

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
“Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”  
им. В.И. Ульянова (Ленина)” (СПбГЭТУ)

## **Кафедра теоретических основ радиотехники**

---

Д. М. Воскресенский, А. А. Данилин, Д. О. Москалец,  
С. И. Пышкин

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению лабораторной работы по дисциплине

“Основы метрологии и радиоизмерений”

(электронный вариант)

# **ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**

Санкт-Петербург

2025 г.

# 1 ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

*Цель работы* – изучение устройства, основных технических характеристик и способов применения электромеханических измерительных приборов магнитоэлектрической, электродинамической и электромагнитной систем.

В процессе работы измеряются значения постоянных и переменных напряжений и токов, производится косвенное измерение сопротивлений резисторов. Анализируются погрешности измерений токов. Исследуется частотная зависимость показаний электромагнитного амперметра при измерении переменного тока.

## 1.1. Краткие сведения об электромеханических измерительных приборах

Электромеханические (ЭМ) приборы применяют для измерения напряжения, тока, мощности и других электрических величин в цепях постоянного и переменного тока низкой частоты. Название электроизмерительного прибора определяется его назначением. Различают вольтметры, амперметры, ваттметры, омметры, фазометры и комбинированные приборы – ампервольтметры, вольтомметры, мультиметры и др.

По принципу действия электромеханические приборы делятся на приборы магнитоэлектрической, электродинамической, ферродинамической, электромагнитной, электростатической, индукционной и некоторых других систем, используемых реже. Принадлежность прибора к той или иной системе обозначается условным значком на его шкале (см. прил. 8).

Метрологические свойства прибора характеризуются его классом точности. Он обозначается десятичным числом на шкале прибора (например, 1,0; 2,5) и указывает предел допускаемой приведенной погрешности прибора, выраженной в процентах.

Основа электромеханического прибора – измерительный механизм (ИМ). Он включает в себя неподвижную и подвижную части, отсчетное устройство (шкалу со стрелкой), демпфер для успокоения собственных колебаний механизма. На подвижную часть ИМ действует вращающий момент, возникающий под действием измеряемых токов. Для его уравнивания используются спиральные пружинки или растяжки, создающие противодействующий момент, пропорциональный углу поворота подвижной части. ЭМ-прибор может комплектоваться шунтами и добавочными резисторами,

расширяющими возможности измерения и часто размещаемыми в том же корпусе.

### 1.1.1. Магнитоэлектрические электроизмерительные приборы

Устройство магнитоэлектрического ИМ показано на рис. 1.1. Принцип его действия – взаимодействие подвижной рамки 5, обтекаемой током, с полем постоянного магнита 1. Это поле с помощью магнитопровода 2, полюсных наконечников 3 и цилиндрического сердечника 4, изготовленных из магнитомягкого материала, концентрируется в зазоре, где движется рамка 5, соединенная полуосью 8 со стрелкой 6. Рамка 5 представляет собой легкий алюминиевый каркас, в котором при движении возникают вихревые токи, способствующие успокоению колебаний рамки. На рамке размещена обмотка с большим количеством витков тонкой проволоки, по которой протекает измеряемый ток. Он подводится к рамке через две спиральные пружинки 7, которые также создают противодействующий момент.

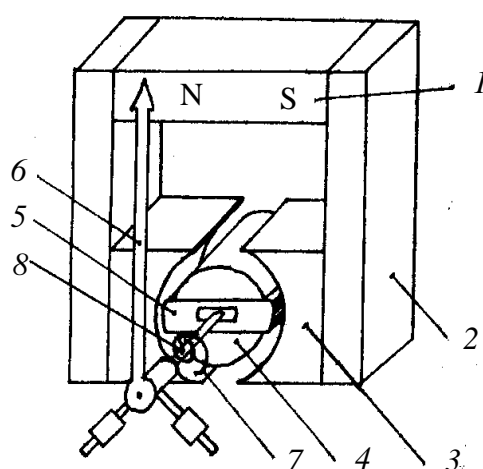


Рис. 1.1. Конструкция магнитоэлектрического измерительного механизма

При протекании по обмотке рамки постоянного тока  $I_p$  на нее действует вращающий момент

$$M_{вр} = BSnI_p, \quad (1.1)$$

где  $B$  – индукция магнитного поля в зазоре;  $S$  – площадь рамки;  $n$  – число витков обмотки рамки.

Учитывая, что противодействующий момент пружинки пропорционален углу поворота рамки, из (1.1) можно найти угол отклонения, при котором наступит равновесие подвижной части ИМ:

$$\alpha = \frac{SBn}{\mu} I_p, \quad (1.2)$$

где  $\mu$  – коэффициент упругости пружинки. Коэффициент пропорциональности между углом отклонения и силой тока называется *чувствительностью* ИМ по току. Как следует из (1.2), при равномерной индукции в зазоре чув-

ствительность магнитоэлектрического ИМ постоянна. Шкала таких приборов линейна.

