

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов специальности 6-05-0716-03
«Информационно-измерительные приборы и системы»
очной формы обучения*



Могилев 2025

УДК 53.081
ББК 30.10
Ф50

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «1» сентября 2025 г.,
протокол № 1

Составитель ст. преподаватель Е. Н. Прокопенко

Рецензент канд. физ.-мат. наук, доц. С. О. Парашков

В методических рекомендациях кратко изложены теоретические сведения, необходимые для выполнения практических заданий. Методические рекомендации разработаны в соответствии с учебной программой по дисциплине «Физические основы измерений» для студентов специальности 6-05-0716-03 «Информационно-измерительные приборы и системы» очной формы обучения.

Учебное издание

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Ответственный за выпуск	А. В. Хомченко
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 16 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2025

Содержание

Введение	4
1 Классификация измерительных преобразователей. Основные характеристики	5
2 Статические характеристики и статические погрешности средств измерений	8
3 Динамические свойства и погрешности средств измерений	14
4 Согласование измерительных преобразователей	18
5 Шумы и помехи	23
Список литературы	27

Введение

Возможность выполнять измерения лежит в основе развития науки и техники. Измерение позволяет оценить правильность теоретической гипотезы и создать современную техническую систему. Современные технические и естественные процессы определяются количественными данными, которые характеризуют свойства и состояние предметов и тел.

Физические основы измерений – это предмет, в котором изучают общие принципы и методы измерений физических величин, основанные на конкретных физических явлениях и законах, а также источники погрешностей измерений и методы повышения точности измерений.

Физических величин, которые приходится измерять в быту и в производстве, несколько тысяч. Для каждой из них разрабатываются и используются (и не один) метод измерений и свое средство измерений.

Целью практических занятий по данной дисциплине является ознакомление студентов с основными методами расчета основных характеристик измерительных преобразователей.

1 Классификация измерительных преобразователей.

Основные характеристики

Основными элементами большинства применяемых средств измерений являются первичные измерительные преобразователи, назначение которых – преобразование измеряемой физической величины (входная величина) в сигнал измерительной информации (выходная величина), как правило, электрический, удобный для дальнейшей обработки [1, 2].

По расположению в измерительной цепи различают первичные и промежуточные измерительные преобразователи.

Первичный измерительный преобразователь, называемый датчиком, – это тот измерительный преобразователь, на который непосредственно действует измеряемая величина.

Первичные измерительные преобразователи предназначены для измерения различных физических величин: температуры, давления, влажности, концентрации растворов и т. д. Преобразователи представляют собой весьма разнообразные устройства, которые классифицируются по измеряемой величине (преобразователи температуры, давления, уровня, плотности и т. п.), принципу действия (электрические, пневматические и т. п.), виду и характеру выходного сигнала (непрерывный и дискретный).

Остальные измерительные преобразователи называют промежуточными. Они расположены после первичного измерительного преобразователя и могут выполнять различные операции преобразования измерительного сигнала.

Как правило, к ним относятся:

- изменение физического рода величины;
- масштабное (линейное или нелинейное) преобразование;
- масштабно-временное преобразование;
- аналого-цифровое преобразование;
- цифроаналоговое преобразование;
- функциональное преобразование (любые математические операции над значениями величины).

По принципу действия первичные преобразователи можно разделить на следующие.

Емкостные преобразователи. Емкостные преобразующие элементы превращают изменения измеряемой величины в изменения емкости. Конденсатор формируется из двух пластин, разделенных слоем диэлектрика, а его емкость определяется из следующего выражения:

$$C = \varepsilon \frac{S}{x}, \quad (1.1)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

S – площадь поверхности каждой пластины;

x – расстояние между пластинами.

Пьезоэлектрические преобразователи. Одним из емкостных типов преобразования является пьезоэлектрический эффект, при котором изменение измеряемой величины преобразуется в изменение электростатического заряда или напряжения, возникающих в некоторых материалах при их механическом напряжении. Напряжение обычно образуется под действием сил сжатия, растяжения или изгиба, которые являются измеряемой величиной и воздействуют на чувствительный элемент либо непосредственно, либо с помощью некоторой механической связи. Чтобы воспринять изменение электрического заряда или напряжения, к пьезоэлектрическому материалу подсоединяют две металлические пластинки, которые фактически образуют пластины конденсатора.

Электромагнитные преобразователи. В этих датчиках используется свойство катушки индуктивности изменять свое сопротивление при перемещении сердечника.

Фотоэлектрические преобразователи. Их действие основано на использовании воздействия изменений измеряемого параметра на интенсивность светового излучения. Источником светового излучения обычно являются лампы накаливания, рентгеновские трубки и радиоактивные вещества. Приемники излучения – фотоэлементы, ионизационные камеры, газоразрядные счетчики.

Преобразователи сопротивления. Они представляют собой резистивные преобразователи, действие которых основано на изменении сопротивления материала датчика в зависимости от измеряемых свойств среды. Изменение сопротивления может быть вызвано различными эффектами в преобразующем элементе, например, нагреванием или охлаждением, механическим напряжением, воздействием светового потока, увлажнением, осушением, перемещением контактной щетки реостата.

Термоэлектрические преобразователи. Термоэлектрические преобразователи превращают изменение измеряемой величины (температуры) в изменение тока, возникающего вследствие разности температуры на спае двух разнородных материалов, в котором возникает эффект Зеебека (рисунок 1.1).

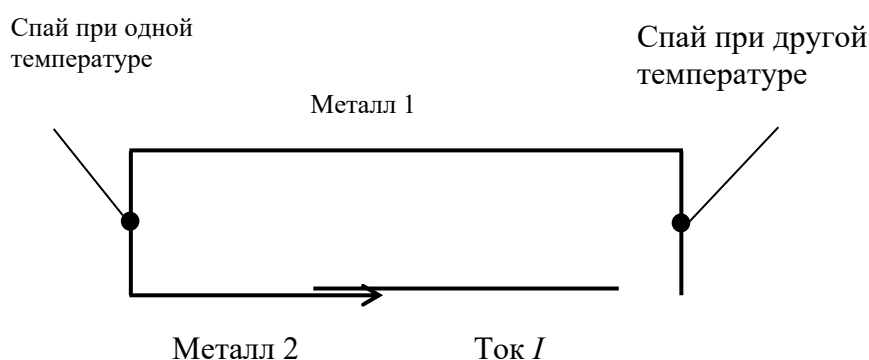


Рисунок 1.1 – Эффект Зеебека

Ионизационные преобразователи. Действие данных преобразователей основано на изменении измеряемой величины в изменение тока ионизации, который протекает, например, через жидкость, расположенную между двумя

электродами (рН-метры).

Выделяют три группы основных требований: метрологические, эксплуатационные и конструктивные.

Метрологические требования:

- чувствительность и точность;
- быстроедействие, пространственное разрешение, соответствие масштабу исследуемого процесса;
- минимальное возмущение полей измеряемых величин;
- малая чувствительность к неинформативным воздействиям.

