

Работа 2.1

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Цель работы: ознакомление с принципом действия электроизмерительных приборов и приобретение навыков работы с ними.

Оборудование: амперметры и вольтметры магнитоэлектрической, электромагнитной, электростатической, цифровой электронные систем, низкочастотный генератор, осциллограф, диод, источник постоянного напряжения.

1. Классификация приборов

К электроизмерительным приборам относятся приборы для измерения величины тока (амперметры), напряжения (вольтметры), сопротивления, мощности и др. в цепях постоянного и переменного тока.

Электроизмерительные приборы делятся на стрелочные, в которых под действием электромагнитных сил происходит механическое перемещение указателя (стрелки или зеркальца), и цифровые, в которых применяются электронные методы измерения и представления информации без преобразования ее в механическое движение.

В зависимости от принципа действия стрелочные приборы делятся на магнитоэлектрические, электромагнитные, электростатические и другие.

2. Принцип действия основных типов стрелочных приборов

Магнитоэлектрические приборы

Поместим прямоугольный подвижный контур в постоянное однородное магнитное поле B так, как показано на рис. 1. При протекании тока I через рамку возникают силы F , создающие вращательный момент M , который по мере поворота рамки уравновешивается механическим противодействующим моментом, создаваемым пружинами.

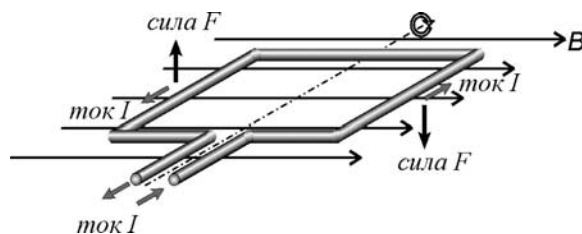


Рис. 1. Принцип действия магнитоэлектрического прибора.

Так, для контура, показанного на рис. 1, сила F действует только на те участки проводника с током длиной l , которые перпендикулярны магнитному полю; они равны $F = l B I$. Направление действия силы F определяется векторным произведением поля на ток (вспомните правило левой руки). Проекция силы F на нормаль к плоскости квадратной рамки F_{\perp} создает вращательный момент, равный $M = F_{\perp} l$. В реальных приборах делают так, чтобы при повороте рамки магнитное поле было всегда параллельно плоскости рамки, что позволяет исключить влияние поворота рамки на величину вращательного момента, создаваемого током. Поскольку момент силы пружин, уравнивающий поворот рамки, пропорционален углу поворота φ , то получается простая зависимость величины угла поворота от силы тока: угол φ пропорционален измеряемому току I , в котором и градуируется шкала прибора.

При изменении направления тока изменяется направление действия силы и, соответственно, изменяется направление вращательного момента. Поэтому приборы данной системы предназначены для измерения силы тока и напряжения только в цепях постоянного тока.

Поведение рамки при протекании через неё переменного тока подробно рассмотрено в учебнике “Механика” Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица. Но и из рассмотренного выше ясно, что, если частота переменного сигнала значительно больше частоты колебаний подвижной системы, то прибор будет показывать значение, пропорциональное среднему току:

$$\varphi \sim \bar{I} \sim \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt ,$$

где T – период сигнала.

При симметричном относительно нуля переменном токе, таком, как, например, $I(t) = I_0 \sin \omega t$, среднее значение силы тока равно нулю, и при

любой величине протекающего тока показания прибора отсутствуют. Однако, если переменный ток не симметричен относительно нуля или прибор снабжен устройством, выпрямляющим ток, – диодным мостиком (в этом случае на шкале прибора присутствует обозначение диода $\rightarrow|$), то прибор магнитоэлектрической системы может использоваться для измерений в цепях переменного тока.

