

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

**Цель работы:** ознакомление с электроизмерительными приборами, определение чувствительности, цены деления и погрешности приборов, расчет шунта и добавочного сопротивления, сборка простейших цепей.

**Приборы и оборудование:** набор электроизмерительных приборов.

#### Теория вопроса.

Все электроизмерительные приборы (ЭИП) классифицируются по следующим основным признакам:

а) по роду измеряемой величины: амперметры (измеряют силу тока), вольтметры (измеряют напряжение), омметры (измеряют сопротивление), ваттметры (измеряют мощность) и т.д.

б) по роду измеряемого тока: приборы постоянного тока, приборы переменного тока, приборы постоянного и переменного тока;

в) по системе прибора: магнитоэлектрические (МЭ), электромагнитные (ЭМ), электродинамические (ЭД), индукционные, тепловые;

г) по степени точности: 0.1; 0.2; 0.5; 1.0; 1.5; 2.5; 4.0 класса точности.

На шкалу прибора наносятся символы указывающие: систему прибора, род измеряемого тока, положение шкалы при измерении, пробивное напряжение изоляции, класс точности (см. табл. 1).

Приборы класса точности 0.1; 0.2; 0.5 применяются для точных лабораторных измерений и называются прецизионными. ЭИП состоят из подвижной и неподвижной частей. При измерениях вращающий момент неподвижной части уравновешивается противодействующим моментом пружины или какого-либо другого устройства. При таком равновесии указатель прибора фиксирует определенный угол поворота.

Таблица 1.

Символ	Пояснение	Символ	Пояснение
	Магнитоэлектрическая система	—	Прибор постоянного и переменного тока
	Электромагнитная система	<b>1.0</b>	Класс точности 1.0
	Электродинамическая система	★	Пробивное напряжение изоляции 2кВ
	Тепловая система	┌	Горизонтальное положение шкалы при измерении
Φ	Индукционная система	└	Вертикальное положение шкалы при измерении
—	Прибор постоянного тока		Прибор со встроенным выпрямителем
	Прибор переменного тока		

Устанавливая однозначную зависимость между углом поворота указателя прибора и численным значением измеряемой величины, можно построить шкалу, по которой и производится отсчет измеряемой величины. Трение в опорах деталей и другие причины влияют на показания прибора, т.е. вносят погрешность. Поправки к показанию прибора могут быть заранее определены путем соответствующей проверки данного прибора.

Величина  $S$  численно равная отношению приращения угла поворота  $d\phi$  подвижной части прибора к приращению измеряемой величины  $dA$ , называется чувствительностью прибора:  $S = d\phi/dA$ . (1)

Ценой деления прибора называют величину:  $C = 1 / S = dA/d\phi$ . (2)

Чем больше чувствительность прибора, тем меньшие величины можно измерить прибором. Цена деления  $C$  определяет значение измеряемой величины, вызывающей отклонение стрелки на одно деление.

Пример: Пусть шкала вольтметра имеет 50 делений. Вольтметр рассчитан на измерение напряжения от 0 до 250 Вольт. Чувствительность этого вольтметра будет равна  $S = 50 \text{ делений} / 250 \text{ Вольт} = 0.2 \text{ деления/Вольт}$ . Цена деления равна:  $C = 1/S = 250 \text{ Вольт} / 50 \text{ делений} = 5 \text{ Вольт/деление}$ .

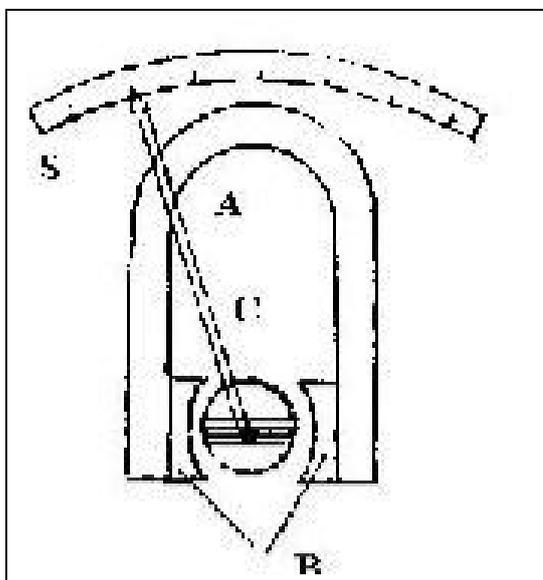
Чтобы определить значение измеряемой величины необходимо цену деления прибора умножить, на число делений, на которое отклонилась стрелка.