Для медленно меняющегося во времени тока  $i(t)$  выражение (1.2) будет описывать связь мгновенных значений тока рамки и угла поворота рамки. Если частота изменения тока намного меньше частоты собственных механических колебаний подвижной части ИМ, то отклонение рамки определяется мгновенными значениями ее тока. Такой режим работы используют для регистрирующих приборов (например, самописцев). Если частота тока превосходит частоту собственных механических колебаний рамки, то подвижная часть прибора работает как интегратор, сглаживающий быстрые колебания рамки. В этом случае угол отклонения рамки пропорционален среднему значению тока (его постоянной составляющей):

$$I_{p0} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt,$$

где  $T$  – интервал усреднения, определяемый постоянной времени подвижной части ИМ.

*Магнитоэлектрические приборы* для измерения постоянных токов и напряжений строятся по схемам, изображенным на рис. 1.2. Прямое последовательное включение прибора в исследуемую схему используют для измерения относительно малых токов в нагрузке  $R_H$  (рис. 1.2, а). Для измерения значительных токов используют схему (рис. 1.2, б) с параллельным резистором – *шунтом*  $R_{Ш}$ , по которому течет большая часть измеряемого тока. Предел измерения тока амперметра с шунтом определяется следующим образом:

$$I_{\max} = I_{p \max} \cdot R_{Ш} / (R_{Ш} + R_p),$$

где  $R_p$  – сопротивление рамки ИМ;  $I_{p \max}$  – ток полного отклонения рамки.

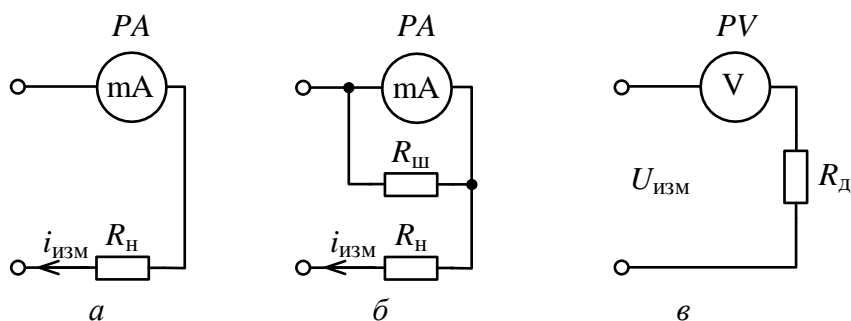


Рис. 1.2. Схемы включения магнитоэлектрических измерительных механизмов

Таким образом, для увеличения предела измеряемого тока в  $n$  раз сопротивление шунта должно быть меньше собственного сопротивления амперметра  $R_p$ :

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_p}{n-1}.$$

Для измерения магнитоэлектрическим прибором напряжения используют добавочные резисторы  $R_d$  (рис. 1.2, в). ИМ с последовательно включенным с ним добавочным резистором подключают к клеммам, на которых измеряется напряжение (параллельное включение). При этом по закону Ома предел измерения напряжения

$$U_{\text{max}} = I_{p\text{max}} \cdot (R_d + R_p). \quad (1.3)$$

Для измерения переменных токов и напряжений совместно с магнитоэлектрическим ИМ используют дополнительные диодные выпрямители. В этом случае прибор показывает средневыврямленное значение тока

$$I_{\text{св}} = \frac{1}{T} \int_0^T |i(t)| dt, \quad \alpha = \frac{SBn}{\mu} I_{\text{св}}.$$

Свойства магнитоэлектрических приборов:

измеряют мгновенное или среднее значение тока;

чувствительность постоянна по углу (линейная шкала);

в магнитоэлектрическом ИМ применяют постоянные магниты с высоким значением магнитной индукции  $B$ , что обеспечивает высокую чувствительность механизма (доли микроампера);

при большой индукции  $B$  магнитоэлектрический ИМ мало чувствителен к внешним магнитным полям. Кроме того, на магнитоэлектрический ИМ практически не действуют высокочастотные помехи;

высокая стабильность параметров магнита и пружинок обеспечивает постоянство градуировки прибора и высокую точность измерений (класс точности вплоть до 0.5).

К недостаткам приборов этой системы можно отнести сложность конструкции, относительно высокую стоимость и малую стойкость к токовым перегрузкам. Последнее обусловлено тем, что рамка ИМ, наматываемая тонким проводом, при сильных токах может перегорать.

### 1.1.2. Электродинамические электроизмерительные приборы

Устройство электродинамического ИМ поясняет рис. 1.3, а. Принцип действия его основан на взаимодействии магнитных полей токов в неподвижной и подвижной катушках (рис. 1.3, б). Неподвижную катушку 1 выполняют обычно из двух частей, между которыми проходит ось с закрепленной на ней подвижной катушкой (рамкой) 2 и стрелкой 3. Спиральная пружинка 4 служит для создания противодействующего момента и подвода тока к рамке.