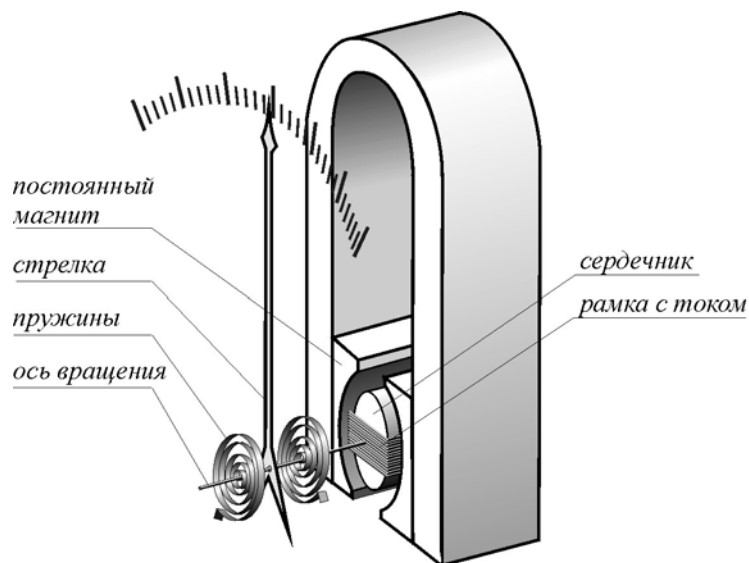


Рис. 2. Устройство прибора магнитоэлектрической системы.

Одна из конструкций отклоняющего механизма магнитоэлектрического прибора показана на рис. 2. Прямоугольная рамка с витками изолированного провода, по которым проходит измеряемый ток, находится в кольцевом зазоре. За счет постоянного магнита с полюсными наконечниками и цилиндрического сердечника в зазоре создается магнитное поле B , параллельное плоскости рамки. Рамка удерживается в зазоре и может вращаться на оси. При отсутствии тока рамка с прикрепленной к ней стрелкой удерживается на нулевом делении шкалы двумя пружинами. При включении постоянного тока рамка приходит к равновесию в режиме затухающего колебательного процесса. Для сокращения времени установления равновесных показаний в прибор вводят демпфирующие устройства.

На лицевой панели магнитоэлектрических приборов присутствует значок \square и название прибора начинается с буквы М. Магнитоэлектрические приборы обладают такими достоинствами как высокая чувствительность (до 3×10^{-11} А), высокая точность (до 0,1 %) и малое потребление мощности (до 10^{-6} Вт). В то же время они сложны в изготовлении, и при перегрузке по току могут отламываться стрелки или перегорать токоподводы. Зная эти недостатки, следует бережно относиться к приборам магнитоэлектрической системы.

Электромагнитная система

Поместим подвижный ферромагнитный сердечник вблизи неподвижной катушки на её оси так, как показано на рис. 3. При протекании тока I по катушке возникает магнитное поле B . Ферромагнитный сердечник намагничивается и втягивается в область более сильного магнитного поля, т.е. в катушку. Сила притяжения уравнивается механической противодействующей силой, создаваемой пружиной. При изменении направления тока изменяется направление магнитного поля, но изменяется и направление ориентации магнитных диполей в ферромагнетике. Поэтому ферромагнетик по-прежнему втягивается в катушку. Таким образом, приборы данной системы предназначены для измерения силы тока и напряжения в цепях как постоянного, так и переменного тока.

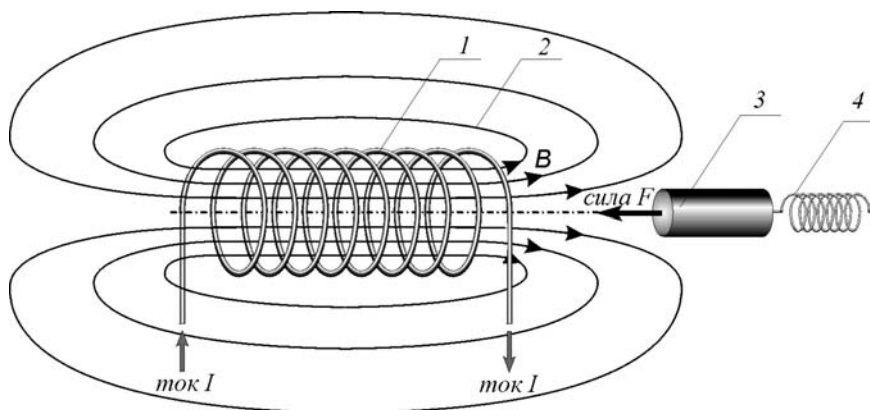


Рис. 3. Принцип действия электромагнитного прибора. 1 – катушка с током, 2 – силовые линии магнитного поля, 3 – ферромагнитный сердечник, 4 – пружина.

