

План курса лекций

1. Введение.
2. Наука фундаментальная и прикладная.
3. Что «лучше», подтвердить или опровергнуть теорию?
4. Что такое «измерение» и какие измерения бывают.
5. Определения и эталоны.
6. Единицы и системы единиц.
7. Работа в лаборатории. Что меняется?
8. Методы измерений.
9. Стратегия измерений.
10. Ошибки измерений.
11. О роли технического прогресса в истории человечества.

План курса лекций

12. Характеристики измерительных систем.

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

14. Шумы и помехи.

15. Источники помех.

16. Структура измерительных систем.

17. Преобразование измеряемого сигнала.

18. Синхронный усилитель (Lock-in Amplifier).

19. Нелинейная обработка сигнала.

План курса лекций

20. Цифро – аналоговое преобразование.

21. Аналогово-цифровые преобразователи.

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

23 Два слова о жаргоне (децибелы и dBm).

24. Криогенные жидкости.

25. Криостаты.

26. Вакуумные уплотнения. Насосы.

27. Магнитное поле.

28. Лазеры.

29. Техника сверхвысоких частот.

4. Что такое «измерение» и какие измерения бывают.

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.

Номинальное измерение.

Если измеряются элементы множества S , то измерительная система должна быть способна определить $s_1 = s_2$ или $s_1 \neq s_2$. Примеры номинальных измерений нам хорошо известны из ботаники и биологии, как разделение по классам, отрядам и т.д.

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.

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.

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 попугаях.

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.

5. Определения и эталоны.

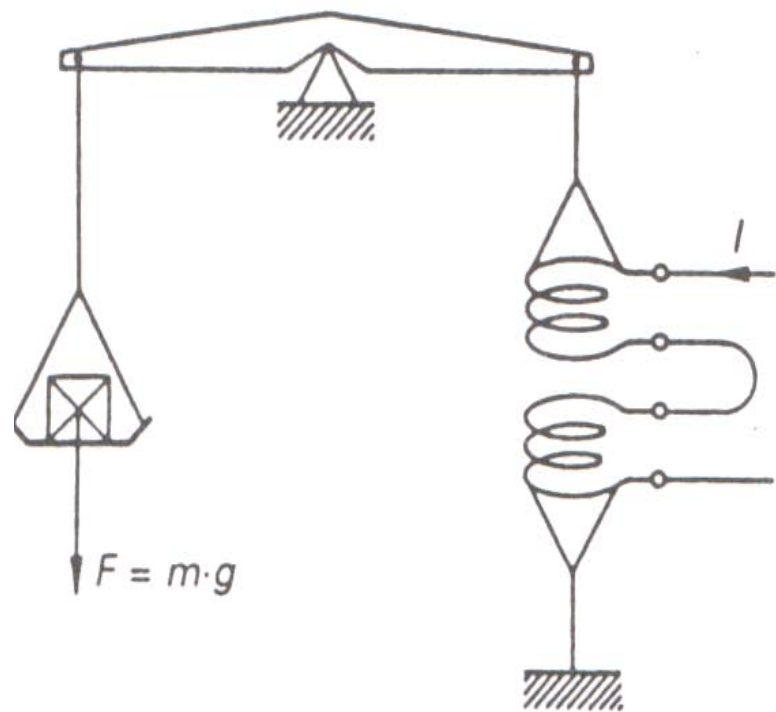
На протяжении веков определение единиц изменялось. Скажем метр, определялся как доля гринвичского меридиана, а в настоящее время определяется как путь, проходимый светом в вакууме за $1/299792458$ сек. Уже из этого примера видно стремление определить единицу измерений так, чтобы на базе определения можно 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.

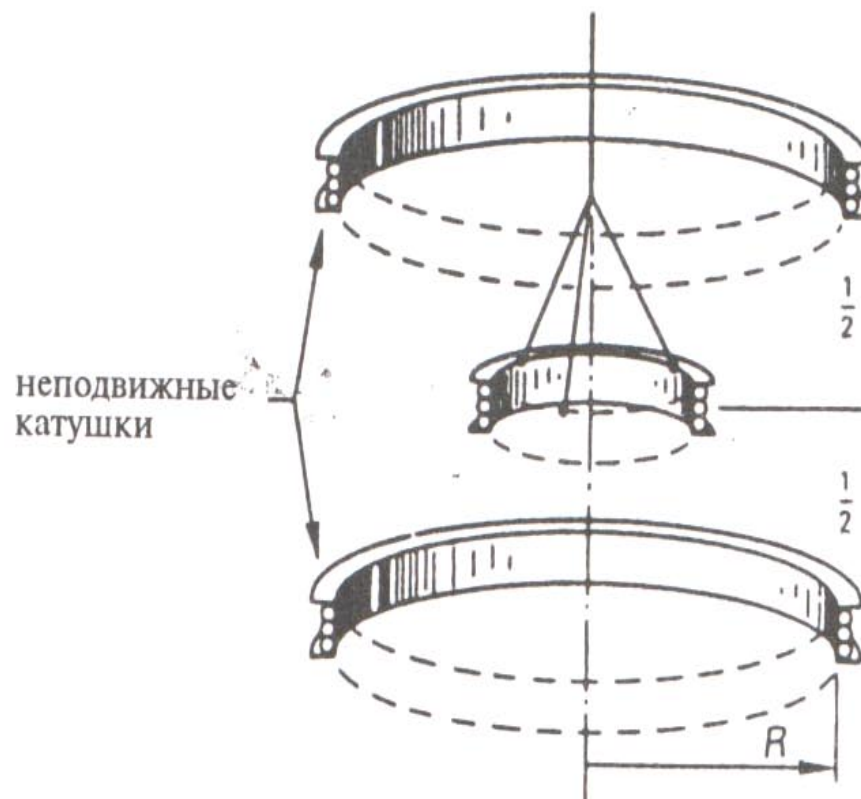
Мерой времени является секунда, определяемая как длительность 9192631770 периодов электромагнитных колебаний, соответствующих переходу между уровнями сверхтонкой структуры атома цезия 133.

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,

5. Определения и эталоны.

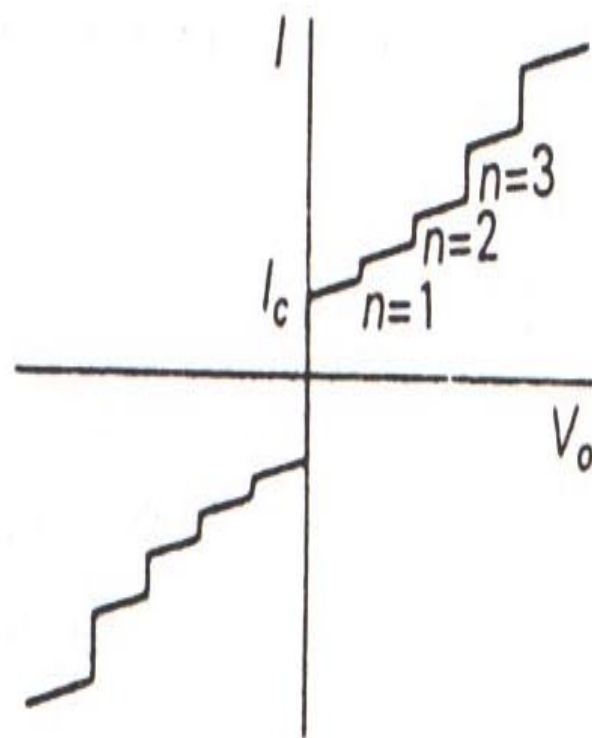
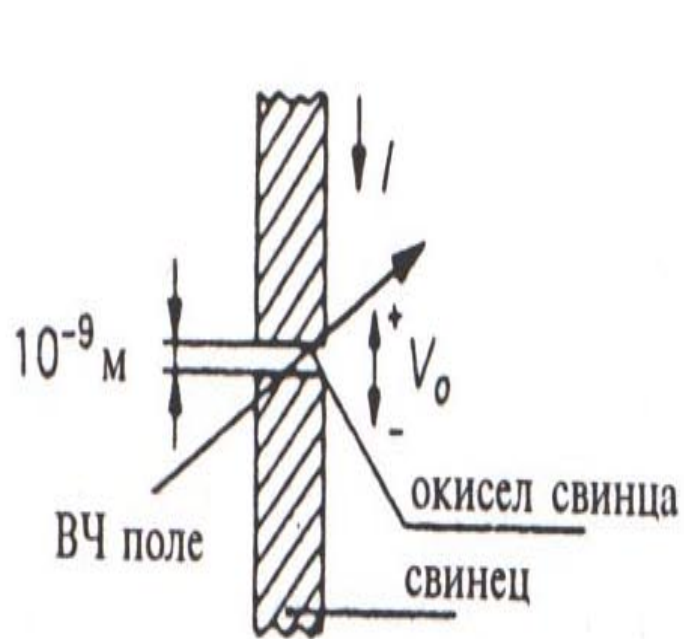


(a)



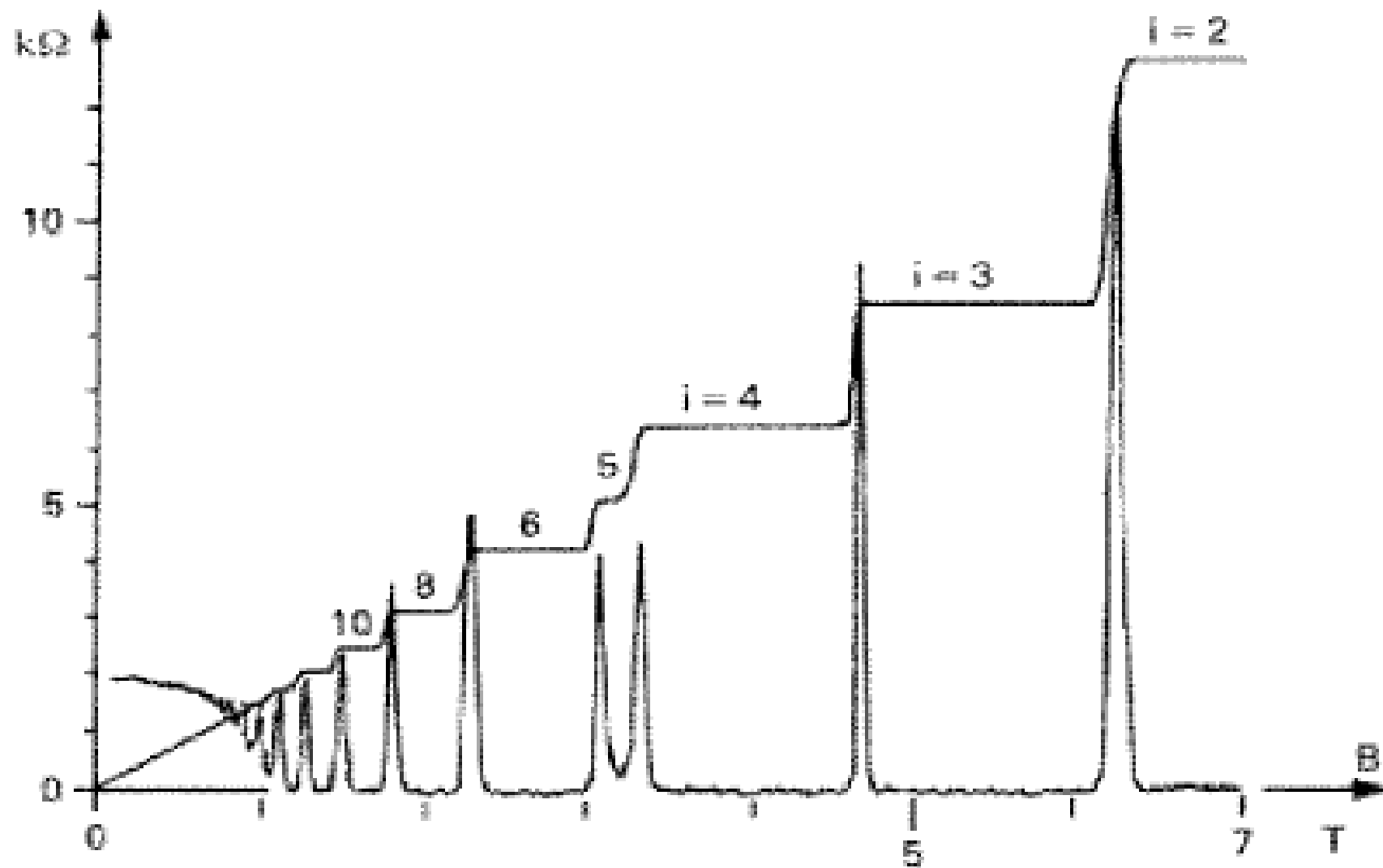
(b)

Эталон разности электрических потенциалов.

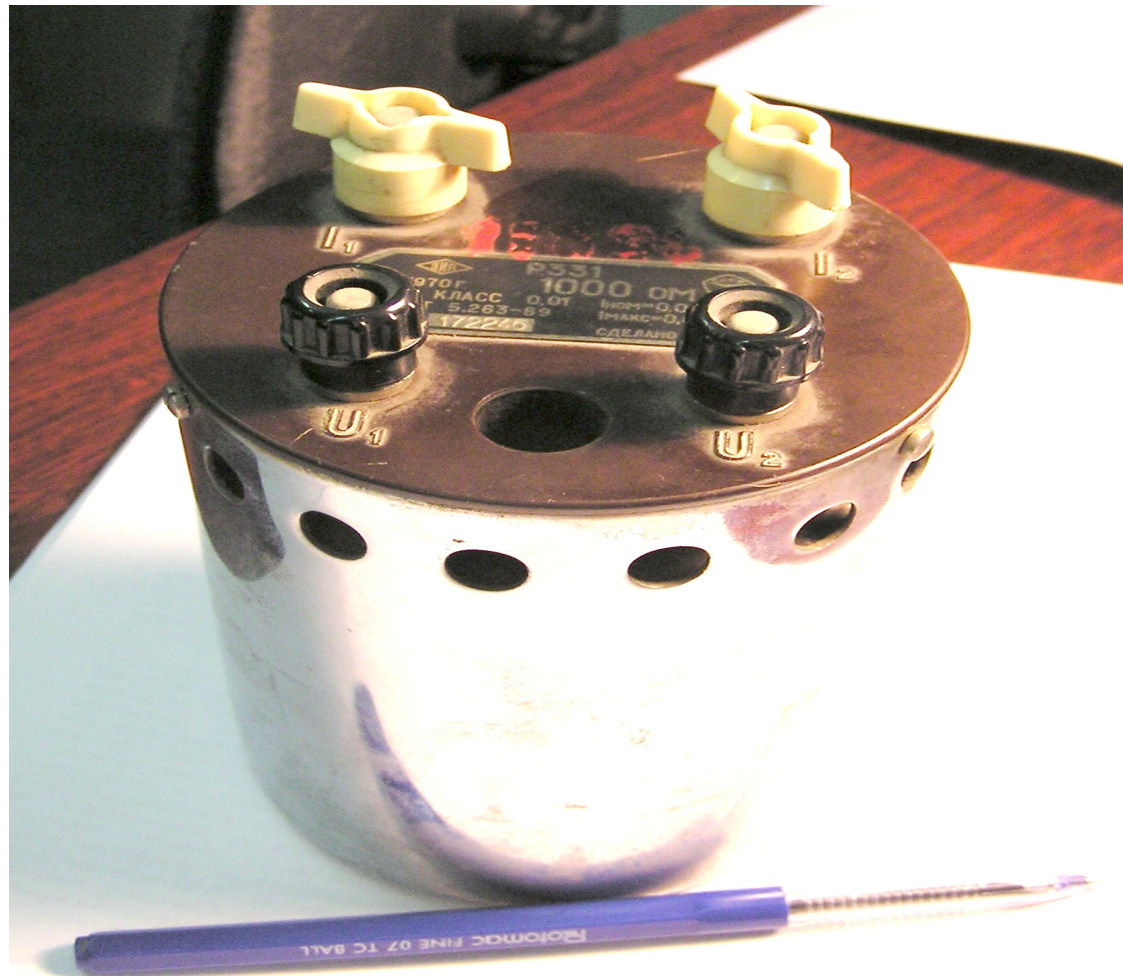


$$nhf=2eV$$

Эталон сопротивления.



Вторичные эталоны.



6. Единицы и системы единиц.

Результат кардинального измерения может быть записан в виде:

$$\text{Величина} = \{\text{численное значение}\} [\text{единица}]$$

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

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

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

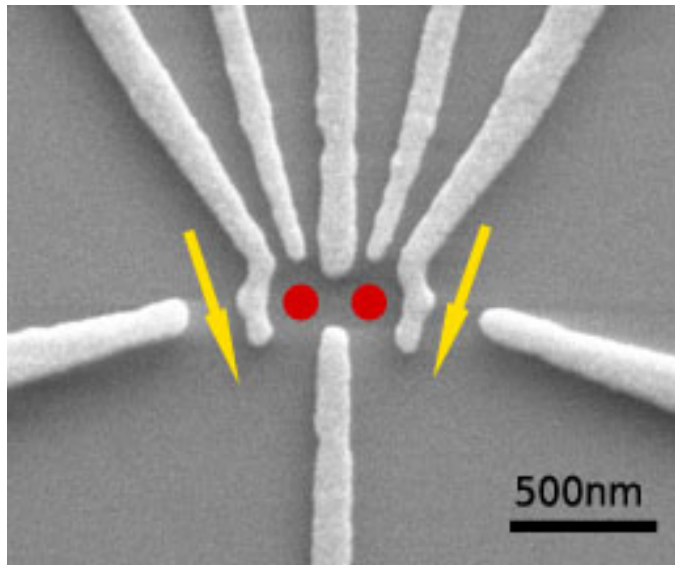
Следовательно, между размерностями физических величин имеется соотношение

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

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.

7. Работа в лаборатории. Что меняется?



8. Методы измерений.

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 Δp и отклонение r с точностью Δr , то будем считать измерение оптимальным, если $\Delta p = \Delta r$. Для оптимального измерения необходимо $p \gg r$ и $\Delta p/p \ll \Delta r/r$.

8. Методы измерений.

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.

8. Методы измерений.

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.

8. Методы 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.

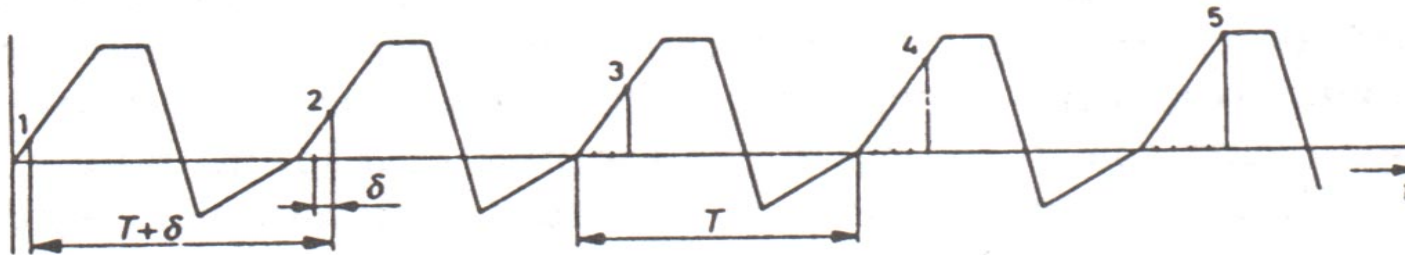
Иногда удастся свести измерение физической величины к подсчету каких-либо объектов, например импульсов. В качестве примера можно привести измерение частоты, с помощью подсчета числа периодов более высокочастотного сигнала стабильной известной частоты за один или несколько периодов измеряемой частоты.

9. Стратегия измерений.

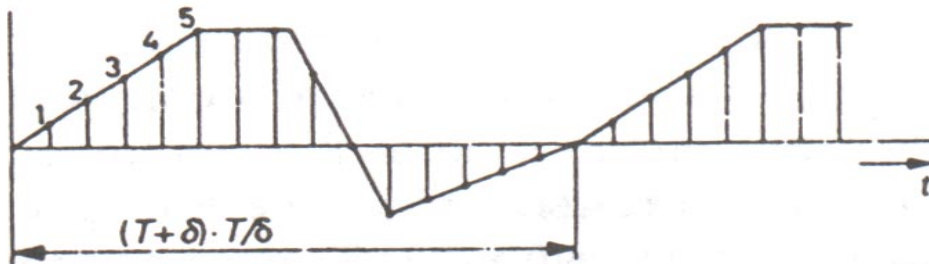
Когерентные выборки.

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.).

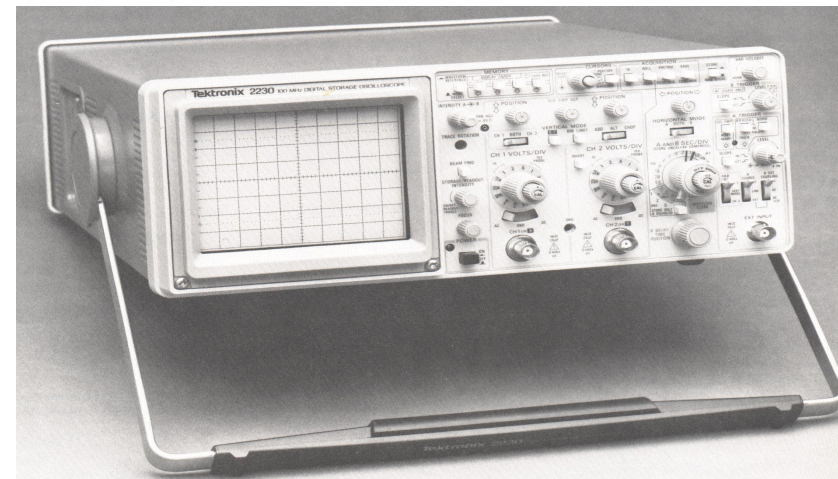
9. Стратегия измерений.



(a)



(b)



9. Стратегия измерений.

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.

9. Стратегия измерений.

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.

9. Стратегия измерений.

Роль экспериментатора..

вклад экспериментатора в результат может быть и непроизвольно отрицательным. Такое случается, как правило, при поиске сигнала незначительно превышающего уровень шума. В этом случае, особенно если параметры ожидаемого сигнала предварительно известны, возможна непроизвольная 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!

10. Ошибки измерений.

Каждое измерение имеет **ограниченную точность** – сопровождается определенной погрешностью. Поэтому всегда имеется различие между истинным значением измеряемой величины и измеренным значением.

Как мы помним, погрешности измерений бывают **систематическими и случайными**.

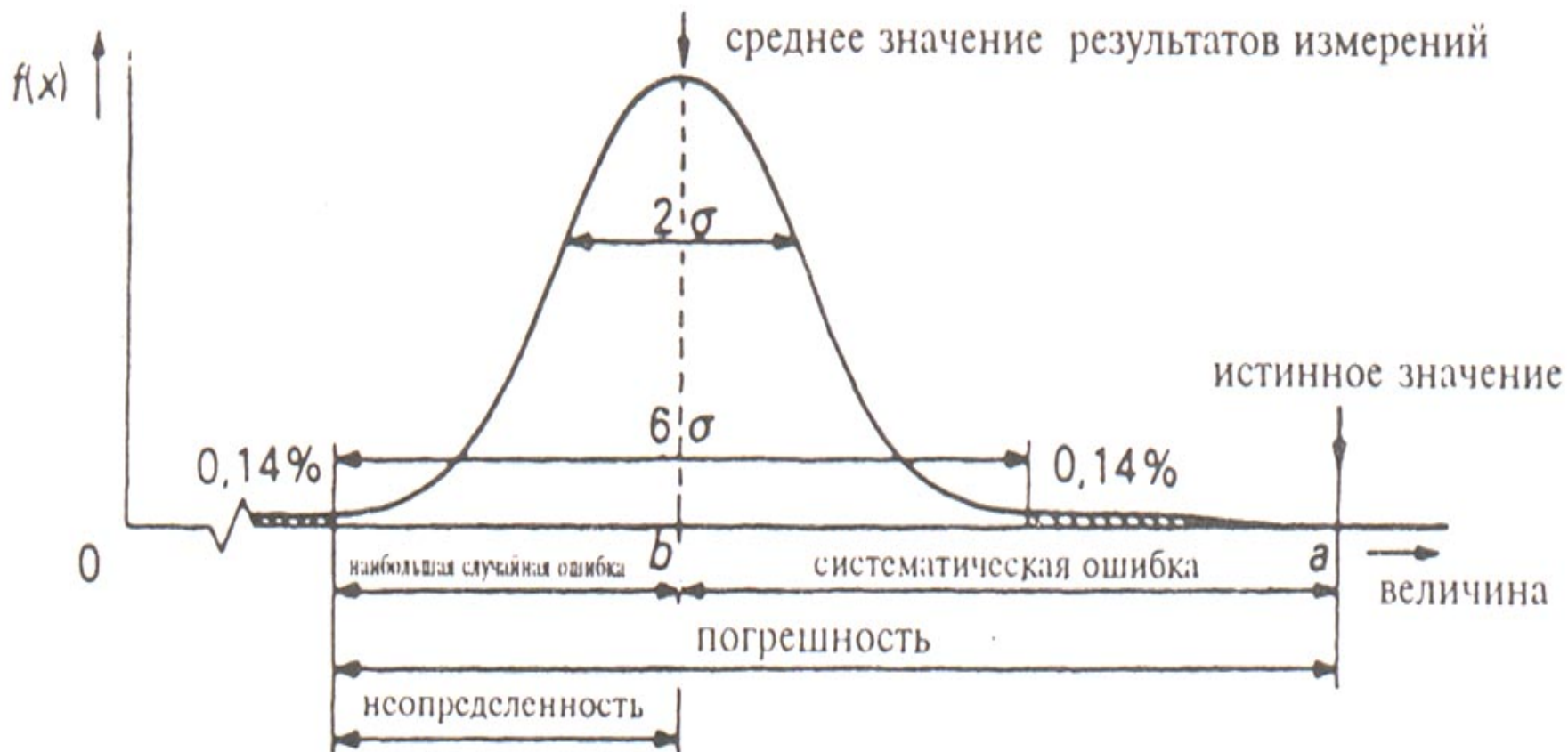
Первые прекрасно воспроизводятся при повторных измерениях на одном и том же объекте при тех же условиях и с помощью той же измерительной установки. Их обнаружение и оценка наиболее сложны. Систематические ошибки могут возникать из-за влияния измерительной системы на объект измерений, из-за неточности 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.