Для получения зависимости угла поворота рамки электродинамического ИМ от токов, протекающих через его катушки, используют следующее обобщенное выражение вращающего момента, справедливое для всех электромеханических ИМ:

$$m_{\text{вр}} = dA / d\alpha = dW_{\text{эм}} / d\alpha, \quad (1.4)$$

где  $dA$  – работа, совершаемая при повороте рамки на угол  $d\alpha$ ;  $W_{\text{эм}}$  – энергия электромагнитного поля в ИМ. Для электродинамического ИМ

$$W_{\text{эм}} = \frac{1}{2} L_{\text{в}} i_{\text{в}}^2 + \frac{1}{2} L_{\text{р}} i_{\text{р}}^2 + M i_{\text{в}} i_{\text{р}}, \quad (1.5)$$

где  $L_{\text{в}}$  и  $L_{\text{р}}$  – индуктивности неподвижной и подвижной катушек соответственно;  $i_{\text{в}}$  и  $i_{\text{р}}$  – мгновенные значения токов, протекающих через катушки;  $M$  – взаимная индуктивность катушек.

катушек.

При вращении рамки изменение энергии электромагнитного поля происходит за счет зависимости взаимной индуктивности подвижной и неподвижной катушек от угла поворота. Используя (1.4) и (1.5), можно показать, что

$$\alpha = \frac{1}{\mu} \frac{dM}{d\alpha} \frac{1}{T} \int_0^T i_{\text{в}}(t) i_{\text{р}}(t) dt, \quad (1.6)$$

где  $\mu$  и  $T$  имеют тот же смысл, что и в (1.1) и (1.2).

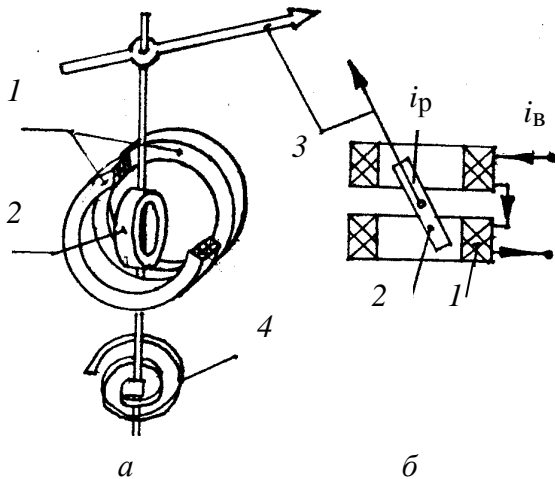


Рис. 1.3. Конструкция электродинамического измерительного механизма

Электродинамические приборы строятся по схеме с последовательным, параллельным или независимым включением катушек. Это иллюстрируется рис. 1.4 а–в, где показаны схемы вольтметра, амперметра и ваттметра.

Используя (1.6), можно показать, что для схемы вольтметра (рис. 1.4, а):

$$\alpha = \frac{1}{\mu R_D} \frac{dM}{d\alpha} U_{\text{ИЗМ}}^2,$$

где  $U_{\text{ИЗМ}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_{\text{ИЗМ}}^2(t) dt}$  – среднеквадратическое значение измеряемого

напряжения. Подбирая форму и взаимное расположение катушек, стремятся выполнить следующее условие, при котором угол отклонения рамки пропорционален  $U_{\text{ИЗМ}}$ :

$$\frac{dM}{d\alpha} U_{\text{ИЗМ}} = \text{const}.$$

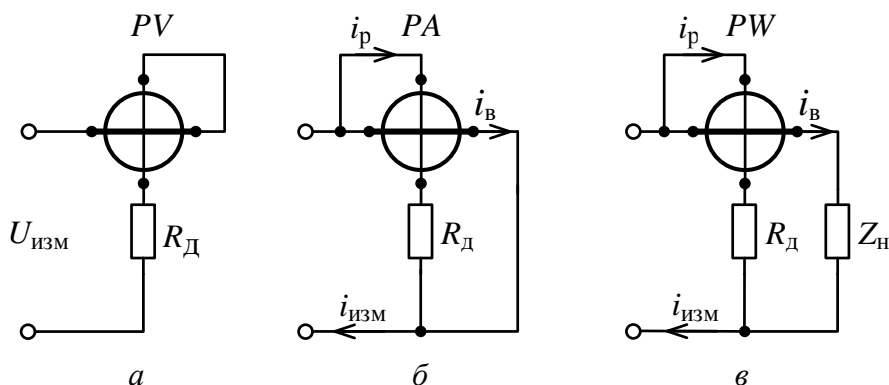


Рис. 1.4. Схемы включения электродинамических измерительных механизмов:

а – измерение напряжения; б – измерение тока; в – измерение мощности

Для схемы амперметра (рис. 1.4, б) можно таким же образом получить

$$\alpha = \frac{b}{\mu} \frac{dM}{d\alpha} I_{\text{ИЗМ}}^2, \quad (1.7)$$

где  $b = i_{\text{В}} i_{\text{Р}} / i_{\text{ИЗМ}}^2$  – постоянный коэффициент;  $I_{\text{ИЗМ}}$  – среднеквадратическое

значение измеряемого тока  $I_{\text{ИЗМ}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\text{ИЗМ}}^2(t) dt}$ . При небольших токах ка-

тушки прибора включают последовательно. В этом случае угол отклонения определяется выражением (1.7) при  $b = 1$ .

