высоте насоса имеется значительный градиент температуры и каждая из фракций испаряется и конденсируется на определенном перепаде высот. Внутри насоса имеется несколько отражателей изменяющих направление потока молекул масла на обратное. Откачиваемый газ из-за столкновений с обратным потоком молекул масла приобретает скорость, направленную вниз. Наличие нескольких отражателей и нескольких основных фракций делает насос многоступенчатым. На выходе поток газа со значительно более высоким давлением, чем на входе, откачивается форвакуумным насосом.

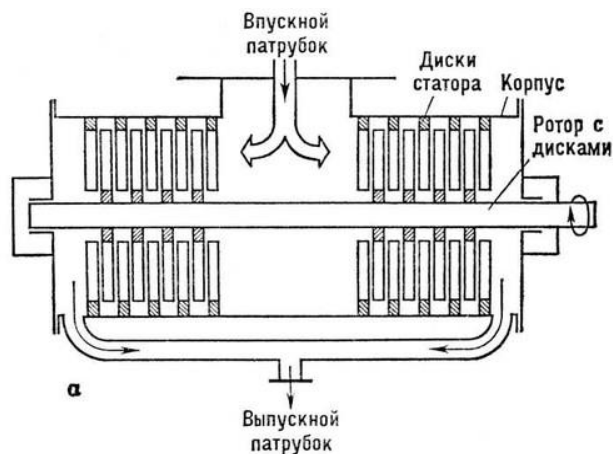


Рис.73. Схема турбомолекулярного насоса



Рис. 74. Типичный криостат со сверхпроводящим соленоидом.

Более современной версией высоковакуумных насосов являются насосы турбомолекулярные (рис. 73). Принцип их работы был, в некотором смысле, сформулирован и реализован бароном Мюнхаузенем, который под дождем так быстро вертел своей шпагой, что на него не упало ни капли. Действие турбомолекулярного насоса также основано на сообщении молекулам откачиваемого газа дополнительной скорости в направлении их движения с помощью вращающегося ротора. Ротор состоит из системы дисков (набор последовательно поставленных вентиляторов, в сущности) Вакуум, получаемый с помощью турбомолекулярных насосов достигает  $10^{-10}$  мм рт. ст.. Естественно, что на выходе турбомолекулярного насоса должен стоять насос поддержки, убирающий сжатый газ.

Отдельной проблемой в вакуумных системах является поиск негерметичных уплотнений или дефектов системы, приводящих к разгерметизации. Для нахождения подобных мест используются течеискатели. Наиболее чувствителен и удобен масс-спектрометрический гелиевый течеискатель. Масс-спектрометрический течеискатель - это относительно простой газоанализатор, настроенный, как правило, на регистрацию содержания пробного газа в газовой смеси. Принцип его работы состоит в следующем: газовая смесь, поступающая из вакуумной системы, частично ионизируется и анализируется в масс-спектрометре. Ускоренный постоянным электрическим полем и коллимированный пучок ионов поступает в однородное магнитное поле. Радиус окружности, описываемой каким-либо ионом, зависит от соотношения заряда иона и его массы. Регистрируются ионы, прошедшие по дуге фиксированной окружности между коллиматором и детектором. Изменяя ускоряющее электрическое поле можно настроить течеискатель на регистрацию ионов какого-либо газа  $He3^+$  или  $He4^+$  например.

В камере масс-спектрометра ионы должны иметь свободный пролет в несколько сантиметров, что означает наличие высокого (порядка  $10^{-6}$  мм рт. ст.) вакуума. В исследуемом объеме вакуум не обязан быть столь высок, просто поступление газа из исследуемого объема должно регулироваться достаточно тонко, например, с помощью игольчатого вентиля. Поиск течи состоит в исследовании состава газа, поступающего из вакуумной системы в течеискатель при обдувании системы газообразным гелием. Последняя операция производится специальным «пистолетом», чтобы создать направленную струйку гелия и строго сверху вниз.

## 26. Магнитное поле

Средства решения лабораторных задач сильно отличаются в зависимости от величины требуемого для решения магнитного поля. Условно диапазон магнитных полей, достижимых в лаборатории, можно разделить на три области: поля слабые (от нуля до 0.01Т) поля средней величины (примерно до 1.5-2 Т) и поля сильные (до 60Т). Ниже мы рассмотрим каждую из этих областей в отдельности, стартовав с сильного поля.

