

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

Т. П. ЖЕЛОНКИНА, С. А. ЛУКАШЕВИЧ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Практическое пособие

для студентов физических специальностей университета

Гомель
ГГУ им. Ф. Скорины
2017

УДК 621.317(076)
ББК 31.221я73
Ж786

Рецензенты:

кандидат физико-математических наук В. Е. Гайшун;
кандидат технических наук Н. А. Ахраменко

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
учреждения образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины»

Желонкина, Т. П.

Ж786 Электрические измерения: практическое пособие /
Т. П. Желонкина, С. А. Лукашевич ; М-во образования
Республики Беларусь, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. –
Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2017. – 44 с.
ISBN 978-985-577-375-8

Целью практического пособия является ознакомление студентов
с классификацией измерительных приборов по принципу действия,
применению их в практической деятельности, нахождению погреш-
ностей на основе класса точности прибора.

Издание адресовано студентам физических специальностей.

УДК 621.317(076)
ББК 31.221я73

ISBN 978-985-577-375-8

© Желонкина Т. П.,
Лукашевич С. А., 2017
© Учреждение образования «Гомельский
государственный университет
имени Франциска Скорины», 2017

Оглавление

Введение.....	4
1 Исторические сведения.....	5
1.1 Электрические измерения. Законы тока.....	5
1.2 Измерительные приборы. Технические приложения.....	8
2 Классификация приборов по принципу действия.....	12
2.1 Магнитоэлектрические приборы.....	12
2.2 Электромагнитные приборы.....	13
2.3 Электродинамические приборы.....	14
2.4 Электроприборы тепловой системы.....	17
2.5 Индукционные приборы.....	19
2.6 Вибрационные приборы.....	19
2.7 Электростатические приборы.....	19
2.8 Термоэлектрические приборы.....	19
2.9 Детекторные (выпрямительные) приборы.....	20
2.10 Электронные приборы.....	20
3 Многопредельные приборы.....	21
3.1 Правила пользования многопредельными приборами.....	22
4 Вклад Эрстеда в электрические измерения.....	24
4.1 Использование магнитного эффекта.....	24
4.2 Гальванометр Д'арсонваля.....	25
4.3 Гальванометр Вестона.....	27
4.4 Измерение сильных токов.....	28
4.5 Амперметр постоянного тока.....	29
4.6 Включение амперметра в цепь электрического тока.....	29
4.7 Исключение из общего правила введения амперметра в цепь.....	30
4.8 Электрическое сопротивление и его единица.....	31
4.9 Измерение разности потенциалов.....	31
4.10 Включение вольтметра.....	32
4.11 Измерение сопротивления.....	33
4.12 Вычисление работы, производимой электрическим током.....	33
4.13 Превращение электрической энергии в тепловую энергию.....	34
4.14 Мощность электрического тока.....	35
4.15 Измерение электрической энергии.....	35
Задачи для самостоятельной работы.....	38
Задания для самостоятельной работы.....	39
Задачи на расчёт погрешностей.....	40
Контролирующие тесты.....	41
Литература.....	44

Введение

В настоящее время весь технологический процесс современных предприятий осуществляется с применением многочисленных электродвигателей, электропечей, электросварочных аппаратов, различного рода высокочастотных установок для закалки, термической обработки деталей, для получения специальных сплавов. Нормальная работа такого предприятия, не говоря уже о работе электростанций и электросетей, невозможна без применения большого числа разнообразных электроизмерительных приборов. Показания этих приборов в большинстве случаев являются единственным основанием для суждения о мероприятиях, необходимых для поддержания непрерывности и правильности работы всего комплекса механизмов.

Сравнительно недавно электроизмерительные приборы служили в основном для контроля и учета электрической энергии при ее генерировании и распределении. В настоящее время область их применения значительно расширилась. Причиной этого послужило то, что контроль технических процессов в различных отраслях промышленности, контроль качества материалов, полуфабрикатов готовых изделий выполняется путем измерения неэлектрических величин, но осуществляются эти измерения во многих случаях при помощи электроизмерительных приборов.

Исключительно велика роль электроизмерительной техники при различных лабораторных и научных исследованиях. Электроизмерительные приборы заполняют пульты управления электростанций, предприятий связи, диспетчерских пунктов электрических, газовых, тепловых сетей, нефтепродуктов.

В учебном пособии рассматриваются исторические сведения об электроизмерительных приборах и измерениях электротехнических величин, даются краткие сведения по принципу действия приборов и их включения в электрическую цепь.

В работе приведены задания для самостоятельной работы, задачи на расчет погрешностей.

Цель данного пособия – научить студентов правильно пользоваться электроизмерительными приборами различной классификации.

Издание предназначено для проведения вводных занятий по лабораторным работам курса «Электричество».

Практическое пособие адресовано студентам физических специальностей университета.

1 Исторические сведения

1.1 Электрические измерения. Законы тока

Количественные теоретические исследования в электродинамике становились возможными благодаря успехам электростатометрии. В развитии последней заслуги Вебера неоспоримы.

Прежде всего надо было выбрать единицы электрических величин. Развивая идеи Гаусса об абсолютной системе единиц, Вебер указывает на следующие возможности определения единицы силы тока.

Единица электричества может быть выбрана по примеру гауссовой единицы магнетизма из закона Кулона. Тогда единица силы тока может быть определена как сила тока, «который возникает, когда через каждое поперечное сечение цепи в единицу времени проходит единица свободного положительного электричества в одном направлении и столько же отрицательного в противоположном». Эту единицу, установленную им в 1855 г., Вебер назвал *механической*.

Ещё раньше, в первых исследованиях 1846 г., он указал на возможность определения трёх единиц силы тока:

– во-первых, *электролитическая единица*. В качестве такой единицы Вебер предлагает силу тока, который в 1 секунду разлагает 1 мг воды;

– во-вторых, такую единицу он предлагает определить из магнитных действий тока. Эта единица определяется, как сила такого тока, который, обтекая плоскость размером в единицу площади, действует на расстоянии совершенно так же, как магнит, обладающий моментом, равным единице, ось которого перпендикулярна плоскости тока. Практически Вебер предлагает использовать для измерения тока в магнитных единицах *тангенс-буссоль*, принцип работы которого был предложен Пулье в 1837 г. и который Вебер впервые применил в 1842 г. Единица силы тока, протекая по окружности буссоли, отклонит его на угол

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{2\pi}{HR},$$

где R – радиус буссоли;

H – горизонтальная составляющая земного магнетизма;

– в-третьих, единица тока может быть определена из динамических взаимодействий токов. Динамическая единица силы тока – это сила

такого тока, который, протекая по элементу длины, равной единице, действует на равный ему параллельный элемент тока, по линии, перпендикулярной к ним, на расстоянии, равном единице, с силой в одну механическую единицу.