Определим зависимость смещения ферромагнитного сердечника от величины измеряемого тока. Можно представить, что ферромагнитный образец состоит из большого числа доменов, каждый из которых намагничен до насыщения, и в отсутствии внешнего магнитного поля векторы намагниченности направлены беспорядочно. При протекании тока I по катушке возникает магнитное поле B , пропорциональное силе тока I , под действием которого содержащиеся в ферромагнитном сердечнике домены ориентируются в направлении поля и увеличивают магнитную индукцию. Вообще говоря, намагниченность J всего ферромагнетика сложным образом зависит от напряженности поля: слабо растет при малой напряженности, стремится к предельному значению при большой напряженности и характеризуется таким процессом как гистерезис. Однако в определенном диапазоне поля можно полагать, что намагниченность J пропорциональна напряженности магнитного поля B . В пространственно неоднородном магнитном поле на намагниченный сердечник действует сила $F \sim \frac{\partial(JB)}{\partial x}$, перемещающая ферромагнетик в более сильное магнитное поле (здесь координата x направлена вдоль действия силы). В итоге получается, что ферромагнитный сердечник втягивается в катушку с силой, пропорциональной квадрату силы тока. Поскольку сила пружины, уравнивающая смещение сердечника, пропорциональна смещению, то угол поворота подвижной части прибора φ пропорционален квадрату измеряемого тока I . Однако, как можно заметить, шкалу прибора размечают не в единицах I^2 , а в единицах эффективного или действующего значения тока:

$$I_{\text{эфф}} \sim \sqrt{I^2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt} .$$

Легко увидеть, что при переменном синусоидальном токе $I(t) = I_0 \sin \omega t$ эффективное значение тока равно $I_{\text{эфф}} = I_0 / \sqrt{2}$.

Обратим внимание, что, хотя угол поворота стрелки φ пропорционален квадрату измеряемого тока I , шкала прибора линейна по току за исключением небольшого участка в начале. Линейность шкалы обеспечивается специальной формой сердечника, когда по мере втягивания сердечника в катушку большая часть ферромагнетика перемещается в более однородное магнитное поле, которое втягивает сердечник с меньшей силой. Конечно, при изготовлении прибора учитывается реальная зависимость намагниченности от тока и изменение магнитного поля вне сердечника из-за намагниченности последнего.

Устройство одного из приборов электромагнитной системы представлено на рис. 4. Ферромагнитный сердечник специальной формы, соединенный со стрелкой, закреплен эксцентрично на оси и может входить в щель катушки, поворачиваясь вокруг оси. Магнитный успокоитель служит для сокращения времени колебаний стрелки.

