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, С. И. Пышкин

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ к выполнению лабораторной работы по дисциплине "Основы метрологии и радиоизмерений" (электронный вариант)

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Санкт-Петербург

2024 г.

1. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Цель работы — изучение устройства, основных технических характеристик и способы 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 другие.

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. приложение 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.

Основой электромеханического прибора является измерительный механизм (ИМ). Он включает 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 уравновешивания используются спиральные пружинки или растяжки, создающие противодействующий момент, пропорциональный углу поворота подвижной части. ЭМ

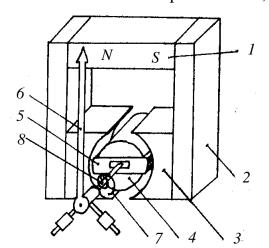
прибор может комплектоваться шунтами и добавочными резисторами, расширяющими возможности измерения и часто размещаемые в том же корпусе.

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 размешена обмотка, включающая большое количество витков тонкой проволоки, по которой протекает измеряемый ток, Он подводится к рамке через две спиральные пружинки 7, которые также создают противодействующий момент.

При протекании по обмотке рамки постоянного тока $I_{\rm p}$ на нее действует врашающий момент



Puc. 1.1. Конструкция магнитоэлектрического измерительного механизма

$$M_{\rm Bp} = BSnI_{\rm p}, \qquad (1.1)$$

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

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

$$\alpha = \frac{SBn}{\mu} I_p, \tag{1.2}$$

где µ— 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 чувствительность 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)

$$I_{\text{po}} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} i(t)dt, \qquad (1.3)$$

где T — интервал усреднения, определяемый постоянной времени подвижной части UM.

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 $R_{\rm H}$ (рис. 1.2, a). Для измерения значительных токов используют схему (рис. 1.2, δ) с параллельным резистором – шунтом $R_{\rm III}$, по которому тычет большая часть измеряемого тока. Предел измерения тока амперметра с шунтом определяется следующим образом:

$$I_{\text{max}} = I_{p \text{ max}} \cdot R_{uu} / (R_{uu} + R_p), \qquad (1.4)$$

где $R_{
m p}$ — сопротивление рамки ИМ; $I_{
m p \ max}$ — ток полного отклонения рамки.

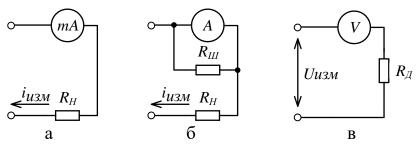


Рис. 1.2. Схемы включения магнитоэлектрических измерительных механизмов

Таким образом, для увеличения передела измеряемого тока в n раз сопротивление шунта должно быть меньше собственного сопротивления амперметра $R_{\rm p}$

$$R_{uu} = \frac{R_p}{n-1}.$$

Для измерения магнитоэлектрическим прибором напряжения используют добавочные резисторы $R_{\rm д}$ (рис. 1.2, ϵ). 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 равен

$$U_{\text{max}} = I_{p \text{ max}} \cdot (R_{\partial} + R_{p}). \tag{1.5}$$

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

$$I_{cp.\theta} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} |i(t)| dt, \ \alpha = \frac{SBn}{\mu} I_{cp.\theta}.$$

Свойства магнитоэлектрических приборов:

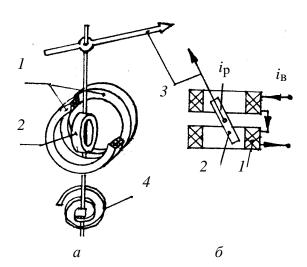
- Измеряют мгновенное или среднее значение тока;
- Чувствительность постоянна по углу (линейная шкала);
- В магнитоэлектрическом ИМ применяют постоянные магниты с высоким значением магнитной индукции *B*, что обеспечивает высокую чувствительность механизма (доли мкА);
- При большой индукции В магнитоэлектрический 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 поясняется на рис. 1.3, a. Принцип действия его основан на взаимодействии магнитных полей токов в неподвижной и подвижной катушках (рис. 1.3, δ). Неподвижную катушку l 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:



Puc. 1.3. Конструкция электродинамического измерительного механизма

$$m_{gp} = dA / d\alpha = dW_{\mathfrak{IM}} / d\alpha, \qquad (1.6)$$

где dA — работа, совершаемая при повороте рамки на угол $d\alpha$; $W_{\rm 3M}$ — энергия электромагнитного поля в ИМ. Для электродинамического ИМ

$$W_{\mathfrak{I}M} = \frac{1}{2} L_{g} i_{g}^{2} + \frac{1}{2} L_{p} i_{p}^{2} + M i_{g} i_{p}, \quad (1.7)$$

где $L_{\rm B}$ и $L_{\rm p}-$ индуктивности подвижной и неподвижной катушек соответственно; $i_{\rm B}$ и $i_{\rm p}-$ мгновенные значения токов, протекающих через катушки; M- взаимная индуктивность катушек.

При вращении рамки изменение энергии электромагнитного поля происходит за счет зависимости взаимной индуктивности подвижной и неподвижной катушек от угла поворота. Используя (1.6) и (1.7), можно показать, что

$$a = \frac{1}{\mu} \frac{dM}{da} \frac{1}{T} \int_{0}^{T} i_{B}(t) i_{p}(t) dt, \qquad (1.8)$$

где μ и T имеют тот же смысл, что и в формулах (1.2) и (1.3).

Электродинамические приборы строятся по схеме с последовательным, параллельным или независимым включением катушек. Это иллюстрируется рис. $1.4~a, \, 6, \, 6$, где показаны схемы вольтметра, амперметра и ваттметра.

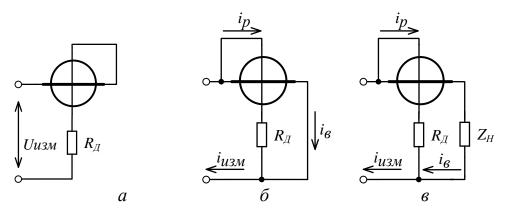
Используя (1.8), можно показать, что для схемы, изображенной на рис. 1.4, a

$$a = \frac{1}{\mu R_{\pi}^{2}} \frac{dM}{da} U_{\text{M3M}}^{2}, \qquad (1.9)$$

где $U_{u_{3M}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} u_{u_{3M}}^2(\mathbf{t}) dt}$ — среднеквадратическое значение измеряемого

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

$$\frac{dM}{d\alpha}U_{\text{M3M}} = \text{const.} \tag{1.10}$$



Puc. 1.4. Схемы включения электродинамических измерительных механизмов a – измерение напряжения; δ – измерение тока; ϵ – измерение мощности

Для схемы амперметра изображенной на рис. 1.4, δ , можно таким же образом получить

$$a = \frac{b}{\mu} \frac{dM}{da} I_{\text{M3M}}^2, \qquad (1.11)$$

где $b = i_{\rm B} i_{\rm p} / i_{\rm H3M}^2$ — постоянный коэффициент; $I_{\rm H3M}$ — среднеквадратическое

значение измеряемого тока $I_{u_{3M}} = \sqrt{\frac{1}{\mathrm{T}}} \int\limits_{0}^{\mathrm{T}} i_{u_{3M}}^2(\mathbf{t}) \, dt$. При небольших токах ка-

тушки прибора включают последовательно. В этом случае угол отклонения определяется выражением (1.11) при b=1.

Для схемы ваттметра изображенной на рис. 1.4, ϵ ,

$$a = \frac{1}{\mu R_{\partial}} \frac{dM}{da} P_{H}, \qquad (1.12)$$

где $P_{\rm H}$ — активная мощность в нагрузке $Z_{\rm H}$, равная произведению напряжения на ток. Из выражения (1.12) 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, отсутствуют и погрешности, связанные с нелинейностью и нестабильностью ферромагнетиков.

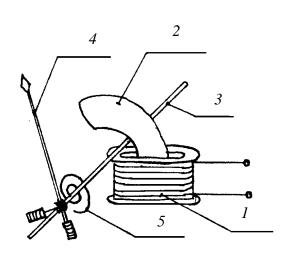
Недостатком электродинамических приборов (в отличие от магнитоэлектрических) является невысокая чувствительность, нелинейно зависящая от измеряемого значения. Это вызвано сложностью конструктивного увеличения параметра dM / da в системе связи катушек. Для повышения чувствительности используют ферродинамические 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 пружинка 5 используется здесь только для создания противодействующего момента. Успокоение 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 воспользоваться (1.6).