Эксплуатационные требования:

- надежность и срок службы;
- устойчивость к перегрузкам, температуре, химическим, биологическим, механическим воздействиям;
- удобство обслуживания и метрологической аттестации.

Конструктивные требования:

- унифицированность и взаимозаменяемость;
- малые масса и габаритные размеры;
- технологичность и экономичность изготовления.

Индивидуальное задание

Ознакомиться с основными характеристиками и требованиями, предъявляемыми к первичным измерительным преобразователям. Решить следующие задачи.

1 Отрезок проволоки длиной $l = 1$ м и диаметром $d = 0,1$ мм имеет электрическое сопротивление $R = 51$ Ом. Из какого материала сделана проволока и к какому виду преобразователей можно отнести данный элементарный преобразователь?

2 Для определения емкостей конденсаторов C_1 и C_2 они были включены последовательно, потом – параллельно. При последовательном включении был получен результат $C_{\text{пос}} = 2$ мкФ, при параллельном – $C_{\text{пар}} = 8$ мкФ. Чему равны емкости конденсаторов C_1 и C_2 и к какому виду преобразователей можно отнести данный преобразователь?

3 Для определения сопротивлений R_1 и R_2 измерили сопротивление при их последовательном $R_{\text{пос}} = 10$ кОм и при параллельном $R_{\text{пар}} = 2,5$ кОм включении. Чему равны сопротивления R_1 и R_2 и к какому виду относятся эти измерения?

4 При нагревании сопротивление металлического резистора определяется соотношением $R_{\theta} = R_0(1 + \alpha T)$, где R_0 – сопротивление при 0°C , α – температурный коэффициент сопротивления. Сопротивление резистора было измерено при двух температурах: T_1, T_2 – и получены значения сопротивлений резистора R_{T_1}, R_{T_2} . Определите параметры резистора R_0 и α , установите материал, из которого изготовлен резистор.

5 ТермоЭДС, возникающая в спаяв медь – свинец, определяется соотношением $e = AT + BT^2$, где T – температура нагретого спая (свободные концы

находятся при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Для определения коэффициентов A и B были измерены термоЭДС при двух температурах: T_1, T_2 – и получены значения e_1, e_2 . Чему равны коэффициенты A и B ?

Контрольные вопросы

- 1 Что такое измерительный преобразователь?
- 2 Как классифицируются измерительные преобразователи?
- 3 Какие преобразователи относятся к первичным?
- 4 Какие преобразователи относятся к преобразователям электрических величин в электрические?
- 5 Какие преобразователи относятся к масштабным преобразователям?
- 6 Назовите основные характеристики измерительных преобразователей.
- 7 Что понимают под понятием «порог чувствительности»?
- 8 Что представляет собой градуировочная характеристика?

2 Статические характеристики и статические погрешности средств измерений

Характеристики измерительных преобразователей (ИП), как и других средств измерений, делятся на метрологические и неметрологические. *Метрологическими* называют характеристики, влияющие на точность измерения (преобразования), а *неметрологическими* – соответственно, не влияющие. Будем рассматривать только метрологические характеристики [3–5].

Метрологические характеристики, в свою очередь, делят на статические и динамические. *Статические* – это характеристики, которые наблюдаются при неизменности входной преобразуемой величины хотя бы за время преобразования. *Динамические* характеристики проявляются при изменении во времени входной преобразуемой величины.

Статические характеристики измерительных преобразователей. Основными статическими характеристиками ИП можно считать следующие характеристики.

1 Уравнение преобразования. Возможность применения ИП для преобразования y , в конечном счете, измерения конкретной физической величины определяется уравнением преобразования $y = f(x)$. Эта зависимость должна быть однозначной и не иметь разрывов в пределах рабочего диапазона измерения преобразуемой величины x . Примеры зависимости $y = f(x)$ представлены на рисунке 2.1.

Зависимости 1 и 2 являются линейными, а 3 и 4 – нелинейными. Линейная зависимость более желательна, особенно для ИП, применяемых в измерительных информационных системах, где приведение зависимостей $y = f(x)$ различных ИП к единому виду позволяет использовать общие средства для дальнейшей обработки информации.

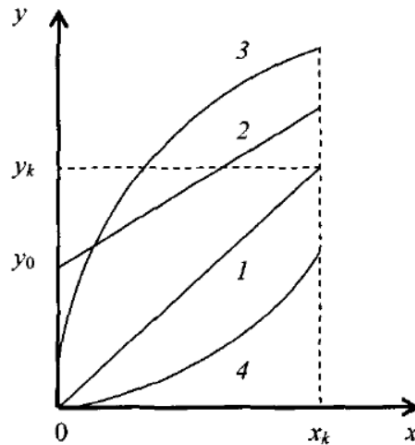


Рисунок 2.1 – Примеры функций преобразования

Для получения численных значений зависимости $y = f(x)$ ИП градуируют, получая это уравнение в виде графика или таблицы. В зависимости от типа ИП и вида уравнения преобразования процесс градуировки может быть более или менее трудоемким. Градуировка осуществляется следующим образом. Измеряется ряд значений y для некоторых заданных значений x в пределах рабочего диапазона изменения x . Для ИП с линейной характеристикой в рабочем диапазоне (см. рисунок 2.1, зависимости 1 и 2) достаточно измерить y для двух заданных значений x , а остальные точки зависимости получить расчетным путем. Для ИП с нелинейной характеристикой $y = f(x)$ градуировку производят, задаваясь рядом значений x в пределах рабочего диапазона и получая с помощью полиномиальной аппроксимации уравнения $y = f(x)$.

Для уменьшения влияния случайной погрешности процесс градуировки многократно повторяют с последующей обработкой результатов многократных измерений, получая, в конечном итоге, наиболее вероятный вид уравнения преобразования, который указывается в паспорте ИП и называется номинальной характеристикой $y = f_n(x)$.

2 Погрешность измерительных преобразователей. Важнейшей характеристикой любого средства измерения, в том числе и ИП, является погрешность. В соответствии с ГОСТом погрешность – это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Для ИП результатом измерения можно считать выходное значение y , по которому, в соответствии с уравнением преобразования, находится входное измеряемое значение x . Отклонение может определяться как абсолютное значение – разность (абсолютная погрешность), так и как относительное значение – относительная погрешность (например, в процентах).

Абсолютная Δ и относительная δ погрешности ИП в конкретной точке диапазона преобразования определяются по формулам $\Delta = x - x_u$ и $\delta = 100\Delta / x$, где x – значение входной преобразуемой величины, полученное по значению выходной величины с учетом уравнения $y = f_n(x)$; x_u – истинное значение преобразуемой величины.

Так как истинное значение величины x остается неизвестным, то вместо

него в формулах для определения погрешности используют действительное значение, т. е. значение физической величины, найденное экспериментально и настолько приближающееся к истинному, что для данной цели может быть использовано вместо него.