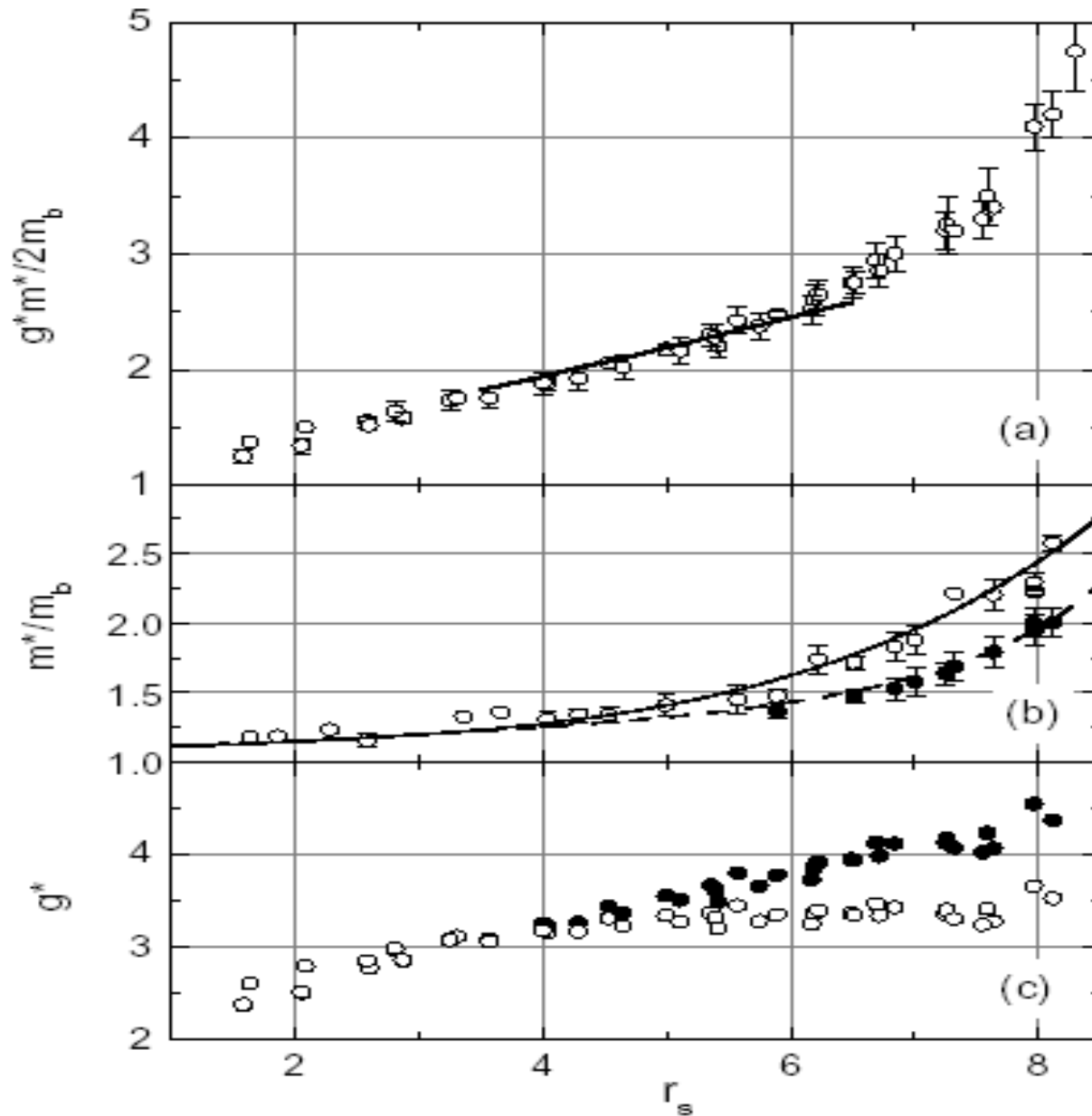
10. Ошибки измерений.

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

10. Ошибки измерений.



10. Ошибки измерений.



Характеристики измерительных систем.

Чувствительность.

Порог чувствительности

Разрешающая способность.

Чувствительность к форме сигнала.

Нелинейность измерительных систем.

Пределы измерений и динамический диапазон.

Описание измерительных систем с помощью дифференциальных уравнений.

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

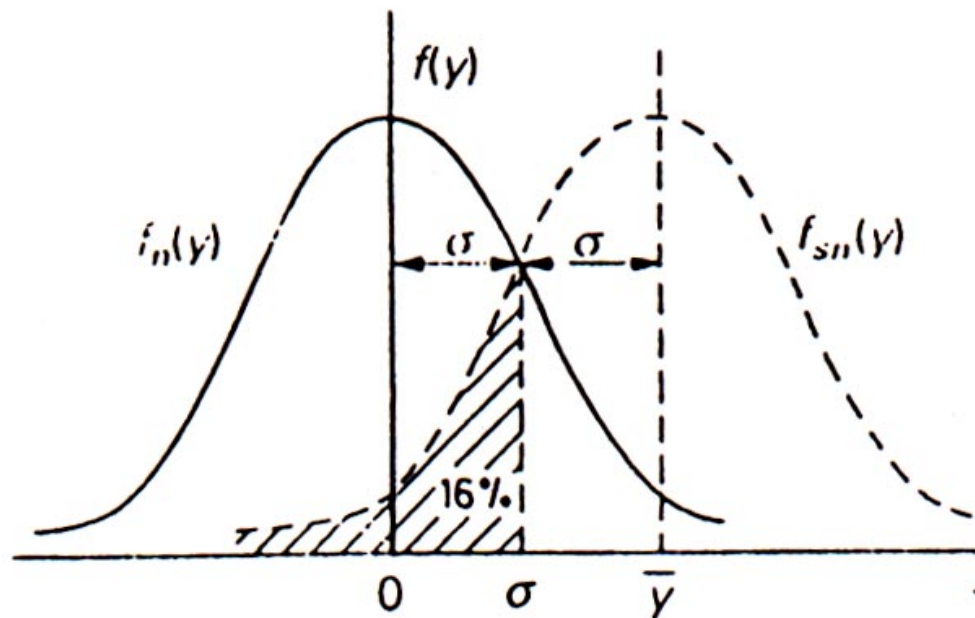
$$S^y_x = d(\ln(y))/d(\ln(x)).$$

Порог чувствительности.

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 $f_{sn}(y) = f_n(y) + \langle y \rangle$



Порог чувствительности.

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.

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

Порог чувствительности.

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 σ_0 шум измерительного устройства в полосе 1 Гц (Размерность σ_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 Δx 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 Δx - шаг оцифровки, не совпадает, а зачастую и значительно превышает величину последнего индицируемого 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}

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

Среднее от модуля

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

Действующее значение

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

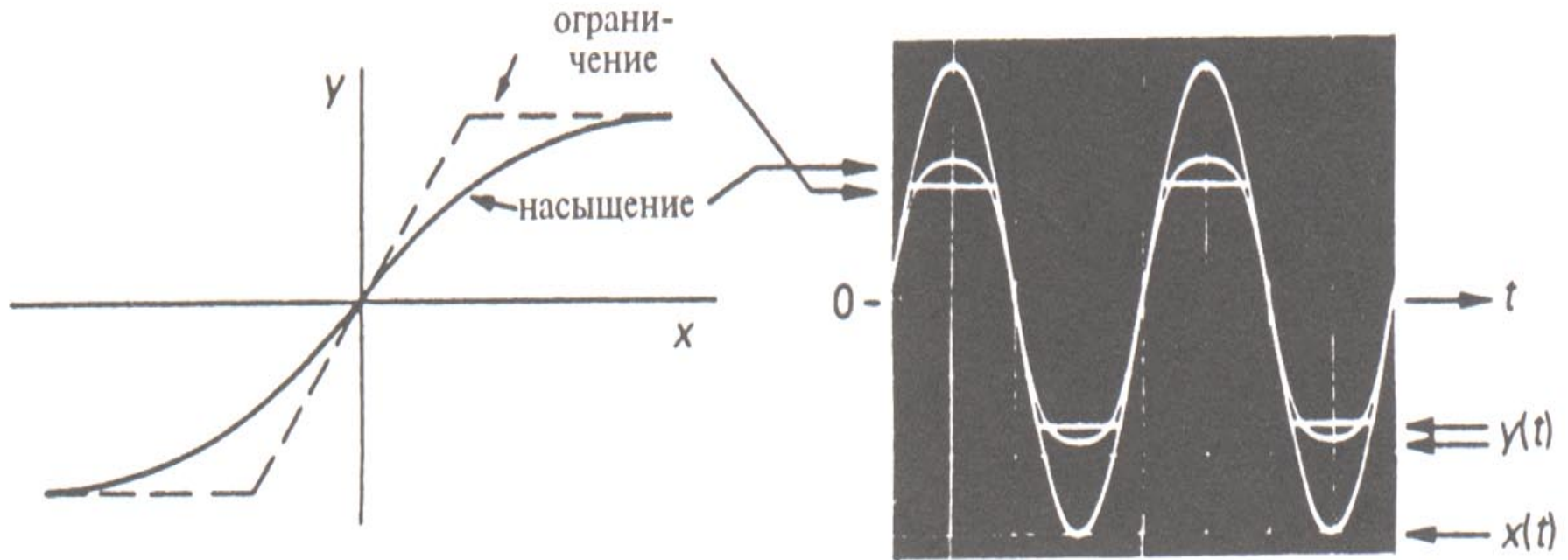
Нелинейность измерительных систем.

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 приведены типичные примеры нелинейности измерительных систем.

Нелинейность измерительных систем.

Ограничение

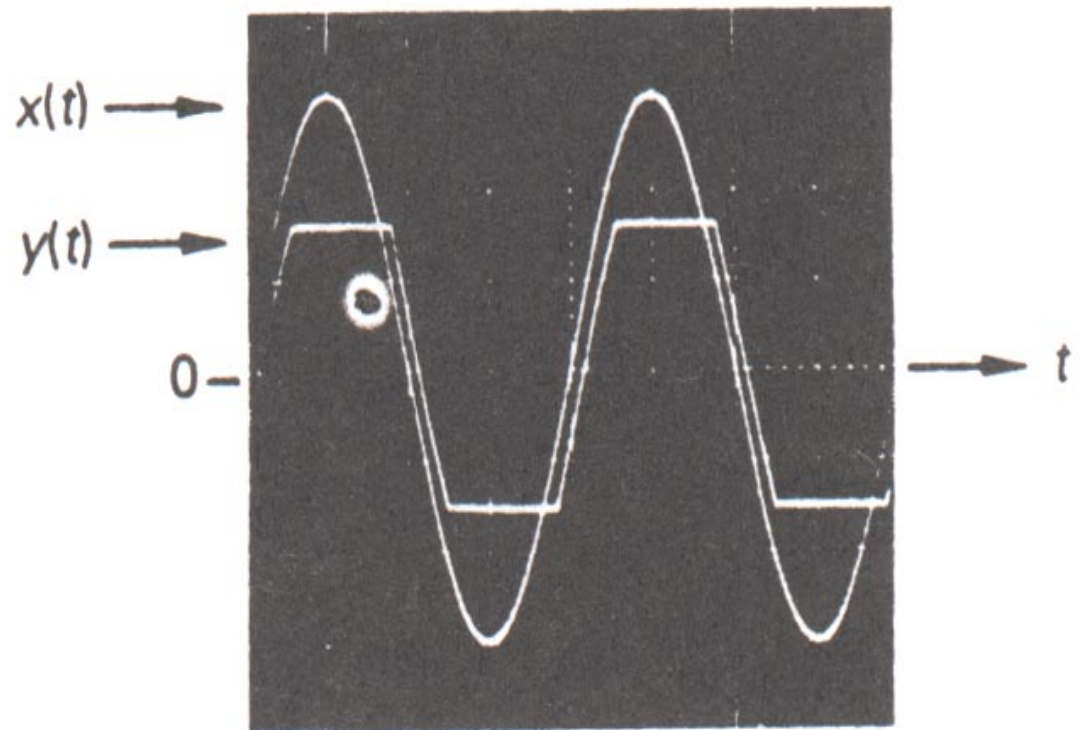
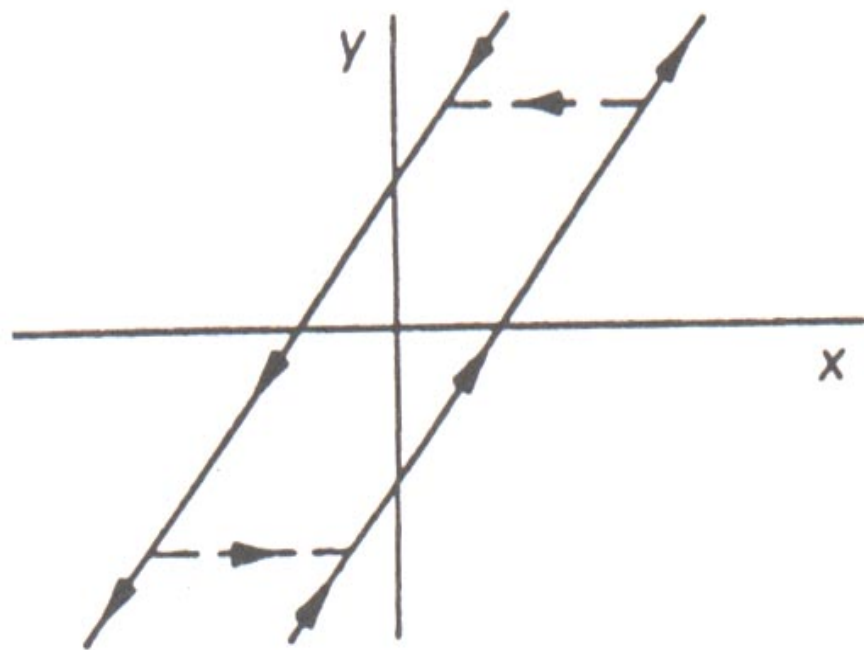


(a)

(b)

Нелинейность измерительных систем.

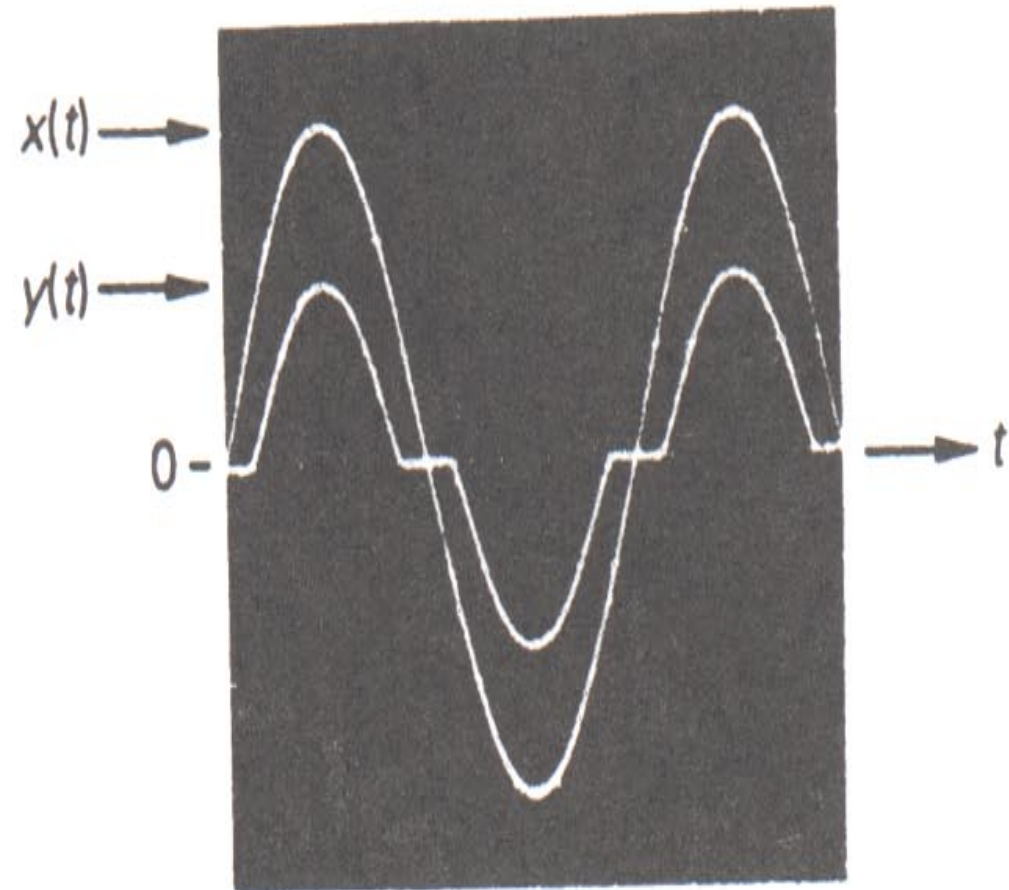
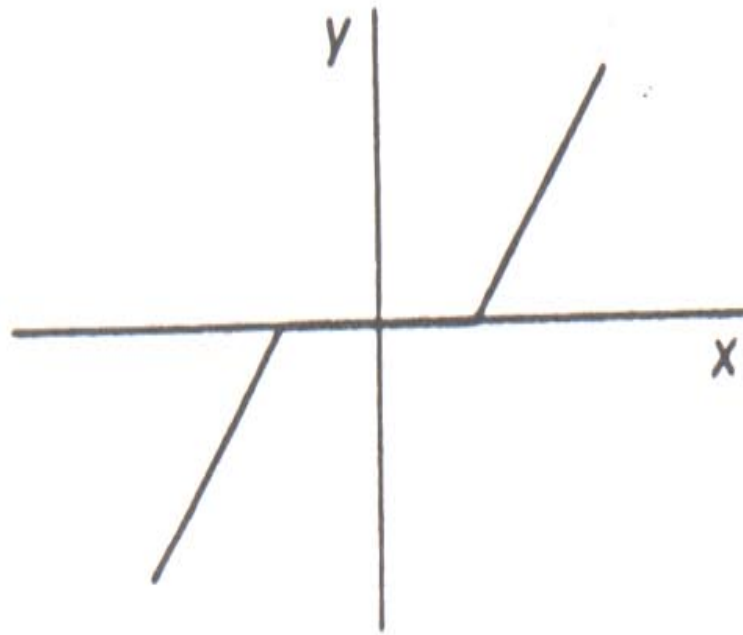
Гистерезис.



(b)

Нелинейность измерительных систем.

Мертвая зона.



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.

Описание измерительных систем с помощью дифференциальных уравнений.

Системы первого порядка. В общем случае описываются уравнением:

$$\tau \, dy/dt + y = x$$

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

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

Здесь T_i – измеряемая температура. В итоге имеем уравнение:

$$RC \, dT/dt + T = T_i.$$

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

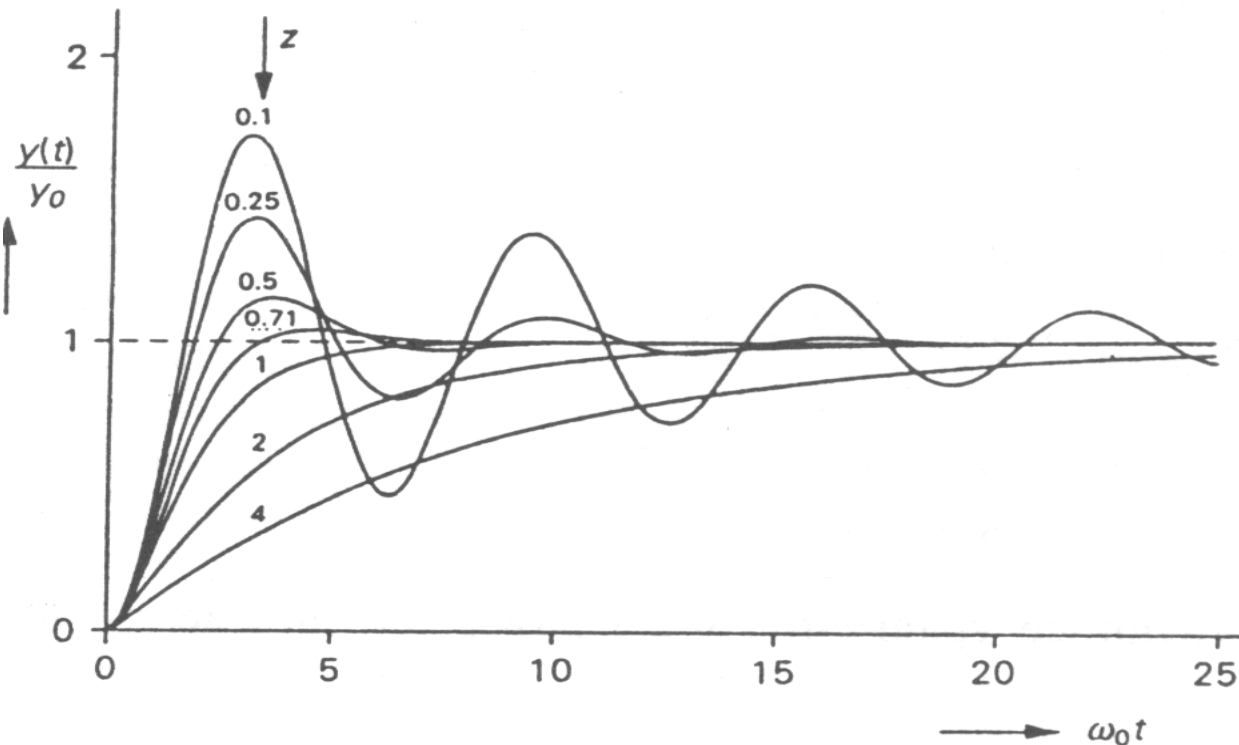
$$y = y_0 (1 - \exp(-t/\tau)).$$

Описание измерительных систем с помощью дифференциальных уравнений.

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

Описание измерительных систем с помощью дифференциальных уравнений.

Нелинейные системы

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

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.

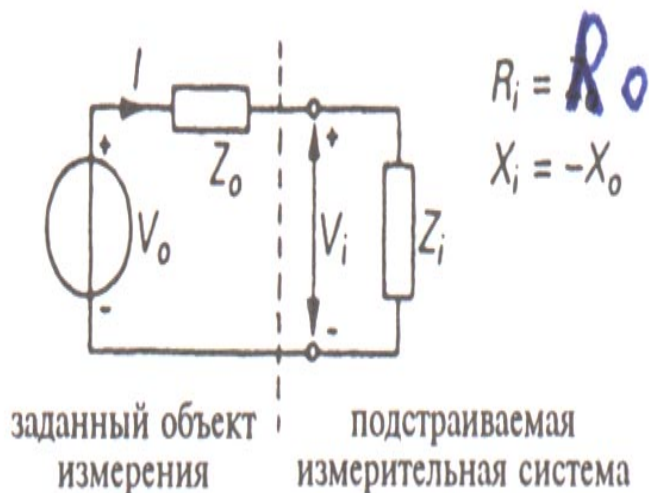
Анэнергетическое согласование.