Магнитная единица в $\sqrt{2}$ больше динамической. Это было подтверждено Вебером. Он же нашёл, что магнитная единица в $106^{2/3}$ раза меньше электролитической. Особенно важным в историческом отношении было произведённое Вебером совместно с Кольраушем в 1856 г. сравнение магнитной единицы с механической. Опыт заключался в следующем. Лейденская банка C заряжалась определённым количеством электричества (это количество электричества могло быть измерено с помощью кулоновских весов). Банка разряжалась через тангенс-гальванометр в течение известного промежутка времени τ . По отклонению ϕ можно было определить силу тока в магнитных единицах, которая, с другой стороны, равнялась e/τ , e/τ , где e – количество электричества, измеренное в механических единицах. Из многочисленных измерений Вебер и Кольрауш нашли, что механическая единица относится к магнитной, как $1:155\,370 \cdot 10^6$, а следовательно, к электродинамической, как $1:109\,860 \cdot 10^6$ и к электролитической, как $1:16\,576 \cdot 10^6$.

Отсюда можно было определить постоянную C в законе Вебера. Она оказалась равной $C = 439\,440 \cdot 10^6$ мм/с.

Эта величина равна скорости света в пустоте, разделённой на 42. Этот важный факт авторами эксперимента был оставлен без внимания.

Продолжая развивать свою систему единиц, Вебер предложил в качестве единицы электродвижущей силы выбрать электродвижущую силу, которая индуцируется в витке проволоки, охватывающей площадь, равную единице э.д.с. при повороте последнего из положения, параллельного магнитному полю силой в единицу, на угол 90° в течение одной секунды. Тогда абсолютная единица сопротивления оказывалась равной сопротивлению такого проводника, в котором единица электродвижущей силы создаёт ток, равный единице. Она имела размерность скорости и обозначалась мм/с.

Предложенная Вебером система, удобная в теоретических расчётах, на практике представляла значительные неудобства. Измерение электродвижущей силы путём сравнения с электродвижущей силой, полученной индукционным методом, провести было невозможно. Практика выработала методы электродвижущей силы постоянно действующих источников и методы сопротивлений, которые позволяли,

выбрав электродвижущую силу определённого источника за эталон, выражать все электродвижущие силы в этом масштабе.

Метод измерения электродвижущих сил был предложен в 1841 г. Поггендорфом под названием *метода компенсации*.

Однако практические измерительные схемы (Поггендорфа, Уитстона) уже требовали знания законов разветвления токов. Частные случаи этой проблемы рассматривали такие физики, как Ом, Уитстон, Поггендорф, Вебер, Пулье. В общем виде эта проблема была поставлена и решена студентом Г. Кирхгофом в 1845 г., когда будущему известному физику был всего 21 год.

Законы распределения токов в сложных цепях Кирхгофом даны в виде прибавления к работе «О прохождении тока через плоскость, в частности ограниченную окружностью». Законы Кирхгофа гласят: «Если через систему проводов, связанных между собою произвольным образом, проходят гальванические токи, то:

1) в случае, если провода 1, 2..., n сходятся в одной точке

$$I_1 + I_2 + \dots + I_n = 0, \quad (1)$$

где $I_1 + I_2 + \dots + I_n$ обозначают силы токов, проходящих по соответствующим проводам, причём все токи, направленные к упомянутой точке, являются положительными;

2) в случае, если провода 1, 2 ..., n образуют замкнутую фигуру,

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 + \dots + I_n R_n \quad (2)$$

равно сумме всех электродвижущих сил, образующихся на пути 1, 2... n , где R_1, R_2, \dots, R_n обозначают сопротивления проводов, I_1, I_2, \dots, I_n силы протекающих по ним токов, причём токи, *текущие в одном направлении, считаются положительными*».

В работе 1847 г. Кирхгоф дал вывод своих уравнений и общее решение задачи о разветвлении токов. Следует отметить, что правила Кирхгофа выражают факт стационарности токов. Первый закон требует неизменной замкнутости цепи постоянного тока.

Ток в любой точке линейной цепи (а в законах Кирхгофа речь идёт о линейных проводниках) не может создать накопления электричества. Второй закон означает, что потенциалы всех точек в установившемся процессе постоянны. Поэтому изменение режима в любом участке разветвлённой цепи вызовет соответствующие изменения во всех остальных участках так, чтобы законы Кирхгофа вновь были удовлетворены.

1.2 Измерительные приборы. Технические приложения

XIX в. характеризуется интенсивным развитием электроизмерительной техники, вырабатываются основные формы конструкций электроизмерительных приборов, равно как и приёмы измерения различных электрических величин и вспомогательная аппаратура. В это время конструируются такие регуляторы тока, как реохорды (Поггендорф), агометры (Якоби) и, наконец, реостаты и магазины. Зажимы и клеммы, ртутные контакты, переключатели, все эти, казалось бы, очень простые, но необходимые приспособления создаются в этот период.

Измерители и индикаторы тока (амперметры, гальваноскопы, гальванометры) конструктивно оформляются. Фарадей ещё пользуется поггендорфским мультипликатором. В это время Вебер в Геттингене конструирует тангенс- и синус-буссоль, электродинамометр. Это были первые измерители тока. Тангенс-гальванометр представляет, как известно, круглую рамку, обмотанную или одним проводом (медный круг), или несколькими витками. В центре круга на оси помещена магнитная стрелка, положение которой отсчитывается по горизонтальному кругу с делениями. Площадь рамки устанавливается в плоскости магнитного меридиана. Если по обмотке пробегает ток, то в центре создаётся магнитное поле

$$H = 2\pi nl / R, \quad (3)$$

где R – радиус круга.

С другой стороны, по выходе стрелки из плоскости меридиана на неё будет действовать горизонтальная составляющая земного поля H_0 . Стрелка отклонится из плоскости меридиана на угол φ , для которого моменты сил, создаваемые полями H_0 и H , уравновешиваются. В этом случае

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{H}{H_0} = \frac{2\pi l}{RH_0}. \quad (4)$$

У синус-буссоли обмотка решается около вертикальной оси и по выходе стрелки из плоскости магнитного меридиана (с которой вначале совпадает плоскость обмотки) она вращается до тех пор, пока стрелка вновь не будет в ее плоскости. В этом случае

$$H = \frac{2\pi nl}{R} = H_0 \sin \varphi, \quad (5)$$

где φ – угол, на который повернулась плоскость обмотки.

