

## Теория ошибок.

### Источники ошибок.

#### Взаимодействие объекта измерения и измерительной системой

Для того, чтобы уменьшить ошибки измерений необходимо иметь представление об их источниках.



Рис. 1

Согласно структурной схеме измерений, состоящей из объекта измерения, измерительной системы и наблюдателя, помещенных в определенную окружающую среду, объект и система взаимодействуют друг с другом: объект влияет на измерительную систему и, *наоборот*, система оказывает воздействие на объект. Влияние объекта на систему желательно. Посредством его осуществляется перенос измерительной информации. Вторая из указанных составляющих взаимодействия нежелательна. Влияние на объект может быть такого рода и оказываться в такой степени что измеряемая величина заметно изменяется. В этом состоит *ошибка обратного влияния*. Необходимо попытаться согласовать входной каскад измерительной системы (заштрихованный на рис. 2.17) с объектом измерения таким образом, чтобы свести ошибку обратного влияния к минимуму.

Имеются различные типы согласования: анэнергетическое, энергетическое, по шуму и т.д.

Цель *энергетического* согласования – *извлечение максимально доступной мощности из измеряемого объекта*, чтобы усиление мощности в измерительной системе сделать возможно меньшим. Этот тип согласования особенно важен для пассивных измерительных систем – систем, внутри которых не происходит усиления мощности. Пример – достижение равенства импедансов изм.объекта и изм. системы в длинной линии. При выполнении данного условия вся мощность от источника излучения поглощается нагрузкой и отраженный от нагрузки сигнал отсутствует.

**Цель анэнергетического согласования – сведение к минимуму передачи энергии между объектом измерения и изм. системой.**

Рис. 2 иллюстрирует принцип анэнергетического согласования для измерительной системы типа вольтметра. Когда подключается измерительная система напряжение на клеммах объекта измерения уменьшается (формула). Следовательно, необходимо, что бы входное сопротивление измерительной системы было намного больше внутреннего сопротивления объекта измерения. В этом случае мощность потребляемая изм. системой будет минимальной. Кроме того эта мощность будет полностью рассеиваться на сопротивлении  $R_i$ .

$$V_i = V_0 \frac{R_i}{R_0 + R_i}$$

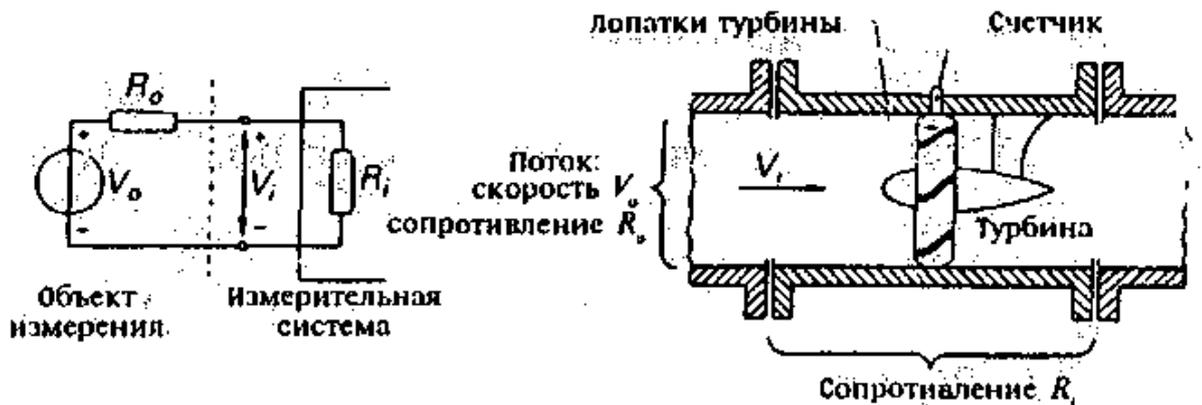


Рис. 2

Аналогия для измерения воздушного потока. Затухание  $R_i$  у турбины должно быть возможно большим.

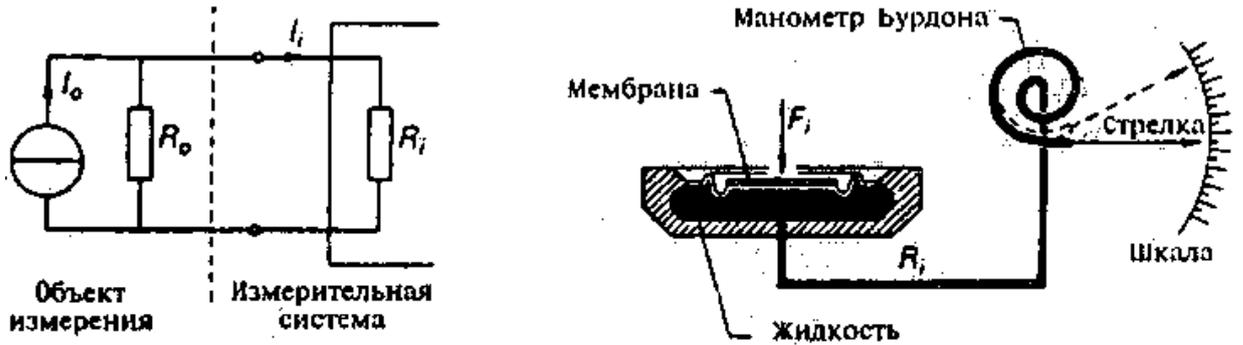
**Пример анэнергетического согласования I-величины (Рис.3).**

Показания измерительной системы пропорциональны току:

$I_i = I_0 \frac{R_0}{R_0 + R_i}$ , следовательно, для точного измерения необходимо чтобы

входное сопротивление измерительной системы было значительно меньше чем внутреннее сопротивление объекта измерения. Тогда мощность от объекта почти не потребляется.