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.

Обратное влияние измерительной системы на измеряемый объект: согласование.

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.)



Потребляемая измерительным устройством мощность равна

$$P = I^2 R_i.$$

Действующее значение тока равно:

$$I = V_0 / ((R_i + R_0)^2 + (X_i + X_0)^2)^{1/2}$$

Соответственно, мощность, поступающая в измерительное устройство равна:

$$P = R_i V_0^2 / ((R_i + R_0)^2 + (X_i + X_0)^2)$$

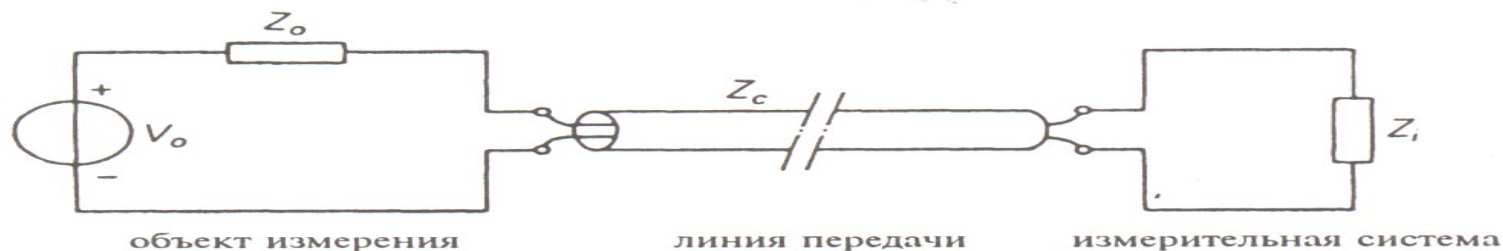
Эта мощность максимальна при $X_i = -X_0$ и $R_i = R_0$.

Ее величина составляет $P_{max} = V_0^2 / 4R_0$.

Обратное влияние измерительной системы на измеряемый объект: согласование.

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.)



Отражений от концов кабеля не будет, если $Z_0 = Z_c = Z_i$.

Для кабеля без потерь $Z_c = (L/C)^{1/2}$. Здесь L - индуктивность единицы длины кабеля, а C – емкость единицы длины.

Коаксиальный кабель - 50 Ом, 75 Ом; скрученная пара проводов – 100-120 Ом, проводники на печатной плате 50-150 Ом.

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:

$$V = (4kTR\Delta f)^{1/2} \text{ и } I = (4kT\Delta f/R)^{1/2}.$$

Шумы и помехи.

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.

Шумы и помехи.

Помехи и методы борьбы с ними.

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 $C_T = S^{-1} dS/dT$.

Шумы и помехи.

Помехи и методы борьбы с ними.

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..**

Шумы и помехи.

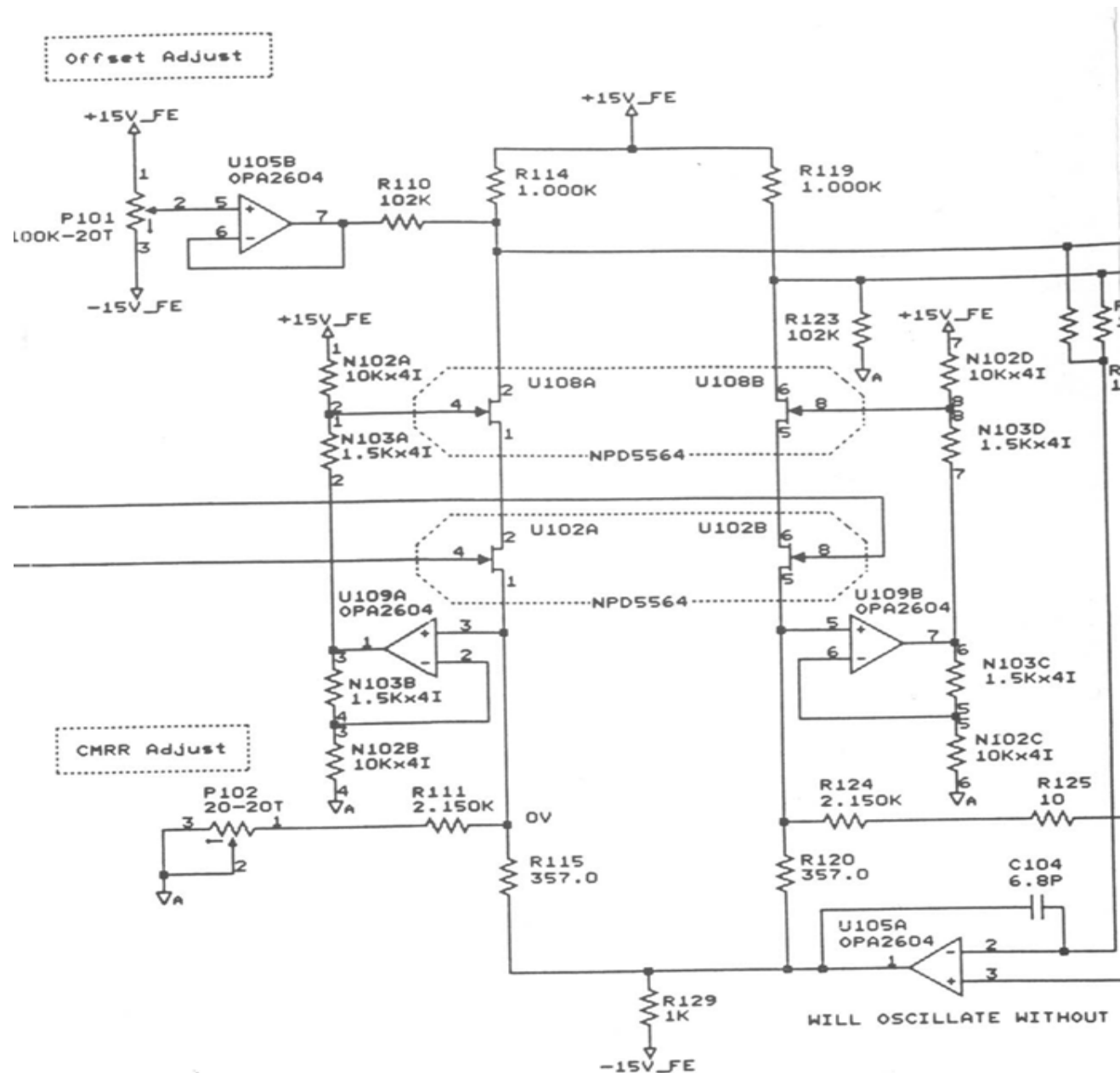
Параллельная компенсация состоит в расщеплении измерительной системы на две параллельные части, каждая из которых подвергается действию одной и той же помехи.

Компенсация по отношению к *аддитивной помехе* будет достигнута, если $S_{d1} = dy_1/dd = -S_{d2}$.

Мультипликативная помеха будет скомпенсирована, если $dS_1/dd = -dS_2/dd$.

Шумы и помехи.

Реализуется 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



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 переполюсовка (смена знака) измерительного тока.

Источники помех.

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.

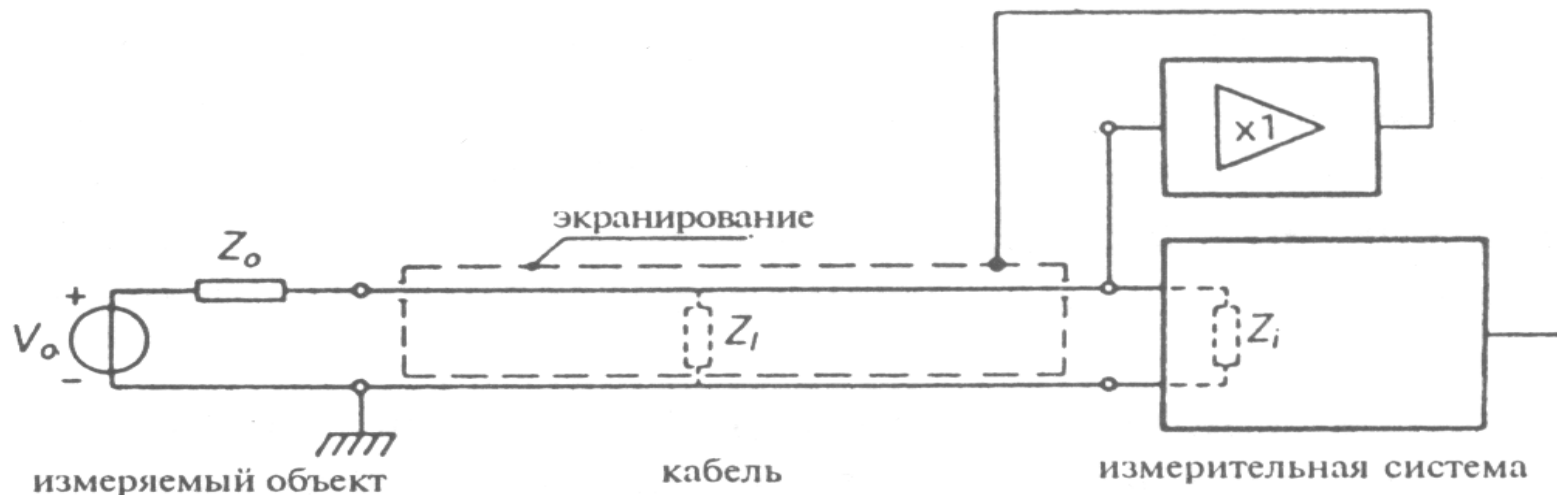
Сопротивление между двумя точками на печатной плате, разделенными расстоянием в 1 см, через некоторое время после изготовления не превосходит 10^8 Ом.

Пассивные способы борьбы состоят в очистке от жира, пыли и уменьшении влажности.

Источники помех.

Токи утечки.

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 $1-\varepsilon$, то эффективный импеданс утечки будет равен Z_i/ε . На печатных платах вблизи защищаемого проводника создают две защитные дорожки, по обе стороны от проводника.



Источники помех.

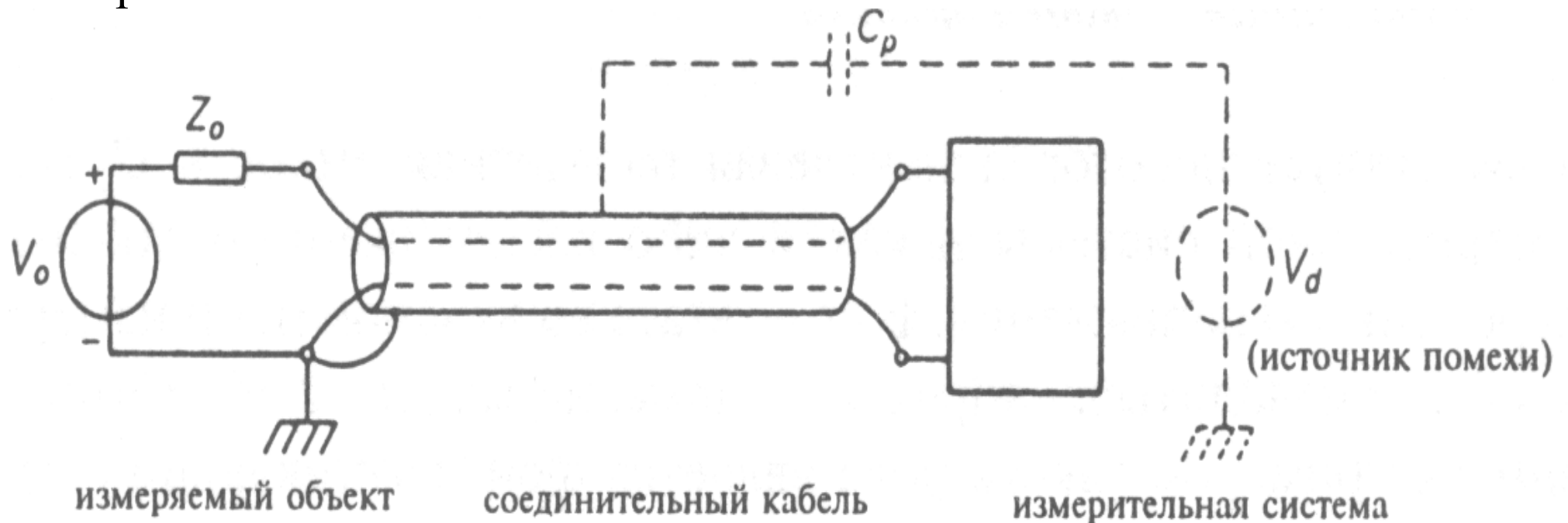
Емкостная наводка.

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.

Источники помех.

Емкостная наводка.

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.



Источники помех.

Индуктивная наводка.

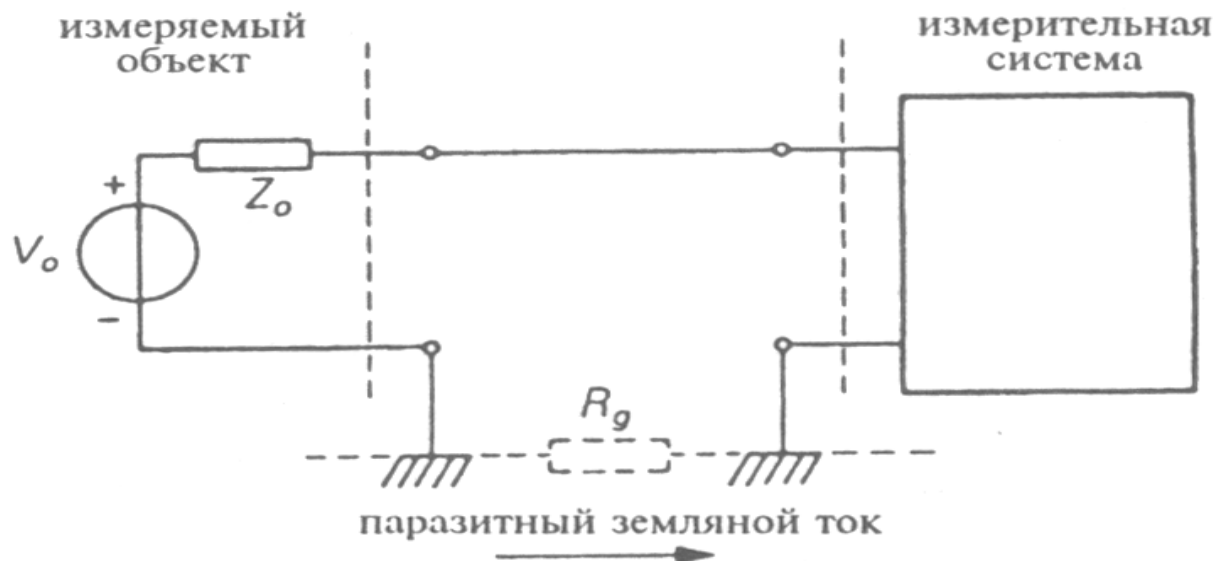
Возникает, если во входной цепи имеется петля, и петлю эту пронизывает переменный поток магнитной индукции. Напряжение индуктивной наводки пропорционально частоте изменения магнитного потока и площади петли. Наводка представляет собой аддитивный сигнал помехи. Отношение индуктивной наводки к полезному 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.

Источники помех.

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

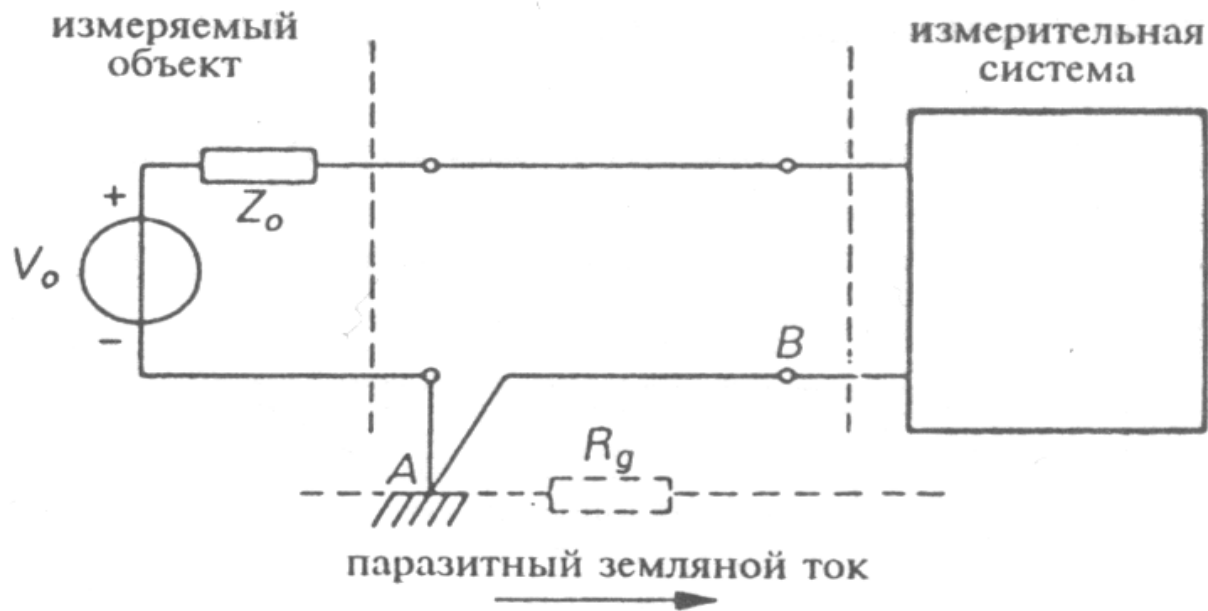


Сопротивление R_g обычно имеет порядок величины 0.1 ом/м, поэтому даже сравнительно небольшие токи по земляной шине создают наводку порядка сотен мВ.

Источники помех.

Сетевые наводки.

Простейший способ борьбы с сетевой наводкой состоит в заземлении в одной точке

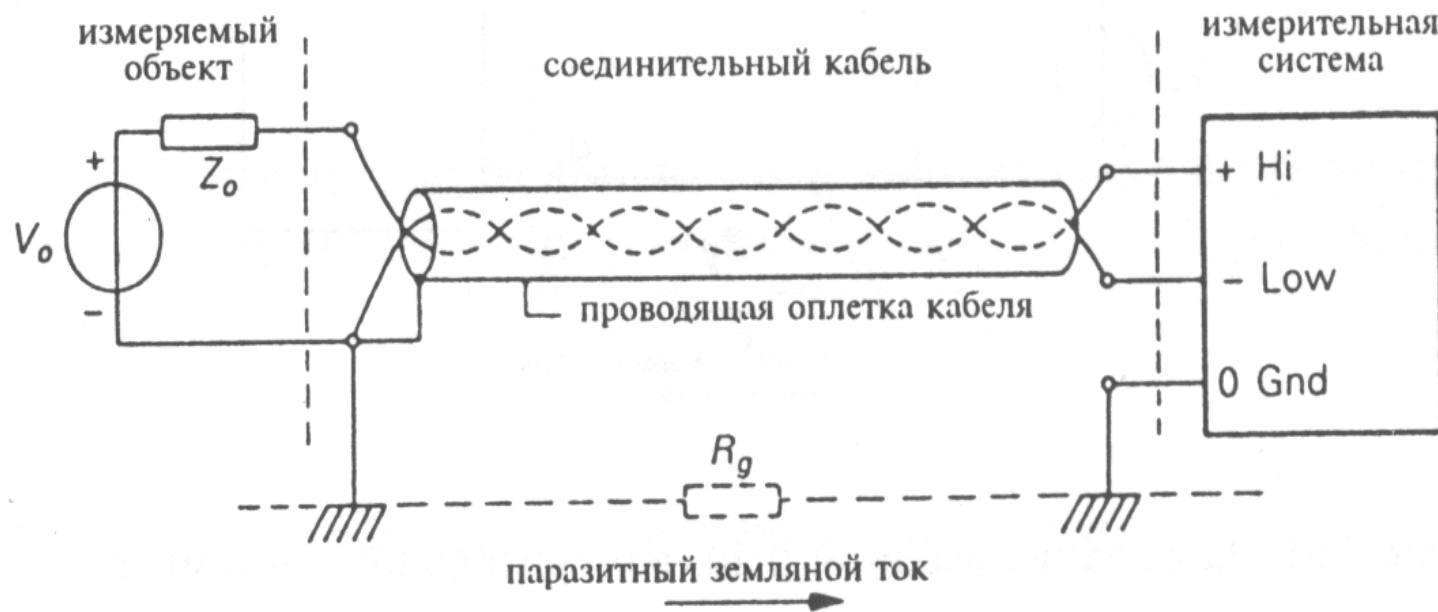


Падение напряжения на сопротивлении R_g теперь уже не подается на вход, однако полностью сетевая наводка не исключается. Дело в том, что между точками A и B текут токи, индуцированные самой измерительной системой. Обычно такие инструментальные наводки на вход значительно ниже чем устраненные за счет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

Источники помех.

Сетевые наводки.

Многие приборы имеют, т.н. плавающий или дифференциальный вход. При подключению к такому прибору происходит измерение разности двух сигналов между двумя клеммами, помеченными как “Hi” и “Low”



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

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.

Структура измерительных систем.

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.

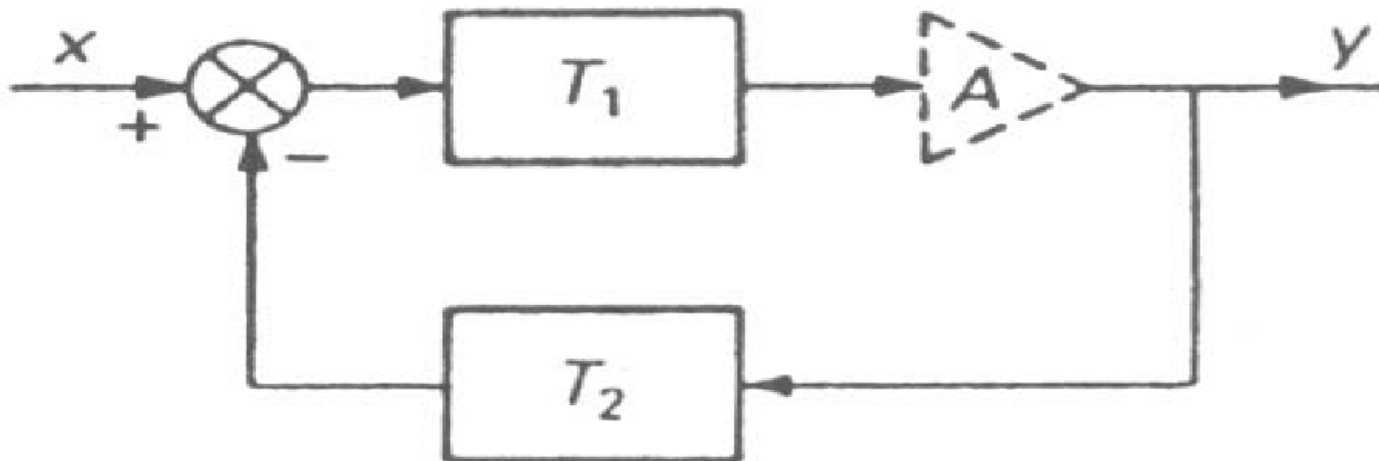
Общие принципы. Измерительный датчик это устройство, преобразующее сигнал одного типа (смещение, температуру, скорость, ускорение, деформацию и т.д.) в сигнал другого типа (электрический, в подавляющем большинстве случаев). Преобразование желательно иметь **линейное**.

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.

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

Измерительные датчики.

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. Вторым датчик предполагается линейным и невосприимчивым к помехам. Поскольку преобразователь T_1 служит в этой схеме 0 –индикатором, линейность составной системы будет определяться линейностью датчика T_2 .



Датчики смещения.

