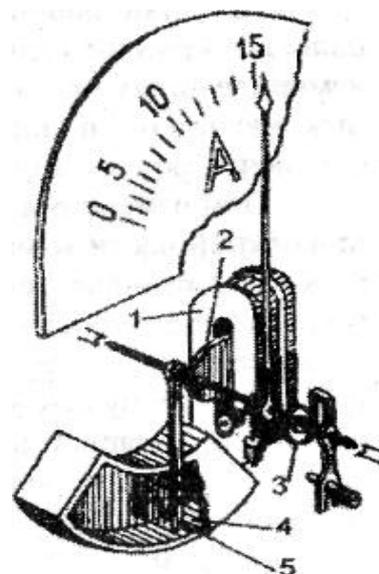
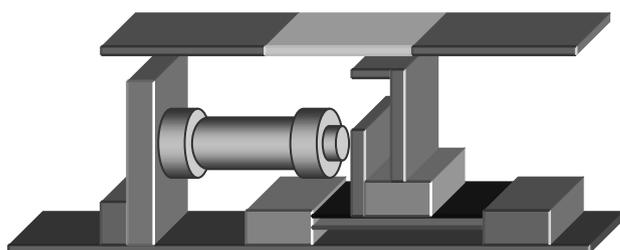


МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

О.А. Пустовая, Е.А. Пустовой, О.Ю. Ищенко

# ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Учебное пособие



Благовещенск  
Издательство ДальГАУ  
2013

УДК 621.317.3 (075.8)

Пустовая, О.А. Электроизмерительные приборы: учебное пособие / О.А. Пустовая, Е.А. Пустовой Е.А., О.Ю. Ищенко. – Благовещенск: ДальГАУ, 2013. – 123 с.

В пособии рассматриваются конструкции аналоговых измерительных приборов их классификация, так же рассматривается электронные измерительные приборы и мосты. В пособие включены задачи для самостоятельной подготовки и лабораторные работы.

Учебное пособие составлено в соответствии с программой дисциплины «Электрические измерения» для студентов и преподавателей инженерно-технических специальностей, для факультетов повышения квалификации, а также очного и заочного обучения для направлений 35.03.06.62 – Агроинженерия, 13.03.02.62 – Энергетика и электротехника.

Рецензенты – Т.Н. Мармус, канд.с.-х. наук, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники

Рекомендовано к печати методическим советом электроэнергетического факультета Дальневосточного государственного аграрного университета (Протокол №4 от 23 декабря 2013 года).

Издательство ДальГАУ

2014

## Введение

При подробном рассмотрении окружающей действительности неизбежно приходишь к выводу, что ни один из происходящих процессов не обходится без измерения. Это относится не только к технике как таковой, но и к другим аспектам современного развития общества.

Страсть человека к различным измерениям принимает порой абсурдные формы. Измеряется все - количество разводов супружеских пар (счетный контроль), количество выпущенных автомобилей, средняя длина носа человеческих особей, количество произведенного тепла (измерительный контроль) и т.д. Порой эти измерения обоснованны, а порой являются забавой для серьезной науки.

Однако для того, что бы правильно разобраться в вопросе «Что такое измерение для энергетической отрасли?» необходимо изучить большое количество специальных терминов, понять их, а главное осмыслить, только при таких условиях возможно свободное владение метрологическим знанием, а в частности измерительной техникой.

## 1 ОБЩИЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В соответствии с межгосударственным стандартом «Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним» ГОСТ 30012.1-2002 (МЭК 60051-1-97) при работе с аналоговыми измерительными приборами приняты следующие термины и определения.

**Электроизмерительный прибор** – прибор, предназначенный для измерения электрической или неэлектрической величины электрическими средствами.

**Показывающий прибор** – измерительный прибор, снабженный устройством для визуального отсчитывания значений измеряемой величины в любое время без регистрации значения этой величины.

**Электронный измерительный прибор** - прибор, предназначенный для измерения электрической или неэлектрической величины электронными средствами.

**Прибор с магнитным экраном** – прибор, защищенный экраном из ферромагнитного материала от влияния внешнего магнитного поля.

**Астатический прибор** - прибор, в котором измерительный механизм выполнен таким образом, что бы не подвергаться воздействию внешнего однородного магнитного поля.

**Прибор с электрическим экраном** - прибор, защищенный экраном из проводящего материала от влияния внешнего электрического поля.

**Класс точности измерительного прибора** – обобщенная характеристика средства измерений, определяемая пределами допускаемых основной и дополнительной погрешностей, а так же другими характеристиками средства измерения, влияющими на точность.

**Калиброванный провод прибора** – провод, сопротивление которого имеет установленное значение.

**Измеритель отношения** - прибор, предназначенный для измерения отношения двух величин.

**Прибор среднеквадратических значений** – прибор, который в заданном частотном диапазоне дает показание, пропорциональное среднеквадратическому значению измеряемой величины, даже если она несинусоидальная или имеет постоянную составляющую.

**Измерительная цепь** – часть электрической цепи, которая является внутренней для прибора и его вспомогательных частей вместе с соединительными проводами, если они имеются, возбуждаемая напряжением или током, причем одна или обе эти величины являются основным фактором при определении показаний измеряемой величины.

**Измерительный механизм** – совокупность тех частей измерительного прибора, на которые воздействует измеряемая величина, в результате чего происходит перемещение подвижной части, соответствующее значению этой величины.

**Отсчетное устройство** – часть измерительного прибора, которая показывает значение измеряемой величины.

**Указатель** – средство, которое вместе со шкалой показывает положение подвижной части прибора.

**Шкала** – совокупность отметок и чисел, по которым, используя указатель, определяют значение измеряемой величины.

**Механический нуль** – положение равновесия, которое займет указатель, когда измерительный элемент обесточен. Это положение может совпадать или не совпадать с нулевой отметкой шкалы.

**Электрический нуль** – положение равновесия, которое займет указатель, когда измеряемая электрическая величина имеет нулевое или заданное значение, а цепь управления (если она имеется), создающая противодействующий момент, находится под напряжением.

**Остаточное отклонение** – часть отклонения механически управляемой подвижной части, которая остается после того, как устранена причина, вызывающая отклонение, а все измерительные цепи обесточены.

**Время успокоения** – время от первого достигнутого показания до установившегося в центре зоны окончательного показания при скачкообразном изменении измеряемой величины от нуля (обесточенное состояние) до такого значения, когда окончательно установившееся показание составит определенную пропорциональную часть от длины шкалы.

**Нормальные условия** – соответствующая совокупность установленных значений и установленных областей значений влияющих величин, при которых нормируются допускаемые погрешности прибора и (или) вспомогательной части.

Влияющая величина	Нормальные условия, если не установлено другое	Допускаемое отклонение нормального значения при испытаниях	
		Для класса точности менее 0,5	Для класса точности 0,5 и более
Температура окружающего воздуха, °С	23	±1	±2
Относительная влажность, %	от 40 до 60	-	-
Пульсация измеряемой величины постоянного тока	0	1%	3%
Частота измеряемой величины переменного тока, за исключением ваттметров, варметров, частотомеров и измерителей коэффициента мощности	от 45 до 65 Гц	±2 нормального значения	
Внешнее магнитное поле	Полное отсутствие	40 А/м на частотах постоянного тока до 65 Гц в любом направлении	

## 2 АНАЛОГОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

## 2.1 КЛАССИФИКАЦИЯ АНАЛОГОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Наибольшее распространение в настоящее время получили аналоговые измерительные приборы. Простота конструкции, большой температурный диапазон, ремонтпригодность делают их использование в ряде отраслей незаменимым. Условно разделить электроизмерительные приборы можно на две большие подгруппы: электромеханические и электротермические (рис.2.1).



Рисунок 2.1 – Классификация аналоговых измерительных приборов

Аналоговые приборы можно классифицировать по нескольким признакам.

1. по точности измерений подразделяются на образцовые классы точности и рабочие.
2. по исполнению в зависимости от условий эксплуатации
3. по механическим воздействиям

4. по принципу действия
5. по степени защиты от внешних магнитных и электрических влияний
6. по измеряемой величине
7. по роду тока
8. по конструкции отсчетного устройства
9. по типу шкалы
10. по способу создания противодействующего момента

Большинство классифицируемых признаков выносятся на лицевую панель прибора в виде условных обозначений.

#### По точности измерений

Классы точности	Приборы	Вспомогательные части
Образцовые	0,05; 0,1; 0,2; 0,5	0,02; 0,05; 0,1;
Рабочие	1,0; 1,5; 2,5; 4,0	0,2; 0,5; 1,0

#### По исполнению в зависимости от условий эксплуатации

Параметры окружающего воздуха	А	Б	В		
	Закрытые сухие и отапливаемые помещения	Закрытые неотапливаемые помещения	Работа в полевых или морских условиях и в передвижных установках		
			В <sub>1</sub>	В <sub>2</sub>	В <sub>3</sub>
температура	от -10 <sup>0</sup> С до +35 <sup>0</sup> С	от -30 <sup>0</sup> С до +40 <sup>0</sup> С	от -40 <sup>0</sup> С до +50 <sup>0</sup> С	от -50 <sup>0</sup> С до +60 <sup>0</sup> С	от -50 <sup>0</sup> С до +80 <sup>0</sup> С
Относительная влажность	80% (+30 <sup>0</sup> С)	90% (+30 <sup>0</sup> С)	95% (+35 <sup>0</sup> С)		98% (+40 <sup>0</sup> С)

#### По механическим воздействиям

Наименование	Обозначение на лицевой панели
Обыкновенные	-----
Обыкновенные с повышенной прочностью	ОП
Устойчивые к механическим воздействиям	ТП - тряскопрочные
	ТН – тряскоустойчивые
	УП - ударопрочные
	ВП - вибропрочные
	ВН– вибрационноустойчивые

По степени защиты от внешних электрических и магнитных полей

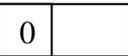
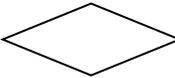
Категория 1	<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px;">1</div> от магнитных полей <div style="border: 1px dashed black; display: inline-block; padding: 2px;">1</div> от электрических полей
Категория 2	-----

Допустимое изменение показаний под действием внешних полей

Класс точности	Допускаемое измерение показаний прибора, %			
	При воздействии внешнего магнитного или электрического поля		При воздействии ферромагнитного или рядом расположенного прибора	
	Категория 1	Категория 2	Категория 1	Категория 2
0,05; 0,1; 0,2; 0,5	±0,5	±1,0	±0,25	±0,5
1,0; 1,5	±1,0	±2,5	±0,5	±1,0
2,5; 4,0	±2,5	±5,0	±0,5	±1,0

По принципу действия

Принцип действия	Условное обозначение
Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой	
Магнитоэлектрический логометр с подвижной рамкой	
Магнитоэлектрический прибор с подвижным магнитом	
Электромагнитный прибор	
Электромагнитный логометр	
Электродинамический прибор	
Ферродинамический прибор	
Индукционный прибор	

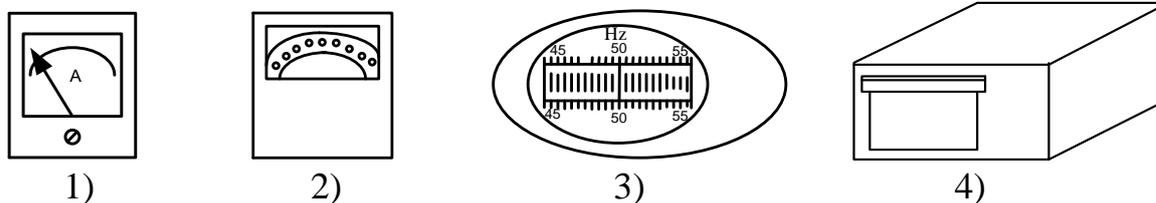
Электростатический прибор	
Вибрационный прибор (язычковый)	
Теловой прибор	
Прибор с цифровым отсчетом	
Счетчик импульсов	
Астатический прибор	ast
Общая вспомогательная часть	

Кроме перечисленных существуют и другие конструкции измерительных механизмов аналоговых приборов.

#### По роду измеряемого тока

Род тока	Условное обозначение
Постоянный ток	
Переменный ток (однофазный)	
Постоянный и переменный	
Трехфазный ток	
Трехфазный при неравномерной нагрузке	
Обозначение для трехфазных приборов	
Приборы с одноэлементным механизмом	
Приборы с двух элементным механизмом	
Приборы с трехэлементным механизмом	

## По конструкции отсчетного устройства



- 1) Приборы с механическим указателем (стрелочные)
- 2) Приборы со световым указателем
- 3) Приборы язычковые
- 4) Приборы самопишущие

Кроме этого на лицевую панель аналоговых измерительных приборов выносятся следующие обозначения.

### Рабочее положение шкалы

	горизонтальное
	вертикальное
	наклонное

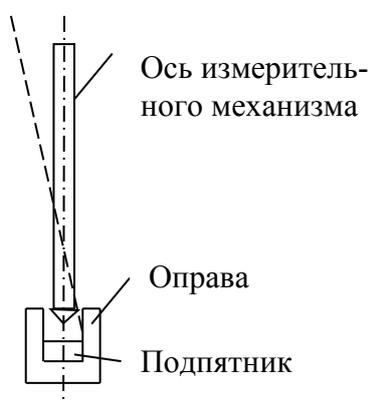


Рисунок 2.2 – Конструкция опоры

Отклонение от оговоренного положения приводит к возникновению дополнительной погрешности обусловленной конструкцией измерительного механизма (рис 2.2). В нормальном положении действие силы тяжести совпадает с осью вращения измерительного механизма, и она опирается на подпятник, изготовленный из прочного материала (агат, рубин, сапфиры др.). Трение в этом случае практически равно нулю.

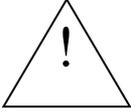
При отклонении измерительного механизма от нормального положения ось

смещается и воздействует уже на стенки оправы, имеющие большой коэффициент трения на преодоление, которого затрачивается энергия, что приводит к потере точности.

#### Обозначение зажимов

Наименование	Обозначение
положительный	+
отрицательный	-
общий или генераторный	*
(экран) соединение с экраном	Э
соединение с корпусом	
заземление	

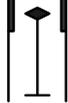
#### Обозначение испытательного воздействия на изоляцию прибора

Наименование	Обозначение
измерительная цепь испытана напряжением 2 кВ	
изоляция испытанию прочности не подлежит	
ОСТОРОЖНО прочность изоляции на соответствует норме	
Включая, смотрите указания в эксплуатационной документации	

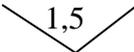
#### Защищенность от влияния внешней среды

Наименование	Обозначение
Брызгозащищенный	Бз
Водозащищенный	Вз
Герметичный	Гм
Газозащищенный	Гз
Пылезащищенный	Пз
Взрывобезопасный	Вб

### Вид преобразователя

Наименование	Обозначение
Термопреобразователь изолированный	
Термопреобразователь неизолированный	
Выпрямитель полупроводниковый	
Выпрямитель электромеханический	
Электронный преобразователь	
Преобразователь вибрационно-импульсный	

### Класс точности измерительного прибора

Наименование	Обозначение
Класс точности в % от интервала	1,5
Класс точности в % от длины шкалы	
Класс точности в % от данного показания	
Класс точности для цифровых приборов	

### Наличие трансформатора

Наименование	Обозначение
Трансформатор тока	ТТ $\frac{600}{5}$ , $\frac{100}{2,5}$
Трансформатор напряжения	ТН $\frac{10000}{100}$ , $\frac{220000}{100}$

Все обозначения наносятся на лицевую панель аналогового прибора и позволяют оперативно получить необходимую информацию.

## Лабораторная работа №1

### Аналоговые измерительные приборы

**Цель:** Изучить условные обозначения на лицевой панели аналоговых приборов. Определить пригодность прибора к эксплуатации в условиях соответствующих варианту задания.

**Приборы:** Лицевые панели измерительных приборов.

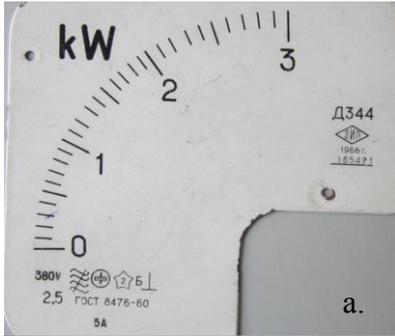
#### Ход работы

1. В соответствии с заданием преподавателя (варианты лицевых панелей приведены на рисунке 2.3), заполните протокол обследования лицевой панели прибора.
2. Сделайте заключение о пригодности исследуемого прибора к условиям заданным в соответствии с вариантом (табл. 2.3).

Таблица 2.1 – Условия эксплуатации измерительных приборов

№ вар	Рисунок	Напряжение, В	Сила тока, А	Номинальная частота, Гц	Класс точности	Коэффициент трансформации	Климатическое исполнение	Род тока
1	2.2 а	220	10	50	1,5		А	Постоянный
2	2.2 б	220		100	2,5		Б	Переменный
3	2.2 г	3		50-100	0,5		В	Постоянный
4	2.2 и		400	100	4,0	500/5	А	Переменный
5	2.2.с	250		50	2,5		Б	Постоянный
6	2.2. д	3		100	1,0		В	Переменный
7	2.2 ж	220	5	50-100	4,0		А	Переменный
8	2.2 р	220		50	2,5		Б	Переменный
9	2.2 т		20	50	1,0	20/5	В	Постоянный
10	2.2 е		200	50	0,5	200/5	Б	Переменный

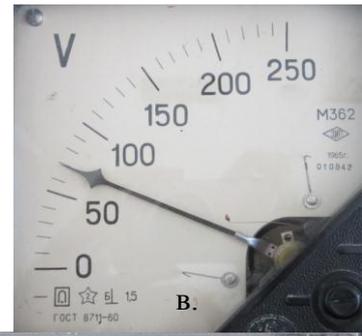




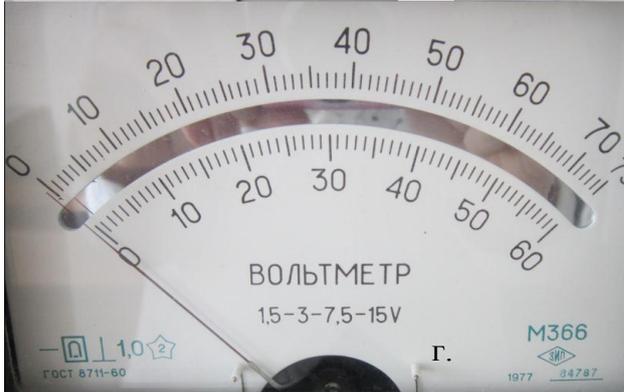
а.



б.



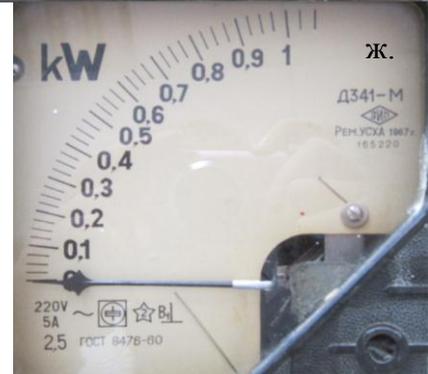
в.



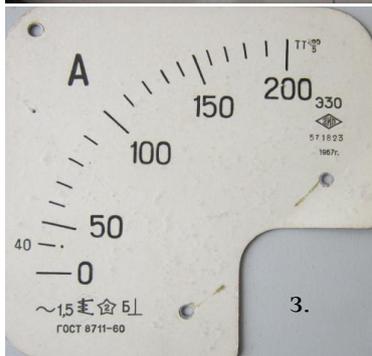
г.



е.



ж.



з.



и.



к.



л.

