

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
"Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники"

Кафедра метрологии и стандартизации

В.Т.Ревин

**ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Учебное пособие
для студентов специальности 54 01 01
«Метрология, стандартизация и сертификация»
всех форм обучения

В 5-ти частях

Часть 4

Минск 2004

УДК 621.317.7 + 006.91 (075.8)

ББК 30.10 я 73

Р 32

Рецензент:

начальник научно-исследовательской части
Военной академии Республики Беларусь, канд. техн. наук,
доц. С.Н.Нефедов

Ревин В.Т.

Р 32 Преобразование и преобразователи измерительной информации:
Учеб. пособие для студ. спец. 54 01 01 «Метрология, стандартизация и
сертификация» всех форм обуч. В 5 ч. Ч. 4 / В.Т. Ревин. - Мн.: БГУИР,
2004. – 91 с.: ил.
ISBN 985-444-655-7 (ч. 4).

В четвертой части учебного пособия рассматриваются измерительные преобразователи, позволяющие преобразовывать электрические сигналы в неэлектрические величины с целью обеспечения возможности индикации результатов преобразования и измерений. Приводятся основные параметры таких преобразователей.

УДК 621.317.7 + 006.91 (075.8)

ББК 30.10 я 73

Части 1, 2 и 3 изданы в БГУИР в 2002, 2003 и 2004 гг. соответственно.

ISBN 985-444-655-7 (ч. 4)
ISBN 985-444-372-8

© Ревин В.Т., 2004
© БГУИР, 2004

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	
1 Электромеханические измерительные преобразователи	
1.1 Общие сведения об электромеханических преобразователях	
1.2 Классификация электромеханических преобразователей	
1.3 Принцип работы электромеханических преобразователей	
1.4 Общие узлы и детали электромеханических преобразователей	
2 Магнитоэлектрические измерительные преобразователи.....	
2.1 Принцип действия, устройство и основы теории магнитоэлектрических измерительных преобразователей	
2.2 Магнитоэлектрические приборы постоянного тока	
2.3 Магнитоэлектрические преобразователи с преобразователями рода тока	
3 Электродинамические измерительные преобразователи	
3.1 Принцип действия, устройство и основы теории электродинамических измерительных преобразователей	
3.2 Электродинамические амперметры, вольтметры, ваттметры и фазометры	
4 Электромагнитные измерительные преобразователи	
4.1 Принцип действия, устройство и основы теории электромагнитных измерительных механизмов	
4.2 Электромагнитные амперметры и вольтметры	
5 Электростатические измерительные преобразователи	
5.1 Принцип действия, устройство и основы теории электростатических измерительных преобразователей	
5.2 Электростатические вольтметры и электрометры	
6 Расширение пределов преобразования. Масштабные измерительные преобразователи	
6.1 Расширение пределов измерений с помощью делителей напряжения, шунтов и добавочных резисторов	
6.2 Расширение пределов преобразования с помощью измерительных трансформаторов	
7 Электрооптические устройства индикации	
8 Регистрация измерительной информации	
8.1 Графическая запись	
8.2 Самопишущие электромеханические преобразователи	
8.3 Электронная регистрация	
Контрольные вопросы	
Литература	

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрев в трех предыдущих частях вопросы преобразования различных физических (как неэлектрических, так и электрических) величин в электрические сигналы, мы вплотную подошли к вопросам индикации и регистрации полученной в процессе преобразования измерительной информации. Прежде всего давайте вспомним определение измерительного преобразователя – это "средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем" [1]. Из этого определения следует, что электрический сигнал на выходе преобразователя непригоден для того, чтобы быть непосредственно представленным наблюдателю.

Однако во всех измерительных приборах, комплексах и системах предполагается получение измерительной информации в той или иной форме. Практически во всех средствах измерений получение измерительной информации происходит посредством зрения, т.е. только одного из пяти чувств человека (зрение, слух, осязание, обоняние и вкус). Это связано с тем, что зрение позволяет легко и правильно обрабатывать сравнительно большое количество информации. Поэтому сигнал на выходе измерительного прибора или системы должен быть преобразован в оптический сигнал. Это осуществляется с помощью выходного преобразователя, осуществляющего преобразование электрических сигналов в визуальные, или, другими словами, электрических сигналов в неэлектрические величины. Такие выходные преобразователи называют *устройствами индикации или дисплеями*.

Правда, иногда для обнаружения сигналов, сопровождающих преобразования или измерения, используется слух, как это бывает в отношении сигналов предупреждения, тревоги и т.д. Раньше на слух иногда воспринимали результат действия нуль-индикатора. Иногда балансировку мостовой измерительной цепи производят с помощью наушников.

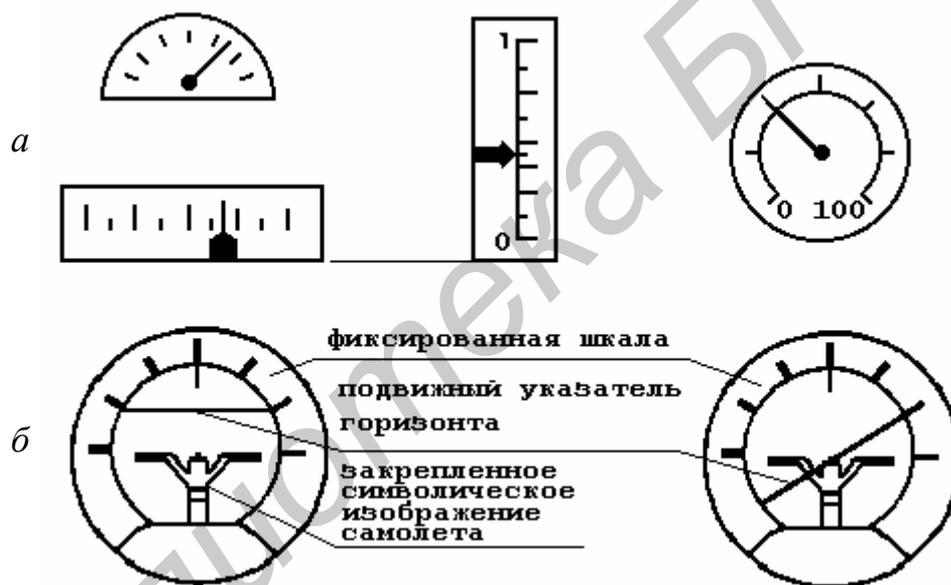
Соображения, касающиеся удобства визуального наблюдения, таковы. Форма и размер символов, используемых в устройстве индикации, должны гарантировать удобочитаемость результата измерения; фон должен быть возможно более контрастным, причем предпочтительно иметь черные буквы на белом фоне или наоборот. Тип шкалы должен соответствовать функциям, возложенным на устройство индикации. Например, если необходимо сравнивать значения двух величин, то следует воспользоваться двумя расположенными рядом измерительными приборами с вертикальными шкалами. Для считывания значений измеряемых величин предпочтительнее измерительные приборы с горизонтальными шкалами. Для регистрации быстро изменяющихся величин применяют стрелочные приборы с круговой шкалой. Направление, в котором происходит изменение положения указателя с ростом значения преобразуемой величины, должно быть следующим: при горизонтальной шкале - слева направо; при вертикальной шкале - снизу вверх; при круговой шкале - по часовой стрелке.

Различают два типа устройств индикации: аналоговые, или непрерывные,

устройства и цифровые, или дискретные.

Аналоговое устройство индикации может показать любое значение между заданными нижним и верхним пределами; диапазон индицируемых значений непрерывен. Такого типа устройство индикации называют аналоговым, поскольку указатель в нем движется в соответствии с изменением входной величины. У *цифрового устройства индикации* диапазон возможных значений дискретен, т.е. оно может воспроизводить только конечное число значений между заданными нижним и верхним пределами.

У большинства аналоговых приборов отсчет производится примерно одним и тем же способом, обычно по результату вращательного или поступательного движения указателя по отношению к фиксированной опорной сетке или шкале (рисунок В.1). Отклонение указателя по отношению к его исходному положению служит мерой измеряемой величины. Примерами такого рода являются отклонение электронного луча, определяемое по сетке на экране электронно-лучевой трубки, или движение указателя горизонта в искусственном горизонте на самолете.



а - приборы с фиксированной шкалой и вращательным или поступательным движением указателя; *б* - сложное аналоговое устройство отображения (искусственный горизонт)

Рисунок В.1 - Традиционные аналоговые устройства индикации

Цифровые устройства индикации в большинстве случаев вырабатывают последовательность символов (цифр, арифметических знаков, букв и т.д.). На рисунке В.2 приведены примеры таких устройств: цифровой индикатор, который показывает только цифры (рисунок В.2,а), и алфавитно-цифровой индикатор (рисунок В.2,б), способный воспроизводить также другие символы. Оба индикатора, показанные на рисунке В.2, используются в электрооптических устройствах отображения измерительной информации.

Кроме аналоговых и цифровых устройств индикации существуют также гибридные устройства. Они, по существу, являются цифровыми устройствами,

у которых способ представления младшего десятичного разряда носит непрерывный характер. Например, в счетчике пройденного расстояния на спидометре автомобиля (рисунок В.3) в первых четырех разрядах значение изменяется скачком, а в последнем (младшем) разряде – плавно.



a - с семью сегментами и *б* - матричный элемент (дисплей), содержащий 5x7 точек

Рисунок В.2 - Сегментные устройства индикации

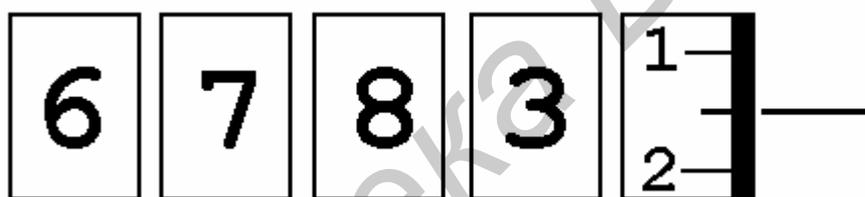


Рисунок В.3 - Гибридное устройство индикации

Аналоговое устройство индикации не только показывает значение отклонения, но и обеспечивает наглядное отображение *тенденции* изменения отклонения во времени. Производная отклонения $\frac{dY}{dt}$ определяет скорость и направление изменения входной величины $Y(t)$. Цифровое же устройство индикации, напротив, не годится для отображения тенденции изменения измеряемой величины. Таким образом, аналоговое устройство является не только *индикатором значения величины*, но также и устройством, воспроизводящим *направление изменения*.

Однако применение аналогового устройства индикации означает неизбежное внесение погрешностей *считывания информации*. При использовании цифрового устройства индикации такие погрешности не возникают. Подразумевается, что даже в том случае, когда отклонение указателя вдоль шкалы аналогового измерителя является абсолютно правильным, точный отсчет все же произвести нельзя.

Регистрируя показания аналогового преобразователя, наблюдатель приписывает отклонению стрелки определенное значение на его шкале. Затем он действует, по существу, как аналого-цифровой преобразователь. К сожалению, воспроизводимость результатов у такого одушевленного

аналого-цифрового преобразователя довольно плохая.

Характеристики погрешности измерительных преобразователей позволяют количественно оценить инструментальную погрешность преобразования [1]. Погрешность преобразователей может быть представлена в форме абсолютной, относительной или приведенной погрешностей. При этом абсолютная (Δ_{Π}) погрешность, выражаемая в единицах преобразуемой величины, определяется как

$$\Delta_{\Pi} = X_{\Pi} - Q,$$

а относительная (δ_{Π}) погрешность определяется как отношение абсолютной погрешности к истинному значению преобразованной величины:

$$\delta_{\Pi} = \frac{\Delta_{\Pi}}{Q}.$$

Приведенная погрешность определяется как отношение Δ_{Π} к некоторому нормирующему значению X_N и выражается в процентах:

$$\gamma_{\Pi} = \frac{\Delta_{\Pi}}{X_N} 100 \%,$$

где Δ_{Π} – абсолютная погрешность преобразователя; X_N – предел преобразования.

Приведенная погрешность введена, в первую очередь, для характеристики показателей точности преобразователей, диапазон преобразуемых величин которых включает в себя и нулевое значение. Если преобразуемая величина приближается к нулю, то δ_{Π} любого преобразователя независимо от его точности стремится к бесконечности. Кроме того, γ_{Π} позволяет в отличие от Δ_{Π} и δ_{Π} выявить потенциальные возможности преобразователей в плане минимизации инструментальной составляющей погрешности результата измерения.

Нормирующее значение X_N - это условно принятое значение, которое может быть равным верхнему пределу преобразования, диапазону преобразования, длине шкалы и др.

Обобщенной характеристикой погрешности преобразователей является класс точности, определяемый пределами допускаемых основной и дополнительной погрешности преобразователей. При выражении этих пределов значениями δ_{Π} и γ_{Π} классы точности преобразователей обозначаются числами, которые равны этим пределам (в процентах) и соответствуют ряду

$$K = [1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,0; 5,0; 6,0] 10^n, n = 1, 0 -1, -2 \dots$$

На рисунке В.4 приведены в качестве примера характеристики погрешностей измерительных преобразователей при их нормировании приведенной $\gamma_{\Pi} = 1 \%$ (кривая 1) и относительной $\delta_{\Pi} = 2 \%$ (прямая 2) погрешностями.

Погрешности считывания, возникающие при использовании аналогового устройства индикации, являются постоянными, т.е. они имеют постоянное зна-

чение во всем интервале значений, на который рассчитан преобразователь. Поэтому значение абсолютной погрешности Δ_{Π} не зависит от угла отклонения подвижной части преобразователя и имеет постоянное значение в любой точке шкалы. Погрешность считывания принято нормировать в виде приведенной погрешности γ_{Π} и выражать в процентах относительно полной шкалы (предела преобразования).

Погрешность отображения, возникающая из-за изменения чувствительности измерительного преобразователя, будет постоянной в пределах всей линейной шкалы устройства индикации. Поэтому данная погрешность нормируется как относительная погрешность δ_{Π} и указывается в процентах по отношению к индицируемому значению.

Рассмотренные примеры нормирования погрешностей являются слишком грубыми. В третьем случае (кривая 3) предполагается, что погрешность отображения составляет 0,5 % относительно индицируемого значения, а погрешность считывания - 0,5 % от предела измерения. Рекомендуемый интервал отсчета преобразованных значений от 30 до 100 % полной шкалы.

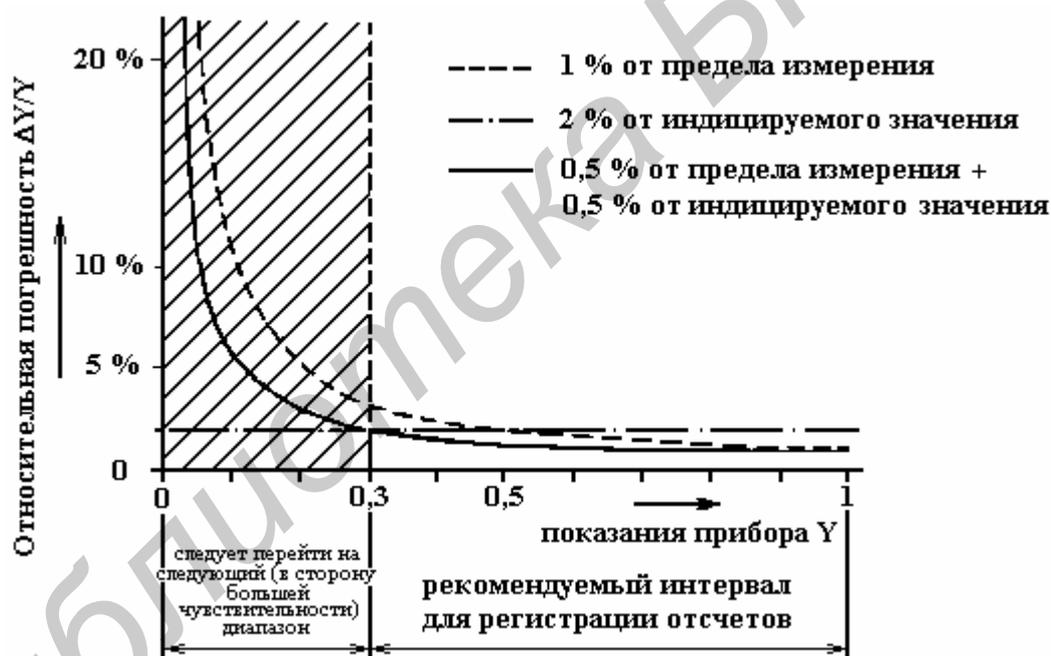


Рисунок В.4 - Относительная погрешность $\frac{\Delta Y}{Y}$ показаний прибора Y для трех различных вариантов определения погрешности, указываемой в технических характеристиках для аналогового устройства индикации с линейной шкалой

Кроме того, при считывании измеренного значения по аналоговому устройству индикации вносятся погрешности (погрешности вследствие параллакса, погрешности интерполяции и - в случае, когда перед измерением нужно устанавливать нуль прибора, - погрешности смещения). Поэтому погрешности преобразования измерительной информации, получаемые при использовании аналогового устройства индикации, достаточно высоки (приблизительно

лишь 0,1 ... 1 % от конечного значения шкалы). Для минимизации этих погрешностей необходимо согласование прибора с наблюдателем. Интерполяцию легче осуществить, когда шкала линейна, ее размеры велики, она нанесена четко и разбита на 10 или 3 крупные части. Зеркальная шкала значительно уменьшает погрешности вследствие параллакса.

Поскольку цифровое устройство индикации представляет наблюдателю измерительную информацию в виде числа или набора чисел, погрешности считывания информации не происходит. (Правда, наблюдатель может все же допустить ошибку другого рода, а именно *сбиться* при считывании или *спутать* цифры). Поэтому цифровые устройства индикации бывают специально рассчитаны на то, чтобы показать постоянные значения с высокой точностью. Единственная погрешность, вносимая при использовании цифровых устройств индикации, - это погрешность квантования, обусловленная конечной разрешающей способностью устройства индикации. В большинстве цифровых устройств индикации младшие разряды просто отбрасываются, вследствие чего возникает погрешность округления. Значение этой погрешности обратно пропорционально значению индицируемого числа (без учета десятичной запятой).

1 ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

1.1 Общие сведения об электромеханических преобразователях

Электромеханические преобразователи составляют одну из самых многочисленных групп аналоговых измерительных преобразователей (ИП) и широко применяются для преобразования постоянных и переменных токов, напряжений и других электрических и неэлектрических величин, а также используются в качестве составных частей более сложных электронных измерительных приборов. Основными достоинствами этих преобразователей являются их относительная простота и невысокая стоимость, достаточно высокие надежность и точность.

Электромеханические преобразователи в общем случае состоят [2, 3] из двух основных функциональных частей (рисунок 1.1): измерительной цепи (ИЦ) и измерительного механизма (преобразователя), размещенных в общем корпусе.

Измерительная цепь может представлять собой последовательное соединение различных измерительных преобразователей [1]: первичных, масштабных, передающих, преобразователей рода электрических величин (например, у выпрямительных и термоэлектрических приборов) - или может вырождаться в отдельный измерительный преобразователь у простейших однопредельных приборов. Основное назначение ИЦ заключается в преобразовании входного измерительного сигнала X в промежуточную электрическую величину X_1 , непосредственно воздействующую на преобразователь. Вид и значение величины X_1 должны быть такими, чтобы обеспечивались нормальные условия работы преобразователя. Кроме того, ИЦ может осуществлять расширение пределов измерений и компенсировать некоторые составляющие погрешности измерения.

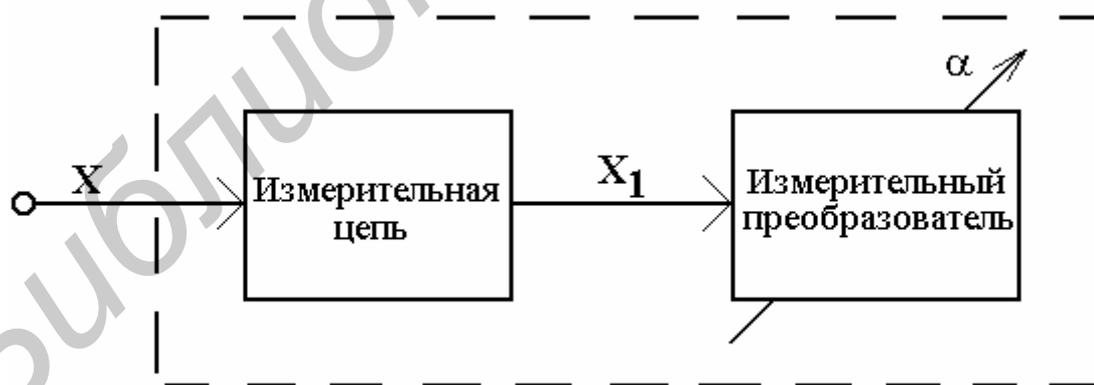


Рисунок 1.1 – Структурная схема электромеханического измерительного преобразователя

Преобразователь представляет собой устройство, преобразующее электромагнитную энергию измерительного электрического сигнала X_1 в механическую энергию перемещения (чаще всего углового) подвижной части преобразователя, в результате чего указатель отсчетного или регистрирующего устройства поворачивается в соответствии со значением измеряемой величины на угол

α . Значение измеряемой величины определяется по углу α отклонения указателя на шкале отсчетного устройства, предварительно проградуированной в единицах измеряемой величины.

1.2 Классификация электромеханических преобразователей

Дополнительно к общей классификации измерительных преобразователей, приведенной в [1], электромеханические преобразователи можно классифицировать по ряду характерных для них признаков.

Все электромеханические преобразователи в зависимости от принципа действия, т.е. от способа преобразования электромагнитной энергии измерительного сигнала в механическую энергию перемещения подвижной части преобразователя, можно дифференцировать на следующие основные группы:

- магнитоэлектрические преобразователи;
- электродинамические преобразователи;
- электромагнитные преобразователи;
- электростатические преобразователи;
- индукционные преобразователи.

Наряду с дифференциацией электромеханических преобразователей по принципу действия их можно классифицировать и по другим признакам. В зависимости от способа создания противодействующего момента различаются:

- преобразователи с механическим противодействующим моментом;
- преобразователи с электрическим противодействующим моментом (логометры).

По виду используемого отсчетного устройства электромеханические преобразователи подразделяются следующим образом:

- преобразователи с механическими указателями - стрелочные;
- преобразователи со световыми указателями.

В зависимости от пределов допускаемой приведенной погрешности электромеханические преобразователи делятся на классы точности. В частности для электромеханических амперметров, вольтметров и ваттметров установлены следующие классы точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0; 5,0.

По роду основной измеряемой величины электромеханические ИП классифицируются на амперметры, вольтметры, ваттметры, омметры, фазометры, частотомеры, гальванометры и др.

И, наконец, по своим размерам электромеханические преобразователи могут быть миниатюрными, малых, средних и больших габаритов.

1.3 Принцип работы электромеханических преобразователей

Принцип работы и основные технические характеристики электромеханических ИП во многом зависят от вида преобразователя, обеспечивающего преобразование энергии электрического измерительного сигнала в механическую энергию перемещения подвижной части ИП.

Общим для всех электромеханических ИП является то, что они состоят из неподвижной и подвижной частей и ряда общих деталей и узлов. Подвижная часть в большинстве преобразователей может совершать угловое перемещение вокруг неподвижной оси. Механический момент, возникающий в результате воздействия на преобразователь измерительного сигнала и обуславливающий

поворот его подвижной части в соответствии со значением измеряемой величины, называется *вращающим моментом* $M_{ВР}$. Этот момент должен однозначно зависеть от преобразуемой величины X и в общем случае от угла α поворота подвижной части ИП:

$$M_{ВР} = f(X, \alpha). \quad (1.1)$$

Наиболее общее выражение для вращающего момента любого электромеханического преобразователя может быть получено из уравнений Лагранжа второго рода, являющихся общими уравнениями динамики механических систем с одной степенью свободы относительно оси вращения. Подвижная часть ИП представляет собой именно такую механическую систему. *Вращающий момент* $M_{ВР}$, действующий на нее, определяется скоростью изменения электромагнитной энергии, запасенной в ИП, по углу поворота

$$M_{ВР} = \frac{dW_e}{d\alpha}, \quad (1.2)$$

где W_e - электромагнитная энергия измерительного сигнала X , запасенная в ИП.

Однако при воздействии на подвижную часть преобразователя только одного вращающего момента она отклонилась бы до упора при любом значении преобразуемой величины. Для обеспечения зависимости угла поворота α подвижной части от измеряемой величины в преобразователе создается *противодействующий момент* $M_{ПР}$, пропорциональный углу α и направленный противоположно $M_{ВР}$.

Противодействующий момент может создаваться механическим или электрическим путем. Для создания механического противодействующего момента используются упругие элементы: плоские спиральные пружины, тонкие ленточки или нити (растяжки и подвесы). При этом один конец упругого элемента закреплен на неподвижной, а другой - на подвижной частях ИП и поворот подвижной части будет вызывать закручивание упругого элемента, а значит, и возникновение $M_{ПР}$, пропорционального α :

$$M_{ПР} = k_{уд} \alpha, \quad (1.3)$$

где $k_{уд}$ - удельный противодействующий момент, зависящий от свойств упругого элемента.

В некоторых измерительных механизмах, называемых логометрическими, противодействующий момент создается электрическим путем. При этом и вращающий, и противодействующий моменты создаются аналогично, оба зависят от угла поворота подвижной части α и направлены противоположно.

В результате воздействия на подвижную часть преобразователя одновременно $M_{ВР}$ и $M_{ПР}$ установившееся ее положение будет определяться равенством

$$M_{ВР} = - M_{ПР}, \quad (1.4)$$

из которого с учетом выражений (1.1, 1.3) можно вывести зависимость угла поворота подвижной части α от измеряемой величины и в общем случае от параметров ИП

$$\alpha = F(X, \alpha, K), \quad (1.5)$$

где K - параметры ИП.

Выражение (1.5) является функцией преобразования (в литературе используется также другой термин – уравнение шкалы). Вид этого выражения зависит от принципа действия и конструкции преобразователей и, в свою очередь, определяет основные свойства и характеристики ИП.

Однако выражение (1.4) или (1.5) описывает работу ИП только в статическом режиме, т.е. при установившемся угле поворота подвижной части. В динамическом режиме в уравнение, описывающее ее движение, должны наряду с $M_{ВР}$ и $M_{ТР}$ входить также другие действующие на подвижную часть моменты, основными из которых являются момент успокоения M_y и момент трения $M_{ТР}$.

Моментом успокоения M_y называют момент сил, подавляющих собственные колебания подвижной части, т.е. успокаивающих ее. Указанные силы должны действовать только тогда, когда подвижная часть находится в движении, и прекращать свое воздействие при ее остановке. Таким образом, момент успокоения должен быть пропорционален угловой скорости $\frac{d\alpha}{dt}$ движения подвижной части, а его направление должно быть противоположным скорости

$$M_y = -P \frac{d\alpha}{dt}, \quad (1.6)$$

где P - коэффициент успокоения.

Момент трения $M_{ТР}$ представляет собой момент сил трения в кривошипных опорах. $M_{ТР}$ должен быть также направлен противоположно движению и выражается с помощью следующей эмпирической формулы:

$$M_{ТР} = k_{ТР} m^{1,5}, \quad (1.7)$$

где $k_{ТР}$ - коэффициент пропорциональности; m - масса подвижной части измерительного преобразователя.

Сумма всех моментов, действующих на подвижную часть ИП, равна моменту количества движения подвижной части, который равен $J \frac{d^2\alpha}{dt^2}$, где J - мо-

мент инерции относительно оси вращения; $\frac{d^2\alpha}{dt^2}$ - угловое ускорение движения подвижной части.

Таким образом, уравнение, описывающее движение подвижной части ИП, можно записать

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = M_{ВР} + M_{ПР} + M_{У} + M_{ТР}. \quad (1.8)$$

Подставляя в (1.8) выражения (1.1, 1.3, 1.6, 1.7), получим наиболее общее дифференциальное уравнение, описывающее движение подвижной части ИП:

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + K_{УД} \alpha + k_{ТР} m^{1,5} = f(X, \alpha). \quad (1.9)$$

Для установившегося положения подвижной части ИП момент количества движения, момент успокоения и момент трения равны нулю и уравнение (1.9) с учетом (1.1, 1.3) преобразуется к виду (1.4). Следовательно, выражение (1.5) для функции преобразования ИП является частным решением дифференциального уравнения движения подвижной части ИП (1.9).

Полное решение $\alpha_{П}$ уравнения (1.9) будет состоять из суммы данного частного решения α и общего решения α_0 уравнения (1.9) без правой части:

$$\alpha_{П} = \alpha + \alpha_0. \quad (1.10)$$

Моментом трения для большинства реальных преобразователей (за исключением случаев, когда подвижная часть крепится в керновых опорах, для которых $M_{ТР}$ необходимо принимать во внимание) можно пренебречь. Тогда общее решение α_0 уравнения (1.9) без правой части можно находить в виде

$$\alpha_0 = C_1 e^{\vartheta_1 t} + C_2 e^{\vartheta_2 t}, \quad (1.11)$$

где C_1, C_2 - постоянные интегрирования; ϑ_1, ϑ_2 - корни характеристического уравнения, составленного для (1.9) без правой части при условии $M_{ТР} = 0$.

Значения ϑ_1 и ϑ_2 определяются выражением

$$\vartheta_{1,2} = -\frac{P}{2J} \pm \sqrt{\frac{P^2}{4J^2} - \frac{K_{УД}}{J}} \quad (1.12)$$

или выражением

$$\vartheta_{1,2} = \omega_0 (-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 1}) \quad (1.13)$$

при условии, что

$$\beta = \frac{P}{2} \sqrt{JK_{УД}}, \quad (1.14)$$

$$\omega_0 = \frac{K_{УД}}{J}, \quad (1.15)$$

где β - степень успокоения подвижной части; ω_0 - частота собственных колебаний подвижной части.

Различным степеням успокоения подвижной части ИП, как следует из (1.11, 1.13), соответствуют различные режимы ее движения (рисунок 1.2). Так, при $\beta < 1$ корни $X_{1,2}$ мнимые и характер движения подвижной части колебательный (кривая 1 на рисунке 1.2); при $\beta > 1$ корни вещественные, характер движения подвижной части аperiodический (кривая 2 на рисунке 1.2); при $\beta = 1$ корни вещественные (равные), характер движения подвижной части - аperiodический, наиболее ускоренный и называемый режимом критического успокоения (кривая 3 на рисунке 1.2).

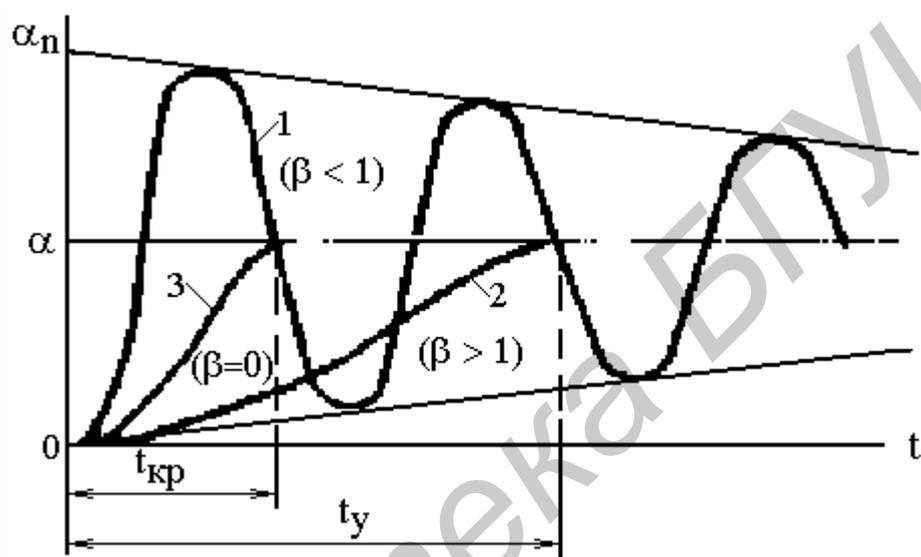


Рисунок 1.2 – Различные степени успокоения подвижной части преобразователей

На рисунке 1.2 t_y - время установления показаний, т.е. время, необходимое для поворота подвижной части преобразователя в установившееся положение, соответствующее углу α (1.5). Наименьшее значение t_y будет в режиме критического успокоения $t_{кр}$.