Для некоторых ИП определяют также приведенную погрешность γ , т. е. отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению x_N (в процентах): $\gamma = 100\Delta / x_N$.

Чаще всего за нормирующее значение выбирают диапазон изменения измеряемой (преобразуемой) величины.

Погрешности средств измерения классифицируют по различным признакам. Рассмотрим кратко эту классификацию.

В зависимости от того, изменяется измеряемая (преобразуемая) величина или остается неизменной, различают статические и динамические погрешности.

Статической называют погрешность при измерении не изменяющейся во времени величины.

Динамическая погрешность – разность погрешности средства измерений в динамическом режиме и статической погрешности.

В зависимости от условий работы средства измерений погрешности делят на основную и дополнительные.

Основная погрешность – это погрешность средства измерения при нормальных условиях работы.

Дополнительная погрешность – погрешность средства измерения, вызванная отступлением от нормальных условий одного из влияющих факторов.

Отметим, что нормальные условия работы ИП зависят от того, где применяются преобразователи, и могут быть совершенно различными. Например, ИП, работающие на космическом объекте, и ИП, работающие на гидроэлектростанции, будут иметь не только разные нормальные условия работы, но и различные влияющие факторы.

В зависимости от закона изменения погрешности различают систематические и случайные погрешности.

Постоянная или закономерно изменяющаяся погрешность называется *систематической*.

Погрешность, изменяющаяся случайным образом, называется *случайной*, т. е. закон изменения случайной погрешности определить невозможно. Появление случайной погрешности при любых измерениях объясняется наличием множества непрерывно изменяющихся факторов, влияющих на процесс измерения, контролировать которые просто невозможно.

Случайные погрешности могут быть замечены только при многократных измерениях значений одной и той же неизменяющейся физической величины, когда отдельные результаты измерений несколько различаются между собой.

Для ИП и некоторых других средств измерений выделяют также аддитивную и мультипликативную погрешности.

Аддитивной называют абсолютную погрешность, постоянную при изменении значений преобразуемой величины по диапазону изменения. Аддитивную

погрешность часто называют погрешностью нуля, и проявляется она тем, что при нулевом сигнале на входе ИП на выходе его есть некоторый сигнал. Появление этой погрешности объясняется дрейфом нуля, помехами, наводками. Относительная аддитивная погрешность, естественно, тем больше, чем меньше значение преобразуемой величины.

Мультипликативной называют абсолютную погрешность, изменяющуюся по линейному закону при изменении значений преобразуемой величины по диапазону изменения. Эту погрешность называют погрешностью коэффициента преобразования, погрешностью чувствительности. Причиной возникновения этой погрешности может быть изменение коэффициента преобразования ИП, например коэффициента усиления усилителя, входящего в структуру ИП, от изменения окружающей температуры или напряжения питания. Относительная мультипликативная погрешность постоянна для всех значений входной величины в пределах рабочего диапазона.

3 Вариация выходного сигнала измерительного преобразователя. Вариация выходного сигнала преобразователя 1 – разность между значениями информативного параметра выходного сигнала преобразователя, соответствующими данной точке диапазона измерения при двух направлениях медленных изменений информативного параметра входного сигнала в процессе подхода к данной точке диапазона измерений.

Напомним, что информативным называют параметр сигнала, функционально связанный с измеряемым свойством или являющийся самым измеряемым свойством объекта измерения. Например, сигнал, представленный в виде переменного напряжения $U(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$, имеет три параметра: амплитуду напряжения U_m , частоту ω и фазу φ и в зависимости от того, что будет измеряться – напряжение, частота или фаза – один из этих параметров будет информативным, а остальные два – неинформативными.

Причиной вариации выходного сигнала преобразователя, т. е. получения неодинакового выходного сигнала при изменении входного сигнала от меньшего значения к большему или от большего значения к меньшему, могут быть гистерезисные явления в элементах, трение в механических частях.

4 Чувствительность измерительного преобразователя. Чувствительность преобразователя определяется как производная от выходного сигнала по входному преобразуемому параметру, т. е.

$$S = \frac{dx}{dt}.$$

Для преобразователя с линейной характеристикой преобразования (см. рисунок 2.1, зависимости 1 и 2) чувствительность постоянна и может определяться как отношение приращения выходного сигнала к соответствующему приращению входного параметра: $S = \frac{y_k}{x_k}$ – для зависимости 1; $S = \frac{(y_k - y_0)}{x_k}$ – для зависимости 2.

Для ИП с нелинейной характеристикой преобразования (см. рисунок 2.1, зависимости 3 и 4) чувствительность является величиной переменной, и в некоторых случаях говорят о средней чувствительности преобразователя в пределах используемого участка характеристики.

Наряду с рассмотренным понятием чувствительности, которую называют абсолютной чувствительностью, часто пользуются понятием относительной чувствительности, подразумевая под этим отношение относительного изменения выходного сигнала к относительному изменению входного преобразуемого параметра: $S = (\Delta y / y) / (\Delta x / x)$ или $S = \Delta y / (\Delta x / x)$.

Понятие чувствительности не следует путать с понятием «порог чувствительности», под которым понимается минимальное значение входной преобразуемой величины, способное вызвать заметное изменение выходного сигнала преобразователя.

Заметим, что чувствительность и порог чувствительности имеют разную размерность. Если так называемая абсолютная чувствительность имеет размерностью отношение размерности выходного сигнала преобразователя к размерности входного сигнала, то порог чувствительности всегда имеет размерность входного преобразуемого сигнала.

5 Входной и выходной импедансы измерительного преобразователя. Любое средство измерений влияет на объект измерения, в определенной степени искажая исследуемый процесс. Не являются исключением и измерительные преобразователи неэлектрических величин. Например, при измерении давления в трубе газопровода приходится устанавливать мембрану, которая, уменьшая площадь воздействия давления, тем самым увеличивает его. Введение терморезистивного или термоэлектрического преобразователя температуры в печь искажает картину температурного поля. В результате появляется погрешность измерительного преобразователя за счет обратного воздействия преобразователя на исследуемый объект, которая хотя и является систематической, далеко не всегда легко может быть определена и, соответственно, учтена.

Для электрических цепей понятие «входной импеданс» тождественно понятию «входное сопротивление». До недавнего времени вместо входного импеданса использовали термин «обобщенное входное сопротивление», что нашло отражение в технической литературе. Влияние ИП на исследуемый объект характеризуют общим понятием «входной импеданс».

В соответствии с ГОСТ 16263–70 *Метрология. Термины и определения* входной импеданс – характеристика, определяющая реакцию входного сигнала на подключение средства измерения к источнику входного сигнала с фиксированным выходным импедансом.

Важной характеристикой ИП является также выходной импеданс преобразователя, т. е. характеристика ИП, определяющая реакцию его выходного сигнала на подключение к его выходу фиксированной нагрузки.

Для электрических цепей понятие «выходной импеданс» тождественно понятию «выходное сопротивление». Существовал также термин «обобщенное выходное сопротивление».