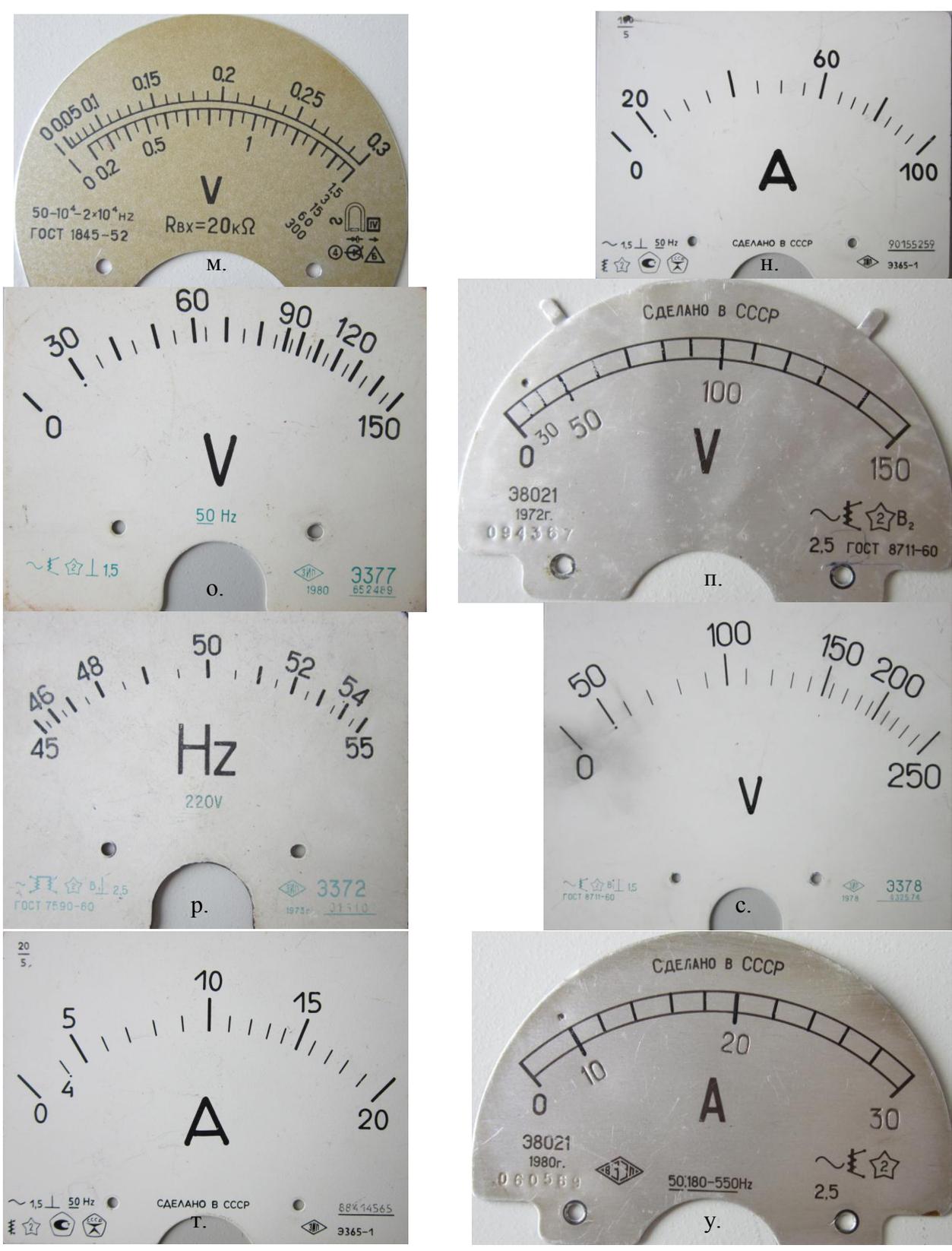


Рисунок 2.3 - Лицевые панели аналоговых измерительных приборов





## 2.2 КОНСТРУКЦИЯ АНАЛОГОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

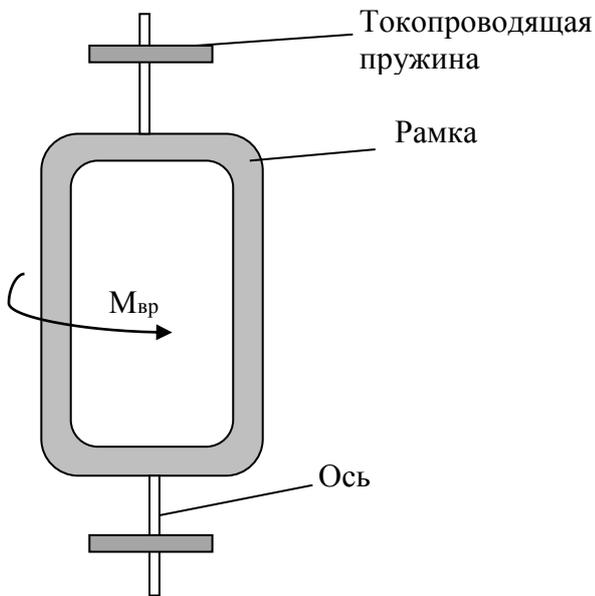


Рисунок 2.4 – Подвижная рамка

Основу конструкции аналоговых приборов составляет измерительный механизм. Принцип его построения идентичен у магнитоэлектрических, электромагнитных, электродинамических и ферродинамических приборов.

При прохождении тока через токопроводящие пружины и рамку (рис.2.4) вокруг нее формируется магнитное поле создающее усилие, которое, преодолевая момент инерции,

поворачивает рамку. Сила в данном случае зависит в основном от тока, протекающего по ней.

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \omega, \quad (1)$$

где  $B$  – магнитная индукция в воздушном зазоре измерительного механизма, Тл.

Возникает момент вращения  $M_{вр}$ , который стремится повернуть рамку относительно оси. Этот момент пропорционален силе тока  $I$  и геометрическим размерам рамки.

$$M_{вр} = B \cdot \omega_0 \cdot I_0 \cdot S, \quad (2)$$

где  $\omega_0$  - количество витков рамки;

$I_0$  – ток измерительного механизма;

$S$  – активная площадь рамки, м<sup>2</sup>.

Подвижная часть может быть выполнена тремя способами:

1. Рамка размещается на кернях с опорой на подпятниках представляющих собой конструкцию, обеспечивающую снижение момента трения на опорах. Простейшая конструкция рамки на опорах представлена на рисунке 2.5.а.
2. Рамка размещается на растяжках, выполненных из бронзовой ленты. (рис.2.5.б)
3. Рамка размещается на подвесе. Одна из сторон закреплена при помощи металлической нити. (Рис.2.5.в)

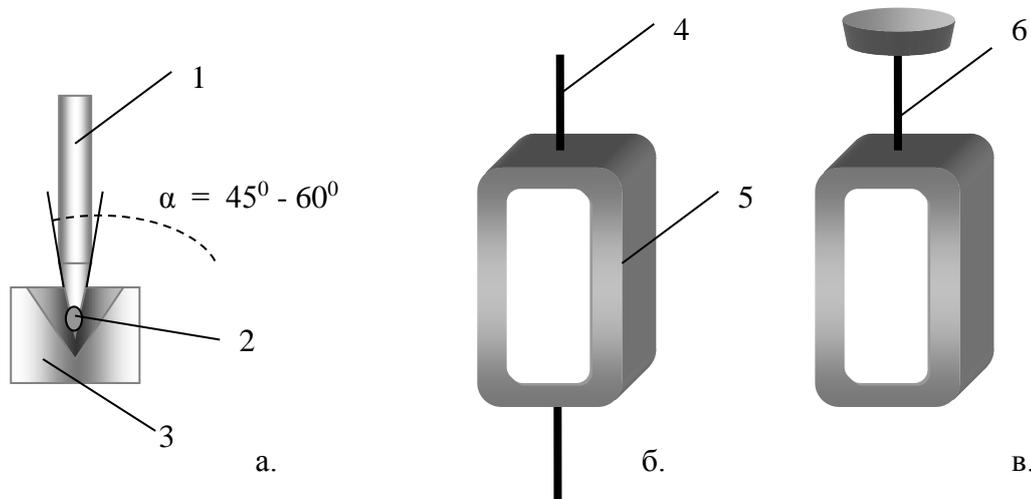


Рисунок 2.5 – Конструктивное исполнение подвижной части аналоговых приборов  
 1- керн, 2 – подпятник (агат, корунд, рубин), 3 – оправа, 4 – бронзовая лента (растяжка), 5 – рамка, 6 – металлическая нить.

Для достижения установившегося состояния необходимо создать противодействующий момент, который уравнивает момент вращающий. Он создается токопроводящими пружинами и зависит от их свойств.

$$M_{\text{пр}} = W_{\text{пр}} \cdot \alpha, \quad (3)$$

где  $W_{\text{пр}}$  – удельный противодействующий момент, Н·м;

$\alpha$  - угол отклонения рамки, рад, град, см.

Величина удельного противодействующего момента зависит от материала пружин.

$$W_{\text{пр}} = 1,57 \cdot 10^5 \cdot \varepsilon \cdot \frac{b \cdot h^2}{12 \cdot l}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  - модуль упругости материала пружины;

$b$  – ширина развернутой ленты пружины;

$h$  – толщина пружины;

$l$  – длина пружины.

Так как стрелка под действием вращающего и противодействующего момента будет совершать колебательные движения необходимо создать момент успокоения, который будет стабилизировать ее положение. Функцией успокоителя является создание момента, действующего на подвижную часть только тогда, когда она движется.

$$M_{\text{усп}} = \frac{\Phi}{R} \cdot \frac{d\alpha}{dt} = P \cdot \frac{d\alpha}{dt}; \quad (5)$$

где  $\Phi$  – магнитный поток;

$R$  – сопротивления индуктивным токам;

$\frac{d\alpha}{dt}$  - изменение положения стрелки с течением времени;

$P$  – коэффициент успокоения.

Момент успокоения создается успокоителями, которые по принципу создания демпфирующего момента можно разделить на три группы:

Воздушные – момент создается за счет трения подвижного сегмента о воздух. Конструкция обрабатывается только экспериментальным путем.

Жидкостные – подвижный сегмент помещен в камеру содержащую жидкость (глицерин), трение создается при перемещении сегмента в жидкости.

Магнитоиндукционный - подвижный сегмент перемещается над пластиной, в которой установлены магниты с переменной полярностью. Успокоение создается за счет создания в сегменте токов Фуко. Момент, создаваемый таким успокоителем наиболее благоприятен, так как пропорционален скорости движения подвижной части.

Подвижный сегмент выполняется из немагнитного материала.

## 2.3 ПРИБОРЫ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

### Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой

В приборах магнитоэлектрической конструкции (рис.2.6) вращающий момент создается за счет взаимодействия магнитного поля постоянного магнита и электромагнита.

Через токопроводящие пружины 3 на рамку 6 подается электрически ток, который формирует вокруг нее магнитное поле. Рамка так же нахо-

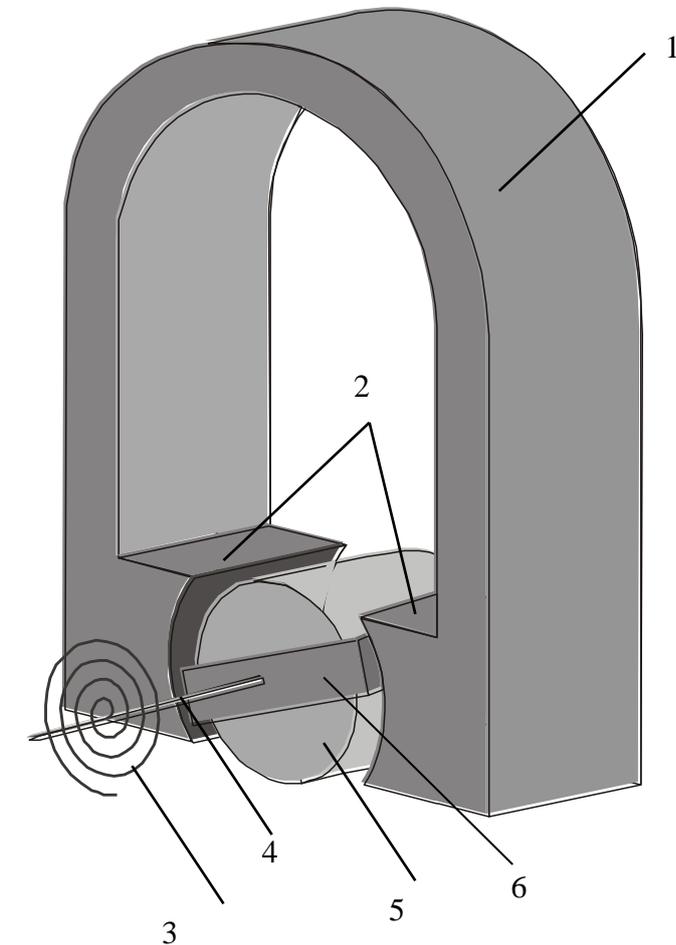


Рисунок 2.6 – Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой

1 – магнитопровод, 2 – полюсные наконечники, 3 – пружина, 4 – ось, 5 – стальной цилиндр, 6 – рамка

дится в магнитном поле постоянного магнита состоящего из полюсных наконечников 2 и магнитопровода 1, который замыкает магнитное поле на себя, что позволяет обеспечить отсутствие магнитного потока рассеяния (потерь).

Магнитные поля постоянного и электромагнита взаимодействуют, и создается вращающий момент. Рамка поворачивается до тех пор, пока не займет установившееся положение, которое обеспечивается так же пружинами 3, создающими противодействующий момент. Кроме установки на опорах,

рамка может быть установлена на растяжках или подвесе, которые так же обеспечивают создание противодействующего момента.

Конструктивно измерительный механизм может быть выполнен двумя способами:

1. Каркасная рамка – состоит из каркаса, выполненного из различных сплавов алюминия и проволоки (диаметр от 0,03 до 0,15 мм). Устанавливается рамка на подпятник в оправе.
2. Бескаркасная рамка – выполняется из проволоки, которая прессуется в виде рамки и заливается лаком.

Однако необходимо учитывать, что для магнитоэлектрических приборов рамка так же является успокоителем и не может быть изготовлена из металлов. При пересечении магнитного поля в алюминиевом каркасе наводятся токи Фуко, которые взаимодействуют с магнитным потоком. На это взаимодействие расходуется некоторая часть энергии, и движение замедляется, создается момент успокоения.

Угол поворота рамки кроме зависимости от измеряемой величины, так же зависит от формы зазора между полюсными наконечниками 2 и сердечником 5. Для магнитоэлектрической системы зазор считается равномерным, следовательно, рамка находится в равномерном магнитном поле и угол отклонения стрелки прямо пропорционален измеряемому току.

$$\alpha = \frac{B \cdot S \cdot \omega_0}{W_{\text{пр}}} \cdot I_0, \quad (6)$$

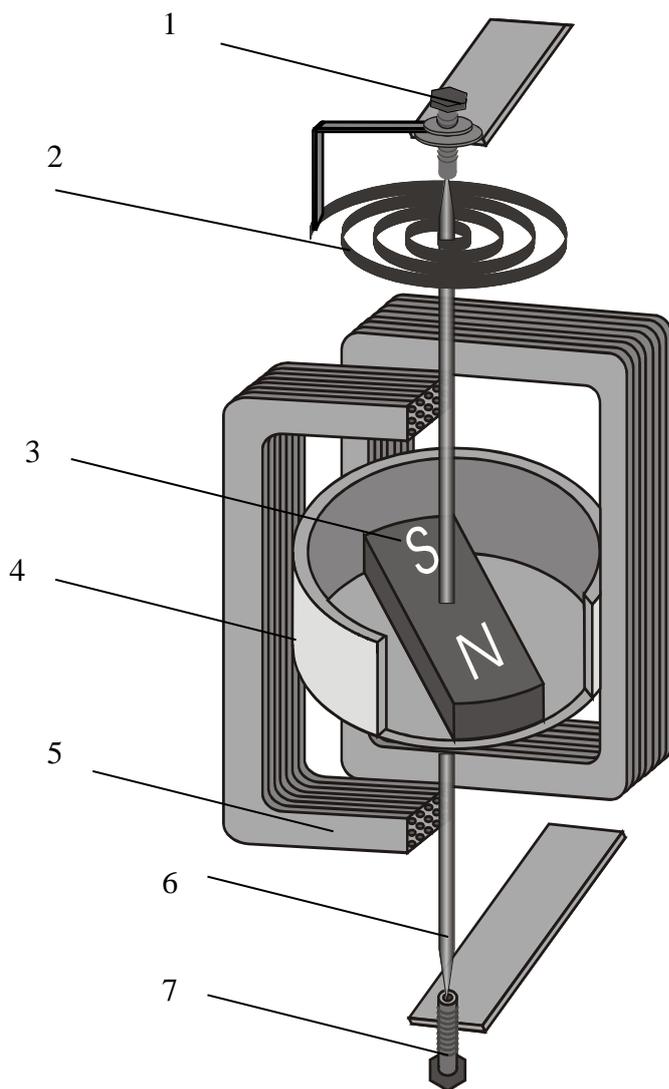


Рисунок 2.7 – Магнитоэлектрический прибор с подвижным магнитом

Шкала в этом случае равномерная, за исключением первых 10-15% где она является неравномерной. Эта часть шкалы отмечается точкой арретирования.

Величина магнитной индукции в воздушном зазоре увеличивается до 0,2-0,3 Тл при использовании сплавов типа альни, альноко, магнитоко. Однако при большом увеличении магнитного поля теряется чувствительность рамки к измеряемой величине.

Чувствительность таких приборов варьируется в зависимости от рода измеряемой величины. Для амперметров рассматривается чувстви-

тельность по току.

$$S_I = \frac{B \cdot S \cdot \omega}{W_{\text{пр}}} = \frac{\alpha}{I}, \quad (7)$$

Для вольтметров

$$S_U = \frac{\alpha}{U} = \frac{S}{r}; \quad (8)$$

где  $r$  - сопротивление катушки механизма.

## **Магнитоэлектрический прибор с подвижным магнитом (рис.2.7)**

Принцип действия приборов с подвижным магнитом аналогичен рассмотренному выше, за исключением того, что постоянный магнит жестко связан с осью, а рамка неподвижна (рис.2.7).

Измеряемая величина подается на катушки 5 и создает магнитное поле, которое взаимодействует с полем постоянного магнита 3. В результате взаимодействия создается вращающий момент. Так как постоянный магнит жестко закреплен на оси 6, установленной в оправе 7 и связан с пружиной 2, то при повороте магнита создается противодействующий момент.

В качестве успокоителя используется стакан 4 выполненный из немагнитного материала, принцип действия аналогичен каркасной рамке.

Приборы магнитоэлектрической конструкции используются в качестве амперметров, вольтметров при измерениях постоянного тока и напряжения, а при дополнении их преобразователями могут использоваться для измерения переменного тока и неэлектрических величин. Так же конструктивно могут оформляться в виде логометров и гальванометров.

Для расширения пределов измерения используются добавочные сопротивления и шунты.

Достоинства: высокая чувствительность, малое потребление энергии на собственные нужды, малые габариты, низкая стоимость.

Недостатки: сложность конструкции, невысокая перегрузочная способность, без преобразователей могут измерять только постоянный ток.

### **Задачи для самостоятельного решения**

#### **Пример**

Определите удельный противодействующий момент механизма магнитоэлектрического гальванометра и его постоянную по току, если его рамка состоящая из 85 витков расположена в радиальном магнитном поле индукция

которого 0,071 Тл и при токе  $1,8 \cdot 10^{-6}$  А повернулась на  $10^0$ . Активная площадь рамки составила 1,34 см<sup>2</sup>.

### Решение

Вращающий момент составит

$$M_{BP} = 0,071 \cdot 85 \cdot 1,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1,34 \cdot 10^{-4} = 14,6 \cdot 10^{-10} \text{ А/град}$$

Так как системе СИ соответствует единица измерения плоского угла радиан, то произведем перевод заданного угла поворота.

$$\alpha = \frac{\alpha^0 \cdot \pi}{180} = \frac{100^0 \cdot 3,14}{180} = 0,174$$

Удельный противодействующий момент

$$W_{PP} = \frac{14,6 \cdot 10^{-10}}{0,174} = 8,3 \cdot 10^{-9} \text{ (Н·м)/рад}$$

Чувствительность по току

$$S_I = \frac{0,174}{1,8 \cdot 10^{-6}} = 96666 \text{ рад/А}$$

Постоянная по току

$$C_I = \frac{1}{96666} = 1,034 \cdot 10^{-5} \text{ А/рад}$$

**Задача 1.** Механизм магнитоэлектрического измерительного прибора характеризуется следующими параметрами: магнитная индукция 0,155 Тл, активная площадь рамки 1,66 см<sup>2</sup>, число витков 13,5, удельный противодействующий момент  $78 \cdot 10^{-7}$  (Н·м)/рад, угол поворота подвижной части  $15^0$ , длина шкалы 76 мм. Определите ток измерительного механизма прибора, его чувствительность, по току используя в качестве единиц измерения град., рад., дел., при условии, что общее количество делений шкалы 32.

**Задача 2.** Определите постоянную по напряжению для механизма магнитоэлектрического гальванометра включенного в мост если постоянная по току составляет  $7,5 \cdot 10^{-7}$  А/дел, сопротивление гальванометра 4000 Ом, сопротивление внешнее критическое 60000 Ом.

**Задача 3.** Имеется механизм со следующими параметрами: величина магнитной индукции 0,232 Тл, ток измерительного механизма  $0,094 \cdot 10^{-6}$  А, количество витков в рамке 1200,5, сопротивление одного метра медного провода диаметром 0,02 мм 55,8 Ом/м, сопротивление растяжек 24,5 Ом, активная площадь рамки  $\text{см}^2$ , длина рамки 60 мм. Определите момент вращающий измерительного механизма, собственное потребление мощности механизма до и после установки добавочного сопротивления для расширения предела измерения милливольтметра до 5 мВ.