Из выражений (1.11, 1.13) и рисунка 1.2 видно, что от режима работы ИП зависит такая важная характеристика измерительных преобразователей, как время установления показаний. Анализ указанных выражений позволяет путем изменения параметров ИП оптимизировать режим их работы и добиться минимального времени установления показаний.

1.4 Общие узлы и детали электромеханических преобразователей

Существующие электромеханические преобразователи отличаются друг от друга как принципом действия, так и конструктивным исполнением, обуславливающими наличие большого разнообразия конкретных видов и типов преобразователей. Однако для всех их ряд узлов и деталей является общим и различается только конструктивно. Сюда относятся: корпус, устройство для создания противодействующего момента, приспособление для установки подвижной части, отсчетное устройство и успокоитель (демпфер).

Корпус прибора предназначен для установки и крепления в нем элементов измерительных цепей и узлов преобразователей, а также для защиты их от воздействий внешней среды. Корпус изготавливают из стали, сплавов цветных металлов, пластмассы или из сочетания указанных материалов. Размеры и форма корпуса определяются видом, назначением и условиями эксплуатации преобразователя и весьма разнообразны. Часть корпуса прибора, закрывающая шкалу, изготавливается, как правило, из стекла.

Различные виды устройств для создания механического противодействующего момента и приспособления для установки подвижной части преобразователей показаны на рисунке 1.3.

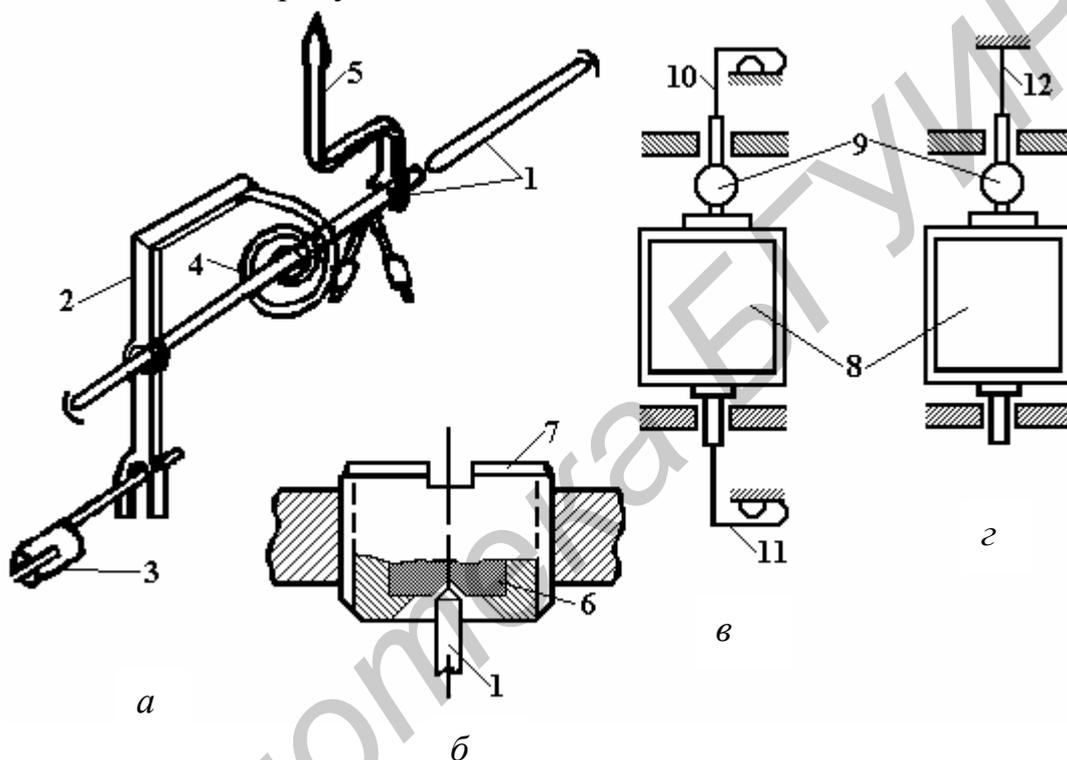


Рисунок 1.3 – Устройства для создания противодействующего момента и приспособления для установки подвижной части преобразователей

При установке подвижной части на оси 1 между опорами (рисунок 1.3,а,б) противодействующий момент создается с помощью спиральных пружин 4. Ось или полуось 1 при этом заканчиваются кернами, изготавливаемыми из стали и заточенными на конус с закруглением на конце. Керн опирается на подпятник 6, изготавливаемый из агата, корунда или рубина (иногда из стали или бронзы) и запрессованный в регулировочный винт 7. Пружины 4 изготавливаются из оловянно-цинковой и других бронз и обеспечивают практически постоянное значение $K_{уд}$ в выражении (1.3).

При креплении подвижной части 8 на растяжках 10 (рисунок 1.3,в) последние при повороте подвижной части закручиваются и создают противодействующий момент. Пружины 11 обеспечивают необходимое натяжение растяжек. У преобразователя с таким способом крепления подвижной части повышается чувствительность и устраняется механическое трение в опорах,

что способствует повышению точности измерения.

Крепление подвижной части 8 на подвесе 12 (рисунок 1.3,з) применяется в высокочувствительных приборах - гальванометрах. Растяжки и подвесы представляют собой тонкие ленточки или нити, изготовляемые из различных бронзовых и платиновых сплавов. Зеркальце 9, закрепленное на подвижной части 8 (см. рисунок 1.3,в,з), используется в отсчетном устройстве со световым указателем.

Для установки указателя отсчетного устройства 5 (см. рисунок 1.3,а) перед началом измерения на нулевое значение шкалы служит корректор, состоящий из поводка 2 и винта 3 с эксцентрически расположенным на нем стержнем, который входит в вилку поводка. Вращая винт 3, выведенный на переднюю панель преобразователя, добиваются установки указателя 5 на нулевую отметку шкалы.

Для защиты устройств крепления подвижной части от повреждений при транспортировке в чувствительных приборах применяются арретиры. Арретир представляет собой устройство, осуществляющее подъем и полужесткое фиксирование подвижной части преобразователя на время транспортировки.

Отсчетные устройства служат для определения числового значения преобразуемой величины и состоят из шкалы и указателя. В зависимости от вида указателя различают отсчетные устройства со стрелочными (см. рисунок 1.3,а) и световыми (рисунок 1.5) указателями.

На шкалу отсчетного устройства наносятся отметки в виде штрихов и точек (оцифрованные и неоцифрованные), соответствующие значениям измеряемой величины, а также ряд условных обозначений, характеризующих важнейшие свойства преобразователя.

Промежуток между двумя соседними отметками шкалы называется делением шкалы, а разность значений измеряемой величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы, называется ценой деления. Цена деления согласовывается с абсолютной погрешностью прибора и превышает ее в 2 - 4 раза. Шкала считается равномерной, если расстояния между двумя любыми смежными ее отметками равны между собой. В противном случае шкала является неравномерной.

В технических приборах с классом точности ниже 0,5 используются обычные незеркальные шкалы и клиновидные стрелки (рисунок 1.4,а). В приборах класса точности 0,5 и выше используются ножевидные или игловидные стрелки (рисунок 1.4,б,в), а также зеркальные шкалы.

В приборах с малым значением вращающего момента используют отсчетные устройства со световыми указателями (см. рисунок 1.5). При этом луч от осветителя 1 через оптическую систему 2 и диафрагму 3 попадает на зеркало 5 подвижной части 4 и, отражаясь от него, далее попадает на шкалу 6. На шкале получается изображение светового пятна, посередине которого резко видна тень нити, укрепленной в отверстии диафрагмы. При повороте подвижной части световая "стрелка" перемещается по шкале. В приборах с высокой чувствительностью используется световой указатель с длиной луча порядка 1,5 ... 2 м, получаемой за счет многократного отражения луча или за счет использования отдельной выносной шкалы.

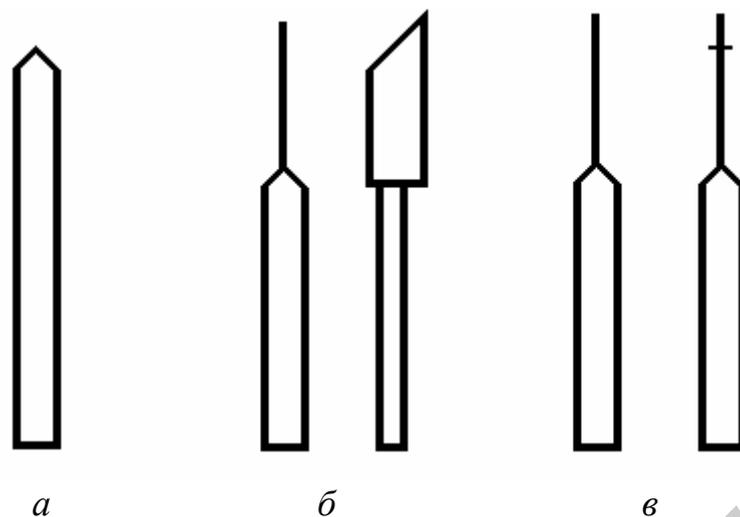


Рисунок 1.4 – Указатели электромеханических преобразователей

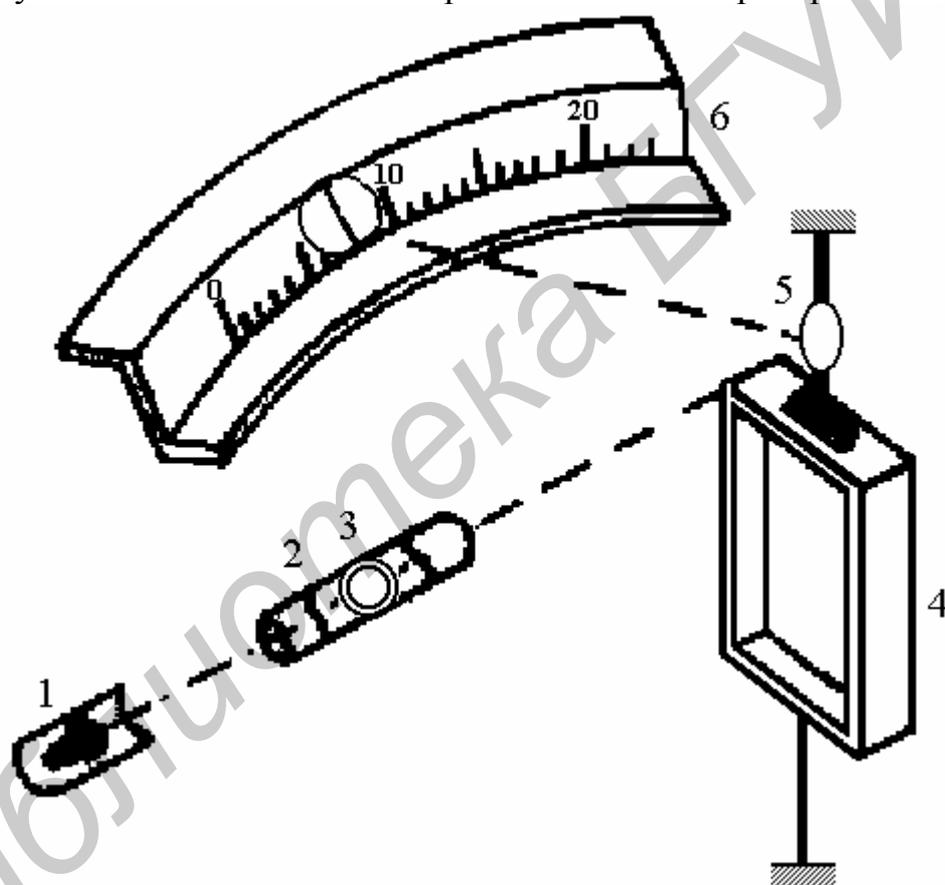


Рисунок 1.5 – Отсчетное устройство со световым указателем

Основные преимущества светового отсчета заключаются в том, что при его использовании создаются предпосылки для повышения чувствительности (угол отклонения отраженного от зеркальца луча вдвое больше угла поворота подвижной части; длина луча может быть сделана достаточно большой) и за счет уменьшения массы и момента инерции подвижной части возможно расширение пределов преобразования в сторону малых значений, а также улучшаются условия успокоения прибора.

Для уменьшения времени переходного процесса (t_y на рисунке 1.2) подвижной части перед достижением ею установившегося положения служат ус-

покойтели, обеспечивающие требуемую степень успокоения.

В электромеханических преобразователях наиболее широко применяются воздушные и магнитоиндукционные успокойтели, устройство которых схематически показано на рисунке 1.6.

Крыльчатый воздушный успокойтель (рисунок 1.6,а) состоит из закрытой камеры 1 и легкого алюминиевого крыла 2, которое жестко связано с осью 3 подвижной части ИП и может свободно перемещаться внутри камеры. Между крылом и стенками камеры имеется зазор порядка 0,3 ... 0,5 мм. Ввиду малости этого зазора при движении подвижной части в камере создается разность давлений по обе стороны крыла, которая противодействует свободному перемещению подвижной части и вызывает ее успокойение.

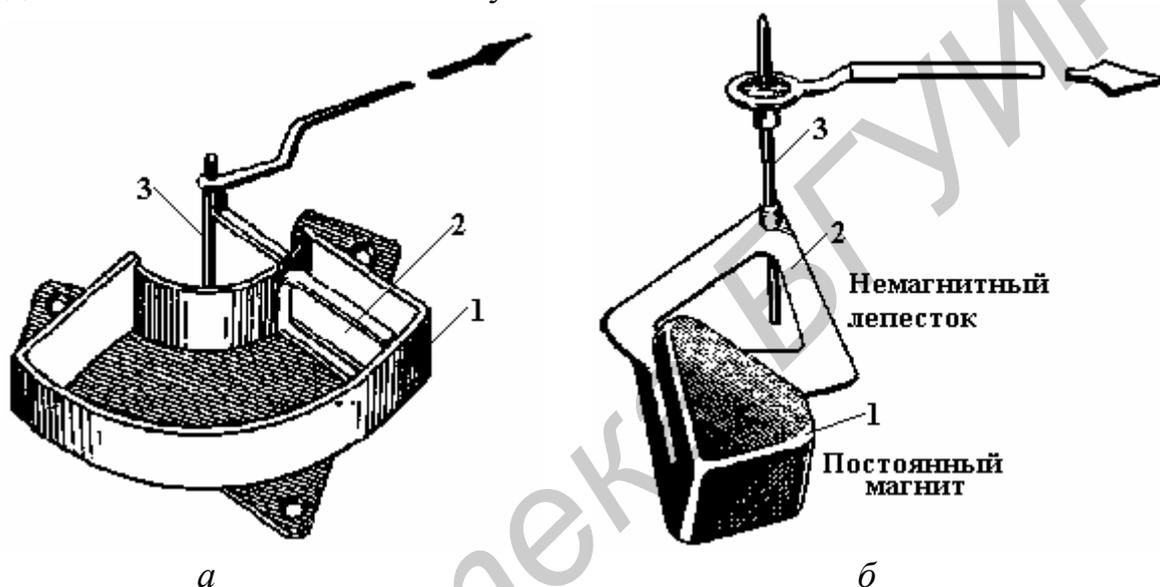


Рисунок 1.6 – Различные типы успокойтелей

Магнитоиндуктивные успокойтели (рисунок 1.6,б) состоят из постоянного тормозного магнита 1 и неферромагнитного металлического сектора 2, неподвижно закрепленного на оси 3 подвижной части ИП и находящегося в магнитном поле магнита. При движении подвижной части в секторе 2 возникают вихревые токи, магнитное поле которых взаимодействует с полем магнита 1 и в результате этого создается момент успокойения.

Конструктивно магнитоиндукционные успокойтели проще воздушных и легко поддаются регулировке. Однако поле тормозного магнита может оказывать влияние на показания приборов. В таком случае предпочтение отдают воздушным успокойителям.

В некоторых преобразователях (например в осциллографических гальванометрах и др.) для успокойения подвижной части преобразователя используются жидкостные успокойители [2].

2 МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Магнитоэлектрические преобразователи выделяются среди других групп электромеханических преобразователей широтой и разнообразием применения,

высокими метрологическими характеристиками, а также многотипностью [3]. Отечественной промышленностью серийно выпускаются магнитоэлектрические преобразователи вплоть до класса точности 0,05 и с минимальным током полного отклонения до 0,1 мкА.

Наиболее широко магнитоэлектрические преобразователи используются при создании амперметров и вольтметров постоянного тока, омметров, гальванометров постоянного тока, баллистических гальванометров для измерений малых количеств электричества, а также приборов для измерений в цепях переменного тока (осциллографические гальванометры, вибрационные гальванометры, выпрямительные, термоэлектрические и электронные приборы на базе магнитоэлектрических преобразователей).

2.1 Принцип действия, устройство и основы теории магнитоэлектрических измерительных преобразователей

Принцип действия магнитоэлектрических преобразователей основан на взаимодействии магнитных полей постоянного магнита и проводника с током, конструктивно выполненного в виде катушки (рамки).

Практически все магнитоэлектрические преобразователи можно разделить на две основные разновидности:

- преобразователи с подвижной катушкой и неподвижным магнитом;
- преобразователи с неподвижной катушкой и подвижным магнитом.

Конструктивно преобразователи обеих разновидностей могут быть выполнены:

- с внешним (по отношению к рамке) магнитом;
- с внутрирамочным (внутренним) магнитом.

Кроме того, они могут различаться креплением подвижной части, способом создания противодействующего момента, способом успокоения подвижной части и др.

В настоящее время более широкое применение получили магнитоэлектрические преобразователи с неподвижным магнитом и подвижной катушкой (рисунок 2.1).

Катушка 5 с числом витков w и площадью витка s находится в магнитном зазоре с равномерным радиальным магнитным полем. Поле в зазоре создается с помощью магнитной системы, состоящей из постоянного магнита 7, полюсных наконечников с цилиндрической расточкой 6 и цилиндрического сердечника 4 из магнитомягкого материала. Благодаря введению в магнитную систему сердечника 4, поле в зазоре, где движется рамка, получается однородным. Для изготовления магнита 7 используют материалы с большой коэрцитивной силой, чаще всего железоникельалюминиево-кобальтовые сплавы. Магнитопроводы и полюсные наконечники выполняют из магнитомягких материалов, чаще всего из низкоуглеродистых электротехнических сталей. Подвижная часть крепится на полуосях и керновых опорах (в высокочувствительных приборах - на растяжках и подвесах). Противодействующий момент может создаваться механическим (с помощью спиральных пружин 3) или электрическим путем. Катушка 5 наматывается на легком алюминиевом каркасе и жестко крепится на полуосях. При движении катушки в магнитном зазоре в каркасе возникают вихре-

вые токи, создающие момент успокоения (подраздел 1.4). Если получаемый таким образом момент успокоения недостаточно велик, то на каркас катушки дополнительно наматывается необходимое количество короткозамкнутых витков, увеличивающих момент успокоения до нужного значения.

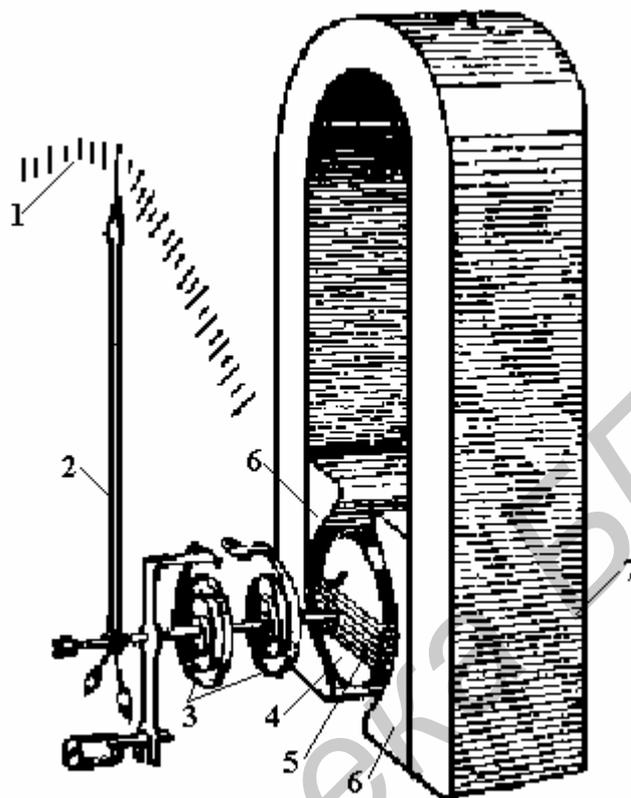


Рисунок 2.1 – Конструкция магнитоэлектрического преобразователя

На оси подвижной части ИП жестко крепится стрелка 2, которая вместе со шкалой 1 образует отсчетное устройство, позволяющее определять числовые значения измеряемых величин по углу поворота α подвижной части преобразователя.

Для определения вращающего момента воспользуемся общим выражением (1.2). Энергия электромагнитного поля W_E , обусловленная взаимодействием потока вектора индукции Φ постоянного магнита и тока I , протекающего по катушке, определяется выражением

$$W_E = I\Phi. \quad (2.1)$$

Изменение магнитного потока $d\Phi$ при повороте рамки на угол $d\alpha$ равно

$$d\Phi = Bswd\alpha, \quad (2.2)$$

где B - магнитная индукция в зазоре.

Вращающий момент в соответствии с (1.2) определится выражением

$$M_{BP} = \frac{dW_E}{d\alpha} = BswI. \quad (2.3)$$

Приравняв вращающий (2.3) и противодействующий (1.3) моменты, можно

записать уравнение преобразования (уравнение шкалы) магнитоэлектрического преобразователя:

$$\alpha = \frac{B_{sw}}{K_{уд}} I = S_i I; \quad (2.4)$$

$$S_i = \frac{B_{sw}}{K_{уд}}, \quad (2.5)$$

где S_i - чувствительность ИМ по току.

Выражения (2.4, 2.5) позволяют сделать следующие выводы о свойствах (достоинствах и недостатках) магнитоэлектрических преобразователей:

- угол отклонения стрелки прямо пропорционален току, протекающему по катушке. Следовательно, магнитоэлектрический преобразователь можно непосредственно использовать для преобразования тока, а его функция преобразования будет линейной;

- при изменении направления протекания тока на обратное будет изменяться и направление отклонения подвижной части, т.е. магнитоэлектрические преобразователи могут использоваться для преобразования только в цепях постоянного или медленно изменяющегося тока;

- чувствительность магнитоэлектрических преобразователей постоянна и может быть повышена за счет увеличения магнитной индукции в зазоре, площади и числа витков катушки или уменьшения удельного противодействующего момента упругих элементов;

- собственное потребление мощности магнитоэлектрическими преобразователями вследствие их высокой чувствительности мало.

Конструктивно магнитоэлектрические преобразователи достаточно сложны и поэтому несколько дороже преобразователей других групп. Они мало устойчивы к электрическим перегрузкам из-за того, что создающий противодействующий момент пружины (3 на рисунке 2.1) или растяжки одновременно используются в качестве токоподводящих элементов катушки и при перегрузках первыми выходят из строя: перегорают или теряют упругие свойства.

Наиболее существенное влияние на магнитоэлектрические преобразователи из внешних факторов оказывает температура окружающей среды. В зависимости от температуры изменяются магнитная индукция в зазоре, удельный противодействующий момент, а также электрическое сопротивление катушки. Однако влияние температурного изменения магнитной индукции и противодействующего момента компенсируют друг друга, влияние же изменения сопротивления уменьшается за счет применения схем термокомпенсации [3].

На основе магнитоэлектрических ИП с механическим противодействующим моментом создано большое количество разнообразных амперметров, вольтметров, гальванометров и омметров. В ряде случаев используются магнитоэлектрические логометрические преобразователи (рисунок 2.2).

Для того чтобы обеспечить возможность создания электрическим путем как вращающего, так и противодействующего моментов, подвижная часть преобразователя состоит из двух неподвижно закрепленных на полуосях катушек 1 и 2 и стрелки 4 с противовесами 5. Упругие элементы для создания механиче-

ского противодействующего момента здесь отсутствуют. Токи к катушкам 1 и 2 подводятся с помощью безмоментных (неупругих) проводников, выполненных чаще всего из бронзы.

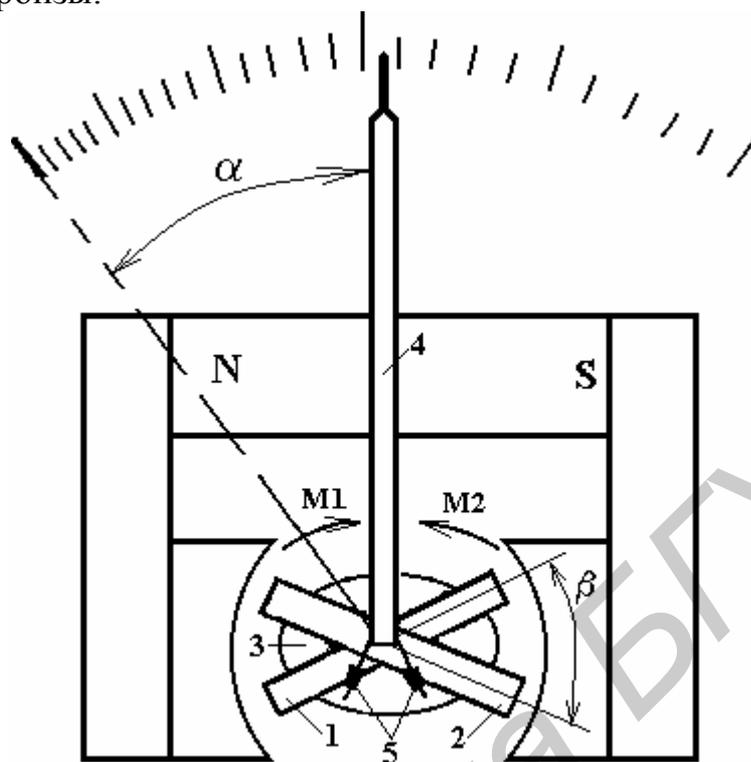


Рисунок 2.2 – Магнитоэлектрический логометрический преобразователь

При протекании по катушкам 1 и 2 токов, например I_1 и I_2 , их магнитные поля, взаимодействуя с полем в зазоре, где находятся катушки, создают моменты M_1 и M_2 . Направление токов I_1 и I_2 выбираются такими, чтобы указанные моменты были направлены противоположно друг другу. Тогда один из моментов можно рассматривать как вращающий, а второй - как противодействующий. Эти моменты (по крайней мере один из двух) должны зависеть от угла α (см. рисунок 2.1) поворота подвижной части. Наиболее просто зависимости M_1 и M_2 от α можно добиться созданием в зазоре неравномерного поля, у которого B является функцией угла α . Технически осуществить его можно, сделав сам зазор неравномерным, например, путем использования эллипсоидального сердечника 3, как это показано на рисунке 2.2. В остальном конструкция логометрического преобразователя аналогична конструкции магнитоэлектрического преобразователя, приведенной на рисунке 2.1.

Моменты, действующие на подвижную часть логометрического преобразователя, можно выразить по аналогии с формулой (2.3) следующими соотношениями:

$$M_1 = B(\alpha)s_1w_1I_1;$$

$$M_2 = B(\alpha)s_2w_2I_2,$$

где S_1 , w_1 и S_2 , w_2 - параметры первой и второй катушек соответственно; β

- угол между катушками.

Подвижная часть будет в состоянии равновесия при условии $M_1 = M_2$, т.е.

$$B(\alpha) s_1 w_1 I_1 = B(\alpha-\beta) s_2 w_2 I_2, \quad (2.6)$$

или

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{B(\alpha - \beta) s_2 w_2}{B(\alpha) s_1 w_1}. \quad (2.7)$$

Разрешив (2.7) относительно α , можно в общем случае записать выражение

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right), \quad (2.8)$$

из которого видно, что отклонение подвижной части однозначно определяется отношением токов в катушках.

При отсутствии токов в катушках подвижная часть логотрического преобразователя может находиться в произвольном положении, так как механизм не содержит упругих элементов (спиральных пружин), однозначно определяющих начальное положение подвижной части преобразователя.

2.2 Магнитоэлектрические приборы постоянного тока

Самыми разнообразными по номенклатуре и наиболее широко используемыми приборами, создаваемыми на основе магнитоэлектрических преобразователей, являются амперметры, вольтметры, гальванометры и омметры для измерений в цепях постоянного тока.

Амперметры. Как уже отмечалось ранее, магнитоэлектрические измерительные механизмы могут непосредственно использоваться для измерений силы электрического тока. Для этого они включаются в электрическую цепь последовательно с участком, ток через который необходимо измерить (рисунок 2.3,а). Внутреннее сопротивление R_A такого амперметра равно сумме внутреннего сопротивления измерительного механизма R_i и термокомпенсирующего резистора R_{TK} (рисунок 2.3,б), если последний используется в амперметре. Сопротивление R_i представляет собой последовательно соединенные сопротивление катушки преобразователя R_K и сопротивление токоподводящих элементов R_T , т.е. $R_i = R_K + R_T$. Таким образом, внутреннее сопротивление амперметра равно либо $R_A = R_i$ - для амперметра, не содержащего термокомпенсирующих преобразователей, либо $R_A = R_i + R_{TK}$ - для амперметра, содержащего термокомпенсирующий резистор R_{TK} .

Так как R_A в обоих случаях является конечной величиной, режим электрической цепи после включения в нее амперметра изменится, т.е. измеренное значение тока $I_{ИЗМ}$, протекающего через нагрузку R_H при включении в цепь амперметра, будет отличаться от действительного значения тока I , протекающего через R_H до начала измерений. Однако данная погрешность является систематической и может быть вычислена и исключена из результата измерений.

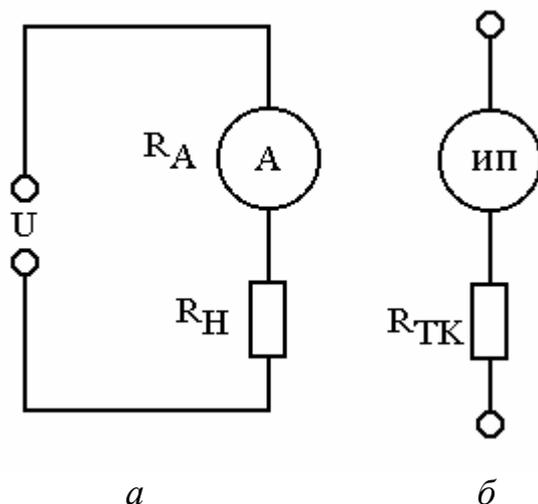


Рисунок 2.3 – Амперметр на базе магнитоэлектрического преобразователя

Вычислить с помощью амперметра погрешность измерения тока, обусловленную конечным сопротивлением прибора, можно по формуле

$$\delta_I = \frac{I_{\text{ИЗМ}} - I}{I} 100\% = -\frac{1}{1 + \frac{R_H}{R_A}} 100\%. \quad (2.9)$$

Знак "минус" в формуле (2.9) показывает, что измеренное значение тока $I_{\text{ИЗМ}}$ всегда будет меньше действительного значения тока I .

Значение погрешности δ_I не зависит от класса точности используемого амперметра, а полностью определяется отношением R_H/R_A .

Для уменьшения δ_I необходимо снижать внутреннее сопротивление амперметра R_A с тем, чтобы выполнялось условие $R_A \ll R_H$.

Температура влияет на магнитную индукцию в рабочем зазоре, удельный противодействующий момент и внутреннее электрическое сопротивление преобразователя. Так, при повышении температуры индукция B уменьшается со скоростью $0,02\%/K$, а удельный противодействующий момент $K_{\text{уд}}$ - со скоростью $0,02 - 0,04\%/K$. Так как температурные изменения B и $K_{\text{уд}}$ примерно одинаковы, а их влияния на показания прибора, как следует из (2.4), противоположны, то в результате действия обоих факторов одновременно показания прибора практически не изменятся.

Для уменьшения температурной погрешности за счет изменения внутреннего сопротивления преобразователя используются измерительные термокомпенсирующие преобразователи. Простейшим из них является делительная цепь, (см. рисунок 2.3,б), образованная путем последовательного включения внутреннего термозависимого сопротивления $R_i(t)$ и термокомпенсирующего резистора $R_{\text{ТК}}$ из материала с малым температурным коэффициентом сопротивления (например манганина). Результирующий температурный коэффициент сопротивления полученной цепи β может быть рассчитан по

$$\beta = \frac{R_i(t)\beta_M}{R_i(t) + R_{TK}} = \frac{\beta_M}{1 + \frac{R_{TK}}{R_i(t)}}, \quad (2.10)$$

где β_M - температурный коэффициент сопротивления (ТКС) преобразователя, определяемый глазным образом ТКС медной обмотки преобразователя.