Электродинамометр Вебера, которым он пользовался для проверки законов взаимодействия токов, состоит из двух катушек – неподвижной и подвижной, подвешенной на бифилярном подвесе, который служит и для подвода тока. Центры обеих катушек совпадают, плоскости взаимноперпендикулярны. Вращательный момент, испытываемый подвижной катушкой, пропорционален квадрату силы тока (при условии, что через обе катушки проходит один и тот же ток). Электродинамометр Вебера явился прототипом приборов электродинамической системы.

Серьезную эволюцию претерпели измерители слабых токов – гальванометры. Гаусс и Вебер работали с большим мультипликатором эллиптического сечения, в центре которого был подвешен на длинной шёлковой нити большой стальной магнит длиной 30 см и весом 500 г. К нити было прикреплено для отсчёта зеркало (зеркальный отсчёт по методу зеркала и шкалы был предложен в 1826 г. Поггендорфом). Период колебаний магнита – 14 секунд. Так как дожидаться успокоения системы было почти невозможно, то Вебер прибегал к специальным методам измерения и впервые предложил успокоитель в виде медной массы, окружающей магнит (явление Араго).

Чрезвычайно чувствительный гальванометр для работы по испытанию трансатлантического кабеля сконструировал В. Томсон в 1851 г. Лёгкая подвижная астатическая система состоит из маленьких магнитиков, наклеенных на зеркальце и слюдяной кружок, скреплённых вместе тонкой проволокой и подвешенных на тонкой коконовой нити между двумя парами катушек. Гальванометр помещён в стеклянном футляре, на крышке которого находится латунный стержень с передвигающимся вдоль него астазирующим магнитом (служит для ослабления действия на подвижную систему земного магнитного поля). Это астазирующее приспособление было предложено в 1841 г. Меллони; оно повышает чувствительность прибора.

В процессе работы по исследованию кабеля Томсон предложил в 1867 г. и другой тип гальванометра, из которого развились впоследствии гальванометры магнитоэлектрической системы. Между полюсами электромагнита подвешена лёгкая рамка, обмотанная тонкой токнесущей проволокой. Для концентрации магнитного потока внутри пространства, охватываемого рамкой, помещено подходящей формы тело из мягкого железа.

Томсону принадлежит и конструкция точных электрометров – квадрантного и абсолютного, описанных им в 1855 и 1867 гг. В абсолютном электрометре реализована Ломоносовская идея измерения электрической силы по силе притяжения штамп.

Конструкция прибора развивалась, как показывает пример В. Томсона, в тесной связи с техническими применениями электричества. Уже в 1850 г. Вернер Сименс организовал вместе с Гальске электротехническую фирму, известную своей электроизмерительной аппаратурой. При существовавших тогда источниках тока электротехника была электротехникой слабых токов. Чрезвычайно интересно, что пионером такой передовой отрасли, как электротехника, явилась Россия.

В 1833 г. Гаусс и Вебер построили по принципу *Шиллинга* телеграфную линию в Геттингене, протяженностью 4 000 футов, между обсерваторией и физической лабораторией. «Это устройство, – писал Гнусе Ольбсрсу, – было испытано нами для телеграфирования; вполне удались опыты с передачей целых слов и даже простых фраз». Эти стрелочные аппараты стал вводить на английских железных дорогах в 1837 г. Уитстон. Однако настоящее распространение телеграфия получила только после того, как в том же году Морзе предложил свой аппарат с электромагнитом.

Его практически пригодный аппарат был изготовлен в 1840 г., а в 1844 г. была открыта первая телеграфная линия, оборудованная аппаратами Морзе, между Вашингтоном и Балтимором. В 1866 г. при активном содействии В. Томсона, была осуществлена постоянная трансатлантическая связь (работы по прокладке кабеля начались в 50-х гг.).

Большое значение в развитии электротехники имели работы русского физика Б. С. Якоби (1801–1874). Этот ученый с 1837 г. принимает участие в работе комиссии, организованной в Петербурге по вопросу о применении электромагнетизма для приведения в движение машин. Здесь он совместно с Ленцем исследует законы намагничивания железа и электромагнитное притяжение. Он конструирует агометр для регулировки напряжения.

В 1838 г. Якоби изобретает гальванопластику – электролитический способ получения копий. В 1839 г. он построил лодку, приводимую в движение электродвигателем, который развивал от батареи в 69 элементов Грове мощность в одну л. с. и двигал против течения лодку с 14-ю пассажирами. В 1842–1845 гг. Якоби консультирует прокладку телеграфа с подземным кабелем между Петербургом и Царским Селом.

Много внимания Якоби уделял вопросам электрометрии и метрологии. В 1867 г. он в качестве русского делегата участвует в Международной

комиссии мер и весов, где выступает активным поборником метрической системы.

Итак, первый опыт использования движущей силы электричества был осуществлён в России. Но путь для широкого использования электричества был закрыт из-за отсутствия мощных и дешёвых источников электроэнергии. Машины с постоянными магнитами (индукторы) уже применялись, но они не могли развивать больших электродвижущих сил из-за слабых магнитных потоков постоянных магнитов. Кроме того, эти машины были машинами переменного тока.

В апреле 1866 г. Уайльд в Манчестере сконструировал первую динамомашину с электромагнитами, возбуждение которых производилось магнитоэлектрической машиной. В это же время был нащупан принцип самовозбуждения. Патент принадлежит Вернеру Сименсу, но независимо от него к той же идее (использование остаточного магнетизма) пришли его брат Вильгельм, Муррей, Варлей, Уитстон, и в мае 1867 г. Лондонский механик Лодд продемонстрировал на Лондонской выставке динамомашину независимого возбуждения с двумя индукторами.

Принцип выпрямления тока (коллектор) был высказан итальянским профессором Пачинотти, но практически пригодная динамомашина была построена в 1868 г. бельгийским рабочим Граммом, пришедшим к своему изобретению независимо от Пачинотти. Так на рубеже 70-х гг. зародилась электротехника сильных токов.

2 Классификация приборов по принципу действия

2.1 Магнитоэлектрические приборы

Электроизмерительные приборы магнитоэлектрической системы предназначены для измерения силы тока и напряжения в цепях постоянного тока. Применяя различные преобразователи и выпрямители, магнитоэлектрические приборы можно использовать также для электрических измерений в цепях переменного тока высокой частоты и для измерения неэлектрических величин (температуры, давлений, перемещений и т. д.). Лабораторные измерения на постоянном токе производятся преимущественно посредством магнитоэлектрических приборов.

Работа приборов магнитоэлектрической системы основана на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита и подвижной катушки, по которой протекает измеряемый ток.