**Задача 4.** Определите удельный противодействующий момент механизма магнитоэлектрического гальванометра и его постоянную по току если его рамка состоит из 85 витков, магнитная индукция равна 0,071 Тл, ток измерительного механизма подвижной части  $1,8 \cdot 10^{-6}$  А, угол поворота подвижной части  $10^0$ , активная площадь рамки  $1,34 \text{ см}^2$ .

**Задача 5.** Механизм магнитоэлектрического прибора отклонился на угол  $12^0$  при следующих параметрах измерительной цепи: удельный противодействующий момент  $34 \cdot 10^{-7}$  (Н·м)/рад, величина магнитной индукции 0,025 Тл, активная площадь рамки  $0,98 \text{ см}^2$ , количество витков в рамке 65,5. Определите чувствительность прибора и его постоянную по току, а так же его показания если предел измерения 5 А, угол шкалы  $90^0$ . Шкала равномерная и имеет нулевое значение.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### ПОВЕРКА ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

**Цель работы:**

1. Изучить конструкцию электроизмерительных приборов магнитоэлектрической системы.
2. Освоить методы и способы поверки данных электроизмерительных приборов.

# ПРОГРАММА ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

## ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Магнитоэлектрический вольтметр рабочего класса точности, магнитоэлектрический вольтметр образцового класса точности, секундомер, источник сильного магнитного поля (катушка индуктивности), ЛАТР.

## ХОД РАБОТЫ

Заполните паспортные данные приборов используемых в опыте.

Серийные данные образцового прибора

Тип прибора \_\_\_\_\_, Серийный номер \_\_\_\_\_

Класс точности \_\_\_\_\_, Диапазон измерений \_\_\_\_\_,

Система прибора \_\_\_\_\_, Год выпуска \_\_\_\_\_.

Серийные данные поверяемого прибора

Тип прибора \_\_\_\_\_, Серийный номер \_\_\_\_\_

Класс точности \_\_\_\_\_, Диапазон измерений \_\_\_\_\_,

Система прибора \_\_\_\_\_, Год выпуска \_\_\_\_\_.

Температура окружающей среды \_\_\_\_\_

## Определение периода собственных колебаний подвижной части

1. Соберите схему, приведенную на рисунке 2.8, и покажите ее преподавателю. После проверки подайте питающее напряжение на схему и прогрейте прибор в течении 15 минут.

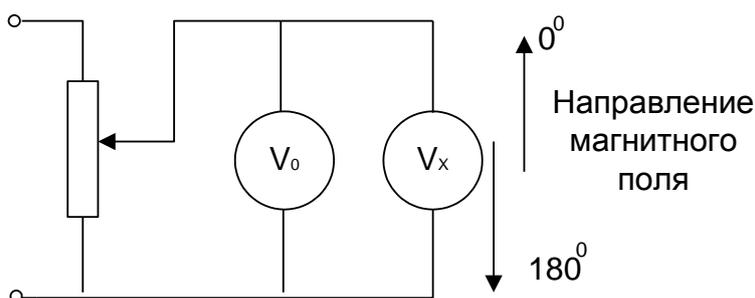


Рисунок 2.8 - Схема поверки магнитоэлектрического прибора

## 2. Определение времени успокоения магнитоэлектрического прибора.

- 2.1. Установите указатель на середину шкалы прибора и отключите питающее напряжение.

Таблица 2.2 - Время успокоения и период колебания подвижной части

Время успокоения			
$t_{y1}$	$t_{y2}$	$t_{y3}$	$t_{cp}$

- 2.2. Повторно подайте напряжение на прибор и отсчитайте время, за которое стрелка совершает три полных колебания, проходя через отсчетное деление шкалы. Занесите полученный результат в таблицу 2.2.
- 2.3. Проведите исследование 3 раз и определите время успокоения подвижной части как среднее арифметическое всех измерений. Время собственных колебаний не должно превышать 2 - 4 с. Сделайте вывод о качестве успокоителя исследуемого прибора.

## Определение влияния внешнего магнитного поля

1. Используя ранее собранную схему, оцените влияние внешнего магнитного поля на показания прибора. Если в качестве источника магнитного поля используется электромагнит, то измерения проводятся без разворота катушки на  $180^{\circ}$ .
2. Поместите рядом с магнитоэлектрическим прибором источник магнитного поля. Образцовый прибор разместите как можно дальше.
3. Проведите измерения, для каждого оцифрованного деления шкалы, выставляя на поверяемом приборе исследуемые значения, а результат, снимая с образцового для устранения систематической погрешности. Проведите измерения для прямого и обратного хода прибора.
4. Разверните магнитоэлектрический прибор на  $180^{\circ}$  и проведите измерения аналогично п.3. занося полученный результат в таблицу 2.3.
5. Удалите источник внешнего магнитного поля и проведите измерения аналогично п.3.

6. Рассчитайте абсолютную и приведенную погрешность измерения, занесите полученные значения в таблицу 2.4. Сравните полученный результат с показаниями, полученными в п. 3-5.
7. По полученным данным постройте две характеристики вариации показаний  $\beta=f(X_n)$ , считая  $X_n$  как значение оцифрованной метки шкалы рабочего прибора.

Таблица 2.3 - Результаты поверки магнитоэлектрического прибора

№	Поверяемое значение шкалы	Действительное значение измеряемой величины					
		При наличии внешнего магнитного поля				Магнитное поле отсутствует	
		0°		180°			
		Прямой ход	Обратный ход	Прямой ход	Обратный ход	Прямой ход	Обратный ход
1.							
...							
n.							

Таблица 2.4 – Расчетные показатели поверки магнитоэлектрического прибора

Погрешность поверяемого прибора								Поправка показаний								Вариация показаний при отсутствии магнитного поля
При наличии внешнего магнитного поля				Магнитное поле отсутствует				При наличии внешнего магнитного поля				Магнитное поле отсутствует				
0°		180°						0°		180°						
↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	
Абсолютная	Приведенная	Абсолютная	Приведенная	Абсолютная	Приведенная	Абсолютная	Приведенная									
1																
...																

8. Сделайте вывод о влиянии на показания магнитоэлектрического прибора источника внешнего магнитного поля и о пригодности его к работе в соответствии с классом точности. Сделайте вывод о пригодности прибора к

дальнейшему использованию. Постройте графики зависимости:  $\Delta P=f(X)$ ,  $\gamma=f(X)$ .

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ

1. Объясните устройство и принцип действия приборов магнитоэлектрической системы?
2. Можно ли применять в приборах данной системы индукционные успокоители. Почему?
3. Для чего определяется вариация показаний?
4. Для чего необходимо прогревать приборы перед измерением?
5. С какой целью поверяют приборы?
6. Какие моменты действуют на вращающиеся части прибора?
7. Как создается момент успокоения в приборах данной системы?
8. Чем создается противодействующий момент, его роль в приборе?

## 2.4 ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМ

Система преобразует электрическую энергию в механическое перемещение на основе взаимодействия магнитного поля образованного катушкой и подвижного сегмента измерительного механизма. Наибольшее распространение получили две конструкции

### Электромагнитный прибор с плоской катушкой

Измеряемый сигнал (рис.2.9) подается на катушку 2 и формирует магнитное поле, которое взаимодействует с подвижным сегментом 6 (обычно выполняется из пермаллоя), создает вращающий момент.

$$M_{BP} = c \cdot I^2; \quad (9)$$

где  $c$  – коэффициент характеризующий свойства катушки.

Подвижный сегмент жестко закреплен на оси 5 и при повороте одновременно вращает стрелку 4, которая отсчитывает показания по шкале. Для достижения установившегося состояния используется пружина, создающая противодействующий момент.

$$M_{\text{ПР}} = \alpha \cdot W_{\text{ПР}} ; \quad (10)$$

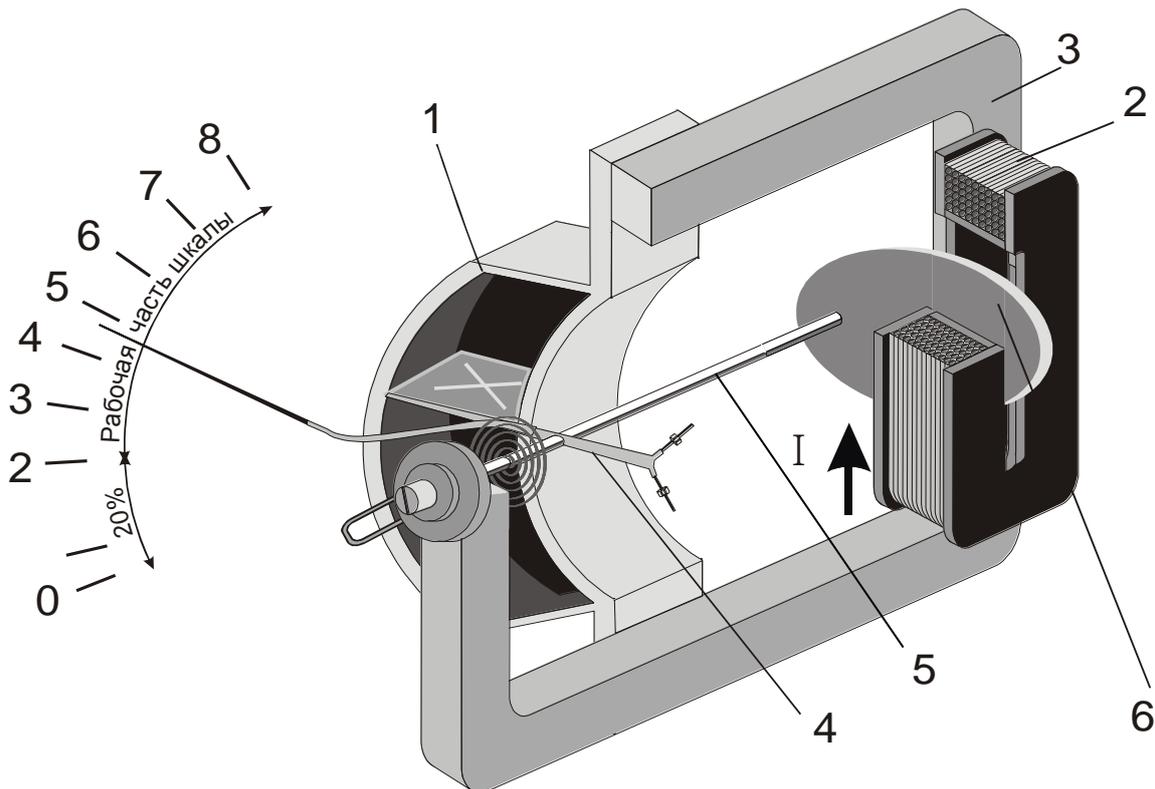


Рисунок 2.9 – Электромагнитный прибор с плоской катушкой  
1 – успокоитель, 2 – плоская катушка, 3 – сердечник, 4 – стрелка, 5 – ось, 6 – подвижный сегмент

Момент успокоения создается успокоителем (воздушным, жидкостным или магнитоиндукционным).

Подвижная часть прибора будет отклоняться до тех пор пока не займет установившееся положение для которого соблюдается равенство:

$$-M_{\text{ПР}} = M_{\text{БР}} ; \quad (11)$$

Угол поворота составит

$$\alpha = \frac{c}{W_{\text{ПР}}} \cdot I_0^2 ; \quad (12)$$

Шкала прибора квадратичная, что представляет неудобство для использования. Шкалу выравнивают, подбирая форму и расположение сердечника относительно катушки. В итоге остается квадратичной только начальные 20% шкалы, которые отмечаются точкой арретирования. Прибор измеряет, и переменный ток, так как при смене полярности магнитного поля подвижный сегмент так же перемагничивается.

### Электромагнитный прибор с круглой катушкой

Ток (рис.2.10), протекая по катушке 2, создает в воздушном зазоре магнит-

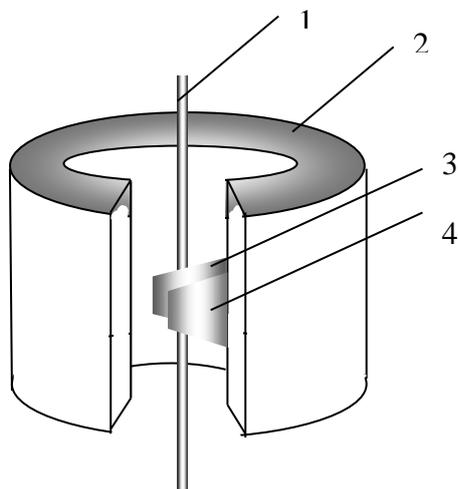


Рисунок 2.10 – Электромагнитный прибор с круглой катушкой

1 – ось, 2 – катушка, 3 – подвижный сегмент, 4 – неподвижный сегмент

ное поле, в котором находится подвижный 3 и неподвижный 4 сегмент измерительного механизма. Сегменты выполняются из ферромагнитного материала и обладают собственным магнитным полем. При взаимодействии магнитного поля катушки и сегментов создается вращающий момент, приводящий в движение стрелку прибора жестко связанную с осью 1 и подвижным сегментом 3. Измерительный механизм занимает установившееся положение. Против

действующий момент создается пружинами. Шкала прибора так же квадратичная и требует доработки.

Приборы электромагнитной системы используются в качестве амперметров (катушка выполняется проводом большого сечения) и вольтметров (катушка выполняется проводом малого сечения). При измерениях больших токов и напряжений используются дополнительно трансформатор тока и трансформатор напряжения.

Достоинства: большая перегрузочная способность, большой верхний предел для непосредственного включения, простота конструкции, дешевизна.

Недостатки: неравномерность шкалы, низкая чувствительность, невысокая точность, большое потребление энергии на собственные нужды.

### Задачи для самостоятельного решения

**Пример.** Необходимо измерить ток потребителя в пределе от 20 до 25 А. Имеется микроамперметр электромагнитной системы с внутренним сопротивлением 300 Ом и максимальным числом делений 100, пределом измерения 50 А, класс точности 4.0. Определите относительную погрешность измерения для делений 20 и 25 А.

### Решение

Определим абсолютную погрешность

$$\Delta U = \frac{k \cdot U_n}{100} = \frac{4 \cdot 50}{100} = 2 \text{ В}$$

Относительная погрешность измерения

$$\delta = \frac{\Delta U}{U} 100 = \frac{2}{20} 100 = 10 \%$$

$$\delta = \frac{\Delta U}{U} 100 = \frac{2}{25} 100 = 8 \%$$

Таким образом, относительная погрешность измерения составит 10 и 8%.

**Задача 1.** Определите ток полного отклонения и входное сопротивление электромагнитного вольтметра Э303 с верхним пределом измерения 150 В, если при постоянном напряжении 150 В и потребляемой мощности 3 Вт.

**Задача 2.** Амперметр характеризуется падением напряжения 75 мВ, предел измерения 5 А. определите внутреннее сопротивление и потребляемую мощность.

**Задача 3.** Определите класс точности электромагнитного микроамперметра с двусторонней шкалой и пределом измерения 100 мкА, если наибольшее значение абсолютной погрешности получено на отметке 40 мкА и равно 1,7 мкА. Определите относительную погрешность.

Задача 4. Рассчитайте мощность выделяемую в обмотке измерительного механизма электромагнитного вольтметра с пределом измерения 100 В, если активное сопротивление обмотки 1 кОм, ее индуктивность 0,3 Гн. Прибор рассчитан на измерение постоянного и переменного напряжения на частоте 50 Гц.

Задача 5. При изменении измеряемого тока на 0,5, а стрелка электромагнитного амперметра отклонилась на половину линейной шкалы, имеющей 100 делений. Определите верхний и нижний предел измерения, если нелинейная часть шкалы занимает 5%. Определите цену деления и чувствительность амперметра.

### **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3**

#### **ПОВЕРКА ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ**

**Цель работы:**

1. Изучить конструкцию электроизмерительных приборов электромагнитной системы.
2. Освоить методы и способы поверки данных электроизмерительных приборов.

#### **ПРОГРАММА ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

##### **ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ**

Электромагнитный амперметр рабочего класса точности, электромагнитный или электродинамический амперметр образцового класса точности, секундомер, ЛАТР, трансформатор напряжения 220/12 В.

##### **ХОД РАБОТЫ**

###### **Внешний осмотр**

Запишите в протокол исследований номинальные характеристики образцового и поверяемого прибора.

Проведите внешний осмотр поверяемого прибора и занесите имеющиеся повреждения на корпусе в протокол осмотра. При внешнем осмотре выявляются дефекты, которые могут препятствовать применению прибора.

## Определение погрешности поверяемого прибора

2.1 Соберите схему представленную на рисунке 2.11. покажите для проверки ее преподавателю.

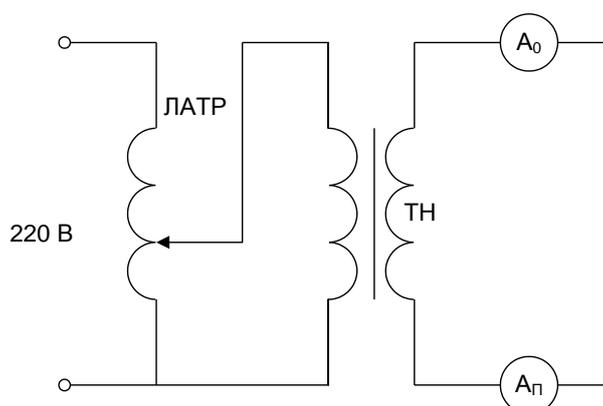


Рисунок 2.11 – Схема поверки электромагнитного амперметра

2.2 Проведите опыт прямого и обратного хода для поверяемого прибора предварительно прогрев его в течении 15 минут. Полученные значения занесите в таблицу 2.5.

2.3 На основании расчета погрешности измерений для полученных показаний оцените пригодность прибора к дальнейшему использованию (прибор признается пригодным к использованию при отсутствии дефектов корпуса и величине приведенной погрешности ниже чем класс точности поверяемого прибора).

2.4 Согласно полученным данным постройте график зависимости  $\Delta P=f(X)$  для прямого и обратного хода и  $\gamma=f(X)$ .

Протокол исследований

Серийные данные образцового прибора

Тип прибора \_\_\_\_\_, Серийный номер \_\_\_\_\_  
 Класс точности \_\_\_\_\_, Диапазон измерений \_\_\_\_\_,  
 Система прибора \_\_\_\_\_, Год выпуска \_\_\_\_\_.

Серийные данные поверяемого прибора

Тип прибора \_\_\_\_\_, Серийный номер \_\_\_\_\_  
 Класс точности \_\_\_\_\_, Диапазон измерений \_\_\_\_\_,  
 Система прибора \_\_\_\_\_, Год выпуска \_\_\_\_\_.

Температура окружающей среды \_\_\_\_\_

Вид поверки (первичная, вторичная, экспертная, инспекционная) \_\_\_\_\_

Способ поверки (непосредственное сличение, компорирование, поверка по образцовой мере и др.) \_\_\_\_\_

Электрическая схема соединения


Результаты внешнего осмотра \_\_\_\_\_

Таблица 2.5 – Результаты поверки электромагнитного амперметра

№	Поверяемое значение измеряемой величины	Показания образцового прибора		Погрешность				Поправка показаний		Вариация показаний
		Прямой ход	Обратный ход	↓		↑		↓	↑	
				$\Delta X$	$\gamma$	$\Delta X$	$\gamma$			
1.										
...										
n.										

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ

1. Каких классов точности выпускаются аналоговые измерительные приборы.
2. С какой целью проводится поверка измерительных приборов.
3. Для чего используется поправочная характеристика прибора.
4. Какой вид поверки производится при сходе прибора с конвейера.
5. Какова связь между абсолютной погрешностью и поправкой.
6. Для чего определяется вариация показаний прибора.
7. Для чего прибор прогревают перед проведением измерений.
8. По какой погрешности определяется класс точности прибора.
9. Почему шкала электромагнитных приборов квадратичная, каким образом ее выравнивают.
10. Какие типы успокоителей используются в электромагнитных приборах.

### 2.5 ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Принцип действия приборов основан на взаимодействии двух проводников с током. При согласном направлении токов проводники притягиваются, при встречном отталкиваются.

При протекании токов (рис.2.12) по подвижной 1 и неподвижной 3 катушке создается магнитное поле вокруг проводника, в зависимости от направления протекания тока катушки будут отталкиваться или притягиваться. Так как они неподвижно связаны со стрелкой, закрепленной на подвижной катушке, стрелка будет перемещаться до установившегося положения. На достижение такого положения необходимо затратить часть энергии, которая запасается в магнитном поле, замкнутом по воздуху.

$$W_M = \frac{L_{\Pi} \cdot I_{\Pi}^2}{2} + \frac{L_H \cdot I_H^2}{2} + M_{\Pi H} \cdot I_{\Pi} \cdot I_H; \quad (13)$$

где  $L_{\Pi}, L_{H}$  - индуктивность подвижной и неподвижной катушки;  
 $M_{\Pi H}$  - взаимная индуктивность подвижной и неподвижной катушки;  
 $I_{\Pi}$  - ток, протекающий по подвижной катушке;  
 $I_{H}$  - ток, протекающий по неподвижной катушке.