- Резистивные датчики смещения.
- Емкостные датчики смещения.
- Индуктивные датчики смещения.
- Оптические датчики смещения.
-

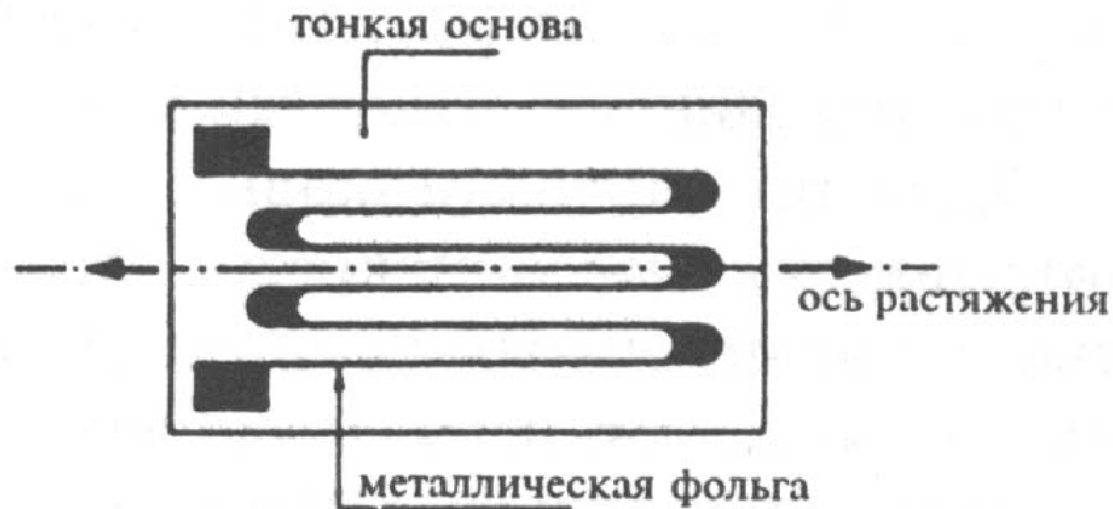
Резистивные датчики смещения.

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.

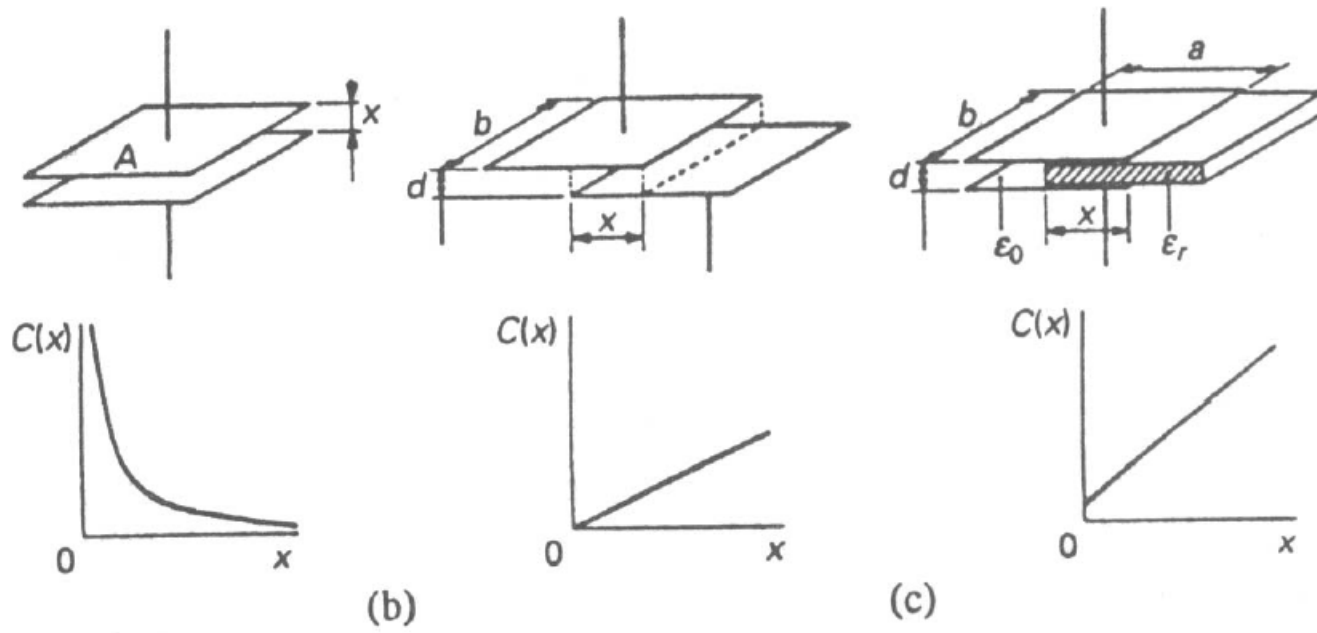
Резистивные датчики смещения.

В других типах резистивных датчиков смещения (тензOMETрах) используется тот факт, что сопротивление металлического проводника зависит от его длины и поперечного сечения. На тонкую подложку наносят металлическую фольгу так. 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.



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.



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.

Индуктивные датчики смещения.

Возможность использовать катушку индуктивности в качестве датчика смещения состоит, во-первых, в использовании **взаимоиндукции двух катушек**, во вторых, в изменении индуктивности при **смещении ферромагнитного сердечника**, в третьих, в изменении магнитного сопротивления при **смещении одного из элементов магнитного контура**



(a)



(b)

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 1мкм.

Датчики скорости.

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.

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.

Датчики скорости.

Датчик скорости может быть построен и на эффекте Доплера.

Так, например, работают все 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

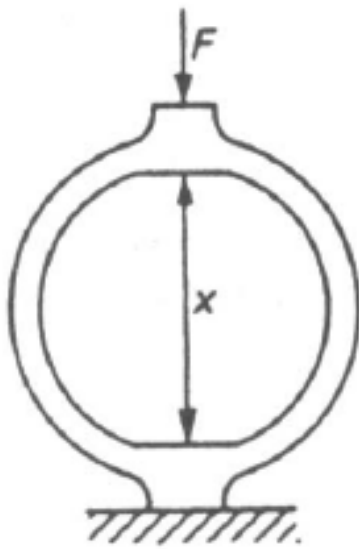
Датчики ускорения.

Для построения датчика ускорения может быть использован, например, **второй закон Ньютона**. Т.е можно измерять силу, необходимую для придания ускорения, равного ускорению измеряемого объекта , известной массе.

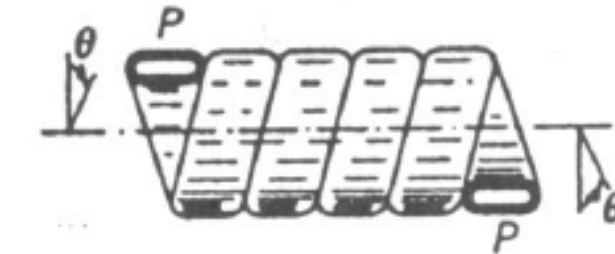
Для того, чтобы датчик не возмущал движение измеряемого объекта его масса должна быть сведена к минимуму. Кроме того возникают проблемы с переходными процессами (колебаниями малой массы относительно положения равновесия). Однако, основная проблема состоит в применении **подходящего датчика силы**.

Датчики силы.

Простейшими датчиками силы являются пружины. Конструкции нескольких типов пружин, кольцевой, винтовой, спиральной и мембранной приведены на Рис.



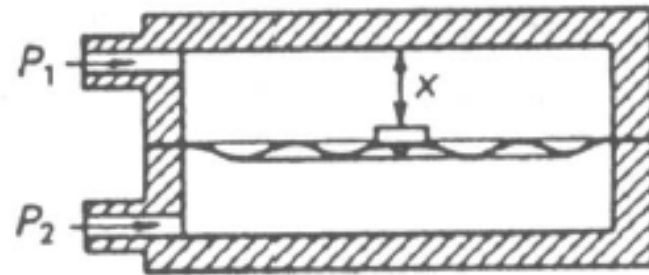
(a)



(b)



(c)



(d)

Датчики силы.

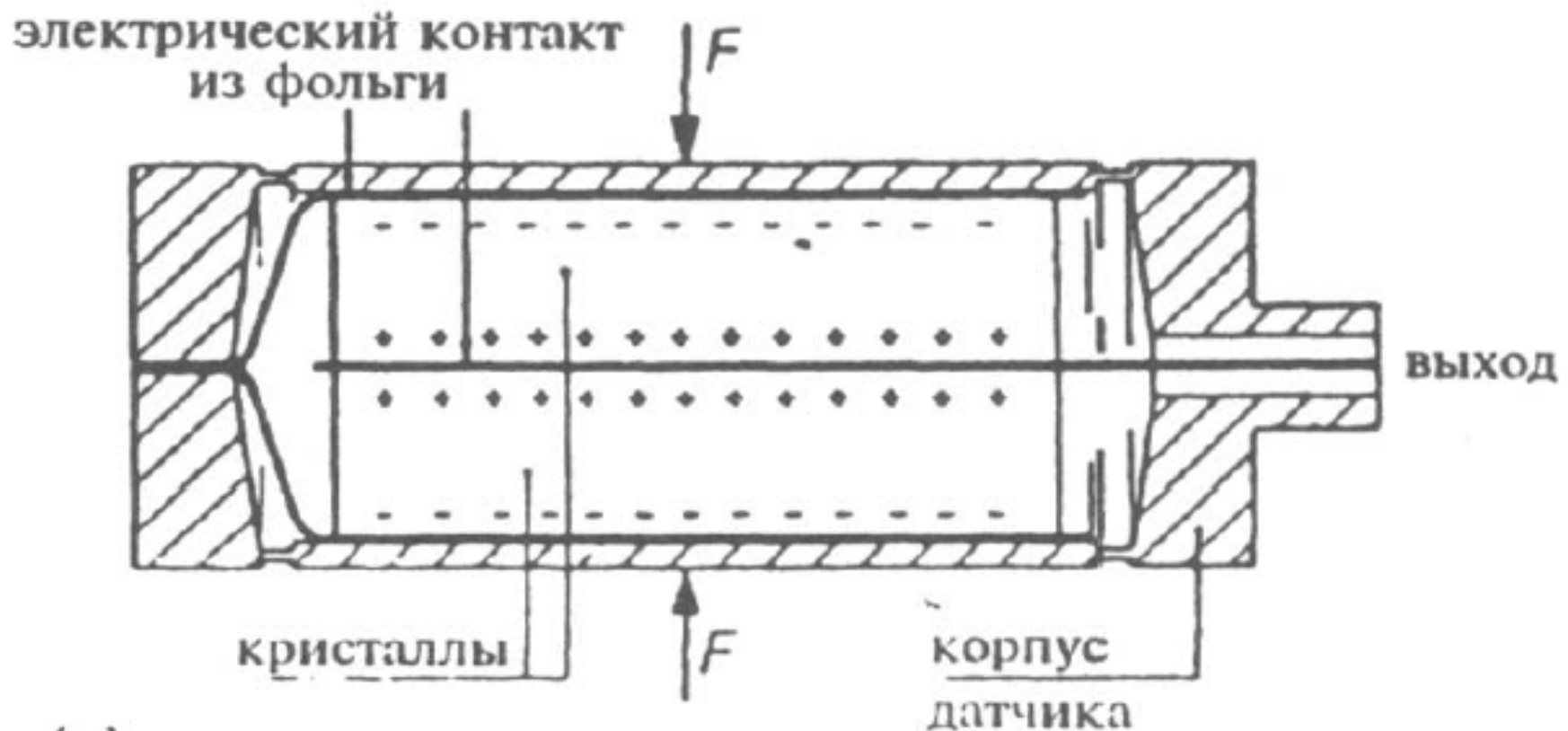
Другую возможность построения датчика силы предоставляют нам **пьезоэлектрические преобразователи**. Их действие основано на том, что у некоторых материалов при деформации появляется электрическая поляризация. Для появления пьезоэлектрического эффекта у кристалла должен отсутствовать центр симметрии. Примером такого материала является кристаллический кварц.

Другим примером являются так называемые ферроэлектрики, у которых симметрия нарушена спонтанным появлением электрической поляризации, например титанат бария.

Датчики силы.

Датчик давления на основе монокристалла кварца показан на Рис

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.
- Термопары
- Термометры излучения.

Термоэлектрические датчики.

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.

Термоэлектрические датчики.

Термопары. Если соединить два проводника, сделанные из различных материалов, то на концах возникнет так называемая контактная разность потенциалов. 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 5мкВ/К.

Термоэлектрические датчики.

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.

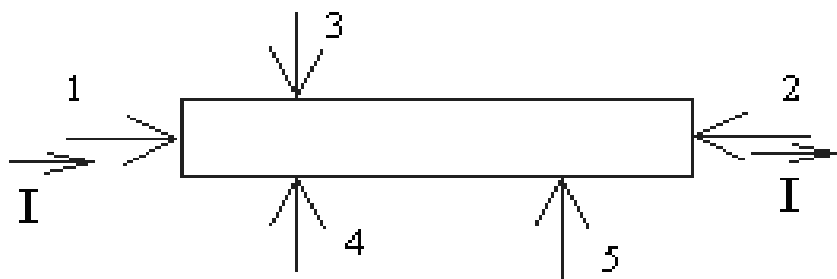
Датчики магнитного поля.

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

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

Датчики магнитного поля.

Еще более известны датчики, основанные на **эффекте Холла**.



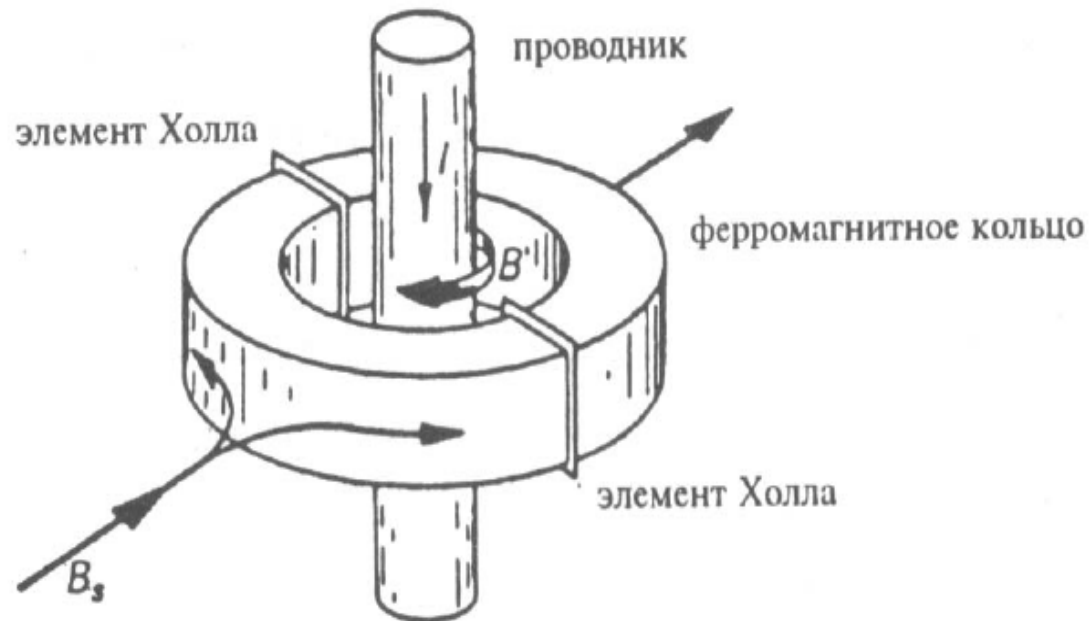
Датчики магнитного поля.

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.

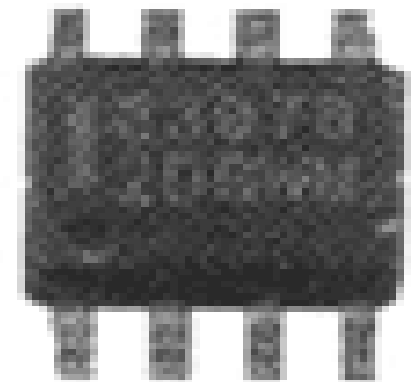
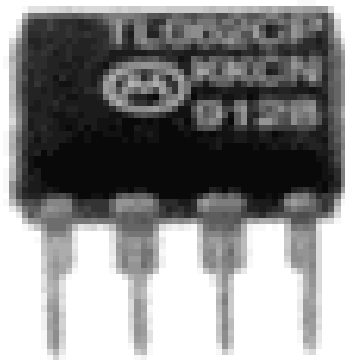
Большие токи удобно измерять бесконтактным образом, пользуясь измерением магнитного поля, индуцируемого током (См. Рис. 37). Используют разрезное ферромагнитное кольцо, охватывающее проводник. В каждый из разрезов помещается датчик Холла так, что напряжения датчиков суммируются. ЭДС Холла, возникающие 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.



Преобразование измеряемого сигнала

Операционные усилители.

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.

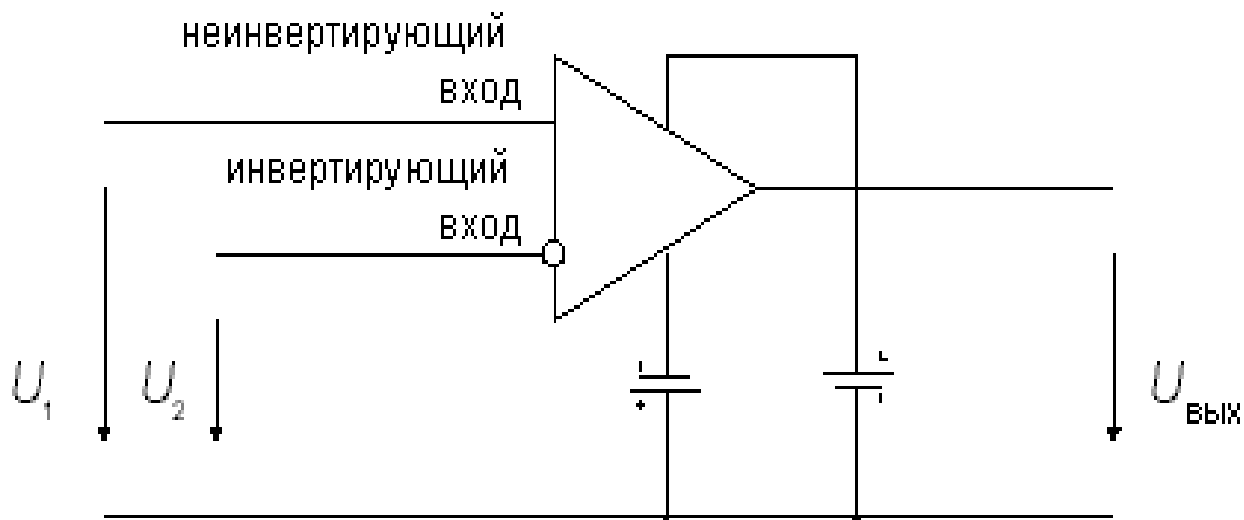


Операционные усилители.

На рис дано схемное обозначение операционного усилителя. Входной каскад его выполняется в виде дифференциального усилителя, так что операционный усилитель имеет два входа. Выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ находится в одной фазе с разностью входных напряжений:

$$U_{\text{вых}} = U_1 - U_2$$

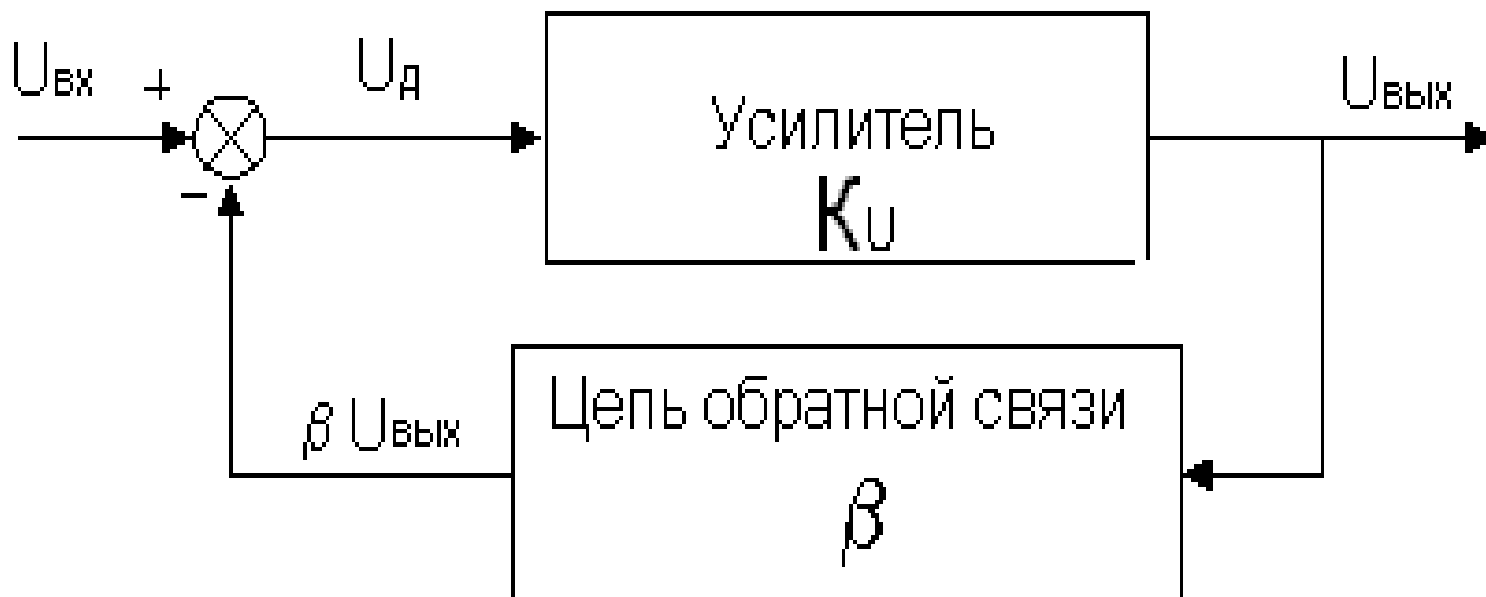
Чтобы обеспечить возможность работы операционного усилителя как с положительными, так и с отрицательными входными сигналами, следует использовать двухполярное питающее напряжение. Обычно интегральные операционные усилители работают с напряжением питания ± 15 В. В



Операционные усилители.

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.

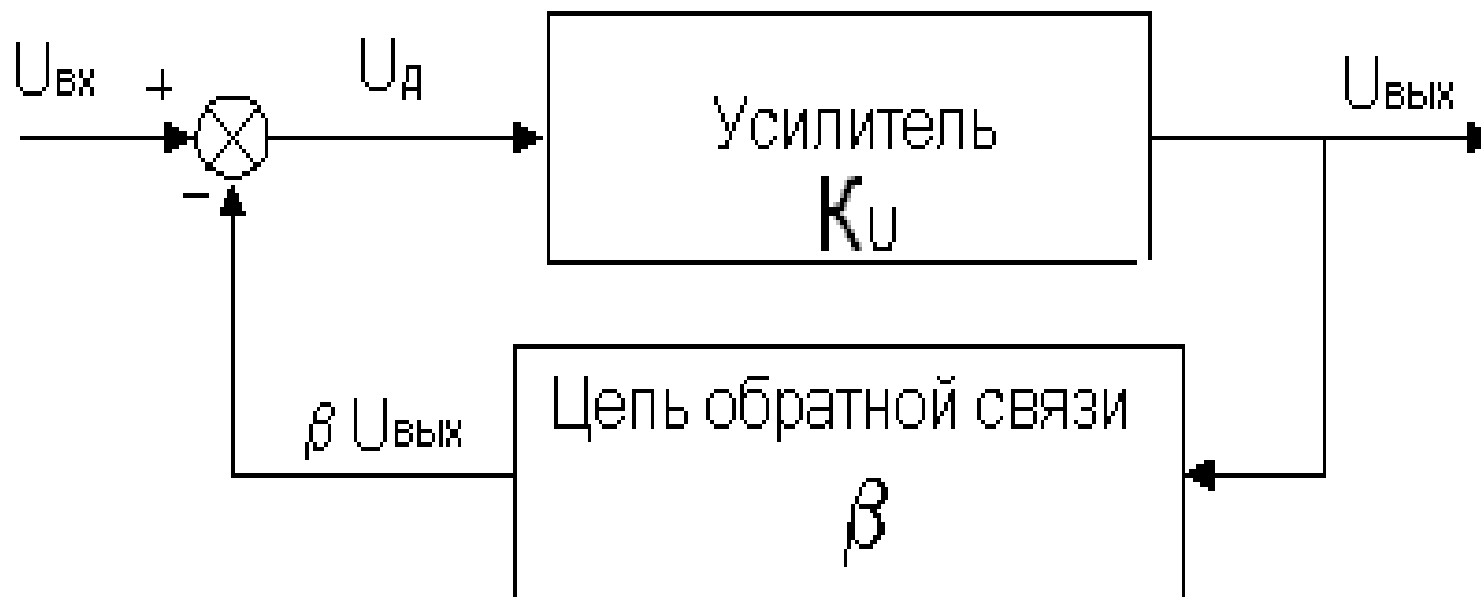


Операционные усилители.