Аналогия – мембранный измеритель силы. Объект измерения создает силу, которая сжимает пружину. Хорошее анэнергетическое согласование будет тогда, когда входной импеданс изм. системы много меньше чем внутренний импеданс объекта измерения.



Согласование по шуму. Во всех физических системах в которых происходит преобразование или рассеяние энергии, имеются случайные флуктуирующие сигналы. Поскольку невозможно построить физическую систему без потерь приводимые ниже рассуждения справедливы ко всем физическим системам. Случайные флуктуирующие сигналы, возникающие в таких системах называют шумом по аналогии с шипящим шумом при их прослушивании. Практически не существует физических систем с КПД 100 % - всегда имеются потери. Следовательно, работа любой системы при температуре выше абсолютного нуля подвержена действию шума. Обычно шум занимает широкую полосу частот (рис. 4). Шум называют «белым», если его спектр, то есть распределение по частоте, является равномерным (например, в средней части графика на рис. 4). Шум называют «розовым», когда его мощность, приходящаяся на единичную полосу частот, падает с увеличением частоты (рис. 4 слева).

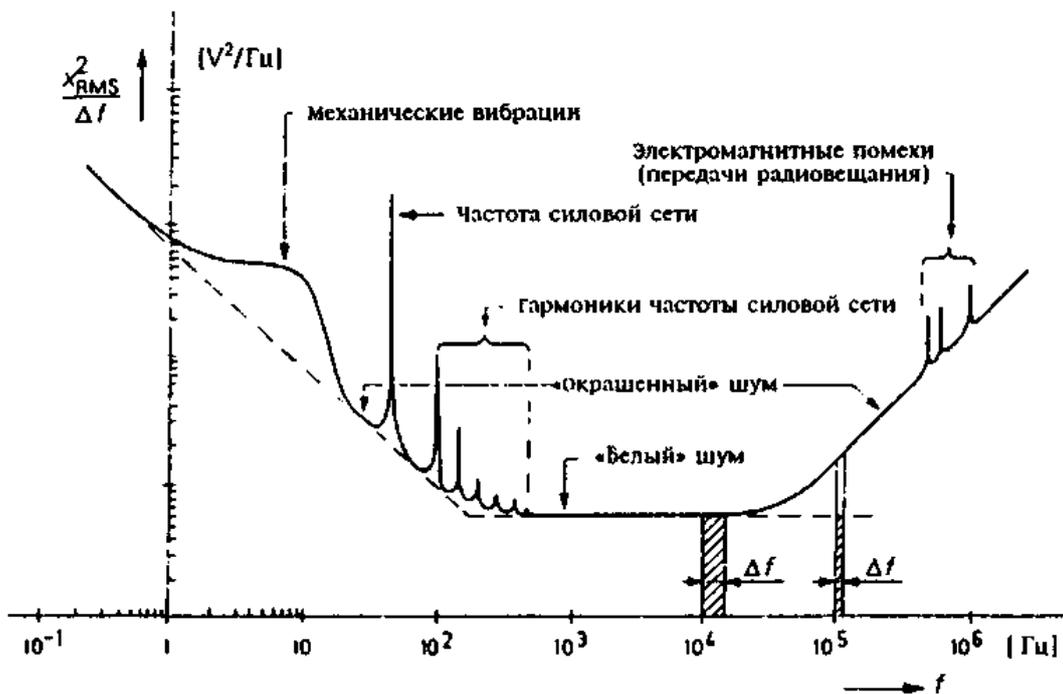


Рис. 4. Пример спектрального распределения шума и помех в реальной измерительной системе

Важный вид шума - тепловой шум, вызываемый тепловыми колебаниями носителей заряда в проводниках и броуновским движением таких частиц как атомы и молекулы. Имеется также дробовой шум, вызванный потоком дискретных частиц.

Все обобщенные резисторы шумят (обобщенные – рассеивающие энергию, в том числе и имеющие неэлектрическую природу). Идеальные катушки индуктивности и емкости не шумят, так как в них нет потерь энергии.

При каждом измерении к измеряемому сигналу добавляется шум. Но и в самом объекте изм. содержится шум.

***Целью согласования по шуму является достижение таких условий, когда измерительная система добавляет к измеряемой величине возможно меньше шума.***

Количественно величину шума можно охарактеризовать коэффициентом шума – отношением мощности сигнала к мощности шума.

Одни из способов обеспечения высокого коэффициента шума – ***обеспечение большого коэффициента усиления первого каскада*** изм. системы и тогда влияние шума последующих каскадов окажется пренебрежимо малым.

Другой путь - ***использование во входной цепи малошумящих приборов и установка оптимального режима работы этих приборов по постоянному току.***

Можно использовать включение между изм. объектом и изм. системой ***трансформатор (или эквивалент трансформатора в случае неэлектрического входа системы)***. Трансформатор, в случае малых потерь энергии на нем не является источником шумов.

### **Взаимодействие между измерительной системой и наблюдателем.**

На рис. 1 показано также взаимодействие между выходом измерительной системы и наблюдателем. Выражение «наблюдатель» употреблено здесь в широком смысле слова, включающем не только регистрацию результатов измерения человеком. Наблюдателем может быть человек, но им может быть также и машина. Например, в случае, когда результат измерения используется для управления машиной или процессом, эта машина или этот процесс как раз и являются наблюдателем. Снова, как и выше, взаимодействие измерительной системы и наблюдателя складывается из желательной и нежелательной составляющих.