Фактически электродинамическая конструкция работает на основе регистрации магнитных потоков рассеяния, что является ее и достоинством и недостатком. Величина вращающего момента в зависимости от энергии, запасенной в магнитном поле

$$M_{BP} = \frac{dW_M}{d\alpha} = \frac{I_{\Pi}^2}{2} \cdot \frac{L_{\Pi}}{d\alpha} + \frac{I_H^2}{2} \cdot \frac{L_H}{d\alpha} + \frac{dM_{\Pi H}}{d\alpha} \cdot I_{\Pi} \cdot I_H; \quad (14)$$

где  $d\alpha$  - приращение угла поворота, при котором энергия поля получает приращение  $dW_M$ .

$$M_{BP} = c \cdot I_{\Pi} \cdot I_H; \quad (15)$$

где  $c$  – коэффициент, зависящий от геометрических размеров, числа витков,

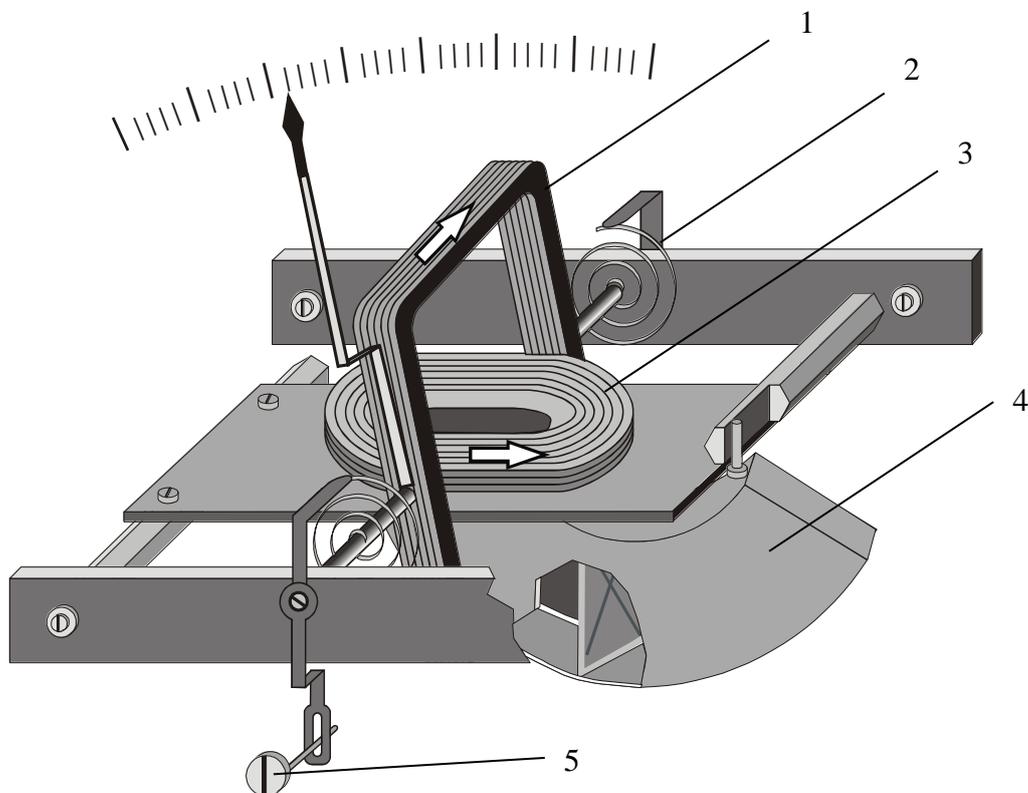


Рисунок 2.12 – Электродинамическая система  
 1 – подвижная катушка, 2 – пружины, 3 – неподвижная катушка, 4 –  
 успокоитель, 5 - корректор

взаимного расположения катушек;

Противодействующий момент создается спиральными пружинами 2 и зависит от их свойств.

$$M_{\text{ПР}} = W_{\text{ПР}} \cdot \alpha ; \quad (16)$$

Угол поворота подвижной.

$$\alpha = \frac{c}{W_{\text{ПР}}} \cdot I_{\text{Н}} \cdot I_{\text{П}} ; \quad (17)$$

Вследствие чего шкала прибора квадратичная и требует корректировки. Линейность шкалы обеспечивается подбором взаимного расположения катушек и их формы. После корректировки нерабочая часть шкалы составляет 20% и отмечается точкой арретирования. Максимальный угол поворота шкалы при такой конструкции  $90^{\circ}$ .

При использовании прибора на переменном токе момент вращающий зависит от мгновенного значения тока.

$$M_{\text{ВР}} = c \cdot i_{\text{П}} \cdot i_{\text{Н}} ; \quad (18)$$

где  $i_{\text{П}}$ ,  $i_{\text{Н}}$  - мгновенное значение тока в подвижной и неподвижной катушке.

Средний момент за период

$$M_{\text{СР}} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T M dt = c \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i_{\text{Н}} \cdot i_{\text{П}} \cdot dt ; \quad (19)$$

При наличии угла сдвига фаз между токами в подвижной и неподвижной катушке средний момент составит:

$$M_{\text{СР}} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T M \cdot \cos(\omega t \pm \psi) dt = c \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i_{\text{Н}} \cdot i_{\text{П}} \cdot \cos(\omega t \pm \psi) \cdot dt = c \cdot I_{\text{П}} \cdot I_{\text{Н}} \cdot \cos \psi ; \quad (20)$$

где  $\cos \psi$  - угол сдвига фаз между током подвижной и неподвижной катушки.

Угол поворота подвижной части с учетом угла сдвига фаз.

$$\alpha = \frac{c}{W_{\text{ПР}}} \cdot I_{\text{П}} \cdot I_{\text{Н}} \cdot \cos \psi ; \quad (21)$$

Приборы электродинамической системы используются в качестве амперметров, вольтметров, ваттметров, часто выполняются многопредельными.

Приборы, используются как на переменном, так и на постоянном токе. При использовании на переменном токе показания являются результатом действия мгновенных значений за период с учетом угла сдвига фаз между током подвижной и неподвижной катушки.

В электродинамических приборах магнитный поток создаваемый током, протекающим по катушкам, замыкается по воздуху, что ведет к большим потерям мощности и чувствительности к внешним воздействиям. Однако такая конструкция в виду большой чувствительности обеспечивает лучший класс точности (приборы используются в качестве лабораторный при поверке). Большая точность обеспечивается так же отсутствием погрешности на гистерезис и вихревые токи.

Достоинства: пригодны для постоянного и переменного тока, высокая точность, равномерная шкала в рабочей части.

Недостатки: подвержены влиянию внешних магнитных полей, показания зависят от частоты, имеют большое собственное потребление мощности, дороговизна.

## 2.6 ПРИБОРЫ ФЕРРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В основу конструкции положена электродинамическая система, в которой для устранения магнитных потоков рассеяния установлен магнитопровод (рис.2.13).

Измеряемая величина подается на подвижную 6 и неподвижную 5 катушки (бескаркасные). Магнитное поле, создаваемое в катушках, замыкается через магнитопровод 3, что исключает потери энергии. Магнитопровод выполняется из листов электротехнической стали для уменьшения токов Фуко.

Ферродинамическая система создает больший вращающий момент, чем электродинамическая, что позволяет ее использовать так же в качестве самопишущих приборов. Однако применение магнитопровода приводит к снижению чувствительности системы и как следствию снижению класса точности.

Противодействующий момент создается спиральными пружинами 4.  
 Момент успокоения магнитоиндукционным успокоителем 2.  
 Мгновенное значение вращающего момента

$$M_{BP} = B_t \cdot S_2 \cdot \omega_2 \cdot i_2; \quad (22)$$

где  $B_t$  - мгновенное значение магнитной индукции;

$S_2$  - площадь подвижной катушки;

$\omega_2$  - число витков подвижной катушки;

$i_2$  - мгновенное значение тока в подвижной катушке.

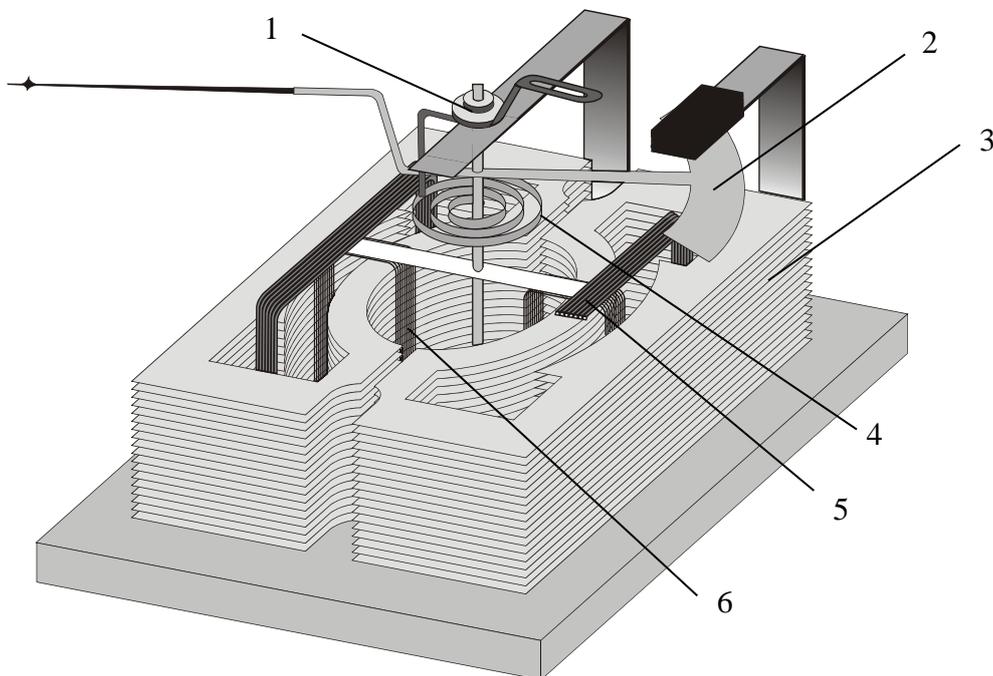


Рисунок 2.13 – Ферродинамическая конструкция  
 1 – корректор, 2 – магнитоиндукционный успокоитель, 3 – ферромагнитный сердечник, 4 – пружина, 5 – неподвижная катушка, 6 – подвижная катушка

Так как измерительный механизм обладает некоторой инерцией, то реагировать он будет не на мгновенное значение, а на среднее вращающего момента.

$$M_{BP} = B \cdot S_2 \cdot \omega_2 \cdot I_2 \cdot \cos(B, I_2); \quad (23)$$

При расчетах используется действующее значение магнитной индукции в воздушном зазоре. В основном для ферродинамических приборов используется линейный участок петли гистерезиса. Угол, фиксируемый между маг-

нитной индукцией и током, протекающим во второй катушке, позволяет заполнить прибор фазозависимым. Угол поворота стрелки составит:

$$\alpha = k \cdot I_{II} \cdot I_H \cdot \cos(I_{II}, I_H); \quad (24)$$

где  $k$  – коэффициент, определяемый конструкцией измерительного механизма и выбором системы единиц.

Шкала прибора квадратичная, что устраняется изменением конфигурации воздушного зазора.

Приборы ферродинамической системы используются в качестве амперметров, вольтметров, ваттметров, варметров и измерительных механизмов самопишущих приборов.

Достоинства: устойчивы к тряске и вибрации, большой вращающий момент, малая чувствительность к внешним магнитным полям.

Недостатки: малая точность, температурная и частотная погрешности, погрешность, обусловленная вихревыми токами и петлей гистерезиса сердечника.

### Задачи для самостоятельного решения

**Пример.** Амперметр Д533/2 с двумя пределами 2,5 и 5 А, односторонней шкалой 50 на делений включен во вторичную обмотку трансформатора тока типа И515. Определите цену деления амперметра, если коэффициент трансформации составляет 50/5.

### Решение

Определим цену деления для вторичной обмотки для предела измерения 2,5 А.

$$C_{a1} = \frac{2,5 \cdot \frac{50}{5}}{50} = 0,5 \text{ А}$$

Цена деления для предела 5 А

$$C_{a2} = \frac{5 \cdot \frac{50}{5}}{50} = 1 \text{ А}$$

Ответ: Цена деления для предела измерения 2,5 А составляет 0,5 А, а для предела 5 А составляет 1 А.

**Задача 1** В электродинамическом вольтметре с пределом измерения 150 В, катушки соединены последовательно и имеют добавочный резистор величиной 4565 Ом, индуктивность 240 мГ, активное сопротивление катушки 435 Ом. Прибор проградуирован на постоянном токе. Определите относительную погрешность измерения при частоте 500 Гц.

**Задача 2** Электродинамический ваттметр Д533/10 имеет пределы измерения по току 2,5, 5, 7,5 А и по напряжению 75, 150, 300, 600 В. Число делений шкалы 150. Определите цену деления прибора и величину абсолютной погрешности для каждого варианта, если класс точности прибора 2,5.

**Задача 3** Определите показания электродинамического и электромагнитного амперметров включенных последовательно с реальной катушкой, если напряжение на входе изменяется по закону  $u(t)=25+50\sin(\omega t)$ . Величина активного сопротивления 10 Ом, реактивного 10 Ом.

**Задача 4** В трехфазную цепь с однородной активно-индуктивной нагрузкой включены два ферродинамических ваттметра показания которых составили 85 Вт и 385 Вт. Определите коэффициент мощности сети и начертите схему включения.

**Задача 5** Какова максимальная допустимая абсолютная погрешность электродинамического ваттметра классом точности 1,0 с пределами измерения по току 5 А, по напряжению 300 В.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### ПОВЕРКА ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ФЕРРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

**Цель работы:** 1. Изучить конструкцию электроизмерительных приборов ферродинамической системы.

2. Освоить методы и способы поверки данных электроизмерительных приборов.

## ПРОГРАММА ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

### ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Ферродинамический ваттметр рабочего класса точности, электродинамический ваттметр образцового класса точности, секундомер, ЛАТР, трансформатор напряжения 220/12 В.

### ХОД РАБОТЫ

#### Опыт 1 Внешний осмотр

Запишите в протокол исследований номинальные характеристики образцового и поверяемого прибора.

Проведите внешний осмотр поверяемого прибора и занесите имеющиеся повреждения на корпусе в протокол осмотра. При внешнем осмотре выявляются дефекты, которые могут препятствовать применению прибора.

#### Опыт 2 Определение погрешности поверяемого прибора

1 Соберите схему представленную на рисунке 2.14. покажите для проверки ее преподавателю.

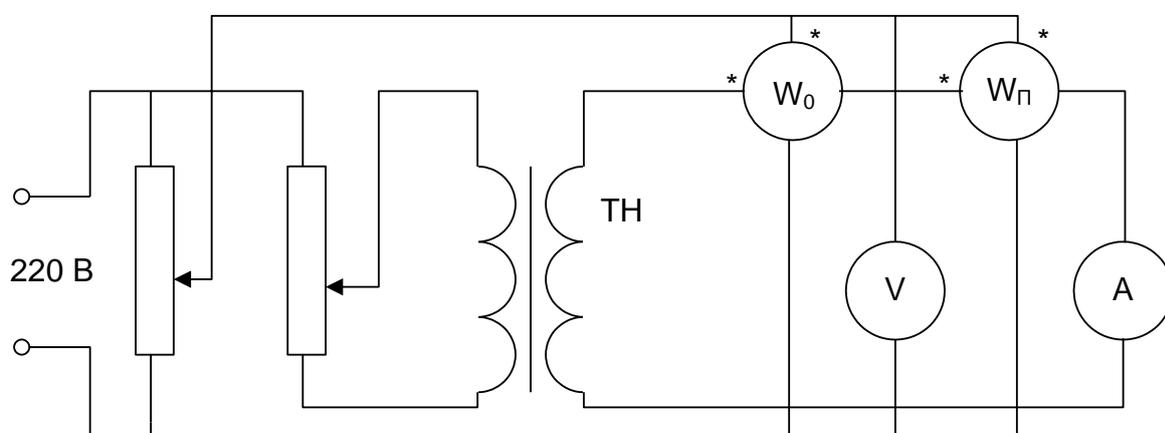


Рисунок 2.14 – Схема поверки ферродинамического ваттметра

- 2 Проведите опыт прямого и обратного хода для поверяемого прибора предварительно прогрев его в течении 15 минут. Полученные значения занесите в таблицу 2.6.
- 3 На основании расчета погрешности измерений для полученных показаний оцените пригодность прибора к дальнейшему использованию (прибор признается пригодным к использованию при отсутствии дефектов корпуса и величине приведенной погрешности ниже чем класс точности поверяемого прибора).
- 4 Согласно полученным данным постройте график зависимости  $\Delta P=f(X)$  для прямого и обратного хода и  $\gamma=f(X)$ .

#### Протокол исследований

##### Серийные данные образцового прибора

Тип прибора \_\_\_\_\_, Серийный номер \_\_\_\_\_  
 Класс точности \_\_\_\_\_, Диапазон измерений \_\_\_\_\_,  
 Система прибора \_\_\_\_\_, Год выпуска \_\_\_\_\_.

##### Серийные данные поверяемого прибора

Тип прибора \_\_\_\_\_, Серийный номер \_\_\_\_\_  
 Класс точности \_\_\_\_\_, Диапазон измерений \_\_\_\_\_,  
 Система прибора \_\_\_\_\_, Год выпуска \_\_\_\_\_.

Температура окружающей среды \_\_\_\_\_

Вид поверки (первичная, вторичная, экспертная, инспекционная) \_\_\_\_\_

Способ поверки (непосредственное сличение, компорирование, поверка по образцовой мере и др.) \_\_\_\_\_

##### Электрическая схема соединения



Результаты внешнего осмотра \_\_\_\_\_

Таблица 2.6 – Результаты поверки ферродинамического ваттметра

№	Поверяемое значение измеряемой величины	Показания образцового прибора		Погрешность				Поправка показаний		Вариация показаний
		Прямой ход	Обратный ход	↓		↑		↓	↑	
				$\Delta X$	$\gamma$	$\Delta X$	$\gamma$			
1.										
...										
п.										

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ

1. Какой принцип действия положен в основу работы приборов электродинамической системы.
2. Каким образом обеспечивается линейность шкалы приборов электродинамической системы.
3. Учитывается ли угол сдвига фаз между током и напряжением в приборах электродинамической системы.
4. Почему электродинамические приборы используются в качестве лабораторных.
5. Назовите основные отличия приборов электродинамической и ферродинамической системы.
6. Какое влияние оказывает наличие ферромагнитного сердечника на вращающий момент.

7. Почему приборы ферродинамической конструкции можно использовать как самописцы, а электродинамической конструкции нет.
8. Чем обусловлена малая чувствительность ферродинамических приборов к внешним магнитным полям.
9. Как определить цену деления ферродинамического ваттметра.
10. Что такое приведенная погрешность и как она связана с классом точности прибора.

## 2.7 ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПРИБОРОВ

Принцип действия приборов основан на взаимодействии заряженных проводников. Одноименные заряды отталкиваются, разноименные притягиваются (рис.2.15). На основе электростатической системы можно создать только вольтметр.

На неподвижные пластины 3 подаются разноименные заряды, на подвижную пластину 2 подвешенную на бронзовых лентах 1 подается измеряемая величина, в зависимости от знака заряда и его величины подвижная пластина притягивается к одной из неподвижных пластин, толкая тягу 4. Тяга жестко связана с осью 5, на которой закреплена стрелка. Угол поворота стрелки зависит от величины и знака заряда. Погрешность измерений в основном зависит от качества изоляции пластин, которая выполняется из стеатита 6.