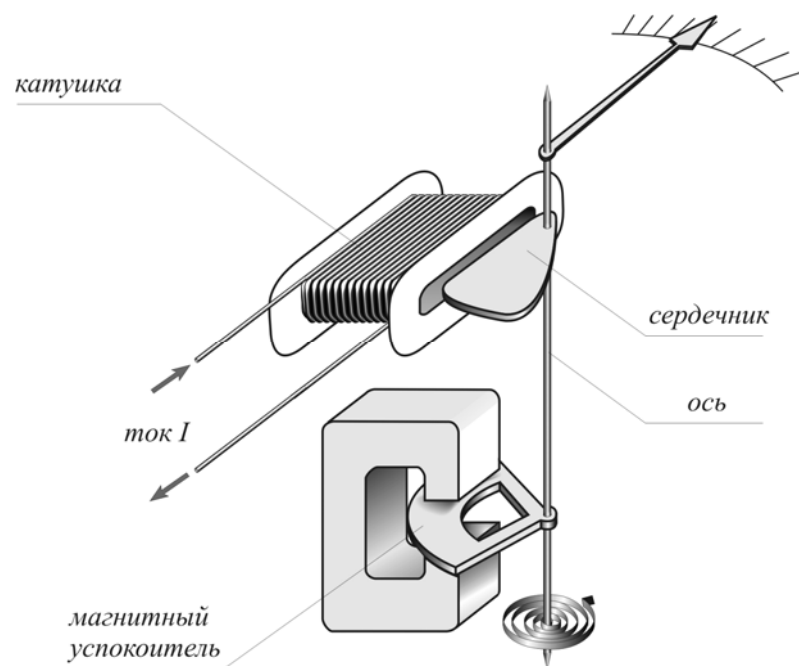



Рис. 4. Устройство прибора электромагнитной системы.

На лицевой панели электромагнитных приборов присутствует значок , и название прибора начинается с буквы Э. Достоинством приборов электромагнитного типа является их простота и надежность, возможность измерения и постоянного, и переменного тока. Изменяя число витков и сечение провода обмотки, легко изготовить приборы для измерения разной силы тока (обычно от 100 мА до 100 А). К недостаткам можно отнести их малую чувствительность, большое потребление мощности от измеряемой цепи (обычно 0,1 - 1 Вт), нелинейность шкалы и зависимость показаний от частоты. Дело в том, что полное сопротивление катушки Z увеличивается с

увеличением частоты ω как $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$, где R – активное сопротивление и L – индуктивность катушки, и, соответственно, уменьшается ток через обмотку при неизменном напряжении. Обычно приборы этого типа градуируют на частотах 50 – 400 Гц, когда активное сопротивление прибора много больше индуктивного. На шкале прибора подчеркиванием указывается основной диапазон частот, соответствующий классу точности прибора, и расширенный, не подчеркнутый, в котором погрешность измерения в два раза хуже указанного класса точности.

Электростатическая система

Возьмем обычный простой электростатический конденсатор, выполненный в виде двух параллельных пластин, находящихся на небольшом расстоянии друг от друга. Пусть одна из пластин закреплена, а вторая подвешена на пружине, и на пластинах нет никакого заряда. При подаче напряжения U на конденсатор на поверхности пластин появится электрический заряд Q , приводящий к возникновению электрического поля E . Подвижная пластина с зарядом Q в поле E будет притягиваться к неподвижной с силой F , равной $F = QE$, уравновешиваемой механической противодействующей силой пружины. Поскольку и величина заряда, и напряженность электрического поля пропорциональны напряжению U , а сила пружины пропорциональна смещению, то смещение подвижной части прибора будет пропорционально квадрату измеряемого напряжения U .

Несмотря на столь сильную зависимость смещения от напряжения, шкалы реальных электростатических приборов линейны в большей части и также, как и шкалы приборов электромагнитной системы, размечены не в единицах U^2 , а в единицах эффективного или действующего напряжения:

$$U_{\text{эфф}} \sim \sqrt{U^2} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}.$$

Обеспечение линейности шкалы можно понять, рассмотрев устройство одного из конкретных приборов электростатической системы, показанное на рис. 5. Подвижный электрод специальной формы с закрепленной на нём стрелкой или зеркальцем по мере увеличения напряжения входит в зазор между двумя пластинами, представляющими собой неподвижный электрод. При симметричном расположении по вертикали подвижной пластины относительно неподвижных вертикальные компоненты силы, действующие на подвижную пластину со стороны электрического поля, компенсируются и остается только сила, лежащая в плоскости пластины и приводящая к

вращению. Величину этой силы можно оценить как $F_{\perp} = Q E \cos\alpha$, где α – угол наклона силовых линий электрического поля к плоскости электрода. При увеличении напряжения подвижный электрод все глубже входит в неподвижный, угол α возрастает, и сила, с которой подвижный электрод втягивается в неподвижный, зависит от напряжения уже не как U^2 , а слабее. Причем тогда, когда подвижный электрод полностью войдет в неподвижный и силовые линии электрического поля будут перпендикулярны его поверхности, на него уже не будет действовать сила со стороны электрического поля.