Например: При измерении напряжения описанным выше вольтметром, стрелка отклонилась на 40 делений. Тогда измеренное напряжение равно  $U = C * N = 5 \text{ В/дел} * 40 \text{ дел} = 200 \text{ В}$ .

В зависимости от конструкции приборы предназначаются для работы в определенном положении: вертикальном, горизонтальном или наклонном. Для сокращения времени успокоения подвижной части прибора после включения в цепь в приборах имеются специальные тормозящие устройства, называемые демпферами.

### Системы злектроизмерительных приборов.

1. *Приборы магнитоэлектрической (МЭ) системы.* Принцип действия приборов этой системы основан на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита с магнитным полем тока, протекающим по обмотке легкой подвижной рамки (катушки). На рис.1 показана схема устройства приборов МЭ системы.



Неподвижный подковообразный магнит  $A$  имеет выполненные из мягкого железа полюса  $B$ , которые охватывают сплошной железный сердечник  $C$ . Между сердечником и полюсами магнита имеется кольцевой зазор. На одной оси с сердечником находится подвижная легкая прямоугольная рамка, имеющая обмотку из тонкого изолированного провода. Эта рамка может свободно вращаться в воздушном

зазоре между сердечником и полюсами магнита. Рамка представляет собой основную часть подвижной системы, которая включает и указатель – стрелку S. Подвижная система с основным механическим приспособлением состоит из спиральных пружин выполненных из немагнитного материала, которые и служат для подвода тока к концам обмотки на рамке и для оказания противодействия вращению рамки.

В результате взаимодействия магнитного поля магнита с током, протекающим по рамке, возникает вращающий момент, под действием которого подвижная часть прибора проворачивается вокруг оси. Противодействующий момент создается пружинами, через которые также подводится ток к обмотке.

Теоретически нетрудно установить зависимость угла поворота подвижной части  $\alpha$  от величины тока  $I$ , протекающего по обмотке рамки прибора:  $\alpha = k \cdot I$  (3), где  $k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции прибора. Из этой зависимости видно, что магнитоэлектрические приборы имеют равномерные шкалы.

Область применения МЭ приборов весьма обширна. Они применяются в качестве амперметров и вольтметров постоянного тока, как при технических измерениях, так и при контрольных лабораторных измерениях. Из всех электроизмерительных приборов с непосредственным отсчетом они дают наибольшую точность измерения и являются наиболее экономичными в смысле потребления энергии. Лучшие конструкции этих приборов имеют класс точности 0,2. При непосредственном включении миллиамперметры и амперметры МЭ системы позволяют измерять токи от 1 мА до 100 А, а с применением шунта до нескольких тысяч ампер. Вольтметры этой системы при непосредственном включении дают возможность измерять напряжение от 0,1 до 600 В, а с дополнительным сопротивлением до 10000 В и более. Для переменного тока магнитоэлектрические приборы неприменимы, т.к. подвижная часть вследствие инерции не успевает отклоняться.

Основные достоинства приборов МЭ системы:

- а) высокая точность (класс точности до 0,2);
- б) высокая чувствительность (позволяют измерять токи до 1 мА);
- в) равномерная шкала отсчета.

Основные недостатки приборов МЭ системы:

- а) применяются для измерения только постоянного тока и напряжения; для измерения переменного тока прибор необходимо дополнить выпрямителем;
- б) при кратковременных перегрузках мгновенно выходит из строя, т.к. рамка прибора состоит из небольшого числа витков из тонкого провода, который при перегрузке быстро сгорает.

