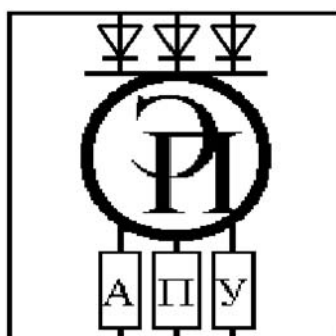


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и АПУ»

ИЗМЕРЕНИЕ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

*Методические рекомендации к самостоятельной работе
для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные
электроприводы» заочной формы обучения*



Могилев 2021

УДК 621.3:531.7
ББК 31.291:30.10
ИЗ7

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и АПУ» «б» января 2021 г.,
протокол № 6

Составитель канд. техн. наук, доц. В. Н. Усик

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

В методических рекомендациях представлен краткий теоретический материал для самостоятельной подготовки по курсу «Измерения основных координат электропривода». Приводятся темы аудиторной контрольной работы.

Учебно-методическое издание

ИЗМЕРЕНИЕ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Ответственный за выпуск	В. Н. Усик
Корректор	Т. А. Рыжикова
Компьютерная верстка	Е. В. Ковалевская

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 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, 2021

Содержание

1	Значение контрольно-измерительной техники в современном производстве. Основные понятия и определения.....	4
2	Характеристики средств измерения.....	7
2.1	Метрологические характеристики.....	7
2.2	Динамические характеристики средств измерения.....	13
2.3	Неметрологические характеристики средств измерения.....	13
3	Структурные схемы средств измерений.....	14
3.1	Схема прибора прямого преобразования.....	14
3.2	Схема преобразования прибора сравнения.....	15
4	Аналоговые измерительные приборы.....	16
4.1	Основные характеристики аналоговых измерительных приборов....	16
4.2	Аналоговые электромеханические измерительные приборы.....	17
5	Электрические измерительные преобразователи: шунты, добавочные сопротивления, делители напряжения, измерительные усилители.....	26
6	Измерительные трансформаторы тока и напряжения.....	29
7	Измерение постоянных и переменных напряжений.....	30
8	Измерение постоянных и переменных токов.....	34
9	Измерение несинусоидальных и импульсных токов и напряжений	34
10	Измерение мощности и энергии.....	36
11	Регистрирующие измерительные приборы.....	37
12	Измерительные мосты.....	39
12.1	Измерительные мосты постоянного тока.....	40
12.2	Измерительные мосты переменного тока.....	41
13	Измерительные генераторы.....	44
13.1	Генераторы низкой частоты.....	44
13.2	Типы задающих генераторов.....	46
14	Темы аудиторной контрольной работы.....	47
	Список литературы.....	48

1 Значение контрольно-измерительной техники в современном производстве. Основные понятия и определения

Координатами электропривода называют любые электрические, механические, магнитные, тепловые переменные, принятые для описания состояния электропривода и управления его состоянием.

Средствами измерений называют технические средства, используемые при измерениях и имеющие нормированные метрологические свойства. Различают следующие виды средств измерений: меры, измерительные приборы, измерительные преобразователи, измерительные установки, измерительные системы.

В ГОСТ 16263 *Метрология. Термины и определения* дано определение понятия «измерение».

Измерение – это нахождение значения физических величин опытным путем с помощью специальных технических средств. Основные признаки понятия «измерение»:

- 1) измерять можно свойства реально существующих объектов познания;
- 2) измерение требует проведения опытов;
- 3) для проведения опытов требуются особые технические средства измерения;
- 4) результатом измерения является значение физической величины.

Принципиальная особенность измерения заключается в отражении размера физической величины числом, которое должно быть выражено в определенных законных единицах.

Средство измерений – это техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические характеристики.

Мера – средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера. Различают однозначные меры, многозначные меры и наборы мер. Однозначная мера воспроизводит физическую величину одного размера, например, нормальный элемент, конденсатор постоянной емкости, гиря. Многозначная мера воспроизводит ряд значений одноименных физических величин различного размера (конденсатор переменной емкости, вариометр индуктивности, линейка с миллиметровыми делениями и т. п.). Набор мер представляет собой специально подобранный комплект мер для воспроизведения ряда значений одноименных величин различного размера, причем меры могут применяться как отдельно, так и в различных сочетаниях. Примерами набора мер являются магазины сопротивлений, емкостей, набор гирь. Магазин мер – это набор мер, конструктивно объединенных в одно целое.

Измерительные приборы – это средства измерений, предназначенные для выработки сигналов измерительной информации, т. е. информации о значениях измеряемой величины в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Измерительные приборы могут быть классифицированы по различным признакам. Измерительные приборы подразделяются на *аналоговые*, показания которых являются непрерывной функцией измеряемой величины, *цифровые*, которые автоматически вырабатывают дискретные сигналы измери-

тельной информации и дают показания в цифровой форме. Измерительные приборы подразделяются также на *показывающие*, которые допускают только считывание показаний оператором, и *регистрирующие*, в которых предусмотрена регистрация показаний. Регистрирующие приборы подразделяются на самопишущие – с записью показаний в форме диаграммы, на которой может быть воспроизведена непрерывная функция измеряемой величины, и печатающие, в которых предусмотрено печатание показаний в цифровой графической форме.

Для получения результата измерения физической величины обязательно должна участвовать мера. У большинства приборов прямого действия, в которых входная величина преобразуется в одном направлении от входа до указателя, роль меры выполняет специальное устройство, откалиброванное с помощью меры при изготовлении прибора. В приборах сравнения производится непосредственное сравнение входной величины с мерой. Примерами приборов сравнения являются мосты, потенциометры, весы.

По роду измеряемой величины приборы делятся на амперметры – для измерения тока; вольтметры – для измерения напряжения; омметры – для измерения сопротивления и т. д.

По характеру применения приборы разделяются на стационарные (щитовые), корпуса которых приспособлены для жесткого крепления на месте установки, и переносные, корпуса которых не предназначены для жесткого крепления на месте установки.

В зависимости от степени защищенности приборы бывают обыкновенными, пыле-, водо-, брызгозащищенными, герметичными и др.

Измерительные преобразователи – это средства измерений, предназначенные для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающиеся непосредственному восприятию наблюдателем. Измерительный преобразователь имеет вход, на который подается преобразуемая величина x (входная величина). Выходная величина преобразователя y (преобразованная величина) связана с входной зависимостью $y = F(x)$, которая называется функцией преобразования.

Существуют также преобразователи с несколькими входами, на которые подаются величины x_1, x_2, \dots, x_n . В этом случае $y = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$, т. е. реализуется зависимость y от всех входных величин или от одной какой-либо величины при неизменных остальных.

Функция преобразования качественно отражает связь между выходной и входной величинами измерительного преобразователя. Для отражения количественной связи между ними вводят градуировочную характеристику – зависимость между значениями величин на выходе и входе измерительного преобразователя – составленную в виде таблицы, графика или формулы. Если в измерительной цепи имеется несколько последовательно включенных измерительных преобразователей, то первый из них, к которому непосред-

ственно подводится измеряемая величина, называется первичным измерительным преобразователем.

В зависимости от характера преобразуемых величин электрические измерительные преобразователи подразделяются на преобразователи электрических величин в электрические величины, неэлектрических величин в электрические, магнитных величин в электрические и электрических величин в неэлектрические.

В зависимости от назначения измерительные преобразователи подразделяются на масштабные, предназначенные для изменения значения величины в заданное число раз, и преобразователи рода величины. К масштабным относятся шунты, делители напряжения, измерительные трансформаторы, измерительные усилители и т. д. Применение этих преобразователей позволяет производить измерения относительно больших токов и напряжений приборами, имеющими меньшие пределы измерений, и, наоборот, измерять малые токи и напряжения приборами, предназначенными для измерения больших токов и напряжений.

К преобразователям электрической величины в электрическую относятся преобразователи электрических величин в цифровой код, напряжения в частоту и период электрических колебаний, активной мощности в постоянное напряжение и т. д. Примером преобразователей неэлектрических величин в электрические могут служить термоэлектрические преобразователи, терморезисторы, тензорезисторы, индуктивные преобразователи и т. д. При помощи этих преобразователей входная неэлектрическая величина (температура, деформация, давление) преобразуется в электрическую величину (ЭДС, приращения электрического сопротивления и индуктивности). Примером преобразователей магнитных величин в электрические могут служить индукционные, квантовые, гальваномагнитные преобразователи. Примером преобразователей электрической величины в неэлектрическую могут быть измерительные механизмы электромеханических приборов, преобразующие ток в угол отклонения стрелки.

По роду выходной величины измерительные преобразователи неэлектрических величин в электрические подразделяются на генераторные, у которых входная величина преобразуется в ЭДС или ток, и параметрические, у которых входная величина преобразуется в один из параметров электрической цепи – сопротивление R , индуктивность L или емкость C .

Измерительный преобразователь в совокупности с измерительным прибором представляет *измерительное устройство*.

Измерительным устройством называют совокупность функционально объединенных средств измерений (мер измерительных приборов, измерительных преобразователей) и вспомогательных устройств. Она предназначена для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем, и расположена в одном месте. Примерами измерительных установок могут служить установки,

предназначенные для градуировки и поверки электроизмерительных приборов, для испытаний магнитных материалов.

Измерительные системы представляют собой совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи. На производстве и при проведении научно-исследовательских работ человеку часто приходится иметь дело с огромным потоком информации, т. е. получать сведения о большом количестве величин, иногда быстро меняющихся. Использование большого числа (сотни и тысячи) отдельных измерительных приборов не всегда позволяет получить нужную информацию, а информация, представленная этими приборами, не может быть воспринята и сохранена человеком в силу физиолого-психологических ограничений. Кроме того, в ряде случаев требуется математическая обработка ряда предварительных данных, что при определенных условиях не всегда может выполнить человек. Таким образом, в случае большого объема информации множество измерительных приборов может оказаться бесполезным. В этом случае на помощь приходят измерительные системы. Они предназначены для автоматического получения измерительной информации от ряда источников, а также для передачи, обработки и представления измерительной информации в той или иной форме. В измерительных системах значения измеряемых или контролируемых величин преобразуются в унифицированные (однородные) сигналы, что позволяет многократно использовать некоторые функциональные блоки системы (например, измерительный усилитель) одними и теми же элементами системы, производить обработку, а в некоторых случаях и передачу сигналов измерительной информации на требуемые расстояния.

Измерительные системы, которые обслуживают объект, находящийся от них на значительном расстоянии, называются телеизмерительными. В телеизмерительных системах используется передача измерительной информации по проводным или волоконным линиям связи, радиоканалам.

Измерительную систему, в которой предусмотрена возможность представления информации оператору, называют информационно-измерительной системой. Если в состав измерительной системы входит свободно программируемая ЭВМ, то система называется измерительно-вычислительным комплексом.

2 Характеристики средств измерения

2.1 Метрологические характеристики

Погрешность измерения – это отклонения результата измерения от истинного значения.

$$\Delta x = x - x_u,$$

где Δx – погрешность измерения;

x – измеренное значение величины;

x_u – истинное значение величины.

В действительности истинное значение величины неизвестно и его заменяют действительным значением x_d . Действительное значение величины получают при помощи эталона или другого прибора более высокого класса точности. Тогда абсолютная погрешность Δx находится как

$$\Delta x = x - x_d,$$

где x_d – действительное значение величины.

Для характеристики средств измерений вводят понятие относительной погрешности приборов, преобразователей и мер. Для приборов и преобразователей вводят также понятие приведенной погрешности, которое широко используется на практике..

Различают две составляющие погрешности измерения:

– *инструментальную*, зависящую от погрешности применяемых средств измерений;

– *методическую*, связанную с несовершенством средств измерений.

Относительная погрешность δ представляет собой отношение абсолютной погрешности к действительному значению входной или воспроизводимой величины x_d . Относительная погрешность обычно выражается в процентах:

$$\delta = (x - x_d) / x_d \cdot 100 \% = \Delta x / x_d \cdot 100 \%.$$

На практике в большинстве случаев при определении δ допустимо относить абсолютную погрешность к значению входной величины, найденному с помощью данного средства измерения.

Приведенная погрешность γ равна выраженному в процентах отношению абсолютной погрешности к нормирующему значению x_N

$$\gamma = (x - x_d) / x_N \cdot 100 \% = \Delta x / x_N \cdot 100 \%.$$

Нормирующее значение величины x_N принимается равным:

а) для средств измерений, за исключением случая неравномерной шкалы, если нулевая отметка находится на краю или вне шкалы – конечному значению диапазона измерений;

б) если нулевая отметка находится внутри диапазона измерений – арифметической сумме конечных значений диапазона измерений;

в) для средств измерений с установленным номинальным значением – этому номинальному значению. Например, для частотомеров с диапазоном измерений от 45 до 55 Гц и номинальной частотой 50 Гц нормирующее значение $x_N = 50$ Гц;

г) для измерительных приборов с существенно неравномерной шкалой нормирующее значение устанавливают равным всей длине шкалы или ее части, соответствующей диапазону измерений. В этом случае абсолютную погрешность выражают, как и длину шкалы, в единицах длины.

Точность измерения – имеется в виду качество измерения, отражающее близость результата измерения к истинному значению измерения величины.

В зависимости от характера изменения различают:

– *статическую погрешность* – погрешность при измерении постоянной во времени величины;

– *динамическую погрешность* – разность между погрешностью в динамическом режиме, т. е. погрешность при измерении переменной во времени величины и статической погрешности, которая соответствует значению измеряемой величины в данный момент времени.

В зависимости от характера измерения различают:

– *систематические погрешности*, остающиеся постоянными или закономерно изменяющимися при повторных измерениях одной и той же величины;

– *случайные погрешности* – составляющие погрешности, изменяющиеся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины.

В зависимости от условий возникновения погрешности различают:

– *основную погрешность* – погрешность средства измерений при нормальных условиях;

– *дополнительную погрешность* – погрешность средства измерений, вызванную отклонением одной или более влияющих величин от нормального значения или их выходом за пределы областей нормальных значений.

Зависимость абсолютной Δ погрешности от входной величины x может быть представлена некоторой полосой неопределенности, обусловленной случайной погрешностью и изменением характеристик средств измерения под действием влияющих величин, поэтому абсолютная погрешность ограничена двумя предельными величинами Δ_{\max} , которые могут быть как положительными, так и отрицательными. Их зависимость от измеряемой величины x характеризуется прямыми l (рисунок 2.1). Уравнение прямой l может быть выражено при помощи двух постоянных коэффициентов a и b . Таким образом,

$$|\Delta_{\max}| = |a| + |bx|,$$

где a – предельное значение аддитивной погрешности;

bx – предельное значение мультипликативной погрешности.