Знание входного и выходного импедансов ИП необходимо для согласования его с исследуемым объектом и последующими элементами измерительной цепи.

Индивидуальное задание

Ознакомиться с основными характеристиками и требованиями, предъявляемыми к первичным измерительным преобразователям. Решить следующие задачи.

1 Отношение амплитуд U_1 / U_2 двух сигналов, выраженное в децибеллах, равно N дБ. Найти отношение этих амплитуд в безразмерных единицах, т. е. значение отношения U_1 / U_2 . Найти также отношение мощностей P_1 / P_2 этих сигналов.

2 Найти относительную погрешность вычисления длины окружности по заданному значению радиуса, если для числа π взять значение 3,14.

3 Класс точности СИ обозначен в виде дроби $\frac{a}{b}$, абсолютная погрешность нуля равна Δx_0 , конечное значение шкалы x_k . Найти полный диапазон D этого средства измерений и его абсолютную Δ и относительную γ погрешности, если результат измерения равен x .

4 Реальная чувствительность средства измерения на малом участке изменения входного сигнала x описывается формулой $F_p(x) = a + bx + cx^2$. Найти абсолютную и относительную погрешности средства измерений, если его номинальная чувствительность выражается формулой $F_n(x) = b_0 x$.

5 Через резистор сопротивлением 10 Ом протекает ток 2,5 А. При измерении падения напряжения вольтметр показал 24,5 В. Определить абсолютную и относительную погрешности измерения напряжения.

6 Верхняя граница рабочей полосы частот электронно-лучевого осциллографа определяется спадом его амплитудно-частотной характеристики (т. е. уменьшением чувствительности канала вертикального отклонения S_y при увеличении частоты входного напряжения относительно значения чувствительности на постоянном токе $S_{y,0}$) на 3дБ. Выразить соответствующее изменение чувствительности δ_{S_y} в процентах.

7 Измеренное значение сопротивления $R = 100,0$ Ом. Предел допускаемой относительной погрешности измерения $\delta_n = 1,0$ %. Найти интервал, в котором должно находиться R_u – истинное значение сопротивления.

8 Номинальная функция преобразования термопреобразователя сопротивления имеет следующий вид: $R(t) = R_0(1 + 0,00428T)$, $R_0 = 100$ Ом. Определить относительную погрешность преобразователя по выходу, если в результате эксперимента получены следующие действительные значения температуры и сопротивления: $T_\delta = 50,0$ °C, $R_{T_\delta} = 121,1$ Ом.

Контрольные вопросы

- 1 Какие характеристики измерительных преобразователей относятся к метрологическим, а какие к неметрологическим?
- 2 Какие характеристики измерительных преобразователей относятся к статическим?
- 3 Что такое уравнение преобразования?
- 4 Перечислите основные виды возможных погрешностей средств измерения.
- 5 Что такое дополнительная погрешность и когда она возникает?
- 6 Что такое чувствительность измерительного преобразователя и как она определяется?

3 Динамические свойства и погрешности средств измерений

В общем случае преобразуемая неэлектрическая величина является функцией времени $x(t)$. Измерительный преобразователь не должен искажать эту зависимость, и между входным и выходным параметрами должно сохраняться уравнение преобразования $y = f(x)$ в виде $y(t) = f[x(t)]$ [3–5].

Для измерительных преобразователей с линейной характеристикой (см. на рисунок 2.1, зависимости 1 и 2) это уравнение принимает вид

$$y(t) = Sx(t), \quad (3.1)$$

где S – чувствительность измерительного преобразователя.

Последнее уравнение характерно для некоторого идеального безынерционного преобразователя, каких практически не бывает. Реальный преобразователь всегда имеет определенную инерционность, зависящую от конструкции и типа: наличия движущихся частей, емкостных и индуктивных элементов, нелинейных элементов, помех.

Для оценки качества работы преобразователя в динамическом режиме рассмотрим его динамические характеристики, которые делят на полные и частные.

С помощью полных динамических характеристик можно восстановить входной преобразуемый сигнал по полученному выходному параметру измерительного преобразователя.

С помощью частных динамических характеристик восстановить входной сигнал по полученному выходному параметру невозможно.

К полным динамическим характеристикам относится, прежде всего, дифференциальное уравнение, связывающее величины $x(t)$ и $y(t)$: $a_n y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \dots + a_0 y = b_m x^{(m)} + b_{m-1} x^{(m-1)} + \dots + b_0 x$, где индексы при y и x означают порядок дифференцирования по времени. Порядок дифференциального уравнения может быть различным и зависит от структуры преобразователя. Вид решения дифференциального уравнения определяется характером изменения

входного сигнала. Например, при синусоидальном входном сигнале $x(t) = x_m \sin \omega t$ выходная величина $y(t)$ также имеет синусоидальный характер изменения с комплексной амплитудой y_m , сдвинутой на угол φ по отношению к x_m .

Существует понятие динамической чувствительности, являющейся отношением комплексного значения выходного сигнала к комплексному значению входного: $\dot{S}_\omega = \dot{y} / \dot{x}$. В случае синусоидального входного сигнала $\dot{S}_\omega$ представляет собой комплексную величину, зависящую от частоты изменения ω входного сигнала. Динамическая чувствительность в комплексном виде представляется выражением

$$S(j\omega) = \frac{y_m}{x_m} e^{j\varphi}. \quad (3.2)$$

При этом выходная величина описывается вектором $y(t) = S(j\omega) x_m e^{j\omega t}$ с действительной частью $|y(t)| = |S(j\omega)| \sin(\omega t - \varphi)$. Модуль комплексной чувствительности и угол сдвига между входной и выходной величинами являются функциями частоты. Зависимости $S(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ называют соответственно амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной характеристиками преобразователя. Для преобразователя с линейной градуировочной характеристикой амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики полностью характеризуют динамические свойства измерительных преобразователей при синусоидальном входном воздействии. Идеальной амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) считается та, которая не зависит от частоты, т. е. $S(\omega) = S$, где S – статическая чувствительность ИП.

Динамические свойства измерительного преобразователя часто оценивают по рабочей полосе частот. При этом предельные частоты определяются по допустимому спаду АЧХ, задаваемому на уровне 0,707 или 0,9 от номинального значения.

Для измерительных преобразователей, работающих как в статическом, так и в динамическом режимах, АЧХ имеет вид амплитудно-частотной характеристики фильтра нижних частот с одной граничной частотой сверху, а для преобразователей, работающих только в динамическом режиме, АЧХ имеет вид амплитудно-частотной характеристики полосового фильтра с двумя граничными частотами: снизу и сверху.

Комплексная динамическая чувствительность представляет собой частное решение дифференциального уравнения и определяет установившийся процесс при подаче на вход преобразователя синусоидального воздействия.