2. *Приборы электромагнитной (ЭМ) системы.* Принцип работы приборов этой системы основан на взаимодействии магнитного поля тока, протекающего по обмотке неподвижной катушки, с подвижным железным сердечником, помещенным в этом магнитном поле. На рис.2 показана схема устройства ЭМ прибор. Прибор состоит из прямоугольной катушки А с узкой щелью (просветом). Сердечник В изготовлен из мягкого железа и эксцентрично на оси. С осью

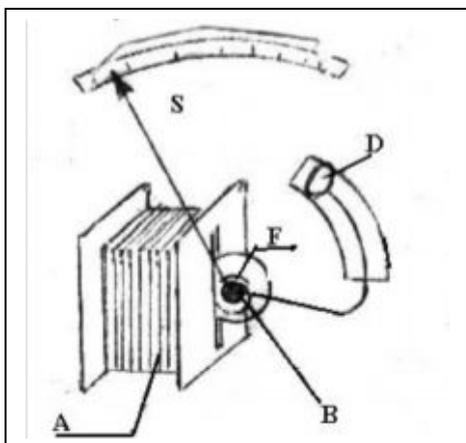


Рис.2

сердечника скреплены стрелка S, поршень воздушного успокоителя D и спиральная пружина F, создающая противодействующий момент.

Ток, протекающий по катушке A, образует внутри нее магнитное поле, под действием которого железный сердечник, поворачиваясь вокруг оси, втягивается в щель катушки.

При увеличении тока возрастает индукция в щели катушки и увеличивается намагничивание железного сердечника. Элементарная теория позволяет установить, что между углом отклонения стрелки и величиной тока должна быть квадратичная зависимость:  $\alpha = k \cdot I^2$  (4), где  $k$  – некоторый коэффициент,  $I$  – величина тока. Следовательно, шкала таких приборов неравномерная.

Приборы ЭМ системы применяются в основном для измерения переменного тока, хотя могут применяться и для измерения постоянного тока. Они просты по конструкции и недороги. Электромагнитные амперметры и вольтметры получили широкое применение как щитовые приборы для переменного тока. Пределы измерения у амперметров от 6 мА до 200 А, у вольтметров от 3 до 600 В,

Точность приборов этой системы зависит от внешнего магнитного поля, частоты измеряемого переменного тока и др. Специальные конструктивные устройства позволяют избежать влияния многих факторов на точность измерения. Однако точность приборов этой системы по сравнению с приборами других систем невысокая.

Основные достоинства приборов ЭМ системы:

- а) простота конструкции;
- б) применяются для измерения постоянного и переменного тока, и напряжения;
- в) при кратковременных перегрузках выше вероятность, что прибор не сгорит, т.к. катушка содержит много витков провода и не успевает сгореть за короткое время перегрузки.

Основные недостатки приборов ЭМ системы:

- а) показания приборов зависят от внешних магнитных полей;
- б) невысокая по сравнению с приборами других систем точность;
- в) неравномерная шкала отсчета.

### 3. Приборы других систем.

*А. Электродинамическая система* – принцип действия приборов основан на взаимодействии токов, протекающим по двум рамкам (катушкам), из которых одна подвижная, а другая неподвижная. Электродинамические приборы применяют для измерения постоянного и переменного токов (амперметры, вольтметры, ваттметры). Точность и чувствительность этих приборов для

переменного тока очень высокие. На показания приборов большое влияние оказывают внешние магнитные поля.

*В. Тепловая система* – принцип действия основан на изменении длины проводника при его нагревании. Эти приборы могут измерять постоянные и переменные токи.

*С. Индукционная система* – принцип действия основан на взаимодействии токов индуцируемых в подвижной части прибора с магнитным потоком неподвижного магнита.

*Д. Вибрационная система* – основана на резонансе при совпадении частот собственных колебаний подвижной части прибора с частотой переменного тока. Приборы этой системы применяются для измерения частоты тока.