Из (2.19) видно, что для уменьшения β_θ необходимо использовать R_{TK} с большими значениями сопротивления, однако это ведет к значительному уменьшению чувствительности амперметра. Более совершенными являются последовательно-параллельные термокомпенсирующие цепи, а также цепи с терморезисторами, мостовые цепи, цепи с термомагнитными шунтами и др.

Вольтметры. Магнитоэлектрические вольтметры образуются путем включения измерительного преобразователя последовательно с добавочным резистором R_D (рисунок 2.4,а). Полученный таким образом прибор подключается параллельно участку цепи, падение напряжения на котором необходимо измерить (рисунок 2.4,б).

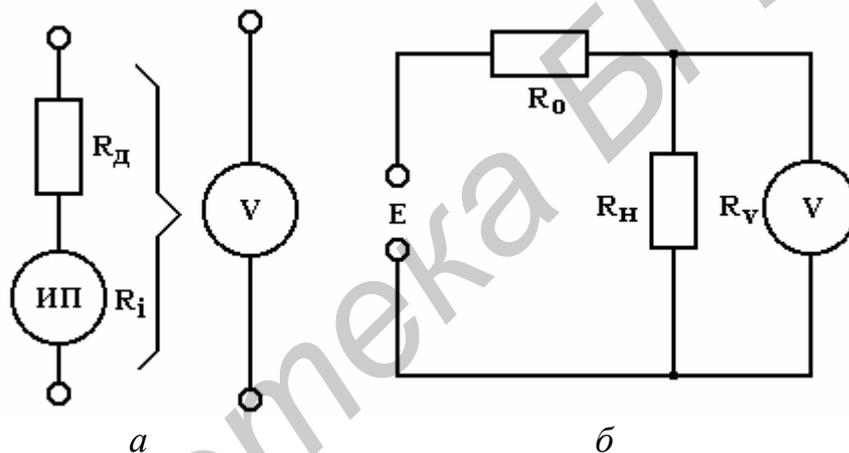


Рисунок 2.4 – Вольтметр на основе магнитоэлектрического преобразователя

При измерении напряжения с помощью такого прибора возникает погрешность измерения, обусловленная тем, что сопротивление прибора имеет конечное значение $R_V = R_i + R_D$ и при его подключении к электрической цепи режим последней изменится. В результате этого измеренное значение напряжения $U_{ИЗМ}$ на нагрузке R_H после подключения к ней вольтметра будет отличаться от действительного напряжения U на R_H до подключения вольтметра. Погрешность результата измерения δ_U , возникающая при этом, является систематической и может быть вычислена по формуле

$$\delta_U = \frac{U_{ИЗМ} - U}{U} 100\% = -\frac{1}{1 + \frac{R_V}{R_H} + \frac{R_V}{R_0}} 100\%, \quad (2.11)$$

где R_0 - внутреннее сопротивление источника питания E .

Из формулы (2.11) видно, что для идеального источника ЭДС, у которого $R_0 = 0$, погрешность $\delta_U = 0$, т.е. результат измерения не зависит от внутреннего

сопротивления вольтметра. Однако на практике такие источники ЭДС отсутствуют. Знак "минус" в формуле (2.11) показывает, что измеренное значение напряжения $U_{\text{изм}}$ всегда будет меньше действительного значения U на сопротивлении нагрузки R_H .

Для уменьшения δ_U необходимо использовать при измерениях вольтметры с высоким входным сопротивлением, чтобы выполнялось условие $R_V \gg R_H$. Для компенсации температурной погрешности используются те же измерительные цепи, что и у амперметров.

Гальванометры. Гальванометрами называют высокочувствительные электроизмерительные приборы, имеющие неградуированную шкалу и применяемые в качестве нуль-индикаторов, а также после предварительной градуировки для измерения малых значений токов, напряжений, количеств электричества и других физических величин [13, 14].

Наиболее широкое распространение в практике получили магнитоэлектрические гальванометры. Конструктивно они делятся на два вида:

- переносные со встроенной шкалой, в которых могут использоваться как стрелочные, так и световые отсчетные устройства;
- зеркальные со световым отсчетом и с отдельной шкалой, устанавливаемой на значительном расстоянии от гальванометра.

В переносных гальванометрах подвижная часть крепится на растяжках, в стационарных - на подвесе.

Гальванометры могут также использоваться для определения равенства двух токов. В этом случае их подвижная часть содержит не одну, а две обмотки, по которым измеряемые токи протекают в противоположных направлениях. Вращающий момент, а значит, и угол поворота подвижной части, определяются разностью токов, что позволяет сравнивать их значения с помощью такого дифференциального гальванометра.

Кроме того, гальванометры могут различаться постоянной времени подвижной части. Гальванометры с большой постоянной времени и используемые для измерения коротких импульсов тока (малых количеств электричества) называют б а л л и с т и ч е с к и м и. Большое значение постоянной времени у них достигается за счет увеличения момента инерции подвижной части.

Устройство магнитоэлектрического гальванометра принципиально мало чем отличается от устройства магнитоэлектрического преобразователя, рассмотренного в подразделе 2.1. Отличия заключаются в том, что с целью повышения чувствительности прибора его подвижная часть крепится на растяжках или подвесе и используется отсчетное устройство со световым указателем (см. рисунок 1.5) и большой длиной луча. В отличие от обычных магнитоэлектрических преобразователей многие гальванометры имеют магнитный шунт, позволяющий механически изменять значение магнитной индукции в рабочем зазоре, а тем самым и чувствительность или постоянную прибора. Гальванометры также снабжаются корректором, служащим для изменения положения указателя относительно нулевой отметки, находящейся, как правило, в центре шкалы. Большинство из них имеет арретир (см. подраздел 1.4). Движение подвижной части гальванометра описывается уравнением (1.9), решение которого (см. под-

раздел 1.2) определяется параметрами подвижной части. Характер решения, записываемого выражениями (1.5, 1.10, 1.11), однозначно зависит от степени успокоения подвижной части гальванометра. Исходя из анализа режимов движения подвижной части гальванометра (см. рисунок 1.2) определяются ее оптимальные параметры. Кроме того, при повороте катушки гальванометра, подключенной к внешнему сопротивлению $R_{вн}$, в ней возникает электрический ток, магнитное поле которого тормозит движение катушки. Из уравнения (1.9) при учете влияния указанного тока можно определить так называемое внешнее критическое сопротивление $R_{вн.кр}$ гальванометра. Под $R_{вн.кр}$ понимают наибольшее возможное значение сопротивления внешней цепи гальванометра, при котором его подвижная часть движется аperiodически, но наиболее ускоренно. Значение $R_{вн.кр}$ указывается в паспорте прибора.

Основной характеристикой всех гальванометров является их чувствительность. Лучшие современные зеркальные гальванометры имеют чувствительность до 10^{-12} дел/А. Чувствительность переносных гальванометров со встроенной шкалой может достигать значений 10^{-9} дел/А. Для баллистических гальванометров наиболее важной характеристикой является баллистическая постоянная S_q , равная количеству электричества, соответствующего перемещению подвижной части на одно деление шкалы. Обратная баллистической постоянной S_q величина называется баллистической чувствительностью S_q гальванометра. Эти величины, кроме параметров самого гальванометра, зависят также от сопротивления внешней цепи, подключенной к прибору. Для баллистических гальванометров, кроме S_q (S_q), всегда указывается период колебаний подвижной части T_0 , значение которого при точных измерениях должно в десятки раз превышать длительность измеряемых импульсов.

Омметры. На основе магнитоэлектрических преобразователей могут быть созданы приборы для непосредственного измерения такого важного параметра электрических цепей, как электрическое сопротивление. Такие приборы получили название омметров. Простейший омметр представляет собой преобразователь, ток через который создается источником постоянного во времени напряжения и зависит от значения измеряемого сопротивления R_x . Указанное сопротивление может быть включено последовательно или параллельно измерительному преобразователю (рисунок 2.5.а,б соответственно). Шкала прибора может быть при этом проградуирована в единицах сопротивления.

Действительно, выразив с учетом (1.19) показание отсчетного устройства преобразователя через ток, протекающий по его катушке, получим для последовательной схемы

$$\alpha = S_I \frac{U}{R_x + R + R_i} \quad (2.12)$$

и для параллельной схемы

$$\alpha = S_I \frac{U}{R + R_i + \frac{R \cdot R_i}{R_x}}, \quad (2.13)$$

где R_i - внутреннее сопротивление преобразователя, на базе которого соз-

дан омметр; R - добавочный резистор, включенный в схему омметра постоянно.

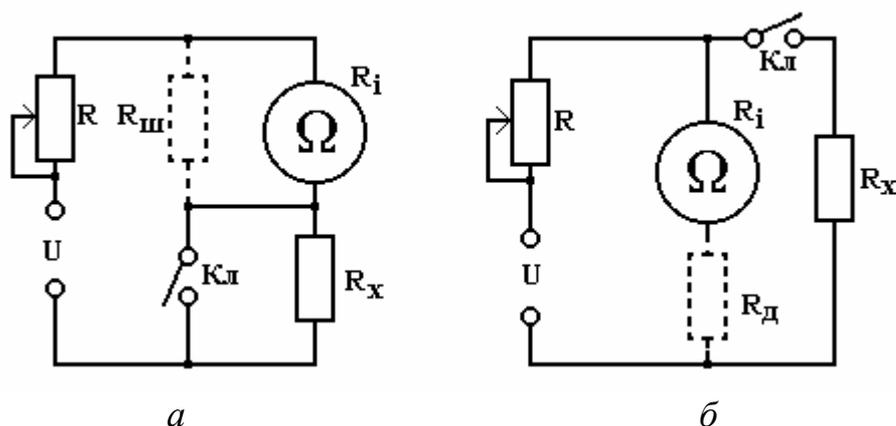


Рисунок 2.5 – Омметры на базе магнитоэлектрического преобразователя

Из (2.12, 2.13) следует, что при $U = \text{const}$ показание прибора однозначно определяется значением R_x , так как остальные величины, входящие в правые части выражений, в процессе измерения не меняются. Шкалы приборов, как видно из указанных выражений, неравномерны. Для омметра с последовательным включением R_x и преобразователя (рисунок 2.5,а) нулевому значению измеряемого сопротивления соответствует максимальное отклонение подвижной части преобразователя, т.е. нулевая отметка шкалы прибора находится, как правило, справа. У омметров с параллельным включением R_x и преобразователя (рисунок 2.5,б) максимальному отклонению подвижной части соответствует $R_x = \infty$, и шкалы таких приборов, как правило, градуируются от нуля до ∞ слева направо. Как показывает анализ выражений (2.12, 2.13), омметры с последовательным включением R_x и преобразователя обеспечивают более высокую точность измерения больших сопротивлений, а с параллельным соединением - малых сопротивлений.

Существенным недостатком рассматриваемых омметров, как видно из (2.12, 2.13), является зависимость их показаний от значения напряжения питания U . Так как в качестве источника питания в таких омметрах обычно применяют батареи, для которых $U \neq \text{const}$, то перед измерением контролируется правильность показаний омметров. Это достигается установкой значения сопротивления $R_x = 0$ путем замыкания ключа K для схемы, приведенной на рисунке 2.5,а, а для схемы на рисунке 2.5,б - значения сопротивления $R_x = \infty$ путем замыкания ключа K . Если показания приборов отличаются от установленных значений R_x , то изменением чувствительности прибора добиваются установки его показаний в соответствии со значением R_x . С этой целью в магнитную систему прибора устанавливается магнитный шунт, представляющий собой ферромагнитную пластинку переменного сечения, которая, перемещаясь, шунтирует рабочий магнитный зазор преобразователя, т.е. изменяет индукцию B в зазоре, а значит в соответствии с (2.5) и чувствительность преобразователя. Таким образом, изменение U компенсируется за счет изменения S_i и, как следует из (2.12, 2.13), характер шкалы омметра при этом не изменится.

Однако если на базе магнитоэлектрического преобразователя создан уни-

версальный прибор, например для измерения тока, напряжения и сопротивления, то использование магнитного шунта при измерении сопротивления не представляется возможным, так как при измерениях тока и напряжения чувствительность преобразователя должна быть постоянной. В этом случае в простых и дешевых универсальных приборах первоначальную корректировку показаний прибора (см. рисунок 2.5,а) на нулевую отметку осуществляют изменением сопротивления шунта $R_{ш}$, включенного параллельно преобразователю (на рисунке показан штриховой линией), или изменением значения добавочного резистора R_d . Первоначальную корректировку показаний прибора (см. рисунок 2.5,б) на отметку " ∞ " осуществляют изменением добавочного сопротивления R_d , включенного последовательно с преобразователем (на рисунке показано штриховой линией), или изменением значения добавочного резистора R_d .

В обоих случаях корректировка показаний прибора вызывает изменение характера его шкалы - изменяется R_i либо R_d в выражениях (2.12, 2.13). В результате снижается точность измерений с помощью прибора.

Для изменения пределов измерений добавочный резистор R может заменяться делителем напряжения, со ступенчато изменяющимся коэффициентом деления.

Класс точности данных омметров с учетом того, что шкала у них неравномерная, определяется максимальным значением приведенной погрешности γ_{Π} , вычисляемой как отношение максимальной абсолютной погрешности Δl прибора к длине шкалы l или ее части, соответствующей диапазону измерений.

Классы точности рассмотренных омметров невысокие и находятся в пределах от 1 до 4 %. Выпускаются они, как правило, в виде переносных приборов, часто универсальных, предназначенных для измерения нескольких величин.

Относительная погрешность измерения сопротивления δ_{RX} с помощью таких омметров вычисляется через их класс точности, определяемый значением

$\gamma_{\Pi} = \frac{\Delta l}{L}$. При вычислениях δ_{RX} удобнее выражать Δl и l не в миллиметрах, а в

значениях углового отклонения указателя омметра $\Delta\alpha$ и α_H , где $\Delta\alpha$ соответствует максимальной абсолютной погрешности ΔR прибора, а α_H - длине шкалы прибора. Обе величины выражаются в углах: используется для этого любая равномерная шкала, имеющаяся в универсальных приборах (см. рисунок 2.5). По этой же шкале определяется и значение угла отклонения указателя, соответствующее измеренному значению R_X . Для шкалы рисунка 2.5,а значению R_X будет соответствовать угол $\alpha_H - \alpha$, а для шкалы рисунка 2.5,б - угол α , так как направления отсчета R_X для обеих шкал противоположны и для рисунка 2.5,а оно не совпадает с направлением отсчета угла по равномерной шкале. С учетом сказанного здесь приведенная погрешность γ_{Π} запишется в виде

$$\gamma_{\Pi} = \frac{\Delta R}{X_H} = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta\alpha}{\alpha_H}, \quad (2.14)$$

а относительная погрешность измерения сопротивления δ_{RX} с помощью омметра, показанного на рисунке 2.5,а, определится по формуле

$$\alpha_{RX} = \frac{\Delta R}{R_H} = -\frac{\Delta \alpha}{\alpha_H - \varepsilon} = -\frac{\gamma_{\Pi} \alpha_H}{\alpha_H - \alpha} = -\gamma_{\Pi} \frac{\alpha_H}{\alpha \left(1 - \frac{\alpha_H}{\alpha}\right)}. \quad (2.15)$$

Значение δ_{RX} для омметра, выполненного по схеме, приведенной на рисунке 2.5,б, определится формулой

$$\delta_{RX} = \gamma_{\Pi} \frac{\alpha_{\Pi}}{\alpha}. \quad (2.16)$$

Не требуют первоначальной установки нуля магнитоэлектрические омметры на базе логометрических преобразователей. Они также могут строиться по последовательной и параллельной схемам (рисунок 2.6,а,б соответственно). Две различные схемы используются с целью уменьшения погрешности измерения, обусловленной влиянием сопротивлений R_1 и R_2 катушек 1 и 2 логометрического преобразователя при измерении больших и малых значений R_X . В обеих схемах резисторы $R_{д1}$, $R_{д2}$ и $R_{д3}$ - добавочные, постоянные, служащие для ограничения токов, протекающих через катушки 1 и 2 преобразователя, и для задания нужного характера шкалы прибора.

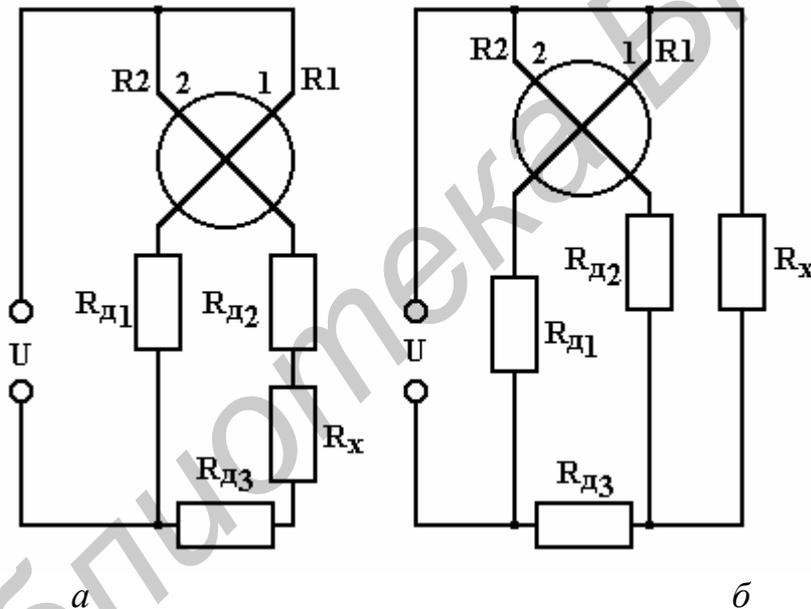


Рисунок 2.6 – Схемы включения логометрических преобразователей при измерении больших сопротивлений

С учетом (2.8) для последовательной схемы можем записать:

$$\alpha = f\left(\frac{R_2 + R_{д2} + R_{д3} + R_X}{R_1 + R_{д1}}\right). \quad (2.17)$$

Из полученного выражения видно, что показание прибора однозначно определяется значением R_X и не зависит от напряжения источника питания U , а также от его полярности. Выражение, определяющее зависимость показаний прибора от значений R_X , можно получить и для параллельной схемы. Первая из схем применяется в омметрах для измерения больших значений сопротивлений, вторая - для измерения малых сопротивлений.

По своему конструктивному исполнению и назначению омметры на базе логометрических преобразователей весьма разнообразны. Часто они выполняются в виде переносных мегомметров с автономным высоковольтным источником питания и предназначены для измерений сопротивлений изоляции кабелей в полевых и лабораторных условиях. Изготавливаются такие приборы с классами точности порядка 1,0 – 4,0 %.

2.3 Магнитоэлектрические преобразователи с преобразователями рода тока

Вследствие целого ряда достоинств, присущих магнитоэлектрическим измерительным преобразователям, их стремятся использовать для измерений в цепях не только постоянного, но и переменного токов. Для этого необходимо осуществить предварительное преобразование переменного тока в постоянный, который затем может быть измерен магнитоэлектрическими приборами постоянного тока.

Наиболее широкое применение в практике электрических измерений для этих целей нашли выпрямительные, термоэлектрические и электронные измерительные преобразователи переменного тока в постоянный. Рассмотрим устройство и принцип действия магнитоэлектрических преобразователей в сочетании с выпрямительными и термоэлектрическими преобразователями.

Термоэлектрические приборы. Соединение одного или нескольких термоэлектрических преобразователей переменного тока в постоянный с магнитоэлектрическим измерительным преобразователем образует термоэлектрический прибор.

Термоэлектрический преобразователь представляет собой сочетание нагревателя АВ, по которому протекает измеряемый переменный ток I_{\sim} , с одной или несколькими термопарами. Такие преобразователи могут быть контактными и бесконтактными. Контактные нагреватели (рисунок 2.7,а,б) имеют с термопарой как тепловой, так и гальванический контакт. Бесконтактные преобразователи не имеют гальванической связи с термопарой (рисунок 2.7,в,г), а тепловой контакт обеспечивается за счет твердого диэлектрика (часто для этой цели используется капля стекла).

Нагреватель АВ изготавливается из тонкой проволоки, материал которой обладает малым температурным коэффициентом сопротивления и не окисляется при длительных нагревах. Чаще всего для этих целей используются нихром, платиноиридий и другие материалы. В контактном термопреобразователе (рисунок 2.7,а) к середине нагревателя приваривается "рабочий спай" С термопары. "Термокрест", показанный на рисунке 2.7,б, также представляет собой контактный термопреобразователь, в котором нагреватель образован самими проводниками термопары. Недостатком "термокреста" является зависимость термоЭДС от направления протекания тока, так как при протекании тока в различных направлениях из-за явления Пельтье происходит выделение или поглощение тепла в рабочем спае. Указанный недостаток обуславливает различие градуировок прибора на постоянном и переменном токе.

В бесконтактных преобразователях отсутствие гальванической связи меж-

ду нагревателем и термопарой исключает ответвление измеряемого тока I_{\sim} в цепь преобразователя, что позволяет повысить точность измерения, однако чувствительность таких преобразователей ниже, чем контактных из-за худших условий теплопередачи от нагревателя к термопаре.

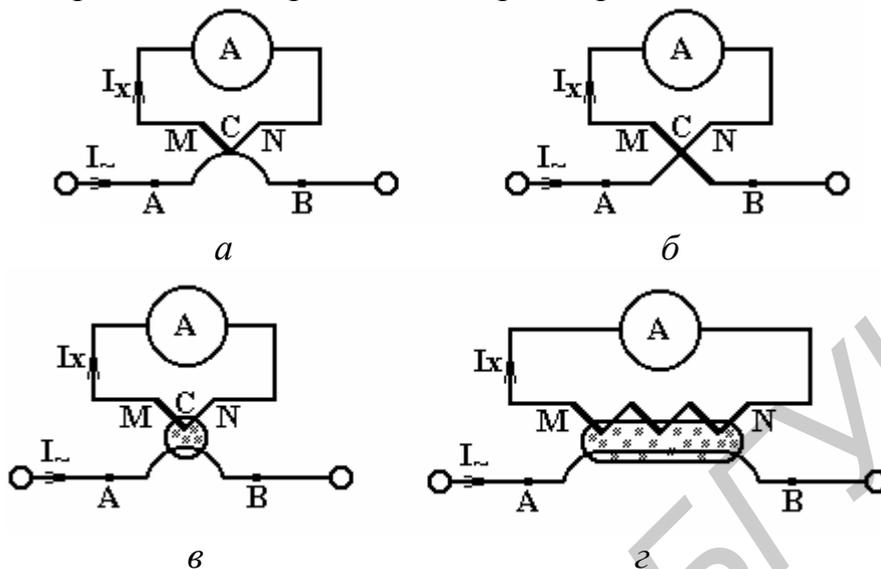


Рисунок 2.7 – Схемы амперметров переменного тока с магнитоэлектрическими и термоэлектрическими преобразователями

Повысить чувствительность бесконтактных преобразователей можно путем последовательного соединения термопар в так называемые термобатареи (рисунок 2.7,г). ТермоЭДС на выходе такого преобразователя будет в n раз больше, чем у преобразователя с одной термопарой (рисунок 2.7,в). К недостаткам бесконтактных термопреобразователей следует отнести также большую по сравнению с контактными преобразователями инерционность.

ТермоЭДС, возникающая на свободных ("холодных") концах M, N термопары (в любом из рассмотренных преобразователей) и воздействующая на магнитоэлектрический преобразователь, пропорциональна разности температур рабочих C и свободных концов термопары. Если учесть, что нагрев рабочих концов термопары обусловлен тепловым действием измеряемого тока I_{\sim} , то значение термоЭДС E_T можно записать в виде

$$E_T = k_T I_{\sim}^2, \quad (2.18)$$

где k_T - коэффициент, зависящий от свойств преобразователя.

Под воздействием E_T через магнитоэлектрический преобразователь будет протекать ток I_{\sim} , равный

$$I = \frac{E_T}{R_i + R_T} = \frac{k_T}{R_i + R_T} I_{\sim}^2, \quad (2.19)$$

где R_i и R_T - соответственно внутреннее сопротивление преобразователя и термопары.

С учетом выражения (2.4) показание прибора запишется в виде

$$\alpha = \frac{S_I k_T}{R_i + R_T} I_{\sim}^2 = S_{IT} I_{\sim}^2, \quad (2.20)$$

где $S_{IT} = \frac{S_I k_T}{R_i + R_T}$ - чувствительность термоэлектрического амперметра.

Из формулы (2.17) следует, что термоэлектрические амперметры могут использоваться при измерениях в цепях как постоянного, так и переменного токов. Однако практически указанные приборы не применяются для измерения постоянных токов, так как в этом случае более целесообразным является использование магнитоэлектрических амперметров без преобразователей рода тока.

При использовании термоэлектрических амперметров для измерений в цепях переменных токов их показания не зависят от формы кривой измеряемого сигнала. Другим достоинством данных приборов является также широкий частотный диапазон, в котором они могут работать при удовлетворительной точности. Для современных приборов диапазон рабочих частот составляет от постоянного тока до 100 МГц. На более высоких частотах погрешность измерения существенно увеличивается из-за увеличения сопротивления нагревателя вследствие поверхностного эффекта, а также из-за влияния паразитных реактивностей термоэлектрического преобразователя (особенно контактного).

К недостаткам термоэлектрических приборов следует отнести зависимость их показаний от изменения температуры окружающей среды, большое собственное потребление мощности, низкую перегрузочную способность и небольшой срок службы термопар, при смене которых требуется дополнительная градуировка прибора – корректировка функции преобразования.

Однако, несмотря на данные недостатки, термоэлектрические приборы широко применяются для измерений в диапазоне высоких частот, где они являются практически единственно пригодными приборами.

В реальных термоэлектрических амперметрах последовательно с магнитоэлектрическим преобразователем включается подгоночный резистор для регулировки чувствительности прибора при смене термопреобразователей. Выполняется резистор из манганина и одновременно служит как термокомпенсирующий элемент для снижения температурной погрешности.

Расширение пределов измерений термоэлектрических амперметров до 1 А осуществляется путем переключения отдельных термопреобразователей с различной чувствительностью. Для измерения токов, больших 1 А, расширение пределов проводится с помощью измерительных трансформаторов тока (см. подраздел 6.2).

Термоэлектрические вольтметры выполняются на базе амперметров путем включения последовательно с ними добавочного резистора R_d (рисунок 2.8), имеющего большое сопротивление.

Под воздействием измеряемого напряжения U_{\sim} в цепи нагревателя АВ и добавочного резистора R_d будет протекать ток I_{\sim} , равный

$$I_{\sim} = \frac{U_{\sim}}{R_H + R_D}, \quad (2.21)$$

где R_H - сопротивление нагревателя.

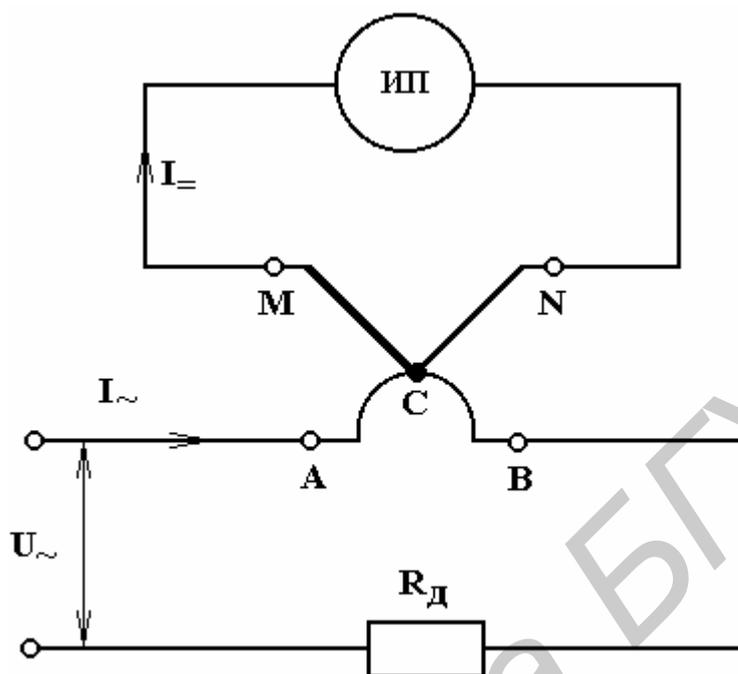


Рисунок 2.8 – Схема вольтметра переменного тока с магнитоэлектрическим и термоэлектрическим преобразователями

Используя формулы (2.15 – 2.17), с учетом (2.18) можно получить уравнение преобразования для термоэлектрического вольтметра, связывающее показание прибора α с измеряемым напряжением U_{\sim} :

$$\alpha = \frac{S_I k_T}{R_i + R_T} \frac{U_{\sim}^2}{(R_H + R_D)^2} = S_{UT} U_{\sim}^2, \quad (2.22)$$

где $S_{UT} = \frac{S_I k_T}{(R_i + R_T)(R_H + R_D)^2}$ - чувствительность термоэлектрического вольтметра.

Характер шкалы и свойства термоэлектрических вольтметров аналогичны рассмотренным ранее амперметрам (за исключением внутреннего сопротивления). Частотный диапазон у вольтметров несколько уже из-за влияния на высоких частотах паразитных реактивностей R_D . Расширение пределов измерения вольтметров осуществляется с помощью добавочных резисторов.

Для повышения чувствительности термоэлектрических приборов в их измерительную цепь могут вводиться усилители постоянного тока, например фотогальванометрические [2, 13].

Выпрямительные приборы. Выпрямительными называют электроизмерительные приборы, в которых магнитоэлектрический преобразователь используется в сочетании с преобразователем переменного электрического тока в посто-

янный, представляющим собой полупроводниковый выпрямитель. В зависимости от схемы самого выпрямителя и его соединения с преобразователем различают приборы с однополупериодным (рисунок 2.9,а) и двухполупериодным выпрямлением (рисунок 2.9,б,в).

В схемах с однополупериодным выпрямлением в течение одного полупериода переменного тока открыт диод V1 и ток протекает через преобразователь, а во время второго полупериода ток проходит через открытый диод V2 и резистор R2, предназначенные для выравнивания входных сопротивлений прибора в оба полупериода и защиты диода V1 от пробоя при обратном для него полупериоде (для вольтметров).

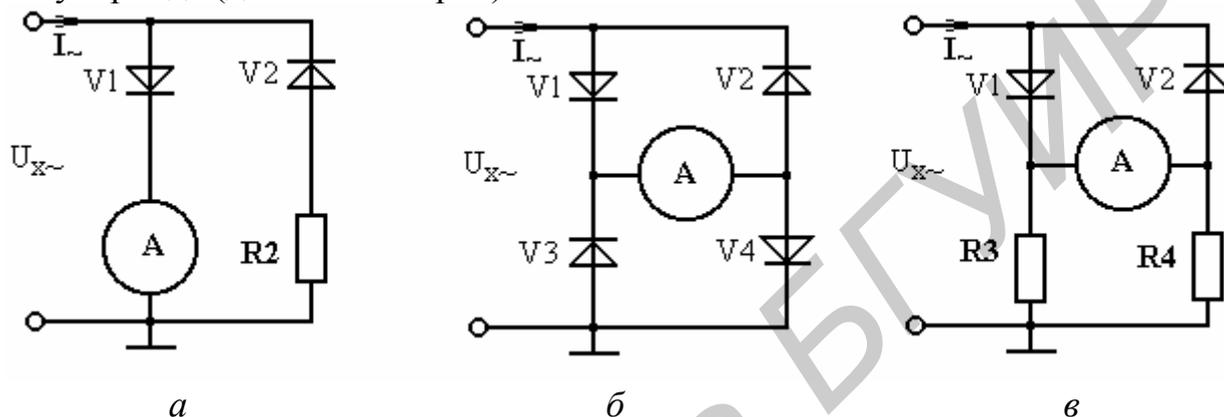


Рисунок 2.9 – Схемы включения измерительных преобразователей в выпрямительные приборы

В схемах с двухполупериодным выпрямлением ток через преобразователь протекает во время обоих полупериодов в одном и том же направлении (рисунок 2.9,б), в результате чего чувствительность прибора возрастает вдвое. На практике двухполупериодные мостовые выпрямительные схемы выполняют лишь на двух диодах, например, V1, V2 (рисунок 2.9,в) или V1, V3, а два других заменяют резисторами. Это уменьшает температурную погрешность, вызванную нестабильностью характеристик диодов, однако в таком случае преобразователь должен иметь более высокую чувствительность, поскольку через него проходит лишь часть тока.