Решение дифференциального уравнения, как известно, можно искать также в операторной форме, позволяющей определить динамическую чувствительность при любом входном воздействии. Динамическая чувствительность или передаточная функция преобразователя в операторной форме находится по формуле

$$S(p) = \frac{y(p)}{x(p)}. \quad (3.3)$$

Частным случаем передаточной функции является переходная характеристика, представляющая собой временную зависимость выходного сигнала при скачкообразном изменении входного сигнала.

Появление динамической погрешности можно продемонстрировать на графике, иллюстрирующем переходный процесс при скачкообразном изменении входной величины $x(t)$ в предположении, что статическая погрешность отсутствует (рисунок 3.1).

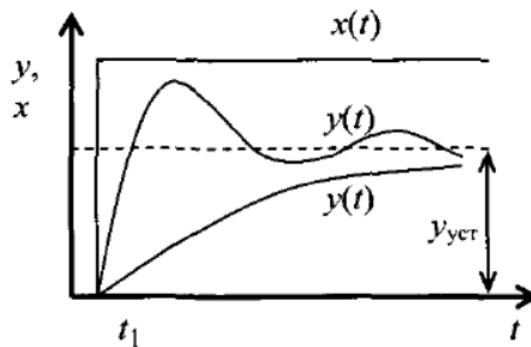


Рисунок 3.1 – Переходный процесс в системе при скачкообразном изменении входной величины

В начальный момент t_1 выходной параметр $y(t)$ значительно отличается от установившегося значения $y_{уст}$, которое он должен иметь в соответствии со значением $x(t)$. Погрешность в динамическом режиме по выходной величине $\Delta y_{\partial} = y(t) - y_{уст}$ постепенно уменьшается и при $t \rightarrow \infty$ $y(t) \rightarrow y_{уст}$. Таким образом, если величина $x(t)$ после скачка остается неизменной, достаточно выждать некоторое время τ и получить неискаженное значение $y_{уст}$. Это время называется временем установления выходного сигнала преобразователя и является частной динамической характеристикой, которая часто нормируется и указывается в паспорте измерительного преобразователя. Очевидно, что время установления выходного сигнала ИП зависит от величины недохода $y(t)$ до $y_{уст}$. Это время называют постоянной времени и определяют на уровне 63 % от установившегося значения $y_{уст}$.

Если входная величина $x(t)$ непрерывно изменяется во времени, то установившееся значение $y(t)$ также зависит от времени и динамическая погрешность всегда присутствует. В этом случае $\Delta y_{\partial}(t) = y(t) - y_{уст}(t)$ является мгновенным значением динамической погрешности выходной величины y . Если предположить, что $y_{уст}(t) = Sx(t)$, то $\Delta y_{\partial}(t) = y(t) - Sx(t)$ и абсолютная динамическая погрешность по входной величине определяется из выражения

$$\Delta x_o(t) = \frac{1}{S} y(t) - x(t). \quad (3.4)$$

Сравнивая формулу (3.4) с (3.3), получим формулу для трансформации динамической погрешности с выхода на вход преобразователя и обратно

$$\Delta x_o(t) = \frac{1}{S} \Delta y(t)_o. \quad (3.5)$$

Соответственно, могут быть найдены и относительные динамические погрешности как по входной, так и по выходной величинам.

Индивидуальное задание

Ознакомиться с основными характеристиками и требованиями, предъявляемыми к первичным измерительным преобразователям. Решить следующие задачи.

1 Чему равно сопротивление R_f проводника цилиндрической формы диаметром d переменному току частотой f , если сопротивление его постоянному току равно R .

2 Найти в момент времени τ относительную погрешность измерительного преобразователя, динамические свойства которого описываются звеном первого порядка с постоянной времени α , измеряющего постоянную физическую величину $U_{ex} = E$, поступившую на его вход в момент времени $t = 0$.

3 Найти значение АЧХ на частоте f интегрирующей RC-цепочки при известных значениях R и C .

4 Построить АЧХ импеданса (полного сопротивления) резистора с номиналом R , если последовательная паразитная индуктивность равна L_s и параллельная паразитная емкость равна C_p .

Контрольные вопросы

1 Какие характеристики измерительных преобразователей относятся к динамическим?

2 Какие динамические характеристики относятся к полным?

3 Что такое динамическая чувствительность?

4 Как определяется амплитудно-частотная характеристика измерительного преобразователя?

5 Что такое переходная характеристика измерительного преобразователя?

4 Согласование измерительных преобразователей

Все измерительные преобразователи можно разделить на преобразователи электрических величин в электрическую величину и преобразователи неэлектрических величин в электрическую величину [3–5].

Преобразователи электрических величин делятся, в свою очередь, на масштабные измерительные преобразователи и преобразователи формы сигналов. Примерами широко распространенных *масштабных преобразователей* являются шунты, делители тока и напряжения, измерительные трансформаторы тока и напряжения, измерительные усилители. Примерами *преобразователей формы* сигналов могут служить аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, модуляторы и демодуляторы.

Преобразователи неэлектрических величин в электрическую величину по выходной величине делят на параметрические и генераторные.

Выходной величиной *параметрических* преобразователей является тот или иной параметр электрической цепи: электрическое сопротивление R , индуктивность L , емкость C и взаимная индуктивность M , изменяющиеся в зависимости от изменения преобразуемой неэлектрической величины. Характерной особенностью параметрических преобразователей является обязательное наличие дополнительного источника энергии, т. к. сами параметры R , L , C , M – пассивные и не могут восприниматься последующими звеньями измерительной цепи непосредственно.

Выходной величиной *генераторных* преобразователей является ЭДС или заряд, функционально связанные с преобразуемой неэлектрической величиной. В этих преобразователях используется энергия объекта, параметры которого преобразуются и, в конечном счете, измеряются или контролируются, т. е. в этом случае часто нет необходимости в дополнительном источнике энергии, что является преимуществом генераторных преобразователей.

Согласование сопротивлений генераторных преобразователей. Есть два преобразователя: генераторный измерительный преобразователь, который представлен своей ЭДС – $E(x)$, которая является функцией входной величины x , и средство измерений с входным сопротивлением R_n (рисунок 4.1).

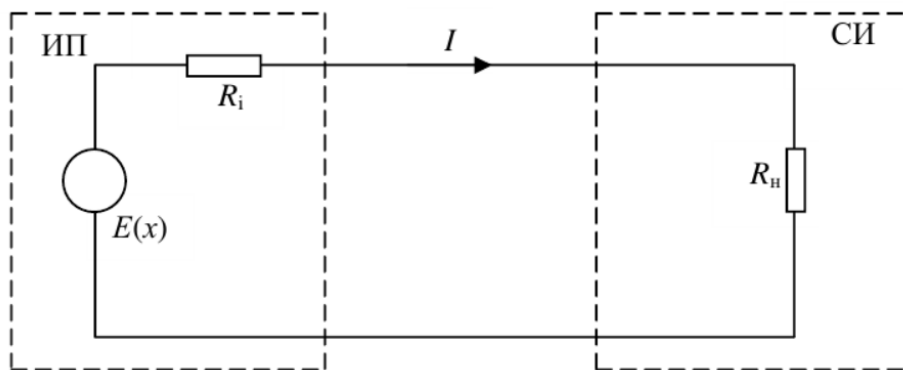


Рисунок 4.1 – Схема соединения генераторного преобразователя и средства измерения

Определим условия, при которых мощность, передаваемая от измерительного преобразователя к средству измерения, является максимальной. Мощность, которая выделяется на нагрузке,

$$P_n = I^2 R_n. \quad (4.1)$$

Если сопротивление нагрузки $R_n = 0$, то ток в рассматриваемой цепи $I = I_{кз} = \frac{E}{R_i}$ и мощность на нагрузке $P_n = 0$. Если $R_n = \infty$, то $I = 0$ и мощность также $P_n = 0$.