Наиболее удобно и популярно использование сверхпроводящих соленоидов. Они изготавливаются из сверхпроводящих сплавов, электрическое сопротивление которых остается равным нулю при температурах и полях проведения эксперимента. С помощью сверхпроводящих соленоидов к настоящему времени удалось создать стационарное магнитное поле в 20 Т. Магнитное поле в 14 Т является совершенно обычным в лабораториях. Типичный диаметр внутреннего отверстия соленоидов составляет 40 мм, хотя бывают отклонения в обе стороны.

При работе сверхпроводящего соленоида энергия выделяется в подводящих проводах и в источнике тока. Выделение энергии вообще может быть исключено, если соленоид работает в короткозамкнутом режиме. Для его реализации соленоид снабжают «сверхпроводящим ключом», т.е. закороткой из сверхпроводника, находящейся при достаточно низкой температуре, а в момент ввода или вывода тока из соленоида переводимой специальным нагревателем в нормальное состояние. Если ток введен и «ключ» замкнут, то магнитное поле может существовать сколь угодно долго без потребления энергии, естественно, пока сохраняется сверхпроводимость.

Максимальное поле, получаемое в сверхпроводящем соленоиде, ограничивается тем обстоятельством, что это же поле разрушает сверхпроводимость при достижении определенного значения. Критическое поле увеличивается при уменьшении температуры от нуля при температуре сверхпроводящего перехода до максимального значения при стремлении температуры к абсолютному нулю. В чистых металлах критическое значение невелико: у Pb ~0.08 Т, у Nb ~ 0.2 Т. В 50-х годах прошлого века были открыты сплавы металлов, у которых критическая температура была в диапазоне 10-20 К. Эти сплавы обладали критическими полями в десятки тесла, например, NbZr -9Т, NbTi -12Т, Nb<sub>3</sub>Sn -27 Т.

Изготавливаются сверхпроводящие соленоиды из композиционного провода или ленты, состоящих из сверхпроводника и меди. У катушек должна быть высокая жесткость, поскольку поперечные силы сжимают соленоид с торцов и пытаются придать ему бочкообразную форму. Сверхпроводящие соленоиды при максимальном поле потребляют ток от 100 до 400 А. Обычно соленоиды на поле выше 8Т делают из нескольких секций: наружную секцию из материала с более низким значением критического поля (зато технологически более удобного и более дешевого), а внутреннюю секцию из Nb<sub>3</sub>Sn. В выборе сверхпроводящего соленоида приходится учитывать два конкурирующих фактора. Либо получение максимального поля с минимальным расходом провода, либо получение максимальной однородности магнитного поля.

Магнитное поле, сравнимое или даже превышающее поле сверхпроводящего соленоида, может быть получено с помощью нормального соленоида при пропускании через него огромного тока. Соленоид изготавливается из тонких, обычно медных дисков, разрезанных один раз по радиусу. Диски электрически соединяются внахлест частью своей площади друг с другом, образуя геликоидальную спираль. Между дисками располагается изоляция. Кроме того, диски по многим радиусам имеют круглые или щелевые отверстия, которые при сборке соленоида образуют вдоль его оси сквозные каналы для прокачки охлаждающей жидкости. Впервые такой соленоид использовал Френсис Биттер в конце 30-х годов прошлого

столетия, поэтому они называются биттеровскими. Ток в биттеровском соленоиде распределен по диску неравномерно: плотность тока  $j$  падает от максимального значения  $j^0$  на внутренней части диска с диаметром  $d$  к периферии с внешним диаметром  $D$  по закону

$$j = j_0 \frac{d}{2r}, D \geq 2r \geq d.$$

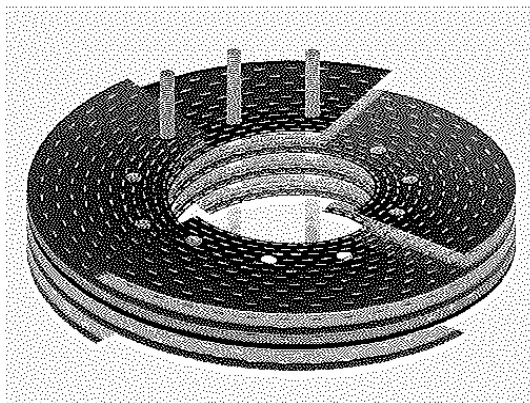


Рис. 75. Схематическое изображение биттервского соленоида.