Для схемы ваттметра (рис. 1.4, в):

$$\alpha = \frac{1}{\mu R_{\text{д}}} \frac{dM}{d\alpha} P_{\text{н}}, \quad (1.8)$$

где  $P_{\text{н}}$  – активная мощность в нагрузке  $Z_{\text{н}}$ , равная произведению напряжения на ток. Из (1.8) следует, что для ваттметра шкала прибора линейна.

Свойства электродинамических приборов:

измеряют постоянные и переменные токи по одной шкале;

измеряют среднеквадратическое значение переменного тока;

можно измерять мощность (линейная шкала);

электродинамические приборы являются наиболее точными среди других приборов, поскольку в них отсутствуют ферромагнитные элементы, а, следовательно, и погрешности, связанные с нелинейностью и нестабильностью ферромагнетиков.

Недостаток электродинамических приборов (в отличие от магнитоэлектрических) – невысокая чувствительность, нелинейно зависящая от измеряемого значения. Это вызвано сложностью конструктивного увеличения параметра  $dM / d\alpha$  в системе связи катушек. Для повышения чувствительности используют *ферродинамические* ИМ, в которых в неподвижную катушку вводят ферромагнитный сердечник. К сожалению, это снижает стабильность градуировки и точность прибора. К недостаткам электродинамического механизма следует отнести низкую стойкость к токовым перегрузкам и сильное влияние внешних магнитных полей. Последнее обстоятельство требует обязательного использования ферромагнитных экранов.

### 1.1.3. Электромагнитные электроизмерительные приборы

Устройство электромагнитного ИМ показано на рис. 1.5. Работа его основана на взаимодействии подвижного ферромагнитного сердечника 2, укрепленного вместе со стрелкой 4 на оси 3, с неподвижной катушкой 1, обтекаемой током. Спиральная пружина 5 используется здесь только для создания противодействующего момента. Затухание колебаний подвижной части происходит за счет вихревых токов, возникающих в ферромагнитном сердечнике 2.

Для вывода зависимости угла поворота подвижной части такого прибора от протекающего через катушку тока можно использовать (1.3).

Учитывая, что при повороте сердечника изменение  $W_{\text{ЭМ}}$  происходит только за счет изменения индуктивности катушки  $L$ , можно показать, что

$\alpha = \frac{1}{2\mu} \frac{dL}{d\alpha} I_p^2$ , где  $I_p$  – среднееквадратическое значение тока, протекающего

через катушку. Подбирая форму подвижного сердечника, стремятся выполнить условие  $I_p dL / d\alpha = \text{const}$ , при котором угол отклонения подвижной части пропорционален среднееквадратическому значению тока в катушке (линеаризация шкалы).

Электромагнитные приборы включаются в цепь по тем же схемам, что и приборы магнитоэлектрической системы (см. рис. 1.2).

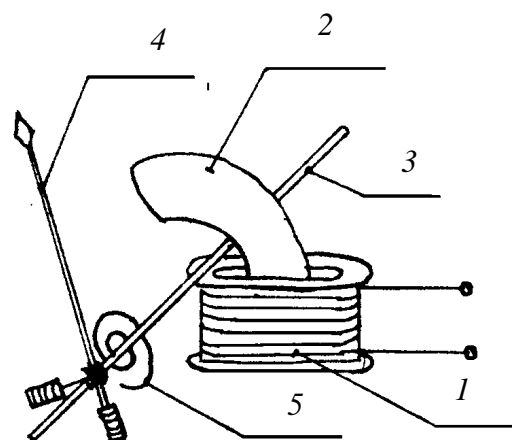


Рис. 1.5. Конструкция электромагнитного измерительного механизма

Свойства электромагнитных приборов:

- измеряют постоянные и переменные токи по одной шкале;
- измеряют среднееквадратическое значение переменного тока;
- высокая перегрузочная способность.

Основное достоинство электромагнитных приборов – простота конструкции и связанная с этим высокая надежность и низкая стоимость. Все это обусловило широкое применение электромагнитных приборов для контроля токов и напряжений в различных силовых цепях.

Существенные недостатки приборов этой системы – низкая точность из-за нестабильности свойств ферромагнетика и малая чувствительность (как и для электродинамических приборов). Сильное влияние внешних магнитных полей требует экранировки прибора.

## 1.2. Погрешности электроизмерительных приборов

Для характеристики точности электроизмерительных приборов используют приведенную погрешность, определяемую как отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению, которое принимают обычно равным конечному значению рабочей части шкалы прибора. Предел приведенной погрешности, выраженной в процентах, определяет *класс точности* прибора. Это оценка предела допускаемой погрешности сверху (при вероятности достоверности оценки, практически равной единице). Класс точности

обозначают десятичным числом (например, 1,0; 2,5 и т.д.) из ряда (1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4; 5; 6) · 10<sup>n</sup>.