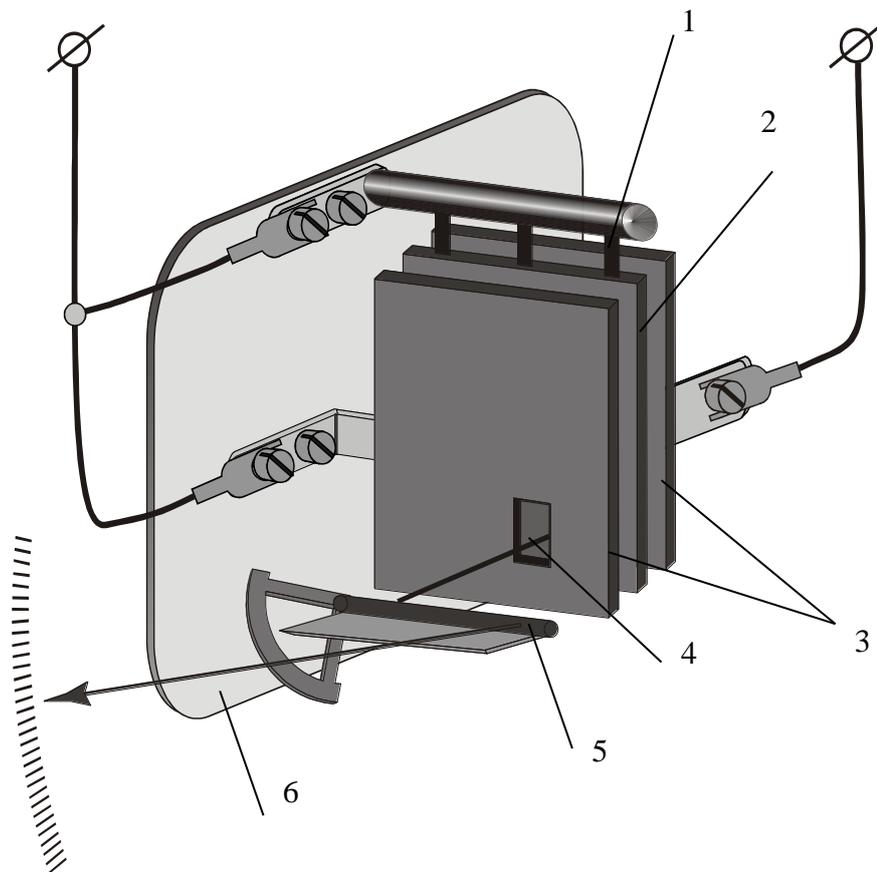


Рисунок 2.15 – Электростатическая система  
 1 – бронзовые ленты, 2 – подвижная пластина, 3 – неподвижные пластины, 4 – тяга, 5 – ось, 6 – стеатитовое основание

Вращающий момент создается за счет энергии запасенной в электрическом поле. Максимальное значение энергии запасенной на обкладках конденсатора.

$$W_{\text{э}} = \frac{c \cdot U}{2}; \quad (25)$$

где  $c$  – емкость конденсатора создаваемого подвижными и неподвижными пластинами;

$U$  – напряжение приложенное к пластинам.

Момент вращающий

$$M_{\text{вп}} = \frac{dW_{\text{э}}}{d\alpha} = \frac{d\left(\frac{c \cdot U}{2}\right)}{d\alpha} = \frac{dc}{d\alpha} \cdot \frac{U^2}{2} = \frac{1}{2} k_1 \cdot U^2; \quad (26)$$

При условии, что  $\frac{dC}{d\alpha}$  это скорость изменения емкости в зависимости от угла поворота тяги.

Вращающий момент создается на оси перемещением подвижной пластины.

$$M_{BP} = \frac{1}{2} \cdot k_1 \cdot U^2; \quad (27)$$

где  $k_1$  – скорость изменения емкости в зависимости от угла поворота стрелки;

$U$  – напряжение приложенное к пластинам.

Угол поворота стрелки

$$\alpha = \frac{k_1}{W_{IP} \cdot 2} \cdot U^2; \quad (28)$$

При измерении переменного напряжения определяется средний момент за период.

$$M_{CP} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{BP} \cdot dt = \frac{1}{2} \cdot k_1 \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt = \frac{1}{2} \cdot k_1 \cdot U^2; \quad (29)$$

где  $u$  – мгновенное значение напряжения на подвижных и неподвижных пластинах.

Шкала прибора квадратичная для приближения к равномерной выбирается форма подвижных и неподвижных пластин. После корректировки шкала равномерная на 75-85% длины. Успокоитель магнитоиндукционный.

Для расширения пределов измерения приборов электростатической системы используется емкостной делитель напряжения. Конструктивно он может быть выполнен тремя способами (рис.2.16). Искомым параметром в данном случае является напряжение поступающее на зажимы вольтметра. Для конденсаторного делителя расчет напряжения на вольтметре производится следующим образом:

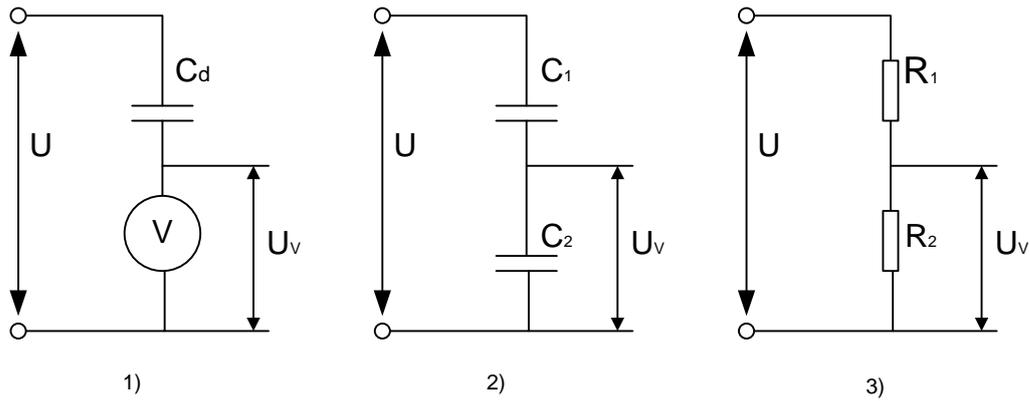


Рисунок 2.16 - Электрическая схема емкостного делителя  
 1 - схема с использованием добавочного конденсатора, 2 – емкостной делитель, 3 – резисторный делитель для постоянного тока

$$U_v = U \cdot \frac{C_d}{C_v + C_d}, \quad (30)$$

где  $C_d$  - емкость конденсатора делителя;

$C_v$  – емкость вольтметра, изменяемая величина зависящая от положения пластин внутри конденсатора

Для емкостного делителя:

$$U_v = U \cdot \frac{C_1}{C_v + C_1 + C_2}, \quad (31)$$

где  $C_{1,2}$  - емкости плеч делителя.

Достоинства: на показания не оказывает влияние внешняя среда, форма кривой тока, частота, внешнее магнитное поле, большое входное сопротивление, малое собственное потребление мощности.

Недостатки: показания зависят от электрических полей, пригодны для измерения только напряжения.

### Задачи для самостоятельного решения

**Пример.** Определите емкость плоского слюдяного конденсатора и напряжение приложенное к нему, если электрический заряд на его обкладках составил  $0,2 \cdot 10^{-6}$  Кл, расстояние между обкладками  $3 \cdot 10^{-4}$  м, площадь обкладок  $22,5 \cdot 10^{-4}$  м.

### Решение

Емкость конденсатора составит

$$\tilde{N} = 8,85 \cdot \frac{\varepsilon_r \cdot s}{d} (N - 1), \quad (32)$$

где  $\varepsilon_r$  - диэлектрическая проницаемость слюды;

$s$  - площадь обкладок;

$N$  - количество обкладок;

$d$  - расстояние между обкладками.

$$\tilde{N} = 8,85 \cdot \frac{7 \cdot 22,5 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 10^{-4}} \cdot 1 = 468,63 \approx 500 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$$

Напряжение на конденсаторе

$$U = \frac{Q}{C}, \quad (33)$$

где  $Q$  - заряд на обкладках конденсатора.

$$U = \frac{0,2 \cdot 10^{-6}}{468,63 \cdot 10^{-12}} = 427$$

**Задача 1.** Для расширения верхнего предела измерения электростатического вольтметра С75 имеющего верхний предел измерения 300 В и внутреннюю емкость 30 пФ до 3000 В используется емкостной делитель напряжения. Определите емкость  $C_1$  если  $C_2$  составляет 500 пФ.

**Задача 2.** В качестве добавочного конденсатора в емкостном делителе напряжения совместно с электростатическим прибором используется конденсатор Томпсона-Лампара. Определите его емкость и заряд при условии, что он имеет следующие линейные размеры: длина  $2,2 \cdot 10^{-2}$  м, внешний диаметр  $1,2 \cdot 10^{-2}$  м, внутренний диаметр внешнего цилиндра  $0,8 \cdot 10^{-2}$  м. Рабочее напряжение составляет 630 В.

**Задача 3.** Определите сколько обкладок соединенных параллельно через одну должен иметь плоский воздушный конденсатор емкостью  $1000 \cdot 10^{-12}$  Ф и напряжение приложенное к нему, если заряд конденсатора  $10^{-6}$  Кл, а расстояние между обкладками  $5 \cdot 10^{-4}$  м при площади  $0,04$  м<sup>2</sup>.

**Задача 4.** Определите необходимую для создания вращающего момента энергию в электростатическом вольтметре при подаче на него напряжения

7,5 кВ и известных параметрах конденсатора: количество обкладок 4, площадь обкладок  $15,6 \cdot 10^{-4}$  м, расстояние между пластинами  $1,5 \cdot 10^{-4}$  м.

**Задача 5.** Определите максимальное значение напряжения которое можно измерить электростатическим вольтметром с внутренней емкостью 200 пФ, емкость дополнительного конденсатора 40 пФ, количество делений шкалы 100, сена деления 0,5 В/дел.

## 2.8 ИНДУКЦИОННАЯ СИСТЕМА ПРИБОРОВ

В основу работы положено преобразование электрической энергии в токи Фуко, а затем в механическое перемещение.

Рассмотрим механические силы, возникающие в результате взаимодействия магнитных потоков и вихревых токов в диске, и зависимость вращающего момента от токов в электромагнитах. Среднее за период значение силы взаимодействия переменных магнитного потока и электрического тока можно выразить уравнением

$$F_{cp} = \Phi \cdot I \cdot \cos \psi, ; \quad (34)$$

где  $\psi$  - сдвиг фаз между магнитным потоком и электрическим током.

Измеряемая величина подается на катушку тока (рис.2.17) 5,6 и катушку напряжения 2,7. Магнитные поля, создаваемые этими катушками, пересекают алюминиевый диск 8 и наводят в нем вихревые токи, создается вращающий момент и диск начинает вращаться.

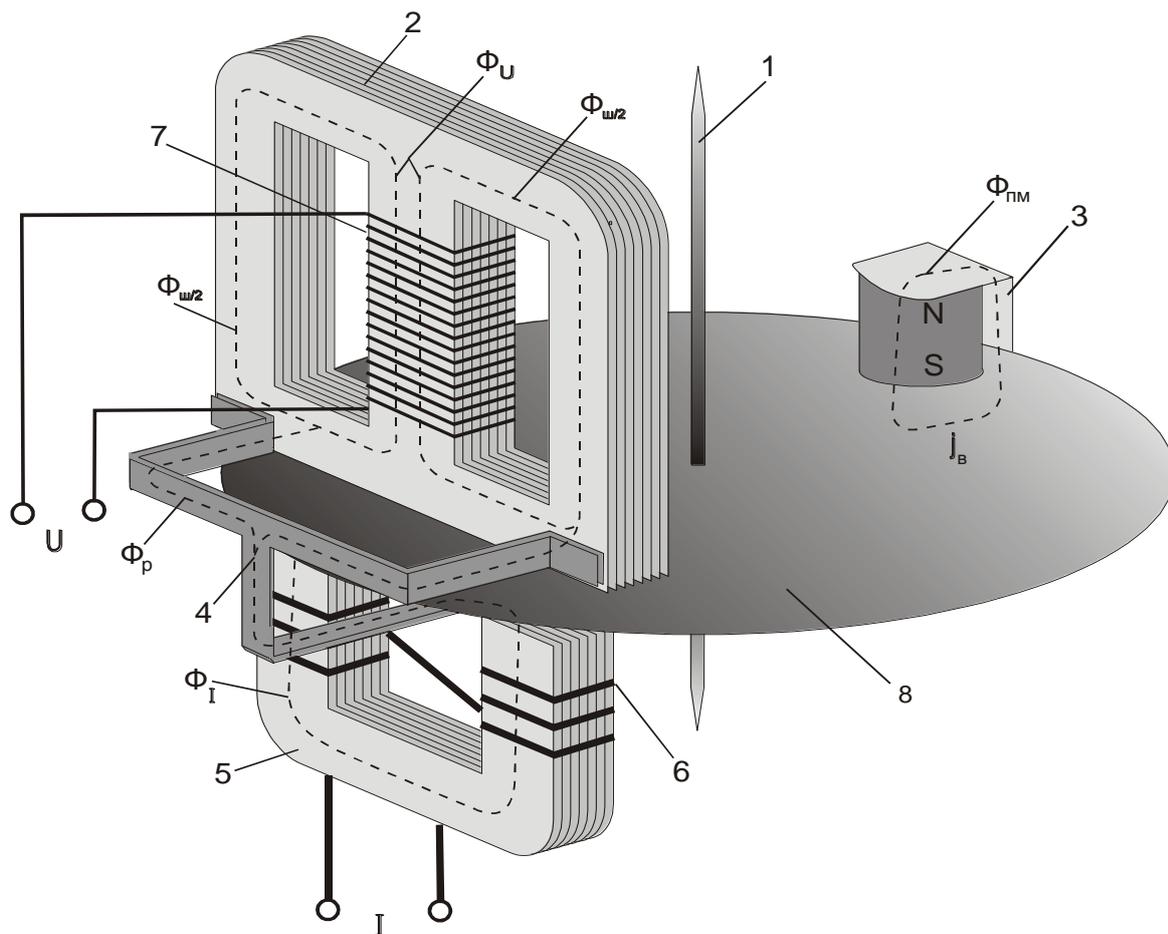


Рисунок 2.17 – Индукционная система приборов

1 – ось, 2 – магнитопровод катушки напряжения, 3 – постоянный магнит, 4 – противоположный полюс, 5 – магнитопровод катушки тока, 6 – обмотка катушки тока, 7 – обмотка катушки напряжения, 8 – диск

$$M_{BP} = k \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi; \quad (35)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности зависит от протекающей через счетчик мощности;

$U$  – напряжение на параллельной обмотке;

$I$  – ток на последовательной обмотке;

$\cos\varphi$  – угол сдвига фаз между током и напряжением.

Энергия, потребленная счетчиком на собственные нужды

$$A_t = P \cdot t; \quad (36)$$

где  $P$  - мощность сети;

$t$  – время за которое счетчик сделал заданное число оборотов.

Замыкаются магнитные поля на катушки по противопололюсу 4. Противодействующий момент создается постоянным магнитом 3.

Регистрация показаний осуществляется роликовым счетным механизмом и не требует создания момента успокоения.

Чаще всего индукционная система используется в качестве счетчиков электрической энергии. Основными характеристиками, которых являются следующие величины.

- **Номинальная постоянная счетчика** это энергия, показанная счетным механизмом на один оборот.

$$C_H = \frac{1000 \cdot 3600}{N}; \quad (37)$$

где  $N$  – номинальная постоянная счетчика, характеризует количество оборотов выполняемое диском на 1 кВт·ч в нормальных условиях;

- **Действительная постоянная счетчика** – характеризует работу счетчика в условиях отличных от номинальных.

$$C_D = \frac{P \cdot t}{n}; \quad (38)$$

где  $n$  – действительная постоянная счетчика, характеризует количество оборотов, выполняемое диском на 1 кВт·ч, в условиях отличных от нормальных;

Относительная погрешность счетчика

$$\delta = \frac{C_H - C_D}{C_H} 100\% . \quad (39)$$

Если действительная постоянная счетчика больше номинальной то он дает заниженные показания, если номинальная больше то завышенные.

В зависимости от величины допустимой погрешности индукционные счетчики делятся на следующие классы точности – 1.0, 2, 2.5. Величина погрешности зависит от нагрузки, включенной в сеть, чем больше нагрузка, тем

меньше действие силы трения и тем точнее показания, при снижении нагрузки на показания оказывает влияние трение диска о воздух, снижение магнитной проницаемости магнитопровода, трение в счетном механизме, трение в подшипника. Влияние этих факторов устраняется введением конструктивных дополнений – короткозамкнутого витка, поводка, которые создают компенсационный момент. Однако при перекомпенсации у счетчика появляется так называемый самоход, который выражается во вращении диска только под действием приложенного напряжения при отсутствии нагрузки.

Приборы используются в качестве счетчиков, активной и реактивной энергии в однофазных и трехфазных сетях, амперметров, вольтметров, фазометров и др.

Достоинства: сильное собственное магнитное поле, нечувствительность к внешним магнитным полям, большой вращающий момент.

Недостатки: пригодны только для переменного тока, чувствительны к колебаниям напряжения, частоты, температуры; большая масса; большое собственное потребление энергии.

### **Задачи для самостоятельного решения**

#### **Пример**

Определите номинальную и действительную постоянную счетчика, относительную погрешность измерения если паспортные данные имеют следующие значения: номинальное напряжение 220 В, номинальный ток 5 А, номинальная частота 50 Гц, 1 кВт·час составляет 1280 оборотов. Счетчик поверен при параметрах 220 В, 5 А, и сделал 150 оборотов за 6 минут.

#### **Решение**

Номинальная постоянная счетчика

$$C_H = \frac{1000 \cdot 3600}{1280} = 2812,5 \text{ (Вт·с)/об.}$$

Действительная постоянная

$$C_D = \frac{220 \cdot 5 \cdot 360}{150} = 2640 \text{ (Вт·с)/об.}$$

Поправочный коэффициент

$$K = \frac{C_D}{C_H}$$

$$K = \frac{2640}{2812,5} = 0,93$$

Относительная погрешность измерения

$$\delta = \frac{2812,5 - 2640}{2812,5} 100\% = 6,13\%$$

**Задача 1.** На счетчике написано 1 кВт·час = 2500 оборотов. Определите потребляемую мощность, если за 40 с диск сделал 20 оборотов.

**Задача 2.** Счетчик активной энергии в начале месяца показал 6852 кВт·ч, а в конце 9156 кВт·ч. Счетчик реактивной энергии 972,5 кВар·ч, а в конце 1123 кВар·ч. Определите среднемесячный коэффициент мощности.

**Задача 3.** Для поверки в метрологическую лабораторию сдан счетчик активной энергии СО-И446 с номинальными характеристиками: количество оборотов на 1кВт·ч 1200, напряжение 220 В, номинальный ток 5-17 А, частота 50 Гц, класс точности 2,5. Определите, сохранил ли прибор свой класс точности, если при поверке были получены следующие показания: мощность 155 Вт, время измерения 3 минуты, количество оборотов 9, величина тока 1 А.

**Задача 4.** Определите действительную постоянную счетчика и его класс точности если количество оборотов сделанных диском составило 28, величина тока 3 А, напряжение приложенное к счетчику 130 В, номинальная постоянная составила 3000.

**Задача 5.** За год работы показания счетчика активной и реактивной энергии составили 110000 кВт·ч и 70000 кВар·ч. Определите среднегодовой коэффициент мощности.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

## **ПОВЕРКА ОДНОФАЗНЫХ СЧЕТЧИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

- Цель работы:**
1. Изучить устройство и принцип действия однофазного счетчика электрической энергии.
  2. Научится поверять счетчики индукционной системы.

### **ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

При поверке счетчиков наибольшее распространение получили метод ваттметра и секундомера, как для переменного тока, так и для постоянного. Перед поверкой счетчик необходимо прогреть в течении 15 минут.

### **ПРОГРАММА ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

#### **ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ**

Счетчик индукционный однофазный, ЛАТР, вольтметр, амперметр, ваттметр, ламповый реостат, секундомер.

#### **ХОД РАБОТЫ**

##### **Опыт 1. Определение чувствительности однофазного счетчика активной энергии и его самохода**

1. Соберите схему в соответствии с рисунком 2.17 и покажите ее для проверки преподавателю.
2. При отключенной нагрузке подайте на счетчик напряжение, равное 110% от номинального, и проверьте отсутствие самохода.
3. Определите порог чувствительности счетчика. Установите активную нагрузку и подайте на нее номинальное напряжение. Величину сопротивления  $R + R_1$  подберите таким образом, чтобы при замыкании ток, протекающий через счетчик, составлял 0,005 от номинального значения нагрузочного тока. Его величина контролируется по показаниям миллиамперметра. Если диск счетчика при этих условиях вращается, то его чувствительность нормальная. Если диск не вращается, увеличивайте плавно ток

регулирующим сопротивлением  $R_1$ , наблюдая, при каком значении тока  $I_c$  наступит устойчивое вращение диска.