Если биттервский соленоид изготовлен из меди, то для получения поля порядка 10Т в нем необходимо выделять мощность порядка 1 Мвт. Ясно, что главная проблема этого способа получения сильного магнитного поля состоит в теплосъеме. Через каналы для охлаждающей жидкости необходимо прокачивать несколько кубических метров холодной воды в минуту. Дальнейшее увеличение максимального поля возможно только за счет увеличения мощности источника тока. При этом должен возрасти перегрев соленоида относительно охлаждающей жидкости, что и ограничивает максимальную величину поля. Тепловыделение приводит к пленочному кипению охлаждающей жидкости (образование паровой прослойки между металлом и жидкостью), резкому снижению теплосъема и повышению температуры соленоида. Для воды это происходит при потоке мощности около 2000 Вт/см<sup>2</sup>. Зная оптимальную площадь охлаждения соленоида, можно подсчитать максимально снимаемую мощность. Подсчеты дают (при  $d = 3$  см) примерно 10 МВт и поле около 20Т.

В принципе, можно сократить время работы биттервского соленоида так, что за это время он еще не успеет расплавиться. Тогда можно надеяться получить еще большее магнитное поле. Его величина в этом случае будет ограничена прочностью самого соленоида. Электромагнитное взаимодействие токов приводит к двум силам. Одна из них - осевая - сжимает соленоид, другая - тангенциальная - растягивает по радиусу. Они могут привести к пластическому течению материала соленоида и к обрыву обмотки. Для материалов типа бронзы и стали предел механической прочности соответствует примерно 70Т. Стационарные поля до 40Т получают в гибридных соленоидах, у которых внешний соленоид - сверхпроводящий, а внутренний - водоохлаждаемый нормальный.

Идея о том, что сократив время протекания тока по соленоиду, можно, во-первых, сильно уменьшить энергозатраты, а во-вторых, увеличить максимально достижимое магнитное поле, используется в импульсных соленоидах. Первые сильные импульсные поля были получены П.Л. Капицей в Кембридже. В настоящее время они получают за счет разряда батареи конденсаторов на соленоид. Поле в соленоиде нарастает в течение четверти периода собственной частоты резонансного

контура, задаваемой индуктивностью соленоида и емкостью конденсаторной батареи. Как только ток достигает максимального значения, соленоид переключается на сопротивление, так, что длительность процесса разрядки контролируется сопротивлением. Типичные времена нарастания тока составляют 50 мсек, процесс разрядки длится до 2 сек. Так достигаются магнитные поля до 60Т.

Магнитные поля среднего диапазона (примерно до 1.5 Т) долгое время получали с помощью электромагнитов. Электромагнит с ферромагнитным ярмом, весом в несколько тонн создавал поле исключительной однородности, что важно, например, при изучении ядерного магнитного резонанса. В настоящее время, когда сверхпроводящий кабель стал относительно дешев, практически все фирмы, выпускавшие электромагниты для ЯМР установок перешли на использование сверхпроводящих соленоидов.

Обратимся теперь к случаю очень слабых магнитных полей, включая нулевое поле. Сразу же отметим, что сверхпроводящие соленоиды не удобны для работы со слабыми полями. Причина состоит в том, что сверхпроводящий кабель может замораживать поток магнитной индукции внутри себя. В результате, даже при отсутствии тока через соленоид в его центре может существовать замороженное магнитное поле, величина и направление которого зависят от предыстории соленоида. Типичные величины замороженного поля в соленоидах с максимальным полем в 10 Тл составляют 0.01Тл.

Для однородного магнитного поля часто используют так называемые *катушки Гельмгольца*. В идеальном случае они представляют собой два одинаковых кольцевых витка, расположенных друг от друга на расстоянии радиуса витка. Обычно катушка Гельмгольца состоит из двух катушек, на которые намотано некоторое число витков, причем толщина катушки много меньше их радиуса. Напряженность магнитного поля в центре катушек Гельмгольца легко вычислить просуммировав поля от каждой из них.