В приборах магнитоэлектрической системы вращающий момент пропорционален силе проходящего тока $M_1 = kI$. Так как противодействующий момент M_2 , создаваемый спиральными пружинками, пропорционален углу закручивания $M_2 = k_2\alpha$, то угол отклонения катушки, а следовательно, и скрепленной с нею стрелки, будет пропорционален силе протекающего по обмотке тока. Действительно $M_1 = M_2$, тогда

$$\alpha = kI, \quad (6)$$

где

$$k = \frac{k_1}{k_2}. \quad (7)$$

Линейная зависимость между током I и углом отклонения обеспечивает равномерность шкалы прибора. Корректор позволяет изменять положение закрепленного конца одной из спиральных пружинки и тем самым производить установку стрелки прибора на нуль. В силу того, что каркас подвижной катушки сделан из алюминия, то есть из проводника, возникающие в нем при движении в магнитном поле индукционные токи создают тормозящий момент, что обуславливает быстрое успокоение. Достоинствами магнитоэлектрических приборов являются:

высокая чувствительность и точность показаний; нечувствительность к внешним магнитным полям; малое потребление энергии; равномерность шкалы; аperiodичность (стрелка быстро устанавливается на соответствующем делении почти без колебаний). К недостаткам приборов этой системы относятся: возможность измерения только в цепи постоянного тока; чувствительность к перегрузкам.

2.2 Электромагнитные приборы

Приборы электромагнитной системы предназначаются для измерения силы тока и напряжения в цепи переменного и постоянного тока.

Принцип действия приборов электромагнитной системы основан на взаимодействии магнитного поля катушки А, по которой протекает измеряемый ток, и подвижного железного сердечника В (рисунок 1).

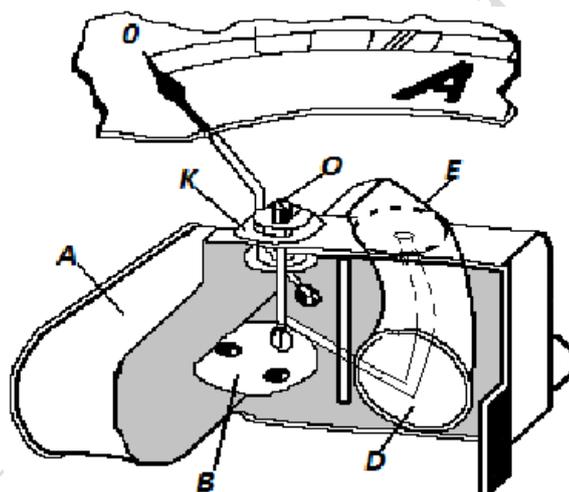


Рисунок 1 – Электромагнитный прибор

Железный сердечник В, особой формы с отверстиями, закреплен эксцентрично на оси и может входить в щель катушки, поворачиваясь вокруг оси О. Под действием магнитного поля катушки сердечник, стремясь расположиться так, чтобы его пересекало возможно больше силовых линий, втягивается в катушку по мере увеличения в ней силы тока. Противодействующий момент создается спиральной пружиной К, а приборы электромагнитной системы снабжаются воздушным успокоителем, представляющим собой камеру D, в которой перемещается алюминиевый поршень Е (демпфер). При повороте сердечника поршень встречает сопротивление воздуха, вследствие чего колебания

подвижной части быстро затухают. Магнитное поле катушки пропорционально току; намагничивание железного сердечника тоже увеличивается с увеличением тока. Поэтому можно приближенно считать, что в электромагнитном приборе вращающий момент M_1 пропорционален квадрату тока

$$M_1 = k_1 I^2, \quad (8)$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции прибора.

Противодействующий момент M_2 , создаваемый пружиной К, пропорционален углу поворота подвижной части прибора

$$M_2 = k_2 \alpha, \quad (9)$$

где k_2 – коэффициент пропорциональности, зависящий от упругих свойств пружины.

Равновесие подвижной части прибора определится равенством моментов, действующих на нее в противоположных направлениях, то есть $M_1 = M_2$, откуда

$$\alpha = k I^2. \quad (10)$$

Это выражение показывает, что шкала электрода магнитного прибора неравномерная, квадратичная. С изменением направления тока меняется как направление магнитного поля, так и полярность намагничивания сердечника. Поэтому приборы электромагнитной системы применяются для измерения как на постоянном, так и на переменном токе низких частот.

Достоинствами приборов электромагнитной системы являются: возможность измерения как постоянного, так и переменного токов; простота конструкции; механическая прочность; выносливость в отношении перегрузок.

К *недостаткам* приборов этой системы относятся: неравномерность шкалы; меньшая точность, чем в магнитоэлектрических приборах; зависимость показаний от внешних магнитных полей.

2.3 Электродинамические приборы

Электродинамические измерительные приборы предназначены для измерения тока, напряжения и мощности в цепях постоянного

и переменного тока. Принцип действия приборов электродинамической системы основан на взаимодействии катушек, по которым протекает измеряемый ток. Таким образом, приборы электродинамической системы отличаются от приборов магнитоэлектрической системы тем, что магнитное поле создается не постоянным магнитом, а катушкой, питаемой измеряемым током.

На рисунке 2 схематически изображено устройство электродинамического прибора. Внутри неподвижно закрепленной катушки может вращаться на оси подвижная катушка 2, с которой жестко связана стрелка 3, перемещающаяся над шкалой. Противодействующий момент создается спиральными пружинами 4. Намеряемый ток проходит через обе катушки. В результате взаимодействия магнитного поля неподвижной катушки и тока в подвижной создается вращающий момент M_1 , под влиянием которого подвижная катушка будет стремиться повернуться так, чтобы плоскость ее витков стала параллельной плоскости витков неподвижной катушки, а их магнитные поля совпали бы по направлению. Этому противодействуют пружинки, вследствие чего подвижная катушка устанавливается в положении, когда вращающий момент становится равным противодействующему.

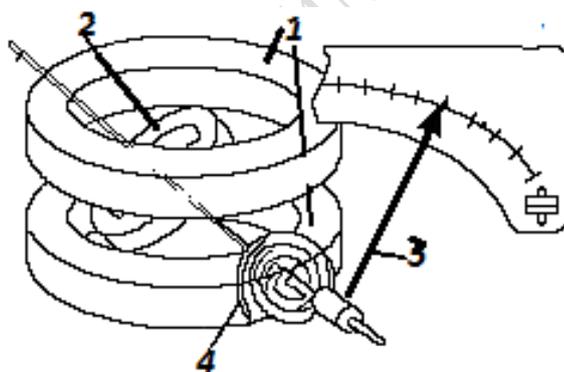


Рисунок 2 – Электродинамический измерительный прибор

Катушки в электродинамических приборах, в зависимости от назначения, соединяются между собой последовательно или параллельно. Если катушки прибора соединить параллельно, то он может быть использован как амперметр. Если же катушки соединить последовательно и присоединить к ним добавочное сопротивление, то прибор может быть использован как вольтметр.