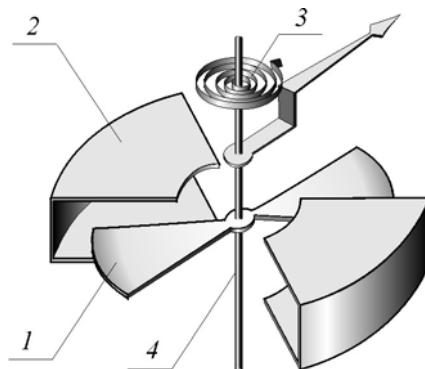


Рис. 5. Конструкция электростатического вольтметра: 1 – подвижный электрод, 2 – неподвижный электрод, 3 – пружина, 4 – ось вращения.

На лицевой панели электростатических приборов присутствует значок \oplus , и название прибора начинается с буквы С. Отличительной особенностью приборов электростатической системы является очень высокое внутреннее сопротивление, достигающее при постоянном токе величины до 10^{16} Ом. Благодаря высокому сопротивлению заряд на электродах измерительной системы сохраняется долго. Поэтому для установки нуля прибора необходимо замкнуть его клеммы. Только в этом случае вы можете гарантировать, что потенциалы электродов одинаковы и заряд на них отсутствует, поскольку один из электродов, как правило подвижный, соединен с заземленным проводящим экраном, покрывающим корпус прибора изнутри и экранирующим прибор от внешних электрических полей.

Цифровые измерительные приборы

В последнее время все чаще для измерений используют цифровые приборы. Основой цифрового вольтметра является аналого-цифровой преобразователь (АЦП), сравнивающий измеряемую величину с набором эталонов и выдающий результат в цифровом виде. Как правило, в состав АЦП входят прецизионный генератор пилообразного (линейно зависящего от времени) напряжения, устройство сравнения, импульсный генератор и счетчик импульсов. Измеряемое напряжение U_0 и пилообразное напряжение $U(t)$ подаются на устройство сравнения. Как только пилообразное напряжение достигает уровня измеряемого напряжения, прекращается генерация импульсов, запущенная одновременно с запуском пилообразного напряжения. Таким образом, число импульсов, сосчитанное счетчиком, оказывается однозначно связанным с измеряемым напряжением.

Цифровой вольтметр представляет информацию в цифровом виде, что уменьшает субъективную ошибку считывания результата и дает возможность соединения с компьютером, что позволяет записывать результат измерения непосредственно в электронном виде, отображать его на экране монитора, использовать для управления.

Цифровой амперметр можно реализовать, установив на входе цифрового вольтметра калиброванный резистор небольшой величины, через который протекает измеряемый ток. Падение напряжения на входном резисторе, пропорциональное протекающему току, измеряется цифровым вольтметром, табло которого соответствующим образом градуируется.

3. Влияние внутреннего сопротивления приборов на измерения

При подключении измерительного прибора к электрической цепи её параметры в той или иной степени изменяются, что необходимо учитывать при проведении измерений. Основное требование к электроизмерительным приборам сводится к минимизации влияния прибора на параметры и режим работы объекта измерений.

Амперметр включается в электрическую цепь последовательно в разрыв цепи, как показано на рис. 6, а. При подключении амперметра ток в цепи уменьшается со значения $I_0 = \mathcal{E}/r$ до $I = \mathcal{E}/(r + R_a)$. Поэтому только в том случае, если внутреннее сопротивление амперметра R_a много меньше сопротивления цепи r , амперметр не вносит заметных искажений. Отсюда следует, что идеальный амперметр – это амперметр с нулевым входным сопротивлением.