Следовательно, должно найтись такое значение R_n , при котором выделяемая мощность P_n максимальна.

Так как $I = \frac{E}{R_i + R_n}$, то, с учетом формулы (4.1), получим следующую формулу: $P_n = I^2 R_n = \frac{E^2 R_n}{(R_i + R_n)^2} = \frac{R_i R_n}{(R_i + R_n)^2} \cdot \frac{E^2}{R_i}$.

Введем величину $P_{кз} = \frac{E^2}{R_i}$ – мощность короткого замыкания измерительного преобразователя, которая является характеристикой измерительного преобразователя. Введем также обозначение

$$\xi = \frac{R_i R_n}{(R_i + R_n)^2} = \frac{\frac{R_n}{R_i}}{\left(1 + \frac{R_n}{R_i}\right)^2} = \frac{a}{(1 + a)^2},$$

где $a = \frac{R_n}{R_i}$.

Таким образом, мощность, выделяемая в нагрузке, определяется формулой

$$P_n = P_{кз} \cdot \xi,$$

где ξ – коэффициент эффективности преобразования энергии преобразователя.

Согласование сопротивлений параметрических преобразователей. Эквивалентная схема соединения параметрического ИП с последующим измерительным показана на рисунке 4.2.

Здесь $E = \text{const}$ и принадлежит внешнему источнику питания (источнику возбуждения параметрического измерительного преобразователя), изменение выходного сопротивление параметрического измерительного преобразователя $\Delta R = \Delta R(x)$ – функция измеряемой величины x . R_0 – внутреннее сопротивление преобразователя ИП1 при отсутствии внешнего сигнала (режим покоя).

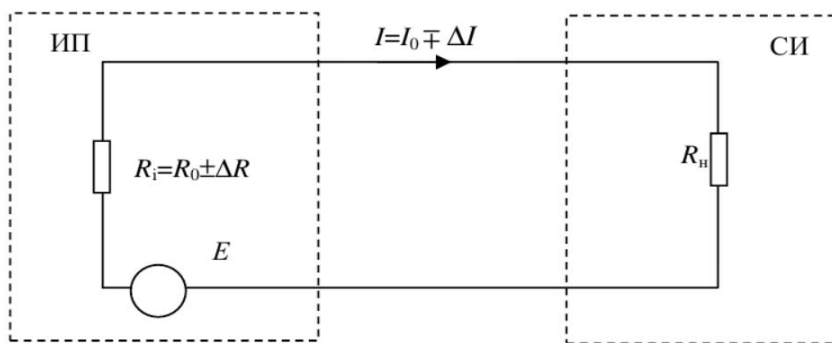


Рисунок 4.2 – Эквивалентная схема соединения параметрического измерительного преобразователя с последующим измерительным

Расчет режима таких цепей разбивают на два этапа.

1 Расчет в режиме покоя или статический режим, когда сигнал x отсутствует и $\Delta I = 0$, $\Delta R = 0$. 2 Расчет режима сигнала (динамический режим), т. е. отклонение от статического режима из-за изменения R_0 на $\pm \Delta R$ под действием входного сигнала x .

В этом случае условно предполагается, что изменение тока (которое на самом деле происходит из-за изменения выходного сопротивления преобразователя ИП на величину ΔR под действием измеряемого сигнала) происходит под действием некоторого дополнительного источника с ЭДС, равной ΔE .

Это основной метод расчета всех усилителей, т. к. используемые в них активные элементы (транзисторы, магнитные элементы и т. д.) являются именно параметрическими преобразователями.

Определим условия согласования сопротивления параметрического преобразователя с СИ. Мощность сигнала, выделяемого в нагрузке,

$$P_{\text{сигн}} = (\Delta I)^2 \cdot R_n = \frac{(\Delta E)^2}{R_0} \cdot \frac{R_0 R_n}{(R_0 + R_n)^2} = P_{\text{кз сигн}} \cdot \frac{a}{(1+a)^2},$$

где $a = \frac{R_n}{R_i}$.

$$\begin{aligned} P_{\text{кз сигн}} &= \frac{(\Delta E)^2}{R_0} = \frac{(\Delta R^2) I_0^2}{R_0} = \frac{(\Delta R)^2}{R_0^2} \cdot \frac{R_0 E^2}{(R_0 + R_n)^2} = \\ &= \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)^2 \cdot \frac{E^2}{R_0} \cdot \frac{R_0}{R_n} \cdot \frac{R_0 R_n}{(R_0 + R_n)^2} = \varepsilon_R^2 P_{\text{кз } E} \cdot \frac{1}{(1+a)^2}, \end{aligned}$$

где ε_R – относительное изменение выходного сопротивления (или относительная чувствительность) измерительного преобразователя, $\varepsilon_R = \frac{\Delta R}{R_0}$;

$P_{\text{кз сигн}}$ – мощность, выделяемая при коротком замыкании измерительного преобразователя при наличии только сигнала;

$P_{кз\ E}$ – мощность, выделяемая при коротком замыкании источника возбуждения измерительного преобразователя.

Таким образом, мощность сигнала, выделяемая в нагрузке параметрического преобразователя, определяется:

- допустимой мощностью рассеивания энергии источника возбуждения этого преобразователя;
- его относительной чувствительностью;
- эффективностью преобразования.

В случае согласования измерительного преобразователя с неоптимальным соотношением выходного и входного сопротивлений широко используются согласующие трансформаторы.

Метод отрицательной обратной связи. Рассмотрим измерительный преобразователь с мультипликативной погрешностью. Процесс преобразования сигнала этим измерительным преобразователем представлен на рисунке 4.3.

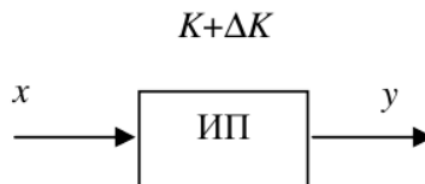


Рисунок 4.3 – Процесс преобразования сигнала преобразователем с мультипликативной погрешностью

Аналитически сигнал на выходе измерительного преобразователя имеет вид

$$y = (K + \Delta K)x.$$

Мультипликативная погрешность такого преобразователя

$$\Delta y = \Delta K \cdot x.$$

Один из методов уменьшения этой погрешности заключается в уменьшении сигнала на входе преобразователя. Это можно осуществить, введя отрицательную обратную связь. Схема преобразователя с отрицательной обратной связью представлена на рисунке 4.4.