В первом приближении вращающий момент M_1 , действующий на подвижную катушку, пропорционален как току I_1 в неподвижной катушке, так и току I_2 в подвижной катушке:

$$M_1 = k_1 I_1 I_2, \quad (11)$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции прибора.

Пружины, закручивающиеся при вращении подвижной катушки, создают противодействующий момент M_2 , пропорциональный углу α , на который повернулась катушка

$$M_2 = k_2 \alpha, \quad (12)$$

где k_2 – коэффициент пропорциональности, зависящий от упругих свойств пружины.

При равенстве моментов M_1 и M_2 подвижная катушка остановится. Тогда

$$\alpha = k I_1 I_2, \quad (13)$$

где $k = \frac{k_1}{k_2}$.

Если катушки соединены последовательно, то

$$\alpha = k I^2. \quad (14)$$

Эти выражения показывают, что шкала электродинамического прибора неравномерная. Однако подбором конструкции катушек можно улучшить шкалу, то есть приблизить к равномерной.

При перемене направления тока в обеих катушках направление вращающего момента не меняется. Отсюда следует, что приборы этой системы пригодны для измерений как на постоянном, так и на переменном токе. Торможение в этих приборах, так же, как и в электромагнитных, достигается при помощи воздушного успокоителя. В электроизмерительной практике для измерения потребляемой в цепи мощности широко применяется электродинамический ваттметр (рисунок 3).

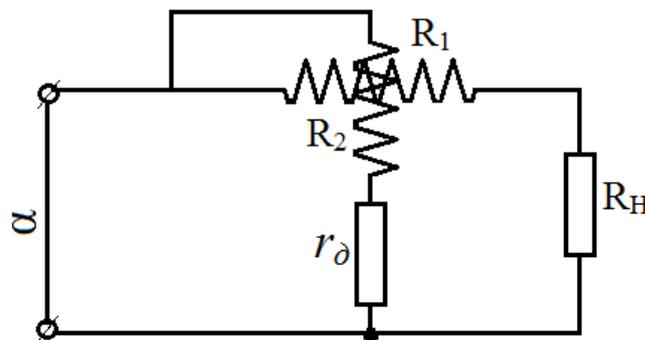


Рисунок 3 – Схема работы электродинамического ваттметра

Он состоит из двух катушек: неподвижной, с небольшим числом витков толстой проволоки, включаемой последовательно с тем участком цепи, в котором требуется измерить расходуемую мощность, и подвижной, содержащей большое число витков тонкой проволоки и помещенной на оси внутри неподвижной катушки. Подвижная катушка включается в цепь подобно вольтметру, то есть параллельно потребителю, и для увеличения ее сопротивления R_2 последовательно с ней вводится добавочное сопротивление r_d .

Пусть ток в первой катушке I_1 , во второй I_2 . По закону Ома напряжение на зажимах нагрузки равно:

$$U = I_2(R_2 + r_d), \quad (15)$$

где

$$I_2 = \frac{1}{R_2 + r_d} U. \quad (16)$$

Подставив значение I_2 в выражение для α , получим:

$$\alpha = \frac{k}{R_2 + r_d} I_1 U \approx I_1 U = P. \quad (17)$$

Таким образом, отклонение подвижной части пропорционально мощности и поэтому шкалу прибора можно проградуировать в ваттах. Из этого также следует, что ваттметр этой системы имеет равномерную шкалу.

Достоинствами приборов электродинамической системы являются: возможность измерения как на постоянном, так и на переменном токе; достаточная точность. К *недостаткам* приборов этой системы относятся: неравномерность шкалы у амперметров и вольтметров; чувствительность к внешним магнитным полям; большая чувствительность к перегрузкам.

Электродинамические амперметры и вольтметры применяются главным образом в качестве контрольных приборов для измерений в цепях переменного тока.

2.4 Электроприборы тепловой системы

Принцип действия приборов тепловой системы основан на изменении длины проводника, по которому протекает ток вследствие его

нагревания. Устройство прибора тепловой системы схематически показано на рисунке 4.

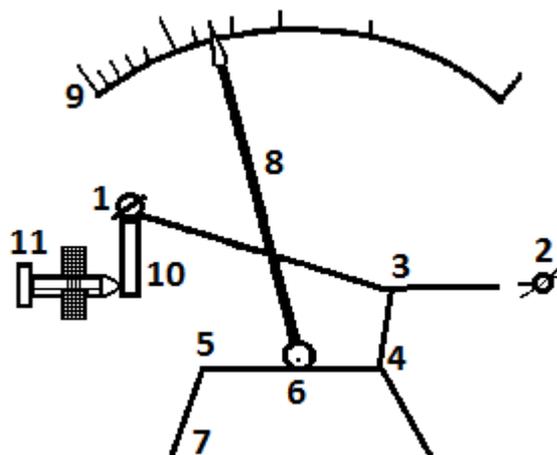


Рисунок 4 – Устройство прибора тепловой системы

Измеряемый ток проходит по тонкой проволочке 1–2, концы которой закреплены. Эта проволочка диаметром около 0,1 мм изготавливается из сплава платины с иридием или серебром. К ней примерно посередине припаяна металлическая нить 3–4, которая оттягивается тонкой шелковой нитью 4–5, перекинутой через блок 6. Конец этой нити прикреплен к стальной пружине 7, которая и производит натяжение нити. К блоку 6 прикреплена стрелка 8, перемещающаяся над шкалой 9. При прохождении тока по проволочке происходит ее нагревание, в результате чего она удлиняется, натяжение нитей 3–4 и 4–5 несколько ослабевает и пружина отходит влево, что вызывает отклонение стрелки. Так как количество теплоты, выделяемой током

$$Q = I^2 Rt, \quad (18)$$

пропорционально квадрату силы тока и не зависит от направления тока, то приборы тепловой системы пригодны для измерения как на постоянном, так и на переменном токе; шкала прибора неравномерная. Для установки стрелки на нуль один из зажимов, к которым прикреплена нить, делается подвижным, в виде рычага 10, способного вращаться вокруг оси. Ввинчивая или вывинчивая микрометрический винт 11, можно усилить или ослабить напряжение нити и тем самым привести стрелку прибора на нулевое деление шкалы.

Достоинствами приборов тепловой системы являются: возможность измерения как на постоянном, так и на переменном токе; независимость показаний от частоты и формы кривой переменного тока,

что позволяет применять их для измерения высокочастотных токов; нечувствительность к внешним магнитным полям. К *недостаткам* приборов данной системы относятся:

- неравномерность шкалы;
- наличие тепловой инерции, в связи с которой необходимо выждать некоторое время, пока указатель прибора окончательно установится;
- зависимость показаний от температуры среды.