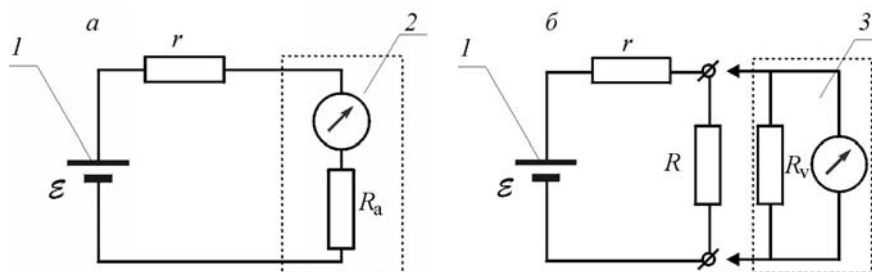


Рис. 6. Эквивалентные схемы измерения тока амперметром (а) и напряжения вольтметром (б), 1 – источник электродвижущей силы \mathcal{E} , 2 – амперметр, 3 – вольтметр; r – сопротивление цепи, включающее внутреннее сопротивление источника, R – сопротивление измеряемого участка цепи, R_a и R_v – внутренние сопротивления амперметра и вольтметра.

Вольтметр включается параллельно тому участку цепи, на котором измеряется падение напряжения (разность потенциалов). При подключении вольтметра напряжение на измеряемом участке цепи уменьшается со значения $U_0 = \mathcal{E} \frac{R}{R+r}$ до $U = \mathcal{E} \frac{R R_v}{(R+r)R_v + rR}$. Напряжения U_0 и U

близки, если внутреннее сопротивление вольтметра R_v много больше сопротивления измеряемого участка цепи R . Следовательно, идеальный вольтметр – это вольтметр с бесконечно большим входным сопротивлением.

4. Изменение пределов электроизмерительных приборов

Многие измерительные приборы являются многопредельными, тогда у соответствующего положения переключателя или клеммы указывается значение величины тока или напряжения при отклонении на всю шкалу.

Изменение пределов измерения в амперметрах достигается параллельным подключением дополнительного сопротивления (шунта), уменьшающего ток через измерительный механизм. В вольтметрах, реагирующих на ток, изменение пределов измерений достигается последовательным включением добавочного сопротивления, также уменьшающим ток через измерительную систему. Для вольтметров электростатической системы расширение пределов измерения достигается механическим изменением расстояния между подвижным и неподвижным электродами.


5. Определение результата и погрешности измерения. Класс точности приборов

Обычно многопредельные приборы имеют одну шкалу, размеченную в относительных единицах. В таком случае значение измеряемой величины определяется следующим образом:

$$X = \frac{n}{N} A_{\max},$$

где n – показание стрелки прибора в относительных единицах; N – максимальное значение относительной величины; A_{\max} – максимальное абсолютное значение, указанное на переключателе диапазона прибора и соответствующее полному отклонению стрелки.

Помимо собственно измерения величины X всегда определяется погрешность измерения ΔX , и результат представляется в виде $X \pm \Delta X$. Погрешность измерения определяется из класса точности прибора, указанного на его шкале (например, как 0,5 или 2). Если на приборе указан класс точности 0,5, то это означает, что показания прибора правильны с точностью до 0,5 % от всей действующей шкалы прибора, т.е. от максимального абсолютного значения A_{\max} . Поскольку ΔX не зависит от положения стрелки и, соответственно, от измеряемой величины, для обеспечения лучшей относительной точности измерений необходимо выбирать диапазон многопредельного прибора таким, чтобы показания прибора были в конце его шкалы.

Обратите внимание: если под значением класса точности прибора присутствует значок, такой, как на шкале омметра тестера , то погрешность прибора указывается в процентах от длины рабочей части шкалы.

6. Тестер

В лабораторной практике часто используют тестер – универсальный многопредельный электроизмерительный прибор, предназначенный для измерения постоянного напряжения и силы тока, действующего (эффективного) значения переменного напряжения и тока, сопротивления постоянному току и других величин. Измерительным устройством тестера является обычно микроамперметр магнитоэлектрической системы с типичным током полного отклонения 100 мкА и сопротивлением рамки порядка 1 кОм. В связи с расширением пределов измерения тестер имеет различные внутренние сопротивления на разных пределах измерения, обычно указанных в табличке, прикрепленной на нижней стороне прибора.