При измерении с помощью выпрямительного амперметра переменного тока $i = I_m \sin \omega t$ на подвижную часть преобразователя будет действовать вращающий момент, определяемый мгновенными значениями пульсирующего тока $i_{\pi} = I_m |\sin \omega t|$, протекающего через катушку преобразователя:

$$M_{CP}(t) = Bswi_{\pi}.$$

Однако, вследствие инерции подвижной части отклонение ее будет пропорционально среднему за период значению вращающего момента M_{BP} , и в результате показание прибора с однополупериодным выпрямлением можно записать в виде

$$\alpha = \frac{B_{sw}}{K_{уд}} \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} I_m |\sin \omega t| dt = \frac{B_{sw}}{K_{уд}} \frac{I_{CP}}{2} = S_{IB} \frac{I_{CP}}{2}, \quad (2.23)$$

где $S_{IB} = \frac{B_{sw}}{K_{уд}}$ - чувствительность выпрямительного амперметра; T , I_{CP} -

период и средневывпрямленное значение измеряемого тока I .

Для выпрямительных амперметров с двухполупериодным выпрямлением показание запишется следующим образом:

$$\alpha = S_{IB} I_{CP}. \quad (2.24)$$

Из выражений (2.23, 2.24) следует, что показания выпрямительных амперметров пропорциональны средневывпрямленному значению I_{CP} измеряемого тока. Однако при измерениях в цепях переменного тока чаще определяют среднеквадратическое значение тока I , которое связано со средневывпрямленным значением I_{CP} через коэффициент формы K_{Φ} :

$$I = \frac{I_{CP}}{K_{\Phi}}. \quad (2.25)$$

Показание амперметра с двухполупериодным выпрямлением в среднеквадратических значениях выразится формулой

$$\alpha = \frac{S_{IB}}{K_{\Phi}} I. \quad (2.26)$$

Таким образом, выпрямительные амперметры могут быть проградуированы в среднеквадратических значениях, однако градуировка будет справедлива только для заданной формы кривой, т.е. показания амперметров в общем случае зависят от формы кривой измеряемого сигнала. Чаще всего градуировка проводится для синусоидальных сигналов, для которых $K_{\Phi} = 1,1$.

Основными источниками погрешностей выпрямительных амперметров являются: зависимость коэффициента выпрямления диодов от температуры, нелинейность их характеристик, влияние паразитных реактивностей диодов, а также влияние формы кривой измеряемого тока. Для снижения погрешностей обычно используются различные компенсирующие измерительные цепи. Однако практически погрешность измерения тока не удается сделать меньше $\pm 1,5\%$. Диапазон рабочих частот для выпрямительных амперметров неширок и для приборов без специальной частотной коррекции ограничивается частотами 500...2000 Гц (главным образом из-за шунтирующего действия емкости диодов), а для приборов с частотной коррекцией расширяется до нескольких десятков килогерц. При этом погрешность возрастает до $\pm 5\%$.

Основными достоинствами выпрямительных амперметров являются их высокая чувствительность и малое собственное потребление мощности от объекта измерения.

Расширение пределов измерения амперметров осуществляется с помощью шунтов или измерительных трансформаторов тока при измерениях

больших токов (см. подраздел 6.2).

Выпрямительные вольтметры образуются на базе амперметров путем включения последовательно с ними добавочного резистора R_d с большим сопротивлением (рисунок 2.10).

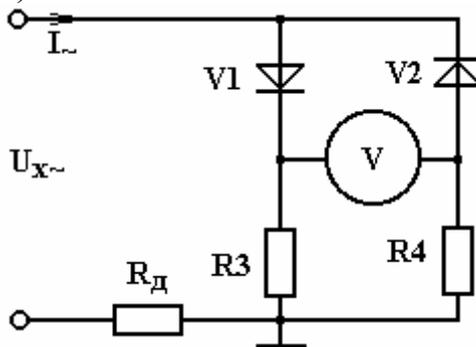


Рисунок 2.10 – Выпрямительный вольтметр на базе магнитоэлектрического преобразователя

Под воздействием измеряемого напряжения U_{\sim} в цепи, состоящей из выпрямительного амперметра и добавочного сопротивления R_d , будет протекать ток

$$I_{\sim} = \frac{U_{\sim}}{R_A + R_d}, \quad (2.27)$$

где R_A - сопротивление выпрямительного амперметра.

Используя формулы (2.26, 2.27), можно получить уравнение преобразования для выпрямительного вольтметра, связывающее показание прибора α с измеряемым напряжением U_{\sim} .

$$\alpha = \frac{S_{IB}}{K_{\Phi}} \frac{U_{\sim}}{R_A + R_d} = S_{UB} U_{\sim}, \quad (2.28)$$

где $S_{UB} = \frac{S_{IB}}{K_{\Phi} (R_A + R_d)}$ - чувствительность выпрямительного вольтметра.

Свойства выпрямительных вольтметров принципиально не отличаются от свойств аналогичных амперметров (за исключением внутреннего сопротивления).

Расширение пределов измерения вольтметров проводится с помощью добавочных резисторов и измерительных трансформаторов напряжения (п. 6.2).

Практически выпрямительные приборы чаще всего выполняются в виде комбинированных многопредельных приборов для измерения токов, напряжений и сопротивлений. Такие приборы получили название ампервольтметров (сокращенно авометров) или тестеров.

3 ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Самыми точными среди других подгрупп электромеханических преобразователей, применяемых в цепях переменного тока, являются электродинамические преобразователи. В настоящее время многие из них выпускаются с клас-

сами точности 0,05 и сохраняют свои показания при переходе с постоянного тока на переменный.

Наиболее широкое применение электродинамические преобразователи находят в качестве ваттметров постоянного и переменного тока, амперметров постоянного и переменного токов, фазометров, частотомеров и фарадометров.

3.1 Принцип действия, устройство и основы теории электродинамических измерительных преобразователей

Принцип действия электродинамических преобразователей основан на взаимодействии магнитных полей токов, протекающих по неподвижной и подвижной катушкам (или системам катушек).

Электродинамический преобразователь, конструкция которого и схема соединения катушек приведены на рисунке 3.1, *а, б* соответственно, включает в себя в общем случае систему неподвижных и подвижных катушек, отсчетное устройство, упругие элементы у преобразователей с механическим противодействующим моментом, успокоитель и средства защиты от внешних магнитных полей.

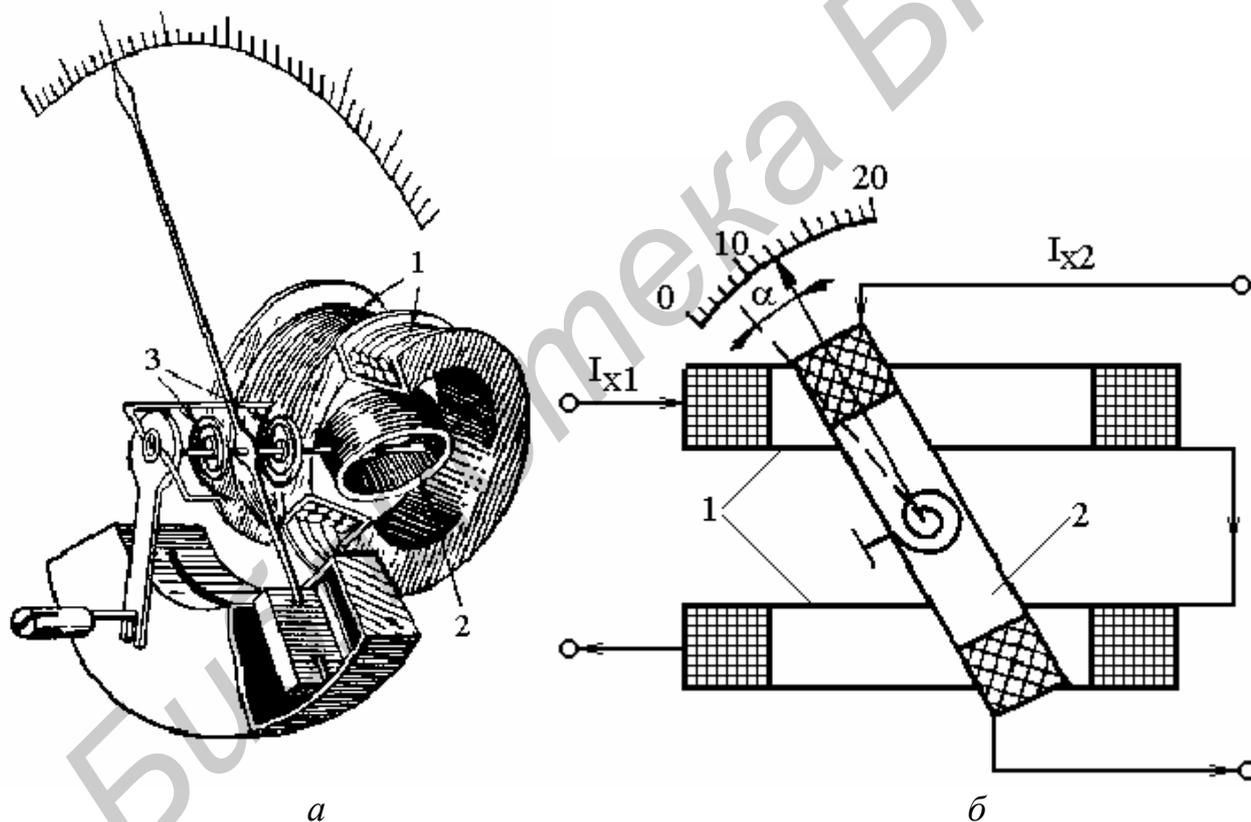


Рисунок 3.1 – Электродинамический преобразователь

Неподвижные катушки 1, как правило, выполняют из двух секций, разнесенных в пространстве. Это создает конструктивные удобства при размещении подвижной части и, кроме того, позволяет изменением расстояния между секциями изменять конфигурацию магнитного поля, что используется для линеаризации функции преобразования преобразователя. Выполняются неподвижные катушки, как правило, из медного провода. Подвижная катушка 2 выпол-

няется из медного или алюминиевого провода и размещается внутри неподвижной. Токопроводящими проводниками подвижной катушки служат упругие элементы (спиральные пружины 3), создающие механический противодействующий момент, или безмоментные проводники в логометрах.

По форме катушки выполняют круглыми или прямоугольными. Первые из них более технологичны в производстве и имеют добротность на 15 - 20 % выше по сравнению с прямоугольными. Это повышает чувствительность преобразователя. Прямоугольные же катушки используются с целью уменьшения размеров прибора.

Для создания необходимой степени успокоения подвижной части в электродинамических преобразователях используют воздушные или магнитоиндукционные (при наличии магнитного экрана) успокоители.

Подвижная катушка преобразователя стремится занять положение, при котором направление ее магнитного поля совпадало бы с направлением магнитного поля, создаваемого неподвижной катушкой. Вращающий момент, действующий на подвижную часть преобразователя, определяется из выражения (1.2). Электромагнитная энергия, запасенная в преобразователе, представляет собой энергию системы, состоящей из двух индуктивно связанных между собой катушек с токами:

$$W_e = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + M_{1,2} I_1 I_2, \quad (3.1)$$

где L_1 , L_2 - индуктивности неподвижной и подвижной катушек; $M_{1,2}$ - взаимная индуктивность между катушками; I_1 и I_2 - постоянные токи в неподвижной и подвижной катушках.

В выражении (3.1) от угла поворота α подвижной катушки преобразователя зависит только M_{BR} , поэтому при подстановке (3.1) в выражение (1.2) получим:

$$M_{1,2} = I_1 I_2 \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}. \quad (3.2)$$

Из равенства M_{BR} и $M_{ПР}$, определяемого выражением (1.3), получим условие установившегося положения подвижной части

$$I_1 I_2 \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} = K_{yD} \alpha, \quad (3.3)$$

из которого запишем функцию преобразования электродинамического преобразователя

$$\alpha = \frac{1}{K_{yD}} I_1 I_2 \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}. \quad (3.4)$$

При включении преобразователя в цепь переменного тока выражение для мгновенного вращающего момента будет аналогично (3.2), с той разницей, что вместо постоянных токов I_1 и I_2 в него входят мгновенные значения перемен-

НЫХ ТОКОВ:

$$\begin{aligned}i_1 &= I_{m1} \sin \omega t; \\i_2 &= I_{m2} \sin (\omega t + \varphi).\end{aligned}$$

Однако вследствие достаточно большого момента инерции подвижной части ее отклонение определяется не мгновенным, а средним за период значением вращающего момента:

$$M_{BP} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{BP}(t) dt = I_1 I_2 \cos \varphi \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}, \quad (3.5)$$

где I_1 и I_2 - среднеквадратические значения переменных токов i_1 и i_2 ; φ - фазовый сдвиг между токами.

Функция преобразования электродинамического преобразователя для переменных токов с учетом (3.5) запишется в виде

$$\alpha = \frac{1}{K_{yD}} I_1 I_2 \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} \cos \varphi. \quad (3.6)$$

Из выражения (3.6) можно сделать некоторые выводы о свойствах, достоинствах и недостатках электродинамических преобразователей:

- угол отклонения подвижной части электродинамических преобразователей пропорционален произведению среднеквадратических значений токов, протекающих по неподвижной и подвижной катушкам;

- функция преобразования электродинамических ИП нелинейна, так как характер ее определяется произведением токов в катушках и законом изменения взаимной индуктивности при повороте подвижной катушки, т.е. формой катушек и их взаимным расположением. Однако, изменяя отношение $\frac{dM_{1,2}}{d\alpha}$ за

счет изменения формы, размеров и взаимного расположения катушек, можно линеаризовать функцию преобразования на рабочем участке, начиная с 15-20 % от верхнего предела преобразования;

- электродинамические преобразователи в отличие от ИП других групп имеют две цепи протекания тока, и угол отклонения подвижной части в них определяется произведением токов в катушках и фазовым сдвигом между этими токами, т.е. преобразователи обладают множительными и фазочувствительными свойствами и могут служить основой для создания не только вольтметров и амперметров, но и ваттметров, фазометров и других приборов;

- возникновение вращающего момента в электродинамических ИП обусловливается (см. рисунок 3.1) взаимодействием магнитных потоков в воздухе, а не в ферромагнитных сердечниках, обладающих такими нежелательными свойствами, как явления гистерезиса вихревых токов, нелинейности характеристик и др. Поэтому у указанных преобразователей отсутствуют погрешности, характерные для преобразователей с ферромагнитными сердечниками, и приборы, выполненные на их основе, могут быть изготовлены с высоким классом точности;

- чувствительность электродинамических ИП невысока вследствие того,

что M_{BR} создается (см. рисунок 3.1) слабыми магнитными потоками, действующими в воздухе. Значит, собственное потребление мощности у электродинамических преобразователей достаточно велико. Для повышения чувствительности и уменьшения потребляемой мощности применяют крепление подвижной части на растяжках и световой отсчет;

- у электродинамических ИП могут возникать большие погрешности из-за влияния внешнего магнитного поля, так как собственное магнитное поле у них мало. Для исключения этих погрешностей необходимо принимать меры по магнитной защите - магнитное экранирование или астазирование, что значительно усложняет и удорожает преобразователи;

- частотный диапазон электродинамических преобразователей ограничен сверху частотами порядка нескольких килогерц. На более высоких частотах возникают большие частотные погрешности за счет изменения индуктивных сопротивлений катушек преобразователя;

- при изменении температуры окружающей среды у электродинамических преобразователей возникает дополнительная температурная погрешность, обусловленная изменением сопротивления обмоток и противодействующего момента, создаваемого упругими элементами.

Целый ряд электродинамических приборов создается на основе логометрического преобразователя. Электродинамический логометрический преобразователь (рисунок 3.2) состоит из неподвижной двухсекционной катушки 1 и двух жестко закрепленных на оси подвижных катушек 2 и 3. Токи I_1 и I_2 подводятся к подвижным катушкам с помощью безмоментных проводников. Направления токов выбираются такими, чтобы моменты M_1 и M_2 , возникающие в результате взаимодействия магнитных полей каждого из токов с магнитным полем тока I в неподвижной катушке, вызывали взаимно противоположные перемещения подвижной части. Отсчет преобразованных значений тока производится с помощью стрелки 4, закрепленной на оси преобразователя, и шкалы 5.

Средние за период значения моментов M_1 и M_2 определяются выражениями, аналогичными (3.5):

$$M_1 = I \cdot I_1 \cos \varphi(\hat{I}, \hat{I}_1) \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}, \quad M_2 = I \cdot I_2 \cos \varphi(\hat{I}, \hat{I}_2) \frac{dM_{1,3}}{d\alpha}, \quad (3.7)$$

где $M_{1,2}$ и $M_{1,3}$ - взаимные индуктивности неподвижной и подвижной катушек 2 и 3 соответственно; $\varphi(\hat{I}, \hat{I}_1)$ и $\varphi(\hat{I}, \hat{I}_2)$ - фазовые сдвиги между током I в неподвижной катушке и I_1, I_2 в подвижных катушках соответственно.

Условие установившегося отклонения подвижной части, определяемое выражением (1.3), в данном случае запишется так:

$$M_1 = M_2. \quad (3.8)$$

Скорости изменения взаимных индуктивностей $\frac{dM_{1,2}}{d\alpha}$ и $\frac{dM_{1,3}}{d\alpha}$ в общей случае зависят от угла α , т.е.

$$\frac{dM_{1,2}}{d\alpha} = f_1(\alpha); \quad \frac{dM_{1,3}}{d\alpha} = f_2(\alpha),$$

причем $f_1(\alpha) \neq f_2(\alpha)$.

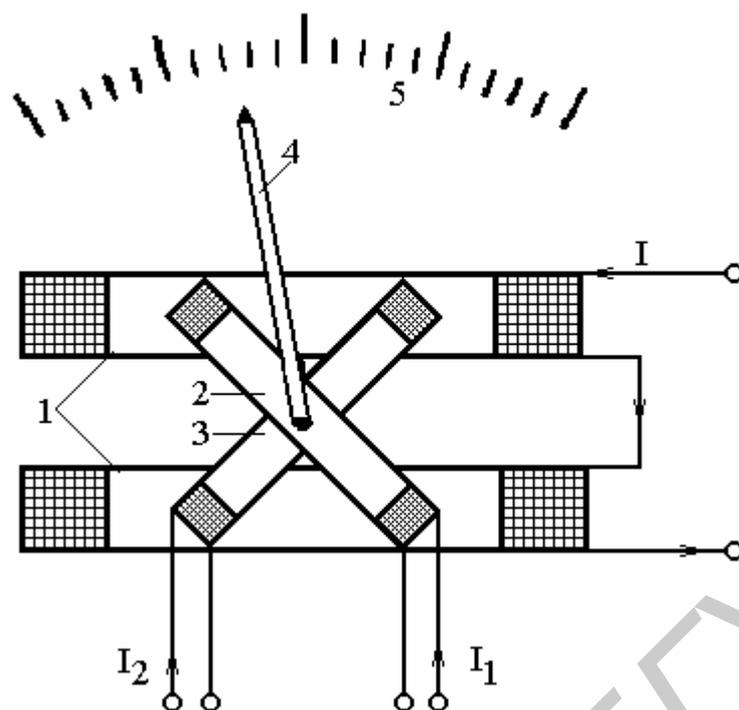


Рисунок 3.2 – Электродинамический преобразователь с электрическим противодействующим моментом (логометр)

Тогда выражение (3.8) с учетом (3.7) преобразуется к виду

$$\frac{I \cdot I_1 \cos \varphi(I, I_1)}{I \cdot I_2 \cos \varphi(I, I_2)} = \frac{dM_{1,3}}{d\alpha} : \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} = \frac{f_2(\alpha)}{f_1(\alpha)},$$

откуда уравнение шкалы электродинамического логометра запишется в виде

$$\alpha = F \left(\frac{I_1 \cos \varphi(I, I_1)}{I_2 \cos \varphi(I, I_2)} \right). \quad (3.9)$$

Таким образом, угол поворота подвижной части электродинамического логометра определяется отношением проекций токов I_1 , I_2 в его подвижных катушках на направление тока I в неподвижной катушке.

Однако, как уже отмечалось при анализе выражения (3.6), электродинамические преобразователи, как с механическим противодействующим моментом, так и логометры, обладают низкой чувствительностью и значительным собственным потреблением мощности. Это обстоятельство не позволяет использовать их там, где мала мощность источника измеряемого сигнала (характерно для радиотехнических измерений) или требуется большой вращающий момент (например в регистрирующих приборах), а также затрудняет их использование в условиях механических воздействий (вибрации, удары и т.п.). В таких случаях находят применение ферродинамические преобразователи, представляющие

собой разновидности электродинамических преобразователей, у которых имеется магнитопровод из ферромагнитного материала, на отдельных участках которого располагаются неподвижная и подвижная катушки [2, 3]. Принципиально ферродинамические преобразователи не отличаются от электродинамических. Благодаря наличию ферромагнитного магнитопровода в преобразователях существенно возрастают взаимодействующие магнитные потоки, что ведет к увеличению чувствительности приборов, уменьшению собственного потребления мощности и ослаблению влияния внешних магнитных полей. Однако наличие магнитопровода, обладающего нелинейной кривой намагничивания, явлениями гистерезиса, вихревых токов и т.п., заметно увеличивает погрешность ферродинамических приборов. Поэтому они нашли весьма ограниченное применение для измерений в цепях постоянного тока и применяются главным образом в цепях переменного тока на частотах 50 и 400 Гц, как сравнительно низкоточные приборы (класс точности их, как правило, не выше 0,5).

Основными мерами по защите электродинамических приборов от вредного воздействия внешних магнитных полей являются магнитное экранирование и астазирование.

Магнитные экраны изготавливают из тонкой электротехнической стали с целью уменьшения погрешностей за счет вихревых токов и выполняют в виде двух цилиндров, которыми закрывают преобразователи.

Астатические измерительные преобразователи имеют две системы катушек, образующие два самостоятельных преобразователя, причем подвижные катушки обоих преобразователей закреплены на общей оси. Катушки соединены между собой так, что изменения моментов, вызванные внешними полями у каждого из них, противоположны по направлению и взаимно компенсируются при однородных воздействующих полях. Моменты же, создаваемые в обоих преобразователях токами в катушках, имеют одно направление.

3.2 Электродинамические амперметры, вольтметры, ваттметры и фазометры

Наиболее широкое распространение в практике электрических измерений нашли электродинамические амперметры и вольтметры переменного тока, ваттметры постоянного и переменного тока и, реже, фазометры, частотомеры и фарадометры.

Амперметры. В электродинамических амперметрах используются последовательное и параллельное включения подвижной 2 и неподвижной 1 катушек. Последовательное включение катушек (рисунок 3.3,а) применяется в амперметрах, предназначенных для измерения малых (до 0,5 А) токов. В этом случае токи I_1 и I_2 в неподвижной и подвижной катушках равны между собой и фазовый сдвиг между ними φ равен нулю, т.е. $\cos \varphi = 1$. Выражение для уравнения шкалы (3.6) для такого амперметра запишется следующим образом:

$$\alpha = \frac{1}{K_{уд}} I^2 \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}. \quad (3.10)$$

Шкала прибора, как видно из (3.10), в принципе является квадратичной,

однако путем соответствующего выбора формы, размеров и взаимного расположения катушек можно добиться такого закона изменения взаимной индуктивности $M_{1,2}$ при изменении угла поворота подвижной части α , что на участке шкалы начиная с 15 – 20 % от ее верхнего предела она будет иметь практически линейный характер.

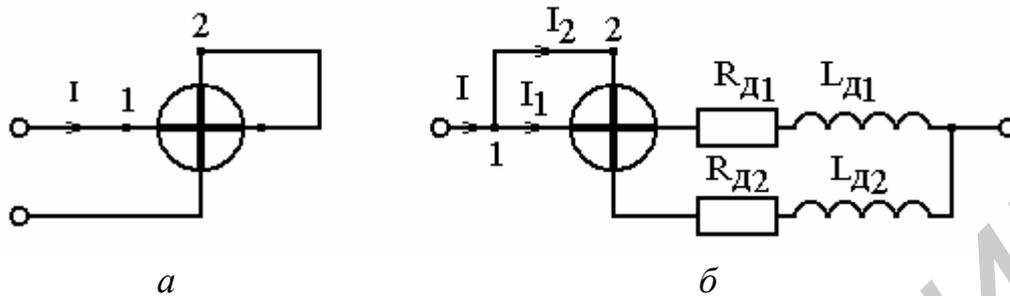


Рисунок 3.3 – Амперметры на основе электродинамических преобразователей

Изменение частоты до нескольких килогерц при последовательной схеме включения катушек практически не вызывает дополнительной частотной погрешности амперметра. Незначительно влияют на его показания и изменения температуры окружающей среды. Поэтому в амперметрах с последовательным соединением катушек не применяют специальных мер для компенсации частотной и температурной погрешностей.

При измерениях больших токов применяют амперметры с параллельным включением катушек преобразователя (рисунок 3.3,б). Это позволяет уменьшить ток, проходящий через упругие элементы, используемые в качестве токоподводящих, за счет пропуска значительной части измеряемого тока по неподвижной катушке, менее чувствительной к электрическим перегрузкам, чем упругие элементы и подвижная катушка. В этом случае при изменениях частоты измеряемого тока и температуры окружающей среды будет изменяться соотношение сопротивлений цепей протекания токов через неподвижную и подвижную катушки, что вызовет перераспределение токов между этими цепями. В результате такого перераспределения токов будут возникать дополнительные частотная и температурная погрешности. Для компенсаций этих погрешностей в параллельные цепи включают добавочные катушки индуктивности L_d и (или) конденсаторы, а также резисторы R_d , изготовленные из манганина и меди. Этим добиваются выравнивания постоянных времени параллельных ветвей RL (для компенсации частотной погрешности) и температурных коэффициентов сопротивления (ТКС) ветвей (для компенсации температурной погрешности).

При условии компенсации частотной и температурной погрешностей токи I_1 и I_2 в параллельных ветвях и косинус фазового сдвига между токами будут соответственно равны

$$I_1 = K_1 I; I_2 = K_2 I; \cos \varphi = 1,$$

где K_1 и K_2 - коэффициенты пропорциональности.
Тогда уравнение шкалы (3.10) запишется в виде

$$\alpha = \frac{K_1 K_2}{K_{yD}} I^2 \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}. \quad (3.11)$$

Сравнение (3.10) и (3.11) показывает, что шкала амперметра с параллельным соединением катушек аналогична по характеру амперметру с последовательным соединением, и рассуждения о возможностях ее линейаризации справедливы также и в этом случае.

Расширение пределов измерения электродинамических амперметров осуществляется путем включения неподвижных катушек последовательно или параллельно (два предела измерения), а также с помощью измерительных трансформаторов тока (см. подраздел 6.2).

Вольтметры. Электродинамические вольтметры образуются путем последовательного соединения подвижной и неподвижной катушек и добавочного резистора R_D (рисунок 3.4).

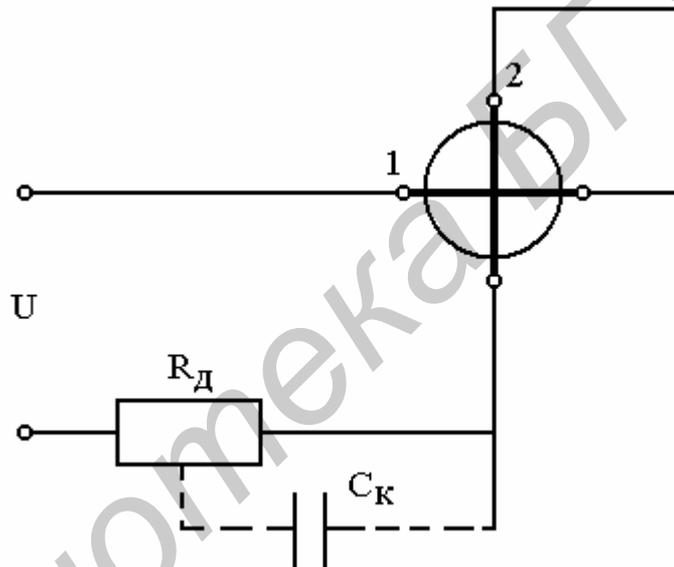


Рисунок 3.4 – Вольтметр на основе электродинамического преобразователя

Добавочный резистор изготавливается, как правило, из манганина, обладающего малым ТКС. Его сопротивление в целях компенсации температурной погрешности вольтметра должно быть значительно больше сопротивления обмоток катушек, выполненных медным проводом и имеющих большое значение ТКС. При изготовлении вольтметров на малые пределы измерения значения сопротивления R_D получаются небольшим и для выполнения данного условия приходится уменьшать и сопротивление обмоток за счет уменьшения числа витков катушек, что приводит к снижению чувствительности прибора.

Компенсация дополнительной частотной погрешности, возникающей из-за изменения индуктивного сопротивления преобразователя при изменении частоты измеряемого напряжения, может осуществляться шунтированием части резистора R_D компенсирующей емкостью C_K .

При условии компенсации температурной и частотной погрешности полное сопротивление цепи вольтметра Z_V будет практически постоянным в рабочем диапазоне частот, т.е. $Z_V = \text{const}$, и тогда

$$I_1 = I_2 = \frac{U}{Z_V}; \cos \varphi = 1,$$

и уравнение шкалы прибора (3.6) запишется в виде

$$\alpha = \frac{1}{Z_V^2 K_{уд}} U^2 \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}, \quad (3.12)$$

аналогичном (3.10, 3.11). Следовательно, характер шкалы электродинамического вольтметра и соображения по ее линейризации такие же, как и для электродинамических амперметров.

Электродинамические амперметры и вольтметры применяются в основном для точных измерений в цепях переменного тока в диапазоне частот от нескольких десятков герц до нескольких килогерц, а также в качестве образцовых приборов для поверки менее точных приборов других групп.

Ваттметры. В электродинамических ваттметрах подвижная и неподвижная катушки включаются независимо друг от друга (рисунок 3.5).

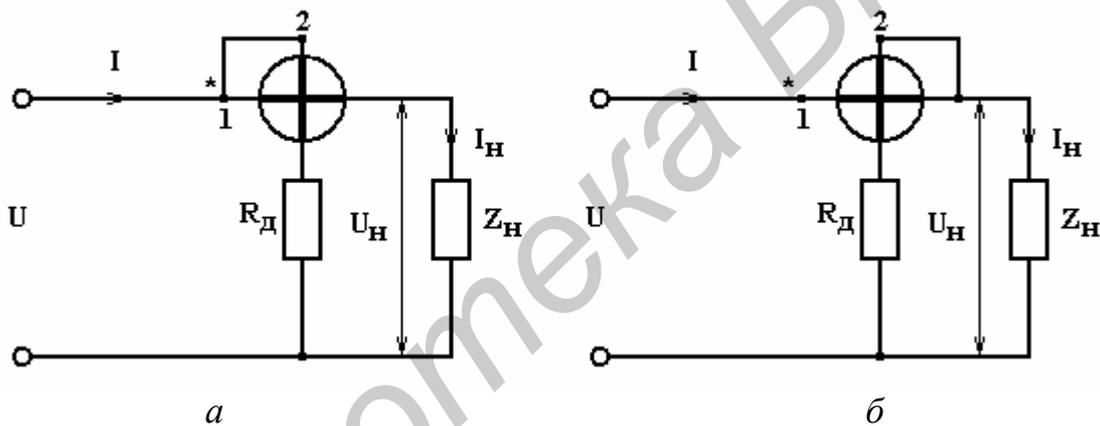


Рисунок 3.5 – Ваттметры на основе электродинамического преобразователя

Неподвижная катушка 1 преобразователя включается последовательно с сопротивлением Z_H нагрузки и образует так называемую последовательную (токовую) цепь прибора. Подвижная катушка 2 преобразователя с добавочным резистором R_d включается параллельно Z_H и образует так называемую цепь напряжения электродинамического ваттметра.