Учитывая, что при повороте сердечника изменение $W_{\rm 9M}$ происходит только за счет изменения индуктивности катушки L, можно показать, что



Puc. 1.5. Конструкция электромагнитного измерительного механизма

$$a = \frac{1}{2\mu} \frac{dL}{da} I_p^2$$
, где I_p — среднеквадратическое значение тока, протекающего через катушку. Подбирая форму подвижного

катушку. Подбирая форму подвижного сердечника, стремятся выполнить условие $I_p dL/da = const$, при котором угол отклонения подвижной части пропорционален среднеквадратическому значению тока в катушке (линеаризация шкалы).

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

Свойства электромагнитных приборов:

- Измеряют постоянные и переменные токи по одной шкале;
- Измеряют среднеквадратическое 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.

Существенными недостатками приборов этой системы является низкая точность из-за нестабильности свойств ферромагнетика и малая чувствительность (как и для электродинамических приборов). Сильное влияние внешних магнитных полей требуют 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 %, определяет класс точности прибора. Это оценка предела допускаемой погрешности сверху (при вероятности досто-

верности 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) $\times 10^{n}$.

Зная класс точности С, можно определить предел относительной *инструментальной* погрешности (%) прибора

$$\delta_X = CX_{\text{max}} / X_{u_{3M}}, \tag{1.13}$$

где X_{\max} – предел измерений величины X; X_{\max} – 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 конечной величины внутреннего сопротивления амперметра при включении его в цепь происходит нарушение режима работы цепи. Это вызывает *методическую* погрешность измерений. Она носит систематический характер. Так, при измерении тока в нагрузке $R_{\rm H}$ амперметром с внутренним сопротивлением $R_{\rm p}$ относительная методическая погрешность равна

$$\delta_I = 100 R_{\rm p} / (R_{\rm p} + R_{\rm H}) \%.$$
 (1.14)

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:

$$I(2\pi f) = I_0 / \sqrt{1 + (2\pi f L_p / (R_H + R_p))^2},$$
 (1.15)

где I_0 — показания прибора на нулевой частоте; $L_{\rm p}$ и $R_{\rm p}$ — индуктивность и активное сопротивление катушки прибора; $R_{\rm H}$ — 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 P0 и исследуемые амперметры P2 и P3 (первый из которых магнитоэлектрической, а второй – электромагнитной системы). Для исключения амперметров из цепи предусмотрены короткозамыкающие тумблеры S0, S4 и S5. Прибор P1 — магнитоэлектрической системы с шунтом R_{uu} и дополнительными резисторами $R_{\partial 2}$ и $R_{\partial 3}$. Он используется в качестве вольтметра (переключатель S2, положения 1...3) или, для контроля тока, как амперметр с дополнительным шунтом (положение 4). Максимальное значение показаний прибора P1 $I_{pmax} = 100$ мкА. Выпрямительная цепочка VD1- $R\partial 1$ используется для контроля амплитуды переменного входного напряжения.