Абсолютные аддитивные погрешности не зависят от значений измеряемой величины x , а мультипликативные – пропорциональны измеряемому значению физической величины x .

Источником аддитивной погрешности является трение в опорах, неточность отсчета, дрейф, наводки, вибрации и другие факторы. От этой погрешности зависит наименьшее значение величины, которое может быть измерено прибором. Источники мультипликативной погрешности – действие влияющих величин на параметры элементов и узлов средств измерений.

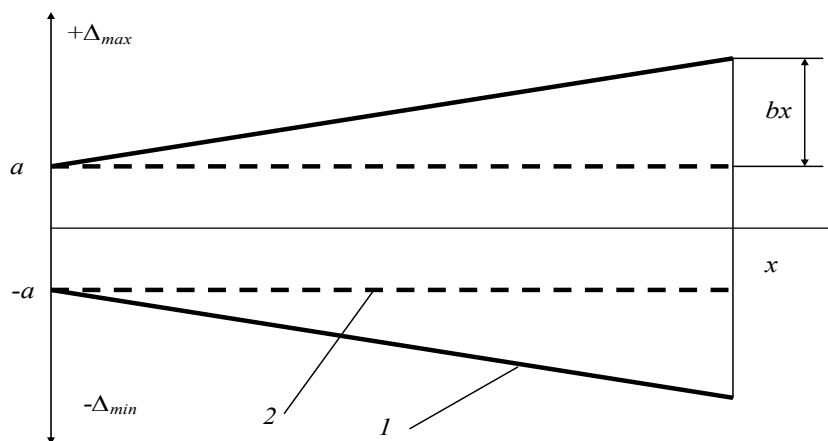


Рисунок 2.1 – Зависимость абсолютной погрешности прибора от измеряемой величины

Согласно ГОСТ 8.401 средствам измерений присваиваются определенные классы точности. Классом точности средства измерения называется обобщенная его характеристика, определяемая пределами допускаемых основной погрешности и погрешностей, вызванных изменением значений влияющих величин.

Класс точности средства измерения может выражаться одним числом или дробью (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Обозначение классов точности

Форма выражения основной погрешности	Расчет допускаемой основной погрешности по формуле	Пределы допускаемой основной погрешности, %	Обозначение класса точности	
			в документации	на средстве измерений
Приведенная основная погрешность	$\gamma = (x - x_0) / x_N = \pm p$	$\gamma = \pm 1,5$	Класс точности 1,5	Для средства измерения с равномерной шкалой – 1,5
		$\gamma = \pm 0,5$	Класс точности 0,5	Для средства измерения с неравномерной шкалой – 0,5 ▽
Относительная основная погрешность	$\delta = \Delta x / x_0 = \pm q$ $\delta = \pm [c + d (X_k / x - 1)]$	$\delta = \pm 0,5$	Класс точности 0,5	○ 0,5
		$\delta = \pm [0,1 + 0,05 \times (X_k / x - 1)]$	Класс точности 0,1/0,05	0,1/0,05
Абсолютная основная погрешность	$\Delta x = \pm a$ $\Delta x = \pm (a + bx)$ или по более сложной формуле	–	Класс точности М	М
		–		

У приборов, аддитивная составляющая погрешности которых преобладает над мультипликативной, все значения погрешностей оказываются в пределах прямых 2, параллельных оси x (см. рисунок 2.1). В результате абсолютная и приведенная погрешности прибора оказываются постоянными в любой точке его шкалы. У таких приборов класс точности выражается одним числом, выбираемым из ряда $(1; 2; 2,5; 4; 5) \cdot 10^n$, где $n = 1, 2, -1, -2$ и т. д.

У приборов, класс точности которых выражается одним числом, основная приведенная погрешность прибора в рабочем диапазоне шкалы, выраженная в процентах, не должна превышать значения, соответствующего классу точности. К таким приборам относится большинство регистрирующих и аналоговых показывающих приборов.

Класс точности средств измерения, у которых аддитивная и мультипликативная составляющие основной погрешности соизмеримы, обозначается двумя числами, разделенными косой чертой, например, класс точности 0,1/0,05. Предельные значения основной относительной погрешности средства измерения, выраженные в процентах, в этом случае могут быть определены путем расчета по формуле

$$\delta_{\max} = \pm [c + d (| X_k / x | - 1)],$$

где X_k – больший по модулю из пределов измерений;

x – измеряемая величина;

c и d – положительные постоянные числа.

Класс точности должен удовлетворять условию $c / d > 1$. Так как относительная, абсолютная и приведенная погрешности взаимосвязаны, то, зная одну из них, можно определить остальные. К приборам, класс точности которых выражается дробью, относятся цифровые приборы и приборы сравнения как с ручным, так и с автоматическим уравниванием.

Функция преобразования (статическая характеристика) – это функциональная зависимость между информативными параметрами выходного и входного средств измерения. Функцию преобразования, принимаемую для средства измерения и установленную в технической документации, называют номинальной функцией преобразования. Функция преобразования может быть задана графически, таблицей или в виде функциональной зависимости.

Пути повышения точности средств измерений:

– стабилизация важных параметров элементов и узлов средств измерений технологическим путем, использование материалов с малой зависимостью свойств от внешних факторов;

– методы защиты средств измерений от быстроизменяющихся влияющих величин, т. е. уменьшение случайных погрешностей путем фильтрации, теплоизоляции, экранирования, амортизации;

- стабилизация медленно изменяющихся влияющих величин;
- методы коррекции составляющих систематической погрешности – аддитивной, мультипликативной, погрешности от нелинейности;
- методы статистической минимизации обработки результатов наблюдения при наличии случайной погрешности.

Коррекцию аддитивной составляющей погрешности можно выполнить периодической проверкой положения нуля в процессе измерения, мультипликативной составляющей – калибровкой измерительного прибора.

Существуют методы коррекции погрешностей, позволяющие автоматически корректировать отдельные составляющие погрешности.

Диапазон измерения – область значений между верхним и нижним пределами измерений. Верхним и нижним пределами измерений прибора называются соответственно наибольшее и наименьшее значения величин, которые могут быть измерены с нормированной погрешностью.

Диапазон измерений может состоять из нескольких частей (поддиапазонов), для каждой из которых могут быть нормированы разные погрешности.

Для измерительных преобразователей верхним и нижним пределами преобразований следует считать соответственно наибольшее и наименьшее значения входной (или выходной) величины, в пределах которых нормирована крутизна преобразователя.

От диапазона измерений следует отличать диапазон показаний – область значений входной величины, ограниченную конечным и начальным значениями шкалы прибора.

Порог чувствительности – изменение измеряемой величины, вызывающее наименьшее изменение показаний, обнаруживаемое наблюдателем при нормальном для данного прибора способе отсчета.

Быстродействие – число измерений (преобразований), выполняемых в единицу времени. Эта характеристика особенно важна для цифровых приборов и преобразователей, а также для самопишущих приборов и измерительных систем, когда одним прибором с помощью коммутирующего устройства необходимо измерять несколько медленно меняющихся величин.

Время установления показаний (время успокоения) – это промежуток времени, который проходит с момента изменения измеряемой величины до момента, когда указатель займет положение, соответствующее новому значению измеряемой величины.

Под временем установления показаний электроизмерительного прибора понимается интервал времени, прошедший с момента подключения или изменения измеряемой величины до момента, когда отклонение указателя от установившегося значения не превышает 1 % длины шкалы. Время установления показаний для большинства типов приборов не должно превышать 4 с.

2.2 Динамические характеристики средств измерения

Динамические характеристики прибора определяют динамическую погрешность. Есть полная динамическая характеристика, однозначно определяющая изменение выходного сигнала средства измерения при любом изменении во времени информативного и неинформативного параметра выходного сигнала влияющей величины или нагрузки.

К полным динамическим характеристикам относят импульсную переходную, амплитудно-частотную и фазовую характеристики и передаточную функцию.

Частная динамическая характеристика не отражает полных динамических свойств средств измерения. Например, коэффициент демпфирования подвижной системы аналоговых измерительных механизмов.

2.3 Неметрологические характеристики средств измерения

Надежность средств измерений – это их способность сохранить заданные характеристики при определенных условиях работы в течение заданного времени. Если значение одной или нескольких характеристик средств измерений выходит из заданных предельных значений, то говорят, что имеет место отказ.

Количественной мерой надежности является вероятность безотказной работы средств измерений в заданных промежутках времени и условиях работы. Вероятностью безотказной работы называется вероятность того, что в течение определенного времени T непрерывной работы не произойдет ни одного отказа. Время безотказной работы указывается в технической документации на средства измерений. Часто пользуются приближенным значением этого показателя, определяемым отношением числа средств измерений, продолжающих после определенного времени T безотказно работать, к общему числу испытываемых средств измерений.

К показателям надежности относят также среднее время безотказной работы средств измерений, которое определяется как среднеарифметическое время исправной работы. Обычно, когда средства измерений начинают выпускать серийно, некоторая небольшая часть их отбирается для испытаний на надежность. Показатели надежности, определенные по результатам этих испытаний, присваивают всей серии средств измерений.

Отказ – нарушение работоспособности средства измерения.

Наработка на отказ – это отношение наработки ремонтируемого средства измерения к числу отказов в течение этой наработки.

Срок службы и ресурс – это календарная продолжительность эксплуатации средства измерения и его наработка от ее начала до наступления такого состояния, при котором дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена.

К неметрологическим характеристикам средств измерения также относятся *габариты, масса, металлоемкость, вид климатического исполнения.*

3 Структурные схемы средств измерений

3.1 Схема прибора прямого преобразования

Измерительным прибором прямого преобразования называется прибор, в котором предусмотрено одно или несколько преобразований сигнала измерительной информации в одном направлении. Типовая структурная схема прибора прямого преобразования приведена на рисунке 3.1.

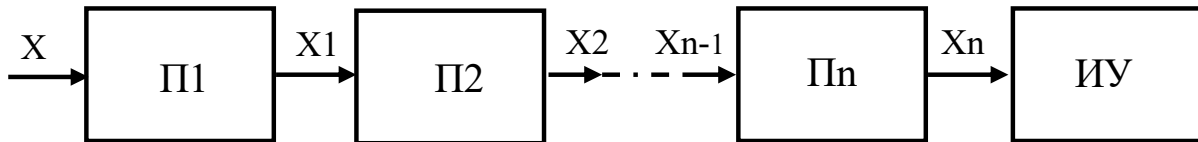


Рисунок 3.1 – Структурная схема прибора прямого преобразования

Прибор состоит из последовательно соединенных измерительных преобразователей $П1, П2, \dots, Пn$ и измерительного устройства (ИУ), тип которого определяется принадлежностью прибора к той или иной классификационной группе. Входной сигнал X последовательно преобразуется в первичном и промежуточных преобразователях в выходной сигнал Xn . Если все преобразования – линейные звенья, а измерения являются статическими, то

$$Xn = K1 \cdot K2 \cdot \dots \cdot Kn \cdot X,$$

где $K1, K2, Kn$ – коэффициенты преобразования каждого из преобразователей, $K1 = X1/X, K2 = X2/X1, Kn = Xn/Xn - 1$.

Показание прибора

$$\alpha = S_{uy} \cdot Xn,$$

где S_{uy} – чувствительность измерительного устройства.

Величина чувствительности прибора определяется значением чувствительности измерительного устройства и результирующим коэффициентом преобразования.

$$S = K1 \cdot K2 \cdot \dots \cdot Kn \cdot S_{uy} = K \cdot S_{uy}.$$

Отсюда следует, что изменение коэффициента преобразования любого преобразователя приводит к изменению показаний прибора. Таким образом, в приборах прямого преобразования происходит суммирование погрешностей, вносимых отдельными преобразователями, что затрудняет изготовление приборов высокой точности.

3.2 Схема преобразования прибора сравнения

В приборах сравнения измеряемая величина сравнивается с известной величиной, воспроизводимой с помощью меры или набора мер. Обязательным узлом такого прибора является схема сравнения, где осуществляется сравнение входного сигнала с сигналом, поступающим от меры, – X_m . Типовая структурная схема такого прибора приведена на рисунке 3.2.

В результате сравнения образуется разностный сигнал ΔX , который по цепи обратного преобразования передается к ИУ. С помощью цепи обратного преобразования обеспечивается изменение X_m и реализуется одна из модификаций метода сравнения.

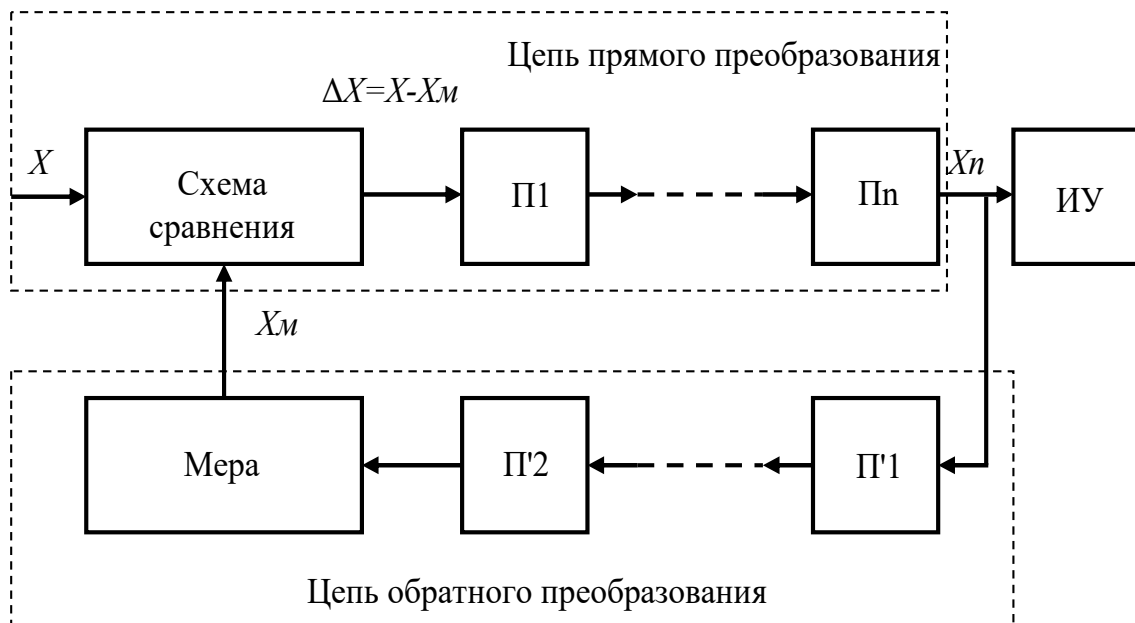


Рисунок 3.2 – Структурная схема прибора сравнения

При $\Delta X = X - X_m$, равном нулю реализуется нулевой метод. При $\Delta X \neq 0$ реализуется дифференциальный метод.