При измерениях в цепях постоянного тока по неподвижной катушке протекает ток I_1 , практически равный току нагрузки I , а ток в подвижной катушке I_2 определяется формулой

$$I_2 = \frac{U}{R_2 + R_d},$$

где R_2 - сопротивление обмотки подвижной катушки.

Подставляя значения токов I_1 и I_2 в (3.4), получим уравнение шкалы электродинамического ваттметра на постоянном токе:

$$\alpha = \frac{1}{K_{уд}} \frac{U \cdot I}{R_2 + R_д} \frac{dM_{1,2}}{d\alpha} = \frac{1}{K_{уд}(R_2 + R_д)} P \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}. \quad (3.13)$$

На переменном токе работу ваттметра удобно рассматривать, пользуясь его векторной диаграммой. При индуктивном характере нагрузки Z_H векторная диаграмма, характеризующая работу ваттметра, представлена на рисунке 3.6.

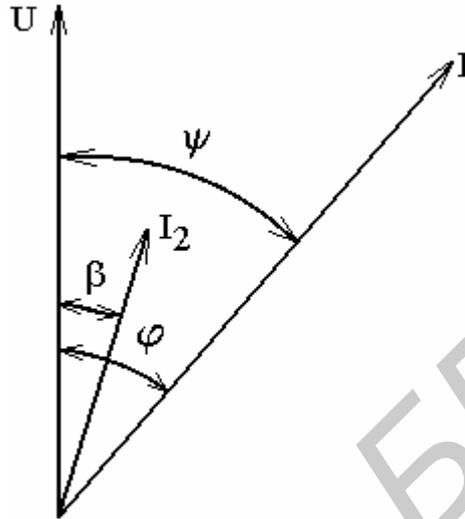


Рисунок 3.6 – Векторная диаграмма, характеризующая работу ваттметра

Из диаграммы видно, что вектор тока I_2 в цепи напряжения сдвинут по фазе относительно вектора U на угол β из-за влияния индуктивности подвижной катушки 2. Следовательно, фазовый сдвиг между токами в подвижной I_2 и неподвижной I_1 катушках ваттметра φ в общем случае не равен фазовому сдвигу ψ между током I и напряжением U в измеряемой цепи. Поэтому уравнение шкалы (3.6) для ваттметра

$$\alpha = \frac{1}{K_{уд}} I \cdot I_2 \cos(\psi - \beta) \frac{dM_{1,2}}{d\alpha}.$$

Выбором конструкции катушек можно обеспечить выполнение условия

$$\frac{dM_{1,2}}{d\alpha} = K = \text{const}.$$

Ток I_2 в первом приближении можно определить как

$$I_2 = \frac{U}{R_2 + R_д} \cos \beta.$$

Тогда уравнение шкалы ваттметра после подстановки в него значения I_2 примет вид

$$\alpha = \frac{1}{K_{уд}(R_2 + R_д)} UI \cos(\psi - \beta) \cos \beta. \quad (3.14)$$

Из полученного уравнения шкалы (функции преобразования) следует, что

при $\beta \neq 0$ ваттметр будет измерять значение мощности, потребляемой нагрузкой, с некоторой погрешностью. В большинстве случаев значение угла β находится в пределах до 1° . При этом условии относительная погрешность ваттметра δ_β , обусловленная влиянием β , может быть приблизительно оценена формулой

$$\delta_\beta \approx \beta \operatorname{tg} \psi. \quad (3.15)$$

Указанная погрешность может быть скомпенсирована на конкретной рабочей частоте путем включения параллельно части R_d компенсирующей емкости C_k , создающей в параллельной цепи резонанс напряжений на данной частоте. Однако при изменении рабочей частоты условие компенсации δ_β с помощью C_k будет нарушаться.

Наряду с названной погрешностью для ваттметров характерно также наличие погрешности, обусловленной влиянием собственного потребления мощности катушками преобразователя. Если считать нагрузку Z_H чисто активной, то без учета влияния углов сдвига фаз между токами и напряжениями в катушках преобразователя относительная погрешность ваттметра δ из-за собственного потребления мощности для схем, представленных на рисунке 3.5, а, б запишется соответственно

$$\delta_a = \frac{U I_H - U_H I_H}{U_H I_H} = \frac{P_1}{P_H}, \quad (3.16)$$

$$\delta_b = \frac{U_H (I_2 - I_1) - U_H I_H}{U_H I_H} = \frac{P_2}{P_0}, \quad (3.17)$$

где P_1 и P_2 - значения мощности, потребляемые в токовой цепи и цепи напряжений ваттметра соответственно.

Выражения (3.16, 3.17) в случае активной нагрузки $Z_H = R_H$ могут быть преобразованы к виду

$$\delta_a = \frac{R_1}{R_H}, \quad (3.18)$$

$$\delta_b = \frac{R_H}{R_2}, \quad (3.19)$$

где R_1, R_2 - сопротивления обмоток неподвижной и подвижной катушек ваттметра соответственно.

Из выражений (3.18, 3.19) следует, что значения погрешностей δ_a и δ_b зависят от сопротивления нагрузки R_H (рисунок 3.7). Из рисунка 3.7 видно, что при некотором критическом значении сопротивления нагрузки

$$R_{HK} = \sqrt{R_1 \cdot R_2} \quad (3.20)$$

значения погрешности измерения для обеих схем равны, т.е. $\delta_a = \delta_b$. Следовательно, при $R_H > R_{HK}$ более целесообразным является использование схемы включения ваттметра, соответствующей рисунку 3.5,а, а при $R_H < R_{HK}$ предпочтение следует отдать схеме, представленной на рисунке 3.5,б)

Электродинамические ваттметры обычно имеют несколько пределов измерения (чаще всего два предела измерения по току и три - пять по напряжению).

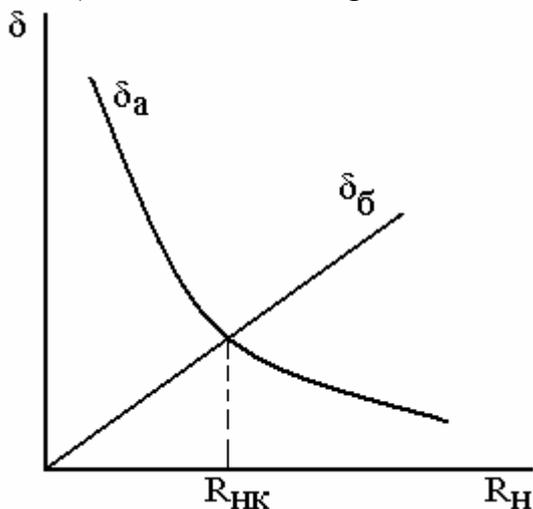


Рисунок 3.7 – Зависимость погрешности преобразователя от сопротивления нагрузки

направления протекания тока в одной из катушек вызывает изменение знака угла отклонения подвижной части (3.13, 3.14), то для облегчения правильного включения ваттметра в электрическую цепь один из каждой пары зажимов (последовательной и параллельной цепей) обозначают знаком "*" (см. рисунок 3.5) и называют "генераторным зажимом".

Фазометры. Электродинамические фазометры создаются на базе логометрического преобразователя (см. рисунок 3.2). Электрическая схема фазометра показана на рисунке 3.8,а.

Неподвижная катушка 5-6 преобразователя образует последовательную (токовую) цепь прибора. Подвижные катушки 1-2 и 3-4 образуют параллельную цепь. Последовательно с подвижной катушкой 3-4 включен резистор R_1 , имеющий активное сопротивление, а последовательно с катушкой 1-2 - комплексное индуктивное сопротивление, образованное резистором R и индуктивностью L . При такой схеме включения фазометра и индуктивном характере нагрузки Z_H векторная диаграмма фазометра будет соответствовать рисунку 3.8,б.

Уравнение преобразования фазометра можно записать на основании выражения (3.9) и векторной диаграммы

$$\alpha = f\left(\frac{I_1 \cos \varphi}{I_2 \cos(\psi - \varphi)}\right),$$

где I_1 и I_2 - токи в цепях подвижных катушек 1-2 и 3-4 соответственно; φ - фазовый сдвиг между током I в неподвижной катушке и током I_1 , равный изме-

При включении в цепь напряжения добавочных резисторов с различными значениями сопротивления (см. рисунок 3.5) достигается изменение пределов измерения ваттметра по напряжению. Расширение пределов измерения прибора по току осуществляется секционированием неподвижных катушек и включением секций по различным схемам. В некоторых случаях для расширения пределов измерения ваттметра применяют также измерительные трансформаторы, которые часто встраивают внутрь прибора.

Поскольку в ваттметре изменение

ряемому фазовому сдвигу между током и напряжением на нагрузке Z_H ; $\psi - \varphi$ - фазовый сдвиг между токами I и I_2 ; ψ - фазовый сдвиг между напряжением U и током I_2 в подвижной катушке 3.

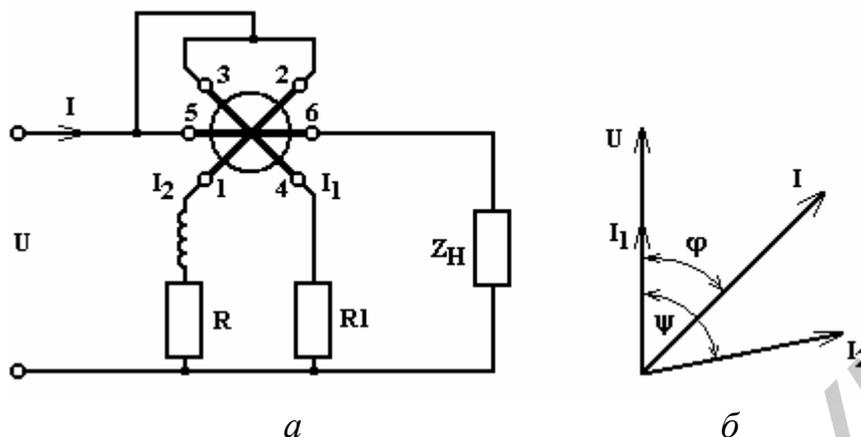


Рисунок 3.8 – Фазометр на основе электродинамического преобразователя

Если подобрать параметры подвижных катушек и элементов схемы R_1 , L и R так, чтобы $I_1 = I_2$, то при $\psi = \text{const}$ можем однозначно записать показание прибора α как функцию искомого угла φ или $\cos \varphi$, т.е. $\alpha = F_1(\varphi)$ или $\alpha = F_2(\varphi)$. Таким образом, шкала прибора может быть проградуирована непосредственно в единицах измеряемого фазового сдвига φ или $\cos \varphi$. Соответствующим выбором конструкции подвижной части преобразователя и параметров схемы фазометра можно добиться равномерной шкалы прибора по углу φ (шкала для $\cos \varphi$ будет при этом существенно неравномерной).

Электродинамические фазометры позволяют измерять фазовые сдвиги в пределах от 0 до 180° (чаще градуируются от плюс 90 до минус 90° с нулем в середине шкалы). Промышленно выпускаются фазометры с классами точности до $0,1$. Достаточно высокая точность их обеспечивается благодаря достоинствам, присущим электродинамическим преобразователям.

Основными недостатками рассмотренных фазометров является то, что они могут работать на фиксированных частотах и напряжениях. Изменение напряжения U требует изменения элементов схемы фазометра R и R_1 (для выполнения условия $I_1 = I_2$), а значит, и характер шкалы прибора при этом изменится. Изменение частоты также приводит к изменению характера шкалы из-за изменения реактивного сопротивления цепи катушки 1-2, а следовательно, и соотношения токов I_1 и I_2 .

4 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Отличительной особенностью электромагнитных приборов, обуславливающей их широкое применение для измерений в цепях переменного и постоянного токов в качестве щитовых амперметров и вольтметров, являются их высокие эксплуатационные качества: простота конструкции, низкая стоимость, высокая надежность, устойчивость к электрическим перегрузкам, широкий диапазон измеряемых величин. Основным недостатком этих приборов является

невысокая точность (отечественные электромагнитные приборы выпускаются с классами точности до 0,5).

Все электромагнитные приборы в зависимости от конструктивного исполнения и характера движения их подвижной части могут быть разделены на резонансные и нерезонансные. Каждая из этих групп приборов в свою очередь делится на две подгруппы: поляризованные и неполяризованные (в поляризованных приборах кроме намагничивающей катушки используются постоянные магниты). Так как резонансные электромагнитные приборы в настоящее время используются очень редко, то в настоящем пособии они не рассматриваются. Здесь рассмотрены лишь неполяризованные нерезонансные электромагнитные преобразователи, наиболее широко применяемые в электроизмерительной технике. Основу этих приборов составляют электромагнитные измерительные механизмы, отличающиеся как по конструктивному исполнению, так и по своим свойствам и параметрам.

4.1 Принцип действия, устройство и основы теории электромагнитных измерительных механизмов

Принцип действия всех электромагнитных преобразователей основан на взаимодействии магнитного поля тока, протекающего в катушке, с ферромагнитным сердечником.

Электромагнитные ИП могут быть выполнены так, что в результате взаимодействия магнитного поля катушки с током и ферромагнитного сердечника последний будет намагничиваться одноименно с другим неподвижным сердечником и отталкиваться от него (так называемые преобразователи отталкивающего действия), или же таким образом, что в результате воздействия магнитного поля катушки с током на ферромагнитный сердечник он будет втягиваться в магнитное поле катушки (преобразователь втяжного действия).

Все конструктивные разновидности электромагнитных ИП можно свести к двум основным типам [3, 5] (рисунок 4.1).

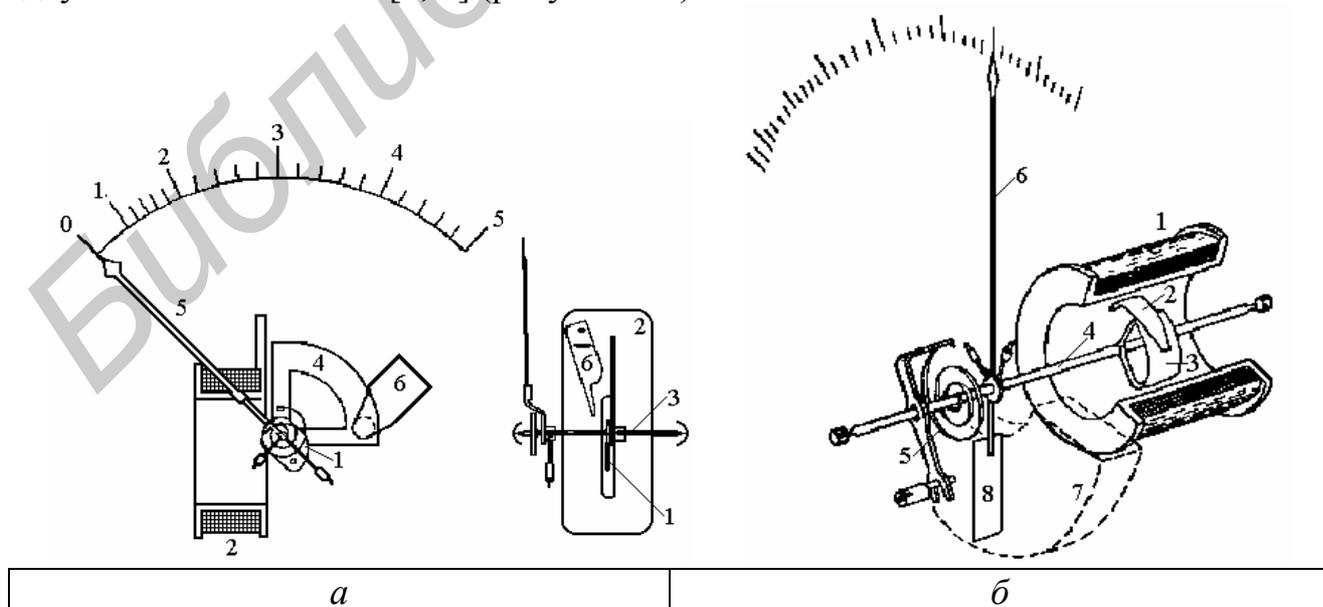


Рисунок 4.1 – Электромагнитные измерительные преобразователи

Преобразователи с плоской катушкой (рисунок 4.1,а) состоят из катушки

2, в магнитном поле которой находится ферромагнитный сердечник 1 в форме усеченного диска или язычка, эксцентрически закрепленный на оси подвижной части. При протекании по катушке тока ферромагнитный сердечник втягивается в магнитный зазор катушки, поворачивая при этом ось 3 с закрепленным на ней успокоителем 4 и стрелку 5 в сторону увеличения показаний. Регулировка угла отклонения подвижной части осуществляется с помощью магнитного шунта 6. Преобразователи с плоской катушкой менее технологичны в изготовлении, чем механизмы с круглой катушкой, однако они обладают повышенной чувствительностью, меньшими габаритами и массой.

Преобразователи с круглой катушкой (рисунок 4.1,б) состоят из катушки 1, подвижного 2 и неподвижного 3 ферромагнитных сердечников, форма которых определяется необходимостью получения требуемого характера шкалы преобразователя. При протекании по катушке тока подвижный и неподвижный сердечники намагничиваются одноименно. Подвижный сердечник отталкивается от неподвижного, поворачиваясь вместе с осью 4 и закрепленной на ней стрелкой 6. Причем сила отталкивания оказывается прямо пропорциональной значению тока, протекающего по катушке. Противодействующий момент создается с помощью спиральной пружины 5. Успокоение подвижной части осуществляется воздушным (крыльчатым) успокоителем, состоящим из закрытой камеры 7 и легкого алюминиевого крыла 8, жестко связанного с осью 4 подвижной части. Достоинством таких преобразователей является их простота, высокая технологичность изготовления и возможность получения требуемого характера шкалы (за счет выбора формы сердечников. Конструктивно сердечники могут быть цилиндрическими, призматическими или иметь другую форму). Чувствительность таких преобразователей оказывается ниже, чем у преобразователей с плоской катушкой.

Собственное магнитное поле у электромагнитных преобразователей, особенно у механизма с круглой катушкой, мало, они сильно подвержены влиянию внешних магнитных полей, для защиты от которых применяются два основных способа: магнитное экранирование и астазирование. При магнитном экранировании измерительный механизм заключается в оболочку из магнитомягкого ферромагнитного материала (железоникелевых сплавов или пермаллоя). При этом магнитные силовые линии внешнего поля замыкаются внутри стенок экрана, практически не проникая внутрь экрана. Для улучшения экранирующего действия экраны могут изготавливаться двойными. Астатические преобразователи представляют собой систему двух преобразователей, сердечники которых закреплены на общей подвижной оси, а катушки соединены между собой последовательно. Выполняются катушки таким образом, чтобы их магнитные поля были одинаковы по значению и конфигурации и направлены навстречу друг другу. При этом на подвижную часть будут действовать два вращающих момента. Если астатический механизм попадает в однородное внешнее магнитное поле, то под его влиянием тот из моментов, действующих на подвижную часть, для которого направления собственного и внешнего магнитных полей совпадают, увеличится, а второй момент - уменьшится на такое же значение. В результате суммарный момент, действующий на подвижную часть, а следовательно, и

показания прибора останутся прежними. К недостаткам астатических преобразователей следует отнести усложнение и удорожание конструкции, а также то, что в них исключается влияние только однородных магнитных полей. Поэтому в тех случаях, когда приборы работают в неоднородных полях, наиболее эффективным является их магнитное экранирование.

Вращающий момент для рассмотренных преобразователей определяется из выражения (1.2). Электромагнитная энергия, запасенная в катушке преобразователя, по которой протекает ток I , выражается формулой

$$W_e = \frac{1}{2} LI^2,$$

при подстановке которой в (1.2) получим выражение для вращающего момента:

$$M_{BP} = \frac{dW}{d\alpha} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}, \quad (4.1)$$

где L - индуктивность катушки, зависящая от положения сердечника.

Установившееся положение подвижной части наступит при равенстве вращающего и противодействующего моментов. Для случая, когда $M_{ПР}$ создается с помощью механических упругих элементов и определяется формулой (1.3), приравняв правые части (4.1) и (1.3), получим математическое выражение условия установившегося отклонения подвижной части, из которого определим уравнение шкалы электромагнитного преобразователя:

$$\alpha = \frac{1}{2K_{уд}} I^2 \frac{dL}{d\alpha}. \quad (4.2)$$

При использовании электромагнитного преобразователя в цепях переменного тока уравнение шкалы будет совпадать с выражением (4.2), в которое вместо значения постоянного тока I следует подставлять среднеквадратическое значение переменного тока $I_{СК}$.

Из проведенного рассмотрения можно сделать некоторые выводы о свойствах, достоинствах и недостатках электромагнитных преобразователей:

- электромагнитные преобразователи могут применяться для измерений в цепях как постоянного, так и переменного токов, так как направление отклонения подвижной части не зависит от направления тока в обмотке. При применении их для измерений в цепях переменного тока они измеряют среднеквадратические значения тока или напряжения;

- точность электромагнитных преобразователей сравнительно невысокая вследствие влияния потерь в сердечниках (на гистерезис и вихревые токи), внешних магнитных полей, температуры окружающей среды и частоты измеряемых электрических величин;

- чувствительность электромагнитных преобразователей за исключением преобразователей с замкнутым магнитопроводом невысока, следовательно, собственное потребление мощности от источников преобразуемых сигналов у них довольно значительное;

- функция преобразования электромагнитных преобразователей по своему характеру является квадратичной, однако соответствующим выбором формы и местом расположения сердечника, т.е. закона изменения индуктивности при

изменении угла поворота подвижной части, можно получить практически равномерную шкалу на участке от 20 до 100 % от ее верхнего предела;

- электромагнитные преобразователи наиболее просты по своей конструкции, имеют низкую стоимость и надежны в работе;

- электромагнитные преобразователи способны выдерживать длительные электрические перегрузки, так как токоподводящими элементами у них являются медные проводники соответствующего сечения, а не упругие элементы, создающие противодействующий момент $M_{пр}$ и первыми выходящие из строя при перегрузках в преобразователях других групп;

- диапазон рабочих частот для электромагнитных преобразователей ограничен сверху частотами порядка нескольких десятков килогерц из-за возникновения большой частотной погрешности на высоких частотах вследствие влияния вихревых токов в сердечнике и других металлических деталей преобразователя, а также вследствие изменения индуктивного сопротивления катушки при изменении частоты. Для уменьшения дополнительных частотных погрешностей сердечники и магнитопроводы электромагнитных преобразователей выполняются из магнитомягких материалов с высоким удельным сопротивлением (пермаллоев).

Существуют также электромагнитные логометрические преобразователи, которые применяются в фазометрах, частотомерах, фарадометрах и т.п. Их основные свойства аналогичны свойствам преобразователей с механическим противодействующим моментом.

4.2 Электромагнитные амперметры и вольтметры

Электромагнитные приборы находят широкое применение в практике электрических измерений главным образом в виде различных щитовых и лабораторных амперметров и вольтметров переменного тока. Кроме того, на базе логометрических преобразователей создаются фазометры, частотомеры и фарадометры.

Амперметры. Электромагнитные амперметры образуются путем непосредственного последовательного включения преобразователя в цепь измеряемого тока. Они используются для измерения сравнительно небольших токов, так как при больших токах сильное влияние на показания приборов оказывают магнитные поля токопроводящих проводов. Щитовые амперметры, как правило, изготавливаются однопредельными. Лабораторные приборы могут иметь несколько пределов измерений, которые изменяются путем секционирования обмотки катушки и включения секций последовательно или параллельно. Для расширения пределов измерения амперметров на большие токи используются измерительные трансформаторы тока (см. подраздел 6.2).

Вольтметры. Вольтметры образуются путем последовательного включения электромагнитного преобразователя и добавочного резистора R_d . При этом для уменьшения температурной погрешности из-за изменения сопротивления цепи протекания измеряемого тока отношение сопротивления добавочного резистора R_d выполняемого обычно из манганина, к сопротивлению медного провода катушки не должно быть меньше определенного значения, задаваемого допустимой температурной погрешностью. Поэтому в вольтметрах, предназна-

ченных для измерения малых напряжений, приходится уменьшать сопротивление катушки за счет уменьшения числа ее витков, что ведет к снижению чувствительности приборов. Для избежания этого расширение пределов измерения вольтметров в сторону малых напряжений осуществляется, как правило, не за счет изменения R_d , а путем секционирования катушек и перехода с последовательного включения секций на параллельное. Расширение пределов измерений в сторону больших напряжений осуществляется до 600 В с помощью добавочных резисторов, а на более высокие напряжения - с помощью измерительных трансформаторов напряжения (см. подраздел 6.2). Из-за различного характера частотной зависимости добавочного сопротивления R_d и сопротивления катушки у вольтметров могут появляться дополнительные (по сравнению с амперметрами) частотные погрешности.

Электромагнитные фазометры, частотомеры и фарадометры на базе логометрических преобразователей сколько-нибудь широкого применения в электроизмерительной технике не получили и поэтому в данном пособии не рассматриваются.

5 ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Электростатические приборы обладают целым рядом отличительных особенностей, обуславливающих их значительные преимущества по сравнению с приборами других систем. Это, прежде всего, малое собственное потребление мощности от источника измеряемого напряжения, сравнительно высокая точность, возможность использования их в широком диапазоне частот (от 20 Гц до 35 МГц), незначительная зависимость показаний от частоты и формы кривой измеряемых напряжений, возможность использования для непосредственного измерения (без применения измерительных трансформаторов напряжения) высоких напряжений (до 300 кВ), независимость показаний от внешних магнитных полей и др. К основным недостаткам этих приборов относятся: сильная зависимость показаний от внешних электрических полей, малое значение вращающего момента и низкая чувствительность, неравномерная шкала и др.

Наиболее широко электростатические преобразователи выпускаются и используются в виде щитовых вольтметров для измерения напряжений до 15 кВ в диапазоне частот до 3 МГц с классами точности 1,0 и 1,5, а также переносных вольтметров с пределами от десятков вольт до 3 кВ, частотным диапазоном до 35 Гц и классами точности: 0,5; 1,0; 1,5. Выпускаются также высокоточные приборы с классами 0,05 и 0,10 и специальные высоковольтные вольтметры для измерения напряжений от десятков вольт до 300 кВ.

Основу всех электростатических приборов составляют электростатические измерительные механизмы.

5.1 Принцип действия, устройство и основы теории электростатических измерительных преобразователей

Принцип действия электростатических преобразователей основан на взаимодействии электрических полей двух тел (систем пластин), заряженных разноименными зарядами. В результате такого взаимодействия одна из систем, яв-

ляющаяся подвижной, перемещается относительно неподвижной системы пластин, вызывая при этом отклонение стрелки отсчетного устройства, связанной с подвижной частью преобразователя, в сторону возрастающих показаний. Перемещение подвижной части преобразователя относительно неподвижной вызывает изменение емкости между ними. Конструктивно подвижная и неподвижная части ИМ выполняются в виде пластин.

Все существующие электростатические преобразователи можно разделить на два вида: преобразователи, у которых изменение емкости достигается за счет изменения активной площади взаимодействующие пластин (рисунок 5.1,а), и преобразователи, у которых емкость изменяется за счет изменения расстояния между пластинами (рисунок 5.1,б).

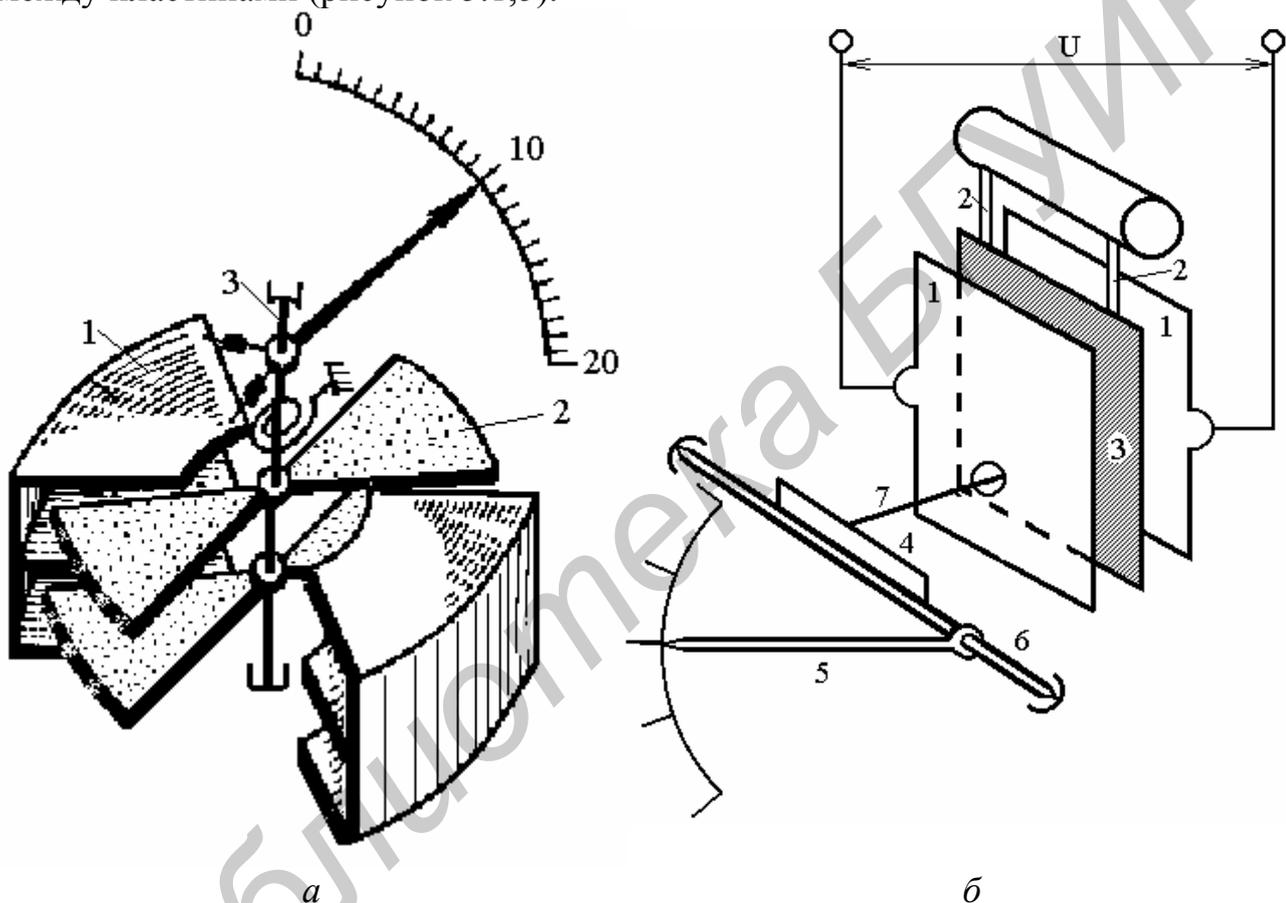


Рисунок 5.1 – Электростатические измерительные преобразователи

Преобразователи первого вида применяются в вольтметрах, предназначенных для измерения низких напряжений, второго вида - в киловольтметрах.

Подвижная часть преобразователя с изменяющейся активной площадью пластин (см. рисунок 5.1,а) состоит из одной или нескольких тонких алюминиевых пластин 2, закрепленных на оси 3. Неподвижная часть образуется одной или несколькими камерами 1, состоящими из металлических пластин с воздушным зазором между ними. Увеличение числа камер и лучей у подвижных пластин приводит к повышению чувствительности преобразователя. Форма подвижных и неподвижных пластин выбирается или рассчитывается исходя из необходимости обеспечения равномерного характера шкалы прибора. При подаче на подвижные и неподвижные пластины измеряемого напряжения они окажут-

ся заряженными разноименными зарядами и между ними возникнут силы электростатического притяжения, в результате действия которых подвижные пластины будут поворачиваться, стремясь зайти внутрь камер. Вместе с подвижными пластинами будет поворачиваться и ось 3 с закрепленной на ней стрелкой отсчетного устройства. При этом будут закручиваться упругие элементы, создающие противодействующий момент. Подвижная часть остановится при равенстве вращающего и противодействующего моментов. Значение измеряемого напряжения будет определяться углом отклонения стрелки относительно начала шкалы. Для успокоения подвижной части в электростатических преобразователях используются магнитоиндукционные или крыльчатые, воздушные успокоители. Вследствие того что вращающий момент у электростатических преобразователей мал, для увеличения их чувствительности применяют крепление подвижной части на растяжках и световой отсчет. При этом уменьшаются масса и момент инерции подвижной части и улучшается характер шкалы.