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.



Операционные усилители.

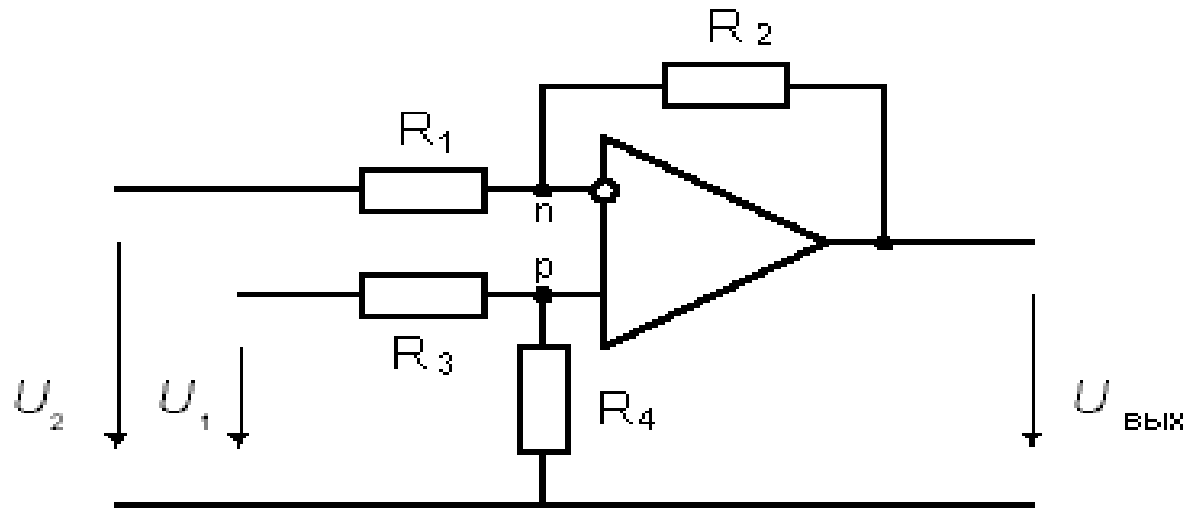
Будем называть **идеальным** операционный усилитель, который имеет следующие свойства:

- 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 мкА);
- 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)

Операционные усилители.

Дифференциальное включение операционных усилителей.

Пример дифференциального включения операционного усилителя показан на Рис.

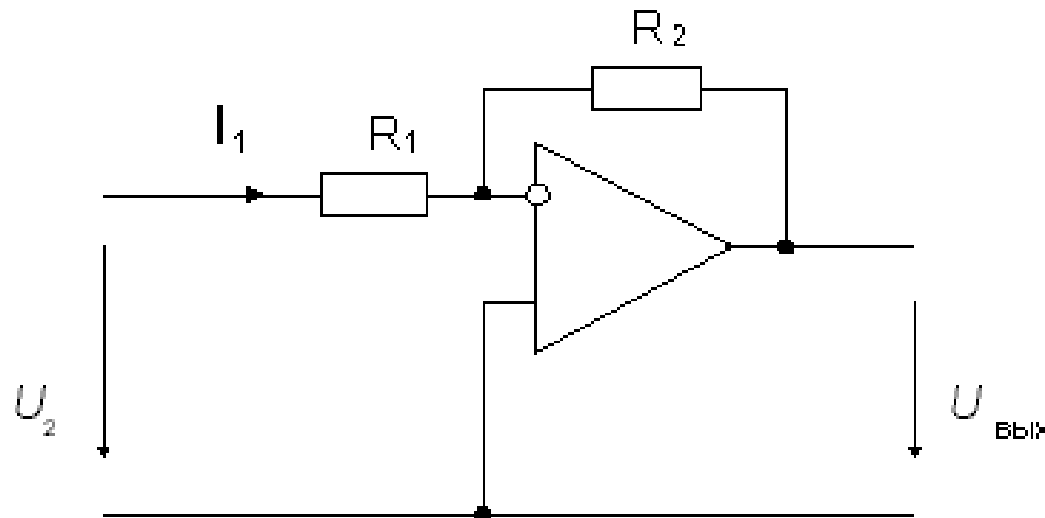


$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{(R_1 + R_2)R_4}{R_1(R_3 + R_4)} U_1 - \frac{R_2}{R_1} U_2$$

Операционные усилители.

Инвертирующее включение, преобразователь ток- напряжение.

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

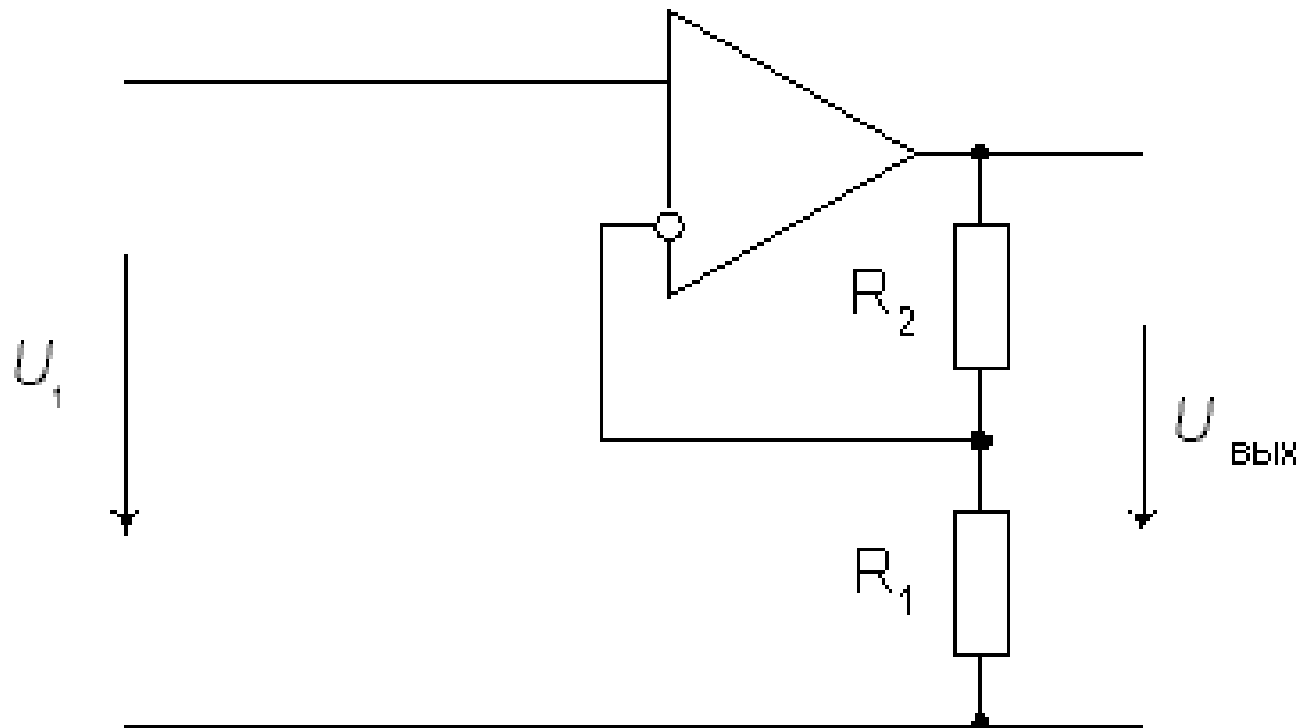


$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_2} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Операционные усилители.

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.



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

Операционные усилители.

Внутренняя структура операционного усилителя.

Реальный операционный усилитель должен обладать следующими свойствами:

высоким коэффициентом усиления по напряжению, в том числе и по постоянному;

малым напряжением смещения нуля;

малыми входными токами;

высоким входным и низким выходным сопротивлением;

высоким коэффициентом ослабления синфазной составляющей (КОСС);

амплитудно-частотной характеристикой с наклоном в области высоких частот -20дБ/дек (для достижения устойчивости на высоких частотах)

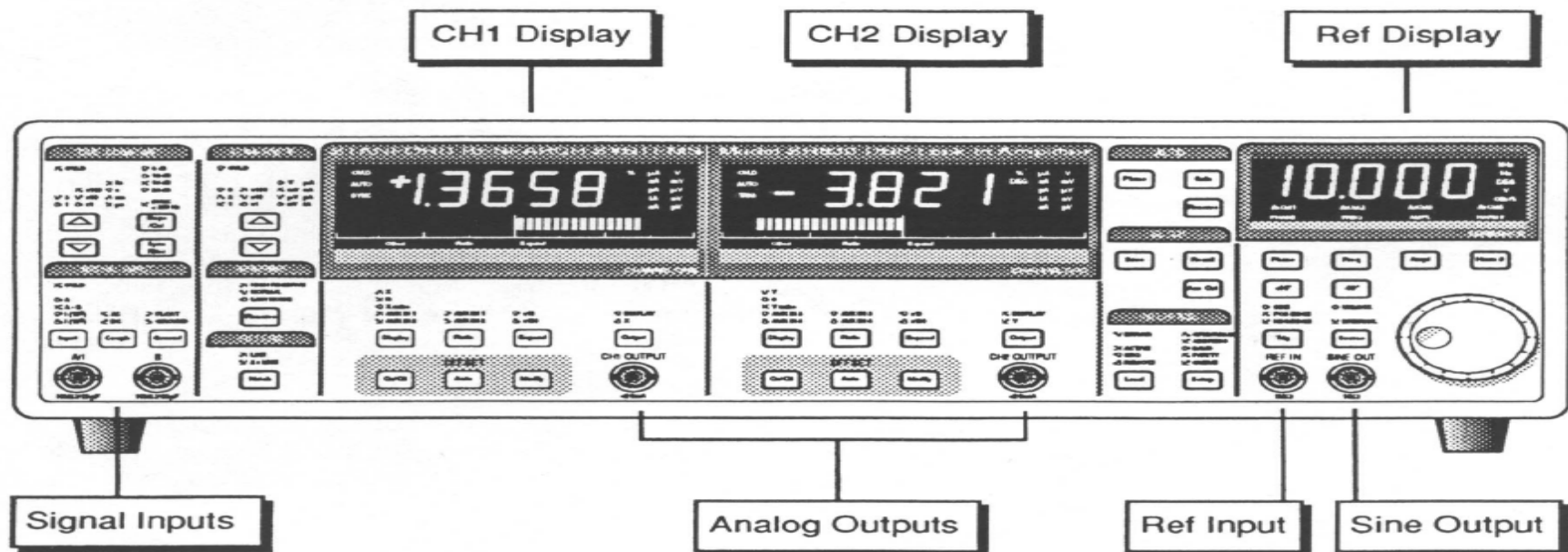


Синхронный усилитель (Lock-in Amplifier).

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.



Синхронный усилитель (Lock-in Amplifier).

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

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

А опорный сигнал равен $U_r = u_r \cos(\omega_r t)$. Их произведение

$U_i U_r = S[\cos(\omega_i t + \omega_r t + \phi) + \cos(\omega_i t - \omega_r t + \phi)] u_i u_r$. Поставив фильтр нижних частот (удалив частоту $2\omega_r$) и

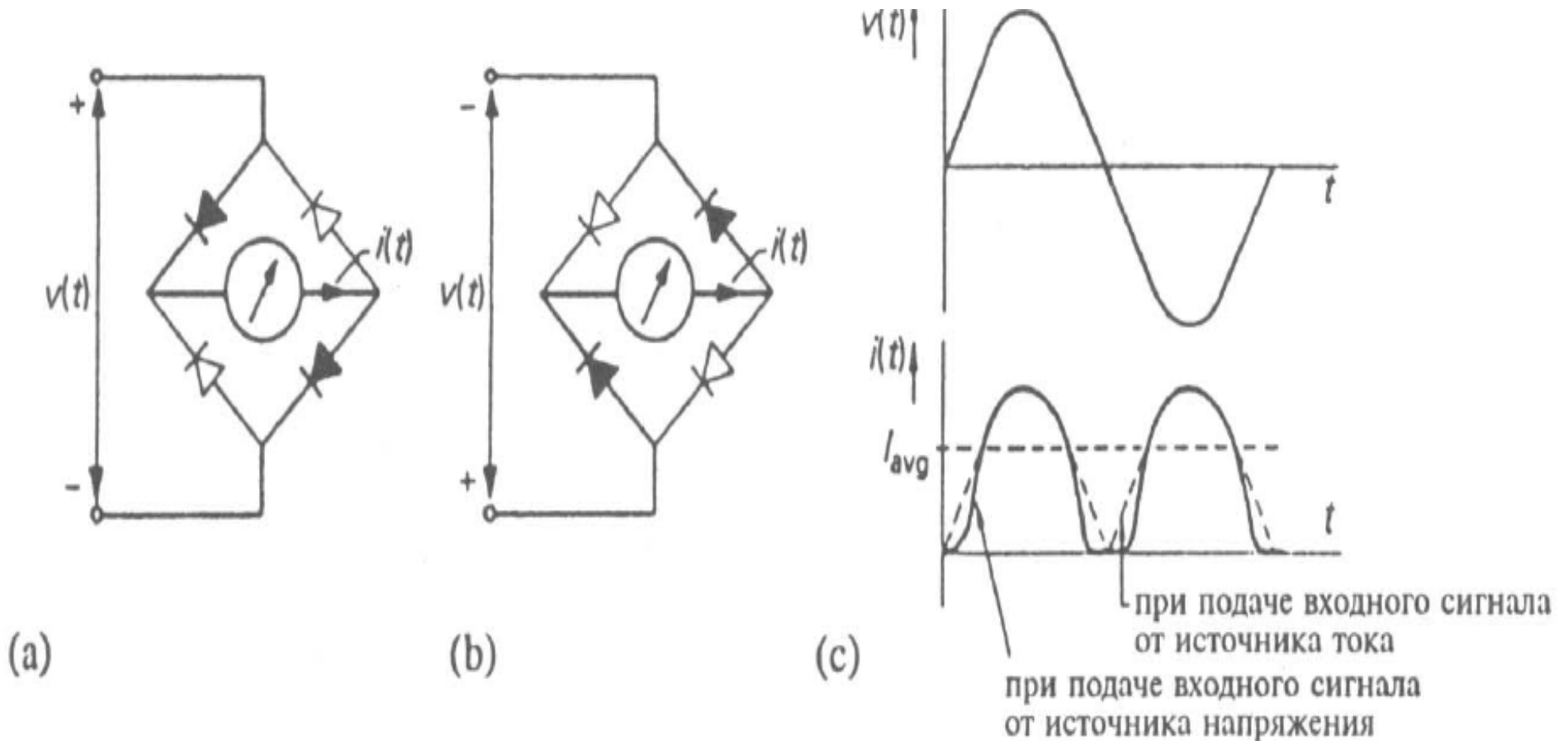
детектируя сигнал с постоянной времени $\tau \gg \omega_r^{-1}$, получим на выходе сигнал, пропорциональный $1/2 u_i u_r$. Как мы видим, для правильной работы синхронного детектора такого типа необходимо, чтобы напряжение опорного сигнала было стабильным и чтобы характерное время изменения амплитуды измеряемого сигнала сильно превышало τ . Фазу опорного сигнала можно вращать, исследуя поворот фазы измеряемым объектом. Более того, синхронные усилители являются зачастую двухканальными регистрируя сигналы двух фаз, сдвинутых на 90° .

Нелинейная обработка сигнала.

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

Нелинейная обработка сигнала.

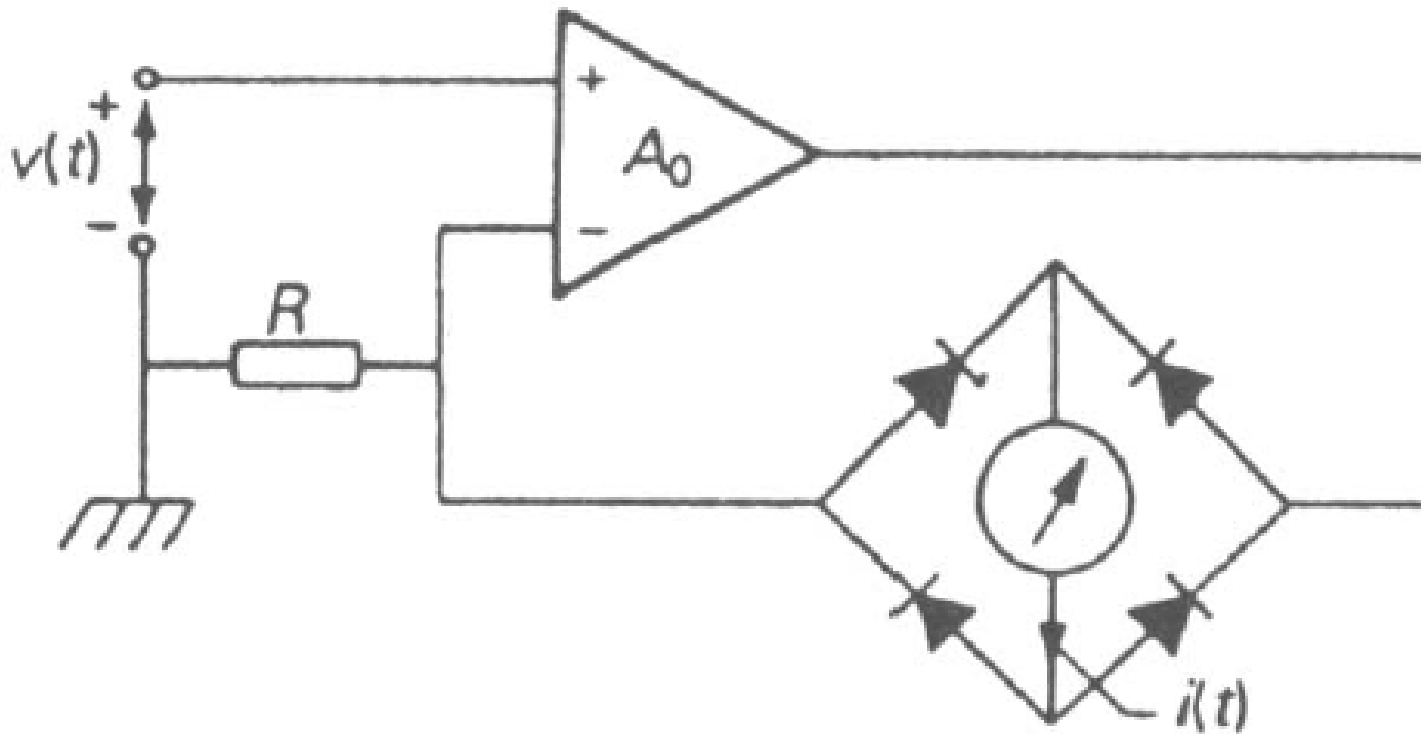
Детекторы среднего значения. Когда говорят о среднем значении переменного напряжения, имеют в виду среднее значение его модуля. Реализуют подобные детекторы в виде диодного моста, показанного на рис.



Нелинейная обработка сигнала.

Детекторы среднего значения.

при заданном напряжении, детектор среднего значения имеет погрешность, связанную с искажением формы сигнала. Чтобы устранить этот недостаток, достаточно включить диодный мостик в цепь обратной связи операционного усилителя так, как это показано на Рис

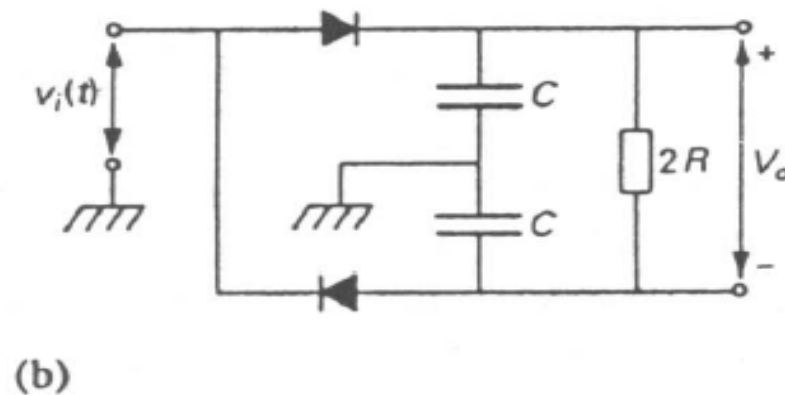
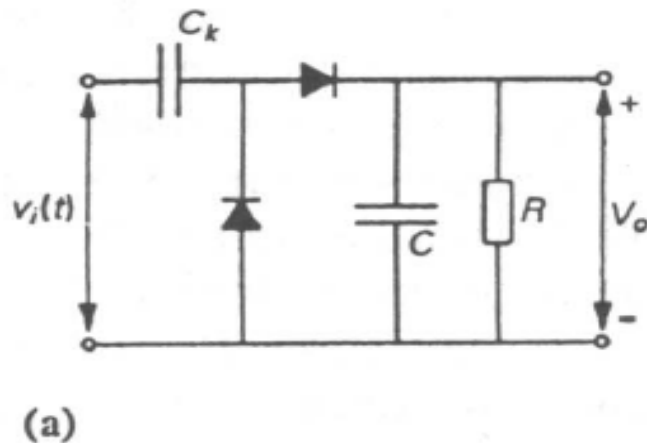


Другими словами, с помощью ОУ мы перешли из режима заданного напряжения в режим заданного тока и улучшили детекторную характеристику.

Нелинейная обработка сигнала.

Пиковые детекторы.

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



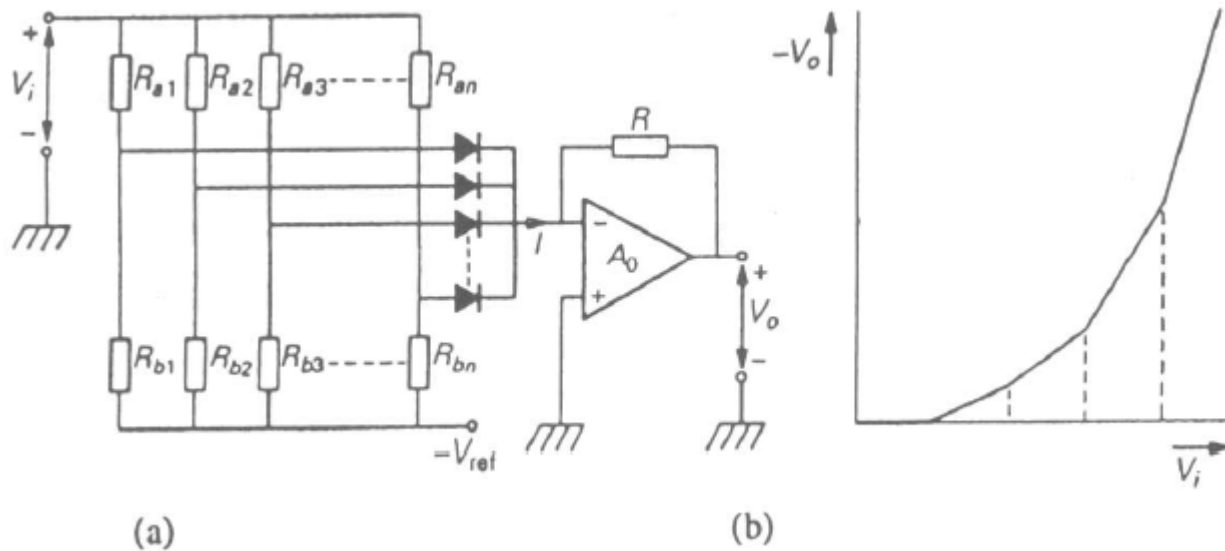
На Рис. а показан пиковый детектор на одну полярность сигнала. Неудобством детекторов такого типа является непропорциональность выходного сигнала пиковому значению входного напряжения при малых напряжениях

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

Нелинейная обработка сигнала.

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.