Напряженность поля катушек Гельмгольца в центре системы отличается от поля, создаваемого на расстоянии 1/2 радиуса от центра по ее оси, (т.е. в плоскости ее витка) примерно на 5%. При точном определении напряженности магнитного поля следует принимать во внимание конечные размеры соленоида, учитывая высоту и ширину обмотки. Для получения наибольшей однородности существует оптимальное соотношение между шириной и высотой намотки. Для получения еще более однородного поля применяют более сложные системы катушек.

Катушки Гельмгольца используются и для компенсации земного магнитного поля. В этом случае используется три пары катушек Гельмгольца различного диаметра с взаимно ортогональными осями.

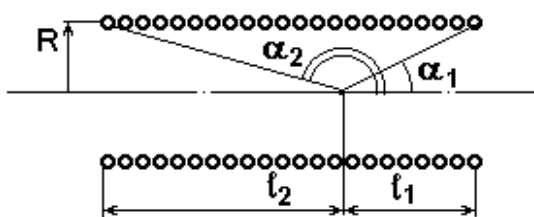
**Задача:** вычислить поле на оси соленоида.

**Решение:** Поле на оси тонкого соленоида вычисляется как сумма (точнее интеграл) от поля, создаваемого витками одного радиуса, рассредоточенными равномерно по оси вращения соленоида:

$$l = - R \cot \alpha$$

$$dl = R d\alpha / \sin^2 \alpha$$

$$dJ = J n dl = (J N / L) dl$$



$$dH = \frac{dJ}{2R} \sin^3 \alpha = \frac{1}{2R} \frac{JNdl}{L} \sin^3 \alpha = \frac{1}{2R} \frac{JNRd\alpha}{L \sin^2 \alpha} \sin^3 \alpha = \frac{JNR}{2RL} \sin \alpha d\alpha$$

$$H = \frac{JN}{2L} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) = \frac{Jn}{2} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

Поле на оси толстого соленоида вычисляется как сумма (точнее интеграл) по слоям от полей (т. е. по радиусу), создаваемых тонкими соленоидами (здесь  $d$  дифференциал):

$$dH = \frac{d(Jn)}{2} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) = \frac{jdR}{2} \left( \sqrt{\frac{l_1^2}{R^2 + l_1^2}} + \sqrt{\frac{l_2^2}{R^2 + l_2^2}} \right) = \frac{jdR}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{1 + R^2 l_1^{-2}}} + \frac{1}{\sqrt{1 + R^2 l_2^{-2}}} \right) \int \frac{dx}{\sqrt{1 + x^2}} =$$

$$\ln(x + \sqrt{1 + x^2}), \quad x = R/l, \quad dR = l dx$$

$$H = \int_{R_1}^R dH = \frac{j}{2} \left( l_1 \ln \frac{R_2 + \sqrt{l_1^2 + R_2^2}}{R_1 + \sqrt{l_1^2 + R_1^2}} + l_2 \ln \frac{R_2 + \sqrt{l_2^2 + R_2^2}}{R_1 + \sqrt{l_2^2 + R_1^2}} \right)$$

$R_1$  и  $R_2$  - внутренний и внешний радиусы соленоида,

$l_1$  и  $l_2$  - расстояния от точки, в которой вычисляется поле до краев соленоида.

Проверим эту сложную формулу: в простом предельном случае тонкого длинного соленоида мы должны получить:  $H = JN/L = Jn = j(R_2 - R_1)$

$$H = j \ln \frac{R_2 + \sqrt{l^2 + R_2^2}}{R_1 + \sqrt{l^2 + R_1^2}} = j \ln \frac{\frac{R_2}{l} + \sqrt{1 + R_2^2/l^2}}{\frac{R_1}{l} + \sqrt{1 + R_1^2/l^2}} = j \ln \left( 1 + \frac{R_2}{l} - \frac{R_1}{l} \right) = j l \frac{R_2 - R_1}{l}$$