2.5 Индукционные приборы

Устройство приборов индукционной системы основано на взаимодействии токов, индуктируемых в подвижной части прибора, с магнитными потоками неподвижных электромагнитов. К индукционной системе принадлежат, например, электрические счетчики переменного тока. Применяются также и ваттметры этой системы.

2.6 Вибрационные приборы

Устройство приборов этой системы основано на резонансе при совпадении частот собственных колебаний подвижной части прибора с частотой переменного тока. Приборы этой системы в основном применяются в качестве герцметров, служащих для измерения частоты тока.

2.7 Электростатические приборы

Устройство приборов этой системы основано на взаимодействии двух или нескольких электрически заряженных проводников. Под действием сил электрического поля, подвижные проводники перемещаются относительно неподвижных проводников. Электростатические приборы служат преимущественно вольтметрами для непосредственного измерения высоких напряжений.

2.8 Термоэлектрические приборы

Эти приборы характеризуются применением одной или нескольких термопар, дающих под влиянием тепла, выделяемого измеряемым

током, постоянный ток в измерительный прибор магнитоэлектрической системы. Приборы термоэлектрической системы в основном применяются для измерения переменных токов высокой частоты.

2.9 Детекторные (выпрямительные) приборы

Устройство приборов этой системы основано на том, что переменный ток выпрямляется с помощью выпрямителя, вмонтированного в приборе. Полученный таким образом пульсирующий постоянный ток измеряется с помощью чувствительного прибора магнитоэлектрической системы.

2.10 Электронные приборы

Устройство приборов этой системы основано на применении одной или нескольких электронных ламп и измерительного прибора магнитоэлектрической системы, соединенных в схему, позволяющую производить измерения электрических величин.

3 Многопредельные приборы

Измерительный прибор, электрическую схему которого можно переключать для изменения интервалов измеряемой величины, называется многопредельным. В случае амперметров изменение пределов достигается включением различных шунтов, в случае вольтметров – включением добавочных сопротивлений.

Наличие многопредельных приборов связано с тем обстоятельством, что часто требуется измерять электрические величины в очень широких пределах с достаточной степенью точности в каждом интервале. В этом случае многопредельный прибор заменяет несколько однотипных приборов с различными интервалами, измерения. Например, при снятии анодных характеристик трехэлектродной лампы величина анодного тока, в зависимости от анодного напряжения (при постоянном потенциале сетки), может изменяться в пределах от 0 до 30 мА. Если измерения производить прибором, шкала которого рассчитана на 30 мА, то небольшие токи будут измерены таким прибором с большой погрешностью.

Действительно, пусть класс прибора 1,5. Тогда абсолютная погрешность определится из условия:

$$\Delta\alpha = \varepsilon_{\Pi} \alpha_{\text{пр}} = 0,015 \cdot 30 = 0,45 \text{ (мА)}. \quad (19)$$

При измерении тока в 21 мА относительная погрешность

$$\varepsilon_1 = \frac{0,5}{21} = 2,4 \%. \quad (20)$$

Если же измерять тем же прибором ток в 1 мА, то относительная погрешность будет такого же порядка, как и измеряемая величина

$$\varepsilon_2 = \frac{0,5}{1} = 50 \%. \quad (21)$$

В таких случаях многопредельный прибор переключают на меньший предел, чтобы стрелка отклонилась на максимальный угол, но не выходила за пределы шкалы. Иными словами, многопредельный прибор следует включать так, чтобы относительная погрешность измерения была минимальной. Иногда многопредельные приборы снабжаются различными шкалами. Отсчет производится по шкале, соответствующей включению прибора. Часто многопредельные приборы имеют одну

шкалу. В таких случаях нахождение измеряемой величины связано с пересчетом. Пересчет состоит в определении переводного коэффициента, на который следует умножить отсчет по прибору, для того чтобы получить значение измеряемой величины в соответствующих единицах. Переводной коэффициент

$$k = \frac{a}{N}, \quad (22)$$

где a – максимальное значение величины, которое можно измерить при данном включении прибора;

N – число, стоящее против последнего деления прибора.

Не следует смешивать число делений и отсчет по прибору. Поясним сказанное на примере. Число делений может совпадать с отсчетом по прибору. В общем случае отсчет и число делений не совпадают. Предположим, что к миллиамперметру, имеющему на шкале 300 делений, подобраны шунты таким образом, что при различных включениях он позволяет измерять ток в трех интервалах: 0–3, 0–9 и 0–30 мА. Пусть прибор работает в диапазоне 0–3 мА, отсчет по прибору – 210. Переводной коэффициент

$$k_3 = \frac{3}{300} = 0,01.$$

Измеряемая величина

$$I_1 = 210 \cdot 0,01 = 2,1 \text{ (мА)}.$$

Пусть при измерении другого тока I_2 в диапазоне 0–9 мА отсчет по прибору также равен 210. В этом случае

$$I_2 = 210 \cdot k_9 = 210 \cdot \frac{9}{300} = 6,3 \text{ (мА)}.$$

3.1 Правила пользования многопредельными приборами

Вычисляют переводные коэффициенты для всех диапазонов

$$k_{a_1}, k_{a_2}, \dots, k_{a_n}.$$

Во избежание порчи прибора включают его в максимальном диапазоне a_n .

Определяют грубо измеряемую величину, умножив отсчет по прибору на переводной коэффициент k_{a_n} . После переходят на тот диапазон, верхний предел которого ближе всего к значению измеряемой величины, но в то же время больше ее. Определяют точное значение измеряемой величины, умножив отсчет на соответствующий переводной коэффициент.

Если измеряемая величина увеличивается, то измерения продолжают до тех пор, пока стрелка не подойдет до конца шкалы, а затем переходят на следующий (большой) диапазон.

В случае уменьшения величины измерения продолжают до тех пор, пока измеряемая величина не достигнет верхнего предела следующего меньшего диапазона, после чего переходят на этот диапазон.

4 Вклад Эрстеда в электрические измерения

Никакое исследование не может считаться вполне научным до тех пор, пока не проведены измерения всех изучаемых величин. Найти прямые методы измерения электрических величин гораздо труднее, чем придумать, как измерить. Такую возможность дают измерения одного или нескольких электрических эффектов, например света, теплоты, электрохимических и магнитных явлений.

С помощью электрохимического эффекта можно очень точно измерить величину тока. В некоторых случаях используется тепловой эффект. Но наиболее широко применяются измерительные приборы, основанные на магнитном действии тока, которое было открыто Эрстедом.

4.1 Использование магнитного эффекта

Из опыта Эрстеда мы знаем, что вокруг проводника, по которому идет ток, возникает магнитное поле, тем более значительное, чем сильнее ток. Значит, если на некотором расстоянии от провода над или под ним поместить компасную стрелку, то при прохождении тока по проводу стрелка должна будет отклониться от своего первоначального направления с севера на юг и тем сильнее, чем значительнее ток (рисунок 5).