Воздействие измерительной системы на наблюдателя, то есть передача наблюдателю результата работы измерительной системы, очевидно, является желательным. Обратное влияние может приводить к ошибкам, если характер воздействия наблюдателя на измерительную систему и степень этого воздействия оказываются такими, что результат измерения меняется. Вот примеры ошибок такого рода: считывание показаний стрелочного прибора под углом, а не по направлению, перпендикулярному к шкале прибора, в

результате чего возникает ошибка параллакса; нагружающее действие несогласованного (неодушевленного) наблюдателя на выходные каскады измерительной системы. Чтобы уменьшить *ошибки обратного влияния*, необходимо осуществить согласование выходного каскада измерительной системы с наблюдателем.

*Третьим источником ошибок измерения являются (несовершенные) "характеристики самой измерительной системы"*. Если характеристики системы не соответствуют требованиям данного измерения, то они приводят к тому, что измерения оказываются неправильными. Ошибки измерения такого рода (*систематические ошибки*) необходимо минимизировать.

Основные характеристики средств измерений влияющие на точность:

- **чувствительность.** Чувствительность часто зависит от частоты. Чувствительность невозможно увеличивать до бесконечности, так как мы столкнемся с
- **порогом чувствительности.** Наименьший входной сигнал, который может быть обнаружен с заданной вероятностью. Причина невозможности измерения малых сигналов – шум носителей энергии, наводки, механические колебания, трения и люфт механических элементов и т.д.
- **чувствительность к форме сигнала.**
- **разрешающая способность.** Размер шага, на который настроена измерительная система. Наименьший интервал значения измеряемой величины, на котором средство измерения способно зарегистрировать изменение входной величины.
- **нелинейность входа.** Различают статические (с частотонезависимой чувствительностью) и динамические измерительные системы.
- **Предел измерения, динамический диапазон**
- **полоса пропускания**
- **время отклика и т.д.**

### *Помехи*

Помимо рассмотренных взаимодействий измерительная система находится в двусторонней связи с окружающей средой. Влияние окружающей среды на измерительную систему может сказаться на результате измерения, и потому оно является нежелательным и вносящим помехи.

Окружающая среда влияет на измерительную систему двумя способами: аддитивно и мультипликативно. В случае *аддитивных помех* параметр  $d$ , выражающий мешающее воздействие окружающей среды, вызовет появление сигнала  $y$  на выходе измерительной системы даже тогда, когда **входной сигнал  $x$  отсутствует** (измеряемая величина не подана на вход). При подаче на вход измеряемого сигнала  $x$  выходной сигнал представляет собой сумму двух сигналов: обусловленных возмущающим воздействием окружающей среды  $d$  и обусловленного входным сигналом  $x$ . Мерой того, в какой степени

выходной сигнал подвержен влиянию помехи  $d$ , служит соответствующая чувствительность, а именно **чувствительность по отношению к помехе** (или **коэффициент чувствительности**)  $S_d$ :

$$S_d = \left(\frac{y}{d}\right) \text{ при } x = 0.$$

Передаточная функция может быть нелинейной, а реальные помехи часто имеют форму *приращения*  $\Delta d$  параметра  $d$ , выражающего влияние окружающей среды (как, например, в случае температуры окружающей среды или напряжения питания в системе). Поэтому более точным определением величины  $S_d$  будет следующее:  $S_d = \left(\frac{dy}{dd}\right)_{x=0}$

В случае **мультипликативного воздействия окружающей среды** помеха  $d$  сказывается на чувствительности  $S$  измерительной системы. Мерой восприимчивости измерительной системы к мультипликативным помехам служит **коэффициент помехи** (или функция мешающего воздействия)

$$C_d = \frac{1}{S} \frac{dS}{dd}.$$

*Терминология:* Обычно название чувствительности или коэффициента чувствительности определяется видом помехи.

Например: Даже в том случае, на входе нуль-детектора постоянного напряжения отсутствует входное напряжение, стрелка измерительного прибора может слегка отклоняться. Величина этого отклонения зависит, в частности, от напряжения питания. Поэтому чувствительность по отношению к напряжению питания  $S$ , отражающая степень влияния этой *аддитивной помехи*, может составлять, например,  $10 \text{ мкВ/В} = 10^{-5}$  (безразмерная величина). мы говорим: *чувствительность к напряжению питания*  $S_U$ .

Или *температурный коэффициент*  $C_T$  измерительной системы. Чувствительность (коэффициент усиления) измерительного усилителя определяется отношением сопротивлений двух резисторов, значения которых в какой-то мере зависят от температуры окружающей среды. Для подобной *мультипликативной помехи* температурный коэффициент  $C_T$  может равняться, например,  $10^{-5} \text{ В/К}$ .

**Влияние мешающего воздействия** окружающей среды на измерительную систему стараются свести к **минимуму - использовать системы с наименьшей чувствительностью на влияющие факторы**. Кроме того, можно предпринять следующие меры для еще большего ослабления нежелательного влияния окружающей среды:

1. Можно построить измерительную систему из компонентов с **малыми значениями коэффициентов помех**  $C_d$ , используя, например, элементы с малыми температурными коэффициентами.

2. Можно **изолировать** измерительную систему (или ее часть) от внешних воздействий, например, путем электрического экранирования,

стабилизации температуры окружающей среды, поддержания постоянной влажности и т.д.