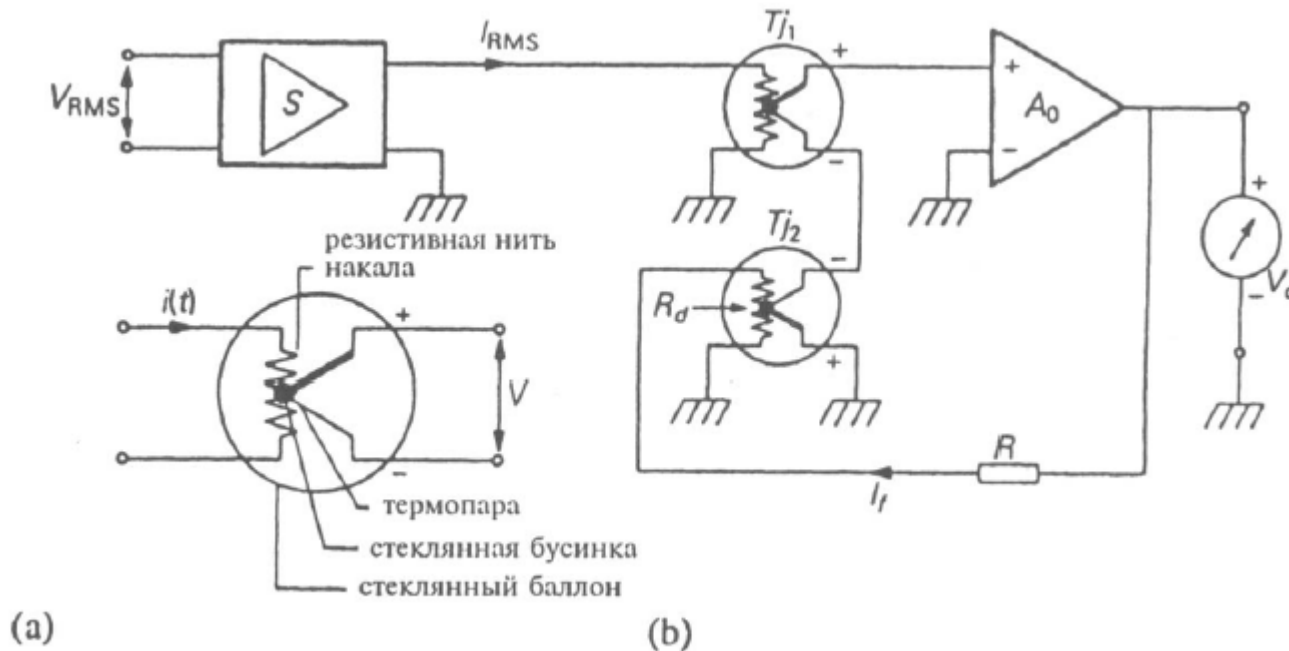
Входное напряжение V_i подается одновременно на несколько параллельных ветвей делителя, образованного сопротивлениями R_{aj} , R_{bj} . Когда напряжение на входе одного из диодов становится положительным, т.е. V_i превышает $V_{ref} R_{aj}/R_{bj}$, соответствующий диод дает вклад в общий ток и в выходное напряжение.

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

Нелинейная обработка сигнала.

Детекторы среднеквадратичного значения.

Альтернативный метод измерения среднеквадратичного значения состоит в преобразовании измеряемого сигнала в тепловую энергию и измерении, по сути, выделяемой мощности. Соответствующий преобразователь показан на Рис.



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.

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.

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

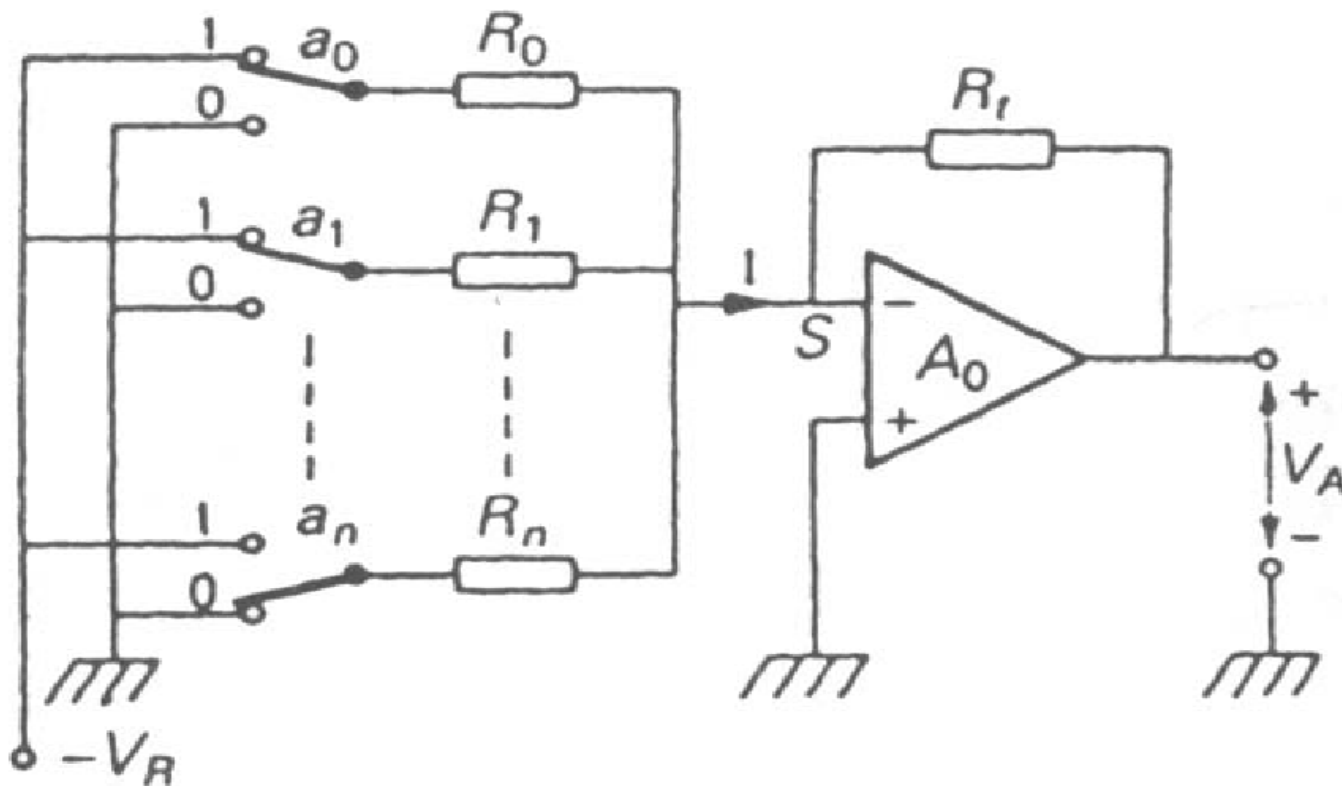
Нам требуется построить напряжение $V = V_0 \sum a_i 2^i$.

Цифро – аналоговое преобразование.

Сопротивления R_i должны быть подобраны таким образом, что $R_i = 2 R_{i+1}$. Поскольку Оу работает в режиме конвертера ток- напряжение, то напряжение на выходе равно

$$V_A = (V_R/R) * R_t * \Sigma a_i 2^i$$

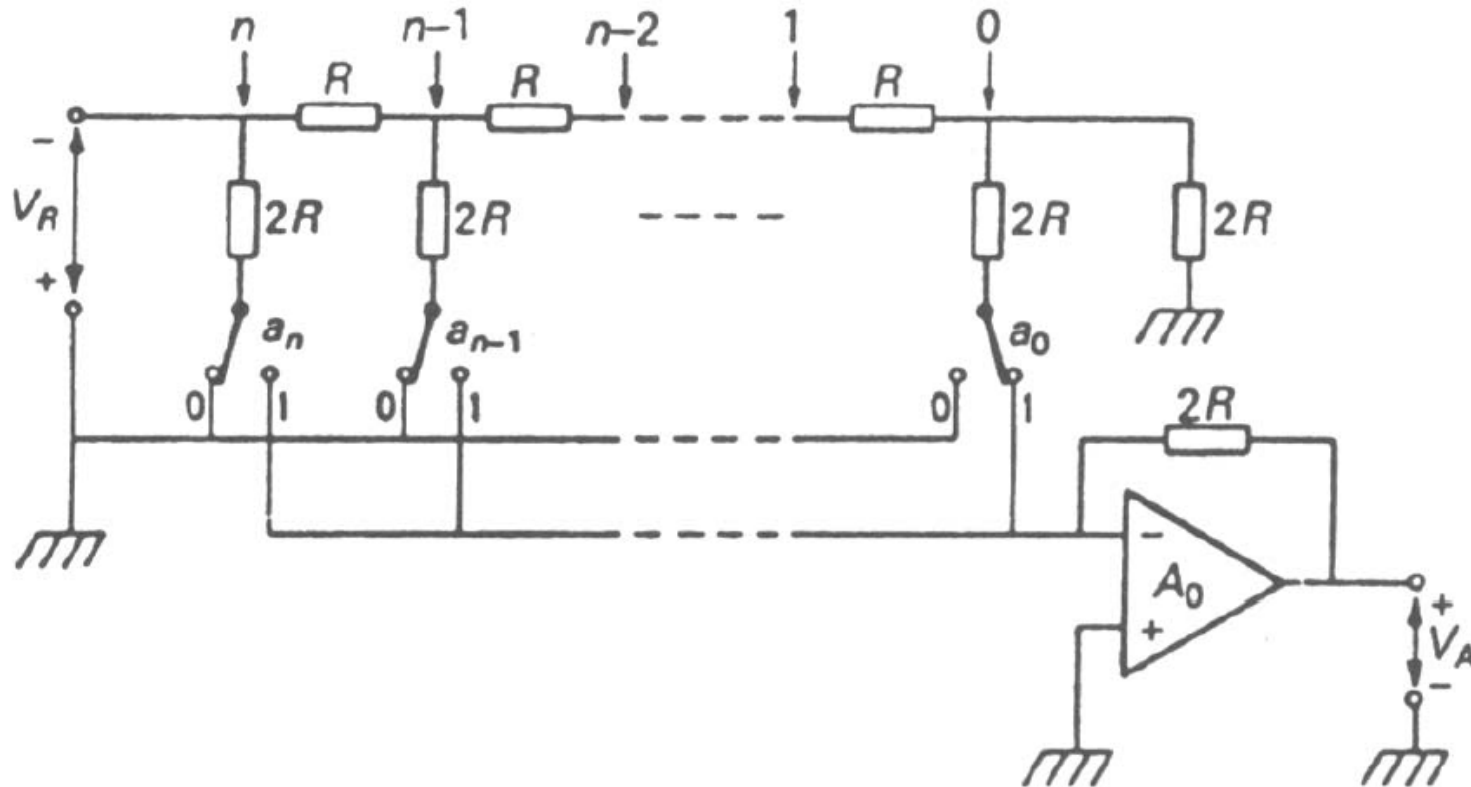
Например, для реализации преобразования цифра-аналог с точностью в три знака, можно использовать $R_0 = 1 \text{ Мом}$, $R_{10} = R_0/1024$, $R_t = 1 \text{ Ком}$.



Цифро – аналоговое преобразование.

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

$$V_R/2^{n-k+1}, \text{ а выходное напряжение } V_A = V_R/2^n * \sum a_i 2^i.$$



Аналогово-цифровые преобразователи.

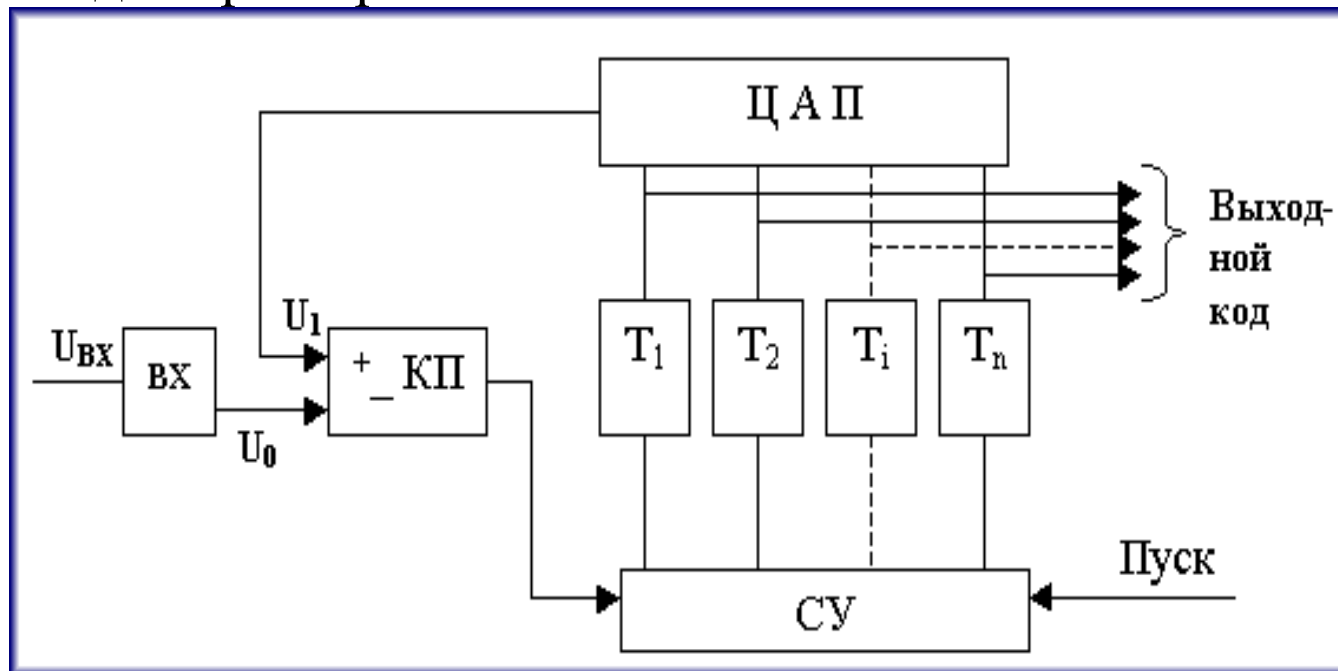
Преобразование, которое следует выполнить, выглядит следующим образом

$$\lfloor V_A / V_0 \rfloor + Q = \sum a_i 2^i,$$

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.

Аналогово-цифровые преобразователи.

АЦП последовательного приближения (АЦПП).. Входной аналоговый сигнал $U_{вх}$ перед началом преобразования запоминается схемой выборки – хранения ВХ. 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.



Аналогово-цифровые преобразователи.

АЦП последовательного приближения (АЦПП). Погрешность АЦПП определяется неточностью ЦАП, зоной нечувствительности и смещением нуля компаратора, а также погрешностью схемы выборки – хранения

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.

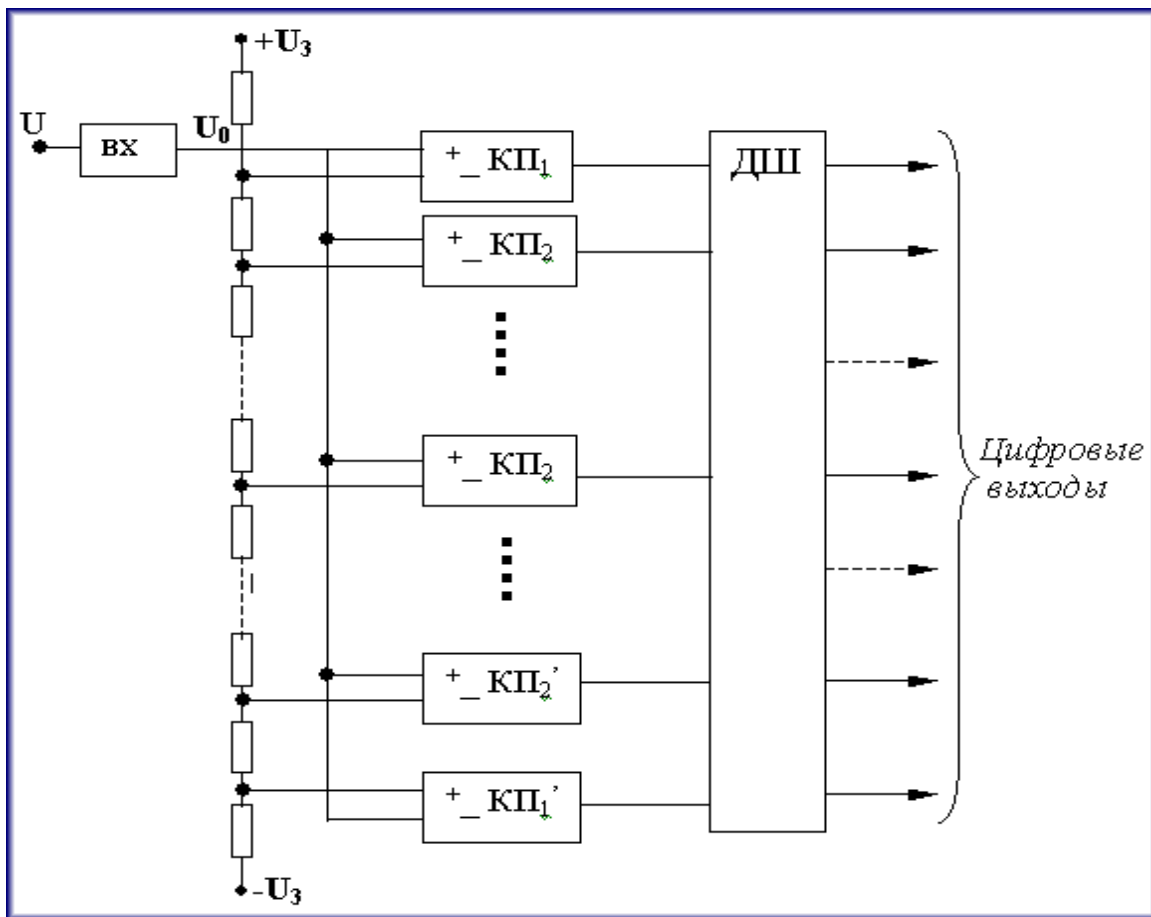
При 12 – разрядном АЦП и использовании быстродействующего ЦАП с $t_{\text{у}} = 100$

нс время $t_{\text{пр}}$ близко к 1,5 мкс. В большинстве случаев $t_{\text{пр}}$ такого преобразователя

достигает 10 – 100 мкс.

Аналогово-цифровые преобразователи.

АЦП параллельного типа (АЦПШ). 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.



Обмен информацией между отдельными приборами и/или компьютером.

Для обмена данными между отдельными приборами, входящими в измерительную установку, используется интерфейсный канал в стандарте IEEE-488.

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.

Обмен информацией между отдельными приборами и/или компьютером.

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).

Шина квитирования

Шина управления.

Обмен информацией между отдельными приборами и/или компьютером.

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».

Обмен информацией между отдельными приборами и/или компьютером.

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.

Обмен информацией между отдельными приборами и/или компьютером.

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

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.

Обмен информацией между отдельными приборами и/или компьютером.

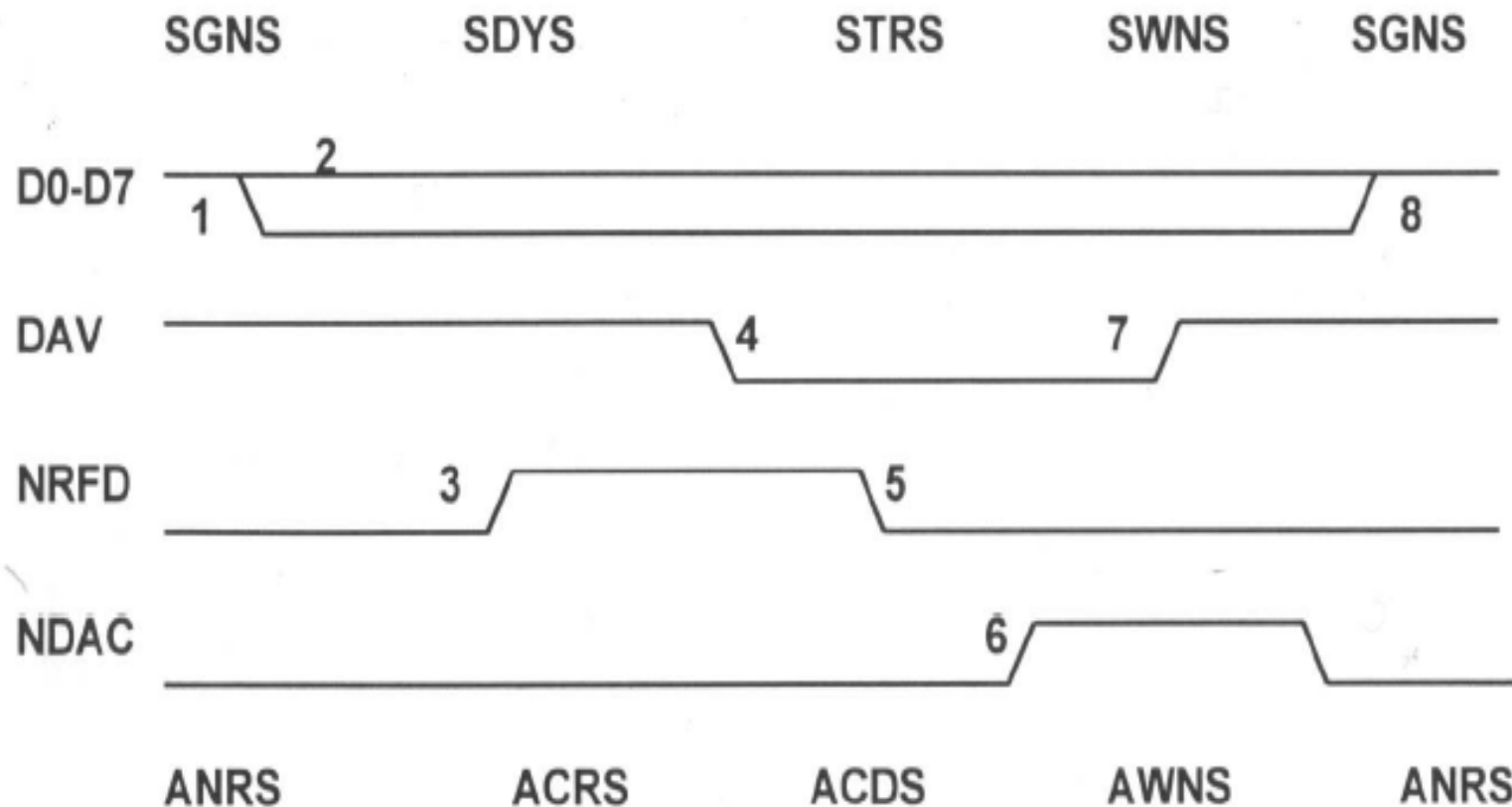
Низкое значение напряжения на линии соответствует логической единице («истина»), напряжение +5В – нулю («ложь»).

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)**.

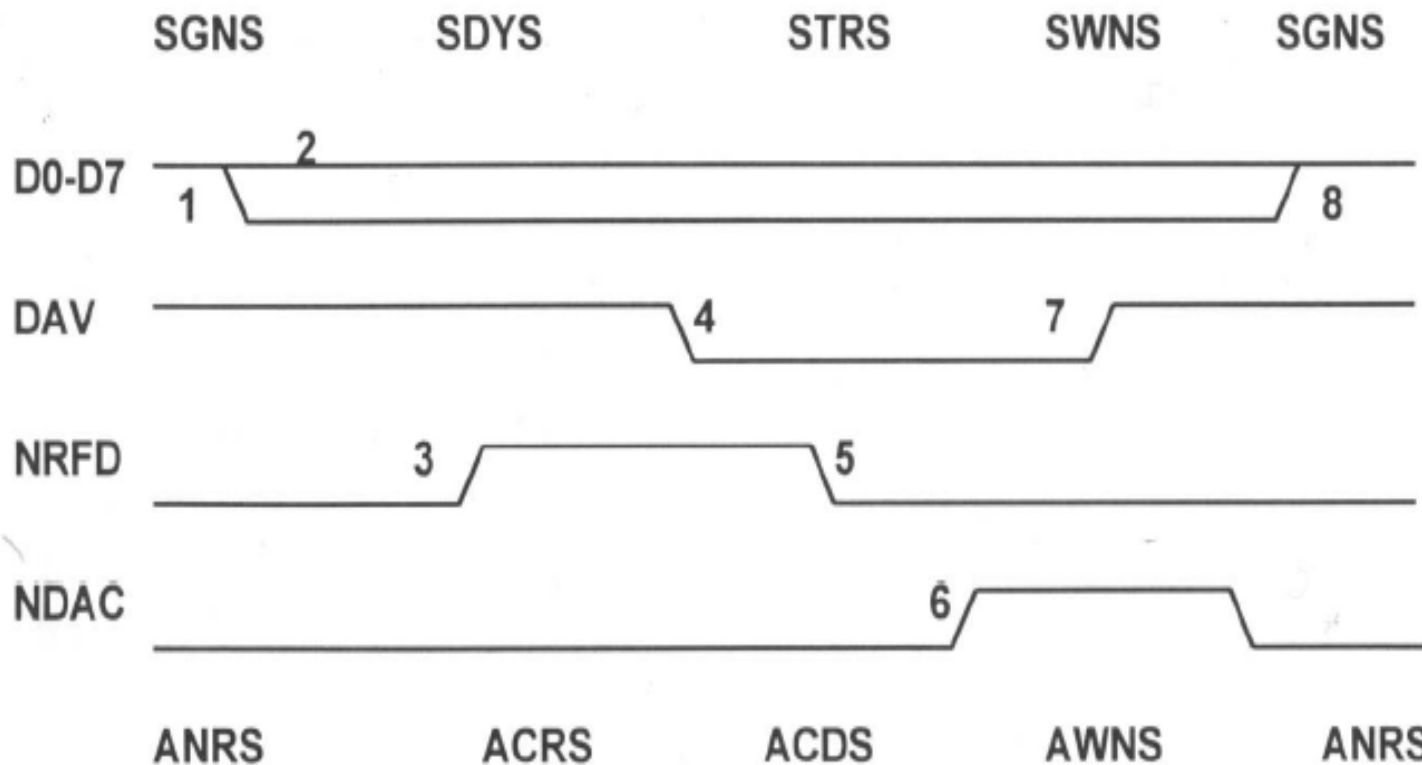
Обмен информацией между отдельными приборами и/или компьютером.