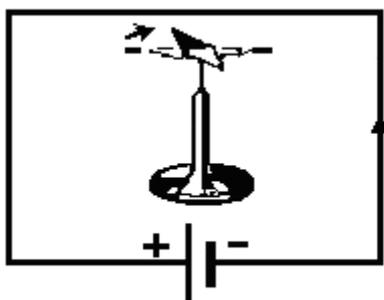


Рисунок 5 – Для измерения тока используется производимое им магнитное действие

После соответствующей градуировки такое приспособление, несмотря на его грубость и невысокую чувствительность, действительно можно использовать для измерения тока. Чтобы сделать это устройство более чувствительным, провод можно свить в катушку круглого

сечения и стрелку компаса ввести внутрь такой катушки. Такой прибор получил название тангенс-гальванометра (рисунок 6).

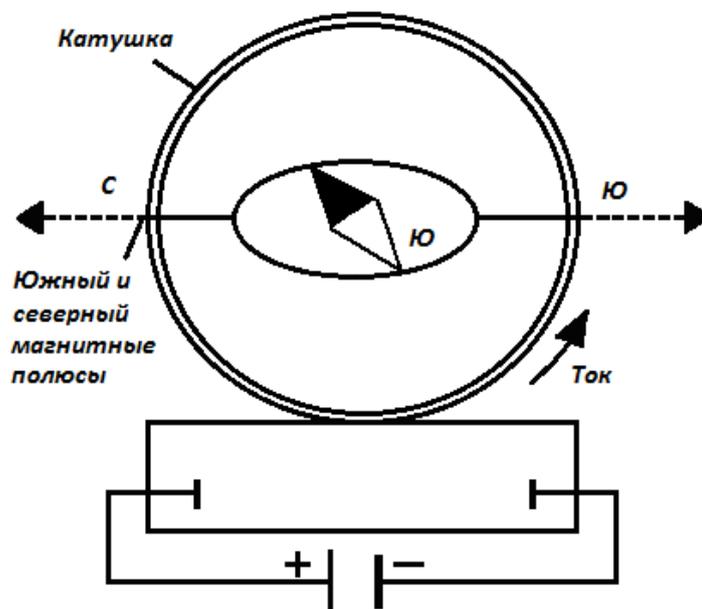


Рисунок 6 – Тангенс-гальванометр

Этот прибор, однако, также имеет свои недостатки: перед использованием его катушка должна быть установлена вдоль силовых линий земного магнитного поля, на напряженность и направление которого сильно влияет присутствие поблизости железа и стали, а также линий электропередач. Все эти влияния приводят к ошибкам при измерениях тангенс-гальванометром.

4.2 Гальванометр Д'арсонваля

Французский физик Жак д'Арсонваль (1851–1940) значительно усовершенствовал тангенс-гальванометр. В качестве подвижной части прибора вместо постоянного магнита – компасной стрелки – он применил катушку, которую подвесил на проволоке между полюсами подковообразного магнита (рисунок 7). Внутри вращающейся катушки д'Арсонваль поместил неподвижный сердечник из мягкого железа, который служил для увеличения напряженности поля между полюсами постоянного магнита.

В гальванометре д'Арсонваля катушка поворачивается в поле магнита до тех пор, пока вращательный момент ее не уравновесится крутящим моментом нити, на которой она подвешена.

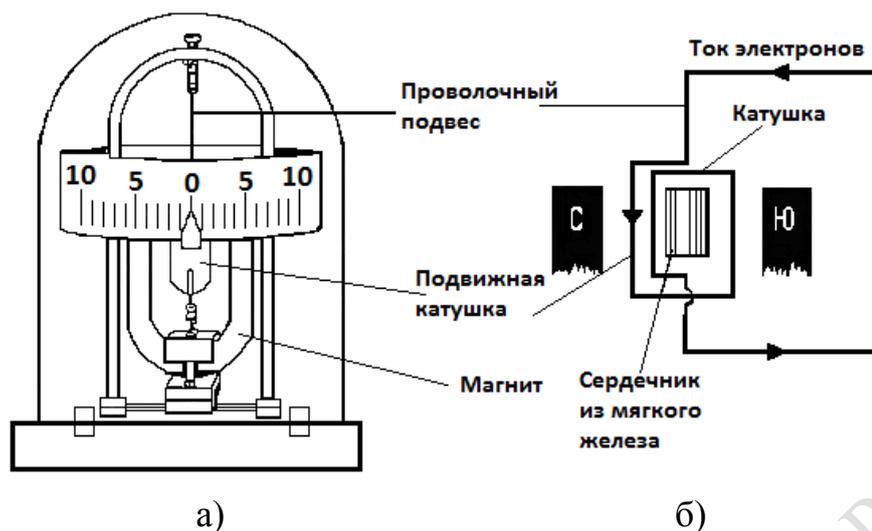


Рисунок 7 – Гальванометр д'Арсонваля

Отметим, что д'Арсонваль просто поменял местами части тангенс гальванометра. Подвижной частью его гальванометра является катушка, а неподвижной – постоянный магнит, поле которого может быть гораздо сильнее поля Земли.

Когда через катушку гальванометра д'Арсонваля проходит электрический ток, катушка работает подобно электромагниту, полюсы которого расположены на обоих концах катушки. Взаимное притяжение между разноименными полюсами катушки и постоянного магнита заставляет катушку поворачиваться, в данном случае по часовой стрелке, если смотреть на нее сверху. Угол поворота катушки приблизительно пропорционален величине тока.

Повороту катушки препятствует закручивание нити, на которой она подвешена; поэтому вращение катушки происходит до тех пор, пока вызывающая вращение сила магнитного поля не сравняется с силой, стремящейся раскрутить подвес обратно. Для измерения угла поворота катушки, который, как уже говорилось, характеризует величину тока, к катушке прикрепляется стрелка, скользящая по шкале. Этот прибор можно проградуировать по известным значениям тока. Хотя гальванометр д'Арсонваля явился большим шагом вперед по сравнению с тангенс-гальванометром в том отношении, что он более чувствителен и менее подвержен влияниям магнитного поля Земли и местных магнитных полей, ему все же присущи некоторые недостатки. Так, гальванометр д'Арсонваля очень массивен, и поэтому с ним неудобно работать. Кроме того, если его катушку подвесить не строго вертикально, то она будет притягиваться к расположенному внутри нее неподвижному сердечнику. Последний недостаток можно

исправить, точно выравнивая горизонтальность опоры с помощью уровня, но это требует затраты времени.