Записав значение  $I_c$ , вычислите порог чувствительности

$$S_c = \frac{I_c}{I_N} 100 \%. \quad (40)$$

## Опыт 2. Проверка однофазного счетчика электрической энергии

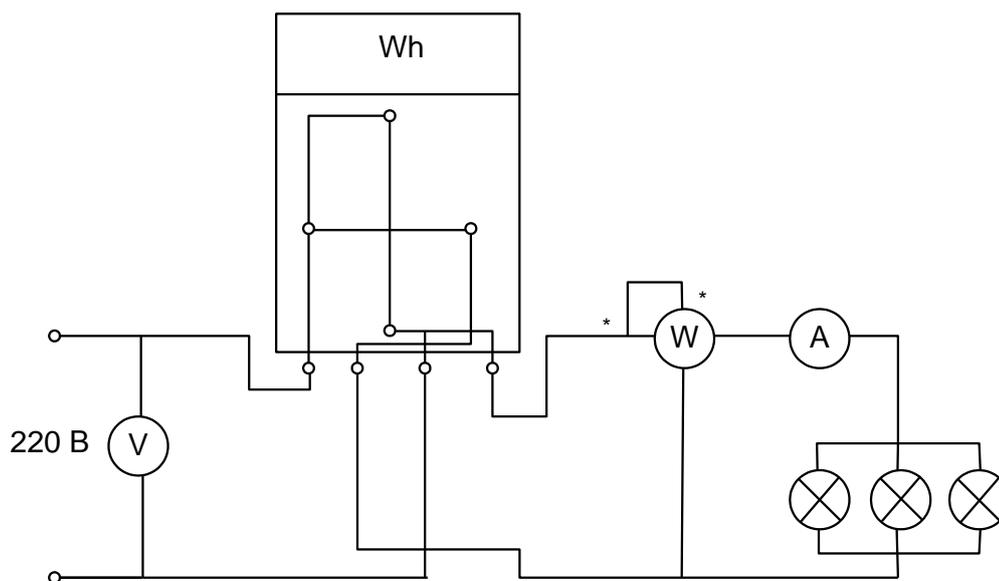


Рисунок 2.18 – Схема проверки однофазного счетчика электрической энергии

1. Соберите схему, приведенную на рисунке 2.18, и покажите ее для проверки преподавателю.
2. Изменяя нагрузку в соответствии с заданием преподавателя, замерьте мощность, и число оборотов диска в течение 2-3 минут (по секундомеру). Время, в течении, которого считают число оборотов счетчика, задается преподавателем и должно быть не менее 120 с (число оборотов диска не должно быть дробным, а промежутки времени при разных токах могут несколько отличаться).

Протокол исследований

Серийные данные поверяемого прибора

Тип прибора \_\_\_\_\_, Серийный номер \_\_\_\_\_

Класс точности \_\_\_\_\_ Год выпуска \_\_\_\_\_

Система прибора \_\_\_\_\_, Начальные показания \_\_\_\_\_

Количество оборотов на 1 кВт·ч \_\_\_\_\_ Конечные показания \_\_\_\_\_

Номинальный ток \_\_\_\_\_ Номинальное напряжение \_\_\_\_\_

Температура окружающей среды \_\_\_\_\_

Вид поверки (первичная, вторичная, экспертная, инспекционная) \_\_\_\_\_

Способ поверки (непосредственное сличение, компорирование, поверка по образцовой мере и др.) \_\_\_\_\_

Электрическая схема соединения


Результаты внешнего осмотра \_\_\_\_\_

Таблица 2.7 – Результаты поверки счетчика индукционной системы

№	U, В	I, А	P, Вт	n, об	C <sub>д</sub>	C <sub>н</sub>	ΔC	t, с	W <sub>и</sub> , Вт·с	β
1.										
...										
n.										
<b>Наличие самохода</b>										
<b>Чувствительность счетчика</b>										

Заполните протокол исследований и по полученным данным определите пригодность счетчика к дальнейшему использованию.

3. Постройте графики зависимостей  $n = f(I)$ , действительной постоянной счетчика  $C_d = f(I)$ , приведенной погрешности счетчика  $\gamma = f(I)$  от протекающего тока.

### Опыт 3. Проверка цифрового счетчика электрической энергии

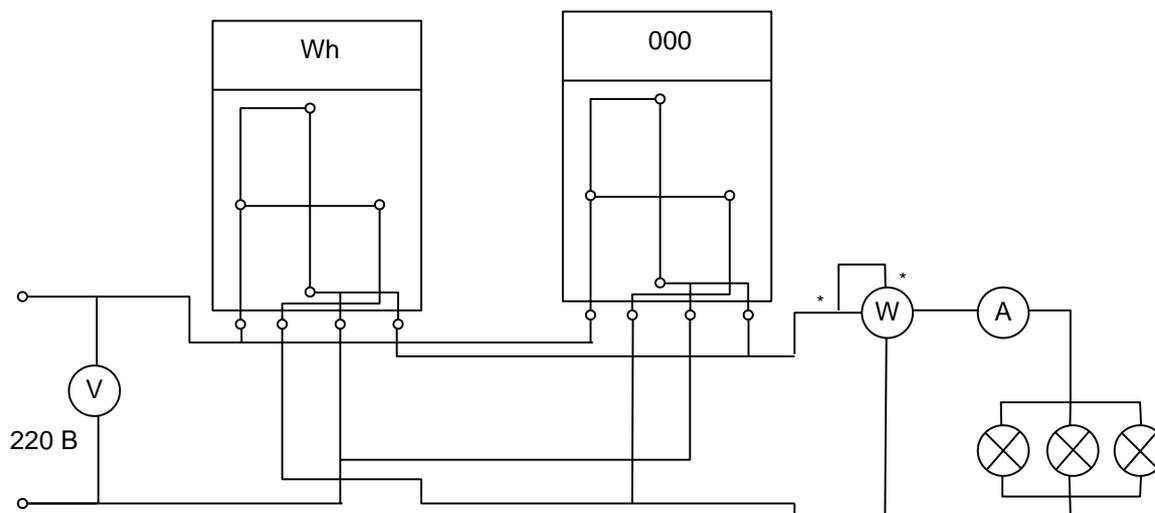


Рисунок 2.19 – Схема проверки цифрового счетчика электрической энергии

1. Соберите схему, приведенную на рисунке 2.19, и покажите ее для проверки преподавателю.
2. Проведите измерения, аналогичные опыту 2 и занесите полученные показания в таблицу 2.8.

#### Протокол исследований

##### Серийные данные поверяемого прибора

Тип прибора \_\_\_\_\_, Серийный номер \_\_\_\_\_

Класс точности \_\_\_\_\_ Год выпуска \_\_\_\_\_

Система прибора \_\_\_\_\_, Начальные показания \_\_\_\_\_

Конечные показания \_\_\_\_\_

Номинальный ток \_\_\_\_\_ Номинальное напряжение \_\_\_\_\_

Температура окружающей среды \_\_\_\_\_

Вид проверки (первичная, вторичная, экспертная, инспекционная) \_\_\_\_\_

Способ проверки (непосредственное сличение, компорирование, проверка по образцовой мере и др.) \_\_\_\_\_

Электрическая схема соединения

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--


Результаты внешнего осмотра \_\_\_\_\_

Таблица 2.8 – Результаты поверки цифрового счетчика

№	Показания индукционного счетчика			Показания цифрового счетчика			$\Delta W_{и},$ Вт·с	$\beta$	Количество импульсов на 1 кВт·ч
	Нач.	Конеч.	Разн.	Нач.	Конечн.	Разн.			
1.									
...									
n.									

Заполните протокол исследований и по полученным данным определите пригодность счетчика к дальнейшему использованию. Сравните показания цифрового и индукционного счетчика, и сделайте вывод о том какая из систем дает более точные показания.

4. Постройте графики зависимостей относительной погрешности счетчика  $\beta = f(I)$  от протекающего тока.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ

1. Объясните отличие тангенциальной и радиальной конструкции однофазного счетчика электроэнергии.
2. Каким устройством создается противодействующий момент в однофазном счетчике электроэнергии.
3. Объясните возникновение вращающего момента в алюминиевом диске счетчика.
4. Объясните причины возникновения самохода счетчика.
5. Объясните различие действительной и номинальной постоянной счетчика.
6. Охарактеризуйте конструкцию компенсационного устройства счетчика и необходимость его применения.

7. Как возникает момент трения в счетчике, объясните необходимость его компенсации.
8. Возможно ли применение вместо постоянного магнита электромагнита для создания тормозного момента.

## 2.9 ПРИБОРЫ ВИБРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Принцип действия основан на явлении резонанса. Под действием электрического тока (рис.2.20) протекающего через электромагнит 2 возникает состояние резонанса с одной пластин закрепленных на колодке 1.

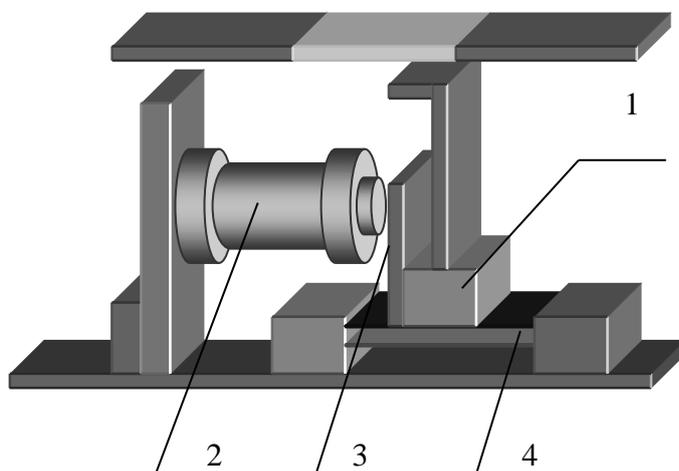


Рисунок 2.20 – Вибрационная система  
1 – колодка, 2 – электромагнит, 3 – железный якорь, 4 – пружинящие пластины

Пластина колеблется с удвоенной частотой и в силу инерции человеческого зрения воспринимается как увеличенная в размере (рис.2.21), максимальный размах колебаний будет у пластины находящейся в резонансе. Пружинящие пластины 4 частично компенсируют колебания.

При включении в цепь электромагнит начинает воздействовать на якорь с силой пропорциональной току.

$$F = I^2; \tag{41}$$

где  $I$  – действительное значение тока протекающего в электромагните.

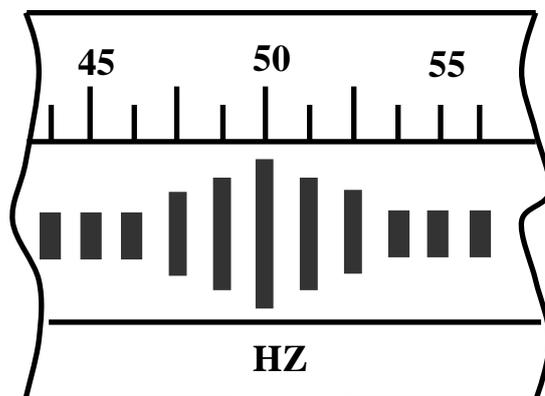


Рисунок 2.21 – Шкала вибрационного прибора

Обычно шкала вибрационных приборов выполняется горизонтальной, и имеет двадцать одну пластину, резонансная частота которых отличается на 0,5 Гц.

Достоинства: простота, надежность, нечувствителен к электрическим полям.

Недостатки: измеряет только частоту, чувствителен к вибрациям, дискретная шкала.

## 2.10 АСТАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Астатический прибор это прибор, в котором измерительный механизм выполнен таким образом, что бы не подвергаться воздействию внешнего однородного магнитного поля. Прибор выполнен на основе электромагнитной конструкции (рис.2.22).

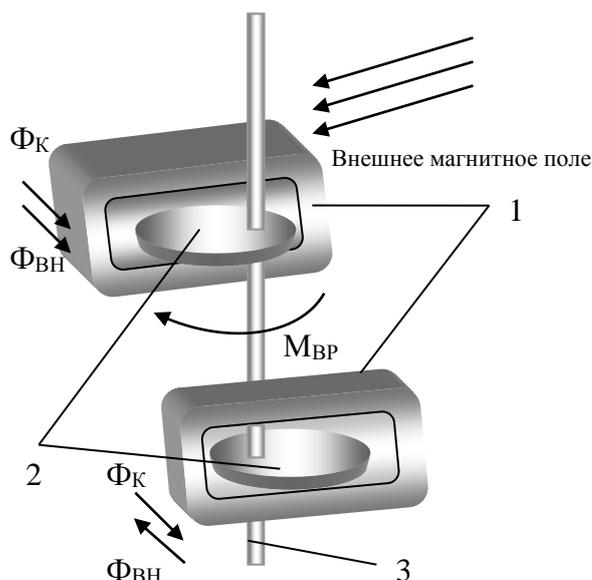


Рисунок 2.22- Конструкция аstaticеского прибора

Конструктивно представляет собой два подвижных сегмента 2 закрепленных на подвижной оси, которые под действием магнитного поля наведенного неподвижными катушками 1 перемещаются. Так как подвижный сегмент жестко связан с осью 3, то стрелка закрепленная на ней перемещается.

Катушки включаются последовательно, поэтому магнит-

ный поток, наведенный внешним магнитным полем с магнитным полем одной из катушек суммируется, для другой вычитается. Суммарный вращающий момент при использовании такой конструкции остается неизменным и позволяет получить показания, не зависящие от внешнего магнитного поля.

Для статического равновесия необходимо соблюдать равенство

$$M_1 = M_2; \quad (42)$$

или

$$\frac{1}{2} \cdot I_1^2 \cdot \frac{dL_1}{d\alpha} = \frac{1}{2} \cdot I_2^2 \cdot \frac{dL_2}{d\alpha}; \quad (43)$$

Рассмотрев уравнение относительно токов уравнение соотношения сил действующих в катушках

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{dL_2}{d\alpha}}{\frac{dL_1}{d\alpha}} = F(\alpha); \quad (44)$$

Конструкция используется только для лабораторных приборов образцовых классов точности.

Достоинства: большая перегрузочная способность, большой верхний предел для непосредственных измерений.

Недостатки: большое собственное потребление энергии, ограниченное климатическое исполнение, сложность конструкции, дороговизна, требовательность к условиям эксплуатации.

## 2.11 ЛОГОМЕТРЫ

В общем случае логометр измеряет отношение двух величин (logos – отношение). Логометрами считаются конструкции, в которых отсутствуют устройства создающие механический противодействующий момент. Положение подвижной части зависит от соотношения величин моментов вращения возникающих в рамках под действием измеряемых величин.

Конструктивно логометры могут быть выполнены на базе магнитоэлектрического (рис.2.23.а), электродинамического (рис.2.23.б) и ферродинамического приборов.

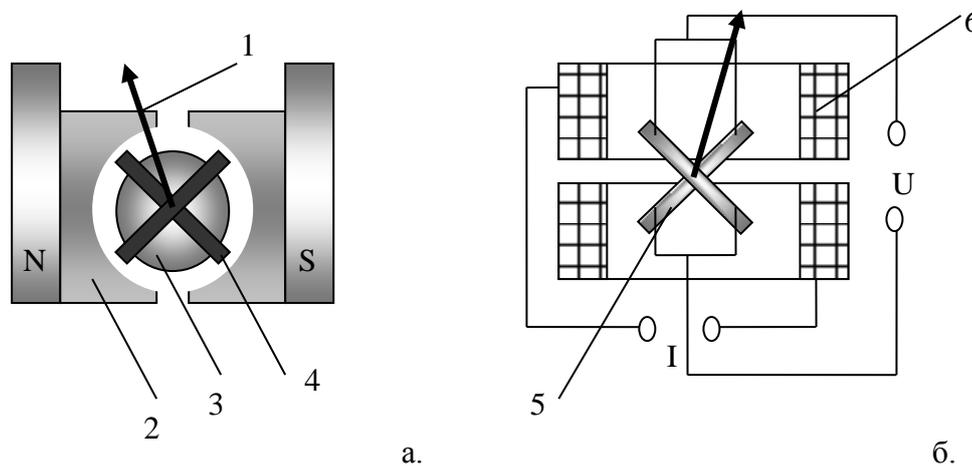


Рисунок 2.23 – Конструкция магнитоэлектрического а. и электродинамического логометров

1 – стрелка, 2 – полюсные наконечники, 3 – сердечник, 4 – подвижная рамка, 5 – катушка напряжения, 6 – катушка тока

### Логометры магнитоэлектрической конструкции

В неравномерное магнитное поле постоянного магнита (рис.2.23.а) помещается подвижная часть измерительного механизма, содержащая две рамки 4, жестко скрепленные под углом  $30 \div 90^\circ$  и насаженные на общую ось. Точки к катушкам подводят через "безмоментные" проводники. Поэтому подвижная часть прибора при отсутствии тока в катушках занимает произвольное положение. Различают с несимметричной выточкой полюсов и эллипсовидным неподвижным сердечником. Такая конструкция позволяет создать некоторую неравномерность магнитного поля, которая создает неравные моменты вращения в обмотках.

Направление токов  $I_1$  и  $I_2$  в обмотках катушек выбирают так, чтобы моменты  $M_1$  и  $M_2$  были направлены в противоположные стороны. Поле в воздушном зазоре неоднородно, так как сердечник и полюсные наконечники не концентричны. Поэтому моменты, создаваемые токами в обмотках катушек, при повороте подвижной части изменяются неодинаково.

$$\begin{aligned} M_1 &= B_1 s_1 \omega_1 I_1, \\ M_2 &= B_2 s_2 \omega_2 I_2 \end{aligned} \quad (45)$$

Максимальные значения моментов будут сдвинуты относительно друг друга на угол между плоскостями рамок. Это обстоятельство позволяет получить при повороте подвижной части уменьшение момента  $M_1$  при увеличении момента  $M_2$  или наоборот. Так как магнитная индукция  $B_1=f_1(\alpha)$  и  $B_2=f_2(\alpha)$ , то при установившемся значении

$$B_1 s_1 \omega_1 I_1 = B_2 s_2 \omega_2 I_2; \quad (46)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{f_2(\alpha)}{f_1(\alpha)}, \quad (47)$$

Соответственно угол поворота подвижной части

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right); \quad (48)$$

Источниками погрешности логометров служат неодинаковое выполнение двух воспринимающих элементов, наличие в логометрах дополни-

тельных моментов  $M_g$  (от трения в опорах, "безмоментных" подводов, неуравновешенности подвижной части).

### Логометры электродинамической конструкции

Рассмотрим моменты, действующие в электродинамическом логометре. При наличии двух жестко связанных рамок возникают моменты, зависящие от угла между ними.

$$\dot{I}_1 = I \cdot I_1 \cdot \cos(I \wedge I_1) \cdot \cos\alpha \cdot \frac{dM_A}{d\alpha}; \quad (49)$$

$$\dot{I}_1 = I \cdot I_2 \cdot \cos(I \wedge I_2) \cdot \cos(\gamma - \alpha) \cdot \frac{dM_A}{d\alpha}; \quad (50)$$

где  $I_1, I_2$  – токи протекающие в катушках;

$I$  - ток в последовательной и согласно включенных катушках.

При условии если катушки выполнены в соответствии с равенством

$$\frac{dM_A}{d\alpha} = \frac{dM_B}{d\alpha}; \quad (51)$$

То соблюдается равенство углов

$$\frac{I_1 \cdot \cos(I \wedge I_1)}{I_2 \cdot \cos(I \wedge I_2)} = \frac{\cos(\gamma - \alpha)}{\cos\alpha}; \quad (52)$$

Отсутствие металлических деталей позволяет отбросить потери на гистерезис и вихревые токи.

## 2.12 ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

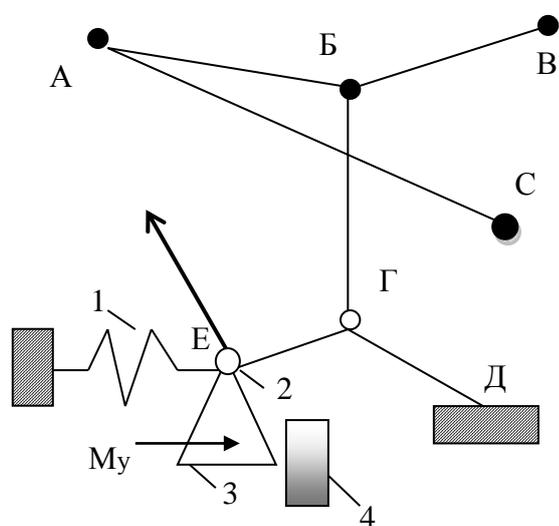


Рисунок 2.24 - Термоэлектрический прибор с нагреваемой нитью

Принцип действия измерительного прибора основан на преобразовании тепла выделенного под действием электрического тока во вращающий момент при помощи удлинения платиновой нити. (рис.2.24)

Электрический ток протекает по платиноиридиевой проволоке АБВ (длина 100-160 мм, диаметр 0,03-0,05 мм) и нагревает ее. Проволока удлиняется, и шелковая нить ЕГ под действием пружины 1 натягивается, поворачивая ролик 2 с жестко закрепленной стрелкой. Проволока БГД неподвижна и служит в качестве противовеса. Момент успокоения создается подвижным сегментом 3 и постоянным магнитом 4. Момент успокоения формируется перемещением подвижного сегмента между полюсами подковообразного магнита. В подвижном сегменте магнитное поле индуцирует вихревые токи, которые взаимодействуя с магнитным полем магнита, быстро успокаивают подвижную часть прибора. Отрезок проволоки АС служит температурным компенсатором и выполняется из проволоки с тем же температурным коэффициентом, что и платиноиридиевая проволока.