3. Можно применить **метод** измерения с малой собственной чувствительностью к помехам  $S$ . Например, мы можем сначала измерить выходной сигнал  $y_0$ , обусловленный только аддитивной помехой (при  $x = 0$ ), затем измерить сигнал, появляющийся на выходе в результате совместного действия входного сигнала и помехи, а после этого снова измерить выходной сигнал  $y$ , вызванный только помехой. После этого скорректировать по отношению к помехе результат измерения.

4. Можно спроектировать измерительную систему таким образом, чтобы неизбежные в других случаях *помехи* здесь **компенсировали** друг друга посредством **параллельной** или **последовательной компенсации** или в результате компенсации **путем вычисления отношения**. Эти три метода компенсации показаны на рис. 2.

**Параллельная компенсация** в измерительной системе (или в ее критической части) заключается в расщеплении ее на две параллельные части  $S_1$ , и  $S_2$ , каждая из которых подвергается действию одной и той же внешней помехи  $d$ . Чувствительность системы  $S$  оказывается равной  $S = S_1 + S_2$  и действие любой *аддитивной помехи* уже не будет сказываться, если соответствующие чувствительности по отношению к помехе подсистем  $S_1$  и  $S_2$  будут равны по величине и противоположны по знаку. . Примером параллельной компенсации является дифференциальный усилитель с резистором в общей цепи эмиттеров.

Метод **последовательной компенсации** состоит в том, что измерительная система разбивается на две части, включенные последовательно. Обе они подвержены действию одной и той же внешней помехи  $d$ . Чувствительность системы равна  $S = S_1 S_2$  Если коэффициенты помех равны по величине, противоположны по знаку то *аддитивные помехи* уже не оказывают своего влияния, а действие *мультипликативной помехи* полностью подавляется, когда  $S_2 = 1/S_1$ . Последовательная компенсация часто применяется для борьбы с помехами в измерительных преобразователях. Помеха компенсируется в схеме, включенной последовательно с источником измеряемого сигнала

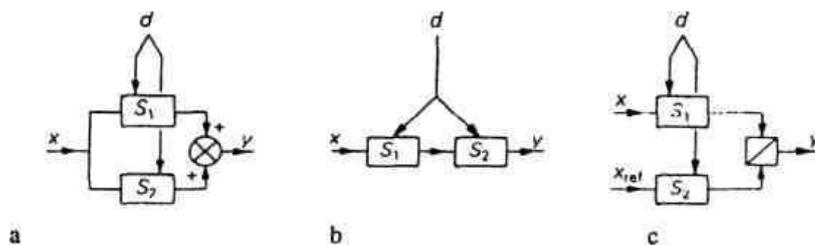


Рис. 5. Три основных метода компенсации помех, возникающих в результате влияния окружающей среды: (а) параллельная компенсация, б -

последовательная компенсация и (с) компенсация путем вычисления отношения

Метод *компенсации путем вычисления отношения* эффективен только при борьбе с *мультипликативными помехами*. Чувствительность системы, в которой берется отношение, равна  $S = S_1/S_2 x_{\text{ref}}$ , где  $x_{\text{ref}}$  — постоянная опорная величина. Внешняя мультипликативная помеха воздействует как на  $S_1$  так и на  $S_2$ . Эта мультипликативная помеха подавляется в выходном сигнале, если коэффициенты шума  $C_{d1} = C_{d2}$ . Компенсация путем вычисления отношения происходит *де-факто* при любом измерении отношения.

5. Можно *изменить форму входного сигнала* или его **частотный спектр** так, чтобы помеху можно было легко отделить от полезного сигнала. Например, в усилителе постоянного тока с преобразованием от постоянного напряжения, поступающего на вход, переходят к переменному сигналу. Это позволяет избежать влияния смещения по постоянному току и дрейфа внутри самого усилителя.

6. Для борьбы с мультипликативными помехами можно воспользоваться *обратной связью*. На рис. 6 представлена схема, в которой за счет обратной связи из сигнала  $x$  на входе измерительной системы с чувствительностью  $S_0$  вычитается  $\beta$ -я часть выходного сигнала  $y$ . Чувствительность  $S$  системы в целом, с учетом обратной связи, уже не равна  $S_0$ , а определяется соотношением:

$$S_f = \frac{S_0}{1 + \beta S_0}$$

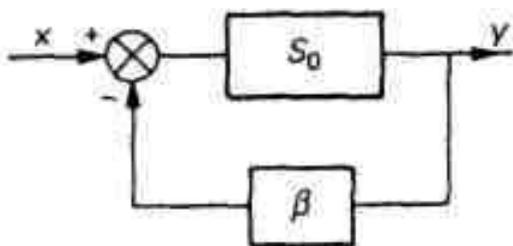


Рис. 6. Применение обратной связи в измерительной системе с исходной чувствительностью  $S$ .

При  $|1 + \beta S_0| > 1$  обратная связь *отрицательна*, а при  $|1 + \beta S_0| < 1$  обратная связь *положительна*. Когда отрицательная обратная связь является глубокой, коэффициент помехи значительно уменьшается. Однако в этом случае и чувствительность системы оказывается много меньшей, чем чувствительность  $S_0$  исходной системы. Отметим, что за счет отрицательной обратной связи **аддитивные помехи уменьшаются во столько же раз, во сколько уменьшается чувствительность системы**. Это означает, что отношение измеряемого сигнала к помехе (как на входе, так и на выходе) *не меняется* в результате введения обратной связи. Т.е. в результате применения отрицательной связи отношение сигнал/шум измерительной системы не ухудшается.