Зная класс точности  $C$ , можно определить предел *относительной инструментальной* погрешности прибора, %:

$$\delta_X = CX_{\max} / X_{\text{изм}},$$

где  $X_{\max}$  – предел измерений величины  $X$ ;  $X_{\text{изм}}$  – измеренное значение этой величины. Основная составляющая инструментальной погрешности обусловлена нестабильностью градуировки из-за температурных уходов и старения деталей ИМ, трением в опорах подвижной части ИМ и другими факторами. Эта погрешность может иметь как случайную, так и систематическую составляющие.

Из-за конечного внутреннего сопротивления амперметра при включении его в цепь нарушается режим ее работы. Это вызывает *методическую* погрешность измерений. Она носит систематический характер. Так, при измерении тока в нагрузке  $R_H$  амперметром с внутренним сопротивлением  $R_p$  относительная методическая погрешность, %:

$$\delta_{I_M} = R_p / (R_p + R_H) \cdot 100\%. \quad (1.9)$$

При измерении переменных токов и напряжений приборами электродинамической и электромагнитной систем из-за влияния полного сопротивления их катушек возникает методическая погрешность, зависящая от частоты. Так, показания электромагнитного амперметра зависят от частоты  $f$  следующим образом:

$$I(f) = I_0 / \sqrt{1 + (2\pi f L_p / (R_H + R_p))^2}, \quad (1.10)$$

где  $I_0$  – показания прибора на нулевой частоте;  $L_p$  и  $R_p$  – индуктивность и активное сопротивление катушки прибора;  $R_H$  – сопротивление нагрузки, через которое протекает ток. Таким образом, влияние индуктивности катушки прибора приводит к неравномерности частотной характеристики его показаний.

### 1.3. Описание лабораторного макета

Схема лабораторного макета приведена на рис. 1.6. Макет содержит внешний образцовый электродинамический амперметр  $PA1$  и исследуемые амперметры  $PA3$  и  $PA4$  (первый из которых магнитоэлектрической, а второй

– электромагнитной системы). Для исключения амперметров из цепи предусмотрены короткозамыкающие тумблеры  $SA3$ ,  $SA5$  и  $SA6$ . Прибор  $PA2$  – магнитоэлектрической системы с шунтом  $R5$  и добавочными резисторами  $R3$ ,  $R4$ . Он используется в качестве вольтметра (переключатель  $SA2$ , положения 1...3) или, для контроля тока, как амперметр с дополнительным шунтом (положение 4). Максимальное значение показаний прибора  $PA2$  составляет  $I_{PA2max} = 100$  мкА. Выпрямительная цепочка  $VD1$ – $R1$  используется для контроля амплитуды переменного входного напряжения.