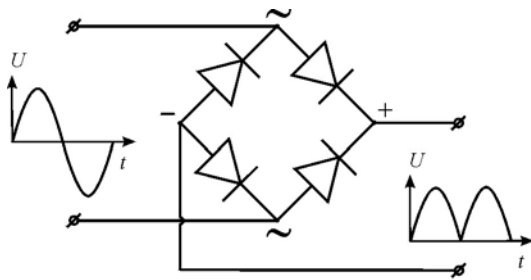


Рис. 8. Схема двухполупериодного выпрямления синусоидального тока.

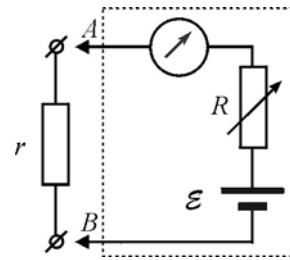


Рис. 9. Принципиальная схема измерения сопротивления тестером.

При измерении параметров переменного тока используется двухполупериодная схема выпрямления (рис. 8). Выпрямленный ток (пульсирующий, но одной полярности) подается далее в схему измерения магнитоэлектрическим прибором, шкала которого проградуирована в эффективных (действующих) значениях напряжения (тока).

Измерение сопротивления внешней цепи осуществляется с помощью встроенного источника постоянного напряжения (сменные электрохимические источники) и переменного сопротивления (рис. 9). Перед измерением сопротивления клеммы *A* и *B* замыкаются, и подстроечным резистором *R* (установка "0") стрелка измерительного прибора устанавливается на предел шкалы (максимум силы тока), что соответствует нулю на шкале измерения сопротивления. Последующее включение измеряемого сопротивления *r* уменьшает силу тока, стрелка прибора отклоняется на меньший угол и указывает на величину измеряемого сопротивления.

Задание

1. Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника постоянного напряжения.

Возьмите источник постоянного напряжения с высоким внутренним сопротивлением и измерьте напряжение на его зажимах поочередно приборами электростатической и магнитоэлектрической системы. Запишите полученные результаты, естественно, с указанием точности. Объясните различие показаний приборов. Определите ЭДС источника и его внутреннее сопротивление. Соедините приборы параллельно, присоедините их к источнику и измерьте напряжение. Объясните результат измерения.

Для выяснения причины расхождения в показаниях приборов рассмотрим электрическую цепь, состоящую из источника ЭДС с внутренним сопротивлением r и вольтметра с сопротивлением R_v . Ток в цепи равен $I = \mathcal{E}/(r + R_v)$, напряжение на зажимах прибора – $U = I R_v = \mathcal{E} R_v/(r + R_v)$. Видно, что измеряемое напряжение U всегда меньше ЭДС источника \mathcal{E} .

2. Определение амплитуды переменного напряжения.

К генератору переменного напряжения через низкочастотный диод подключите параллельно электростатический, электромагнитный, магнитоэлектрический вольтметры и осциллограф (рис. 10). Используя осциллограф, убедитесь, что диод действительно пропускает синусоидальный сигнал только в течение полупериода; в противном случае добейтесь данного режима, изменяя частоту подаваемого сигнала. Переключая ручки управления генератора, установите амплитуду сигнала в районе 100 В. Измерьте напряжение, показываемое каждым из вольтметров и осциллографом. Повторите измерения без диода, что может быть легко реализовано его шунтированием, которое обеспечивается замыканием переключателя, показанного на рис. 10.

Как в режиме пропускания тока через диод, так и в режиме без диода, из показаний стрелочных приборов определите амплитудное значение напряжения, сравните его с показанием осциллографа. Результаты измерений и вычислений представьте в виде таблицы.