Поэтому для достижения определенного значения чувствительности  $S_f$  которая была бы свободна от влияния помех, необходимо, чтобы значение коэффициента передачи  $\beta$  не зависело от действия помех.

Рассмотрим несколько часто встречающихся источников помех.

### **Термоэлектричество.**

Термоэлектричество возникает в том случае, когда проводящая цепь в измерительной системе образована проводниками из двух или более **разнородных** материалов или из материалов, находящихся в **различном состоянии** (например, один из них натянут, а другой нет). Это явление проявляется в виде разности потенциалов, возникающих в месте контакта материалов, при условии, что температура горячего спая и холодных концов проводников различна. Разность потенциалов зависит от перепада температур на стыке. Поэтому в случае, когда два контакта между отрезками проводников  $A$  и  $B$  из разных металлов находятся при различных температурах ( $T_1$  и  $T_2$ ) (рис. 7), между двумя концами проводников  $A$  возникает заметное напряжение. Величина этого термоэлектрического напряжения (термоЭДС)  $V$  почти прямо пропорциональна разности температур  $T_1 - T_2$ .



Рис. 7. Термоэлектричество в качестве аддитивной помехи в электрической системе: а - термопара, образованная двумя контактами разнородных металлов; клеммы вольтметра

ТермоЭДС зависит также от того, из каких металлов выполнены проводники:

Cu-Ag	
Cu-Au	
Cu-Cd/Sn	0,3 мкВ/К
Cu-Pb/Sn:	3 мкВ/К
Cu - ковар:	500 мкВ/К
Cu-CuO:	1000 мкВ/К

В этом списке присутствуют следующие материалы:

- Pb/Sn: обычный припой;
- Cd/Sn: специальный припой для соединений с малыми термоЭДС;
- ковар: материал, используемый для изготовления выводов полупроводниковых приборов;

—SiO: окисел меди. (Поверхность проводника бывает покрыта слоем окиси. Этот слой необходимо разрушать, крепко скручивая проводники.)

ТермоЭДС в измерительной системе вызывают *ошибки смещения нуля* и потому носят характер *аддитивной помехи*. Чтобы избежать возникновения термоЭДС, проводники внутри измерительной системы и те, которые подведены извне к ее входу, должны быть сделаны из одного и того же материала. Если это невозможно, то следует воспользоваться такой комбинацией металлов, которая порождает малую термоЭДС.

Кроме того, систему необходимо сконструировать так, чтобы избежать большой разности температур между входными клеммами.

### ***Токи утечки***

Когда изоляция между двумя проводниками, электрические потенциалы которых различны, несовершенна, от одного проводника к другому будет течь нежелательный ток. Величина этого тока зависит от материала изоляции, уровня примеси в нем, влажности окружающего воздуха, скопившегося мусора, поверхностной пленки и т. д. Цепи с большими значениями импедансов (с большим сопротивлением источника сигнала или с большим входным сопротивлением системы) особенно подвержены возникновению ошибок из-за *токов утечки*. Обычно токи утечки влияют только на чувствительность измерительной системы. Токи утечки вызывают *мультипликативные ошибки*, так как они эквивалентны включению дополнительной нагрузки.

Представление о порядке величины тока утечки можно составить, приняв во внимание, что сопротивление между двумя точками на печатной плате на расстоянии 1 см одна от другой через некоторое время с момента изготовления, как правило, не превосходит  $10^8$  Ом.

Можно принять ряд мер, чтобы обеспечить малое значение тока утечки, например, создав пыленепроницаемую оболочку. Чтобы минимизировать влияние влажности, можно обработать схему водоотталкивающим средством (силиконовым составом) или поместить схему в водонепроницаемый кожух, заполнив его гигроскопическим веществом (силикагелем).

Часто применяемым средством борьбы с токами утечки является преобразование входной цепи измерительной системы таким образом, чтобы свести к нулю напряжение на сопротивлении утечки. Одним из способов достижения этого является *активная защита* (рис. 5). Активная защита устраняет не только *резистивную утечку*, но также и *«емкостную утечку»*. Действительно, если потенциал защитного экрана изменяется вместе с потенциалом защищаемого проводника, то все импедансы утечки, оказавшиеся внутри экрана, исключаются. В схеме на рис. 8 благодаря защитному экрану, окружающему незаземленный провод, происходит исключение импеданса утечки  $Z$ . Потенциал защитного экрана задается повторителем напряжения с коэффициентом передачи 1.

На печатной плате часто создают вспомогательные проводящие дорожки по обе стороны того проводника, который должен быть защищен.

Эти две медные полоски соединяются в одной единственной точке в месте их подключения к выходу повторителя напряжения. Для достижения большего увеличения импеданса утечки необходимо, чтобы защитный экран возможно ближе подходил к измеряемому объекту и ко входу измерительной системы.