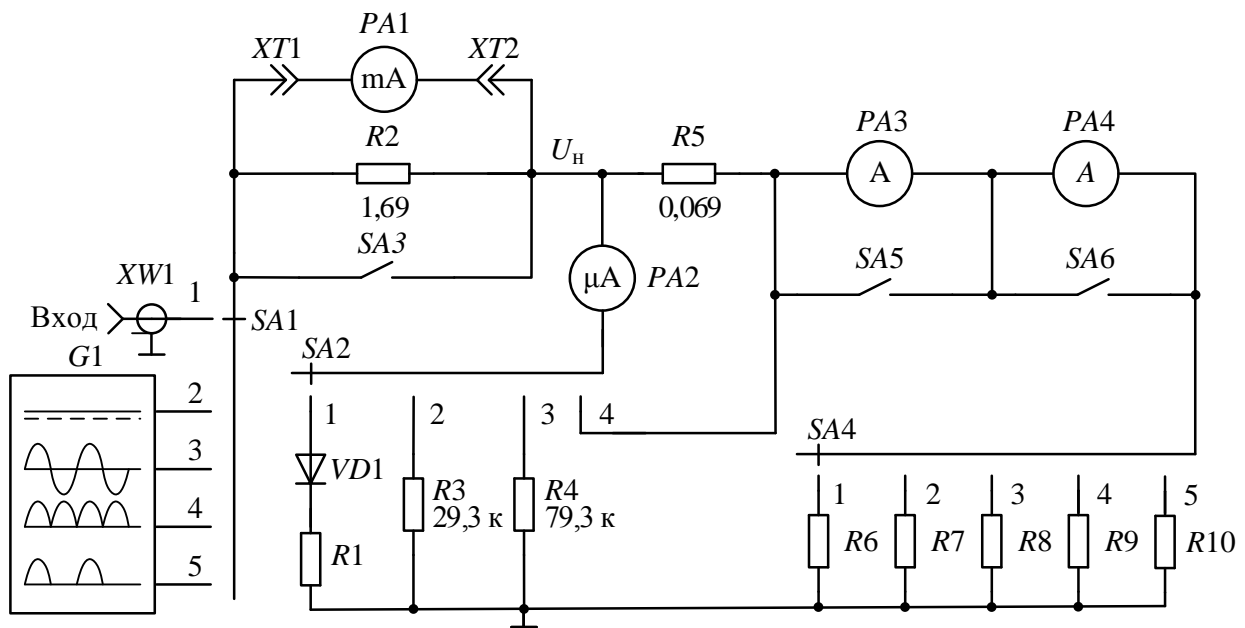


Рис. 1.6. Схема лабораторного макета

В макете предусмотрен генератор  $G1$ , вырабатывающий на 2–5 входах переключателя  $SA1$  постоянное напряжение, переменное напряжение частотой 50 Гц и пульсирующие напряжения, полученные с помощью одно- и двухполупериодного выпрямителей. Кроме того, макет содержит набор нагрузочных резисторов  $R6$ – $R10$ , коммутируемых переключателем  $SA4$ . В лабораторной работе используется внешний образцовый амперметр  $PA1$ . Он представляет собой двухдиапазонный электродинамический миллиамперметр, используемый совместно с шунтом  $R2$ , позволяющий изменить предел измерения тока с 25 мА до 1 А. Данный прибор подключается в схему при помощи разъемов  $XT1$  и  $XT2$ , либо шунтируется (исключается из схемы) выключателем  $SA3$ . Для контроля частоты внешнего генератора гармонического сигнала ГЗ-109 в работе может быть использован аналоговый частотомер Ф433/3.

Таблица 1.1

Параметры элементов макета		Классы точности измерительных механизмов $C$	
Величина	Значение	Прибор	Класс точности
$R_2$	1,69 Ом	$PA1$	$C_1 = 0,2$
$R_3$	29,3 кОм	$PA2$	$C_2 = 1,0$
$R_4$	79,3 кОм	$PA3$	$C_3 = 2,5$
$R_5$	0,069 Ом	$PA4$	$C_4 = 2,5$
$R_{PA2}$	688 Ом		
$R_{PA3}$	0,06 Ом		
$R_{PA4}$	0,35 Ом		
$L_{PA4}$	81 мкГн		

Номиналы основных элементов схемы лабораторного макета и параметры измерительных механизмов указаны в табл. 1.1.

#### 1.4. Задание и указания к выполнению работы

##### 1.4.1. Измерение постоянного тока

Измеряется сила постоянного тока в нагрузках цепи амперметрами  $PA1$ ,  $PA3$  и  $PA4$ .

1. Включите питание лабораторного макета и эталонного прибора  $PA1$ .
2. Соедините прибор  $PA1$  с лабораторным макетом, используя выходы  $XT1$  и  $XT2$  и включите его, переведя тумблер  $SA3$  в положение *Выкл.*
3. Подайте на вход измерительной схемы макета постоянное напряжение, установив переключатель  $SA1$  на лабораторном макете в положение 2.
4. Включите в схему амперметры  $PA3$  и  $PA4$ , для чего выключите тумблеры  $SA5$  и  $SA6$ .
5. Поочередно устанавливая переключатель  $SA4$  в положения 1...5, измерьте и запишите ток через нагрузочные резисторы  $R6...R10$  амперметрами  $PA1$ ,  $PA3$ ,  $PA4$ . Поскольку схема включения прибора  $PA1$  содержит шунтирующий резистор  $R2$ , диапазон измерения прибора увеличивается с 25 мА до 1 А. В связи с этим, чтобы получить ток в амперах, **необходимо численные показания данного прибора разделить на 100**. Результаты измерений занесите в табл. 1.2.

6. Рассчитайте погрешности измерений токов  $\delta I_{PA3}$ ,  $\delta I_{PA4}$  в соответствии с п. 1.4.5, а также методические погрешности  $\delta I_{PA3M}$ ,  $\delta I_{PA4M}$ , используя (1.9). Результаты расчетов занесите в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Положение переключателя SA4	$I_{PA1}$ , A	$I_{PA3}$ , A	$\delta I_{PA3}$ , %	$\delta I_{PA3M}$ , %	$I_{PA4}$ , A	$\delta I_{PA4}$ , %	$\delta I_{PA4M}$ , %
1 (R6)							
2 (R7)							
3 (R8)							
4 (R9)							
5 (R10)							

### 1.4.2. Измерение сопротивления методом вольтметра-амперметра

Измерьте сопротивления 5 нагрузочных резисторов косвенным методом вольтметра-амперметра. Для этого измерьте постоянный ток через резистор образцовым амперметром PA1 и напряжение на нем прибором PA2 (косвенным путем). Показания прибора PA2 при измерении напряжения записываются в делениях шкалы прибора (в микроамперах). Далее они пересчитываются в значение напряжения.