Здесь β – коэффициент преобразования обратного преобразователя. Чувствительность такого преобразователя

$$S = \frac{K}{1 + \beta K}.$$

Поэтому, учитывая погрешность измерительного преобразователя ΔK , можно записать $S + \Delta S = \frac{K + \Delta K}{1 + \beta(K + \Delta K)}$. Если $\beta K \ll 1$, то $\Delta S = S \frac{\Delta K}{K} \cdot \frac{1}{1 + \beta K}$.

Отношение $\frac{\Delta S}{S} = \frac{1}{1 + \beta K} \frac{\Delta K}{K} \approx \frac{1}{\Delta K} \cdot \frac{\Delta K}{K}$, т. е. относительная погрешность уменьшается в $1 / \beta K$ раз.

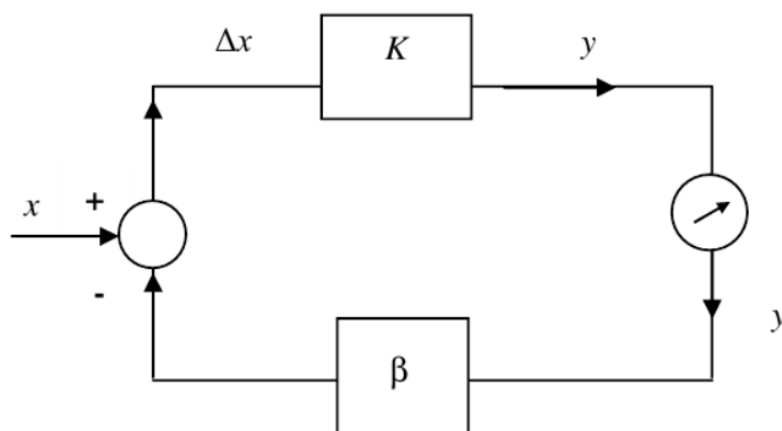


Рисунок 4.4 – Схема преобразователя с отрицательной обратной связью

Метод уменьшения полосы пропускания. Данный метод является весьма эффективным для уменьшения влияния наводок и шумов, проникающих в измерительную цепь.

Индивидуальное задание

Ознакомиться с основными характеристиками и требованиями, предъявляемыми к первичным измерительным преобразователям. Решить следующие задачи.

1 Имеется измерительный преобразователь генераторного типа с внутренним сопротивлением R_i . Построить график зависимости мощности P_n полезного сигнала, выделяемой в нагрузке, от сопротивления нагрузки R_n .

2 Имеется преобразователь генераторного типа с внутренним сопротивлением R_i . Сопротивление нагрузки R_n . Найти коэффициент $\xi_{ГЕН}$ эффективности преобразования энергии преобразователем.

3 Пусть E – ЭДС источника возбуждения параметрического преобразователя, согласованного с нагрузкой. Найти напряжение U на выходе этого источника.

4 Имеется объект измерения параметрического типа с внутренним сопротивлением R_i . В измерительную цепь включают согласующий трансформатор с n_1 витков в первичной обмотке и n_2 витков во вторичной обмотке. Найти сопротивление нагрузки.

Контрольные вопросы

- 1 Какие измерительные преобразователи называются параметрическими?
- 2 Какие измерительные преобразователи называются генераторными?

- 3 Какие способы согласования преобразователей применяются на практике?
 4 В чем суть метода согласования сопротивлений?
 5 В чем суть метода обратной связи?

5 Шумы и помехи

Функция преобразования $y = f(x)$ идеального измерительного преобразователя однозначно связывает выходной сигнал y только с одной входной физической величиной x . Функциональная связь между x и y определяется взаимодействием чувствительного элемента измерительного преобразователя с объектом исследования. В действительности измерительный сигнал зависит от очень большого множества неконтролируемых факторов, характеризующих сам объект, окружающую среду и измерительный прибор, но не включенных в идеализированную и упрощенную функциональную связь $y = f(x)$. В результате наблюдаемый выходной сигнал отличается от идеального, описываемого передаточной функцией ИП [1, 2, 5].

Шумами называются отклонения выходного сигнала

$$\delta(y) = y - f(x), \quad (5.1)$$

обусловленные физическими воздействиями, которые имеют статистическую природу и вследствие этого изменяются во времени случайным образом. В реальных условиях измерительный сигнал всегда приходится выделять на фоне шумов, а предельная чувствительность ИП в отношении слабых сигналов часто определяется именно шумами.

По характеру воздействия на сигнал шумов, как и погрешности, делятся на две группы:

- 1) аддитивные шумы, для которых

$$y = y_{изм} + y_a; \quad (5.2)$$

- 2) мультипликативные шумы, где

$$y = y_{изм} \cdot y_m. \quad (5.3)$$

Здесь $y_{изм} = f(x)$ – информационная составляющая измерительного сигнала $y_{изм}$, а y_a , y_m – шумовая.

Шумы представляют собой случайные процессы во времени, которые описываются с помощью статистических характеристик. В теоретических исследованиях, как правило, используются величины, усредненные по всем возможным реализациям случайного процесса (усреднение по ансамблю) на основе заданных функций распределения. В эксперименте всегда имеют дело с усреднением по некоторому временному интервалу, который может определяться временем быстрогодействия прибора или задаваться условиями наблюдения.

Как уже отмечалось, источники шумов существуют в объекте исследования,

измерительном приборе и окружающей среде. Они могут иметь разную физическую природу.

Тепловой шум. Хаотическое тепловое движение носителей электрического заряда в проводниках и полупроводниках создает тепловые шумы, которые обнаруживаются как флуктуации электрического тока и напряжения. Первые соображения о тепловых шумах были высказаны А. Эйнштейном при его анализе броуновского движения в 1906 г. Тепловые шумы непосредственно в электрических цепях экспериментально наблюдал Дж. Джонсон в 1928 г. В этом же 1928 г. Х. Найквист получил основные формулы для тепловых флуктуаций электрического напряжения и тока.

Тепловой шум влияет на передающие характеристики частей любого измерительного устройства.

Дробовой шум. Возникновение дробового шума обусловлено дискретной природой носителей заряда. Если по сопротивлению течёт постоянный ток, то среднее число носителей заряда, протекающее по нему в единицу времени, постоянно. В то же время в каждый момент времени число носителей заряда статистически изменяется. Это вызывает флуктуации тока. Такое явление называют дробовым эффектом по аналогии с ударами дроби, падающей на металлическую пластину. Соответствующий шум называют дробовым шумом.

Дробовой шум зависит от величины тока, ширины частотной полосы и величины заряда, который переносится каждым носителем. В отличие от теплового шума в сопротивлениях, который зависит от температуры, на дробовой шум внешние условия никак не влияют.