У электростатических преобразователей с изменяющимся расстоянием между пластинами (рисунок 5.1,б) неподвижная часть образована двумя пластинами 1, между которыми находится подвешенная на тонких неупругих металлических подвесах 2 подвижная пластина 3, гальванически соединенная с одной из неподвижных пластин и изолированная от другой. При подаче на подвижную и изолированную неподвижную пластины измеряемого напряжения подвижная пластина будет притягиваться к разноименно заряженной изолированной неподвижной пластине и одновременно отталкиваться от одноименно заряженной неподвижной пластины (независимо от полярности подключения измеряемого напряжения). Через тягу 7 и мостик 4 перемещение подвижной пластины вызывает поворот оси 6 с закрепленной на ней стрелкой 5. При этом возникает противодействующий момент, создаваемый массой подвижной пластины. Установившееся показание стрелки будет при равенстве вращающего и противодействующего моментов. Вольтметры с такими преобразователями требуют первоначальной установки в такое положение, при котором стрелка будет находиться на нулевой отметке (при отсутствии измеряемого напряжения).

Вращающий момент, возникающий в обоих видах электростатических преобразователей, может быть определен из выражения (1.2). Электрическая энергия, запасенная в преобразователе, представляет собой энергию электрического поля между двумя разноименно заряженными системами пластин и может быть определена по формуле

$$W_e = \frac{1}{2}CU^2, \quad (5.1)$$

где C - емкость между заряженными системами пластин; U - измеряемое напряжение, приложенное к пластинам.

Подстановкой (5.1) в выражение (1.2) получим

$$M_{BP} = \frac{1}{2}U^2 \frac{dC}{d\alpha}. \quad (5.2)$$

Условие установившегося отклонения подвижной части преобразователя определим из равенства $M_{ВР}$ и $M_{ПР}$, который при создании его механическими упругими элементами определяется выражением (1.3). Приравняв (5.2) и (1.3), получим соотношение

$$\frac{1}{2} U \frac{dC}{d\alpha} = K_{уд} \alpha, \quad (5.3)$$

из которого запишем уравнение шкалы электростатического преобразователя

$$\alpha = \frac{1}{2K_{уд}} U^2 \frac{dC}{d\alpha}. \quad (5.4)$$

При использовании преобразователя для измерения в цепях переменного тока в формулу (5.4) необходимо подставлять мгновенное значение напряжения

$$U(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi).$$

Однако из-за достаточно большого момента инерции подвижной части ее отклонение будет определяться не мгновенным, а средним за период значением $M_{ВР}$:

$$M_{ВР} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{ВР}(t) dt = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\alpha},$$

где U - среднеквадратическое значение переменного напряжения $U(t)$.

Поэтому уравнение шкалы и в случае измерения переменных напряжений определяется формулой (5.4), в которую подставляется среднеквадратическое значение переменного напряжения.

Из вышесказанного можно сделать некоторые выводы о свойствах, достоинствах и недостатках электростатических преобразователей и приборов на их основе:

- электростатические преобразователи могут непосредственно измерять только напряжение;
- электростатические преобразователи могут применяться для измерений напряжений постоянного и переменного токов;
- вращающий момент в электростатических преобразователях сравнительно мал, и они обладают низкой чувствительностью по напряжению;
- точность электростатических преобразователей может быть достаточно высокой, так как на их показания незначительно влияют частота и форма кривой измеряемого напряжения, внешние магнитные поля и температура окружающей среды. Электростатические вольтметры могут изготавливаться с классами точности до 0,05;
- собственное потребление мощности из измерительной цепи для электростатических преобразователей мало, так как при измерениях в цепях постоян-

ного тока оно обусловлено лишь кратковременным током заряда и незначительными токами утечки через изоляцию, а на переменном токе определяется током, протекающим через малую емкость преобразователя, и диэлектрическими потерями в изоляции;

- функция преобразования электростатических преобразователей по своему характеру является квадратичной, однако соответствующим выбором формы пластин, т.е. закона изменения емкости при изменении угла поворота, можно получить практически равномерную шкалу на участке от 20 до 100 % от ее верхнего предела;

- электростатические преобразователи сильно подвержены влиянию внешних электрических полей и требуют их экранировки;

- электростатические преобразователи могут работать в широком частотном диапазоне (до 35 МГц), который ограничивается влиянием собственной емкости преобразователя, паразитных реактивностей и активного сопротивления проводов и растяжек;

- с помощью электростатических вольтметров можно непосредственно измерять высокие напряжения (до 300 кВ);

- электростатические преобразователи могут использоваться для измерения кроме напряжения и других электрических величин: мощности, сопротивления и индуктивности.

5.2 Электростатические вольтметры и электрометры

Электростатические приборы наиболее широко используются в электроизмерительной технике в виде различных вольтметров. Кроме того, для измерения напряжения и других функционально связанных с ним величин (мощность, сопротивление в т.п.) используются так называемые электрометры электростатической системы.

Для измерения низких напряжений (от десятков до сотен вольт) используются преимущественно вольтметры, созданные на базе ИП с изменяющейся активной площадью пластин (см. рисунок 5.1,а). При этом для обеспечения достаточной чувствительности расстояние между подвижными и неподвижными пластинами делается очень малым (десятые доли миллиметра) и при случайных ударах, толчках, вибрации и т.д. возникает опасность короткого замыкания пластин, а значит и источника измеряемого напряжения. Для предохранения преобразователя от выхода из строя вследствие протекания через него больших токов при коротком замыкании внутрь низковольтных вольтметров встраивается защитный резистор, ограничивающий эти токи (рисунок 5.2).

Значение защитного сопротивления определяется исходя из допустимого тока через растяжки, на которых крепится подвижная часть, при коротком замыкании пластин. Вольтметр при этом подключается к источнику измеряемого напряжения с помощью зажимов 1 и 2. При частотах измеряемого переменного напряжения порядка сотен килогерц защитный резистор вызывает большие дополнительные частотные погрешности за счет емкостного тока, поэтому он отключается и вольтметр включается в электрическую цепь зажимами 1 и Э (экран).

В вольтметрах, рассчитанных на измерение более высоких напряжений,

расстояния между пластинами достаточно велики и защитные резисторы не используются. При измерениях высокочастотных напряжений в электрических цепях с несимметричным выходом зажим Э, соединенный с внутренним экраном прибора, должен обязательно заземляться.

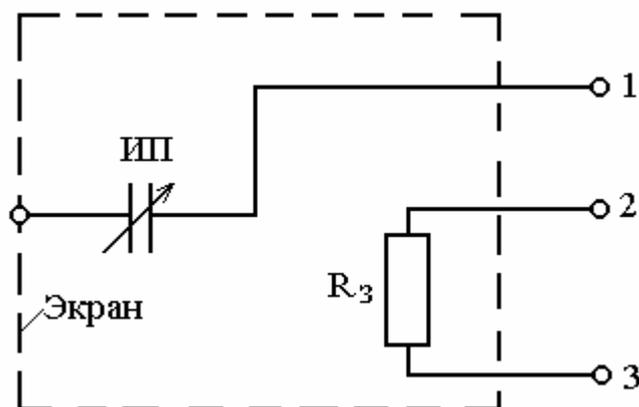


Рисунок 5.2 – Схема включения электростатического измерительного преобразователя

Расширение пределов электростатических вольтметров осуществляется главным образом с помощью делителей напряжения: емкостных - при измерениях на переменном токе и резистивных - на постоянном токе.

Схематическое устройство измерительного преобразователя так называемого квадрантного электростатического электрометра и три схемы его включения приведены на рисунке 5.3.

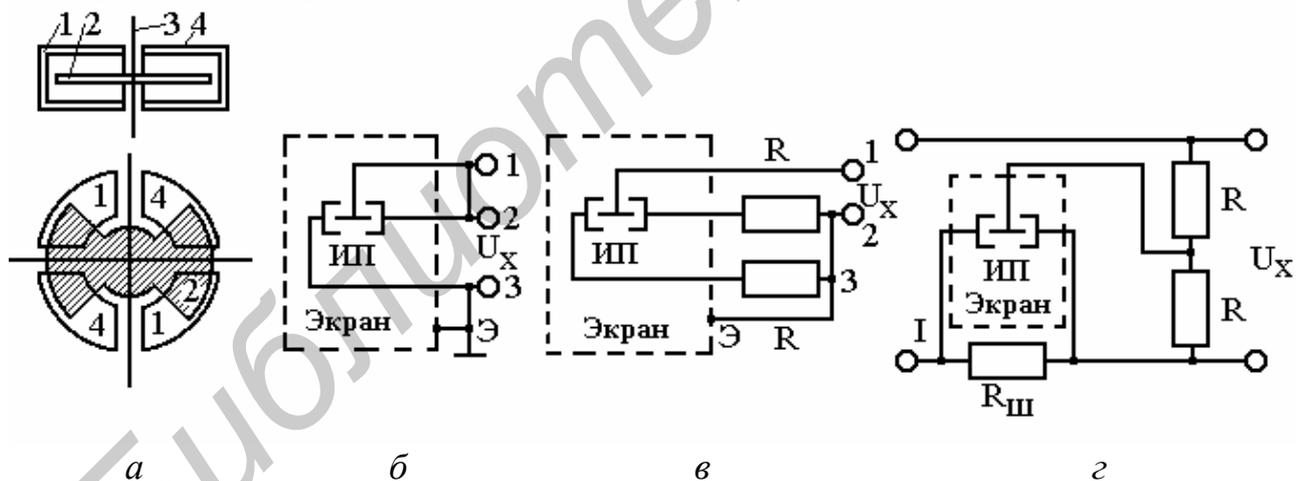


Рисунок 5.3 – Устройство квадрантного электростатического электрометра (а) и схемы его включения в измерительную цепь (б, в, г)

Преобразователь электрометра (рисунок 5.3,а) состоит из трех электродов, находящихся под разными потенциалами: подвижный электрод - бисквит 2 и две пары неподвижных электродов - квадрантов 1 и 4. Применяются три схемы включения электродов: двойное (рисунок 5.3,б), бисквитное (рисунок 5.3,в) и квадрантное (рисунок 5.3,г). При двойном включении электродов одна пара квадрантов соединяется с подвижным электродом (зажимы 1, 2), а вторая пара квадрантов - с экраном и заземляется (зажимы 3 и Э).

Измеряемое напряжение U_x подается на неподвижные электроды. При таком включении электромметр представляет собой электростатический вольтметр с квадратичной шкалой. При бисквитном включении (см. рисунок 5.3,в) на неподвижные электроды через зажимы 2 и 3 подается вспомогательное напряжение U от дополнительного источника питания, однородное с измеряемым напряжением (постоянное или переменное). Измеряемое напряжение U_x включается между подвижным электродом и искусственной средней точкой, образованной симметричным делителем $R - R$, соединенной с экраном прибора. Вращающий момент при этом будет определяться выражением

$$M_{BP} = 2U \cdot U_x \frac{dC}{d\alpha},$$

из которого очевидно, что при $U = \text{const}$ шкала полученного таким образом электростатического вольтметра будет равномерной.

Электромметр с квадрантным включением электродов (рисунок 5.3,г) применяется для измерения мощности. При таком включении на обе пары неподвижных электродов подается напряжение U_{III} , создаваемое на R_{III} током I измеряемой цепи, а подвижный электрод подключается через симметричный делитель $R - R$ к напряжению U измеряемой цепи. Вращающий момент электромметра в этом случае будет пропорционален произведению

$$U U_{III} \cos \varphi = U I R_{III} \cos \varphi,$$

где φ - фазовый сдвиг между U и I измеряемой цепи.

Таким образом, электромметр можно использовать в качестве электростатического ваттметра. Достоинством такого ваттметра является его широкий диапазон рабочих частот (до единиц мегагерц).

6 РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ. МАСШТАБНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В практике электрических измерений приходится измерять значения электрических величин в широких пределах. Так, например, диапазон возможных значений тока может быть определен пределами $10^{-16} \dots 10^6$ А. Для того чтобы обеспечить возможность с помощью одного и того же прибора измерять различные значения электрической величины, необходимо осуществлять расширение пределов измерений. Для этих целей могут использоваться различные масштабные измерительные преобразователи, а также специальные конструктивные и схемные решения самих измерительных приборов. Все масштабные измерительные преобразователи можно разделить на активные и пассивные. К первым относятся измерительные усилители, ко вторым - делители напряжения, шунты, добавочные резисторы и измерительные трансформаторы. Измерительные усилители используются в электронных электроизмерительных приборах. Поэтому здесь будут рассмотрены способы расширения пределов измере-

ний с помощью пассивных масштабных измерительных преобразователей.

6.1 Расширение пределов измерений с помощью делителей напряжения, шунтов и добавочных резисторов

Делители напряжения. Делители напряжения используются для расширения пределов измерения вольтметров и представляют собой последовательное соединение двух активных, реактивных или, в общем случае, комплексных сопротивлений, подключенных к источнику измеряемого напряжения U_x (рисунок 6.1,а). Преобразованное выходное напряжение $U_{\text{пр}}$ снимается с одного из этих сопротивлений и подается на вход вольтметра.

В практике электрических измерений находят применение резистивные (рисунок 6.1,б), емкостные (рисунок 6.1,в) и широкополосные (рисунок 6.1,г) делители напряжения.

При подключении к выходу делителя вольтметра с невысоким входным сопротивлением R_V (когда не выполняется условие $R_V \gg R_2$) реальный коэффициент передачи делителя из-за влияния будет значительно отличаться от его номинального значения, определяемого выражением (6.1). Поэтому резистивные делители, выполненные по схеме на рисунке 6.1,б, используются, главным образом, для расширения (увеличения в K раз) пределов измерений приборов с высоким R_V (электронные вольтметры, измерительные потенциометры, электростатические вольтметры на постоянном токе). Для расширения пределов измерения электромеханических вольтметров (кроме электростатических) используются резистивные делители напряжения, состоящие из добавочного резистора и вольтметра.

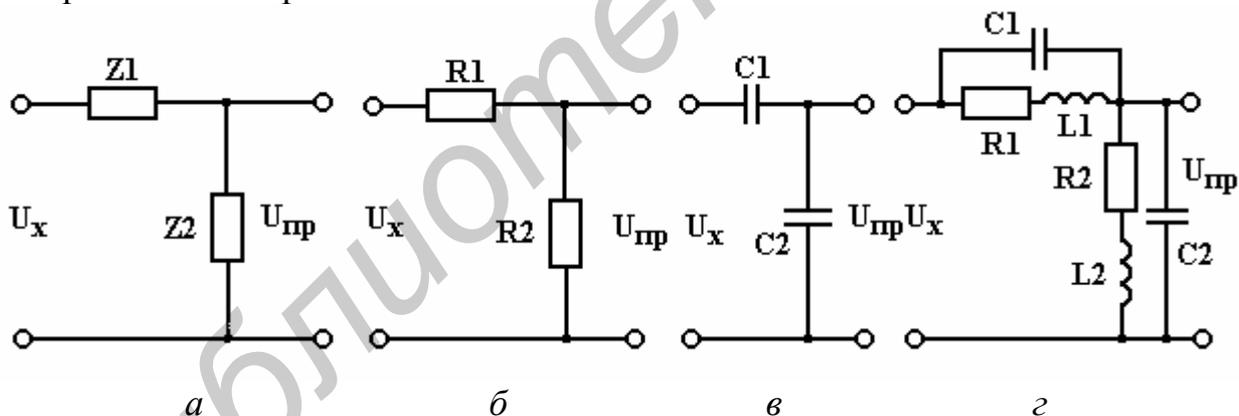


Рисунок 6.1 – Схемы делителей напряжения

Резистивные делители широко используются при измерениях в цепях постоянного тока и переменного тока в промышленном диапазоне частот. Коэффициент передачи K делителя определяется выражением

$$K = \frac{U_{\text{пр}}}{U_x} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (6.1)$$

Номинальный коэффициент передачи емкостного делителя напряжений (см. рисунок 6.1,в) без учета влияния подключенного к нему вольтметра и сопротивлений активных потерь в конденсаторах C_1 и C_2 определяется выражением

$$K = \frac{U_{\text{ПР}}}{U_X} = \frac{C_1}{C_1 + C_2}. \quad (6.2)$$

Применяются такие делители для расширения (увеличения в K раз) пределов измерений электростатических вольтметров на переменном токе. Часто в качестве C_2 используется сам электростатический преобразователь с емкостью C_V . В этом случае коэффициент передачи (коэффициент расширения пределов измерения) делителя записывается так:

$$K = \frac{C_1}{C_1 + C_V}. \quad (6.3)$$

При измерениях напряжений переменного тока на высоких частотах (ВЧ), начиная уже с десятков килогерц, сказывается влияние паразитных емкостей и индуктивностей элементов схемы делителя напряжения, и в данном случае нельзя говорить о чисто резистивных или емкостных делителях. Эквивалентная схема резистивного делителя напряжения на высоких частотах показана на рисунке 6.1,2, на котором C_1 , L_1 , C_2 , L_2 представляют собой паразитные емкости и индуктивности резисторов R_1 и R_2 . Для данной схемы делителя коэффициент передачи запишется выражением

$$K_F = \frac{R_2 \left(1 + \frac{j\omega L_2}{R_2} \right) (1 - \omega^2 L_1 C_1 + j\omega C_1 R_1)}{R_2 \left(1 + \frac{j\omega L_2}{R_2} \right) (1 - \omega^2 L_1 C_1 + j\omega C_1 R_1) + R_1 \left(1 + \frac{j\omega L_1}{R_1} \right) (1 - \omega^2 L_2 C_2 + j\omega C_2 R_2)}. \quad (6.4)$$

Из выражения (6.4) видно, что K_F в этом случае зависит от частоты измеряемого напряжения U_X , значит, при использовании резистивного делителя для преобразования напряжений различных частот будет появляться дополнительная частотная погрешность. Эта погрешность может быть исключена путем устранения зависимости K_F от частоты, т.е. при условии равенства коэффициентов передачи, определяемых выражениями (6.1) и (6.4). Приравняв правые части указанных выражений, видим, что резистивный делитель напряжения не будет вносить дополнительных частотных погрешностей в диапазоне высоких частот при условии

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{C_2}{C_1} = \frac{L_1}{L_2}. \quad (6.5)$$

Делитель напряжения, в котором выполняются условия (6.5), является цепью минимально-фазового типа. В нем помимо исключения частотных погрешностей осуществляется также компенсация фазочастотных погрешностей, что очень важно при использовании его совместно с фазочувствительными измерительными приборами. Резистивные делители с частотной компенсацией ис-

пользуются главным образом с электронными измерительными приборами. Из-за влияния внутреннего сопротивления источника измеряемого напряжения U_X , а также паразитных связей между элементами схемы делителя полной компенсации частотных погрешностей добиться не удастся, однако частотные погрешности не превосходят нескольких процентов в диапазоне частот до сотен мегагерц.

Делители напряжений могут быть также выполнены на индуктивных элементах, однако они находят ограниченное применение в электроизмерительной технике.

Шунты. Расширение пределов измерения амперметров может осуществляться путем деления измеряемого тока I_X и измерения только определенной его части. Простейшим масштабным измерительным преобразователем, осуществляющим деление тока, является шунт, включаемый параллельно амперметру (рисунок 6.2).

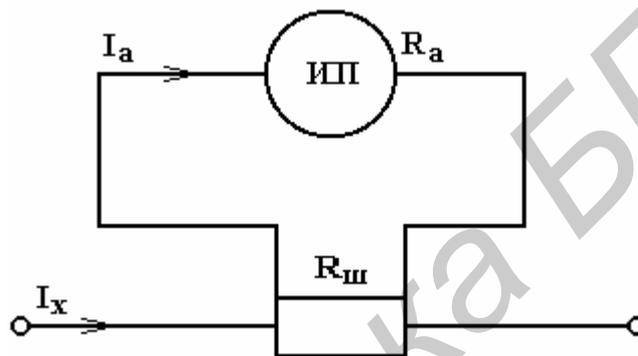


Рисунок 6.2 – Расширение пределов преобразования по току

При включении параллельно амперметру с внутренним сопротивлением R_A шунтирующего резистора (шунта) с сопротивлением R_{III} измеряемый ток I_X разветвляется на две составляющие: ток, протекающий через амперметр I_A , и ток, протекающий через шунт I_{III} . Таким образом, шунт можно рассматривать как масштабный измерительный преобразователь, коэффициент преобразования (деления) n которого можно записать выражением, получаемым из первого и второго законов Кирхгофа:

$$n = \frac{I_X}{I_A} = \frac{R_A + R_{III}}{R_{III}}. \quad (6.6)$$

Из выражения (1.73) можно определить значение сопротивления R_{III} , необходимое для расширения (увеличения) в n раз предела измерения амперметра:

$$R_{III} = \frac{R_A}{n - 1}. \quad (6.7)$$

Шунты применяются главным образом для расширения пределов измерения магнитоэлектрических амперметров на постоянном токе. Применение их в

приборах, созданных на основе электродинамических, электромагнитных и индукционных преобразователей, нецелесообразно из-за сравнительно большой мощности, потребляемой этими преобразователями, что приводит к необходимости изготовления шунтов с большими мощностями рассеивания, а следовательно, к увеличению их габаритов и массы. Кроме того, использование шунтов на переменном токе обуславливает возникновение дополнительной частотной погрешности вследствие различных законов изменения сопротивлений шунта и преобразователя.

Изготавливаются шунты из манганина и конструктивно подразделяются на внутренние (рассчитанные на токи до 30 А) и наружные (на токи до 7500 А). Наружные шунты представляют собой манганиновые пластины или стержни с двумя парами зажимов: токовыми и потенциальными. Токовые зажимы служат для включения шунта в цепь с измеряемым током, потенциальные - для подключения к шунту амперметра. В зависимости от точности изготовления наружные шунты дифференцируются на классы точности (0,02; 0,05; 0,10; 0,20; 0,50). Основные параметры шунтов регламентируются ГОСТ 8042-70. В многопредельных амперметрах и комбинированных приборах применяются ступенчатые шунты, сопротивление которых может изменяться с помощью переключателя пределов измерений.

Добавочные резисторы. Расширение пределов измерения электромеханических вольтметров, исключая электростатические, может осуществляться с помощью делителей напряжения, состоящих из добавочного резистора и вольтметра (рисунок 6.3).

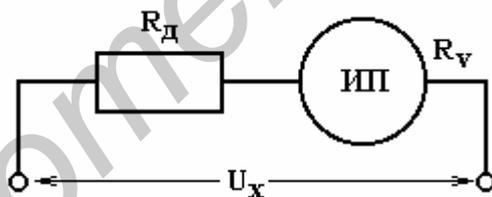


Рисунок 6.3 – Расширение пределов преобразования по напряжению

При последовательном включении вольтметра с внутренним сопротивлением R_v и добавочного резистора с сопротивлением R_d измеряемое напряжение U_x распределяется между R_v и R_d пропорционально их значениям. Следовательно, добавочный резистор представляет собой масштабный измерительный преобразователь напряжения, коэффициент преобразования (деления) m которого можно выразить соотношением, получаемым из второго закона Кирхгофа и закона Ома:

$$m = \frac{U_x}{U_v} = \frac{R_d + R_v}{R_v}, \quad (6.8)$$

где U_v - номинальный предел измерения вольтметра (до расширения его пределов).

Из выражения (6.8) можно определить значение сопротивления R_d , необходимое для расширения в m раз предела измерения вольтметра:

$$R_d = R_v(m - 1). \quad (6.9)$$

В большинстве случаев добавочные резисторы изготавливаются из манганиновой проволоки, однако могут состоять и из нескольких резисторов, изготовленных из материалов с различными ТКС (в целях компенсации температурной погрешности вольтметра). При использовании добавочных резисторов на переменном токе они могут представлять собой достаточно сложную электрическую цепь, осуществляющую одновременно коррекцию частотной погрешности вольтметра.

По конструктивному исполнению добавочные резисторы бывают внутренними (встроенными) и наружными. Вольтметр со встроенными добавочными резисторами градуируется вместе с ними. Для многопредельных переносных вольтметров они выполняются секционными на несколько пределов. Наружные добавочные резисторы могут быть калиброванными, т.е. иметь фиксированные значения R_d и применяться с различными приборами, и индивидуальными, т.е. используемыми только с определенными приборами или типами приборов. По точности изготовления они делятся на классы (0,01; 0,02; 0,05; 0,10; 0,20; 0,50; 1,00). С помощью добавочных резисторов можно расширить пределы измерения напряжений до 30 кВ в цепях постоянного и переменного токов с частотами от 10 Гц до 20 кГц.

6.2 Расширение пределов преобразования с помощью измерительных трансформаторов

Измерительные трансформаторы (ИТ) используются в качестве преобразователей больших токов и высоких напряжений в токи и напряжения, доступные для измерений приборами с небольшими стандартными пределами измерений. Благодаря использованию ИТ не только расширяются пределы измерений электроизмерительных приборов, упрощается их конструкция, но и создаются безопасные условия работы персонала, обслуживающего измерительные приборы, так как эти приборы применяются для измерения уже преобразованных, сравнительно небольших электрических величин и могут быть заземлены. Измерительные трансформаторы могут применяться как на переменном, так и на постоянном токах. Однако ИТ постоянного тока применяются сравнительно редко, при измерениях токов и напряжений в высоковольтных цепях постоянного тока, а также в тех случаях, когда использование шунтов невозможно или неэкономично. Поэтому здесь будут рассмотрены только ИТ переменного тока, находящие широкое применение в электроизмерительной технике.

ИТ переменного тока состоят из первичной и вторичной обмоток, расположенных на ферромагнитном сердечнике. По своему назначению они делятся на измерительные трансформаторы тока (ИТТ) и измерительные трансформаторы напряжения (ИТН). Схема включения ИТТ и ИТН в электрическую цепь и подключения к их вторичным обмоткам измерительных приборов приведена на рисунке 6.4.

Измерительные трансформаторы тока. Первичная обмотка ИТТ включается в электрическую цепь последовательно нагрузке. Ко вторичной обмотке могут подключаться амперметры, токовые обмотки ваттметров, счетчиков

электрической энергии и другие приборы. Для ИТТ, как правило, ток в первичной обмотке $I_1 = I_X$ больше тока во вторичной обмотке I_2 . Поэтому у ИТТ первичная обмотка должна иметь меньшее количество витков w_1 , чем вторичная - w_2 . Выполняется первичная обмотка из провода, сечение которого определяется номинальным значением тока $I_{1Н}$, и для токов, больших 600 А, состоит, как правило, из одного витка в виде медной шины или стержня, проходящих через окно сердечника.

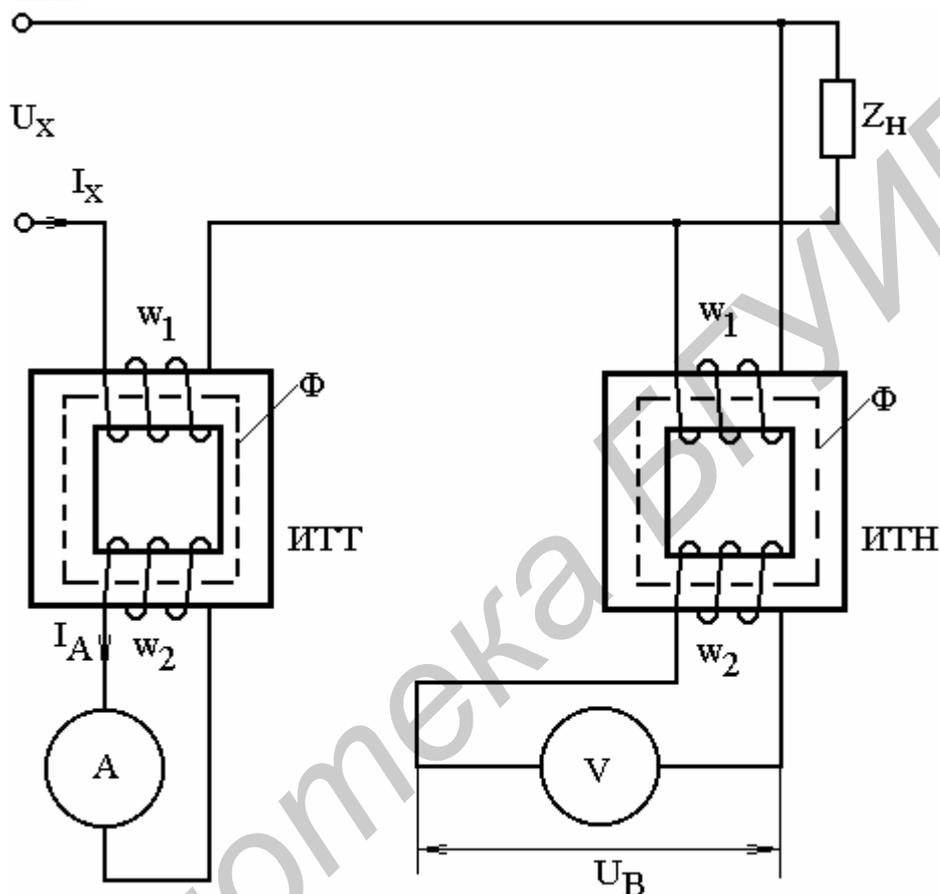


Рисунок 6.4 – Схема включения измерительных трансформаторов тока и напряжения

Вторичная обмотка ИТТ нагружена малым сопротивлением, так как подключаемые к ней электроизмерительные приборы обладают низким входным сопротивлением. Поэтому ИТТ работает в режиме, близком к режиму короткого замыкания по входу.

Коэффициент преобразования (трансформации) K_1 для ИТТ определяется формулой

$$K_1 = \frac{I_1}{I_2}. \quad (6.10)$$

Для реальных трансформаторов, однако, действительный коэффициент трансформации не является постоянным. Он зависит от режима работы трансформатора, т.е. от значений токов I_1 и I_2 , от характера и значения нагрузки вторичной цепи, частоты тока, конструкции и материала сердечника трансформатора. На практике поэтому пользуются так называемым номинальным коэффи-

циентом трансформации K_{IH} . Тогда измеряемый ток определяется по формуле

$$I_X = K_{IH} I_2, \quad (6.11)$$

где $K_{IH} = \frac{I_{1H}}{I_{2H}} = \frac{w_2}{w_1}$ - номинальное значение коэффициента трансформации ИТТ, указываемое в его паспорте.

Вследствие отличия номинального значения K_{IH} от действительного значения K_{ID} будет возникать токовая погрешность измерения, относительное значение которой можно определить:

$$\delta_I = \frac{I_2 K_{IH} - I_2 K_{ID}}{I_2 K_{ID}} 100 \% = \frac{K_{IH} - K_{ID}}{K_{ID}} 100 \%. \quad (6.12)$$

Кроме этой погрешности, при использовании ИТТ появляется еще так называемая угловая погрешность δ_φ , обусловленная отличием фазового сдвига между токами I_1 и I_2 от 180° . Данная погрешность сказывается только при использовании трансформаторов с фазочувствительными приборами (ваттметры и др.).

В зависимости от значений указанных погрешностей ИТТ делятся на классы точности, устанавливаемые для переносных многопредельных трансформаторов ГОСТ 23624-79. Переносные ИТТ изготавливаются на номинальные рабочие частоты в диапазоне от 25 Гц до 10 кГц, на номинальные первичные токи в пределах от 0,1 А до 30 кА и на номинальное значение вторичного тока, равное 6 А. Стационарные ИТТ изготавливаются на номинальные первичные токи от 1 до 40 кА и вторичные - 1; 2; 2,5; 5 А.

Измерительные трансформаторы напряжения. ИТН включаются параллельно участку электрической цепи, падение напряжения на котором необходимо измерить (см. рисунок 6.4). Для них, как правило, первичное напряжение $U_1 = U_X$ больше вторичного, и поэтому количество витков в обмотках $w_1 > w_2$. Обмотки выполняются обычно из тонкого изолированного медного провода.

В отличие от ИТТ измерительные трансформаторы напряжения работают в режиме, близком к режиму холостого хода по выходу, так как в их вторичную цепь включаются приборы с высоким входным сопротивлением.

Значение коэффициента преобразования (трансформации) K_U для ИТН определяется по формуле

$$K_U = \frac{U_1}{U_2}. \quad (6.13)$$

Как и для трансформаторов тока, на практике пользуются номинальным коэффициентом трансформации (K_{UH}).