Значение величины меры определяется как

$$X_m = \beta \cdot X_n,$$

где β – результирующий коэффициент цепи обратного преобразования.

Если $\Delta X = 0$, то $X_m = X$ и

$$X_n = X/\beta, \quad (3.1)$$

т.е. X_n не зависит от коэффициента преобразования цепи прямого преобразования.

Чувствительность прибора при этом

$$S = S_{uy}/\beta .$$

Если же $\Delta X \neq 0$, то тогда

$$X_n = K \cdot \Delta X; \quad X_n = \frac{K}{1 + K \cdot \beta} X \quad (3.2)$$

и, соответственно,

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

Если $K \cdot \beta$ много больше 1, то выражение (3.2) переходит в выражение (3.1). Это значит, что нестабильность K не влияет на работу прибора. Для получения высокой чувствительности необходимо снижать коэффициент β , а для выполнения условия $K \cdot \beta$ много больше 1 необходимо увеличивать K .

Таким образом, всегда имеется возможность создания приборов сравнения с высокой точностью и чувствительностью.

4 Аналоговые измерительные приборы

4.1 Основные характеристики аналоговых измерительных приборов

Аналоговый измерительный прибор характеризуется тем, что информационный параметр входного сигнала преобразуется в информационный параметр выходного сигнала. При этом измеренное значение может принимать любые значения в пределах заданных границ.

Каждый измерительный прибор состоит из трех функциональных блоков: первичного преобразователя, согласующего устройства (блока сравнения) и устройства вывода измерительной информации. Каждый функциональный блок может рассматриваться как соединение одинаковых или различных по своим функциональным характеристикам элементов и узлов. При этом не всегда возможно однозначно разделить отдельные функциональные блоки.

В настоящее время имеется свыше 10000 различных аналоговых электроизмерительных приборов, поэтому существуют соответствующие классификации данных приборов. Выделим основные признаки, по которым классифицируются электроизмерительные приборы:

- измеряемая величина;
- принцип измерения;
- виды измерительного сигнала, преимущество использования в измерительных приборах;
- метод измерений;

- характер изменения измерительного сигнала (линейный, нелинейный);
- режим передачи сигнала (статический, динамический).


Электрические аналоговые приборы характеризуются высоким временным разрешением, простотой реализации математических операций, большим усилением сигнала и использованием в ряде случаев бесконтактных измерительных преобразователей. К этому можно добавить многоканальность измерения отсчетов, почти неограниченную возможность дистанционной передачи данных, простую реализацию.

К недостаткам можно отнести подверженность влиянию внешних помех (температуры, магнитного поля, вибраций и т. п.)

4.2 Аналоговые электромеханические измерительные приборы

Электромеханические приборы применяют для измерения электрических величин в цепях постоянного и переменного тока низкой частоты (до 1000 Гц). Широко используются в качестве входных устройств приборов для измерения магнитных величин, параметров радиосигнала, характеристик электрических цепей. Электромеханические преобразователи, как правило, состоят из простейшей схемы преобразователя измерительного механизма.

Основой всех электромеханических приборов является измерительный механизм, имеющий подвижную и неподвижную части, а также отсчетное устройство. В измерительном механизме электрическая энергия преобразуется в механическую. По принципу действия электромеханические измерительные приборы делятся на магнитоэлектрические, электромагнитные, ферродинамические, электродинамические, электростатические, индукционные.

Магнитоэлектрические приборы. Основаны на взаимодействии проводника (рамки с током) с полем постоянного магнита. Условное обозначение данных приборов  или буквенное М.

Разновидностью магнитоэлектрического прибора является прибор магнитоэлектрической системы с подвижным магнитом.

Вращающий момент создается в результате взаимодействия магнитного поля постоянного магнита и магнитного поля рамки. Принцип действия заключается в следующем: подвижная рамка измерительного механизма, представленного на рисунке 4.1, находится в равномерном радиальном магнитном поле. При протекании по обмотке рамки тока возникают силы F , стремящиеся повернуть рамку так, чтобы её плоскость стала перпендикулярной к направлению O_1-O_2 . При равенстве вращающего и противодействующего моментов подвижная часть останавливается. Противодействующий момент создается упругими элементами. При перемене тока в обмотке меняется на обратное направление отклонения подвижной части, из этого следует, что при включении прибора следует соблюдать полярность.

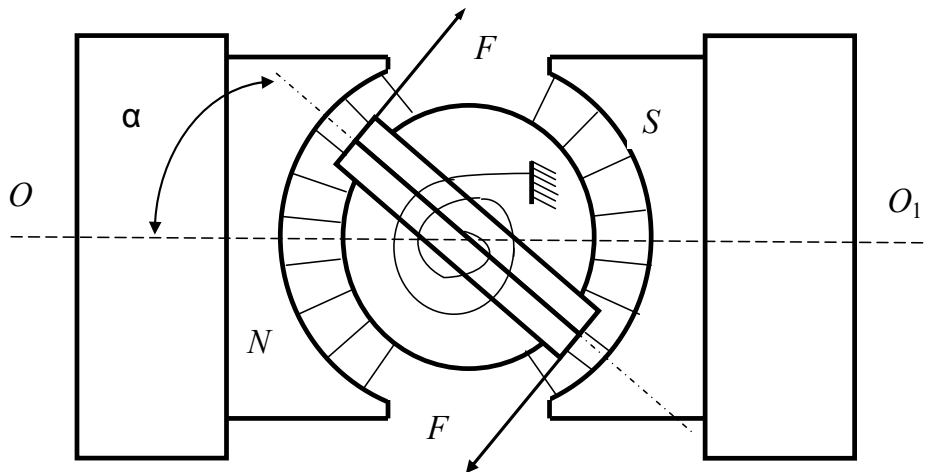


Рисунок 4.1 – Схема магнитоэлектрического измерительного механизма

Характеристики магнитоэлектрических приборов:

- чувствительность не зависит от угла поворота и постоянна по всей шкале, шкала равномерная;
- относится к числу наиболее точных приборов (класс точности до 0,1);
- шкала имеет равномерный характер;
- из-за сильного собственного магнитного поля влияние внешних полей несущественно;
- внешние электрические поля на работу почти не влияют;
- температурные погрешности могут быть скомпенсированы с помощью специальных схем;
- высокая чувствительность при малой потребляемой мощности.

Недостатки приборов этой системы:

- сложная и дорогая конструкция;
- невысокая перегрузочная способность;
- использование приборов данной системы для измерений в цепях постоянного тока.

Магнитоэлектрические измерительные механизмы с механическим противодействующим моментом используют в качестве амперметров, вольтметров, гальванометров, некоторых типов омметров.

Электромагнитная система основана на взаимодействии ферромагнитного сердечника с неподвижной катушкой, через обмотку которой протекает ток.

Условное обозначение: ⚡ или буквенное Э.

Наибольшее распространение получили три конструкции измерительных механизмов: с плоской катушкой; с круглой катушкой; с замкнутым магнитопроводом.

Принцип действия механизма изображен на рисунке 4.2.

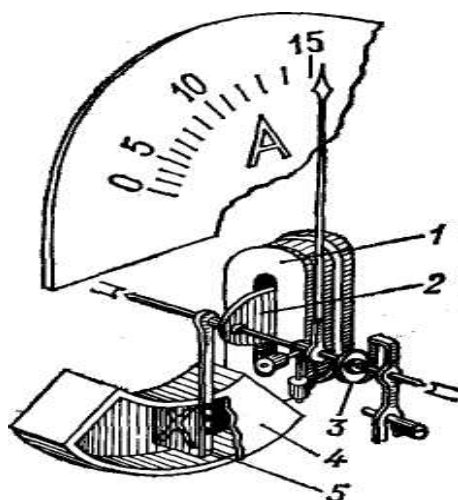


Рисунок 4.2 – Электромагнитный измерительный механизм с плоской катушкой

На катушку *1* наматывается медный провод. В катушке имеется зазор, в который может входить эксцентрично укрепленный на оси сердечник *2*. Материал обладает высокой магнитной проницаемостью. При наличии тока в катушке сердечник стремится расположиться в месте с наибольшей концентрацией поля, то есть втягивается в зазор катушки. Как следствие, закручивается пружинка *3* и создается противодействующий момент. Недостатком механизмов с плоской и круглой катушкой является сильное влияние на показания внешних магнитных полей. Для защиты применяют экранирование.

На рисунке 4.3 изображен механизм с замкнутым магнитопроводом. Принцип его действия: катушка *1* помещается на магнитопровод *2* с полюсными наконечниками *3*. При наличии тока в обмотке катушки подвижный сердечник *4* стремится повернуться по часовой стрелке вокруг точки *0*, втягиваясь в рабочее пространство между полюсными накладками.

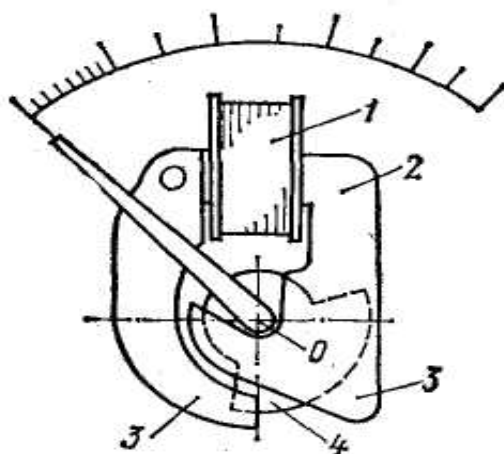


Рисунок 4.3 – Электромагнитный измерительный механизм с замкнутым магнитопроводом

Преимущества таких механизмов: повышенная чувствительность; уменьшения погрешности от влияния внешних магнитных полей.


Преимущества электромагнитных приборов:

- простота конструкции, как следствие, дешевизна и надежность;
- выдерживают большие перегрузки;
- возможна работа в высокочастотных цепях постоянного и переменного токов (до частоты 10 кГц).

Недостатки электромагнитных приборов:

- малая точность;
- относительно малая чувствительность.

Электростатическая система. Использует силы электростатического взаимодействия между подвижными и неподвижными электродами.

Условное обозначение:  или буквенное С.

В приборах электростатической системы отклонение подвижной части связано с изменением ёмкости, которое происходит вследствие изменения:

- активной площади пластин;
- изменения расстояния между пластинами.

На рисунке 4.4 изображен прибор, работа которого основана на изменении активной площади пластин.

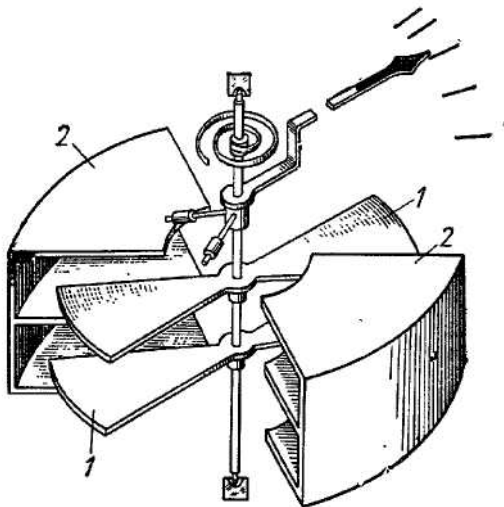


Рисунок 4.4 – Электростатический измерительный механизм с изменением активной площади электродов

Данный механизм состоит из подвижных и неподвижных частей. Неподвижная часть – несколько камер 2 (чем больше камер, тем больше чувствительность). Камера 2 – две металлические пластины с воздушным зазором. В зазор входит алюминиевая пластина 1 подвижной части. Если к подвижной и неподвижной пластинам подвести измеряемое напряжение, то они зарядятся противоположными по знаку зарядами. Под действием сил притяжения подвижные пластины стремятся внутрь камер. Поворот подвижных пластин,

жёстко закреплённых на оси, вызовет закручивание упругих элементов, которые создают противодействующий момент. При равенстве моментов подвижная часть останавливается и на шкале фиксируется измеряемое напряжение. Механизм может применяться в вольтметрах высокого напряжения (до 300 кВ).

Приборы, работающие по принципу изменения расстояния между электродами, состоят из двух неподвижных пластин 1, между которыми на двух металлических ленточках подвижная пластина 3 (рисунок 4.5).

Подвижный электрод электрически соединён с одной и изолирован от другой пластины. При наличии напряжения пластина 3 притягивается к одной и отталкивается от другой пластины 1. Перемещение пластины 3 посредством тяги 7 и мостика 4 передаётся на ось 6 и стрелку 5. Противодействующий момент создаётся весом пластины 3. Механизм применяется в вольтметрах с пределом измерения до 10 кВ.

Характеристики приборов электростатических систем:

- применяется в цепях постоянного и переменного тока;
- рабочие частоты 20...30 МГц в маломощных цепях;
- класс точности 1,0; 1,5; 2,5 (может быть 0,05 и 0,1);
- не влияет температура воздуха, внешние магнитные поля;
- малое собственное потребление тока;
- показание прибора зависит от внешнего электрического поля (в данном случае применяют электростатическое экранирование).