Квантовый шум. Если дискретная природа носителей заряда вызывает дробовой шум, то квантование электромагнитного излучения приводит к флуктуациям «потока» фотонов.

В отличие от теплового шума, уровень которого понижается при высоких частотах, квантовый шум линейно возрастает с частотой. В области $(h\nu / kT) > 1$ он начинает преобладать над тепловым шумом. При комнатной температуре это соответствует оптической и инфракрасной областям спектра. Для описания шумов вводят так называемую шумовую температуру T_R . При этой температуре мощность теплового шума в проводнике равна мощности квантового шума.

Фликкер-шум. Под Фликкер-шумом подразумевают зависимость эффективной величины тока от частоты, которая обусловлена наличием Фликкер-эффекта.

Фликкер-эффект первоначально наблюдался в электронных лампах с оксидными катодами. Он вызван тем, что в таких катодах флуктуирует локальная работа выхода электронов. Эти флуктуации вызывают соответствующие колебания тока. Существует целый ряд физических механизмов, которые вызывают изменение локальной работы выхода. Работа выхода меняется сравнительно медленно, поэтому соответствующий шум в основном замечен в области низких частот.

Магнитные шумы. Возникают в электрических цепях, содержащих ферромагнитные элементы, в которых происходят процессы намагничивания и

размагничивания ферромагнетиков с помощью плавного изменения во времени внешнего магнитного поля. Они обусловлены как изменением объемов, так и переориентацией (поворотами) доменов, из которых состоит ферромагнетик. Плавный рост намагниченности образца с увеличением внешнего магнитного поля может нарушиться, когда на пути увеличения объема домена или поворота домена встречается препятствие в виде какой-либо неоднородности материала. Такими неоднородностями служат дефекты, дислокации, посторонние примеси или локальные механические напряжения, создающие потенциальный барьер для роста или переориентации домена. Преодоление потенциального барьера осуществляется за счет накопленной доменом дополнительной энергии, а сам переход домена в новое состояние происходит во времени скачкообразно. В результате намагниченность ферромагнетика также меняется скачкообразно с характерной длительностью скачков $\tau_b \sim 10^{-4} \div 10^{-3}$ с, а на плавной кривой намагничивания $I(H)$ возникает тонкая пикообразная шумовая структура, получившая название эффекта Баркгаузена.

Генерационно-рекомбинационный шум. В полупроводниках возникает специфический вариант дробового шума – генерационно-рекомбинационный шум. Его часто называют токовым шумом.

Принципиальное отличие полупроводников от вакуумного диода состоит в том, что среднее время жизни носителей заряда (электронов и дырок) в полупроводниках, как правило, очень мало по сравнению со временем, необходимым для переноса носителя заряда от одного конца образца до другого. Поэтому дробовой шум в полупроводниках определяется скоростями генерации и рекомбинации носителей заряда.

Технические шумы. Случайные воздействия внешней среды и нестабильность источников питания определяют технические шумы. По существу, технические шумы обусловлены незамкнутостью системы объект + измерительный прибор. К этим воздействиям относятся механические, связанные с давлением, ускорением и вибрацией, которые вызывают случайные деформации и напряжения в элементах прибора, тепловые, определяемые случайными изменениями Температуры среды, которые приводят к изменению механических, электрических и магнитных характеристик материалов прибора, а также электромагнитные, индуцирующие в проводниках прибора заряды, токи и электрические напряжения, которые искажают измерительный сигнал. Влажная среда способствует протеканию на поверхностях проводников электрохимических реакций, приводящих к коррозии металлических элементов и появлению электрохимических ЭДС. Кроме того, вода, являясь электролитом, способствует замыканию элементов электрической цепи.

Следует также отметить *помехи* в виде электрических токов и напряжений, искажающие электрический измерительный сигнал. Они возникают вследствие термоэлектрических эффектов в области контактов разнородных проводников при изменении температуры, токов утечки, связанных с несовершенством изоляции, ёмкостных наводок, обусловленных зарядкой паразитных емкостей прибора, и индуктивных наводок. ТермоЭДС вызывает смещение нуля, которое

рассматривается как аддитивная помеха. Токи утечки имеют характер мультипликативных помех. Емкостные наводки дают вклад в аддитивные помехи. Индуктивные наводки возникают в переменном магнитном поле или при движении измерительной цепи в постоянном магнитном поле в соответствии с законом электромагнитной индукции и создают аддитивные помехи.

Для защиты от внешних воздействий применяются температурная стабилизация, виброизоляция, измерительные приборы помещаются в проводящие корпуса с толщиной стенок, превышающих глубину скин-слоя, на которую может проникать переменное магнитное поле, и т. д.

Индивидуальное задание

Ознакомиться с основными характеристиками и требованиями, предъявляемыми к первичным измерительным преобразователям. Решить следующие задачи.

1 Два проводника длиной по l см, отстоящие друг от друга на расстояние h , образуют замкнутую цепь. Эта цепь расположена в магнитном поле с индукцией B , изменяющемся с частотой f Гц. Чему равно максимальное напряжение шумов, наводимое на цепь в результате воздействия на нее магнитного поля?

2 Имеется резистор с сопротивлением R . Найти среднее квадратическое значение напряжения на концах резистора, имеющего температуру T в полосе частот Δf .

3 Эквивалентная полоса пропускания белого шума RC-цепочки равна Δf . Найти значение R , если известно значение C .

4 Среднее квадратическое значение помехи при однократном измерении полезного сигнала равно σ . Какое число измерений N нужно провести, чтобы уменьшить помеху в k раз?

Контрольные вопросы

- 1 Что такое шум?
- 2 Что такое аддитивный шум?
- 3 Что такое мультипликативный шум?
- 4 Какие шумы наиболее часто встречаются в практике проведения измерений?
- 5 Что такое тепловой шум?
- 6 Когда возникает дробовый шум?
- 7 Назовите основные способы защиты от помех и шумов.

Список литературы

- 1 **Афанасьев, А. А.** Физические основы измерений и эталоны: учеб. пособие / А. А. Афанасьев, А. А. Погонин. – М. : ИНФРА-М, 2018. – 246 с.
- 2 **Гольдштейн, А. Е.** Физические основы получения информации: учебник / А. Е. Гольдштейн. – М. : Юрайт, 2018. – 219 с.
- 3 Информационно-измерительная техника и электроника. Преобразователи неэлектрических величин : учеб. пособие / под общ. ред. О. А. Агеева, В. В. Петрова. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2018. – 158 с.
- 4 **Аббакумов, К. Е.** Физические основы получения информации: учебник / К. Е. Аббакумов, Е. М. Антонюк, Ю. В. Филатов. – СПб. : ЛЭТИ, 2013. – 320 с.
- 5 **Джилавдари, И. З.** Физические основы измерений (сборник задач): учеб.-метод. пособие / И. З. Джилавдари, Н. Н. Ризноокая. – Минск: БНТУ, 2020. – 57 с.