Временная диаграмма квитирования показана на рис. Верхняя диаграмма соответствует состоянию шины DIO.



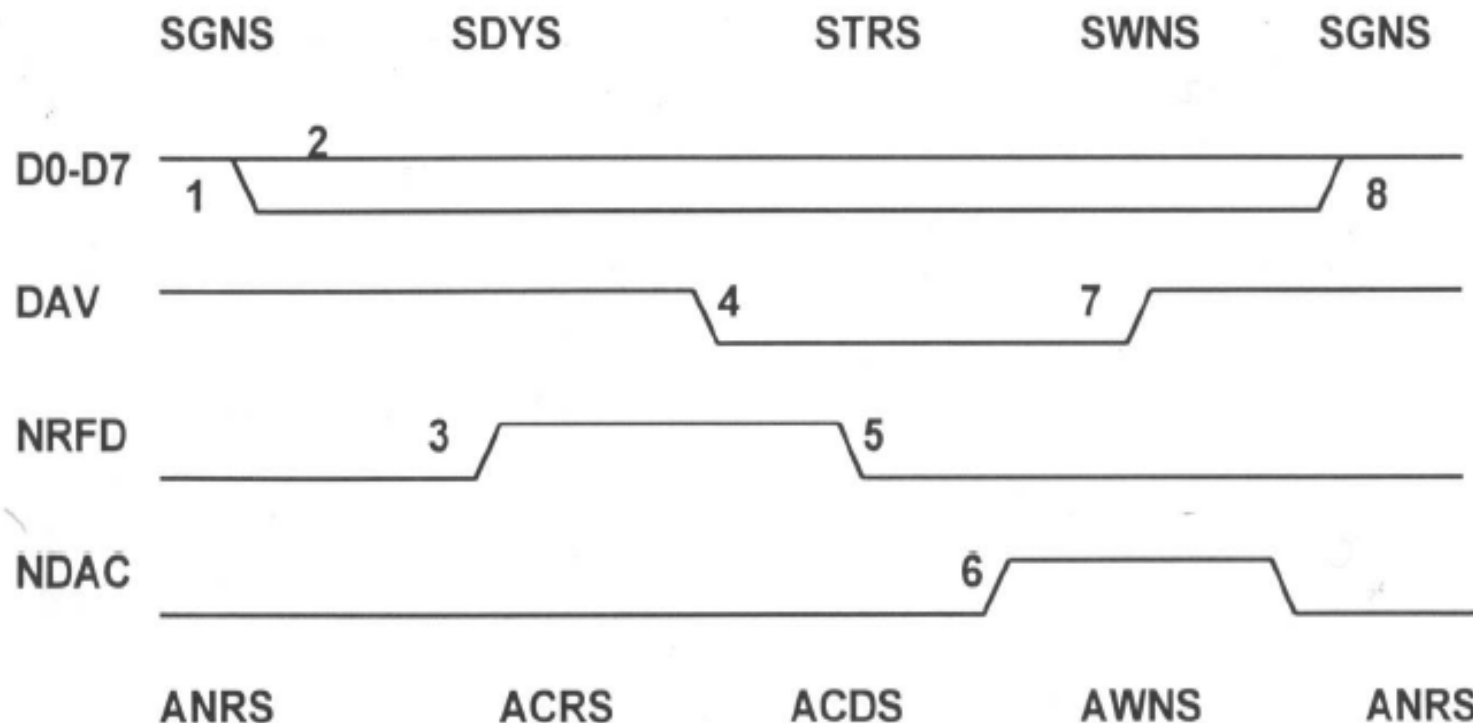
Обмен информацией между отдельными приборами и/или компьютером.

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».



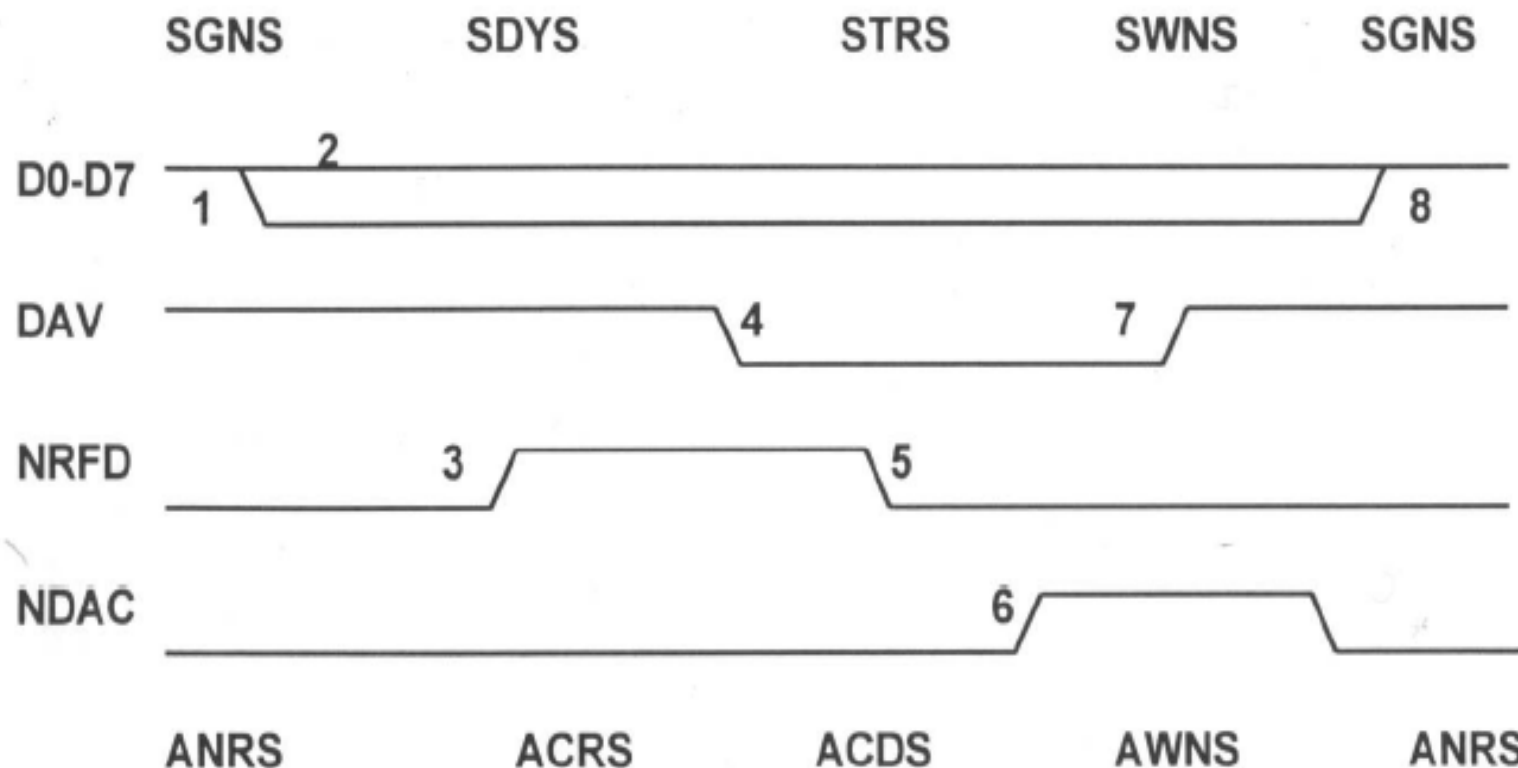
Обмен информацией между отдельными приборами и/или компьютером.

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.



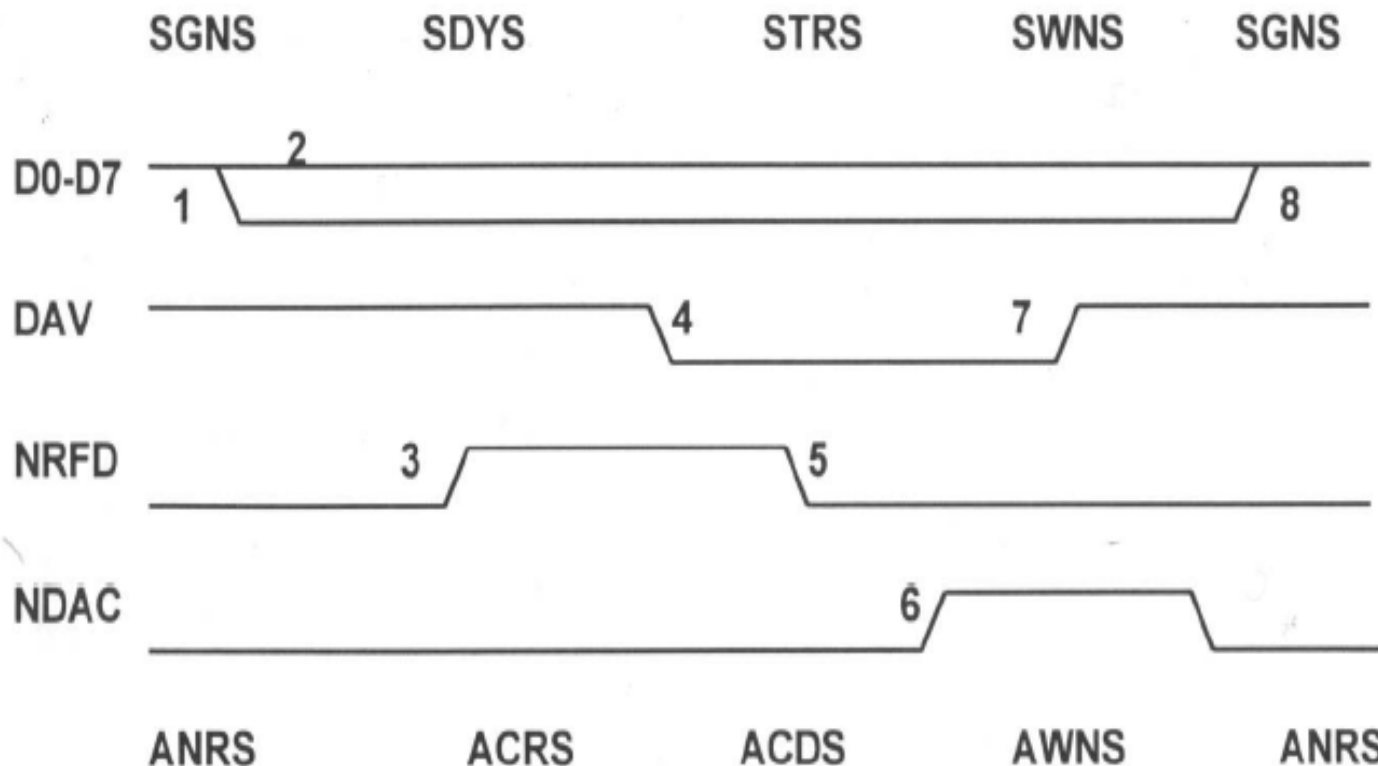
Обмен информацией между отдельными приборами и/или компьютером.

3. Последний (самый медленный) из приемников переключает линию «не готов к приему данных» в состояние «ложь». Приемники в состоянии «приемник готов».



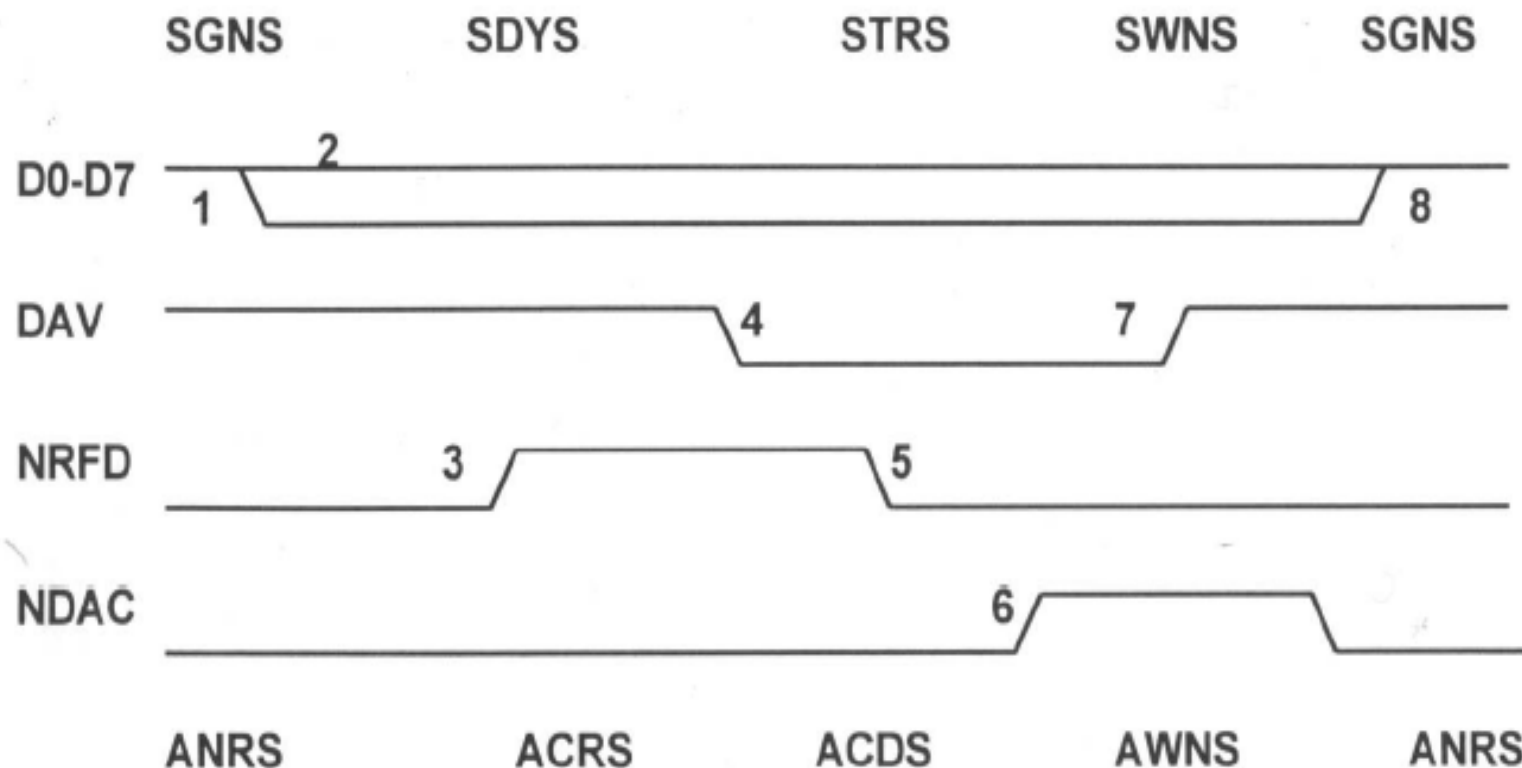
Обмен информацией между отдельными приборами и/или компьютером.

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».



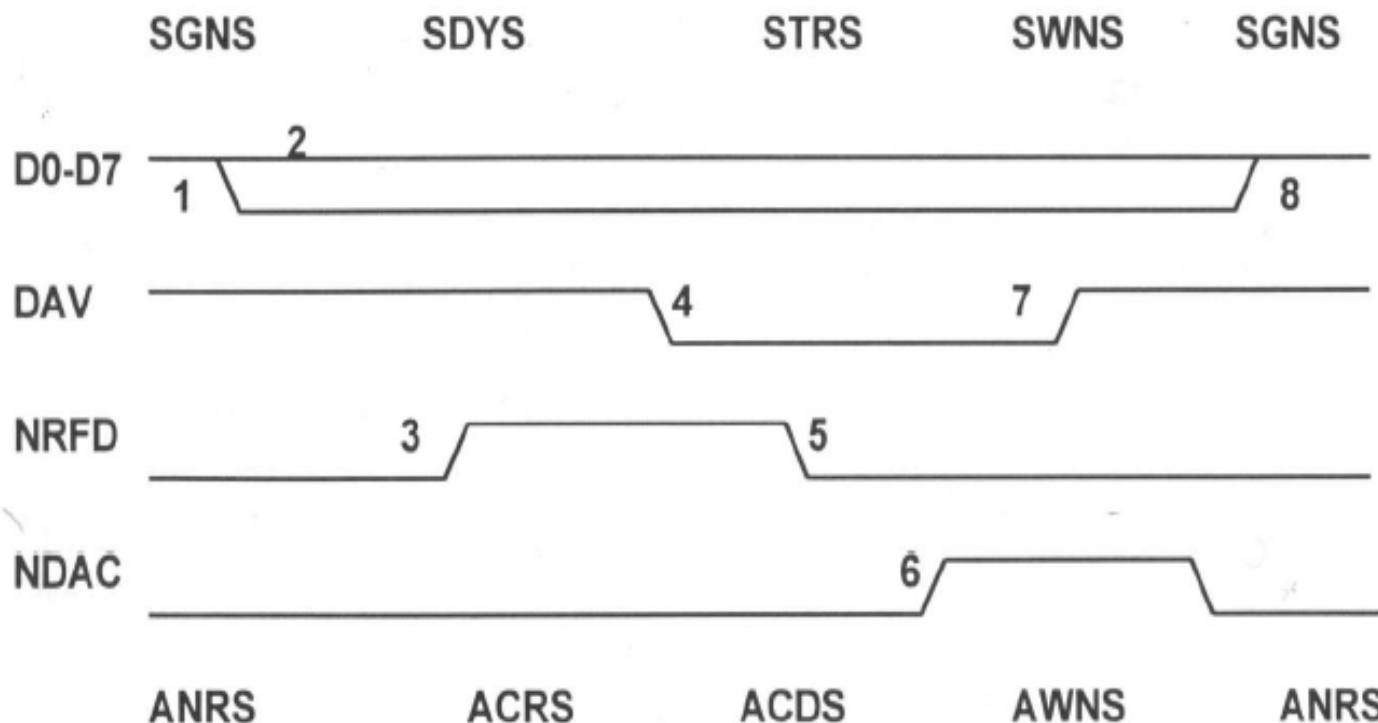
Обмен информацией между отдельными приборами и/или компьютером.

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.



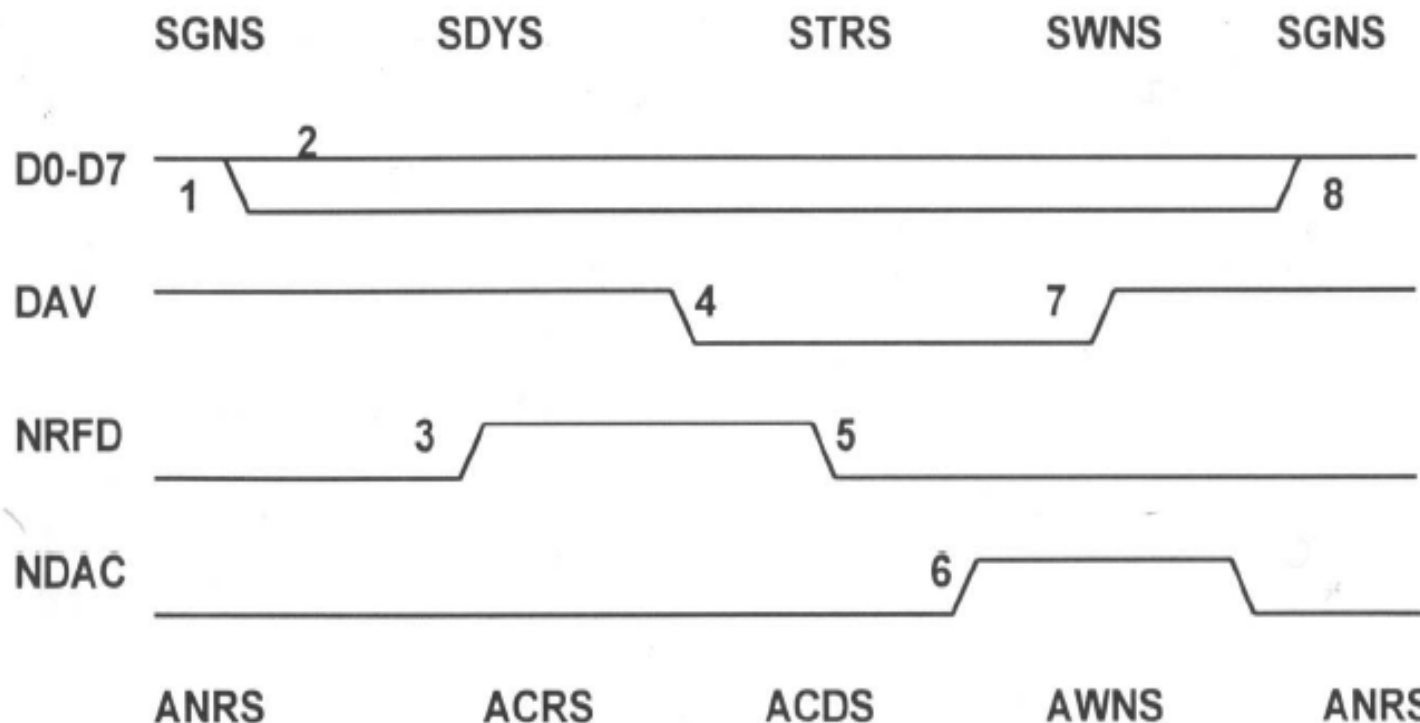
Обмен информацией между отдельными приборами и/или компьютером.

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».



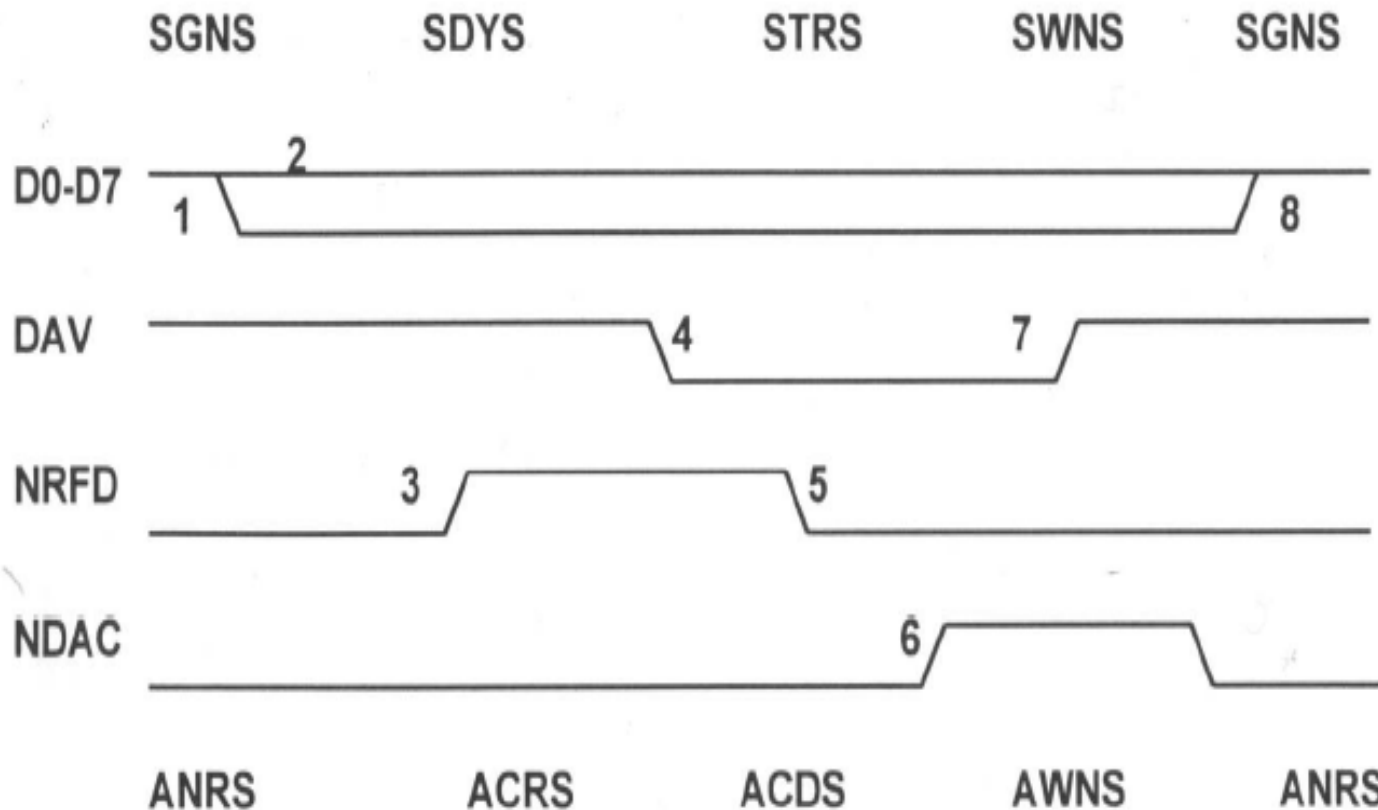
Обмен информацией между отдельными приборами и/или компьютером.