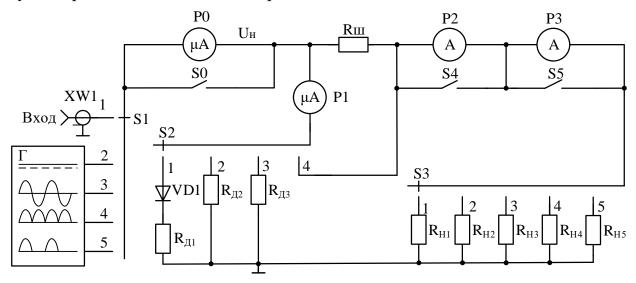


Рис. 1.6. Схема лабораторного макета

В макете предусмотрен генератор Γ , вырабатывающий на входах 2–5 переключателя SI постоянное напряжение, переменное напряжение частотой 50 Γ ц и пульсирующие напряжения, полученные с помощью одно- и двухполупериодного выпрямителей. Кроме того, макет содержит набор нагрузочных резисторов $R_{\rm H_1}...R_{\rm H_5}$, коммутируемые переключателем S3. В лабораторной работе используется внешний образцовый амперметр P0. Он представляет собой двухдиапазонный электродинамический миллиамперметр с шунтом $R_{\rm HI}0=1,69$ Ом, позволяющий изменить предел измерения тока с 25 мА до 1 А. Для контроля частоты внешнего генератора гармонического сигнала $\Gamma3$ -109 в работе может быть использован аналоговый частотомер

Ф433/3. Номиналы основных элементов схемы лабораторного макета и параметры измерительных механизмов указаны в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Параметры эл	ементов макета	Классы точности измерительных механизмов С			
Позиционное	Номинал	Прибор	Класс точности		
обозначение					
$R_{\text{д2}}$	29,3 кОм	P_0	$C_0 = 0,2$		
$R_{\text{д3}}$	79,3 кОм	P_1	$C_1 = 1,0$		
R_{III}	0,069 Ом	P_2	$C_2 = 2,5$		
R_{p1}	688 Ом	P_3	$C_3 = 2,5$		
R_{p2}	0,06 Ом				
R_{p3}	0,35 Ом				
L_{p3}	81 мкГн				

1.4. Задание и указания к выполнению работы

1.4.1. Измерение постоянного тока

В данном пункте измеряется значение постоянного тока в нагрузках цепи при помощи амперметров P0, P2 u P3.

- 1. Включите питание лабораторного макета и эталонного прибора P0.
- 2. Соедините эталонный прибор P0 с лабораторным макетом, используя выходы X2 и X3 и включите прибор P0, переведя тумблер S0 в положение Bыкл.
- 3. Подайте на вход измерительной схемы макета постоянное напряжение, установив переключатель S1 на лабораторном макете в положение 2.
- 4. Включите в схему амперметры P2 и P3, для чего выключите тумблеры S4 и S5.
- 5. Поочередно устанавливая переключатель S3 в положения 1...5, измерьте и запишите ток через нагрузочные резисторы $R_{H1}...$ R_{H5} амперметрами P0, P2, P3. Поскольку схема включения прибора P0 содержит шунтирующий резистор $R_{III0} = 1,69$ Ом, диапазон измерения прибора увеличивается с 25 мА до 1 А. В связи с этим, чтобы получить ток в А, необходимо показания прибора P0 разделить на 100. Результаты измерений занесите в табл. 1.2.
- 6. Рассчитайте погрешности измерений токов в соответствии с п.1.4.4. Результаты расчетов занесите в табл. 1.2.

Таблииа 1.2

Положение переключателя <i>S3</i>	I PO, A	I _{P2,}	δ <i>I_{P2}</i> , %	δ <i>I</i> _{P2M} , %	I _{P3,} A	δ <i>I_{P3}</i> , %	δ <i>I_{P3M}</i> , %
$R_{\rm H1}$							
$R_{\rm H2}$							
R_{H3}							
R_{H4}							
$R_{\mathrm{H}5}$							

1.4.2. Измерение сопротивления методом вольтметра-амперметра

В данном пункте измеряются сопротивления 5 нагрузочных резисторов косвенным методом вольтметра-амперметра. Для этого измеряют постоянный ток через резистор при помощи образцового амперметра P0 и напряжение на нем при помощи прибора P1. Показания прибора P1 при измерении напряжения записываются в делениях шкалы прибора (в мкА). Далее они пересчитываются в значение напряжения.