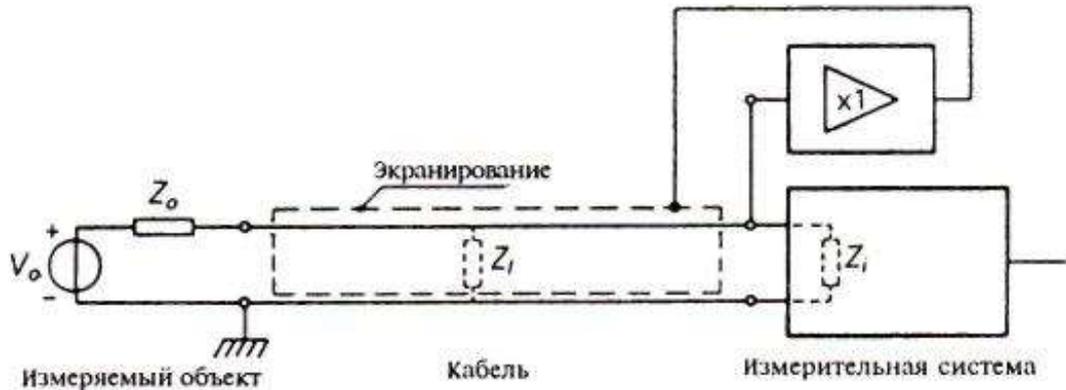


Рис. 8. Активная защита, применяемая и кабеле для подавления тока утечки, текущего по имеющему конечное значение импедансу  $Z$ , между двумя проводниками, образующими соединительную линию

### **Емкостная наводка помехи**

Всегда существует некоторая ненулевая паразитная емкость  $C$  между входом измерительной системы и какой-либо расположенной поблизости линией переменного напряжения. В результате во входной цепи измерительной системы будет наводиться напряжение помехи (рис. 9). Самым распространенным примером такого рода является фон, возникающий из-за наводок со стороны силовой сети с частотой 50 или 60 Гц. Напряжение помехи на входе измерительной системы тем больше, чем больше значение совокупного импеданса во входной цепи  $Z_0/Z_i$ . Емкостная наводка помехи является разновидностью **аддитивного** мешающего воздействия со стороны окружающей среды.

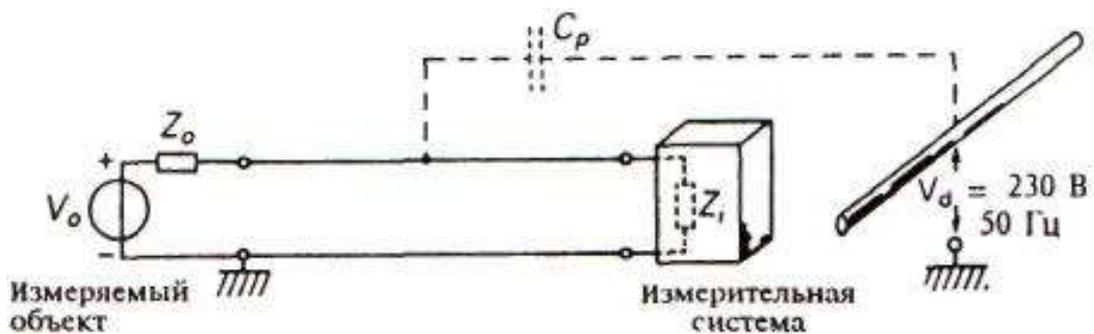


Рис. 9. Емкостная наводка помехи во входной цепи измерительной системы

Существует несколько методов ослабления емкостных наводок:

- увеличение расстояния до источника помехи (уменьшение  $C$ )

- понижение значение импеданса во входной цепи.
- экранировка входной цепи, поместив ее в заземленный проводящий экран (изготовленный из меди или алюминия, как показано на рис. 10).

В большинстве случаев однослойного медного экрана бывает достаточно, чтобы обеспечить защиту от емкостных наводок: медный экран очень хорошо преграждает путь электрическому полю. Как и в предыдущем случае, важно, чтобы экранирование было полным. Другими словами, необходимо, чтобы экран измеряемого объекта и измерительной системы простирался на возможно большее расстояние и в нем не было зазоров или щелей. В отношении высокочастотных помех важно, чтобы экран не имел открытых тонких щелей и т. д.

Строго говоря, экран можно использовать только для защиты от наводок, но не в качестве заземленного проводника соединительной линии. На рис. 10 изображено правильное применение так называемого симметричного двухжильного кабеля. Экран кабеля надо заземлить на том конце кабеля, который подключен к цепи с наименьшим импедансом.

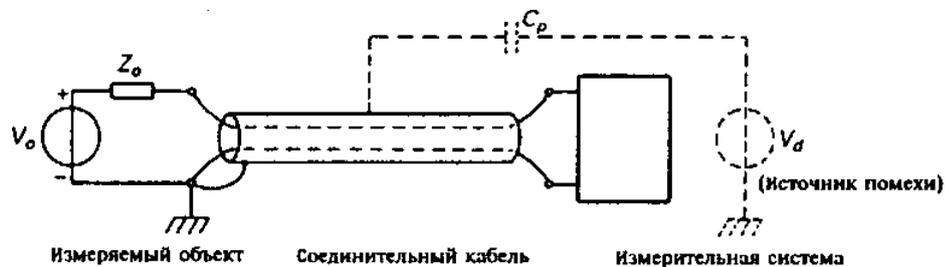


Рис. 10

Для системы, в которой измеряется напряжение, это всегда конец кабеля, обращенный к измеряемому объекту (так как  $Z_0 \ll Z$ ), а для системы, в которой измеряется ток, это всегда конец кабеля, обращенный к измерительной системе (так как  $Z_0 \gg Z$ ). В этом случае разность потенциалов между экраном и двумя проводниками оказывается настолько малой, насколько это возможно, что сводит к минимуму емкостную наводку со стороны экрана на проводники внутри кабеля.