1. Включите питание лабораторного макета и эталонного прибора PA1.
2. Соедините эталонный прибор PA1 с лабораторным макетом, используя выходы XT1 и XT2, и включите в цепь прибор PA1, переведя тумблер SA3 в положение *Выкл.*
3. Подайте на вход измерительной схемы макета постоянное напряжение, установив переключатель SA1 на лабораторном макете в положение 2.
4. Исключите из цепи амперметры PA3 и PA4, включив тумблеры SA5 и SA6.
5. Выберите в качестве нагрузки цепи  $R_H = R_6$  (переключатель SA4 в положении 1).
6. Измерьте напряжение на нагрузке  $U_H$  прибором PA2. Для этого переключателем SA2 подключите прибор параллельно входу схемы через добавочный резистор R3 или R4. Выберите такой добавочный резистор, чтобы обеспечивалось максимальное показание прибора, но не превышающее максимально допустимого значения. Зафиксируйте ток  $I_{PA2}$  (в микроамперах),

пересчитайте его в напряжение (в вольтах) и занесите результаты в табл. 1.3, используя формулу:

$$U_{\text{H}} = I_{PA2} (R_{3(4)} + R_{PA2}).$$

Таблица 1.3

Положение переключателя SA4	$I_{PA1}$ , А	$\delta I_{PA1}$ , %	$I_{PA2}$ , мкА	$U_{\text{H}}$ , В	$\delta U_{\text{H}}$ , %	$R_{\text{H}}$	$\delta R_{\text{H}}$ , %
1 (R6)							
2 (R7)							
3 (R8)							
4 (R9)							
5 (R10)							

7. Эталонным прибором PA1 измерьте и запишите ток в нагрузке  $I_{PA1}$  (напоминаем, что показания по шкале PA1 нужно разделить на 100).

8. Рассчитайте сопротивление нагрузки  $R_{\text{H}}$ , используя измеренные значения напряжения  $U_{\text{H}}$  и тока  $I_{PA1}$  по формуле  $R_{\text{H}} = \frac{U_{\text{H}}}{I_{PA1}}$ , где  $R_{\text{H}}$  соответствует одному из резисторов R6–R10. Результаты расчетов занесите в табл. 1.3.

9. Меняя положение переключателя SA4, повторите аналогичные измерения напряжения и тока для нагрузок R7–R10.

10. Рассчитайте погрешности измерений напряжений и токов в соответствии с 1.4.4. Результаты расчетов занесите в табл. 1.3.

### **1.4.3. Измерение среднего и среднеквадратического значений пульсирующего и переменного тока**

1. Переключателем SA4 включите в схему нагрузочный резистор R6. Включите в цепь амперметры PA3 и PA4, разомкнув тумблеры SA5 и SA6.

2. Переключите прибор PA2 в режим измерения тока (переключатель SA2 в положение 4).

3. Подавая на вход измерительной схемы с помощью переключателя SA1 (положения 3...5) напряжения различной формы, фиксируйте показания при-

боров  $PA1$ – $PA3$ . Пересчитайте показания прибора  $PA2$  из микроамперов в амперы по формуле  $I_{PA2} = I'_{PA2} \cdot (1 + \frac{R_{PA2}}{R_5})$ .

Таблица 1.4

Положение переключателя $SA1$	$I_{PA1}$ , А	$I'_{PA2}$ , мкА	$I_{PA2}$ , А	$I_{PA3}$ , А	$I_{PA3}$ , А	$\delta I_{PA3}$ , %
3						
4						
5						

4. Рассчитайте погрешности измерений токов в соответствии с 1.4.5. Результаты измерений и расчетов занесите в табл. 1.4.

#### **1.4.4. Исследование частотной зависимости показаний электромагнитного амперметра**

1. Включите генератор низкой частоты ГЗ-109. Соедините кабелем клеммы «Выход 2» и  $\perp$  генератора ГЗ-109 с гнездом *Вход* лабораторного макета. Установите переключатель «Нагрузка,  $\Omega$ » на лицевой панели ГЗ-109 в положение 5  $\Omega$ , а переключатель «Регулировка вых.» – в положение «15 V».

2. С помощью переключателя  $SA1$  соедините выход генератора низкой частоты со входом измерительной схемы. Переключателем  $SA3$  выберите нагрузочный резистор  $R6$ , а прибор  $P2$  переключателем  $SA2$  подключите к цепочке  $VD1$ – $R1$  для контроля амплитуды переменного входного напряжения (положение 1).

3. Выключите из цепи приборы  $PA1$  и  $PA3$ , включив тумблеры  $SA3$  и  $SA5$ .

4. Включите в цепь нагрузки исследуемый прибор  $PA4$ , выключив тумблер  $SA6$ .

5. Подключите частотомер Ф433/3 к разъему «Выход 1» генератора ГЗ-109. Кнопками «Б1» и «Б2» проверьте питание частотомера. Нажмите кнопку «К» и произведите калибровку прибора, установив стрелку в положение 10. В дальнейшем используйте режим «И».