### Амперметры, вольтметры и гальванометры.

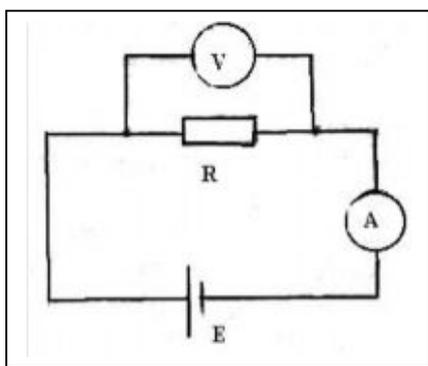


Рис.3

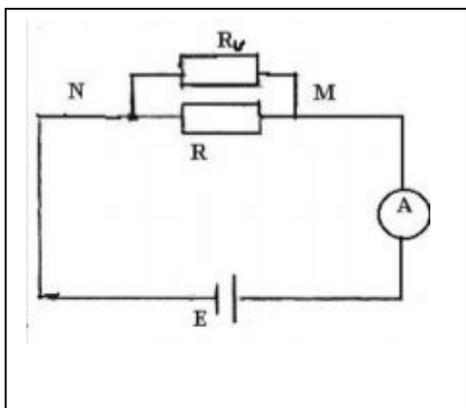
*Амперметр* называется прибор, служащий для измерения силы тока. При измерениях амперметр включают в цепь последовательно, т.е. так, что весь измеряемый ток проходит через амперметр (рис.3). Так как амперметр при включении в цепь влияет на величину тока, то необходимо чтобы сопротивление амперметра было как можно меньше. Покажем на примере.

Если сопротивление в цепи равно  $R$ , то в отсутствии амперметра ток равен  $I = E/(R+r)$ , где  $r$  – внутреннее сопротивление источника тока. При подключении амперметра ток будет равен  $I' = E/(R + r + R_a)$ , где  $R_a$  – сопротивление амперметра.

Из сравнения выражений для  $I$  и  $I'$  видно, что  $I = I'$  при  $R_a = 0$ , т.е. чтобы не вносить в цепь искажений, в идеале  $R_a$  должно быть равно нулю (в реальности как можно меньше). Слабые токи измеряются обычно МЭ амперметрами, которые имеют конструктивные улучшения и благодаря этому приобретают высокую чувствительность. Такие приборы называются миллиамперметрами (токи до  $10^{-3}$  А) и микроамперметрами (токи до  $10^{-6}$  А). На схеме амперметр обозначается кружком с буквой "А".

*Вольтметрами* называют приборы, служащие для измерения напряжения. При измерениях вольтметр, включают параллельно тому участку цепи, на концах которого хотят измерить разность потенциалов, т.е. вольтметр соединяют с теми точками в цепи, разность потенциалов которых нужно измерить (рис.3).

Для того, чтобы включение вольтметра не изменяло заметно режима цепи, сопротивление вольтметра должно быть очень велико по сравнению с сопротивлением  $R$  участка цепи MN. Погрешность при измерениях напряжения тем меньше, чем больше сопротивление вольтметра (рис.4). В отсутствие вольтметра, напряжение на участке MN:  $U = IR = ER/(R+r)$ , где  $I = E/(R+r)$ . При подключении вольтметра с сопротивлением  $R_v$  сила тока в цепи изменится и станет равна  $I'$ . Тогда напряжение на участке MN будет равно  $U' = I'R$ , где  $I' = E/(R' + r)$ , где  $R'$  – общее сопротивление параллельно соединенных



сопротивлений  $R$  и  $R_v$ . По Формуле для общего сопротивления при параллельном соединении определяем:  $1/R' = 1/R + 1/R_v$ , откуда  $R' = RR_v/(R+R_v)$ . Тогда

Рис.4

$$I' = \frac{E}{\frac{RR_v}{R+R_v} + r} = \frac{E(R+R_v)}{RR_v + r(R+R_v)} = \frac{E(R+R_v)}{RR_v + rR + rR_v} = \frac{E\left(\frac{R}{R_v} + 1\right)}{R + \frac{rR}{R_v} + r}$$

$$U' = I'R = \frac{E\left(\frac{R}{R_v} + 1\right)R}{R + r + \frac{rR}{R_v}} = \frac{ER + \frac{ER^2}{R_v}}{R + r + \frac{rR}{R_v}}$$

Сравнивая выражения для  $U$  и  $U'$  видим, что  $U' = U$ , если  $ER/R_v = 0$  и  $rR/R_v = 0$ . Отсюда следует, что необходимо, чтобы  $R_v = \infty$ .