### ***Индуктивная наводка помехи***

Если измерительная система (или ее входная цепь) размещена в переменном магнитном поле, то во входной цепи наводится напряжение помехи. Обычно переменное магнитное поле порождается текущим по проводнику переменным током или движущимися магнитными узлами механизма. То же самое, конечно, будет происходить и в том случае, когда в постоянном магнитном поле будут двигаться (вибрировать) подходящие ко

входу системы проводники. Индуктивное наведение помех схематически изображено на рис. 11.



Рис. 11. Индуктивная наводка помехи на входе измерительной системы

Наведенные помехи являются разновидностью аддитивных возмущений. Наведенное напряжение помехи  $V_d$  равно:

$$V_d = -\frac{d\Phi}{dt} = -\mu_0 A \frac{dH}{dt}$$

Вторая часть формулы получена из предположения, что магнитное поле однородно в пределах площади контура, образованного проводниками на входе системы, и что его индукция равна  $B$ .

Наводимое напряжение помехи растет с увеличением потока, пронизывающего площадь  $A$ , с увеличением магнитного поля  $H$ , при более быстром изменении напряженности поля со временем, а также в том случае, когда первичный ток  $I(t)$  увеличивается или быстрее изменяется во времени.

Индуктивно наводимое напряжение помехи можно свести к минимуму несколькими способами:

- разместив измерительную систему подальше от источника помехи.
- изменить пространственную ориентацию измерительной системы так, чтобы стал минимальным охватываемый поток. Этого можно достичь, расположив две проволочные рамки в перпендикулярных друг к другу плоскостях.
- скручивая два проводника, можно минимизировать площадь  $A$  (витая пара).
- систему можно *экранировать*, воспользовавшись ферромагнитным экраном с большой относительной магнитной проницаемостью.

Коэффициент экранирования зависит от геометрии экрана, а также от используемого материала. На рис. 12 показано, как изменяется магнитное поле, когда в однородное магнитное поле помещается цилиндрический экран.

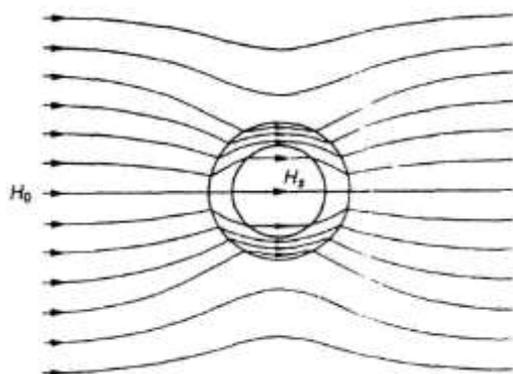


Рис. 12 Магнитное поле в присутствии цилиндрического магнитного экрана, размещенного поперек однородного магнитного поля  $H_0$

С увеличением внешнего магнитного поля намагниченность магнитопровода растет нелинейно, и поэтому коэффициент экранирования сильно зависит от напряженности поля. Нужно иметь в виду, что может наступить и магнитное насыщение экрана.

Экран должен быть толстым, чтобы обеспечить надежное экранирование даже в очень сильных магнитных полях. Однако при этом можно сэкономить ферромагнитный материал, делая экран не сплошным, а состоящим из нескольких более тонких экранов, разделенных воздушным зазором. В этом случае можно получить такое же значение коэффициента экранирования при меньшем расходе материала.

Ферромагнитный экран, как правило, не только обладает высокой магнитной проницаемостью, но и также хорошо проводит электрический ток. Поэтому в случае, когда экран помещен в переменное магнитное поле, внутри него будут возникать вихревые токи. Из-за вихревых токов внешнее поле не может легко проникнуть вглубь экрана; вихревые токи действуют так, как если бы они были экраном по отношению к более глубоким слоям.

Только самый внешний слой экрана служит проводником магнитного поля. Величина вихревых токов растет с увеличением частоты, так что способность проводить магнитное поле с ростом его частоты выталкивается к внешней поверхности. Результатом этого является так называемый магнитный скин-эффект, в соответствии с которым эффективная глубина проникновения внешнего поля (толщина скин-слоя) уменьшается при увеличении частоты.

Чтобы изготовить ферромагнитный экран для борьбы с переменным магнитным полем с малой толщиной скин-слоя  $S$  и большим коэффициентом экранирования  $F$ , необходим материал с высокой электрической проводимостью (малые значения  $\rho$ ) и высокой магнитной проницаемостью

(большие значения  $\mu$ ). Поэтому часто осуществляют многослойное экранирование, применяя попарно экраны с высокой электрической проводимостью и высокой магнитной проницаемостью.

С увеличением частоты толщина скин-слоя  $S$  уменьшается, а коэффициент экранирования растет. Поэтому на высоких частотах ( $f > 10^5$  Гц) в большинстве случаев удовлетворительный коэффициент экранирования удается получить только в результате применения экрана с электрической проводимостью.

### **ПОМЕХИ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ИЗ-ЗА ПЛОХОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ**

В измерительной установке может случиться так, что измеряемый объект будет подключен к земляной шине не в той же точке, что и измерительная система; это может произойти, например, когда используются две различные розетки силовой сети. Такой случай показан на рис. 13.