## 27. Лазеры

Чрезвычайно важным лабораторным устройством в последние десятилетия стали источники света высокого качества – лазеры. Ниже мы подробно остановимся на том, почему качество их света может быть высоко оценено, пока же упомянем, что само название – Лазер – есть не что иное, как аббревиатура. На английском языке *LASER*, то есть *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* означает «усиление света с помощью вынужденного излучения»). Как мы помним, свет это высокочастотная электромагнитная волна, как все электромагнитные волны, обладающая корпускулярными свойствами, т.е. представимая в виде фотонов, каждый из которых переносит определенную дискретную энергию и импульс. Необычны статистические свойства этих частиц: их число в определенном состоянии неограниченно, более того в неравновесных условиях появление фотона определенного типа тем более вероятно, чем больше идентичных фотонов уже имеется. Вот это явление и именуется стимулированной эмиссией. Таким образом, для построения лазера нужно иметь среду в неравновесном состоянии, чтобы за счет квантовых переходов генерировать фотоны и механизм, выделяющий «нужные» фотоны. В качестве последнего удобно использовать интерферометр Фабри – Перо. В результате будет получен когерентный поток монохроматического света. Более того, этот поток может быть сделан поляризованным и слабо расходящимся. Именно эти обстоятельства и позволяют характеризовать свет лазера как излучение высокого качества.

Луч лазера может быть непрерывным, с постоянной амплитудой, или импульсным, достигающим экстремально больших пиковых мощностей. Во многих конструкциях рабочий элемент лазера используется в качестве оптического усилителя для

излучения от другого источника. Усиленный сигнал очень точно совпадает с исходным по длине волны, фазе и поляризации.

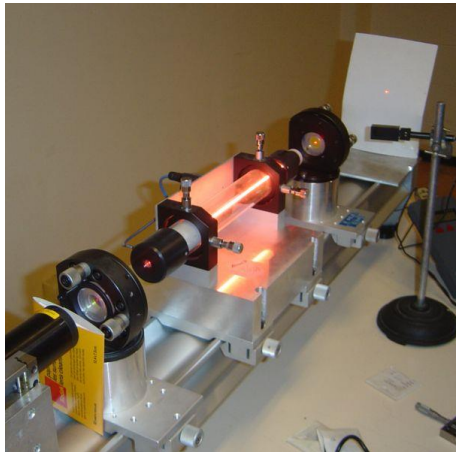


Рис. 77. Гелий-неоновый лазер. Светится активная среда (луч лазера с трудом виден на экране).

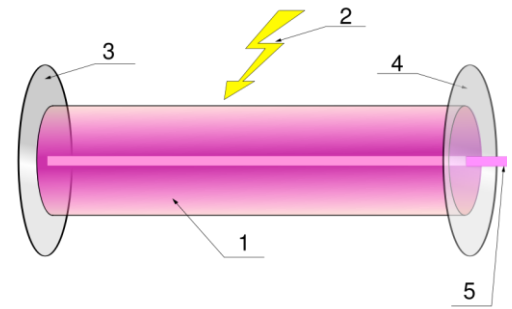


Рис.78.Схема гелий-неонового лазера. 1 – активная среда, 2 – подводимая извне энергия, 3 – непрозрачное зеркало, 4 – зеркало с высоким коэффициентом отражения, 5 – лазерный луч. непрозрачное зеркало, 4 - зеркало с высоким коэффициентом отражения, 5 – лазерный луч.



Рис 79. Пикосекундный лазер ИФТТ РАН.

Для работы лазера необходима инверсии электронной населённости. Имеется в виду следующее: фотон излучается при переходе электрона с квантового уровня, отвечающего большой энергии на низкоэнергетический уровень. Одновременно происходят процессы поглощения фотонов с обратным переходом электронов. Для генерации необходимо, чтобы заселенность верхнего уровня превышала заселенность нижнего. Такая ситуация реализуется путём «накачки» рабочего тела, с помощью подвода к нему энергии, например в виде световых или электрических импульсов.

На рис. 77 и 79 показан луч лазера в воздухе. При низкотемпературных измерениях свет в криостат часто вводят с помощью оптоволоконного световода, в котором используется явление полного внутреннего отражения.