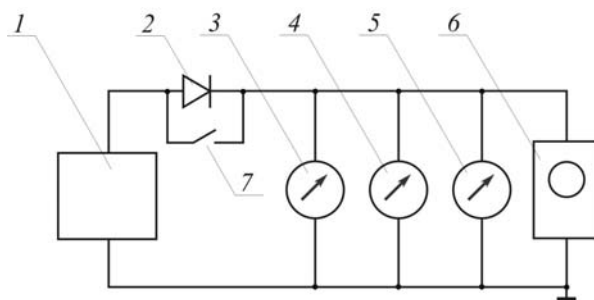


Рис. 10. Схема измерения амплитуды переменного напряжения, 1 – генератор, 2 – диод, 3, 4, 5 – вольтметры, 6 – осциллограф, 7 – переключатель.

3. Определение рабочего интервала частот вольтметров.

Соберите схему (рис. 11). Исследуйте частотную характеристику вольтметров электромагнитной и электростатической систем, т.е. определите зависимость показаний вольтметров электромагнитной и электростатической систем от частоты генератора при постоянном выходном напряжении, обязательно контролируемом осциллографом. Постройте графики $U(f)$, откладывая частоту f в логарифмическом масштабе: $\lg f$. Определите рабочий интервал частот вольтметров, т.е. диапазон частот, когда различие показаний не превышает пределов погрешности. Сравните с диапазоном, указанным на шкале приборов. Объясните полученные результаты. Оцените индуктивность L электромагнитного вольтметра.

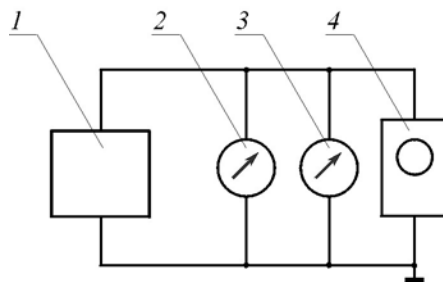


Рис. 11. Схема измерения частотной характеристики вольтметров, 1 – генератор, 2 – электростатический вольтметр, 3 – электромагнитный вольтметр, 4 – осциллограф.

4. Определение эквивалентного сопротивления электростатического вольтметра.

4.1. Зарядите емкость электростатического вольтметра, присоединив его на короткое время к источнику питания. Поскольку сопротивление постоянному току вольтметра R очень велико, то заряд на электродах измерительной системы сохраняется долго, и вольтметр будет продолжать показывать некоторое напряжение в течение длительного времени. Периодически фиксируя показания вольтметра в течение 20–30 минут, постройте зависимость напряжения от времени. Полагая, что разрядка емкости происходит по закону $U(t) = U_0 \exp(-t/RC)$, где R – сопротивление утечки, C – емкость, составляющая величину порядка 10^{-11} Ф, постройте зависимость сопротивления от времени. Для этого следует взять две соседние экспериментально измеренные точки на кривой разрядки и определить сопротивление по приведенной выше формуле. Далее на графике следует отобразить это значение так, чтобы было понятно, что оно измерено именно в этот промежуток времени. Очевидно, что количество полученных значений сопротивления может быть всего на одно значение меньше количества измеренных значений напряжения. Можно поступить по-другому, а именно, аппроксимировать кривую разрядки гладкой функцией, разбить её произвольным образом на временные отрезки и проделать описанную выше процедуру определения зависимости сопротивления от времени.

4.2. Используя высокочувствительный амперметр, измерьте ток утечки электростатического вольтметра, подключив его к источнику постоянного напряжения (рис. 12). По показаниям приборов найдите эквивалентное сопротивление электростатического вольтметра. Сравните полученное значение с ранее измеренным в упражнении 4.1. Объясните результат.

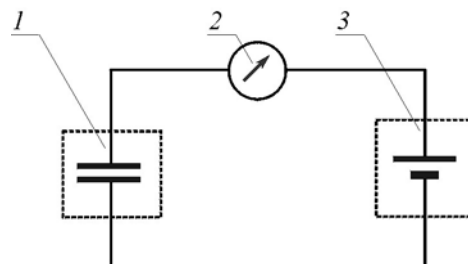


Рис. 12. Схема измерения тока утечки электростатического вольтметра, 1 – электростатический вольтметр, 2 – наноамперметр В7-21, 3 – источник напряжения постоянного тока.