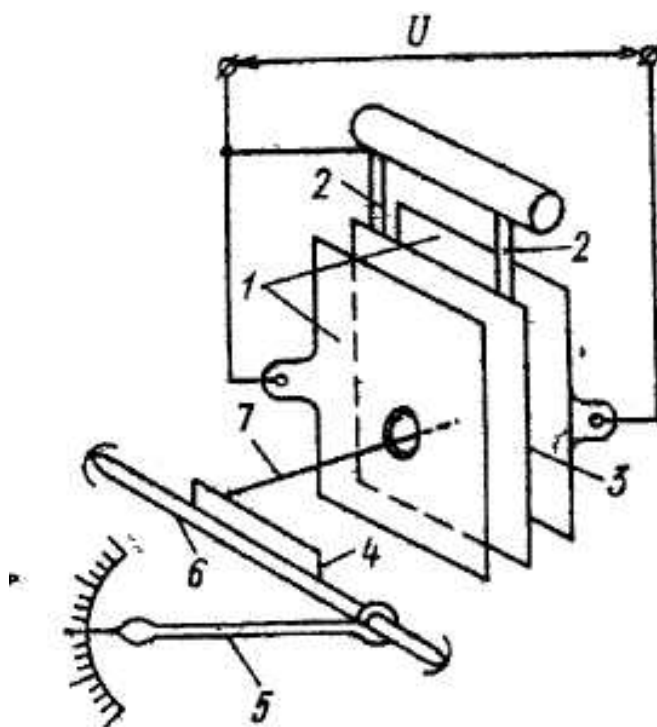



Рисунок 4.5 – Электростатический измерительный механизм с изменением расстояния между электродами

Электродинамическая система основана на использовании сил взаимодействия между подвижной и неподвижной катушкой с током. Условное обозначение:  или буквенное Д.

Прибор такой системы изображен на рисунке 4.6. Неподвижная катушка 1 состоит из двух частей с воздушным зазором (медь на изоляционном каркасе). Подвижная катушка 2 бескаркасная и состоит из меди или алюминия. Для включения подвижной катушки в цепь используются пружины и растяжки. Так как собственное магнитное поле невелико, то необходима защита от внешних магнитных полей. При наличии тока в обмотках возникают силы, стремящиеся повернуть подвижную часть так, чтобы магнитные потоки подвижных и неподвижных катушек уравнились. В электродинамических механизмах вращающий момент создается магнитными потоками, действующими в воздушной среде. Это исключает возможность возникновения погрешностей из-за вихревых токов, гистерезиса.

Характеристики приборов электродинамических механизмов:

- приборы – одни из самых точных для измерения переменного тока и напряжения (класс точности 0,1; 0,2 и 0,5);
- работают в цепях постоянных и переменных токов до частоты 2...3 кГц;
- большая потребляемая мощность;
- плохо переносят механические воздействия (удары, тряску).

Применение такие системы нашли в вольтметрах, амперметрах, ваттметрах.

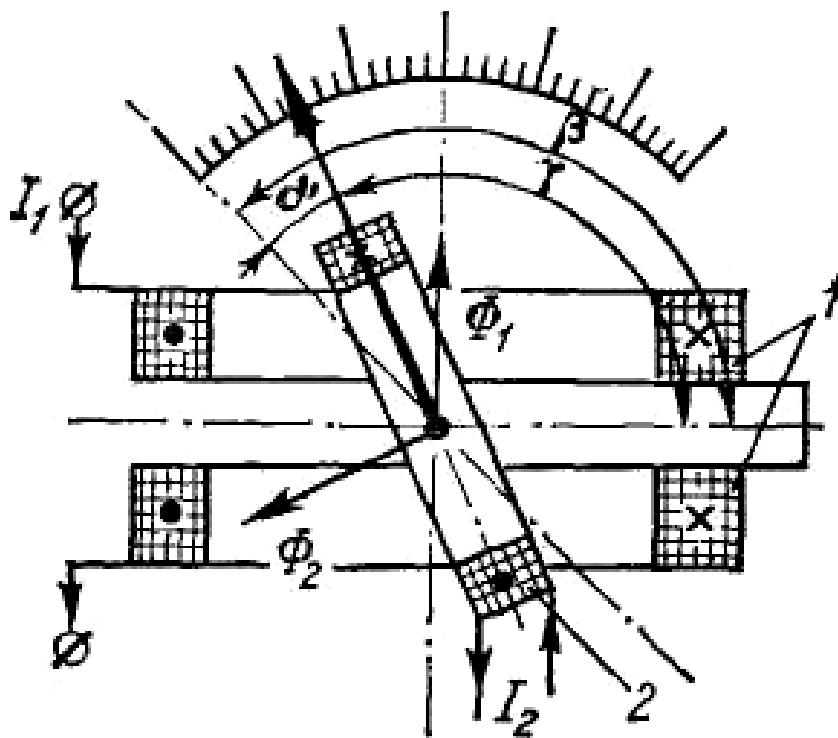


Рисунок 4.6 – Электродинамический измерительный механизм

Индукционная система основана на взаимодействии переменных магнитных полей, создаваемых неподвижными катушками, с токами индукционными этими полями в подвижной части механизма. Условное обозначение: \odot .

В настоящее время широко используются счетчики электрической энергии индукционной системы (рисунок 4.7). Измерительный механизм этой системы имеет два независимых магнитопровода, разнесенных в пространстве.

Обмотка 4 одного из магнитопроводов – обмотка напряжения (число витков большое, большая индуктивность). Обмотка 1 другого магнитопровода является токовой, имеет небольшое число витков сравнительно большого диаметра. Токи в цепях магнитопроводов возбуждают переменные потоки одинаковой частоты, которые, пересекая алюминиевый диск 2, индуцируют в нем ЭДС. В диске формируются вихревые токи, совпадающие по фазе с соответствующей ЭДС, т. к. индуктивность диска на частоте в 50 Гц мала. В соответствии с законом Био-Савара появляются силы и вращающие моменты, совпадающие по направлению действия. Средний за период вращающий момент оказывается пропорционален активной мощности измерительной цепи.

В отличие от аналоговых показывающих приборов класс точности счетчика определяется значением относительной погрешности. Наиболее распространены классы точности 1,0 и 2,5.

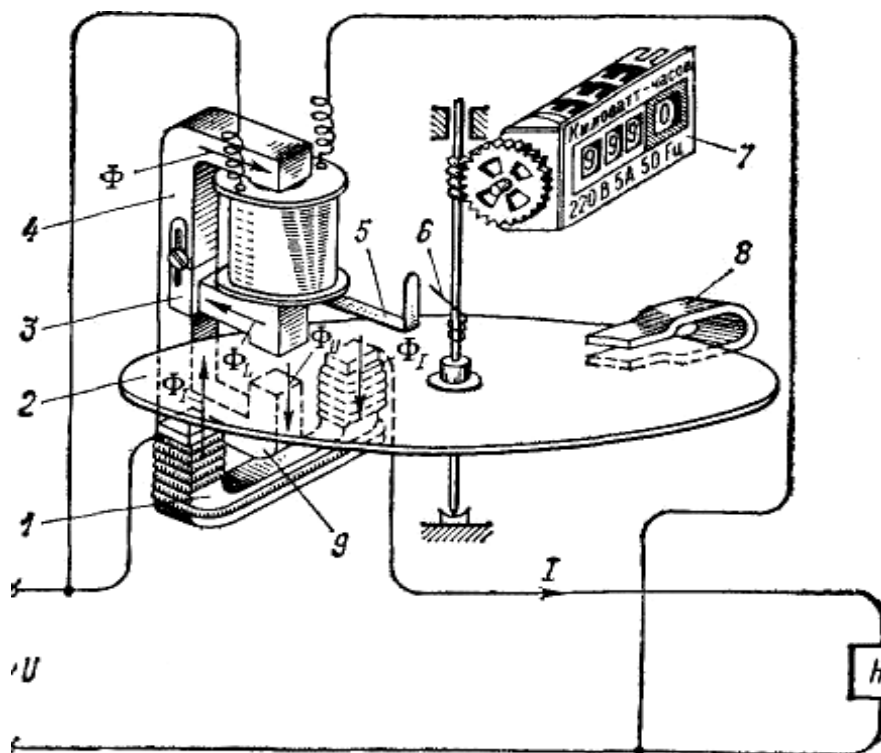



Рисунок 4.7 – Схема индукционного счетчика энергии

Ферродинамическая система основана на взаимодействии рамки с током и поля электромагнита. Условное обозначение: .

Ферродинамические приборы отличаются от электродинамических измерительных механизмов тем, что неподвижные катушки располагаются на сердечнике из ферромагнитного материала (рисунок 4.8). Это приводит к значительному увеличению вращающего момента и уменьшению влияния внешних магнитных полей. Наличие в измерительных механизмах нелинейного элемента (магнитопровода) снижает точность.

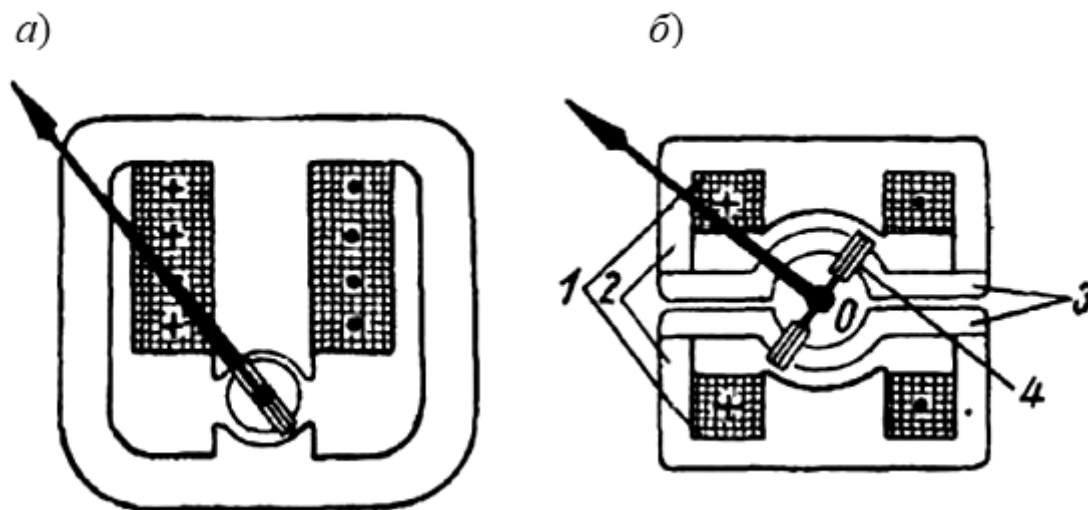


Рисунок 4.8 – Ферродинамический измерительный механизм

В таких приборах сердечники набираются из пластин, которые выполняются из электротехнических сталей. Пластины изолируются друг от друга. Для уменьшения погрешностей от вихревых токов подвижные катушки выполняются бескаркасными. Для успокоения применяют магнитоиндукционные успокоители. Вращающий момент ферродинамических измерительных механизмов возникает в результате взаимодействия подвижной катушки с током и магнитного потока, создаваемого неподвижными катушками. Ферродинамические приборы используются как стационарные приборы для измерения малых токов. Класс точности 1,5 и 2,5 при частоте от 10 до 1500 Гц переменного тока. Не очень чувствительны к тряске, вибрации, ударам. Применяются в самопишущих приборах.

Существуют также измерительные механизмы *магнитоиндукционной, вибрационной и тепловой систем*. Однако они используются редко.

Разновидностью рассмотренных выше систем являются приборы называемые логометрами. Логометры – измерительные механизмы, показывающие отношение двух электрических величин (чаще всего токов).

Наряду с действующими приборами, в цепях переменного тока широко используются приборы, состоящие из магнитоэлектрического измерительного механизма и преобразователя переменного тока в постоянный. К ним относятся термоэлектрические и выпрямительные приборы.

Термоэлектрические приборы. Основной узел этих приборов – термопреобразователь, который преобразует действующее значение измеренного тока в постоянное напряжение. Он состоит из нагревательного элемента I и термопары 2 (рисунок 4.9).

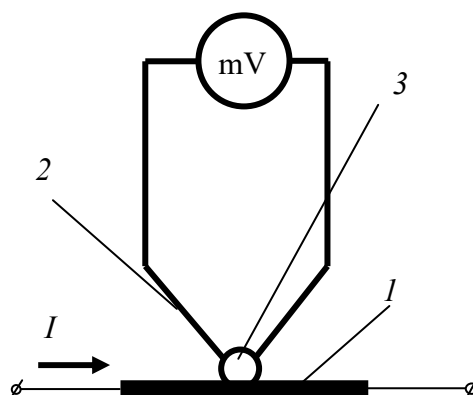


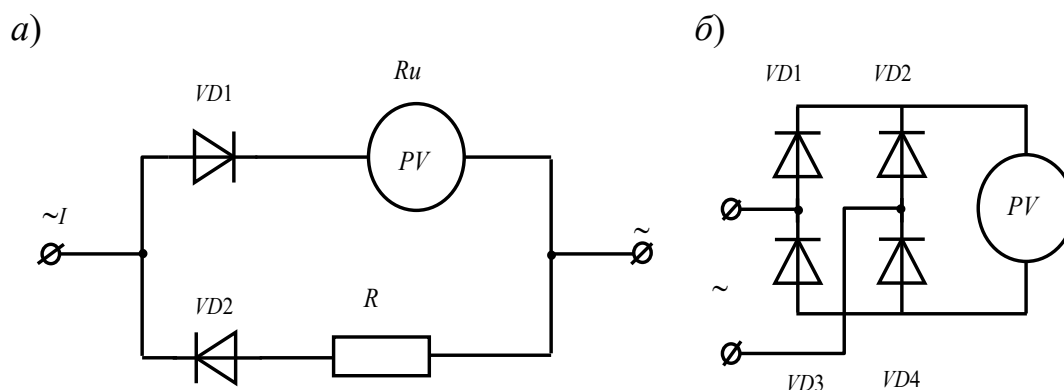
Рисунок 4.9 – Схема термоэлектрического преобразователя

ЭДС термопары пропорциональна разности температур ее горячего спая и холодных концов. Если температура горячего спая термопары и нагревателя, холодных концов и окружающей среды соответственно равны, то значение термоЭДС термопары пропорционально квадрату действующего значения тока. Существуют контактные и бесконтактные преобразователи. В контактных преобразователях горячий спай приваривается к нагревателю (имеет с ним электрический контакт). В бесконтактных преобразователях термопара и нагревательный элемент соединены стеклянной 3 или керамической каплей (нет электрического контакта). Бесконтактные преобразователи выполняют в виде батарей.

Достоинством таких преобразователей является независимость показаний от частоты и формы кривой измеряемой величины. К недостаткам же можно отнести низкую перегрузочную способность и зависимость ЭДС преобразователя от напряжения протекания тока по элементу. Шкала у прибора неравномерная. Класс точности – не выше 1,5.