- 1. Включите питание лабораторного макета и эталонного прибора РО.
- 2. Соедините эталонный прибор P0 с лабораторным макетом, используя выходы X2 и X3 и включите в цепь прибор P0, переведя тумблер S0 в положение Bыкл.
- 3. Подайте на вход измерительной схемы макета постоянное напряжение, установив переключатель S1 на лабораторном макете в положение 2.
 - 4. Исключите из цепи амперметры P2 и P3, включив тумблеры S4 и S5.
 - 5. Выберите нагрузку цепи RH1 (переключатель S3 в положении 1).
- 6. Измерьте напряжение U_H на нагрузке с помощью прибора P1. Для этого переключателем S2 подключите прибор параллельно входу схемы через добавочный резистор $R_{д2}$ или $R_{д3}$. Сопротивление добавочного резистора должно обеспечить максимальное показание прибора без его «зашкаливания». Зафиксируйте ток I_{P1} (в мкА), пересчитайте его в напряжение (в В) по формуле (1.16) и занесите результаты в табл. 1.3.

$$U_{H} = I_{p1} \cdot (R_{\partial 2(3)} + R_{p1}),$$
 (1.16).

- 7. Измерьте ток в нагрузке I_{P0} эталонным прибором P0 и запишите его (напоминаем, что показания по шкале P0 нужно разделить на 100).
- 8. Рассчитайте сопротивление нагрузки R_H , используя измеренные значения напряжения U_H и тока I_{P0} по формуле $R_H = \frac{U_H}{I_{P0}}$. Результаты расчетов занесите в табл. 1.3.
- 9. Меняя положение переключателя S3, повторите аналогичные измерения напряжения и тока для нагрузок $R_{H2} \dots R_{H5}$.
- 10. Рассчитайте погрешности измерений напряжений и токов в соответствии с п.1.4.4. Результаты расчетов занесите в табл. 1.3.

Положение переключателя	I PO,	δΙ _{Ρ0} ,	I _{P1} ,	U_{H} ,	δ_U ,	$R_{\scriptscriptstyle H}$	δR _H , %
S3	A	%	мкА	В	%	.,	,
$R_{\rm H1}$							
$R_{\rm H2}$							
$R_{\rm H3}$							
$R_{ m H4}$							
$R_{\mathrm{H}5}$							

1.4.3. Измерение среднего и среднеквадратического значений пульсирующего и переменного тока

- 1. Переключателем S3 включите в схему нагрузочный резистор $R_{\rm H_1}$. Включите в цепь амперметры P2 и P3, разомкнув тумблеры S4 и S5.
- 2. Переключите прибор P1 в режим измерения тока (4 положение переключателя S2).
- 3. Подавая на вход измерительной схемы с помощью переключателя S1 (положения 3...5), напряжения различной формы, фиксируйте показания приборов P0, P1, P2 и P3. Пересчитайте показания прибора P1 из мкА в А по

формуле
$$I_{p1}(A) = I_{p1}(M\kappa A) \cdot (1 + \frac{R_{p1}}{R_{uu}})$$
.

4. Рассчитайте погрешности измерений токов в соответствии с п. 1.4.4. Результаты измерений и расчетов занесите в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Положение переключателя S1	<i>I</i> _p 0, A	<i>I</i> _p 1, мкА	<i>I</i> _p 1, A	Ip2,	<i>I</i> _p 3, A	δ <i>I</i> _p 3,
3						
4						
5						

1.4.3. Исследование частотной зависимости показаний электромагнитного амперметра

1. Включите генератор низкой частоты Г3-109; Соедините кабелем клеммы « $Bыxod\ 2$ » $u\perp$ генератора Г3-109 с гнездом Bxod лабораторного ма-

кета; Установите переключатель «*Нагрузка*, Ω » на лицевой панели Γ 3-109 в положение 5 *Ом*, а переключатель «*Регулировка вых.*» – в положение «*15 V*».