6. Исследуйте частотную зависимость показаний электромагнитного амперметра  $PA4$  в диапазоне частот 50 Гц...20 кГц. Для этого на частоте 50 Гц с помощью ручки «Регулировка вых.» генератора ГЗ-109 установите показание электромагнитного амперметра  $PA4$  равное 1 А, и зафиксируйте показание

вольтметра PA2. Далее устанавливайте частоту генератора ГЗ-109 согласно табл. 1.4, поддерживая уровень его выходного напряжения постоянным (по показаниям прибора PA2). Точность установки частоты контролируйте частотомером Ф433/3. Запишите показания электромагнитного амперметра PA4 в табл. 1.5.

7. Используя (1.10), рассчитайте частотную зависимость показаний электромагнитного амперметра и занесите в табл. 1.5.

Таблица 1.5

$f$ , кГц	0,05	0,5	2	5	10	15	20
$I_{PA4}$ , А (эксперимент)							
$I_{PA4}$ , А (расчет)							

8. Постройте графики расчетной и экспериментальной частотных зависимостей.

#### 1.4.5. Расчет погрешностей измерений

Инструментальную погрешность измерений токов и напряжений с помощью электромеханических приборов оценивают через их классы точности  $C$ , приведенные в 1.3. Рассчитайте предел относительной инструментальной погрешности для всех значений измеренного тока амперметрами PA2, PA4 и PA5 с помощью формулы  $\delta I_{PA} = C \frac{I_{\max}}{I_{\text{изм}}} \cdot 100\%$ , где  $C$  — класс точности амперметра.

Аналогичным образом оцените инструментальную погрешность измерения напряжения  $\delta U_{PA2}$ . Максимальное показание вольтметра определите по (1.3).

Рассчитайте методическую погрешность измерения тока приборами PA3 и PA4 по формуле (1.9), взяв значения  $R_H$  из табл. 1.3. Результаты занесите в табл. 1.3.

Соппротивления нагрузки измеряют методом вольтметра-амперметра (косвенным способом). При косвенных измерениях значение искомой величины находят по известной зависимости между этой величиной  $A$  и значениями  $x_i$ , определенными посредством прямых измерений  $A = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ . Абсолютная и относительная погрешности косвенного измерения при некор-

релированных значениях случайных погрешностей прямых измерений  $\Delta x_i$  определяются, соответственно, по формулам:

$$\Delta A = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 (\Delta x_i)^2}, \quad \delta_A = \frac{\Delta A}{A} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \left( \frac{\Delta x_i}{A} \right)^2}. \quad (1.11)$$

В частном случае, когда  $R_H = f(x_1, x_2) = \frac{x_1}{x_2} = \frac{U_H}{I_{PA1}}$ , в соответствии с (1.11) будем иметь

$$\delta R_H = \sqrt{(\delta U_H)^2 + (\delta I_{PA1})^2} \cdot 100\%. \quad (1.12)$$

Рассчитайте предел относительной погрешности косвенных измерений сопротивлений нагрузок по формуле (1.12). Результаты занесите в табл. 1.2 и 1.3.

### Содержание отчета

Отчет должен содержать:  
схему лабораторного макета;  
таблицы значений, найденных в результате измерений, дополненные расчетными данными, полученными в соответствии с заданием;  
графики расчетных и экспериментальных зависимостей.

### Контрольные вопросы

1. Сравните основные типы электромеханических измерительных приборов по точности, по чувствительности и пр.
2. Укажите источники погрешностей при измерении тока электромеханическими амперметрами.
3. Поясните устройство электромеханического прибора магнитоэлектрической системы.
4. Поясните устройство электромеханического прибора электродинамической системы.
5. Поясните устройство электромеханического прибора электромагнитной системы.
6. Объясните влияние шунта на пределы измерения тока электромеханическими амперметрами.
7. Объясните влияние добавочного резистора на пределы измерения напряжения электромеханическими вольтметрами.

8. Что показывают магнитоэлектрические, электродинамические и электромагнитные приборы, если протекающий через них ток меняется во времени?

9. Объясните влияние формы измеряемого напряжения или тока на показания электромеханических приборов различной системы.













10. Чем вызвана частотная зависимость показаний приборов электродинамической и электромагнитной систем?

11. Укажите источники погрешностей при косвенном измерении сопротивлений методом вольтметра-амперметра.

12. Почему показания магнитоэлектрического амперметра различаются в 2 раза при измерении пульсирующего тока для однополупериодного (SA1 в положении 4) и двухполупериодного (положение 5) случаев?

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### 1. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, НАНОСИМЫЕ НА ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ЧАСТИ

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой		Переменный ток	
Электромагнитный прибор		Постоянный и переменный ток	
Электродинамический прибор		Общий зажим для многопредельных приборов	
Ферродинамический прибор		Зажим, соединенный с экраном	
Электростатический прибор		Зажим для заземления	
Индукционный прибор		Класс точности при нормировании погрешности в процентах от предела шкалы	1,5
Постоянный ток		—	—