Выпрямительные приборы. Среди приборов такого типа распространены амперметры и вольтметры, которые представляют собой последовательное соединение выпрямительного преобразователя и магнитоэлектрического измерительного механизма (рисунок 4.10).

В качестве преобразователей используются одно- и двухполупериодные схемы выпрямителей. Последние могут быть с четырьмя или двумя диодами и двумя резисторами. Такие измерительные механизмы реагируют на среднее значение вращающего момента. В схеме двухполупериодного выпрямителя ток по нагрузке протекает в течение всего периода, поэтому чувствительность такого преобразователя в два раза выше.



a – однополупериодная схема выпрямления; *б* – двухполупериодная схема выпрямления

Рисунок 4.10 – Схемы включения измерительного механизма и диодов

Класс точности таких преобразователей – 1,0 и ниже. Из-за использования выпрямительного измерительного механизма эти приборы обладают наивысшей чувствительностью и наименьшим потреблением энергии среди электро-механической группы приборов. Недостатком является зависимость показаний от частоты сигнала (собственная ёмкость диодов, индуктивность рамки) и температуры, влияющей на режимы работы диодов.

5 Электрические измерительные преобразователи: шунты, добавочные сопротивления, делители напряжения, измерительные усилители

В измерительной технике для расширения диапазона измерения приборов широкое распространение получили масштабные преобразователи: пассивные, работающие за счет энергии объекта исследования, и активные, работающие за счет дополнительного источника питания. К пассивным преобразователям относятся шунты, добавочные резисторы, измерительные трансформаторы, делители напряжения, к активным – электронные измерительные усилители.

Шунты служат для расширения пределов измерения аналоговых амперметров. Чтобы в измерительный механизм поступал ток $I_{им}$, меньший в n раз измеренного тока I , параллельно цепи ИМ подключают шунт, сопротивление которого определяется по формуле

$$R_{ш} = R_{им} (n - 1),$$

где $R_{им}$ – сопротивление измерительного механизма,
 n – коэффициент шунтирования, $n = I/I_{им}$ (рисунок 5.1).

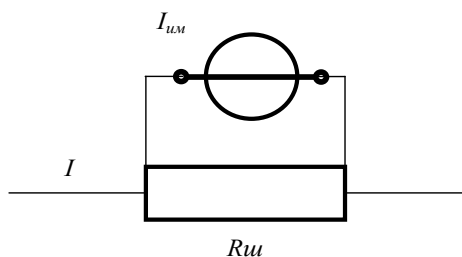


Рисунок 5.1 – Схема включения шунта

Добавочные резисторы служат для расширения пределов измерения аналоговых вольтметров и включаются последовательно с измерительным механизмом (рисунок 5.2).

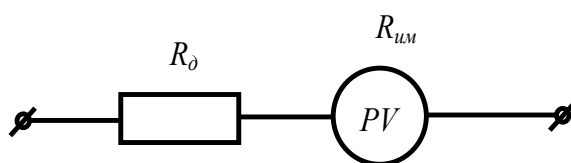


Рисунок 5.2 – Схема включения добавочного резистора

Если напряжение постоянного тока, необходимое для полного отклонения подвижной части измерительного механизма, равно $U_{изм}$, а измеряемое напряжение $U = n \cdot U_{изм}$, то добавочное сопротивление

$$R_д = R_{изм} / (n - 1),$$

где $R_{изм}$ – сопротивление измерительного механизма.

Делители напряжения выполняются резистивными (рисунок 5.3), емкостными (рисунок 5.4) и индуктивными.

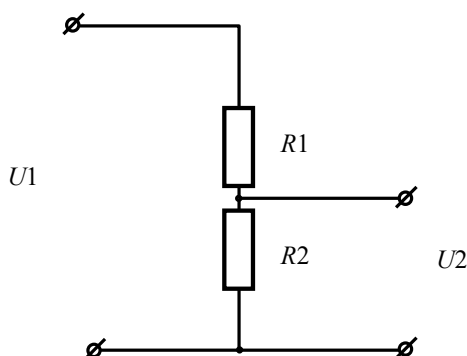


Рисунок 5.3 – Схема включения резистивного делителя напряжения

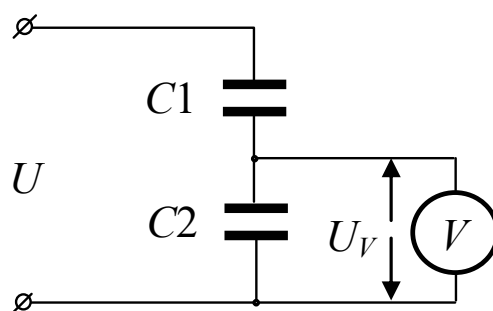


Рисунок 5.4 – Схема включения емкостного делителя напряжения

Резистивные делители обычно выполняют многопредельными с коэффициентами 10:1, 100:1, 10000:1 с полным сопротивлением делителя от 100 до 10 кОм и максимальным входным напряжением до 100 В.

Измерительные усилители. Использование усилителей в средствах измерений позволяет на несколько порядков повысить их чувствительность, снизить температурные и частотные погрешности, а также достичь ничтожного потребления энергии от цепи, в которой производятся измерения. Это потребление может быть существенно ниже, чем потребление компенсационных цепей с магнитоэлектрическими гальванометрами (например, ток $10^{-10} \dots 10^{-12}$ А вместо 10^{-8} А у наиболее распространенных гальванометров). В результате электронные указатели равновесия сейчас почти вытеснили в серийном производстве ранее применявшиеся в качестве указателей равновесия гальванометры. И, наконец, использование частотно-избирательных усилителей в указателях равновесия переменного тока легко решает задачу защиты такого указателя от влияния напряжений с другими частотами, кроме одной заранее заданной.

Наибольшее практическое применение находят полупроводниковые и интегральные измерительные усилители.

По назначению электронные усилители можно разделить на три группы:

- масштабные усилители, или собственно измерительные усилители, предназначенные для увеличения с определенной точностью значения (масштаба) входной величины. Основным требованием, предъявляемым к таким усилителям, является требование линейности уравнения преобразования и стабильности коэффициента преобразования в пределах установленных погрешностей;

- усилители указателей равновесия (нулевые усилители), служащие для обнаружения весьма малых напряжений или токов в соответствующих участках измерительных цепей. Они должны иметь достаточно большой коэффициент усиления (входная и выходная величины однородные), т. е. малый порог чувствительности, обладать большой стабильностью нуля, а часто и определенной частотной избирательностью. В соответствии с последним требованием различают частотно-избирательные и полосовые усилители. Нулевые усилители бывают также фазочувствительными и фазонечувствительными. Первые отличаются от вторых тем, что у них выходная величина является функцией не только значения входной величины, но и угла сдвига этой величины

относительно некоторой другой. Особых же требований в отношении стабильности коэффициента преобразования к нулевым усилителям, как правило, не предъявляют;

– операционные усилители, основной задачей которых является математическая операция (интегрирование, дифференцирование) с входной величиной. В результате выходная величина оказывается пропорциональной интегралу входной величины в некотором частотном диапазоне. К таким усилителям, помимо основного общего требования постоянства параметров, предъявляют особые требования – в соответствии с назначением усилителя.

Измерительные усилители могут быть как усилителями постоянного тока, так и переменного. Однако усилители постоянного тока обладают рядом недостатков, основным из которых является непостоянство уровня выходного напряжения. Это проявляется как в виде беспорядочных кратковременных качаний и бросков, причиной которых является чаще всего непостоянство напряжения источников питания, так и в виде медленного монотонного дрейфа нуля.

6 Измерительные трансформаторы тока и напряжения

Измерительные трансформаторы тока (ИТТ) преобразуют переменный ток от 0,8 до 400000 А в ток с предельными значениями 1; 2; 2,5; 5 А. Выводы L_1 , L_2 первичной обмотки включают в разрыв проводника с измеряемым током (рисунок 6.1). К выводам U_1, U_2 вторичной обмотки последовательно подключают амперметр A .

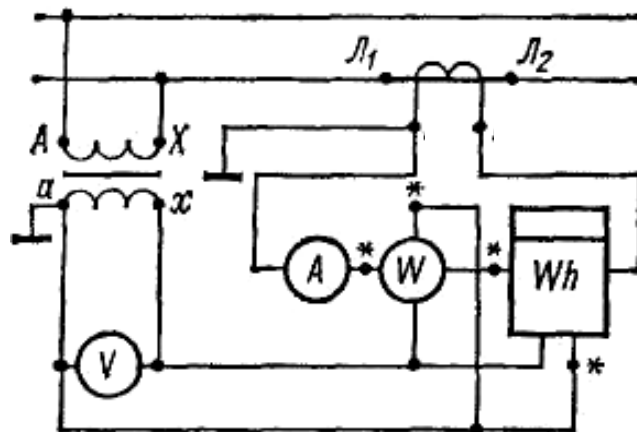


Рисунок 6.1 – Схема включения электромеханических приборов через измерительные трансформаторы тока и напряжения

Измерительные трансформаторы напряжения (ИТН) преобразуют переменное напряжение от 220 В до 36 кВ в напряжение 100 В, 150 В. Первичную обмотку ИТН A, X (начало-конец) включают в измерительную цепь параллельно. К зажимам вторичной обмотки a, x подключают вольтметр V . По показани-

ям приборов, включённых во вторичную обмотку, можно определить значения измеряемых тока и напряжения по формулам

$$U_1 = K_u \cdot U_2; \quad I_1 = K_i \cdot I_2,$$

где K_u, K_i – действительные коэффициенты трансформации;
 U_2, I_2 – показания вольтметра в ИТН и амперметра в ИТТ.

7 Измерение постоянных и переменных напряжений

Для измерения постоянных напряжений наиболее часто используют приборы магнитоэлектрической системы, которым свойственны высокая чувствительность, точность и широкий диапазон измерений от 10^{-5} до 1000 В. Магнитоэлектрические вольтметры с добавочным сопротивлением можно использовать для измерения напряжения до 20 кВ.

Для измерения постоянных напряжений могут использоваться электродинамические, ферродинамические и электромагнитные приборы, но диапазон измерений у них уже (1...600 В). Приборы данной системы обладают большой потребляемой мощностью, поэтому использование их в маломощных цепях приводит к большим погрешностям измерения. Для измерения высоких напряжений (до 300 кВ) используют электростатические приборы.

Наиболее широкими возможностями для измерения напряжения обладают электронные приборы, которые позволяют измерять напряжение от 10^{-9} В. Класс точности электронных приборов достигает 0,002. Они обладают высоким быстродействием, автоматическим выбором диапазона измерения и определением полярности, а также низким энергопотреблением.

Наиболее точно напряжение можно измерить с помощью компараторов.

Для измерения действующих значений переменного напряжения промышленной частоты чаще всего используются электромагнитные, электродинамические и ферродинамические приборы. На повышенных частотах – термоэлектрические, выпрямительные и электронные приборы. Средневыпрямленное и амплитудное значение измеряют выпрямительными и электронными приборами.

Средняя область значений переменного напряжения от 1 до 600 В охватывается диапазонами измерений всех вышеперечисленных систем. При выборе конкретных типов приборов следует учитывать их отличительное свойство, в частности, высокоточные электродинамические приборы можно применять только для измерений в сравнительно мощных цепях, т. к. значительное потребление мощности этими приборами может вызвать большую погрешность метода (до 10 В). Это относится к электромагнитным и ферродинамическим приборам. Наиболее пригодными к использованию в маломощных цепях являются электростатические, выпрямительные и электронные приборы. Однако выпрямительные приборы имеют погрешность от несинусоидальности формы кривой напряжений. Для измерения напряжений ниже 0,1 В применяются только электронные приборы, нижний предел которых достигает 10^{-6} А. Самый вы-

сокий предел измерения 300 кВ имеют электростатические вольтметры. Термоэлектрические приборы используются для измерений при частоте до 100 МГц. Используются спай, состоящие из железа – константана (при $t = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ термоЭДС = 30 мВ), хромель-копеля (термоЭДС = 49 мВ), золото-палладия (при $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, термоЭДС = 40 мВ).

Недостатки термоэлектрических приборов: малое быстродействие, малая перегрузочная способность, большая потребляемая мощность (при токе 5А – 1 Вт), класс точности – 1,0; 1,5. Для расширения диапазонов измерения в цепи переменного тока используют трансформаторы напряжения.

При измерении токов и напряжений необходимо учитывать не только тип приборов, но и место включения их в измерительную цепь. Это может повлиять на точность измерения.

При использовании метода непосредственной оценки вольтметр подключают параллельно тому участку цепи, на котором необходимо измерить напряжение. При измерении напряжения на нагрузке R в цепи с источником энергии, ЭДС которого E и внутреннее сопротивление R_V , вольтметр включают параллельно нагрузке (рисунок 7.1, а).

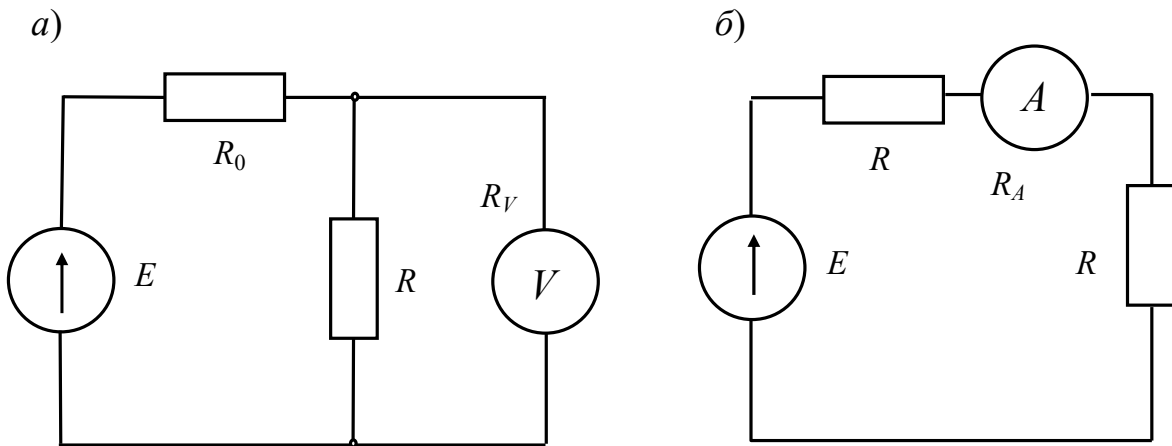


Рисунок 7.1 – Схемы прямого измерения напряжения и тока

Если внутреннее сопротивление вольтметра R_V , то относительная погрешность измерений напряжения определяется как

$$\delta_U = \frac{U_x - U}{U} = \frac{\left[\frac{ERR_V}{(R+R_V)} / \left(\frac{RR_V}{(R+R_V)} + R_0 \right) - \frac{ER}{(R+R_0)} \right]}{\frac{ER}{(R+R_0)}} =$$

$$= - \frac{R/R_V}{1 + R/R_V + R/R_0},$$

где U – действительное значение напряжения на нагрузке R до включения вольтметра;

U_x – измеренное значение напряжения на нагрузке R .