Момент вращения создается стальной пружиной действующей на ролик, а момент, противодействующий упругими свойствами проволоки АБВ. Количество выделенного тепла в проволоке

$$Q = I^2 \cdot r ; \quad (53)$$

где  $I$  – ток протекающий по проволоке, А;

$r$  – сопротивление проволоки, Ом.

Удлинение проволоки

$$\Delta I = k_1 \cdot I^2; \quad (54)$$

где  $k_1$  – коэффициент пропорциональности, А.

Шкала прибора квадратичная. Точность прибора невысока в пределах 1,5-2%.

Достоинства: работает в цепях постоянного и переменного тока, показания не зависят от частоты сети.

Недостатки: малая чувствительность, большое собственное потребление мощности до 30 Вт, малая точность, дороговизна, недостаточная прочность, высокая температурная зависимость, малая перегрузочная способность.

В настоящее время приборы сняты с производства и заменены термоэлектрическими с преобразователями.

### 3 РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ АНАЛОГОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Для расширения пределов измерения на постоянном токе совместно с аналоговыми приборами используются шунты и добавочные сопротивления. На переменном токе трансформаторы тока, трансформаторы напряжения и добавочные сопротивления.

#### 3.1 ШУНТЫ

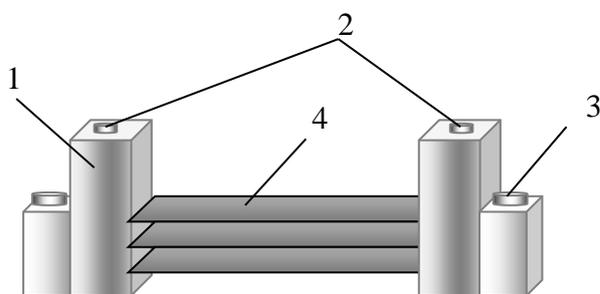


Рисунок 3.1 - Шунт

1 – медная колодка, 2 – измерительные контакты, 3 – проходные контакты, 4 – медные пластины

Шунт представляет собой сопротивление, включаемое параллельно с измерительным механизмом, используется совместно с амперметрами либо в последовательных цепях приборов электродинамической и ферродинамической системы.

Цепь, в которой необходимо провести измерения подключают к проходным контактам 3 (рис.3.1), а измерительный прибор к контактам 2.

Схема замещения шунта приведена на рисунке 3.2. В соответствии с первым законом Кирхгофа ток делится на две части: ток измерительного механизма и ток шунта. Ток шунта протекает через медные пластины и нагревает их.

$$I = I_{\text{ш}} + I_0; \quad (55)$$

Так как внутреннее сопротивление амперметра достаточно мало, то при прохождении большого тока прибор выйдет из строя. Сопротивление шунта должно быть рассчитано таким образом, что бы ток измерительного механизма  $I_0$  был не более оговоренного в паспорте прибора.

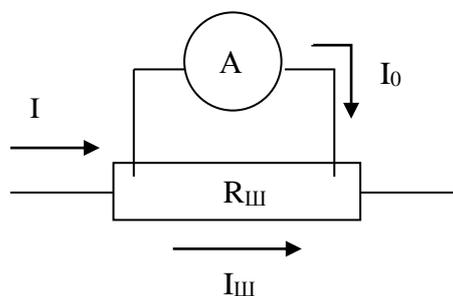


Рисунок 3.2 – Схема замещения шунта

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_0}{n - 1}; \quad (56)$$

где  $R_0$  – внутреннее сопротивление измерительного прибора;

$n$  - коэффициент шунтирования.

$$n = \frac{I'}{I_0}; \quad (57)$$

где  $I'$  – величина до которого необходимо расширить предел измерения прибора.

Конструктивно шунты выполняются внутренние (встроенными в корпус прибора) и внешние. Внешние шунты калибруются с определенным значением номинального тока и напряжения, а тем же имеют классом точности от 0.02 до 1.0.

Введение в измерительную цепь дополнительного звена (шунта) вносит дополнительную погрешность, которая обусловлена неточностью изготовления и разным температурным коэффициентом сопротивления катушки измерительного механизма и шунта.

Использование шунта в цепях переменного тока затруднено так как при этом в пластинах повышается падение напряжения из-за повышения сопротивления, что приводит к увеличению размеров и потребляемой мощности.

### Задачи для самостоятельного решения

#### Пример

Определите сопротивление шунта и ток, протекающий через него к миллиамперметру, если ток полного отклонения рамки 50 мА, внутреннее сопротивление 1,5 Ом. Предел для расширения 10 А.

#### Решение

Максимальное напряжение, приложенное к измерительному механизму

$$U_{\max 0} = I_0 \cdot r_0$$

$$U_{\max 0} = 50 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 = 75 \cdot 10^{-3} \text{ В}$$

Ток, протекающий через шунт

$$I_{\text{ш}} = I - I_0$$

$$I_{\text{ш}} = 10 - 50 \cdot 10^{-3} = 9,95 \text{ А}$$

Сопротивление шунта

$$r_{\text{ш}} = \frac{U_{\max 0}}{I_{\text{ш}}}$$

$$r_{\text{ш}} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{9,95} = 0,007537 \text{ Ом}$$

**Задача 1.** Для расширения предела измерения магнитоэлектрического амперметра используется шунт. Рассчитать сопротивление его ступеней если необходимо измерить при номинальном значении тока 5 А, ток величиной 10, 20, 30 А. Внутреннее сопротивление прибора 10.1 Ом, ток измерительного механизма 0,1 А.

**Задача 2.** Определите сопротивление шунта магнитоэлектрического вольтметра имеющего внутреннее сопротивление 2.78 Ом, ток полного отклонения 26 мА для получения амперметра на 25 А.

**Задача 3.** Чему должно быть равно сопротивление шунта подключенного к миллиамперметру с током полного отклонения 750 мА, если необходимо полу-

чить предел измерения 30 А. Внутренне сопротивление измерительного механизма 0,5 Ом.

**Задача 4.** Каким образом из магнитоэлектрического вольтметра на предел измерения 1.5 В и добавочным сопротивлением 145 Ом при сопротивлении рамки измерительного механизма 5 Ом можно выполнить амперметр с пределом измерения 1 А. Составьте схему включения.

**Задача 5.** Рассчитать многопредельный шунт к измерительному механизму типа М340 на пределы измерения 7.5, 15, 30 А. Если сопротивление рамки 0,38 Ом, сопротивление двух пружин 0,92 Ом, Для уменьшения температурной погрешности включено добавочное сопротивление 1,2 Ом. При включении шунта падение напряжения на любом из пределов не более 50 мВ.

### 3.2 ДОБАВОЧНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

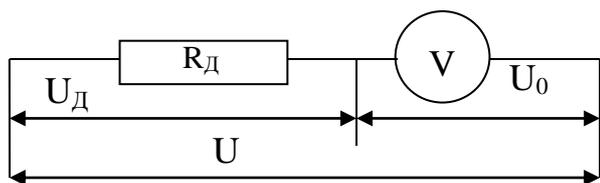


Рисунок 3.3– Схема замещения добавочного сопротивления

Добавочные сопротивления представляет собой измерительный преобразователь, применяемый для расширения пределов измерения вольтметров или параллельных цепей приборов электродинамической, ферродинамической и других систем приборов, а так же в качестве температурной компенсации. Добавочное сопротивление включается в цепь последовательно измерительному механизму (рис.3.3).

В соответствии со вторым законом Кирхгоффа для добавочного сопротивления можно составить следующее уравнение:

$$U = U_d + U_0; \quad (58)$$

где  $U$  – измеряемое напряжение;

$U_d$  - напряжение на добавочном сопротивлении;

$U_0$  - напряжение на измерительном механизме.

Сопротивление добавочного резистора составит

$$R_{\text{д}} = R_0(m - 1) \quad (59)$$

где  $m$  – коэффициент добавочного сопротивления.

$$m = \frac{U'}{U_0}; \quad (60)$$

Добавочные сопротивления, так же как и шунты выполняются внутренними и наружными с классом точности от 0.02 до 1.0.

### Задачи для самостоятельного решения

#### Пример

Для электромагнитного вольтметра с током измерительного механизма 3 мА и внутренним сопротивлением 30 кОм, определите верхний предел измерений и сопротивление добавочного резистора для расширения предела измерения до 600 В.

#### Решение

Предел измерения вольтметра

$$U = I_0 \cdot r_0$$

$$U = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot 10^3 = 90 \text{ В}$$

Сопротивление добавочного резистора

$$r_{\text{д}} = \frac{U'}{I_0} - r_0$$

$$r_{\text{д}} = \frac{600}{3 \cdot 10^{-3}} - 30 \cdot 10^3 = 170 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

Предел измерения составит 90 В, а величина добавочного сопротивления 170 кОм.

**Задача 1.** Определите какое необходимо иметь сопротивление добавочного резистора к электродинамическому вольтметру с верхним пределом 100 В и внутренним сопротивлением 4 кОм, что бы расширить предел измерения в 3 раза.

**Задача 2.** Вольтметр постоянного напряжения с пределом измерения 3 В имеет внутреннее сопротивление 400 Ом. Определите сопротивление доба-

вочных резисторов, которые необходимо подключить к вольтметру, что бы расширить предел измерения до 15 и 75 В. Найдите ток полного отклонения указателя и зарисуйте схему включения.

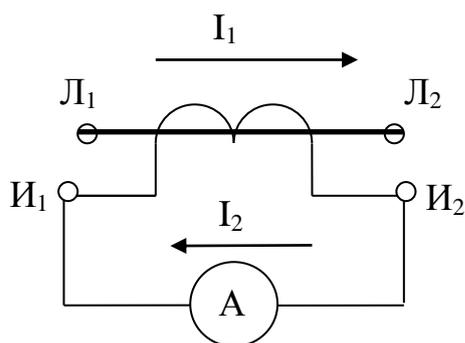
**Задача 3.** У вольтметра электродинамической системы с пределом 300 В и внутренним сопротивлением 30 кОм, необходимо расширить предел измерения до 1500 В. Определите величину добавочного сопротивления и потребляемую прибором мощность на собственные нужды до и после включения добавочного сопротивления.

**Задача 4.** Определите необходимое сопротивление шунта амперметра на 0,1 А с внутренним сопротивлением измерительного механизма 2 Ом и величину добавочного сопротивления для изготовления вольтметра на предел 150 В с внутренним сопротивлением 25 Ом. При условии, что необходимо измерить ток до 10 А, а напряжение до 150 В.

**Задача 5.** Магнитоэлектрический прибор с пределом измерений 100 В и внутренним сопротивлением 10 кОм имеет шкалу с числом делений 100. Определите цену деления вольтметра, если его включать с добавочным сопротивлением 30 кОм.

### 3.3 ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА

Используются в цепях переменного тока для преобразования больших токов в относительно малые (5 и 2.5 А) допустимые для измерения аналоговыми измерительными приборами. Режим работы трансформатора тока



(рис.3.4) близок к короткому замыканию. Позволяют разделить измерительную цепь и силовую, что повышает безопасность.

Обладают рядом нормируемых характеристик:

Рисунок 3.4 – Измерительный трансформатор тока

- класс точности от 0.05 до 1.0.
- сопротивление нагрузки от 0.2 до 2.0 Ом.
- основная рабочая частота 50 Гц редко от 400 до 1000 Гц.
- номинальный ток первичной обмотки от 5 до 15000 А.

Первичная обмотка трансформатора подключается к сети, во вторичную обмотку подключается амперметр.

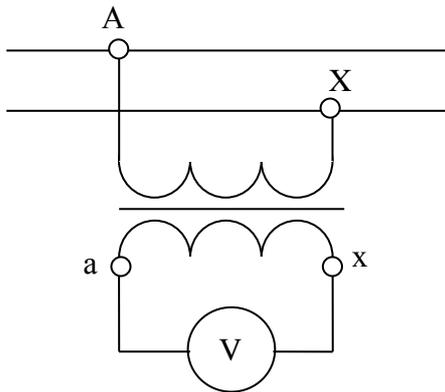


Рисунок 3.5 – Трансформатор напряжения

Трансформатор тока выполняется из листов электротехнической стали с намотанной первичной и вторичной обмотками.

Первичная обмотка подключается последовательно в силовую цепь, выполняется из медного провода (шины) и может иметь один виток при токе 300 А и выше.

Вторичная обмотка подключается последовательно с амперметром либо с последовательными цепями других приборов (фазометров, ваттметров и т.д.). Выполняется тонким медным проводом на токи до 5 А. В трансформаторе тока соблюдается соотношение количества витков  $\omega_1 < \omega_2$ .

Основной характеристикой трансформаторов тока является коэффициент трансформации.

$$k_1 = \frac{I_1}{I_2}; \quad (61)$$

где  $I_1$  – ток первичной обмотки трансформатора;

$I_2$  – ток вторичной обмотки трансформатора.

Для получения показаний характеризующих первичную цепь достаточно помножить показания амперметра на коэффициент трансформации.

Коэффициент трансформации определяется для двух режимов. Номинального, в нормальных условиях работы и при номинальной нагрузке (ука-

зывается в паспорте), а тек же действительного в условиях, отличающихся от нормальных.

Отличие от нормальных условия работы трансформатора приводят к возникновению погрешностей:

- погрешности тока.
- угловой погрешности.

Для трансформаторов тока предусмотрены следующие классы точности от 0.05 до 0.2.

### 3.4 ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

Используются в цепях переменного тока для преобразования больших напряжений в малые. Трансформатор напряжения (рис.3.5) включается параллельно к исследуемой цепи, во вторичную обмотку включаются приборы с большим сопротивлением (вольтметр, параллельные обмотки ваттметров, варметров и т.д.). Режим работы близок к холостому ходу.

Для трансформаторов напряжения характерно следующее соотношение числа витков первичной и вторичной обмотки.

$$\omega_1 > \omega_2$$

Трансформаторы напряжения обладают рядом нормируемых характеристик:

- класс точности от 0.2 до 3.0.
- полная мощность нагрузки, включенной во вторичную цепь до 15 ВА.
- напряжение вторичной цепи 100, 250 В.
- номинальное напряжение первичной обмотки от 3000 до 15000 В.

Погрешность трансформатора обусловлена влиянием нагрузки, напряжения первичной цепи, конструктивных особенностей. Главным образом погрешность зависит от активного сопротивления обмоток.

Основной характеристикой трансформаторов напряжения является коэффициент трансформации.

$$k_U = \frac{U_1}{U_2} \quad (62)$$

где  $U_1$  – напряжение первичной обмотки трансформатора;

$U_2$  – напряжение вторичной обмотки трансформатора.

Для получения показаний характеризующих первичную цепь достаточно помножить показания вольтметра на коэффициент трансформации.

### Задачи для самостоятельного решения

#### Пример

Определите значение напряжения приложенного к вольтметру включенному во вторичную обмотку трансформатора напряжения с номинальным коэффициентом трансформации 300/100. Вольтметр показал 2400 В. Погрешностью вольтметра пренебречь.

#### Решение

Напряжение, приложенное к вольтметру на вторичной обмотке

$$U_2 = U_1 \cdot k_U$$

$$U_2 = 2400 \cdot \frac{3000}{100} = 80 \text{ В}$$

**Задача 1.** Амперметр Д533/2 с двумя пределами 2.5 и 5 А и односторонней шкалой на 50 делений включен во вторичную цепь трансформатора тока типа И515. Определите цену деления амперметра, если коэффициент трансформации составит 50/5.

**Задача 2.** В цепь переменного включен ваттметр на ток 5 А и напряжением 300 В. Шкала имеет 150 делений. Прибор подключается к трансформатору тока с коэффициентом трансформации 200/5 и трансформатору напряжения с коэффициентом 6000/100. Определите потребляемую мощность если показания ваттметра 53 деления. Покажите схему включения измерительных приборов.

**Задача 3.** Электромагнитный вольтметр включен во вторичную цепь трансформатора напряжения с коэффициентом трансформации 10000/100. Определите показания вольтметра если напряжение первичной цепи 7500 В, ко-

личество делений шкалы 150, прибор имеет равномерную шкалу, начало отсчета с 20 делений.

**Задача 4.** Определите возможные пределы первичного тока, если показания в нормальных условиях амперметра с классом точности 1,5 включенного во вторичную цепь трансформатора тока с коэффициентом трансформации 100/5 составили 4 А. Амперметр имеет верхний предел измерений 5 А.

**Задача 5.** Определите показания амперметра включенного во вторичную цепь трансформатора

тока, если номинальный коэффициент трансформации 100/5, первичный ток 80 А.

## 4 ЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

### 4.1 ЭЛЕКТРОННЫЕ ВОЛЬТМЕТРЫ И ОММЕТРЫ

Кроме измерительных приборов, основанных на преобразовании измеряемой величины в механическую, так же используются электронные приборы. Условно электронные приборы делятся на три группы: приборы для измерения характеристик электрических величин, для измерения параметров электрических величин, источники электрических сигналов различного уровня.

Электронные приборы выполняются на основе двух методов:

- метод сравнения
- метод прямого действия

#### Метод сравнения (рис.4.1)

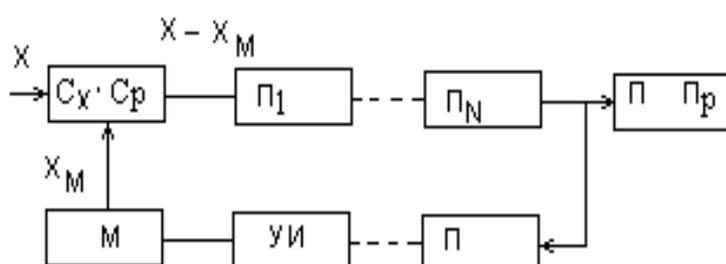


Рисунок 4.1 - Структурная схема метода

В соответствии со структурной схемой измеряемая величина  $X$  и воспроизведенная мерой величина сравнения  $X_M$  подаются на

блок сравнения  $S_X$ . Цепь прямого преобразования  $\Pi_1 - \Pi_N$  обеспечивает передачу сигнала измерительной информации ( $X - X_M$ ) к регистрирующему устройству  $\Pi_p$ , а цепь обратной связи обеспечивает изменение величины  $X_M$ .

#### Метод прямого действия (рис.4.2)

Измерительная цепь  $\Pi_1 - \Pi_N$  преобразующих элементов, преобразует сигнал измерительной информации, которая подается на измерительный механизм или регистрирующее устройство  $\Pi_p$ .

Основные узлы схемы, преобразователи – представляют собой нелинейные элементы. Протекающий по ним ток содержит постоянную составляющую несущую информацию о величине измеряемого сигнала и составляющие частот кратные частоте измеряемого сигнала. Технически проще выделить постоянную составляющую сигнала, которая связана функциональной зависимостью с измеряемым напряжением.

В этом случае последовательность преобразования следующая: преобразование измеряемого напряжения на нелинейном элементе, выделение постоянной составляющей, усиление, измерение с помощью показывающего прибора.

В качестве нелинейных элементов используют три типа преобразователей:

1. Нелинейный элемент с квадратичной характеристикой. Применяются для измерения действующего значения напряжения. Такие вольтметры называются квадратичными.



Рисунок 4.2 - Структурная схема прямого метода

$$I_{CP} = \frac{1}{T} \int_0^T i dt, \quad (74)$$

где  $I_{CP}$  – ток, протекающий по измерительной цепи, А;

$T$  – период исследуемого сигнала;

$i$  – мгновенное значение тока за исследуемый период,  $A$ .

2. Нелинейные элементы с линейным участком характеристики. Используют двухполупериодное выпрямление. Постоянная составляющая пропорциональна средневыпрямленному значению напряжения. Зависимость тока от напряжения близка к линейной. Вольтметры называются линейными.
3. Нелинейный элемент с устройством памяти. Используют для регистрации пиковых значений измеряемой величины. Измеряют не постоянную составляющую, а пиковое значение. Может быть отградуирован как для амплитудных значений, так и для действующий (для синусоиды).

Для усиления сигнала используют усилитель постоянного и переменного напряжения. Вольтметры, имеющие усилители работают в узком частотном

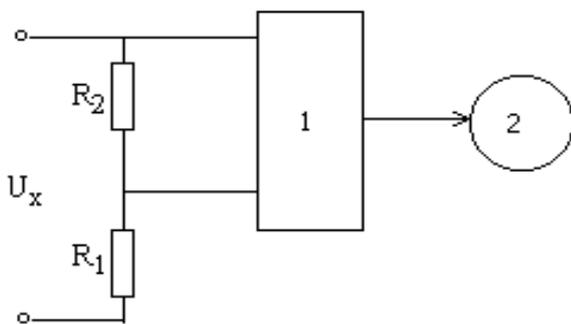


Рисунок 4.3 - Структурная схема электронного вольтметра

диапазоне, не имеющие их менее чувствительны, но рабочий диапазон частот шире.