## 28. Техника сверхвысоких частот

К сверхвысоким частотам (СВЧ) относят обычно частоты, отвечающие длинам волн от 3 см и короче, вплоть до инфракрасного света. Диапазон длин волн примерно короче 2 мм часто обозначают как «крайне высокие частоты» (КВЧ). Волны этого диапазона генерируются либо специальными радиолампами (магнетронами, клистродами и лампами обратной волны), либо специальными полупроводниковыми диодами (диод Гана).

Рассмотрим в качестве примера работу простейшего двухрезонаторного клистрона. Такой электровакуумный прибор обладает двумя резонаторами: входным и выходным (см.рис. 80). Электроны испускаются катодом и ускоряются в пространстве между катодом и ускоряющей сеткой. Изначально постоянный поток электронов в вакууме преобразуется в поток модулированной плотности за счет модуляции скоростей электронов электрическим полем СВЧ. Последнее достигается при пролёте электронов сквозь зазор объёмного входного резонатора и их последующей группировки в сгустки уже при пролете в области свободной от СВЧ поля. В узком сеточном зазоре входного резонатора, имеется продольное СВЧ поле. Поле периодически ускоряет и замедляет электроны, модулируя электронный поток по скорости. Двигаясь далее в пространстве дрейфа, электроны постепенно образуют сгустки за счёт того, что быстрые электроны догоняют медленные. Модулированный по плотности электронный поток попадает во второй резонатор и создает в нем наведенное поле той же частоты, что и частота входного модулирующего поля. Высокочастотное электрическое поле, появившееся между сетками резонатора, взаимодействует с потоком электронов. Параметры клистрона подбираются таким

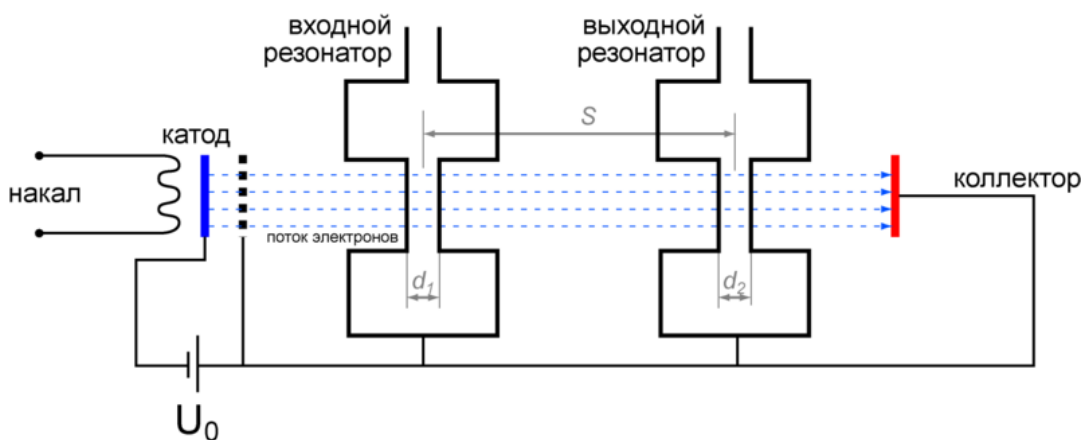


Рис.80. Схема двухрезонаторного пролетного клистрона.

образом, чтобы электрическое поле второго резонатора тормозило сгустки электронной плотности и ускоряло электроны в её разрежениях. В результате, в среднем за период одного колебания поля тормозится большее число электронов, чем ускоряется. Кинетическая энергия электронов преобразуется в энергию СВЧ колебаний электромагнитного поля второго резонатора, а электроны, пройдя резонатор, оседают на коллекторе, рассеивая оставшуюся часть кинетической энергии в виде тепла. Для возбуждения автоколебаний резонаторы должны иметь положительную обратную связь. На первой гармонике мощность СВЧ излучения клистрона может достигать половины от введенной мощности.

В отражательном клистроне используется один резонатор, через который электронный поток проходит дважды, отражаясь от специального электрода — отражателя (рис.81).