Отношение сопротивлений R/R_V обратно пропорционально отношению мощности потребления вольтметра P_V к мощности цепи P , поэтому

$$\delta_U = -\frac{P_V / P}{1 + P_V / P + R / R_0}$$

($\delta_U = 0$ как при $P_V = 0$, так и при $R_0 = 0$).

Для уменьшения погрешности измерения напряжения мощность потребления вольтметра должна быть достаточно мала, а его внутреннее сопротивление велико ($R_V = \infty$).

Напряжение в цепях постоянного тока можно измерить любым измерителем напряжения, работающим на постоянном токе (аналоговыми магнитоэлектрическими, электродинамическими, электромагнитными, электростатическими, цифровыми и электронными вольтметрами). Выбор измерителя напряжения обусловлен потребляемой объектом мощностью и необходимой точностью. Диапазон измеряемых напряжений лежит в пределах от микровольт до десятка киловольт. Если объект измерения мощный, используют электромеханические вольтметры без учета мощности потребления прибором. Если же объект измерения маломощный, то мощность потребления измерительным прибором нужно учитывать либо использовать электронные вольтметры.

При прямом измерении тока амперметр включается последовательно в разрыв исследуемой цепи (рисунок 7.1, б).

Последовательное включение амперметра с внутренним сопротивлением R_A в цепь с источником ЭДС E и сопротивлением R (сопротивление нагрузки и источника) приводит к возрастанию общего сопротивления и уменьшению протекающего в цепи тока.

Относительная погрешность δ_I тока I_X

$$\delta_I = \frac{I_X - I}{I} = \frac{E / (R + R_A) - E / R}{E / R} = -\frac{R_A / R}{1 + R_A / R},$$

где I – действительное значение тока в цепи до включения амперметра;

I_X – измеренное значение тока в цепи R .

Отношение сопротивлений можно заменить отношением мощностей потребления P_A и P амперметра и самой цепи соответственно:

$$\delta_I = -\left(P_A / P\right) / \left(1 + P_A / P\right).$$

Погрешность измерения тем меньше, чем меньше мощность потребления амперметра P_A по сравнению с мощностью потребления цепи P , в которой осуществляется измерение. Поэтому амперметр, включаемый последовательно в цепь измерения, должен обладать малым сопротивлением, т. е. $R_A \rightarrow 0$.

На рисунке 7.2 приведены схемы включения приборов для косвенного измерения сопротивления.

Значение сопротивлений, вычисленные по показаниям приборов, для схемы на рисунке 7.2, а)

$$R_x = U / I_x = (U_x + U_A) / I_x = R_x + R_A.$$

Относительная методическая погрешность измерения

$$\gamma = \Delta R_x / R_x = R_A / R_x.$$

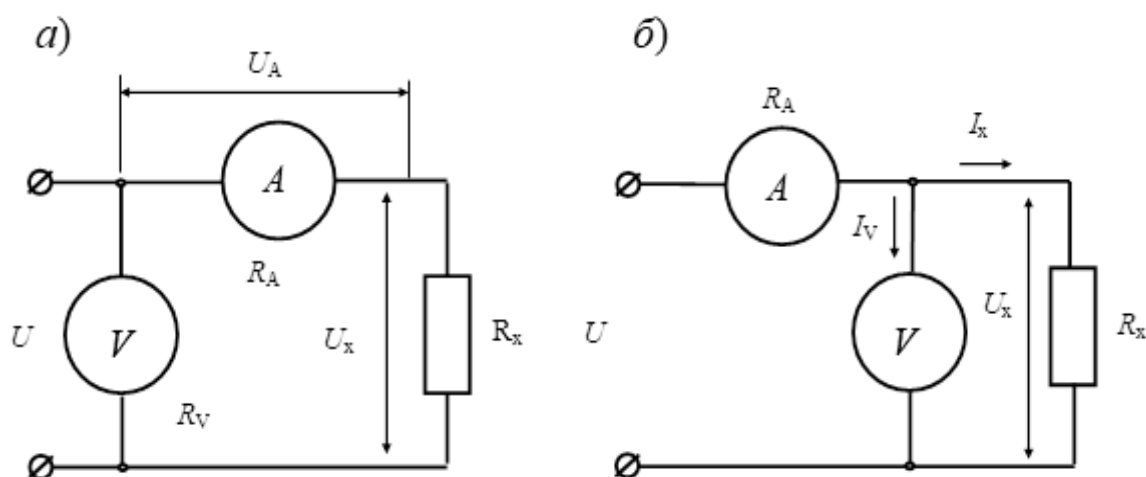


Рисунок 7.2 – Схемы косвенного измерения сопротивления

Для схемы на рисунке 7.2, б)

$$R_x = U_x / I_x = U_x / (I_x + I_V) = R_x / [1 + (R_x / R_V)],$$

где R_A и R_V – сопротивления амперметра и вольтметра соответственно.

Относительная методическая погрешность измерения

$$\gamma = - R_x / (R_V + R_x).$$

Очевидно, что схема, приведенная на рисунке 7.2, а, обеспечивает меньшие погрешности при измерении больших сопротивлений, а на рисунке 7.2, б – при измерении малых сопротивлений.

8 Измерение постоянных и переменных токов

Для измерения постоянных токов наиболее часто используют приборы магнитоэлектрической системы. Они имеют достаточную чувствительность, точность и широкий диапазон измерений (от 10^{-8} до 50 А). Магнитоэлектрические милливольтметры с шунтом применяют для измерения тока до 10 кА. Для измерения постоянных токов пользуются электродинамическими, ферродинамическими и электромагнитными приборами. Диапазон измерения у них составляет от 1 мА до 10 А. Приборы данной системы имеют большую потребляемую мощность. Поэтому применять их в маломощных цепях затруднительно. Наиболее широкими возможностями для измерения токов обладают электронные приборы, которые позволяют измерять ток от 10^{-7} А. Класс точности электронных приборов достигает 0,002. Они обладают высоким быстродействием, автоматическим выбором диапазона измерения и определения полярности, также к их достоинствам можно отнести малое потребление мощности.

Для измерения действующих значений переменного тока промышленной частоты чаще всего используют электромагнитные, электродинамические и ферродинамические приборы, а на повышенных частотах – термовыпрямительные и электронные приборы.

Средневыпрямленное и амплитудное значение измеряют выпрямительными и электронными приборами. Средняя область значений переменного тока – от 10 мА до 10 А – охватывается диапазонами измерений всех вышеперечисленных систем.

Для измерения токов менее 1 мА применяются только электронные приборы, нижний предел которых достигает 10^{-9} А. Самый высокий предел измерения имеют электромагнитные амперметры до 300 А. Выпрямительные приборы представляют собой прибор магнитоэлектрической системы и выпрямитель, построенный по однополупериодной схеме (малые токи) и двухполупериодной схеме (большие токи). Для расширения диапазонов измерения в цепи переменного тока используют трансформаторы тока.

9 Измерение несинусоидальных и импульсных токов и напряжений

Для измерения импульсных токов и напряжений используют приборы, рабочий частотный диапазон которых охватывает все гармонические составляющие исследуемого сигнала и пренебрежение которыми недопустимо по условиям требуемой точности измерения. В частности, для измерения действующих значений несинусоидальных токов и напряжений применяют термоэлектрические приборы.

Для измерения средневыпрямленных значений используют электронные приборы, градуированные в средневыпрямленных значениях, а для измерения амплитудных значений – пиковые вольтметры. Большинство выпрямительных

и электронных приборов имеют шкалы, градуированные в действующих значениях переменного тока и напряжения. На самом деле их показания пропорциональны средним или амплитудным значениям. Несмотря на широкий диапазон частот, такие приборы не следует использовать для измерения действующих значений несинусоидальных токов и напряжений, т. к. они градуируются для строго синусоидальной формы кривой и могут давать большие погрешности при отклонении от синусоидальности.

Для наблюдения и измерения характеристик мгновенных значений сигналов можно применяют электронные осциллографы. При измерении несинусоидальных токов и напряжений можно использовать некоторые соотношения, отмеченные в таблице 9.1.

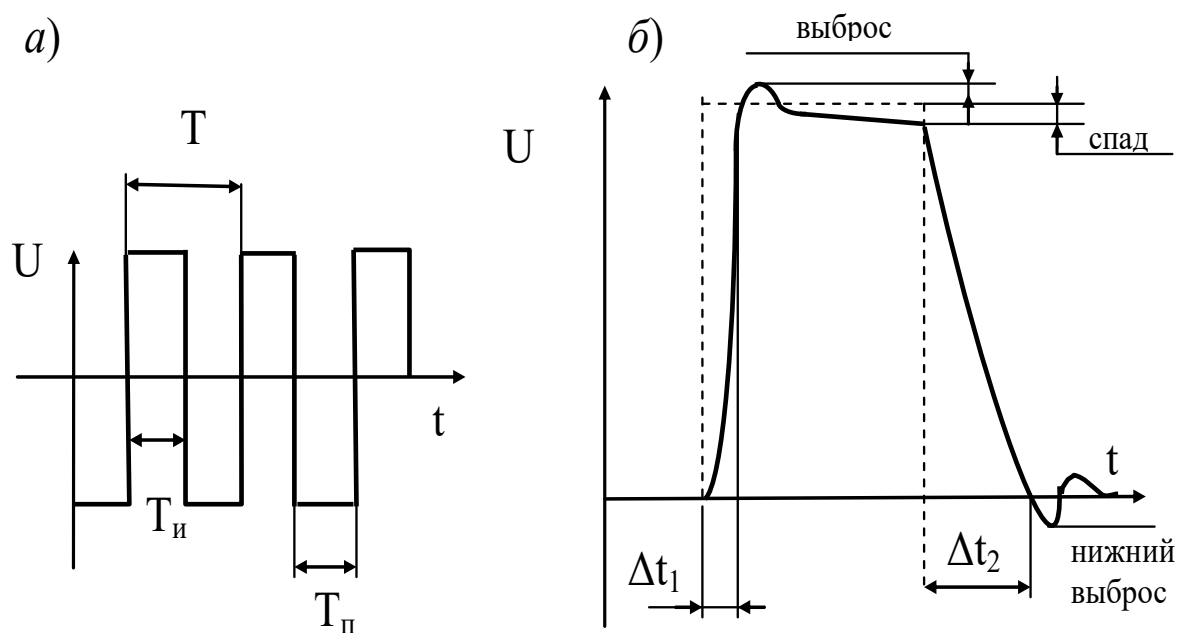
Таблица 9.1 – Соотношения параметров несинусоидальных сигналов и сигналов определенной формы

Измеряемый параметр сигнала	Форма сигнала		
	Синусоидальный	Прямоугольные импульсы	Треугольные импульсы
Среднее значение $A_{сз}$	$0,637 \cdot A_m$	A_m	$0,5 \cdot A_m$
Среднее квадратическое значение $A_{скз}$	$0,707 \cdot A_m$	A_m	$0,577 \cdot A_m$
Амплитудное значение A_m	A_m	A_m	A_m
Коэффициент формы $K_f = A_{скз}/A_{сз}$	1,11	1	1,16
Коэффициент амплитуды $K_a = A_m/A_{скз}$	1,41	1	1,73

Импульсные сигналы представляют собой пачки синусоидальных колебаний, полученных путём модуляции.

Основными контролируруемыми параметрами импульсных сигналов являются (рисунок 9.1):

- период импульсов T ;
- частота следования импульсов f ;
- ширина импульсов T_u ;
- длительность паузы T_n ;
- скважность импульсов $Q = T/T_u$;
- длительность переднего фронта импульса Δt_1 ;
- длительность заднего фронта импульса Δt_2 .



a – сигналы прямоугольной формы; *б* – параметры импульса

Рисунок 9.1 – Периодические прямоугольные импульсы

Характеристики периодических одиночных импульсных сигналов измеряют с помощью осциллографа. Действующее значение напряжения периодического импульсного сигнала с широтно-импульсной модуляцией измеряют с помощью вольтметра.

10 Измерение мощности и энергии

Самый простой способ измерения мощности в цепях переменного тока – применение двух приборов (вольтметр РU и амперметр РI) с последующим расчетом (рисунок 10.1). Погрешность измерения в этом случае определяется погрешностью вольтметра РU и амперметра РI, а так же методической погрешностью, которая обусловлена потреблением энергии приборами.

Для измерения мощности с помощью вольтметра и амперметра чаще всего используют приборы магнитоэлектрической системы, которые обеспечивают широкий диапазон измерения и высокую точность.

Для измерения мощности весьма удобно использовать прямой метод измерения мощности ваттметром РW. Схема подключения ваттметра РW приведена на рисунке 10.1.

Электродинамические и ферродинамические ваттметры выпускаются на токи от 0,01 А и напряжения от 3 до 600 В.

Ваттметр РW измеряет активную мощность P .

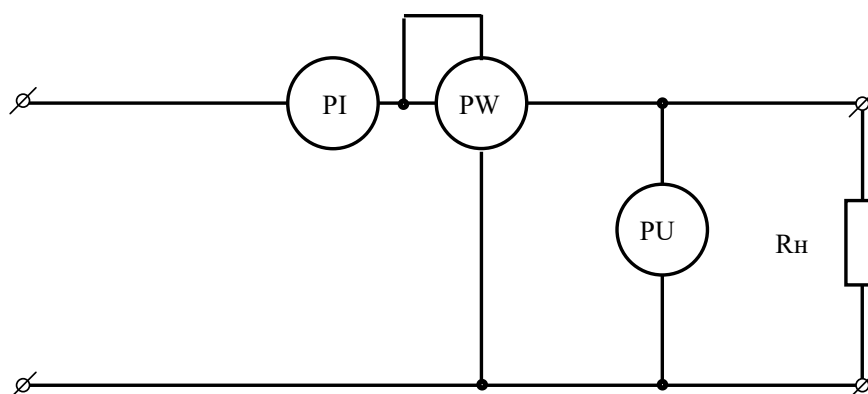


Рисунок 10.1 – Схема измерения мощности

Полная мощность S определяется

$$S = I \cdot U,$$

где I – сила тока;

U – напряжение.