Измеряемое напряжение при использовании ИТН находится во формуле

$$U_X = K_{UH} \cdot U_2, \quad (6.14)$$

где $K_{УН} = \frac{U_{1Н}}{U_{2Н}} = \frac{w_1}{w_2}$ - номинальное значение коэффициента трансформации ИТН, указываемое в его паспорте.

Фазовый сдвиг между векторами первичного U_1 и вторичного U_2 напряжений в идеальном трансформаторе напряжения, как и в ИТТ, равен 180° .

В реальных ИТН, по аналогии с ИТТ, возникают погрешности измерения напряжения δ_U и угловая δ_φ , значения которых зависят от тех же факторов, что и у трансформаторов тока. Значение погрешности измерения напряжения δ_U , появляющейся вследствие отличия номинального значения коэффициента трансформации $K_{УН}$ от действительного значения $K_{УД}$, аналогичного выражению (6.12), определяется формулой

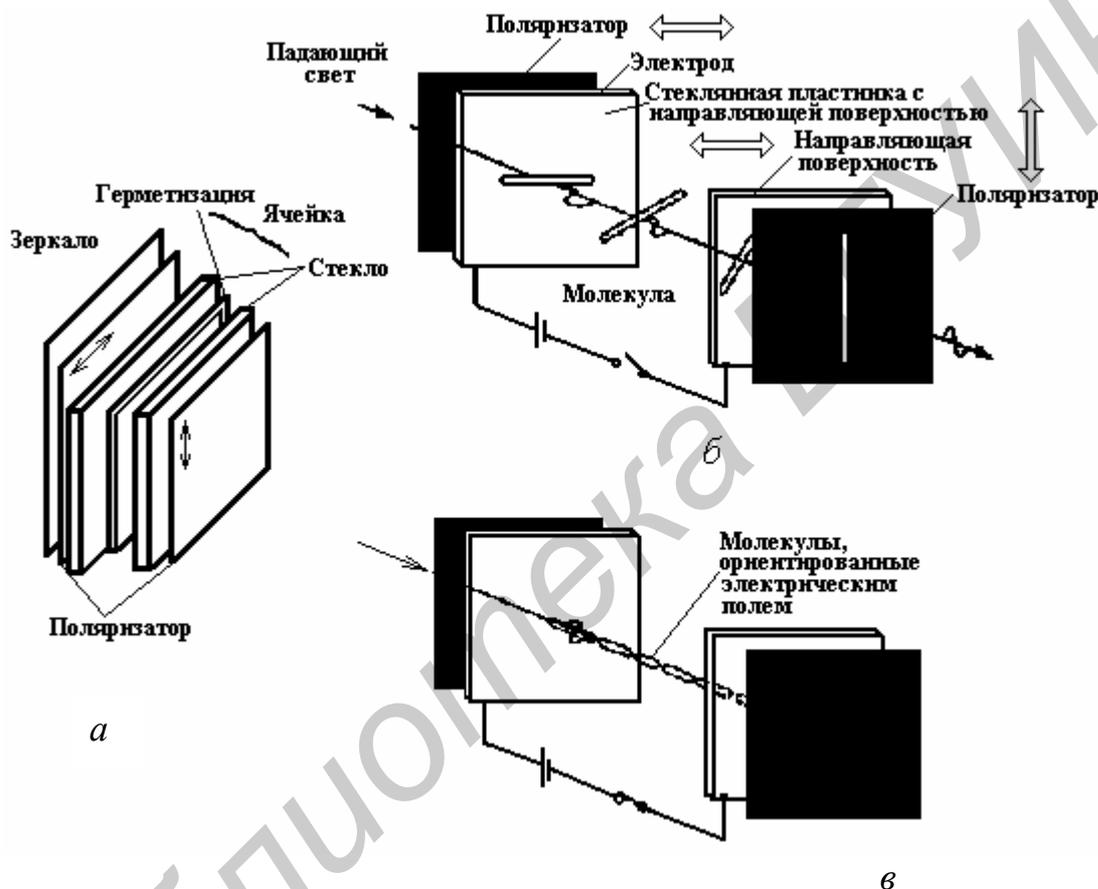
$$\delta_U = \frac{U_2 K_{УН} - U_2 K_{УД}}{U_2 K_{УД}} 100 \% = \frac{K_{УН} - K_{УД}}{K_{УД}} 100 \%. \quad (6.15)$$

ИТН изготавливаются в виде переносных и стационарных. Переносные трансформаторы выпускаются с классами точности 0,05; 0,10; 0,20; 0,50, а стационарные - 0,5; 1,0; 3,0. Другие параметры переносных лабораторных ИТН регламентируются ГОСТ 23825-79. Номинальные рабочие напряжения для нестационарных ИТН находятся в пределах от 127 В до 35 кВ при вторичных номинальных напряжениях $100/\sqrt{3}$, 100 и 150 В. Для измерений в трехфазных цепях используются специальные трехфазные ИТН.

7 ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ИНДИКАЦИИ

Электрооптическое устройство индикации — это выходной преобразователь, используемый главным образом в цифровых дисплеях. Такие дисплеи могут быть рассчитаны либо на излучение света в активном режиме, либо на изменение их оптических характеристик под влиянием электрического сигнала. В последнем случае показания могут быть считаны лишь при наличии внешнего освещения. Главным достоинством таких пассивных электрооптических устройств индикации является очень низкое потребление мощности (примерно 10 мкВт/см^2 , тогда как испускающим свет дисплеям требуется по меньшей мере 100 мВт/см^2). Основу пассивных дисплеев образуют *жидкие кристаллы*. В некоторых органических веществах сочетаются свойства твердых и жидких тел. Их молекулы обладают большой степенью свободы, как в жидкости, но все же остаются взаимно упорядоченными, подобно ионам в кристаллической решетке твердого тела. Однако в таком состоянии жидкие кристаллы существуют лишь в ограниченном диапазоне температур. При более низких температурах такое вещество ведет себя как твердое тело, а при более высоких температурах — как жидкость. Внутри используемого диапазона температур большинство молекул оказываются ориентированными в одном и том же предпочтительном направлении. Многие характеристики жидких кристаллов, такие, как диэлектрическая

проницаемость (ϵ), показатель преломления и прозрачность, зависят от ориентации молекул (наблюдается анизотропия). Под влиянием прикладываемого электрического поля ориентация молекул, а значит, и упомянутые свойства меняются. На рисунке 7.1 показано, как это можно осуществить. Жидкий кристалл (толщиной 10 мкм) помещен между двумя стеклянными пластинками, на которые с внешней стороны нанесены исключительно тонкие прозрачные электроды из проводящего металла (из окиси олова). Поверхность стекла обрабатывается таким образом, чтобы ориентация молекул по отношению к стеклянной пластинке была фиксированной (направляющие поверхности на рисунке 7.1, б).



a - конструкция ячейки ЖК-дисплея; *б* - поворот ориентации молекул (и за счет этого плоскости поляризации падающего света) в отсутствие электрического поля; *в* - принудительное ориентирование молекул путем создания электрического поля (вращение плоскости поляризации отсутствует)

Рисунок 7.1 – Жидкокристаллический дисплей

Таким образом, на противоположных гранях кристалла молекулы оказываются повернутыми на 90° по отношению друг к другу, а между гранями происходит постепенное изменение ориентации молекул. Падающий свет прежде всего проходит через поляризатор, размещенный впереди всей конструкции. По мере того как свет проходит сквозь молекулы жидкого кристалла, вектор поляризации постепенно поворачивается.

Теперь свет с повернутой поляризацией может пройти через выходной поляризатор, у которого плоскость поляризации повернута на 90° по отношению к

первому поляризатору. Когда к электродам прикладывается напряжение, ориентация молекул изменяется и совпадает с направлением электрического поля (как на рисунке 7.1,в). Теперь не происходит вращения поляризации падающего света, и он уже не проходит через ячейку. Ячейка выглядит темной. Требуемое напряжение не больше чем 1 или 2 В. Когда поляризаторы ориентированы в одном направлении, наблюдается обратный эффект. Если позади ячейки расположить зеркало, то с той же стороны, откуда приходит падающий свет, можно наблюдать отраженный свет. Когда ячейка управляется постоянным напряжением, могут иметь место гальванические эффекты, которые значительно сокращают срок службы ячейки. Поэтому для возбуждения ячейки обычно применяют низкочастотное переменное напряжение (например с частотой 50 Гц). В самых распространенных жидких кристаллах используются нематические жидкости (от греч. *Nematos* - пряжа). Жидкокристаллические дисплеи (ЖК-дисплеи) на основе таких веществ называют «твистированными нематическими». При наличии подсветки ЖК-дисплеями, показанными на рисунке 7.1,б,в, можно воспользоваться и в тех случаях, когда считывание должно производиться в темноте. При этом, правда, почти полностью утрачивается достоинство, состоящее в малом потреблении мощности.

Благодаря простой конструкции ячейки ЖК-дисплея ей удобно придавать форму цифр, букв и других символов. ЖК-дисплеи сравнительно медленны (время включения 50 мс, время выключения 100 мс). Чем ниже температура, тем медленнее ЖК-дисплей.

Принцип действия светоизлучающих электрооптических дисплеев основан либо на тепловом свечении, либо на люминесценции. В дисплеях, работающих на тепловом свечении, применяется нить накаливания, в которой электрическая энергия преобразуется преимущественно в тепло, но также отчасти и в видимый свет. КПД дисплеев такого типа крайне низок. Иногда их применяют в сегментных дисплеях. Для одной нити накаливания необходимы питающие напряжение 3 – 5 В и ток 20 мА. Поэтому потребление мощности на сегмент составляет от 60 до 100 мВт.

В люминесцентных дисплеях используется способность возбужденных электронов испускать видимый свет при возвращении на исходный энергетический уровень. В различных материалах возбуждение электронов может быть осуществлено разными способами, например, с помощью электрического разряда в газе, посредством ион-электронной рекомбинации или путем бомбардировки электронами, обладающими высокой энергией.

Дисплеи, в которых реализуется разряд в газе, состоят из стеклянной трубки, наполненной газом, и нескольких электродов, имеющих форму необходимых символов, которые расположены близко один за другим. Эти электроды служат катодами газовой трубки, в которой имеется также единственный анод. Давление газа, расстояние между электродами и плотность тока выбирают такими, чтобы катоды аккуратно покрывались слоем люминесцирующего газа (при этом катод светится). Такие трубки применяются почти исключительно в алфавитно-цифровых дисплеях и называются неоновыми лампами или, иногда,

лампами с тлеющим разрядом (фирменное название: *pixie tubes*). Напряжение зажигания – порядка 120 В, рабочее напряжение 80 В, рабочий ток 1 мА. Применение таких ламп резко сократилось в связи с появлением светодиодов.

В светоизлучающих диодах (светодиодах) возбуждение электронов в атомах осуществляется посредством рекомбинации. Полупроводниковый диод на основе GaAs или GaP испускает свет, когда он смещен в прямом направлении. Добавляя в полупроводник различные вещества, можно изменять цвет свечения. Диоды такого типа часто применяют в матричных дисплеях. Обычный алфавитно-цифровой дисплей состоит из 5 x 7 диодов. Напряжение питания выбирается в районе 1,6 – 3 В, и для достаточной яркости ток, потребляемый от источника питания, должен быть порядка 150 мА.

Электрооптические дисплеи, в которых используется люминесценция за счет бомбардировки вещества быстрыми электронами, носят название электронно-лучевых трубок. В прошлом их называли катодно-лучевыми, веря в существование такой вещи, как катодные лучи. Новое название является более подходящим. С помощью таких трубок легко получать изображение не только цифр, но диаграмм, кривых и произвольных символов. Поскольку дисплеи такого типа значительно более гибки, нежели дисплеи других типов, мы рассмотрим работу электронно-лучевой трубки подробнее.

Электронно-лучевая трубка

Как показано на рисунке 7.2, в электронно-лучевой трубке (ЭЛТ) происходят следующие четыре операции: *формирование*, *фокусировка* и *отклонение* электронного луча, а также *преобразование* электрической энергии в видимый свет.

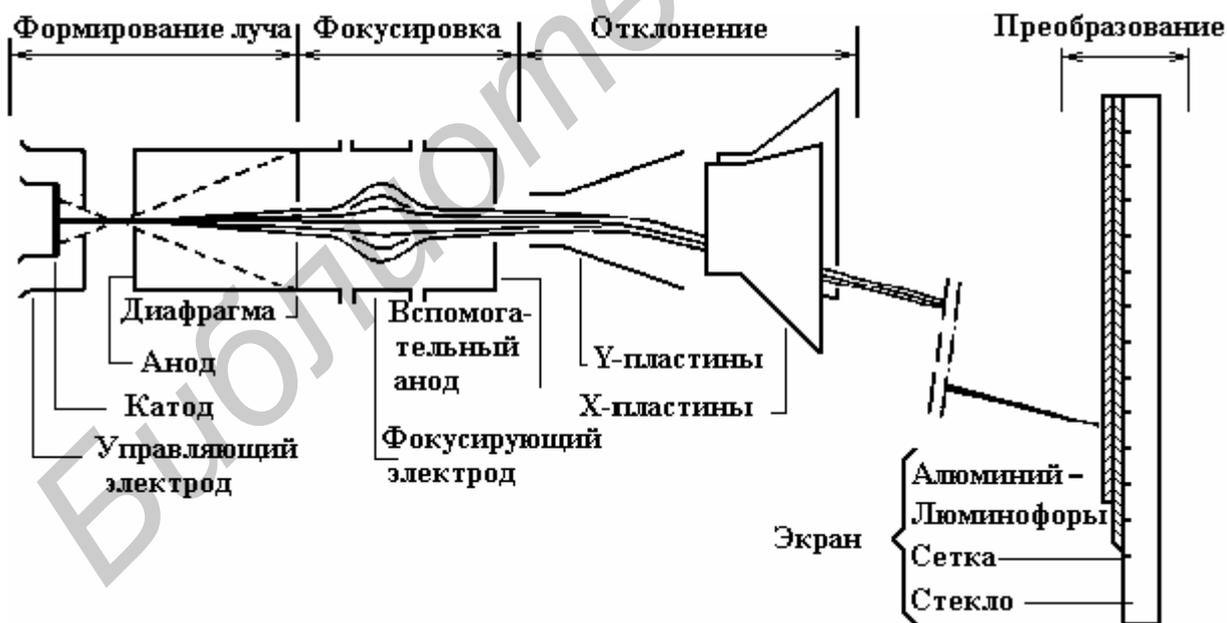
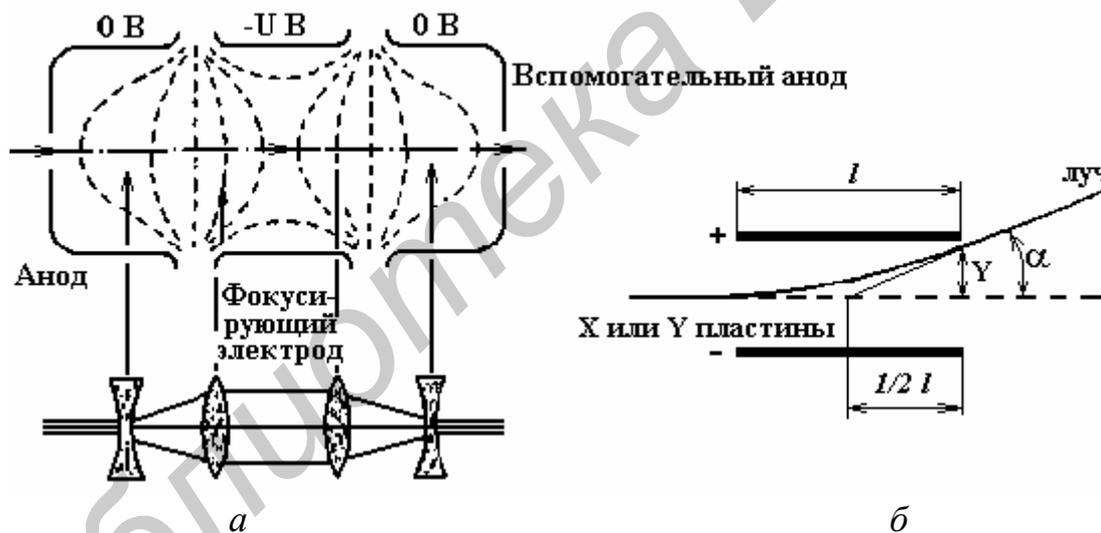


Рисунок 7.2 - Конструкция различных электродов в электронно-лучевой трубке

Электронный луч формируется в ЭЛТ так же, как в ламповом триоде, состоящем из катода, управляющей сетки и анода. Торцы цилиндрического катода покрыт материалом с малой работой выхода (смесь окислов бария и стронция). Когда катод нагревается нитью накала, самые быстрые электроны вылетают с

его поверхности. Их подхватывает электрическое поле, и они с ускорением летят вдоль центральной оси трубки в сторону анода. На управляющей сетке, расположенной между катодом и анодом, поддерживается отрицательное напряжение; с ее помощью регулируется количество электронов, достигающих анода (ток луча). Когда напряжение на сетке делается более отрицательным, электронный луч становится уже. Из рисунка видно, что электроны, вылетевшие из разных точек катода, проходят через одну точку. В действительности, из-за наличия сил отталкивания между электронами, находящимися вблизи друг друга, это не совсем точка, а скорее сечение небольшой площади. Система фокусировки проецирует эту небольшую площадку в точку на экране ЭЛТ. Эта операция имеет много общего с фокусировкой, осуществляемой оптическими линзами; поэтому часто говорят об электронных линзах (рисунок 7.3,а).

Потенциал фокусирующего электрода, расположенного между двумя анодами, поддерживается более низким, чем потенциал анодов, в результате чего возникает показанное на рисунке 7.3,а электрическое поле. Попадая в линзу слева, электронный луч прежде всего сталкивается с выпуклыми эквипотенциальными поверхностями убывающего потенциала, которые оказывают рассеивающее действие на электроны. Это можно сравнить с прохождением света сквозь рассеивающую линзу.



а - электростатическая фокусировка электронного луча;

б - отклонение электронного луча в однородном электрическом поле

Рисунок 7.3 – Схемы формирования и отклонения электронного луча

Затем луч проходит через убывающее вогнутое поле, в котором электроны подвергаются воздействию собирающих сил. Далее следует еще одно выпуклое поле, но теперь уже с нарастающим потенциалом. Это поле также стягивает электронный луч. Наконец, луч проходит сквозь вогнутое поле с увеличивающимся потенциалом, которое снова оказывает на луч рассеивающее действие.

Глядя на симметричную конструкцию электродов, можно подумать, что результат этой последовательности действий будет нулевым, т.е. параллельный луч, пройдя сквозь линзы, выйдет снова параллельным. Однако это не так, поскольку электроны, проходя через фокусирующие электроды, замедляют свое

движение из-за отрицательного потенциала этих электродов по отношению к анодам. Поэтому электроны дольше находятся в собирающем поле и система в целом оказывает фокусирующее действие. Это остается справедливым и в том случае, когда потенциал фокусирующего электрода положителен по отношению к анодам.

Следовательно, потенциалом фокусирующего электрода U можно воспользоваться для регулирования резкости точки на экране. Если, изменив потенциал управляющей сетки, сделать плотность электронного луча другой, то его фокус слегка сместится и точка на экране станет чуть-чуть больше. При изменении интенсивности (и, как следствие, яркости изображения на экране) необходимо заново подстроить фокусировку.

Отклонение электронного луча можно осуществлять с помощью магнитного или электрического поля. Однако мы рассмотрим только отклонение в электрическом поле (рисунок 7.3,б); при проведении измерений бывает необходимо обеспечить возможность наблюдения высокочастотных сигналов, поэтому отклонение луча должно происходить быстро и с этой целью почти всегда применяется отклонение именно электрическим полем. Магнитное отклонение для этого не годится. Отклоняющие электроды (пластины), как правило, изогнуты и расходятся в стороны, как показано на рисунке 7.2. Это позволяет получить большой угол отклонения.

Найдем теперь чувствительность ЭЛТ в отношении отклонения. Предположим, что отклоняющие пластины являются абсолютно плоскими и параллельными и электрическое поле в конденсаторе, образованном этими пластинами, однородно. Если расстояние между пластинами равно d и к ним приложено напряжение F , то напряженность электрического поля равна $E = U/d$. На электрон в этом поле действует кулоновская сила $F_e = qE = ma$ (где q – заряд, m – масса, a – ускорение). В результате электрон будет смещаться в сторону с ускорением $a = qU/md$. Вот почему его траектория является параболой. Таким образом, смещение по вертикали от оси отклоняющей системы равно $l = at^2/2$. Скорость вдоль оси v , с которой электрон влетает в конденсатор, будет оставаться постоянной. Следовательно, расстояние l на рисунке 7.3,б можно представить в виде: $l = qU^2/2mdv^2$. Тогда для угла α справедливо соотношение

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{dy}{dl} = \frac{qUl}{mdv^2}.$$

Результат выглядит так, как если бы траектория электрона имела резкий излом и отклонялась на угол α точно в центре конденсатора. Чувствительность велика, когда пластины являются протяженными и расположены близко друг к другу, а также при низкой скорости электронов. Обозначая напряжение между катодом и анодом в ЭЛТ через U_{CA} , мы можем найти скорость электронов вблизи

экрана, руководствуясь соотношением: $\frac{mv^2}{2} = qU_{CA}$. Следовательно,

$\text{tg}\alpha = \frac{U_I}{2dU_{CA}}$. Поэтому чувствительность падает с увеличением напряжения на аноде.

Если необходимы сигналы очень высокой частоты (свыше 10 МГц), то электронный луч будет двигаться по экрану исключительно быстро и яркость изображения будет небольшой. Эту проблему можно отчасти преодолеть, увеличив ток в луче, хотя это и сократит срок службы катода. Поэтому в высокочастотных трубках часто ускорение электронов разделено на два этапа: сначала они предварительно ускоряются разностью потенциалов в несколько киловольт, затем луч отклоняется, и только после этого снова осуществляется ускорение (напряжением порядка 15 кВ).

Экран ЭЛТ покрыт слоем люминофора (ZnS с Си, Al и другими элементами), атомы которого легко возбуждаются при бомбардировке электронным лучом. По прошествии времени релаксации они испускают свет. (Английское название люминофоров, phosphors, происходит от лат. *phosphorus* — носитель света. Эти вещества не имеют никакого отношения к химическому элементу фосфору.) Существует два механизма излучения света люминофором. Во время бомбардировки электронами люминофор быстро достигает определенного уровня излучения (рисунок 7.4). Этот этап называют *флуоресценцией*. После того как возбуждение прекращается, слой люминофора все еще светится в течение некоторого времени. Об этой фазе послесвечения говорят как о *фосфоресценции*. Цвет испускаемого света зависит от химического состава люминофора. Цвет в фазе фосфоресценции, как правило, отличается от цвета в фазе флуоресценции. Длительность фазы фосфоресценции также зависит от химического состава. Для наблюдения очень медленных физических процессов (таких, как получение радиолокационных изображений) применяют люминофоры с очень длительным послесвечением.

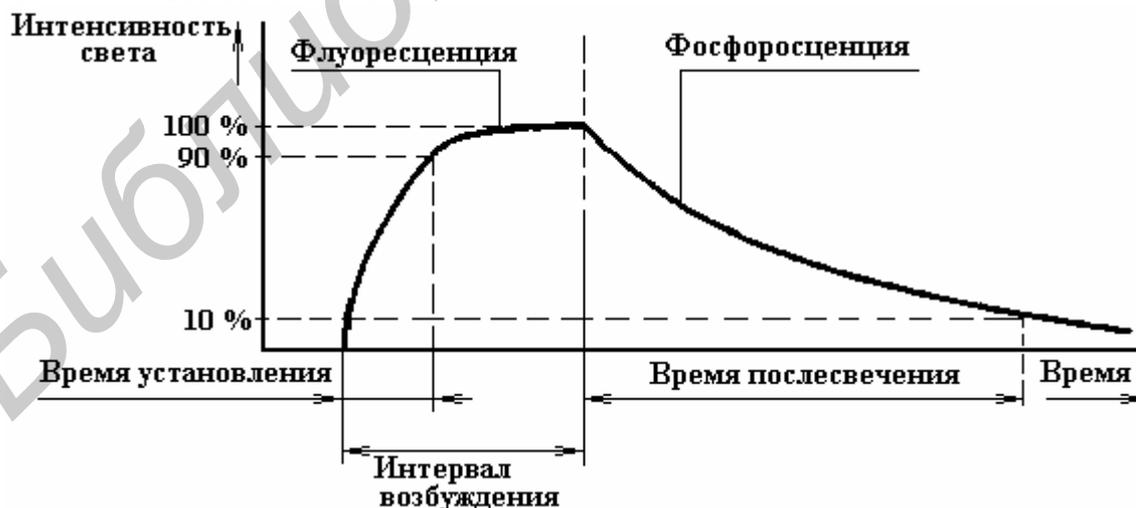


Рисунок 7.4 - Флуоресценция и фосфоресценция люминофора в ЭЛТ

Часто слой люминофора покрывают со стороны электронного луча тонким слоем алюминия. Этот слой служит отражателем света, а также играет роль теплоотвода. При бомбардировке люминофора электронами локально выделяется

большое количество тепла. Алюминиевый слой защищает экран от «выгорания» при большой интенсивности луча и малой скорости отклонения. Правда, проникая сквозь слой алюминия, электроны теряют некоторое количество энергии. Но эту потерю можно возместить, слегка повысив ускоряющее напряжение ЭЛТ.

В настоящее время сетку ЭЛТ вытравливают непосредственно на обратной стороне экрана. Это устраняет параллакс, который в противном случае возник бы из-за толстого защитного стекла трубки.

Наружное освещение может приводить к появлению на экране ЭЛТ мешающих отражений и бликов и к снижению контрастности. Если увеличить интенсивность электронного луча, то он расфокусируется и разрешение ухудшится. Этой проблемы можно избежать, поместив перед экраном оптический фильтр. Свет со стороны экрана станет слабее лишь в небольшой степени, поскольку он проходит сквозь фильтр только однократно и спектр пропускания фильтра выбирается согласованным со спектром излучения ЭЛТ. В то же время свет, приходящий извне, должен дважды пройти сквозь фильтр, да и спектр его довольно широк. Поэтому отражения оказываются существенно подавленными. Кроме того, поверхность фильтра делают, как правило, матовой, чтобы предотвратить блики. Иногда для подавления отражений снаружи применяют тонкую зачерненную проволочную сетку.

8 РЕГИСТРАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Самая важная функция регистрации состоит в том, чтобы служить *памятью*, так как мы хотим сохранить на некоторое время информацию, полученную при преобразовании. Информация, получаемая в результате преобразования, может содержаться в объекте измерения в двух формах: активной и пассивной. *Пассивной информацией* называют совокупность сведений, заключенных в том, как устроен объект. Такой, например, является информация, содержащаяся в фотографии или перфокарте, а также значение сопротивления резистора. С другой стороны, информация является активной, когда она имеет форму энергетической характеристики того или иного явления. Такие информационные энергетические явления называются сигналами. *Активной информацией* бывает промодулирован некий энергетический носитель. Поскольку всегда происходит рассеяние определенного количества энергии, часть активной информации в конечном счете теряется в обязательно присутствующем тепловом шуме. Если в результате усиления энергия сигнала увеличивается, то вместе с ней растет и шум. Усиление сигнала на более ранней стадии, до того как он утонет в помехах, лишь откладывает момент, когда часть сигнала будет потеряна из-за теплового шума. Поэтому информацию не хранят в активной форме. Пассивная информация бывает вложена в особый упорядоченную структуру материи. Информация как бы «заморожена» в веществе. Информация такого типа разрушается значительно медленнее, нежели активная информация. Кроме того, для сохранения запомненной информации мы не должны постоянно затрачивать энергию от источника питания. Таким образом, мы все-

гда преобразуем активную информацию в пассивную, прежде чем ее можно будет зарегистрировать. Это значительно ограничивает способы запоминания, пригодные для регистрации данных.

Мы можем разделить методы регистрации на аналоговые и цифровые точно так же, как мы делали это ранее. В этой книге мы не будем рассматривать цифровые методы регистрации данных, такие как магнитная и магнитооптическая запись на ленте или на перезаписываемом магнитном диске и др.

Аналоговые электрические сигналы обычно регистрируются при измерениях одним из следующих способов: графическим, магнитным или электронным путем. Графическая запись представляет собой регистрацию сигнала на бумаге с помощью пера. Магнитная запись измеряемых сигналов осуществляется на способном запоминать магнитном носителе. Электронная регистрация предусматривает запись измеряемого сигнала в полупроводниковую память, как это делается, например, в устройстве для регистрации переходных процессов.

8.1 Графическая запись

Графическая запись представляет собой электромеханическую регистрацию измеряемого сигнала на бумаге с помощью пишущего пера. Запись можно осуществить чернилами на обычной бумаге, пишущим узлом, переводящим сигнал в усилие, прикладываемое к бумаге, которая чувствительна к нажиму, тепловым или световым пером на фотобумаге. Достоинство перьевых самописцев с обычными чернилами состоит в том, что им не требуется дорогостоящая бумага. Всем другим регистрирующим устройствам необходима специально обработанная бумага. Но существует и недостаток: он заключается в трении между пером и бумагой, из-за которого могут возникать ошибки регистрации. По этой причине в скоростных устройствах регистрации иногда применяют струйные пишущие узлы.

Основными достоинствами использования самопишущих приборов (СП) являются:

- экономия времени наблюдателя при длительных измерениях;
- сокращение штата обслуживающего персонала при необходимости измерения большого количества величин;
- исключение субъективных погрешностей благодаря документированной регистрации;
- возможность получения непрерывной функции изменения исследуемой величины во времени или других величин;
- результаты измерений в виде диаграммы удобны для хранения;
- более высокая оперативность автоматической регистрации по сравнению с ручной;
- возможность регистрации в местах, где присутствие человека опасно или невозможно.

СП можно классифицировать по следующим основным признакам:

- в зависимости от количества одновременно регистрируемых величин - на одноканальные и многоканальные приборы;
- в зависимости от способа регистрации - на приборы, производящие за-

пись в виде диаграмм, и приборы, печатающие показания;

- в зависимости от используемого носителя и способа записи – на приборы с чернильной записью на бумажной диаграммной ленте, с фотографической записью на фотобумаге или фотопленке, с электрической, фотографической, электрохимической, термической и другими видами записи на специальных носителях, с магнитной записью на магнитной ленте, проволоке и других магнитных носителях;

- в зависимости от структурной схемы - на приборы прямого и уравновешивающего преобразования;

- по роду измеряемого тока - на приборы постоянного и переменного тока;

- по измеряемым величинам - на амперметры, вольтметры, ваттметры и вариометры, частотомеры, фазометры и универсальные СП;

- по классу точности – в основном относятся к группе приборов с классом точности 1,5 (для переносных) и 2,5 (для щитовых);

- по принципу действия – подразделяются на магнитоэлектрические, электромагнитные (поляризованные) и ферродинамические преобразователи.

Любой преобразователь содержит в общем случае следующие основные элементы и функциональные узлы:

- носитель информации, на котором производится запись;

- регистрирующее устройство (РУ), производящее запись информации;

- преобразователь, воздействующий на РУ;

- устройство перемещения носителя (привод).

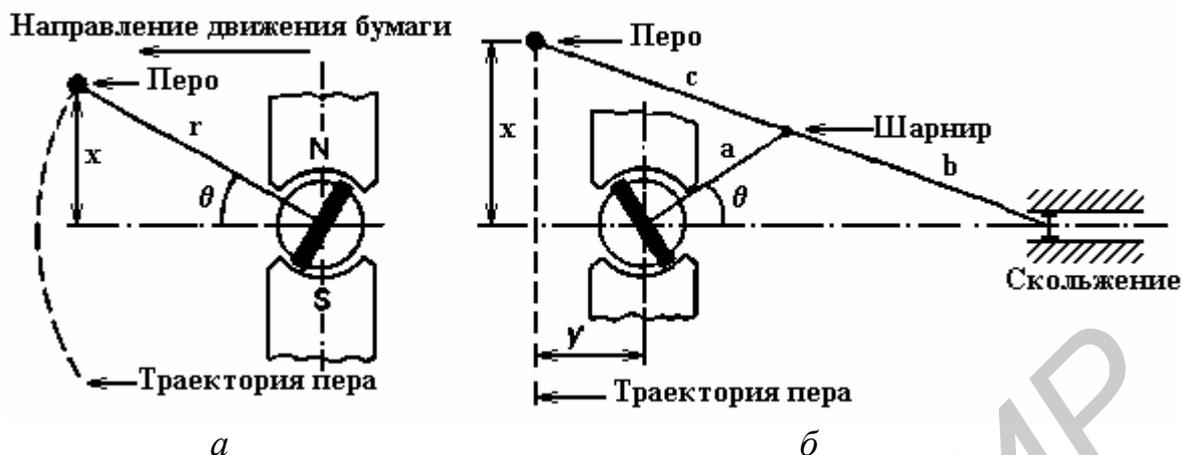
В ряде случаев самопишущий преобразователь содержит отсчетное устройство для непосредственного отсчета измеряемой величины.