*Гальванометрами* называют чувствительные приборы, служащие для измерения весьма малых токов, напряжений и количества электричества (соответственно меньше  $10^{-6}$  ампера, вольта или кулона).

По принципу действия и устройству гальванометры бывают МЭ с подвижной катушкой, МЭ с подвижным магнитом, струнные, термогальванометры, электродинамометры и электрометры.

По роду измеряемого тока гальванометры разделяются на МЭ и вибрационные (резонансные). Первые применяются для измерения тока и напряжения в цепях постоянного тока, а вторые употребляются преимущественно в качестве указателей отсутствия тока при измерениях в цепях переменного тока по, так называемому, нулевому методу.

Гальванометры с подвижной рамкой (катушкой) по своему устройству принципиально не отличаются от описанного выше устройства приборов магнитноэлектрической системы.

#### *Вспомогательные электрические приборы.*

1. *Шунт.* Шунтом называется сопротивление  $r_{ш}$  включаемое в цепь параллельно амперметру, вследствие чего в амперметр ответвляется только часть измеряемого тока. Таким образом, шунт применяется для расширения пределов измерения амперметра. Пусть необходимо измерить ток  $I$  в " $n$ " раз больший максимально возможного  $I_a$  для данного прибора, т.е.  $I = n * I_a$ .

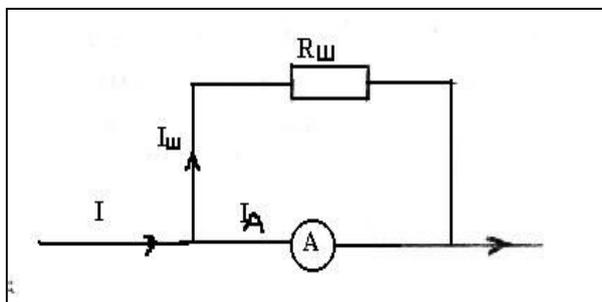


Рис.5

Рассчитаем сопротивление шунта, если сопротивление амперметра  $r_a$ . Т.к. шунт подсоединен параллельно к амперметру, то общее сопротивление  $1/r = 1/(r_{ш} + 1)/r_a = (r_{ш} + r_a)/(r_{ш} * r_a)$ . Сила тока через амперметр  $I_a = U/r_a$ . Когда подсоединён шунт, то  $I = U/r = U * (r_{ш} + r_a) / (r_{ш} * r_a)$ .

Так как  $I = n * I_a$ , то  $I = U/r = U * (r_{ш} + r_a) / (r_{ш} * r_a) = m * U/r_a$ , откуда  $n = (r_{ш} + r_a) / r_{ш}$ , далее получаем  $r_{ш} + r_a = n * r_{ш}$ . Выразим  $r_{ш}$ :  $r_{ш} = r_a / (n - 1)$ , где  $n = I / I_a$ .

Следовательно, чтобы измерить амперметром в "n" раз больший ток, необходимо взять сопротивление шунта в (n - 1) раз меньше сопротивления амперметра. Шунты обычно изготавливаются из манганина, имеющего большое удельное сопротивление, вследствие чего сопротивление шунта практически не зависит от нагревания его током и от изменений температуры окружающей среды. Схема подключения шунта приведена на рис.5.