Тогда реактивная мощность

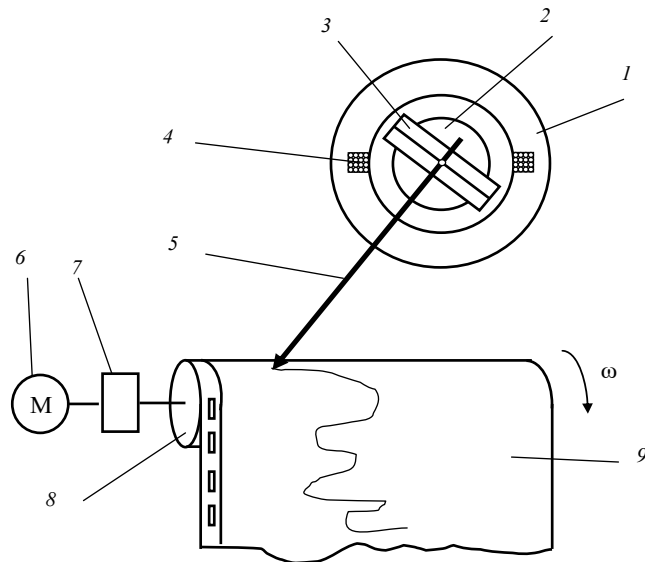
$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}.$$

Для расширения диапазона измерения мощности включают трансформаторы тока и напряжения (см. рисунок 6.1).

Измерение количества энергии производят с помощью индукционных счетчиков, схема и принцип работы которых приведены на рисунке 4.7.

11 Регистрирующие измерительные приборы

Регистрирующие приборы, применяемые в измерительной технике, по роду записи делят на три группы: приборы непрерывного действия, приборы дискретного действия и цифропечатающие устройства. В зависимости от метода действия регистрирующие приборы делят на приборы непосредственной оценки и приборы сравнения. В большинстве этих случаев регистрируемая величина представляет собой функцию времени. Иногда используют двухкоординатные приборы, регистрирующие функциональную связь двух измеряемых величин. Регистрирующий прибор состоит из двух основных элементов: регистрирующего устройства и механизма формирования диаграммы записи. Схематически такой прибор можно представить в следующем виде (рисунок 11.1).

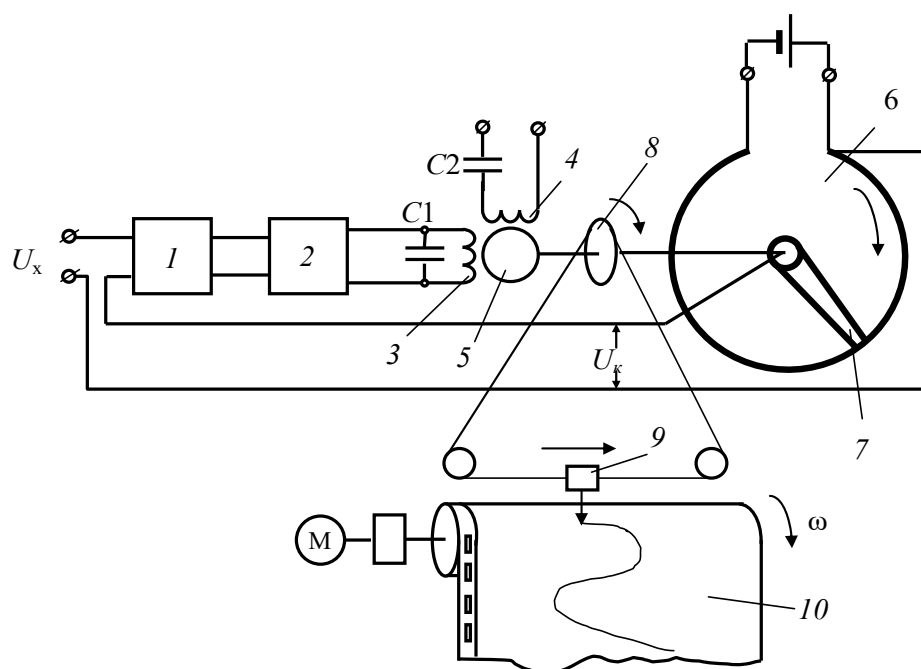


1 – магнитопровод; 2 – внутренний сердечник; 3 – подвижная рамка; 4 – обмотка подмагничивания; 5 – стрелка с пишущим узлом; 6 – электродвигатель; 7 – редуктор, 8 – приводной вал; 9 – диаграммная бумага

Рисунок 11.1 – Схема регистрирующего измерительного прибора

Двигатель передает вращающий момент на редуктор, редуктор позволяет регулировать число оборотов приводного валика. Для увеличения магнитного потока в зазоре между магнитопроводом и внутренним сердечником расположена обмотка подмагничивания, что обеспечивает большой вращающий момент рамки, связанной со стрелкой, на конце которой закреплен пишущий узел. Изменение входного электрического сигнала изменяет положение стрелки, и пишущий элемент на конце стрелки вычерчивает график на бумаге. Запоминание информации может осуществляться следующими способами: запись на бумаге чернилами или карандашом, срезание слоя вещества резцов, изменение структуры вещества.

На рисунке 11.2 приведена схема автоматического компенсатора постоянного напряжения. На вход подается измеряемое напряжение U_x , где оно сравнивается с напряжением поступающим от реохорда U_k . Напряжение U_k снимается с источника опорного напряжения и движка реохорда. Разность напряжений $U_x - U_k = \Delta U$ поступает на преобразователь, а далее – на усилитель. Усиленная разность напряжений подается на обмотку двигателя. Обмотки 3, 4 двигателя питаются токами, сдвинутыми по фазе на 90° , что вызывает появление вращающего момента. Напряжение на обмотке 3 зависит от ΔU . На одном валу с двигателем расположен движок реохорда и приварен шкив. Вращение двигателя продолжается до тех пор, пока U_k не будет равно U_x .



1 – преобразователь постоянного напряжения в переменное; 2 – усилитель; 3, 4 – обмотки двигателя; 5 – ротор двигателя; 6 – реохорд; 7 – движок реохорда; 8 – шкив передачи; 9 – узел перемещения пищевого приспособления; 10 – диаграммная бумага

Рисунок 11.2 – Схема автоматического компенсатора постоянного тока

12 Измерительные мосты

Определения. Общие свойства. Мостовые цепи широко применяются в электроизмерительной технике для измерения параметров электрической цепи, их преобразования в электрические сигналы, в качестве фильтров и т. д. В общем случае мостовой цепью или мостом называют такую электрическую цепь, в которой можно выделить две ветви с взаимным сопротивлением, равным бесконечности при определенном соотношении параметров элементов цепи и равным конечному значению, если это соотношение не выполняется. Соотношение параметров элементов цепи, обеспечивающих взаимное сопротивление выделенных ветвей, равное бесконечности, называют условием или уравнением равновесий цепи.

В зависимости от вида напряжения, питающего мостовую цепь, различают мостовые цепи постоянного и переменного тока. Первые применяются для измерения сопротивления электрической цепи постоянному току, а также для преобразования сопротивления в ток или напряжение. Мостовые цепи переменного тока применяют для измерения или преобразования в электрический сигнал параметров комплексных сопротивлений и для фильтрации напряжения в качестве узкополосных фильтров.

В процессе измерения мостовая цепь может приводиться к состоянию равновесия. Такие цепи называют уравновешенными, в противном случае – неуравновешенными. Неуравновешенная мостовая цепь может рассматриваться

как преобразователь сопротивления в ток или напряжение. Сопротивление электрической цепи постоянному току выражается действительным числом, поэтому для уравнивания мостовой цепи постоянного тока требуется один регулируемый элемент. В мостовых цепях переменного тока измеряемое сопротивление в общем случае выражается комплексным числом, поэтому в таких цепях требуются два уравнивающих элемента - соответственно для модуля и аргумента или активной и реактивной составляющих измеряемого сопротивления. Существуют мостовые цепи переменного тока, которые уравниваются только по одной из этих составляющих. Такие цепи называют полууравновешенными или квазиуравновешенными.

Если частота, питающего мостовую цепь напряжения, содержится в уравнениях равновесия, то такие цепи называют частотно-зависимыми; в противном случае – частотно-независимыми. Частотно-зависимые мостовые цепи используют в схемах электрических фильтров. Частотно-независимые мостовые цепи применяют в приборах, предназначенных для измерения параметров элементов электрической цепи.

По конфигурации электрической схемы мостовые цепи делятся на четырехплечие и многоплечие.

Средство измерения, в основе которого лежит мостовая цепь, называют измерительным мостом.

12.1 Измерительные мосты постоянного тока

Измерительные мосты используются как вторичные цепи преобразования измерительной информации от первичных преобразователей. Измерительные мосты являются наиболее точными средствами измерения сопротивления, индуктивности, емкости, поскольку в процессе измерения используются эталонные значения измеряемых величин. Мосты могут быть постоянного и переменного тока.

Мосты постоянного тока. Различают одинарные и двойные мосты. Индикатором равновесия в мостах служат гальванометры постоянного тока, электрометры и т. д. Мосты постоянного тока служат для измерения больших и малых сопротивлений.

На схеме (рисунок 12.1) представлен одинарный мост с линейными сопротивлениями. Расчет такой схемы может быть проведен по любому методу расчета сложных цепей.

Ток в цепи гальванометра I_r определяется по методу эквивалентного источника:

$$I_r = U_{xx} / (R_э + R_r),$$

где U_{xx} – напряжение холостого хода в точках 1, 2;

$R_э$ – сопротивление цепи в точках 1, 2 (цепь индикатора разомкнута);

R_r – сопротивление цепи гальванометра.

$$I_r = U \frac{R1 / (R1 + R2) - R4 / (R3 + R4)}{R1 \cdot R2 / (R1 + R2) + R3R4 / (R3 + R4) + R_r} .$$

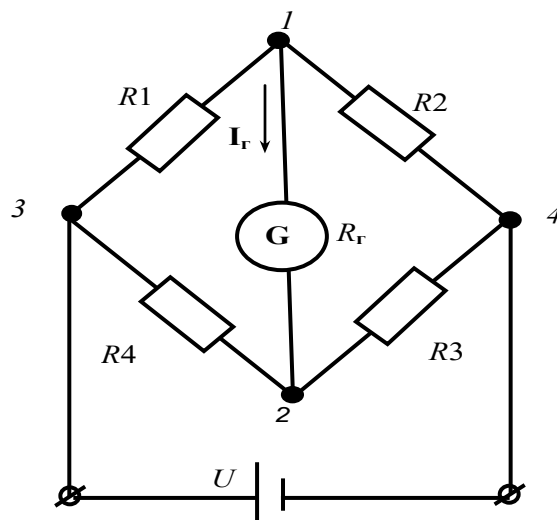


Рисунок 12.1 – Схема моста постоянного тока

Изменяя значение сопротивления моста, доводят ток до нуля в цепи гальванометра. При этом наступает момент равновесия

$$R1R2 - R2R3 = 0 .$$

Чувствительность моста. Отношение изменения тока, напряжения в цепи гальванометра к относительному изменению сопротивления либо абсолютному изменению сопротивления называется чувствительностью моста.

$$S_I = \Delta I_r / (\Delta R_i / R_i); S_I = \Delta I_r / \Delta R_i;$$

$$S_U = \Delta U_r / (\Delta R_i / R_i); S_U = \Delta U_r / \Delta R_i .$$

Для измерения малых сопротивлений от 10^{-8} до 10 Ом применяют двойные мосты. Они обеспечивают исключение влияния сопротивления проводов на измеряемое сопротивление.

12.2 Измерительные мосты переменного тока

Мосты переменного тока используют для измерения L , C , R и угла сдвига фаз. Поскольку сопротивления моста переменного тока комплексные, то при расчете условия равновесия учитываются соотношения фаз. Для равновесного моста переменного тока условие равновесия выражается следующим образом:

$$R1 \cdot R3 - R2 \cdot R4 = 0 ,$$

$$Z1 \cdot Z3 = Z2 \cdot Z4 .$$

В показательной форме $Z_1 + e^{j\varphi_1} = Z_2 \cdot e^{j\varphi_3} + Z_3 \cdot e^{j\varphi} Z_4 \cdot e^{j\varphi^4}$ отсюда следует, что

$$\varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_3 + \varphi_4.$$

Мост для измерения индуктивности с добротностью катушки Q_x более 30. Условие равновесия моста (рисунок 12.2)

$$(R_x + j\omega L_x) \cdot [R_3 - 1 / j\omega C_3] = R_2 \cdot R_4,$$

откуда

$$R_x R_3 + L_x / C_3 = R_2 \cdot R_4,$$

$$\omega L_x R_3 = R_x / (\omega C_3).$$

Из их совместного решения следует

$$L_x = (R_2 \cdot R_4 \cdot C_3) / (1 + 1 / Q_x^2).$$

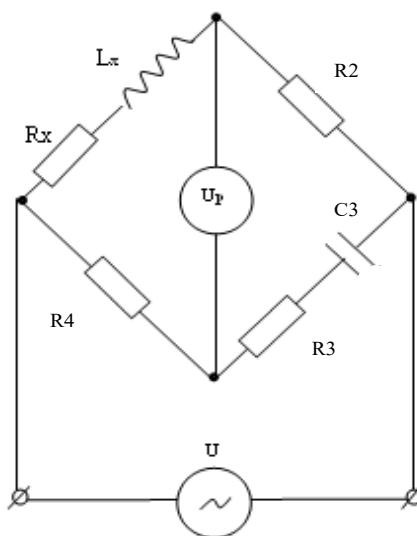


Рисунок 12.2 – Схема моста для измерения индуктивности с добротностью катушки более 30

Мосты для измерения индуктивности с добротностью катушки менее 30. Условия равновесия для данного моста (рисунок 12.3)

$$(R_x + j\omega L_x) \cdot \frac{1}{1 / R_3 + j\omega C_3} = R_2 \cdot R_4; \quad R_x = R_2 \cdot \frac{R_4}{R_3}, \quad L_x = R_2 \cdot R_4 \cdot C_3;$$

$$Q_x = \frac{\omega L_x}{R_x} = \omega C_3 \cdot R_3.$$

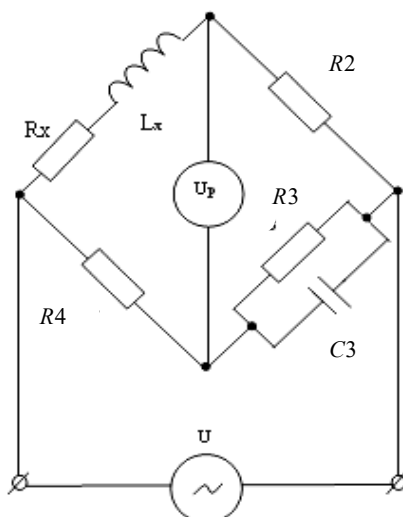


Рисунок 12.3 – Схема моста для измерения индуктивности с добротностью катушки менее 30

Мост для измерения ёмкости конденсаторов (рисунок 12.4). Условие равновесия моста

$$[R_x + 1/(j\omega C_x)]R_3 = R_2[R_4 + 1/(j\omega C)];$$

$$C_x = C_1(R_3 / R_2);$$

$$R_x = R_2(R_4 / R_3).$$

Обычно вместо R_x измеряют $Q = \omega C_x R_x$ в конденсаторе.