Отсчет измеряемого значения производится по стрелочному прибору или с помощью цифрового устройства.

Структурная схема электронного вольтметра состоит из двух основных блоков (рис.4.3). Неизвестное напряжение через добавочное сопротивление  $R_1$  и  $R_2$  поступает на вход усилителя 1, где усиливается до необходимого уровня. Выходной ток с усилителя постоянного тока поступает на измерительный механизм 2 магнитоэлектрического прибора. Так как коэффициент усиления носит линейный характер, то угол поворота подвижной части составит:

$$\alpha = k \cdot U_d, \quad (75)$$

где  $\alpha$  - угол поворота подвижной части, град;

$k$  – коэффициент усиления;

$U_d$  – действующее значение напряжения, В.

По измеряемой величине электронные вольтметры можно разделить на три типа:

- напряжение постоянного тока;
- напряжение переменного тока;
- сопротивление (омметр).

Электронный вольтметр для измерения переменного тока может, структурно выполняться на двух схемах преобразования.

- детектор-усилитель – неизвестное напряжение сначала преобразовывается, а затем усиливается. Схема имеет более узкий диапазон частот и большую точность.
- усилитель-детектор – имеет более широкий частотный диапазон, при небольшой точности. Неизвестное напряжение усиливается и затем преобразовывается.

Вращающий момент и угол поворота стрелки пропорционален среднему значению измеряемого напряжения. Электронные вольтметры как более чувствительные применяются в цепях с малой мощностью.

Достоинства: высокая чувствительность, независимость показаний от частоты и формы кривой, малая мощность потерь, большое входное сопротивление

Недостатки: невысокая точность, наличие дополнительного блока питания, необходимость новой градуировки при замене лампы.

## 4.2 ЭЛЕКТРОННЫЙ ОСЦИЛОГРАФ

Одним из электронных измерительных приборов является осциллограф. Осциллограф – это универсальный измерительный прибор, предназначенный для наблюдения, исследования и фотографирования разнообразных электрических процессов, графически воспроизводимых на экране электроннолуче-

вой трубки. Прибор позволяет оценить исследуемый параметр как качественно, так и количественно.

Существует несколько разновидностей осциллографов.

1. Универсальные (реального времени) – позволяют исследовать процесс длительностью от наносекунд до нескольких секунд. Полоса пропускания 300-400 МГц. Изображение на экране появляется практически одновременно с началом исследуемого процесса. Выполняются со сменными блоками, увеличивающими их функциональность.
2. Скоростные (реального времени) – предназначены для рассмотрения быстротекущих процессов. Используется специальная электронная трубка бегущей волны. Обладают небольшой чувствительностью. Позволяет регистрировать одиночные и повторяющиеся сигналы.
3. Стробоскопические – исследуют повторяющиеся кратковременные процессы. Осуществляют преобразование временного интервала и отличаются высокой чувствительностью и широкой до 18 ГГц рабочей полосой.
4. Запоминающие – из-за особого устройства электронно-лучевой трубки обладают способностью сохранять и воспроизводить в течении длительного времени изображение сигнала после его исчезновения на входе. Основное назначение исследование однократных и редко повторяющихся процессов. Обладают расширенными функциональными возможностями.
5. Специальные - относятся осциллографы с дополнительными блоками особого назначения, а так же телевизионные и цифровые позволяющие получить сигнал в цифровой форме и передать его для дальнейшей обработки на ЭВМ.

Основным элементом конструкции осциллографа является электронно-лучевая трубка (ЭЛТ), она является термоэлектронным прибором. Состоит из трех основных элементов (рис.4.4).

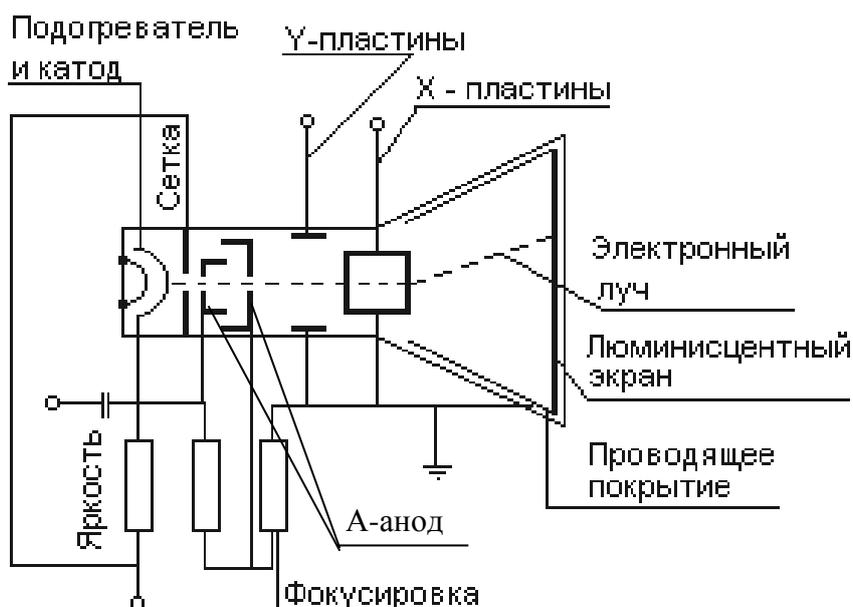


Рисунок 4.4 - Устройство электронно-лучевой трубки

1. Электронная пушка – используется как источник электронного луча. Включает в себя подогреватель, катод.
2. Отклоняющая система - может быть электростатической или магнитной. Включает сетку, X-пластины, Y- пластины, анод.
3. Люминесцентный экран – испускает излучение оптического диапазона при попадании на него электронного луча. Включает люминесцентный экран, проводящее покрытие.

При разогреве катод испускает электроны и они направляются в сторону люминесцентного экрана проходя по пути следования между пластинами анода А на которые подается положительное относительно катода напряжение. Мощность потока электронов регулируется сеткой, на которую подается отрицательное напряжение. При прохождении второго анода поток электронов приобретает еще большую фокусировку. Разность потенциалов между первым и вторым анодом подбирается таким образом, что бы на экране возникло четко сфокусированное пятно. Оба анода образуют электронную линзу. При использовании магнитного поля для фокусировки луча принцип настройки остается тот же.

Пройдя через аноды электронный луч, направляется между двумя парами отклоняющих пластин X и Y, которые придают ему вертикальное или



Для гашения обратного хода луча используется кнопка 7 и блок 15 или генератором развертки 14 вырабатывается отрицательный импульс. Яркость модулируется генератором 13, блок так же называется генератором меток или масштаба времени.

Для использования современного цифрового отсчета к приведенной на рисунке 4.4 схеме осциллографа, добавляется дополнительный цифровой блок который, позволяет повысить точность, быстродействие и удешевить конструкцию осциллографа.

Сигнал, поступающий с входов X и Y, кодируется в АЦП и поступает в память для обработки и коррекции. Обработанные данные сохраняются в ПЗУ или ОЗУ. После цифро-аналоговой обработки полученный сигнал поступает на электронно-лучевую трубку и выводится на экране осциллографа.

Для более точного снятия показаний необходимо знать некоторые величины, характеризующие точность осциллографов.

Чувствительность ЭЛТ по напряжению S - это величина смещения светового пятна при изменении напряжения на 1 В. Значение лежит в пределах от 0,1 до 1 мм/В

$$S = \frac{l \cdot L}{a \cdot 2 \cdot U_A}, \quad (76)$$

где  $l$  – длина пластины, мм;

$L$  – расстояние от пластины до экрана, мм;

$a$  – расстояние между пластинами, мм;

$U_A$  – напряжение между пластинами, В.

Чувствительность зависит в основном от расстояния между отклоняющими пластинами и для ее увеличения достаточно его уменьшить. Однако при этом возрастает опасность перехвата электронов положительно заряженными пластинами. Для исключения этого явления пластины располагаются под некоторым углом друг к другу.

При использовании осциллографа в качестве вольтметра о величине по-  
данного напряжения судят по отклонению электронного луча. Она будет  
равна двойной амплитуде подаваемого напряжения

$$U_M = \frac{l}{2 \cdot S}, \quad (77)$$

где  $l$  – длина линии на экране осциллографа, мм.

Осциллограф можно использовать в качестве вольтметра в большом ча-  
стотном диапазоне, но так как ЭЛТ имеет малую чувствительность, то вели-  
чина напряжения должна лежать в пределе от 10 В и выше.

Смещение светового пятна на экране  $h$  – показывает величину переме-  
щения светового пятна под действием приложенного напряжения.

$$h = \frac{l''}{2 \times a} \cdot \left(L + \frac{l''}{2}\right) \cdot \frac{l''}{U_x} \cdot u, \quad (78)$$

где  $l''$  – расстояние, которое проходит электрон в электрическом поле пла-  
стин, мм;

$U_x$  – напряжение на втором аноде, В;

$u$  – мгновенное значение разности потенциалов между пластина-  
ми, В.

Осциллограф может быть использован как универсальный измеритель-  
ный прибор, которым можно измерить большинство электрических величин  
влияющих на отклонение

## Лабораторная работа № 5

### Применение электронного осциллографа для измерения электрических величин

**Цель работы:** Изучить устройство и принцип действия электронного ос-  
циллографа. Измерить электрические величины.

**Приборы:** аналоговый осциллограф, генератор звуковых колебаний, ЛАТР, образцовая катушка сопротивления, генератор несинусоидального сигнала.

### Ход работы

#### Измерение переменного напряжения

1. Соберите схему, представленную на рисунке 4.5, и покажите ее преподавателю.

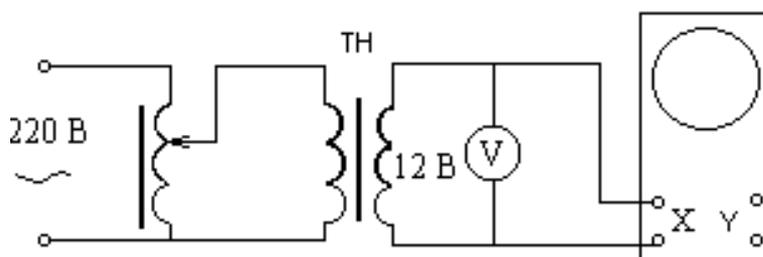


Рисунок 4.5 - Схема измерения значения напряжения

2. Подайте на вход X или Y напряжение в пределах от 5 до 10 В. Установите переключатель «1; П; ПООЧЕР.; ПРЕР.; СУММ.» в требуемый режим работы.
3. Установите переключатель «⊥, ~, ≡» в положение ~.
4. Установите максимальное отклонение исследуемого сигнала и устойчивое изображение с помощью ручек «V/ДЕЛ» и «УРОВ».
5. Согласуйте полученное изображение с осями разметки (ручки  $\updownarrow$  и  $\longleftrightarrow$ ).
7. Измерьте количество делений между крайними вертикальными точками и перемножьте его на показание переключателя «V/ДЕЛ».
8. При измерениях ручка «ПЛАВНО» должна находиться в крайнем правом положении.
9. Определите чувствительность осциллографа. Она характеризует только данное положение регулировочных тумблеров.

$$S = \frac{h}{2\sqrt{2}U_A} \cdot \quad (79)$$

- a. Получите на экране изображение синусоиды.
  - b. Включите функцию «внутр» в разделе синхронизации.
  - c. Получите на экране прямую линию, измерьте ее длину и рассчитайте максимальное напряжение и чувствительность осциллографа.
  - d. Измените, напряжение и проделайте аналогичные измерения. Проведите измерение 2 - 3 раза и занесите полученный результат в таблицу 4.1.
  - e. Постройте график характеризующий изменение чувствительности осциллографа с измерением входного сигнала.
6. Запишите полученные результаты в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 - Измерение чувствительности осциллографа

№	Напряжение поданное на вход	Количество деления	Показание переключателя «V/ДЕЛ»	S
1				
...				
n				

**Исследование характеристик одно и двух полупериодного выпрямителя, сглаживающего влияния на выпрямленный сигнал индуктивного и емкостного сопротивления**

1. Соберите схему, представленную на рисунке 4.6. Покажите ее для проверки преподавателю.
2. Подайте на вход схемы 1 - 1' питающее напряжение и получите его изображение на экране осциллографа. Совместите минимум синусоидального сигнала с горизонтальной осью.

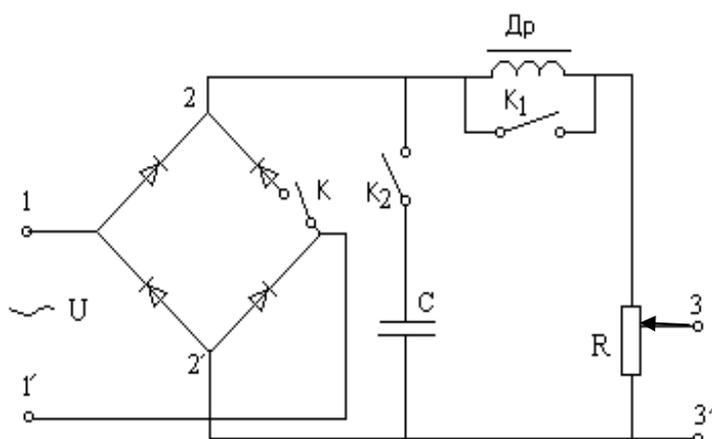


Рисунок 4.6 - Схема измерения

Зарисуйте полученное изображение, измерьте его амплитудное значение.

3. При разомкнутом контакте К перенесите щуп

осциллографа на зажимы 3 – 3' и получите изображение однополупериодного выпрямленного сигнала. Определите величину полученного напряжения и зарисуйте полученную характеристику. Рассчитайте размах пульсаций напряжения

$$\Delta U = \frac{I}{C \cdot f}, \quad (80)$$

где  $I$  – ток питающей цепи, А;  
 $C$  – емкость включенная в схему, Ф;  
 $f$  – частота переменного тока, Гц.

Среднее значение выходного напряжения

$$U_d = U_{\text{вх}} - \frac{I}{2 \cdot C \cdot f}, \quad (81)$$

где  $U_{\text{вх}}$  – напряжение приложенное ко входу схемы, В.

4. Замкните контакт К и К<sub>1</sub> и получите на экране осциллографа сигнал двух полупериодного выпрямления. Зарисуйте полученную характеристику и рассчитайте размах пульсаций полученного сигнала

$$\Delta U = \frac{I}{2 \cdot C \cdot f}. \quad (82)$$

5. Замкните контакт К<sub>2</sub> и получите на экране осциллографа сглаженную характеристику выпрямленного сигнала. Оцените влияние конденсатора на выпрямленный сигнал, зарисуйте полученную характеристику.

1. Разомкните контакт К<sub>1</sub> и оцените влияние дросселя на сглаживание выпрямленного сигнала, занесите полученное изображение в протокол выполнения лабораторной работы.

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ**

1. Охарактеризуйте явление термоэлектронной эмиссии и его применение в осциллографе.
2. При каких условиях на экране осциллографа появляется неподвижное изображение.
3. Каким образом можно увеличить чувствительность осциллографа.

4. Каким образом производится фокусировка электронного луча.
5. Объясните назначение генератора развертки.
6. Каким образом устраняется обратный ход электронного луча.
7. Каким образом на экране осциллографа образуется фигура Лиссажу.

## Лабораторная работа № 6

### Проверка электронного вольтметра

**Цель работы:** Изучить устройство и принцип действия электронного вольтметра. Научится проводить измерение напряжения и сопротивления с помощью электронного вольтметра. Изучить способы проверки электронного вольтметра.

**Приборы:** Электронный вольтметр, многопредельный образцовый вольтметр постоянного тока, многопредельный образцовый вольтметр переменного тока, набор сопротивлений.

#### Ход работы

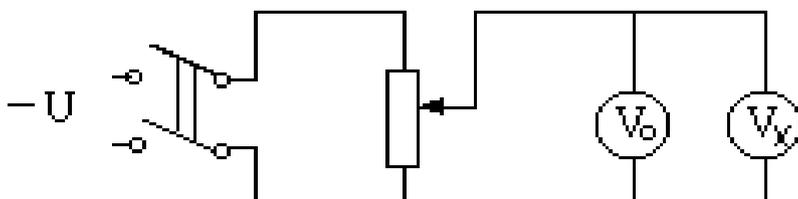


Рисунок 4.7 - Схема подключения электронного вольтметра

#### Проверка одного из пределов измерения постоянного напряжения электронного вольтметра

1. Подготовьте прибор к измерению и соберите схему, приведенную на рисунке 4.7.
  - 1.1. Измерение производится по верхней шкале прибора.
  - 1.2. Сбалансируйте усилитель постоянного тока (Поставьте ручку предела измерения напряжений в положение «0,3V», нажмите кнопку «U+»)

или «U-» в соответствии с полярностью подаваемого напряжения). Зажимы «0,3-10 U» должны быть закорочены. Ручкой «0» установите стрелку прибора на нулевое положение шкалы « V». Прибор готов к работе.

2. В соответствии с заданием преподавателя проведите поверку одного из пределов измерения прибора и занесите полученный результат в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 - Измерение постоянного напряжения

№	U <sub>Э</sub>	U <sub>0</sub> , В		U <sub>д</sub> , В	U <sub>м</sub> , В	Прямой ход		Обратн. ход		Поправка		Вариация показаний от нормирующего значения
		Пр.	Обр.			ΔU	γ	ΔU	γ	Пр	Обр.	
1												
n												

3. Выпрямление происходит через мост, т.е. двухполупериодное выпрямление. Прибор показывает величину средневыпрямленного значения

$$U_{\text{ср.в.}} = \frac{2}{\pi} \cdot U_m, \quad (83)$$

где  $U_m$  – амплитудное значение напряжения, В.

Амплитудное значение напряжения

$$U_m = \frac{\pi}{2} \cdot U_{\text{ср.в.}}. \quad (84)$$

Действующее значение напряжения

$$U_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (85)$$

Магнитоэлектрический прибор показывает действующее значение напряжения. Пересчитайте значение, показываемое электронным вольтметром, в действующее значение напряжения и занесите в таблицу 4.2.

4. Сделайте вывод, о проделанной работе сравнивая действующее значение напряжения, показываемое электронным и магнитоэлектрическим прибором. По результатам расчета постройте вариационную характеристику.

### **Измерение сопротивления электронным вольтметром**

1. Установите переключателем пределов один из пределов измерения.
2. Нажмите кнопку R и ручкой «0» установите стрелку на бесконечность по шкале для измерения сопротивления.
3. Закоротите зажимы «R<sub>x</sub>» и ручкой «0 Ω» установите на пределе нулевую отметку.
4. Подключите неизвестное напряжение к зажимам «R<sub>x</sub>» и проведите отсчет измерений по шкале прибора. Занесите полученный результат в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 - Результат измерения сопротивлений

№	Измеренные значения			Рассчитанные значения			
	R <sub>x1</sub>	R <sub>x2</sub>	R <sub>x3</sub>	R <sub>x</sub>	R <sub>H</sub>	ΔR	γ
1							
...							
n							

### **Поверка одного из пределов измерения переменного напряжения**

1. Соберите схему представленную на рисунке 4.7 используя вместо магнитоэлектрического прибора электромагнитный, а постоянное напряжение, заменив на переменное напряжение. Установите нулевое значение шкалы при помощи корректора.
2. Установите переключатель рода работы на положение «~U». Закоротите входные зажимы на пределе «1-100 V» и «\*» и установите нулевое значение шкалы ручкой «0 ≈ 1». Приступайте к проведению измерений.

3. Проведите поверку одного из пределов измерений на переменном напряжении. Занесите полученный результат в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 - Результаты поверки электронного вольтметра переменного тока

№	$U_0$	$U_{\Sigma}, В$		Прямой ход		Обратн. ход		Поправка		Вариация показаний от нормирующего значения
		Пр.	Обр.	$\Delta U$	$\gamma$	$\Delta U$	$\gamma$	Пр.	Обр.	
1										
...										
n										

5. Сделайте вывод, о проделанной работе сравнивая действующее значение напряжения, показываемое электронным и электромагнитным прибором. По результатам расчета постройте вариационную характеристику.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ

1. Какие факторы влияют на возникновение погрешности электронного вольтметра.
2. Каким образом происходит сравнение измеряемой величины при использовании для измерения метода сравнения.
3. Какие моменты, возникающие в электронном вольтметре, оказывают влияние на угол отклонения стрелки.
4. Каким образом влияет на вид шкалы тип используемого нелинейного элемента.
5. Объясните принцип действия электронного омметра.
6. Каким образом устанавливается метка «0» и «∞» в электронном омметре.
7. Объясните, какие вольтметры называются линейными.
8. Объясните необходимость наличия усилителя в составе универсального электронного вольтметра.