2. *Добавочное сопротивление (ДС)*. ДС применяется для расширения пределов измерения вольтметра, которое включается последовательно с вольтметром (рис.6). Пусть  $r_d$  – ДС,  $r_v$  – сопротивление вольтметра,  $n = U/U_v$  – во сколько раз нужно увеличить пределы измерения вольтметра. Падение напряжения на

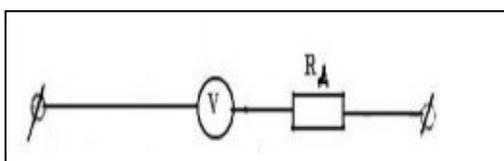


Рис.6

вольтметре в отсутствие  $r_d$  равно  $U_v = I * r_v$ . При подключении  $r_d$  падение напряжения равно  $U = I * (r_d + r_v)$ . Оно в "n" раз больше  $U_v$ , т. е.  $U = n * U_v$ . Тогда  $I * (r_d + r_v) = I * r_v * n$ . Выражая  $r_d$  получим:  $r_d = r_v * (n - 1)$ . Следовательно, если необходимо измерить вольтметром в "n" раз большее напряжение, то необходимо включить последовательно вольтметру добавочное сопротивление  $r_d = r_v * (n - 1)$ .

3. *Реостаты, потенциометры и магазин сопротивлений*. Для измерения силы тока в цепи часто применяются реостаты. В зависимости от назначения реостаты имеют различные виды. В лабораторной практике иногда применяют ламповые реостаты, состоящие из нескольких ламп соединенных параллельно или

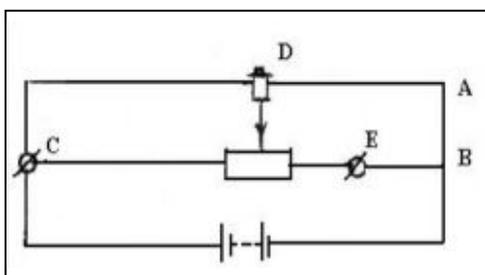


Рис.7

последовательно. Регулирование силы тока происходит за счёт включения в цепь определенного числа ламп. Большое применение получили реостаты со скользящим контактом. Эти реостаты состоят из фарфорового или шиферного цилиндра, на который намотана проволока (или лента), изготовленная из металла с большим удельным сопротивлением. По проводнику может перемещаться контакт (ползунок D) (рис.7), позволяющий постепенно включать в цепь обмотку. Реостат включается в цепь через клемму А, соединенную с ползунком D и клеммами В или С (удобнее подключать через клемму В). Если клеммы В и С соединить с полюсами источника тока (на рис.7 показано пунктиром), то получим прибор, называемый

потенциометром. Перемещая ползунок D между клеммой C и соединенной с ползунком клеммой A, можно получить определенную разность потенциалов в интервале от 0 до U.

Набор эталонных сопротивлений, представляющих собой катушки сопротивлений, называется магазином сопротивлений. Каждая катушка состоит из хорошо изолированной проволочной обмотки, изготовленной из манганина или константана. Сопротивление каждой катушки вполне определено для данной температуры. Катушки набора помещаются в общий ящик.

### Оценка погрешностей электрических измерений.

Абсолютная погрешность измерений, производимых электроизмерительными приборами, оценивается исходя из класса точности приборов. Обозначение класса точности 0,2;0,5;1,0 и т.д. не только характеризует прибор в зависимости от системы, конструкции, качества материалов, точности градуировки и других факторов, но и указывает, что погрешность показаний прибора соответствующего класса в любом месте шкалы не должна превышать 0,2%, 0,5%, 1,0%.

Если обозначим через A' максимально возможное показание прибора, а через n номер класса прибора, то получим абсолютную погрешность прибора:  $\Delta A = n \cdot A'$ . Например, вольтметр 0,2 класса ( $n = 0,002$ ), шкала которого рассчитана на 5В, имеет абсолютную погрешность:  $\Delta U = \pm 0,002 \cdot 5В = \pm 0,01В$ . А амперметр класса 1,5, рассчитанный на максимальное показание 5А, имеет абсолютную погрешность равную:  $\Delta I = \pm 0,015 \cdot 5А = \pm 0,075А$ .