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».



Обмен информацией между отдельными приборами и/или компьютером.

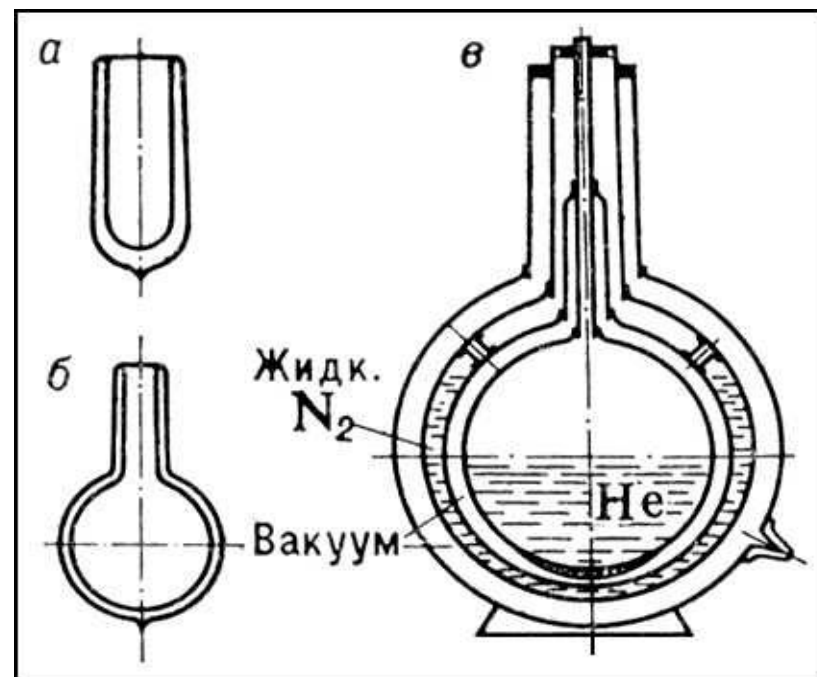
8. Источник сигнала убирает сигнал и система возвращается в исходное состояние.



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.

Напомним, что испарившийся литр жидкости дает примерно 0.7м^3 газа при атмосферном давлении.



Криостаты.

Некоторые низкотемпературные измерения можно проводить непосредственно в транспортных сосудах Дьюара. К таким измерениям относятся измерения при азотной температуре и температуре в 4.2 К.

Тем не менее, большая часть низкотемпературных измерений проводится в специальных криостатах.

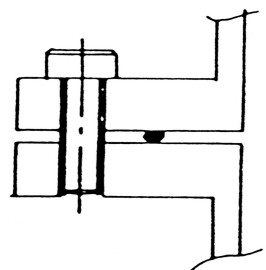
Возникают два естественных вопроса. Во-первых, как жидкий гелий без больших потерь переместить из транспортного сосуда в криостат. Во-вторых, как и до какого предела можно понизить температуру гелия в криостате.

Прямой откачкой паров жидкого гелия температуру в криостате можно понизить. **Минимальная температура**, достигаемая таким способом практически, составляет **1.3 К**. В большинстве крупных криостатов она еще выше (1.6 К). Причина состоит в том, что при температуре примерно 2.15К (давление насыщенных паров около 36 мм рт.ст.) гелий переходит в сверхтекучее состояние.

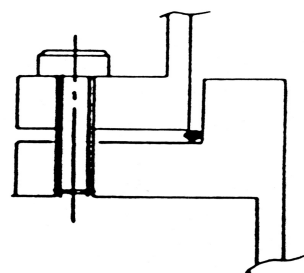
Вакуумные уплотнения.

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.

Разборные вакуумноплотные уплотнения используются и внутри криостатов, и даже в сверхтекучей жидкости. Применяются при этом чаще всего уплотнения из мягкого и пластичного металла – индия.



(a)



(b)



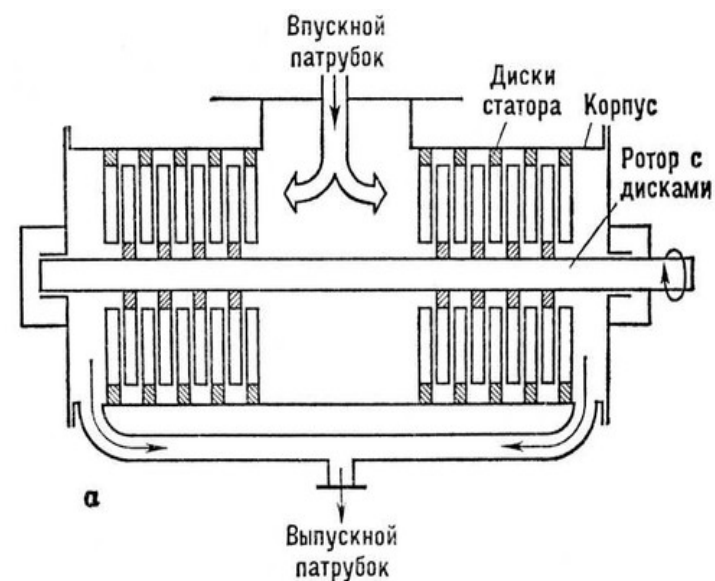
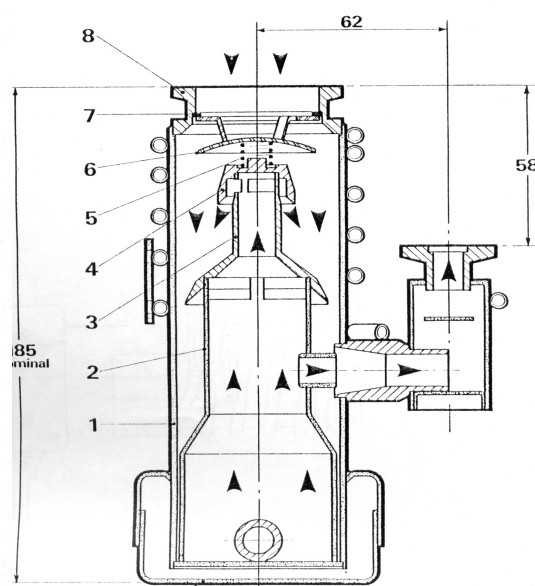
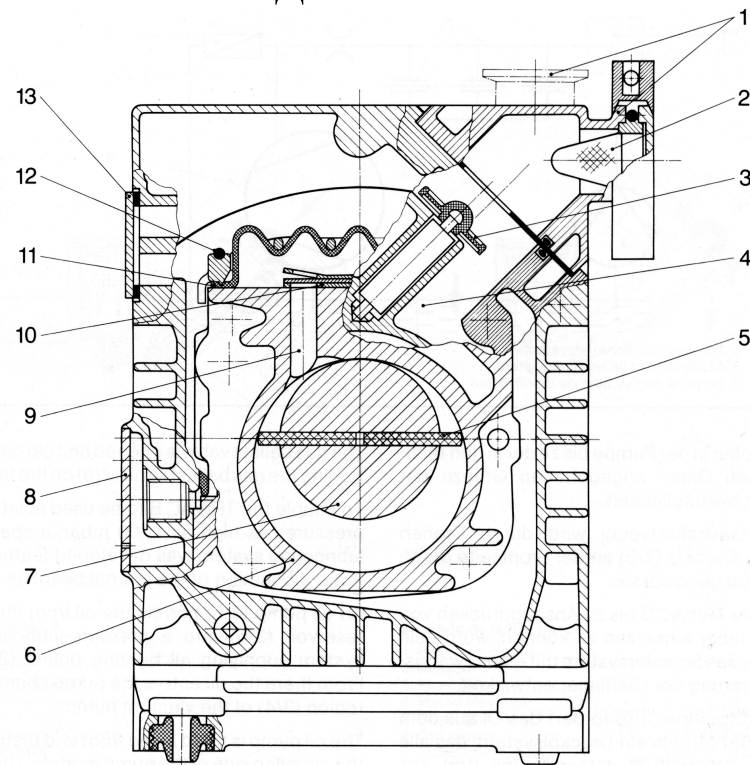
(c)

Насосы.

Для удаления газа и создания не очень хорошего вакуума (остаточное давление 10^{-2} - 10^{-3} мм рт. ст.) используются форвакуумные насосы.

Более высокий вакуум (до 10^{-6} мм рт.ст.) может быть получен, например, с помощью диффузионных паромасляных насосов.

Более современной версией высоковакуумных насосов являются насосы турбомолекулярные. Вакуум, получаемый с помощью турбомолекулярных насосов достигает 10^{-10} мм рт. ст..



Магнитное поле.

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).

Магнитное поле.

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.

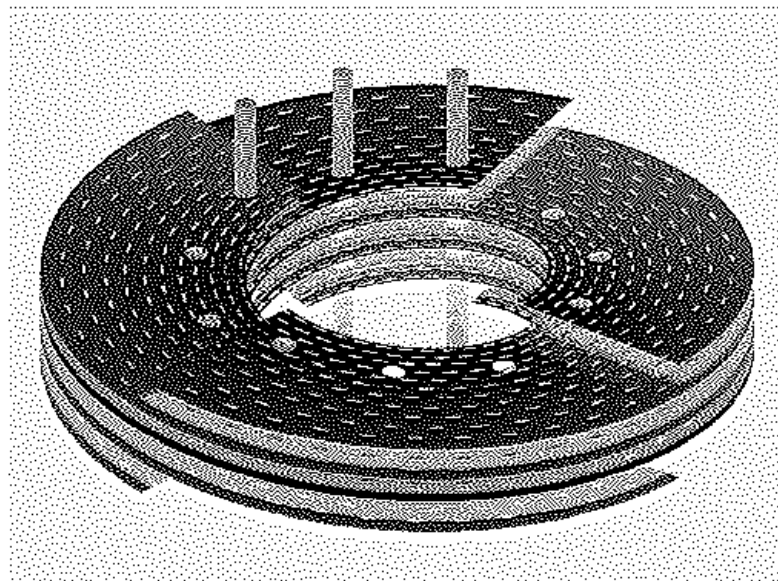
Выделение энергии вообще может быть исключено, если соленоид работает в короткозамкнутом режиме. Для его реализации соленоид снабжают «сверхпроводящим ключом»

Максимальное поле, получаемое в сверхпроводящем соленоиде, ограничивается тем обстоятельством, что это же поле разрушает сверхпроводимость при достижении определенного значения.

Сплавы обладают критическими полями в десятки тесла, например, NbZr -9Т, NbTi -12Т, Nb₃Sn -27 Т . Сверхпроводящие соленоиды при максимальном поле потребляют ток от 100 до 400 А. Обычно соленоиды на поле выше 8Т делают из нескольких секций

Магнитное поле.

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



Магнитное поле.

Если биттеровский 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.

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/см². Зная оптимальную площадь охлаждения соленоида, можно подсчитать максимально снимаемую мощность. Подсчеты дают (при $d = 3$ см) примерно 10 МВт и поле около 20Т.

Стационарные поля до 40Т получают в гибридных соленоидах, у которых внешний соленоид - сверхпроводящий, а внутренний - водоохлаждаемый нормальный.

Магнитное поле.

Идея о том, что сократив время протекания тока по соленоиду, можно, во-первых, сильно уменьшить энергозатраты, а во-вторых, увеличить максимальнодостижимое магнитное поле, используется в **импульсных соленоидах**. 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.

Магнитное поле.

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.

Магнитное поле.

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.

Магнитное поле.

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.

Лазеры.

Чрезвычайно важным лабораторным устройством в последние десятилетия стали источники света высокого качества – лазеры.

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.

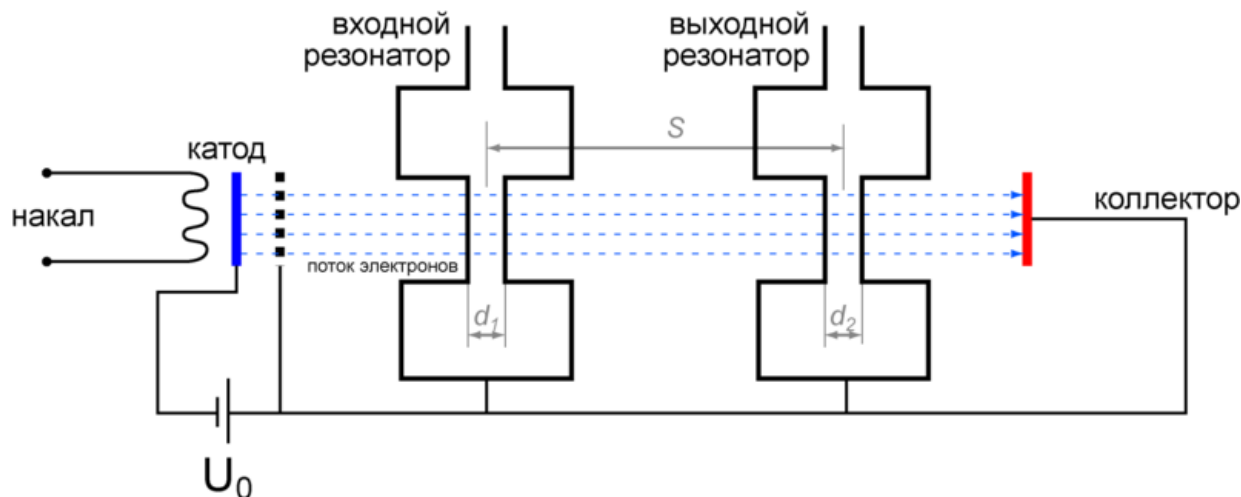
Луч лазера может быть **непрерывным**, с постоянной амплитудой, или **импульсным**, достигающим экстремально больших пиковых мощностей. Во многих конструкциях рабочий элемент лазера используется в качестве **оптического усилителя** для излучения от другого источника. Усиленный сигнал очень точно совпадает с исходным по **длине волны, фазе и поляризации**.

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, клистрономы и лампами обратной волны), либо специальными полупроводниковыми диодами (диод Гана).

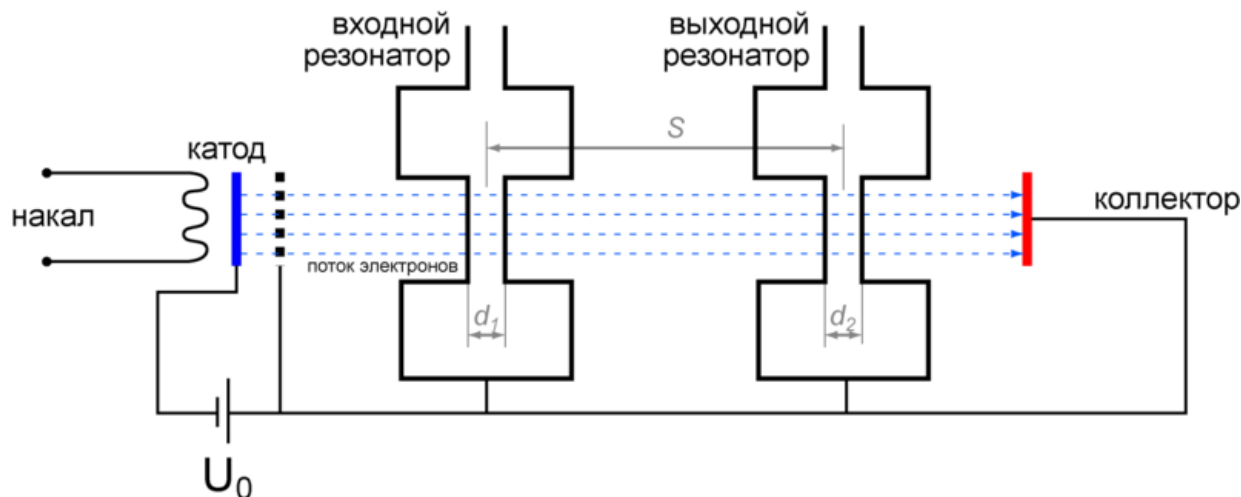
Техника сверхвысоких частот.

Рассмотрим в качестве примера работу простейшего двухрезонаторного клистрона. Такой электровакуумный прибор обладает **двумя резонаторами: входным и выходным**. 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.



Техника сверхвысоких частот.

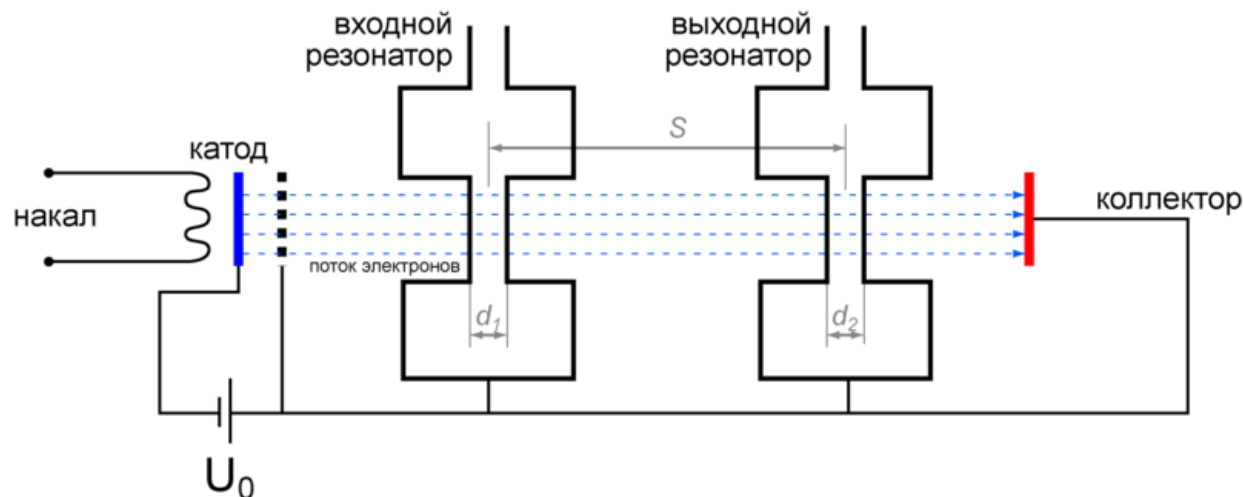
В узком сеточном зазоре входного резонатора, имеется продольное СВЧ поле. Поле периодически ускоряет и замедляет электроны, модулируя электронный поток по скорости. Двигаясь далее в пространстве дрейфа, электроны постепенно образуют сгустки за счёт того, что быстрые электроны догоняют медленные. Модулированный по плотности электронный поток попадает во второй резонатор и создает в нем наведенное поле той же частоты, что и частота входного модулирующего поля.



Техника сверхвысоких частот.

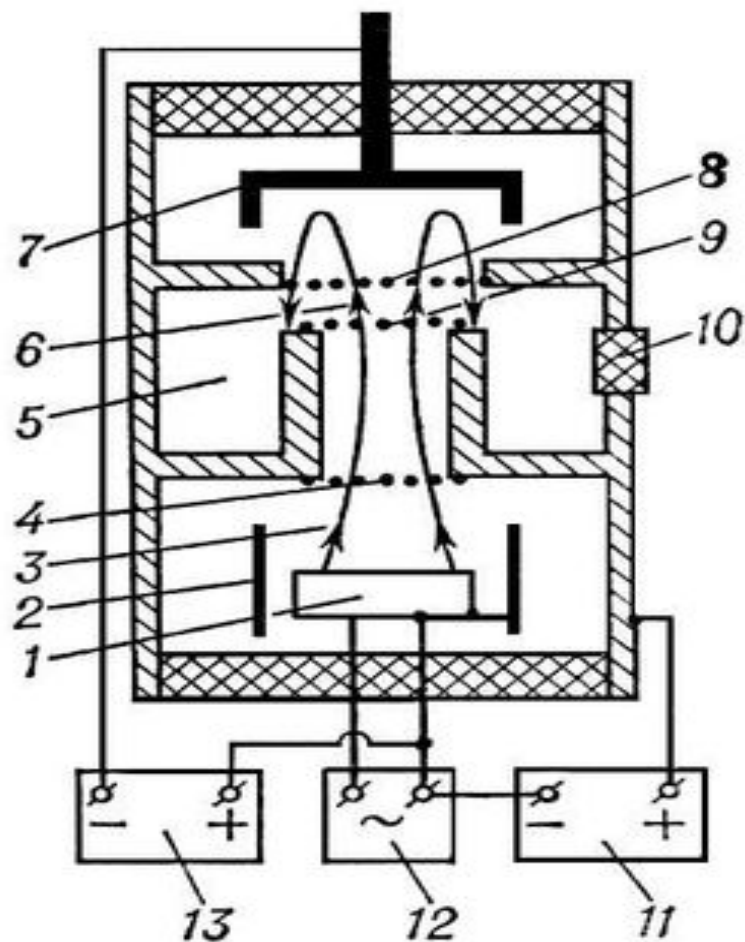
Высокочастотное электрическое поле, появившееся между сетками резонатора, взаимодействует с потоком электронов. Параметры клистрона подбираются таким образом, чтобы электрическое поле второго резонатора тормозило сгустки электронной плотности и ускоряло электроны в её разряжениях. В результате, в среднем 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.



Техника сверхвысоких частот.

В отражательном клистроне используется один резонатор, через который электронный поток проходит дважды, отражаясь от специального электрода — отражателя

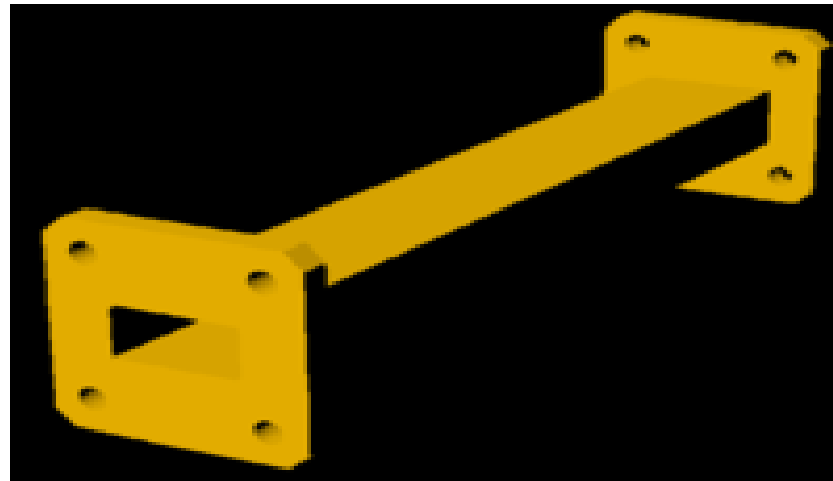


1-катод, 2- коллиматор электронов, 3 – электронный пучок, 4 – ускоряющая сетка, 5 – резонатор, 6 – область взаимодействия, 7 – отражающий электрод, 8,9 -сетки,10 - выход СВЧ мощности, 11, 12, 13 – источники питания.

Техника сверхвысоких частот.

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.



Техника сверхвысоких частот.

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.