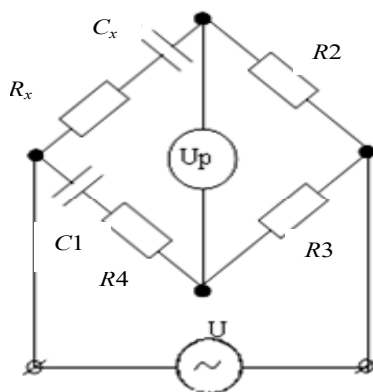


Рисунок 12.4 – Схема моста для измерения ёмкости

Кроме указанных мостов переменного тока, используют трансформаторные Т-образные мосты. Такие мосты применяют для измерения сопротивлений на высоких частотах до 30 МГц.

13 Измерительные генераторы

Генератор электромагнитных колебаний входит в состав большинства измерительных систем. Он может быть выполнен в виде самостоятельного встроеного прибора, совмещенного или вспомогательного узла, отдельной системы. Из существующего разнообразия различных по типу, назначению и исполнению генераторов в измерениях используется *измерительный генератор* – прибор, предназначенный для генерации электрических колебаний заданной формы с заданными значениями параметров. Он представляет собой экранированный источник электрических сигналов определенной формы, параметры которых (частота, мощность и др.) могут быть постоянными или регулируемыми в определенных пределах с помощью соответствующих органов.

Измерительные генераторы обладают высокой точностью установки и стабильностью параметров выходного сигнала. Их применяют при настройке измерительных устройств, при снятии амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), переходных характеристик устройств.

Генераторы классифицируют по диапазону частот генерируемых сигналов, по форме генерируемых сигналов, виду модуляции.

Подгруппы измерительных генераторов:

- Г1 – установки для поверки измерительных генераторов;
- Г2 – генератор шумовых сигналов;
- Г3 – низкочастотный генератор;
- Г4 – высокочастотный генератор;
- Г5 – генератор импульсов;
- Г6 – генератор сигналов специальной формы;
- Г8 – генератор качающейся частоты.

Основными нормируемыми метрологическими характеристиками измерительных генераторов являются:

- пределы и диапазон частот;
- пределы и диапазон уровней воспроизводимых сигналов;
- погрешность установки частоты;
- нестабильность частоты;
- погрешность установки выходного напряжения;
- пределы искажения формы сигнала.

13.1 Генераторы низкой частоты

Диапазон генерируемых частот генераторов низкой частоты составляет от 20 до 200000 Гц.

Данные генераторы характеризуются степенью нелинейных искажений гармонического выходного сигнала (коэффициент гармоник), который определяется как отношение среднеквадратичного напряжения суммы всех гармоник сигнала, кроме первой, к среднеквадратичному напряжению первой гармоники.

$$K_r = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1},$$

где U_1, U_2, \dots, U_n – напряжение первой, второй и n гармоники соответственно.

Обычно K_r выражается в процентах и зависит от амплитуды сигнала и мощности выходного сигнала.

Диапазон генерируемых частот характеризуется коэффициентом перекрытия

$$K_{пер} = \frac{f_{\max}}{f_{\min}},$$

где f_{\max} – максимальная частота генератора;

f_{\min} – минимальная частота генератора.

Стабильность частоты генератора определяется отношением абсолютного изменения частоты ($f_0 - f_1$) к начальной частоте f_0 при определённых условиях:

$$(f_0 - f_1) / f_0 = \frac{\Delta f}{f_0}.$$

Значение выходного сопротивления может регулироваться в соответствии со значением сопротивления внешней нагрузки.

Измерительный генератор состоит из задающего генератора, выходного усилителя, выходного устройства, состоящего из аттенюатора, согласующего трансформатора и электронного вольтметра.

Обобщенная структурная схема низкочастотного (НЧ) генератора представлена на рисунке 13.1.

Задающий генератор создает стабильные по частоте и амплитуде синусоидальные колебания в заданном диапазоне частот.

Генераторы измерительных сигналов по схемному решению разделяются на RC - и LC -генераторы; генераторы на биениях (смещение частот) и прямого генерирования выходных частот; без стабилизации частоты и с диапазонно-кварцевой стабилизацией.

Генераторы с диапазонно-кварцевой стабилизацией частоты являются наиболее сложными среди генераторов. Они предназначены для генерации сигналов высокой стабильности, определяемой используемым в данном генераторе кварцевым резонатором. Для получения широкого диапазона стабильных частот применяются два способа: деление или умножение частоты кварцевого резонатора с последующим их смещением в соответствующих преобразователях, в результате чего получают дискретные частоты; автоматическая подстройка выходной частоты генератора с плавной настройкой по частоте генератора с кварцевой стабилизацией, включая ее гармоники и субгармоники.

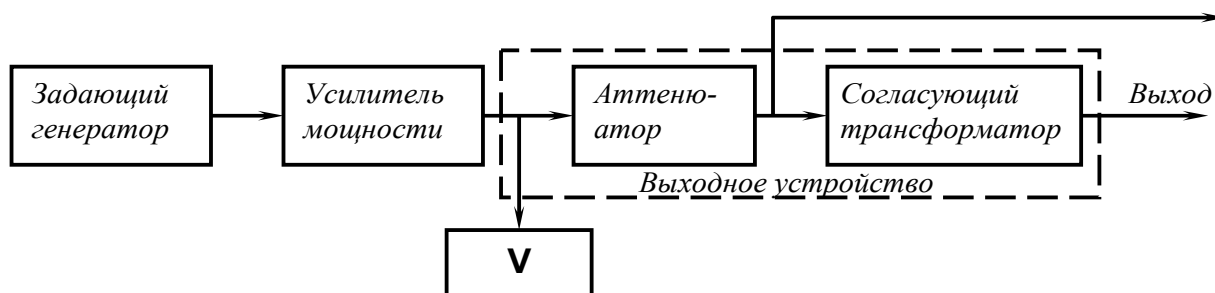


Рисунок 13.1 – Структурная схема измерительного генератора

13.2 Типы задающих генераторов

LC-генераторы. Данный тип задающего генератора используется в основном в высокочастотных генераторах. В них применен LC-контур в режиме самовозбуждения с резонансной частотой:

$$f = 1/(2\pi\sqrt{LC}),$$

где L – индуктивность контура;

C – емкость контура.

Недостатками генераторов данного типа является сложность перенастройки и громоздкость. Широкого распространения как задающие генераторы на низких частотах они не получили. Их используют на узкий диапазон частот или несколько фиксированных частот.

Задающий генератор на биениях (рисунок 13.2).

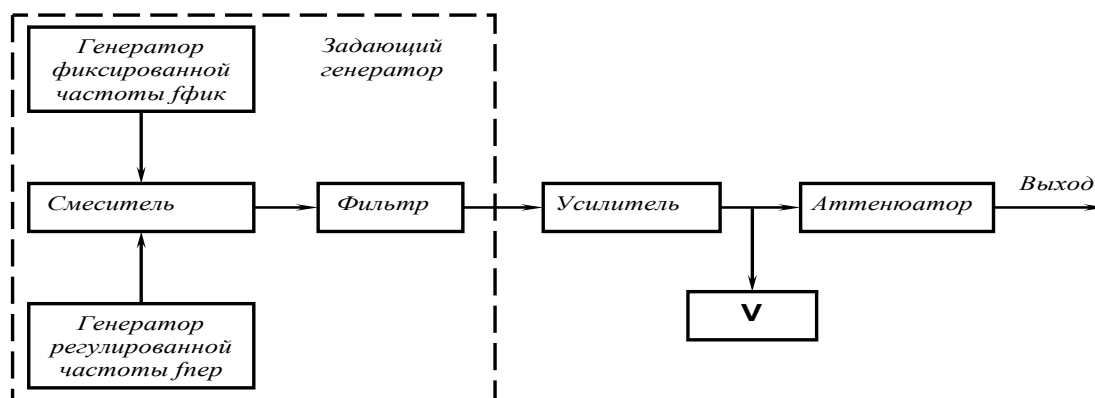


Рисунок 13.2 – Структурная схема задающего генератора на биениях

На смеситель поступают сигналы от двух генераторов: генератора фиксированной частоты $f_{фик}$ и генератора с переменной частотой $f_{пер}$. На выходе смесителя образуются колебания разностной частоты $\Delta f = f_{фик} - f_{пер}$ и серии комбинационных частот. Далее сигнал поступает на фильтр низких частот, который пропускает только низкочастотный разностный сигнал Δf (до сотых долей герца). Недостатками данной схемы являются сложность и относительная нестабильность частоты. Генератор применяется для очень низких частот, поскольку другими методами получить частоты менее 1 Гц сложно.

RC-генераторы. Данные типы задающих генераторов обладают простой схемой реализации и хорошими характеристиками. Схема задающего генератора представлена на рисунке 13.3.

Генератор представляет собой двухкаскадный усилитель с *RC*-положительной частотно-зависимой связью. Положительная обратная связь создается фазированным делителем, образованными элементами $R1$, $C1$ и $R2$, $C2$, предназначенными для обеспечения условий самовозбуждения только на одной частоте. $R3$ и $R4$ – цепи отрицательной обратной связи. Данная связь частотно-независимая. Она стабилизирует работу генератора во всем диапазоне частот и автоматически поддерживает уровень выходного напряжения задающего генератора неизменным.

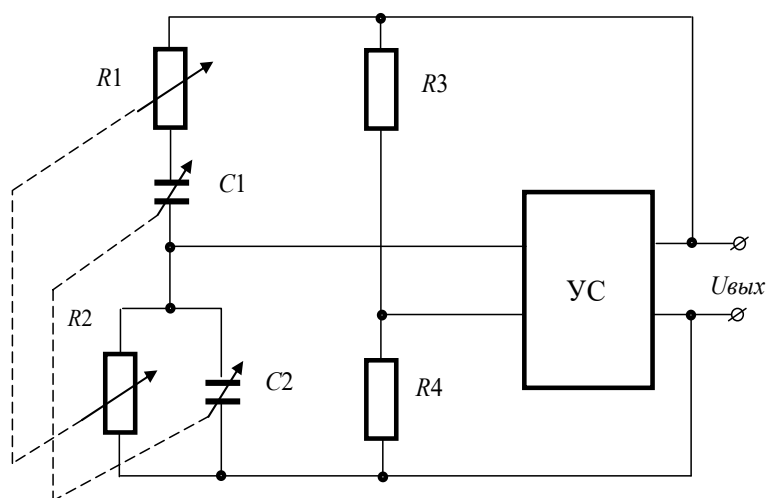


Рисунок 13.3 – Схема задающего RC-генератора

Усилитель мощности предназначен для создания необходимой мощности на нагрузке во всем диапазоне генерируемых частот. Напряжение на выходе усилителя изменяется от нуля до максимума с помощью резистора, включенного на его входе. Усилитель состоит из каскадов усиления напряжения и мощности. Каскад усиления напряжения представляет собой фазоинвертор, превращающий однотактное входное напряжение в двухтактное. Каскад усилителя мощности – усилитель мощности, собранный по двухтактной схеме с глубокой отрицательной обратной связью, нагрузкой которого является выходное устройство. Напряжение на выходе усилителя измеряют вольтметром

14 Темы аудиторной контрольной работы

- 1 Метрология и измерительная техника. Основные проблемы метрологии.
- 2 Объекты и современные средства измерений (СИ).
- 3 Основные термины, используемые в метрологии.
- 4 Понятие электропривода и измеряемых координат.
- 5 Классификация измерений.
- 6 Прямые, косвенные, совокупные, совместные измерения.
- 7 Единицы измерения физических величин. Система СИ.

- 8 Основные характеристики измерений.
- 9 Погрешности измерений и их классификация.
- 10 Качество измерительных приборов.
- 11 Аналоговые измерительные приборы. Общая характеристика.
- 12 Приборы магнитоэлектрической системы.
- 13 Приборы электродинамической системы.
- 14 Приборы ферродинамической системы.
- 15 Приборы электромагнитной системы.
- 16 Приборы электростатической системы.
- 17 Приборы индукционной системы.
- 18 Средства расширения пределов измерений.
- 19 Шунты.
- 20 Добавочные сопротивления.
- 21 Измерительные трансформаторы тока.
- 22 Измерительные трансформаторы напряжения.
- 23 Мостовые схемы измерения параметров электрических цепей.
- 24 Мосты переменного тока.
- 25 Измерение емкости конденсатора.
- 26 Измерение индуктивности катушки.
- 27 Метрологические характеристики мостов.
- 28 Измерительные генераторы.

Список литературы

- 1 Метрология: учебник / О. Б. Бавыкин [и др.]; под общ. ред. С. А. Зайцева. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: ФОРУМ; ИНФРА-М, 2020. – 522 с.
- 2 **Молдабаева, М. Н.** Контрольно-измерительные приборы и основы автоматики: учебное пособие / М. Н. Молдабаева. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. – 332 с.
- 3 Электрорадиоизмерения: учебник / В. И. Нефедов [и др.]. – 4-е изд. – Москва: ФОРУМ, ИНФРА-М, 2015. – 384 с.