Так как абсолютная погрешность считается одинаковой по всей шкале данного электроизмерительного прибора, то относительная погрешность ( $\Delta L \cdot 100\% / L$ ) будет тем больше, чем меньше измеряемая величина. Если, например, при помощи указанного амперметра измерить ток около 4А, то относительная погрешность будет составлять 1,9%, а при измерении силы тока около 1А - 7,5%. При точных измерениях следует пользоваться такими приборами, чтобы предполагаемое значение измеряемой величины составляло 70-80% от максимального (номинального) значения. Поэтому применяют приборы, имеющие несколько пределов измерений; при работе с таким прибором его включают в цепь на тот предел измерений, который достаточно близок к предполагаемому значению измеряемой величины.

Рассмотрим вычисление погрешности измерения внутреннего сопротивления элемента, электродвижущая сила которого E, напряжение на полюсах U и величина тока I. Для измерения применены вольтметр класса 0,5 ( $U' = 2,5В$ ) и амперметр класса 1,0 ( $I' = 1,5А$ ). Результаты измерений следующие:  $E = 2В$ ,  $U = 1,3В$ ,  $I = 1,2А$ .

Абсолютные погрешности измерений:

$$\Delta E = \Delta U = \pm 0,005 \cdot 2,5 В = \pm 0,0125В \quad \Delta I = \pm 0,01 \cdot 1,5 = \pm 0,015А.$$

Вычисление внутреннего сопротивления производим по формуле:

$$r = (E - U) / I \quad (5).$$

Максимальная относительная погрешность может быть определена общеизвестным методом. Логарифмируя выражение (5):  $\ln(r) = \ln(E-U) - \ln(I)$ , находим относительную погрешность:  $\Delta r/r = \Delta(E-U)/(E-U) + \Delta I/I = (\Delta E - \Delta U)/(E-U) + \Delta I/I = (\pm(0,0125 \text{ В} + 0,0125 \text{ В}) / (2 \text{ В} - 1,3 \text{ В}) + 0,015 \text{ А} / 1,2 \text{ А}) = \pm(0,0357 + 0,01251) = \pm 0,0482$ . Округляя получим  $\Delta r/r = 0,05$ . Эта погрешность, выраженная в процентах составляет:  $(\Delta r/r) * 100 \% = \pm 5\%$ .

С помощью формулы (5) находим внутреннее сопротивление  $r$  и абсолютную погрешность  $\Delta r$ :  $r = (2 \text{ В} - 1,3 \text{ В}) / 1,2 \text{ А} = 0,58 \text{ Ом}$

$$\Delta r = \pm 0,05 * 0,58 = \pm 0,029 \text{ Ом} = \pm 0,03 \text{ Ом}.$$

Следовательно внутреннее сопротивление  $r = (0,58 \pm 0,03) \text{ Ом}$ .

### ***Задания.***

1. Ознакомиться с различными приборами и сделать описание каждого прибора (название, система, класс точности и т.д.).
2. Вычислить чувствительность и цену деления каждого прибора.
3. Исходя из класса точности, определить абсолютную погрешность каждого прибора.
4. По заданию преподавателя рассчитать шунт к амперметру и добавочное сопротивление к вольтметру.
5. По заданию преподавателя собрать простейшие схемы подключения амперметра, вольтметра, шунта и добавочного сопротивления.

### ***Вопросы.***

1. Устройство, принцип действия, достоинства и недостатки приборов магнитоэлектрической системы.
2. Устройство, принцип действия, достоинства и недостатки приборов электромагнитной системы.
3. Принцип действия приборов других систем.
4. Как подключается амперметр и вольтметр? Нарисовать схему подключения.
5. Как подключается шунт к амперметру и добавочное сопротивление к вольтметру? Нарисовать схему подключения.
6. Как рассчитать цену деления, чувствительность, абсолютную и относительную погрешность прибора?

### ***Литература.***

1. Майсова Н.Н. Практикум по курсу общей физики. М. Высшая школа, 1970, 448с. стр.179-193.
2. Кортнев А.В., Рублев Ю.В., Куценко А.Н. Практикум по физике. М. Высшая школа, 1991, 427с.
3. Практикум по общей физике.- под ред. проф. В.Ф.Ноздрева. Учебное пособие. М. Просвещение, 1971, 311с.