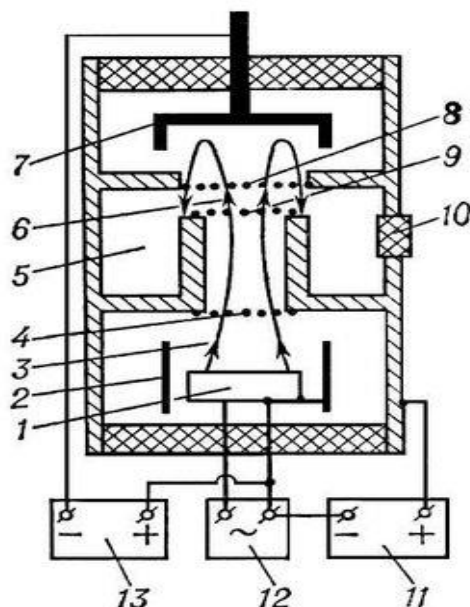


Рис.81 Схема отражательного клистрона.

1-катод, 2- коллиматор электронов, 3 – электронный пучок, 4 – ускоряющая сетка, 5 – резонатор, 6 –область взаимодействия, 7 –отражающий электрод, 8,9 - сетки,10 - выход СВЧ мощности, 11, 12, 13 – источники питания.

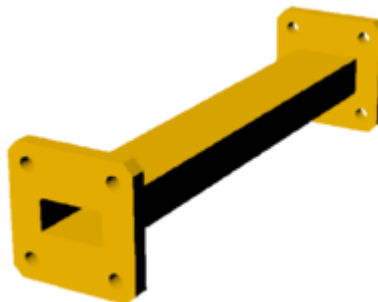


Рис.82. Часть полого латунного прямоугольного СВЧ волновода.

Измерения на СВЧ частотах проводят обычно в резонаторах, помещая образец, в зависимости от задачи, в пучность электрического или магнитного поля. При исследовании объемных свойств образцов с размерами, малыми по сравнению с длиной волны, возникает проблема краев образца. Исключение влияния краев неприятная, решаемая в каждом случае индивидуально задача.

Для транспортировки СВЧ мощности от генератора к измерительному резонатору и от резонатора к детектору используются полые металлические волноводы (см. рис. 82). Вообще говоря, волна с достаточно маленькой длиной может распространяться по трубе произвольного сечения, однако, на практике предпочитают волноводы круглые или прямоугольные волноводы. Полые волноводы

хороши тем, что они слабо поглощают СВЧ энергию. Для уменьшения поглощения внутренние стенки волноводов полируют.

В режиме КВЧ используют как полые металлические волноводы, так и диэлектрические. Более того, иногда работают в квазиоптическом режиме, применяя сетки для построения поляризаторов и, например, тефлоновые линзы для формирования луча.

## Оглавление

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| Введение                                                       | 2  |
| Наука фундаментальная и прикладная                             | 5  |
| Что «лучше», подтвердить или опровергнуть теорию?              | 6  |
| Что такое «измерение», и какие измерения бывают                | 6  |
| Определения и эталоны                                          | 7  |
| Единицы и системы единиц                                       | 10 |
| Работа в лаборатории. Что меняется?                            | 11 |
| Методы измерений                                               | 12 |
| Стратегия измерений                                            | 14 |
| Ошибки измерений                                               | 16 |
| О роли технического прогресса в истории человечества           | 18 |
| Характеристики измерительных систем                            | 19 |
| Обратное влияние измерительной системы на измеряемый объект:   | 24 |
| согласование                                                   |    |
| Шумы и помехи                                                  | 26 |
| Источники помех                                                | 28 |
| Структура измерительных систем                                 | 31 |
| Преобразование измеряемого сигнала                             | 39 |
| Синхронный усилитель (Lock-in Amplifier)                       | 45 |
| Нелинейная обработка сигнала                                   | 46 |
| Цифро-аналоговое преобразование                                | 49 |
| Аналогово-цифровые преобразователи                             | 50 |
| Обмен информацией между отдельными приборами и/или компьютером | 52 |
| Криогенные жидкости                                            | 57 |
| Криостаты                                                      | 60 |
| Вакуумные уплотнения. Насосы                                   | 61 |
| Магнитное поле                                                 | 65 |
| Лазеры                                                         | 68 |
| Техника сверхвысоких частот                                    | 70 |