- 2. С помощью переключателя S1 соедините выход генератора низкой частоты со входом измерительной схемы; Переключателем S3 выберите резистор нагрузки R_{H1} , а прибор P1 переключателем S2 подключите к цепочке VD- $R_{Д1}$ для контроля амплитуды переменного входного напряжения (положение 1).
 - 3. Выключите из цепи приборы P0 и P2, замкнув тумблеры S0 и S4.
- 4. Включите в цепь нагрузки исследуемый прибор P3, разомкнув тумблер S5.
- 5. Подключите частотомер $\Phi 433/3$ к разъему «Выход 1» генератора $\Gamma 3$ -109.
- 6. Исследование частотной зависимости показаний электромагнитного амперметра P3 производите в диапазоне частот 50 Гц...20 кГц. Для этого на частоте 50 Гц с помощью ручки «Регулировка вых.» генератора ГЗ-109 установите показания электромагнитного амперметра P3 равные 1 А и зафиксируйте показания вольтметра P1. Далее устанавливайте частоту генератора ГЗ-109 согласно таблице 1.4, поддерживая уровень его выходного напряжения постоянным (по показаниям прибора P1). Точность установки частоты контролируйте частотомером $\Phi433/3$. Запишите показания электромагнитного амперметра P3 в табл. 1.5.
- 7. Используя формулу (1.15), рассчитайте частотную зависимость показаний электромагнитного амперметра и занесите в табл. 1.5.
- 8. Постройте графики расчетной и экспериментальной частотной зависимости.

Таблица 1.5

f , к Γ ц	0,05	0,5	2	5	10	15	20
I_{p3} , А (эксперимент)							
<i>I</i> _{р3} , A (расчет)							

1.4.4. Расчет погрешностей измерений

Инструментальную погрешность измерений токов и напряжений с помощью электромеханических приборов оценивают через их класс точности С, приведенные в п. 1.3. Рассчитайте предел относительной инструменталь-

ной погрешности для всех значений измеренного тока амперметрами P0, P2 и P3 с помощью формулы $\delta I_p, \% = C \frac{I_{\max}}{I_{\scriptscriptstyle \rm H3M}}$.

Аналогичным образом оцените инструментальную погрешность измерения напряжения δU_{p1} . Максимальное показание вольтметра определите по формуле (1.5).

Рассчитайте методическую погрешность измерения тока приборами P2 и P3 по формуле (1.14), взяв значения $R_{\rm H}$ из результатов п. 1.4.2. Результаты занесите в табл. 1.3.

Измерение сопротивлений нагрузки делается методом вольтметраамперметра (косвенным способом). При косвенных измерениях значение искомой величины находят по известной зависимости между этой величиной Aи значениями x_i , определенными путем прямых измерений $A = f\left(x_1, x_2, ..., x_m\right)$. Абсолютная и относительная погрешности косвенного измерения при некоррелированных значениях случайных погрешностей прямых измерений Δx_i определяются, соответственно, по формулам

$$\Delta A = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \left(\Delta x_i\right)^2}, \ \delta_A = \frac{\Delta A}{A} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \left(\frac{\Delta x_i}{A}\right)^2}.$$
 (1.17)

В частном случае, когда $R_{H} = f(x_{1}, x_{2}) = \frac{x_{1}}{x_{2}} = \frac{U_{H}}{I_{p0}}$, в соответствии с

(1.17) будем иметь

$$\delta R_{H},\% = \sqrt{\left(\delta U_{H}\right)^{2} + \left(\delta I_{p0}\right)^{2}}.$$
(1.18)

Рассчитайте предел относительной погрешности косвенных измерений сопротивлений нагрузок по формуле (1.18). Результаты занесите в таблицы 1.2 и 1.3.

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- схему лабораторного макета;
- таблицы данных, полученных в результате измерений, дополненные расчетными данными, выполненными 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 прибора электродинамической и электромагнитной систем?
- 11. Укажите источники погрешностей при косвенном измерении сопротивлений методом вольтметра-амперметра.
- 12. Почему показания магнитоэлектрического амперметра отличаются в два раза при измерении пульсирующего тока для однополупериодного (s1 в положении 4) и двухполупериодного (положение 5) случаев?

ПРИЛОЖЕНИЕ

1. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, НАНОСИМЫЕ НА ЭЛЕКТРОИЗМЕ-РИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ЧАСТИ

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой		Переменный ток	~
Электромагнитный прибор		Постоянный и переменный ток	$\overline{\sim}$
Электродинамический прибор		Общий зажим для многопредельных приборов	*
Ферродинамический прибор		Зажим, соединенный с экраном	
Электростатический прибор	<u>•</u>	Зажим для заземления	<u></u>
Индукционный прибор	$ (\bullet) $	Класс точности при нормировании погрешности в процентах от предела шкалы	1,5
Постоянный ток	_	-	_