Простейшим перьевым самописцем является перьевой самописец с подвижной катушкой. На рисунке 8.1 показано, что основой этого устройства регистрации служит конструкция типа стрелочного прибора с подвижной катушкой, в которой вместо стрелки имеется рычаг и перо. Нагруженная катушка представляет собой, по существу, электрический двигатель, который водит перо по бумаге. Обычно возбуждение катушки осуществляется сигналом с выхода усилителя. Благодаря этому достигаются большой по величине входной импеданс, высокая чувствительность и широкая полоса частот.

При максимальном размахе пера 5 см такой самописец может иметь полосу пропускания порядка 100 Гц и нелинейность меньше 1 %. Благодаря их компактности несколько таких перьевых самописцев с подвижной катушкой часто устанавливают рядом друг с другом. В результате становится возможным одновременно регистрировать несколько сигналов на одной и той же бумаге. Это особенно полезно тогда, когда важным является временное соотношение между регистрируемыми сигналами, как, например, это бывает при записи электроэнцефалограмм и кардиограмм.

Траектория (след) пера в преобразователях такого типа имеет нелинейную зависимость от входного напряжения, поскольку перо описывает часть окружности с центром на оси вращения катушки. Кривизна траектории приводит к возникновению погрешностей в отношении значения сигнала и к искажению масштаба по оси времени. Амплитуда записанного сигнала X в данном случае

не будет прямо пропорциональна входному напряжению.



a - кривизна траектории пера; *б* - рычажный механизм, позволяющий устранить кривизну траектории

Рисунок 8.1 - Перьевой самописец с подвижной катушкой

Для минимизации погрешности преобразования необходимо, чтобы и угол отклонения подвижной части преобразователя оставался малым. При этом нельзя слишком сильно увеличивать длину рычага, так как в этом случае трение между пером и бумагой будет создавать слишком большой момент, в результате чего произойдет уменьшение размаха пера.

Помимо амплитудных искажений кривизна траектории пера будет вызывать *искажение масштаба по оси времени*. Это легко увидеть, подав на вход сигнал прямоугольной формы и записав его. Однако этот эффект можно почти полностью устранить с помощью показанного на рисунке 8.1,б рычажного механизма. Если значение θ настолько мало, что достаточно точным приближением функции $\cos \theta$ служат первые два члена ее разложения в ряд, то величина Y постоянна и не зависит от X , когда $b^2 = ac$. В этой конструкции кажущаяся длина рычага равна $r' = \frac{a(b+c)}{b}$. Требование, которое должно выполняться да-

же в случае применения специального рычажного механизма, уменьшающего круговые искажения, состоит в том, что угол отклонения θ должен оставаться малым. Это происходит по следующей простой причине: если позволить углу θ принимать большие значения, то искажение временного масштаба станет много больше, чем в случае без рычажного механизма.

При рассмотрении фотографических способов регистрации нужно различать *прямую* и *косвенную* запись. При *прямой записи* регистрируемый сигнал становится видимым (почти) мгновенно, так как отсутствует процесс проявления фотобумаги. Это возможно в том случае, когда бумага чувствительна только к ультрафиолетовому свету. С другой стороны, при *косвенной записи* необходимо выполнить стандартную процедуру проявления фотобумаги, прежде чем сигнал можно будет наблюдать. Косвенная запись применяется при регистрации (фотографировании) осциллографического изображения. Для этих целей

используется специальный осциллограф. При этом необходимо выполнить стандартную процедуру проявления фотобумаги, прежде чем сигнал можно будет наблюдать.

Фотографическая запись непериодических сигналов, таких как переходный процесс, позволяет зафиксировать результат только при однократной развертке осциллографа. При регистрации очень быстрых переходных процессов важна скорость фотографической записи. Она определяется скоростью движения электронного луча по экрану, оставляющего неподвижный след на фотографии. Скорость фотозаписи зависит от интенсивности света, апертуры фотоаппарата и чувствительности пленки. Поэтому для регистрации осциллограмм применяют очень чувствительную пленку. Важен также цвет свечения люминофора ЭЛТ осциллографа. Глаз человека более всего чувствителен к зеленовато-желтому цвету, так что человеку-наблюдателю легче всего воспринимать осциллографическое изображение именно такого цвета. Однако эмульсия пленок обычно чувствительнее всего к синевато-фиолетовому цвету, который, таким образом, больше подходит для получения хороших фотографий с экрана ЭЛТ. Кроме того, при фотографировании осциллографических изображений лучшие результаты можно получить, сознательно создавая вуаль, т.е. заставляя весь экран осциллографа слегка светиться. При этом используется эффект зависимости дифференциальной чувствительности фотоэмульсии от интенсивности света. При малой интенсивности света дифференциальная чувствительность ниже, чем при большой интенсивности. Если соблюсти все эти меры предосторожности, то можно зарегистрировать сигнал при очень высокой скорости движения луча, вплоть до 3 см/нс (30000 км/с).

8.2 Самопишущие электромеханические преобразователи

Среди регистрирующих преобразователей, широко используемых в настоящее время в науке, технике, медицине и других сферах человеческой деятельности, большую группу составляют электромеханические. По своей структурной схеме они относятся к регистрирующим преобразователям прямого преобразования и применяются главным образом в виде самопишущих электроизмерительных приборов и светолучевых осциллографов.

Самопишущие преобразователи (СП) используются для записи медленно изменявшихся во времени электрических величин или процессов с частотами, не превышающими единиц герц. Однако применение различных корректирующих устройств позволяет значительно повысить быстродействие приборов и расширить их диапазон рабочих частот. Самопишущие преобразователи, предназначенные для записи электрических величин, изменяющихся с частотами, большими 1 Гц, относятся к быстродействующим самопишущим преобразователям (БСП). Современные БСП позволяют осуществлять запись электрических сигналов с частотами до 100 - 150 Гц. На более высоких частотах для записи применяются светолучевые осциллографы, электронно-лучевые осциллографы и магнитографы.

Обобщенная структурная схема электромеханических СП может быть представлена в виде, изображенном на рисунке 8.2. Входная электрическая величина $X_{ВХ}$ преобразуется с помощью измерительной цепи в величину $X_{ПР}$, не-

посредственно воздействующую на преобразователь, который, в свою очередь, преобразует ее в перемещение самописца регистрирующего устройства (РУ). Последний осуществляет запись измеряемой величины на носителе информации в функции времени или другой физической величины (в двухкоординатных СП).

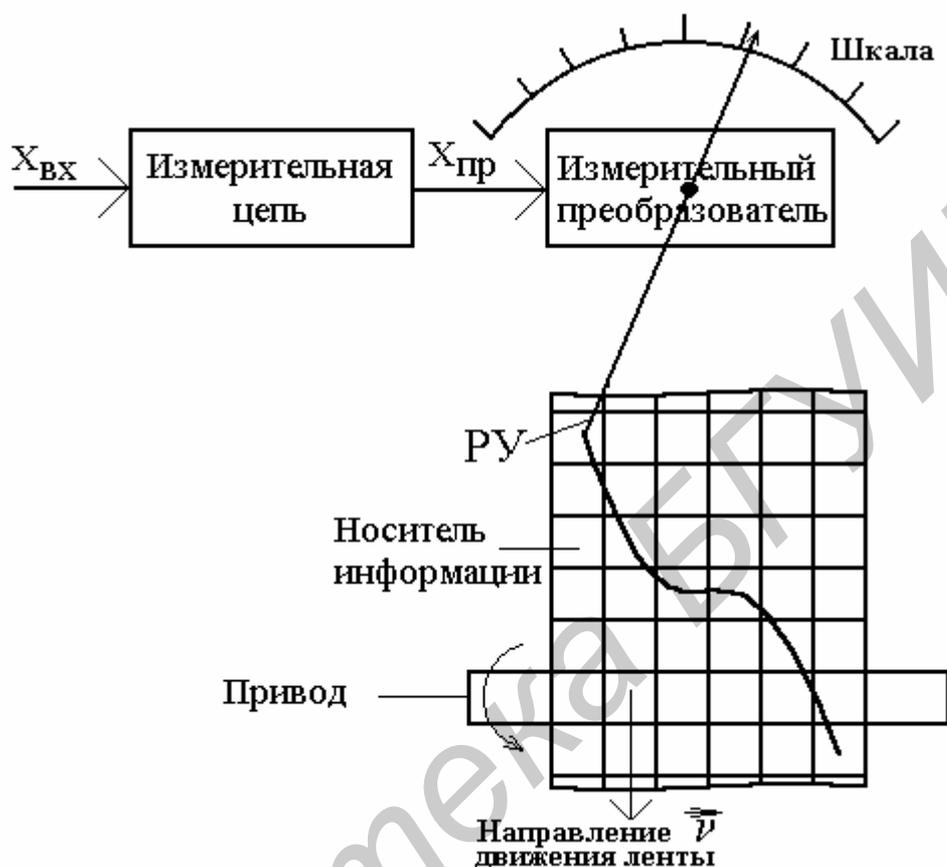


Рисунок 8.2 – Обобщенная структурная схема электромеханического самопишущего прибора

На координатной бумаге наносится координатная сетка в прямоугольных координатах (рисунок 8.3,а) - при прямолинейном перемещении самописца РУ или в криволинейных координатах (рисунок 8.3,б,в) - при угловом перемещении самописца РУ. Носителем информации в электромеханических преобразователях, как правило, является координатная бумага в виде диаграммной ленты (см. рисунок 8.3,а,б) или диска (см. рисунок 8.3,в).

Диаграммная бумага перемещается устройством перемещения со скоростью, которая устанавливается в зависимости от скорости изменения измеряемой величины. Диаграммные ленты, как правило, имеют для этой цели по краям отверстия (перфорацию), в которые входят зубцы или штифты барабана устройства перемещения. Дисковые диаграммы закрепляются на металлическом основании и вращаются вместе с ним. Бумажные диаграммные ленты выпускаются в виде рулонов или в виде пачек, в которых лента уложена "гармошкой", что создает дополнительные удобства в обращении с ними и упрощает лентопротяжный механизм.

Наиболее распространенным способом регистрации в СП является нанесе-

ние на носитель слоя красящего вещества (чернил или пасты) с помощью самописца регистрирующего устройства. Возможна также регистрация измерительной информации путем снятия вещества носителя и изменения состояния его вещества. Однако эти способы более сложны в их осуществлении и получили меньшее распространение.

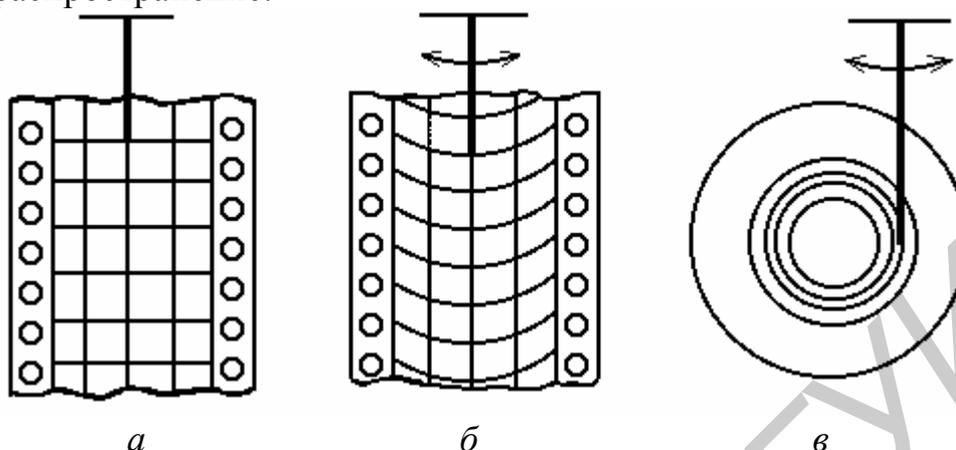


Рисунок 8.3 – Носители информации, используемые в электромеханических самопишущих преобразователях

В ряде случаев СП создаются на основе высокочувствительных ИП с небольшим вращающим моментом (магнитоэлектрические преобразователи). В этом случае механическая энергия перемещения подвижной части ИП оказывается недостаточной для перемещения по диаграммной бумаге самописца РУ, и регистрация осуществляется способом печатания цифр или букв на носителе информации. Схематическое устройство СП магнитоэлектрической системы с данным способом регистрации показано на рисунке 8.4.

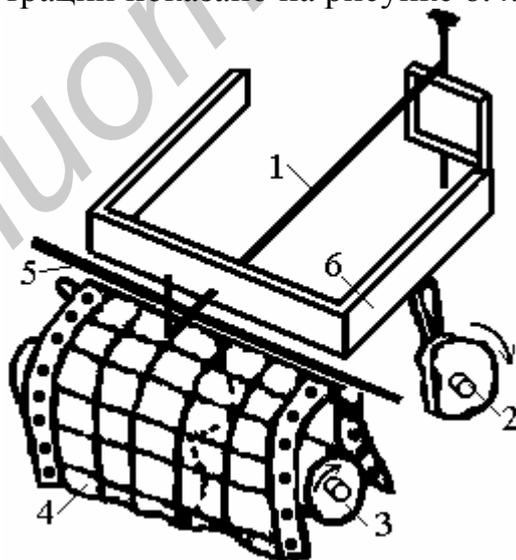


Рисунок 8.4 – Устройство СП магнитоэлектрической системы с регистрацией информации способом печатания

Стрелка 1, закрепленная на подвижной части преобразователя, перемещается над диаграммной лентой 4, перегнутой через опорный валик 3, и устанавливается в положение, соответствующее значению измеряемой величины, не

касаясь ленты. Прижимная дуга 6, поднимаемая кулачком 2, периодически опускается на стрелку, прижимая ее вместе с красящей лентой 5 к диаграммной ленте, на которой в месте пересечения стрелки с валиком появляется точка. При перемещении диаграммной ленты на ней появляется последовательность точек, образующая точечную диаграмму. При таком способе регистрации стрелка перемещается без трения о бумагу, и поэтому здесь возможно применение преобразователей с малым вращающим моментом для измерений в маломощных цепях. Кроме того, в данном случае возможно осуществление записи последовательно во времени нескольких величин, что повышает эффективность использования прибора. К недостаткам таких приборов следует отнести дискретность регистрируемой информации и усложнение их конструкции.

В устройствах перемещения носителя информации в СП используются, как правило, синхронные микродвигатели переменного тока.

Запись измерительной информации в современных СП осуществляется преимущественно в прямоугольных координатах, что обусловлено простотой обработки таких диаграмм с использованием специальных автоматических преобразователей графической информации в цифровой код. Для перехода от криволинейного в общем случае движения самописца РУ к записи в прямоугольных координатах используются специальные устройства для спрямления записи.

В настоящее время промышленностью выпускается достаточно большое количество различных электромеханических СП, используемых для преобразований в цепях как постоянного, так и переменного токов. Самопишущие амперметры, вольтметры и частотомеры, предназначенные для работы в цепях постоянного тока, создаются на базе магнитоэлектрических преобразователей. При измерениях на переменном токе широкое распространение получили самопишущие амперметры, вольтметры, ваттметры, фазометры и частотомеры на основе ферродинамических преобразователей.

Конструктивно электромеханические СП выполняются в виде щитовых (с классом точности 2,5) и переносных (с классом точности 1,5) приборов.

8.3 Электронная регистрация

У рассмотренных методов регистрации скорость записи сильно ограничена, поскольку для реализации каждого из них требуются движущиеся механические части. Часто, однако, бывает желательно зарегистрировать процесс, протекающий с высокой скоростью, для последующего изучения и анализа. Это можно сделать с помощью быстрой твердотельной памяти. Если из входного сигнала с очень высокой частотой берутся выборки и заносятся в полупроводниковую память, то позднее их можно будет считать оттуда со значительно меньшей скоростью и представить их для наблюдения с помощью, например, осциллографа или с использованием перьевого самописца. В результате мы получим реальное растяжение временной шкалы. Таким путем можно осуществить изменение временного масштаба в 10^9 раз (так что наносекунда становится секундой). Это эквивалентно тому, как если бы наблюдаемое явление происходило в 10^9 раз медленнее. Приборы, с помощью которых это можно сделать, называют устройствами для регистрации быстропротекающих процессов. Необ-

ходимо отметить, что хотя в стробоскопическом осциллографе также берутся выборки входного сигнала, с его помощью можно осуществлять индикацию только *периодических сигналов*, поскольку принцип его действия основан на взятии *когерентных выборок*. В осциллографе такого типа сигналы не запоминаются, а непосредственно индицируются на экране.

Принцип действия устройства для регистрации переходных (быстропротекающих) процессов поясняется на рисунке 8.5. Этот прибор иногда называют *оцифровывающим осциллографом*, в котором осуществляется *дискретизация*, хотя это название включает в себя уже упомянутый стробоскопический осциллограф. Существенной функцией устройства для регистрации переходных процессов является то, что с его помощью можно регистрировать как периодические, так и аperiodические (переходные) сигналы, которые можно выводить для наблюдения позднее со значительно меньшей скоростью и в периодическом режиме. Запись осуществляется путем дискретизации входного сигнала и сохранения выборочных значений в циклической памяти. Сигнал воспроизводится в аналоговом виде при использовании позднее.

Электронное устройство для регистрации переходных процессов работает следующим образом. Сначала из входного сигнала в расположенные на равном расстоянии друг от друга моменты времени берутся выборочные значения, которые с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) переводятся в форму цифровых данных. Эти данные записываются в циклическую полупроводниковую память. В отсутствие сигнала запуска этот процесс происходит непрерывно и новые данные постоянно записываются поверх старых. Памятью (длиной слова и числом сохраняемых слов) определяется разрешающая способность по амплитуде и длительность записи. По сигналу запуска сравнивающее устройство переводит счетчик в активный режим.

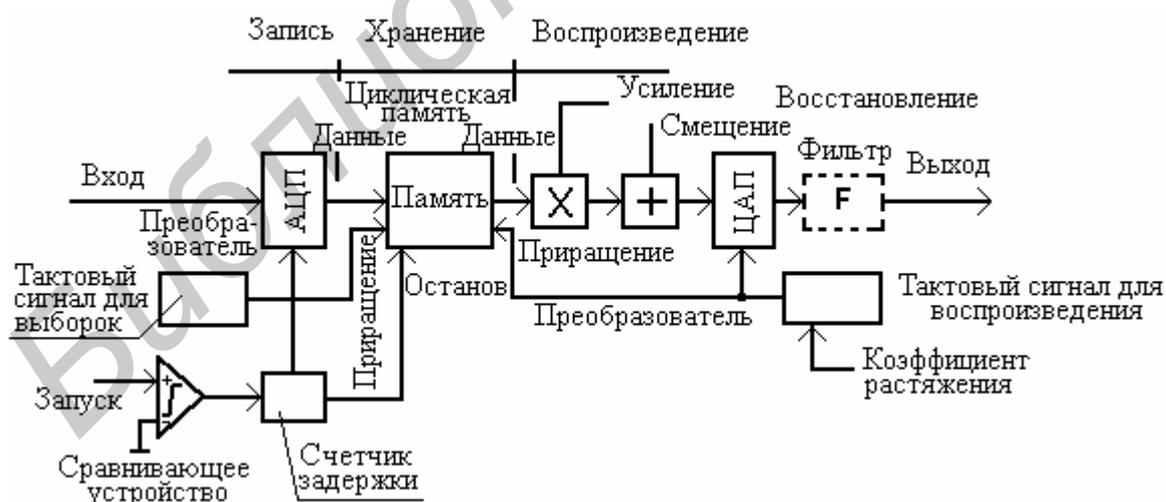


Рисунок 8.5 - Электронная запись с помощью устройства регистрации быстропротекающих (переходных) процессов

Этим счетчиком, в который извне заносится определенное начальное значение, определяется число выборок, которое будет занесено в полупроводнико-

вую память до того, как процесс циклического запоминания будет остановлен. Если, например, объем памяти составляет 4000 слов, а в счетчик задержки в качестве начального значения заносится число 2000, то к моменту, когда содержимое счетчика станет равным нулю, в памяти окажутся заполненными 2000 ячеек *до* момента действия сигнала запуска и 2000 ячеек *после* этого момента. Поскольку частота тактового сигнала, с которой берутся выборки, точно известна заранее, восстанавливаемый сигнал содержит информацию не только о значении, но также и о форме сигнала как функции времени. Если, например, частота тактового сигнала установлена равной 500 МГц, то мы сможем зарегистрировать сигнал в пределах интервала длительностью ± 4 мкс по обе стороны от момента запуска; выборки берутся каждые 2 нс. Процедура непрерывной записи поверх старых данных, прерываемая в момент времени, задержанный на определенную величину по отношению к моменту запуска, позволяет нам наблюдать события, происходившие перед тем, как произошел пуск.

После того как устройство для регистрации переходных процессов остановлено, сигнал в форме цифровых данных сразу же становится доступным для обработки на компьютере. Эти данные можно также вновь преобразовать в аналоговый сигнал, как показано на рисунке 8.5. Восстанавливаемый сигнал можно воспроизводить в любом (регулируемом) темпе, который определяется частотой генератора тактового сигнала для воспроизведения. Продолжая начатый пример, предположим, что восстановление сигнала происходит со скоростью 5 выборок в секунду; тогда 10 нс входного сигнала будут соответствовать 1 с выходного сигнала (коэффициент растяжения равен 10^8). В этом случае сигнал можно было бы изобразить на перьевом самописце, и это заняло бы в целом 13,3 мин. Если генератор тактового сигнала, используемого при воспроизведении, установлен в такой режим работы, при котором осуществляется сканирование только части памяти, можно реализовать "лупу времени" и наблюдать только самую интересную часть сигнала. При обратном преобразовании сигнала в аналоговое напряжение совсем легко изменить амплитуду сигнала (усилить его или ослабить) путем умножения в цифровом виде; можно также ввести смещение (добавляя двоичное число). Для того чтобы при аналоговом восстановлении получалась верная копия входного сигнала, необходимо сгладить скачкообразные приращения выходного сигнала цифроаналогового преобразователя (ЦАП), пропустив этот сигнал через фильтр нижних частот.

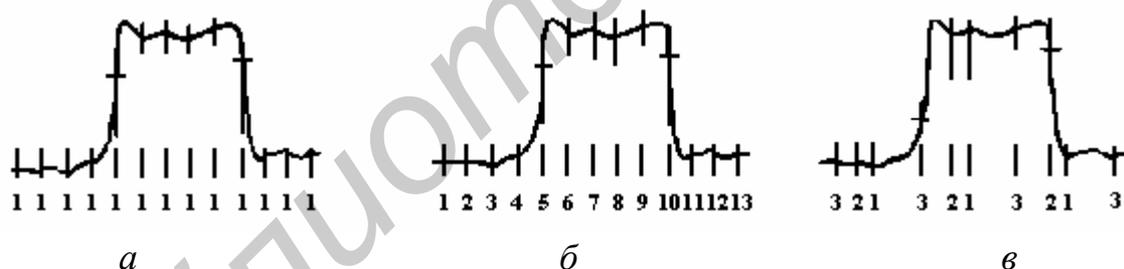
Для правильного восстановления частота (первичных) выборок должна по крайней мере вдвое превышать частоту наиболее высокочастотной составляющей входного сигнала. При скорости взятия выборок 500 МГц, как мы предположили в нашем примере, ширина спектра входного сигнала должна быть менее 250 МГц. На практике для уменьшения погрешности восстановления полосы частот, занимаемую входным сигналом, ограничивают шириной спектра 50 МГц.

Очевидно, что частотный диапазон устройства для регистрации переходных процессов определяется частотой, с которой берутся *первичные* выборки (темп извлечения из памяти *вторичных* выборок определяется частотой тактового генератора, используемого при восстановлении сигнала). Время, необхо-

димое для взятия каждой первичной выборки, зависит от быстродействия схемы фиксации выборок, процедуры преобразования и записи в память. Поэтому взамен непосредственного, эквидистантного взятия выборок изобретен ряд других способов (рисунок 8.6). На рисунке 8.6,*а* выборки из сигнала берутся быстро (в том темпе, в каком изменяется сам сигнал) при равных интервалах времени между выборками. Это как раз тот случай, который мы рассматривали до сих пор. Его называют взятием выборок «в реальном масштабе времени», и для него необходимы чрезвычайно быстрые схемы взятия выборок и АЦП.

На рисунке 8.6,*б* показано, что выборки из того же самого сигнала можно сделать поочередно, по принципу стробоскопа. Однако теперь сигнал должен *быть периодическим*. В первом периоде сигнала выборка берется в точке «1». В следующем периоде выборка берется в точке «2». (На самом деле схема взятия выборок может пропускать целое число периодов перед тем, как взять следующую выборку.) Ясно, что при таком способе преобразование и запись в память могут выполняться только тогда, когда это возможно, т.е. имеется достаточный запас по времени.

Трудность заключается в точности, с какой надо поддерживать временные соотношения между моментами взятия выборок и периодом входного сигнала. Если в результате пропускания периодов время между выборками растет, то становится все труднее соблюдать когерентность выборок по отношению к измеряемому сигналу. С другой стороны, чем меньше периодов входного сигнала заключено между соседними выборками, тем быстрее должны срабатывать соответствующие схемы.



- а* - эквидистантное взятие выборок в реальном времени;
б - последовательное когерентное взятие выборок (по принципу стробоскопа);
в - взятие выборок со случайным повторением

Рисунок 8.6 - Различные принципы взятия выборок преобразуемых сигналов

Следует заметить, что в двух последних случаях принципиально требуется, чтобы входной сигнал был периодическим.

На рисунке 8.6,*в* представлен гибридный способ взятия выборок, называемый дискретизацией со случайным повторением. В течение первого периода сигнала выборки берутся с крупным шагом в точках, помеченных цифрой "1", на равном расстоянии друг от друга. Во втором периоде (после того как пропущено несколько периодов) выборки берутся с тем же самым шагом между мо-

ментами взятия выборок. Однако эти моменты, помеченные цифрой "2", расположены совершенно случайно по отношению к моментам взятия выборок в первом периоде. В данном случае больше нет необходимости в когерентности выборок с входным сигналом. Необходимо только, чтобы удовлетворялись два требования: расстояние между выборками должно оставаться постоянным, а сигнал должен быть периодическим. Для того чтобы можно было восстановить входной сигнал, нужно просто измерить расстояние между моментом запуска и моментом времени, задаваемым тактовым сигналом, используемым при взятии выборок.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1 Приведите классификацию электромеханических преобразователей, обоснуйте их принцип действия.

2 Как в электромеханических измерительных преобразователях создается вращающий момент? Приведите его математическое выражение.

3 Как в электромеханических измерительных преобразователях создается противодействующий момент? Приведите его математическое выражение.

4 Как в электромеханических измерительных преобразователях создается момент успокоения? Приведите его математическое выражение. Какие типы успокоителей вы знаете?

5 Приведите обобщенное уравнение шкалы (функцию преобразования) электромеханических измерительных преобразователей.

6 Какие устройства используются в электромеханических преобразователях для определения значения преобразуемых величин? Какие общие детали и узлы используются в электромеханических преобразователях?

7 На чем основан принцип действия магнитоэлектрического измерительного преобразователя? Приведите его основные технические и метрологические характеристики. Как на его основе создаются амперметры, гальванометры и вольтметры?

8 В чем заключается различие магнитоэлектрических преобразователей с механическим и электрическим противодействующими моментами?

9 На чем основан принцип действия электродинамического измерительного механизма? Как на его основе создаются электродинамические амперметры, вольтметры, ваттметры и фазометры?

10 На чем основан принцип действия электромагнитного измерительного преобразователя? Как на его основе создаются электромагнитные амперметры и вольтметры? Приведите основные характеристики электромагнитных приборов.

11 Термоэлектрические и выпрямительные преобразователи в сочетании с магнитоэлектрическим преобразователем. За счет чего достигается расширение функциональных возможностей магнитоэлектрического преобразователя?

12 На чем основан принцип действия электростатического измерительного преобразователя? Как на его основе создаются электростатические приборы? Приведите их основные характеристики.

13 Как обеспечивается расширение пределов преобразования с помощью шунтов? Как рассчитать сопротивление шунта по известному внутреннему сопротивлению преобразователя?

14 Как обеспечивается расширение пределов преобразования с помощью добавочных резисторов? Как рассчитать сопротивление добавочного резистора по известному внутреннему сопротивлению преобразователя?

15 Как обеспечивается расширение пределов преобразования с помощью измерительных трансформаторов? Как рассчитать коэффициент преобразования измерительных трансформаторов тока и напряжения? Укажите основные отличия между трансформаторами тока и напряжения.

16 Что собой представляют электрооптические устройства индикации? Жидкокристаллический дисплей как преобразователь электрического сигнала в неэлектрическую величину.

17 Как устроена электронно-лучевая трубка? Как происходит формирование электронного луча и его отклонение?

18 Как на экране электронно-лучевой трубки формируется изображение преобразуемого сигнала? Какую роль в этом процессе играет люминофор?

19 Самопишущие электромеханические преобразователи. Обоснуйте их принцип действия.

20 Электронная регистрация сигналов измерительной информации. Обоснуйте принцип записи и воспроизведения сигналов измерительной информации.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Ревин В.Т. Преобразование и преобразователи измерительной информации: Учеб. пособие. Ч. 1. - Мн.: БГУИР, 2002. – 69 с.: ил.
- 2 Аш Ж. и др. Датчики измерительных систем: В 2 кн./Пер. с фр. – М.: Мир, 1992. – 480 с.: ил.
- 3 Елизаров А.С. Электрорадиоизмерения: Учебник для вузов. – Мн.: Выш. шк., 1986. – 320 с.: ил.
- 4 Измерение электрических и неэлектрических величин: Учеб. пособие для вузов/Под ред. Н.Н.Евтихиева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.: ил.
- 5 Касаткин А.С., Перекалин М.А., Сергеев П.С. Электротехника. М.: Гос. энергетическое изд-во, 1953. – 430 с.: ил.
- 6 Клаассен К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике. - М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.: ил.
- 7 Малышев В.М., Механников А.И. Гибкие измерительные системы в метрологии. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 176 с.: ил.
- 8 Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 535 с.: ил.
- 9 Метрология и радиоизмерения в телекоммуникационных системах: Учебник для вузов/В.И.Нефедов, В.И.Халкин, Е.В.Федорова и др.; Под ред. В.И.Нефедова. – М.: Высш. шк., 2001. – 383 с.: ил.
- 10 Основы метрологии и электрические измерения: Учебник для вузов/Под ред. Е.М.Душина. 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1987. – 480 с.: ил.
- 11 Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология: Учеб. пособие для вузов. – М.: Логос, 2001. – 408 с.: ил.
- 12 Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC: Пер. с англ./Под ред. У.Томпкинса, Дж.Уэбстера. – М.: Мир, 1992. – 259 с.: ил.
- 13 Цапенко М.П. Измерительные информационные системы. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 440 с.: ил.
- 14 Шпак И.И., Архипенко А.Г. Электрические измерения: Учеб. пособие. Ч. 3. – Мн.: МРТИ, 1983. – 123 с.: ил.
- 15 Электрические измерения: Учебник для вузов / Под ред. А.В.Фремке и Е.М.Душина. – Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1980. -392 с.: ил.

Учебное издание

Ревин Валерий Тихонович

**ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Учебное пособие
для студентов специальности 54 01 01
«Метрология, стандартизация и сертификация»
всех форм обучения

В 5-ти частях

Часть 4

Редактор Т.А. Лейко
Корректор Е.Н. Батурчик
Компьютерная верстка М.В. Шишло

Подписано в печать	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура "Таймс".	Печать ризографическая.	Усл. печ. л.
Уч.-изд. л. 5,1.	Тираж 100 экз.	Заказ 144.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Лицензия на осуществление издательской деятельности №02330/0056964 от 01.04.2004.
Лицензия на осуществление полиграфической деятельности №02330/0133108 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6