В подобным образом заземленной аппаратуре могут возникать значительные наводки из-за паразитных токов, протекающих по земле. Как правило, сопротивлением  $R$  по земляной шине между измеряемым объектом и

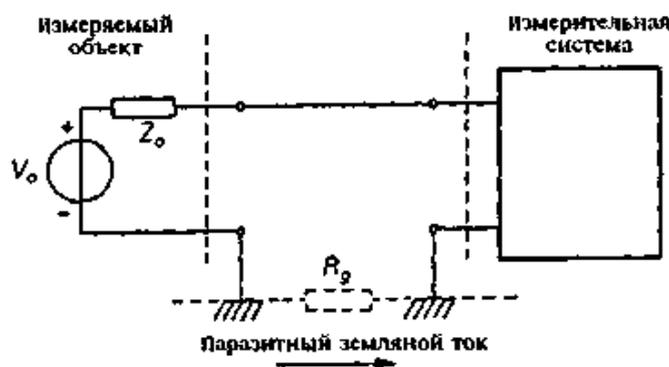


Рис. 13. Заземление измеряемого объекта и измерительной системы в различных точках земляной шины

измерительной системой нельзя пренебрегать (оно бывает порядка 0,1 Ом/м). Это ненулевое сопротивление и паразитные блуждающие токи, протекающие по земляной шине (вызываемые в ней другим оборудованием, подключенным к этой же шине), создадут на  $R$  напряжение, оказывающееся включенным последовательно с напряжением источника  $V$ . Когда должны быть измерены малые сигналы, эти аддитивные возмущения будут относительно велики, и проведение чувствительных измерений может быть легко нарушено.

Способ, к которому часто прибегают, чтобы избежать влияния паразитных токов, состоит в строгом следовании правилу *единственной точки заземления* для измеряемого объекта и измерительной системы (как это изображено на рис. 14).

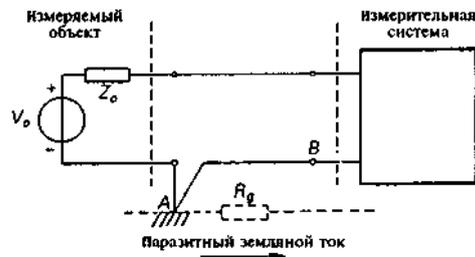


Рис. 14. Заземление входной цепи измерительной системы в одной точке

Теперь напряжение на  $R$  остается в стороне от входной цепи измерительной системы и потому не оказывает влияния. Для большинства измерений этот метод заземления является предпочтительным и обеспечивает надлежащее устранение помех от паразитных токов. Однако малое напряжение помехи все же присутствует, так как система заземлена посредством проводника  $AB$ . По этому проводнику течет ток земли измерительной системы. Преобладающая роль в возникновении инструментального земляного тока принадлежит емкостной связи между первичной и вторичной обмотками силового трансформатора в данном приборе, которая может вызвать значительный по величине переменный ток частоты 50 или 60 Гц. Правда, этот инструментальный ток земли обычно много меньше, чем указанный на предыдущем рисунке ток, текущий по земляной шине. И все же, поскольку сопротивление  $R_{AB}$  включено последовательно с источником сигнала, эта помеха может создать значительный фон на входных клеммах измерительной системы.

Чтобы в еще большей степени избежать влияния помех, возникающих в результате несовершенства заземления, целесообразно воспользоваться измерительной системой с *симметричным входом* относительно земли. При таком устройстве входной цепи вход называют также *плавающим* или *дифференциальным*. Это способ, применяемый при измерении очень малых входных сигналов. В таких дифференциальных измерительных системах происходит измерение только разности потенциалов между входными клеммами (помеченными знаками + и — в схеме на рис. 15). Заземление такой системы осуществляется через отдельный входной зажим (клемма 0 на рис.). Такое заземление корпуса или кожуха необходимо по соображениям безопасности. Ток земли измерительной системы потечет через эту отдельную клемму и поэтому останется в стороне от входной цепи.

Напряжение, возникающее на сопротивлении земляной шины  $R$ , накладывается на потенциалы обоих входных зажимов (относительно клеммы 0): и того, который отмечен знаком +, и того, который отмечен знаком —. Подобная дифференциальная измерительная система бывает специально сконструирована таким способом, чтобы быть максимально нечувствительной к любому напряжению, которое одновременно присутствует на двух входных зажимах.

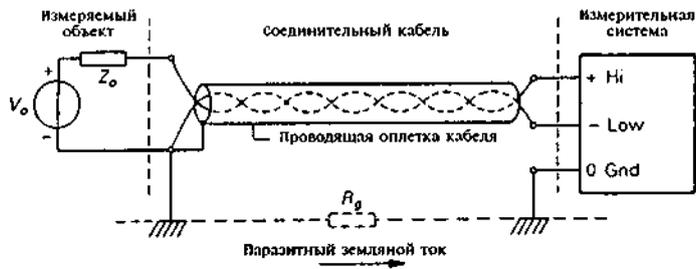


Рис. 15. Измерительная система с симметричным относительно земли входом и экранированным соединительным кабелем с двумя скрученными внутренними проводниками

О нечувствительности измерительной системы говорят как об «ослаблении»; в частности, нечувствительность системы к потенциалам, которые являются общими для обеих клемм со знаками + и —, называют «коэффициентом ослабления синфазного сигнала». Способность системы реагировать на разность потенциалов между входами + и — характеризуется «чувствительностью по отношению к дифференциальному сигналу».

На рис. 14 показано также, как избежать емкостных наводок путем экранирования кабеля проводящей оплеткой, заземленной на стороне измеряемого объекта (при измерении напряжения). Кроме того, показано, что благодаря применению кабеля с двумя внутренними скрученными проводниками можно избежать индуктивной наводки.

Рассмотренные выше методы устранения помех, то есть использование активной защиты или экранирование с заземлением, исключение из входной цепи импедансов, по которым протекают паразитные токи, и компенсация возмущений, применяются не только при электронных измерениях, но и почти во всех областях физики и техники.