4.3 Гальванометр Вестона

Около 1890 года американский ученый Вестон внес несколько усовершенствований в гальванометр д'Арсонваля, которые сделали этот прибор точным, портативным, прочным и очень удобным для повседневных практических электрических измерений. Новый прибор, названный гальванометром Вестона, широко применяется теперь для измерения постоянных токов.

Вестон сохранил расположение деталей в гальванометре д'Арсонваля – неподвижного постоянного магнита и подвижной катушки с сердечником внутри нее (рисунок 8). Основное изменение он внес в конструкцию катушки и в способ ее подвески.

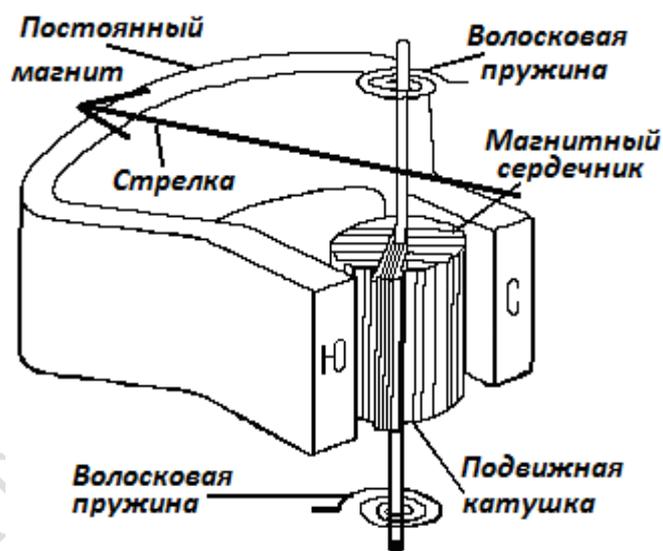


Рисунок 8 – Гальванометр Вестона

Подвижная катушка в гальванометре Вестона представляет собой тонкую легкую рамку из алюминиевого сплава, на которую намотано много витков тонкого изолированного провода. На каждом из концов катушки укреплены штифты из прочной стали, которые покоятся на сапфировых опорах. Ток перед входом и по выходе из катушки проходит через легкие спиральные пружины, которые служат также для возвращения катушки в ее исходное положение. С катушкой связана алюминиевая стрелка, которая движется по шкале. Прибор этот калибруется

путем сравнения его показаний со стандартным точным эталонным прибором при одном и том же токе, проходящем через оба прибора.

Благодаря совершенно ничтожному трению в опорах, малому весу подвижной катушки и исключительной чувствительности пружинок ток, необходимый для отклонения стрелки прибора на полную шкалу, оказывается очень малым, в среднем порядка нескольких миллиАмпер (тысячных долей Ампера). Эта величина тока характеризует чувствительность прибора: ведь чем меньше ток, вызывающий отклонение стрелки на всю шкалу, тем чувствительнее прибор. И, как правило, чем чувствительнее прибор, тем выше его точность. Гальванометры Вестона являются прекрасными приборами для измерения слабых токов, но непригодны для сильных токов.

4.4 Измерение сильных токов

Одним из способов увеличения диапазона измерений гальванометром Вестона без снижения его чувствительности является удлинение его шкалы; однако это расширяет диапазон измерений в очень незначительной степени. Другой возможностью является «деление» тока так, чтобы через подвижную катушку гальванометра проходила только его часть, а остальная часть при этом бы «шунтировалась» или «обходила» катушку. Для примера предположим, что данная величина тока отвечает отклонению стрелки гальванометра на полную шкалу (рисунок 9,а). Если же половину этого тока зашунтировать, пустить в обход гальванометра, то стрелка отклонится только на половину шкалы, и тем самым диапазон измерений увеличится вдвое.

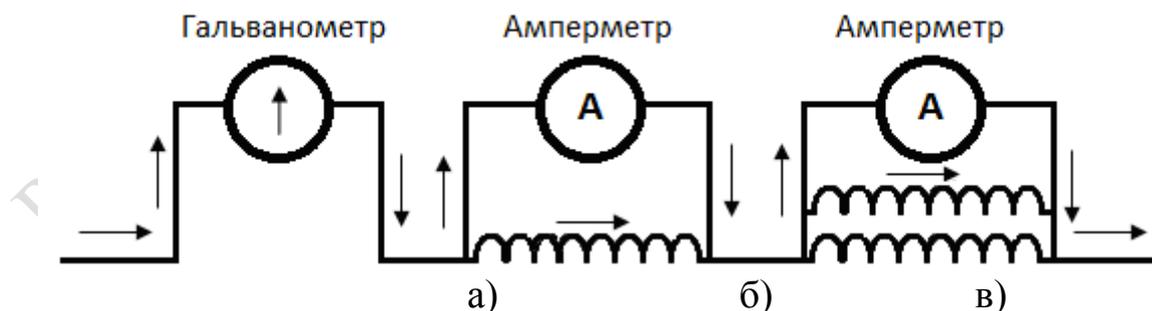


Рисунок 9 – Амперметры постоянного тока

Чтобы пустить половину тока в обход катушки, применяется шунтирующее сопротивление, называемое часто просто шунтом (рисунок 9,б),

величина которого в точности равна сопротивлению гальванометра. Тогда половина тока пойдет через шунт, а половина – через катушку.

Для дальнейшего расширения диапазона измерений можно использовать второе шунтирующее сопротивление, как показано на рисунке 9,в. Если это последнее равно сопротивлению первого шунта, то через гальванометр пойдет только одна треть полного тока, которая отклонит его стрелку только на треть всей шкалы. Значит, в этом случае диапазон измерений прибором увеличится в три раза. Объясните, как можно увеличить диапазон гальванометра в четыре раза.

4.5 Амперметр постоянного тока

Увеличивая общее число шунтов, мы тем самым все более уменьшаем долю тока, проходящего через гальванометр, и полное отклонение его стрелки, а значит, все больше расширяем диапазон измерений этим прибором. Гальванометры со встроенным в них шунтом называются амперметрами; они предназначены только для измерений на постоянном токе.

Наиболее часто в качестве амперметров постоянного тока применяются гальванометры Вестона со встроенным шунтом. Они обычно предназначены для измерения токов от нескольких миллиампер до 30 Ампер; однако некоторые конструкции этих приборов могут измерять и гораздо более значительные токи.

4.6 Включение амперметра в цепь электрического тока

При включении амперметра в электрическую схему следует прежде всего убедиться в том, что его диапазон достаточен для измерения тока, проходящего по цепи. Далее, поскольку чаще всего стрелка амперметра отклоняется только в одном направлении, необходимо, чтобы ток входил через отрицательный и выходил через положительный зажим прибора, иначе стрелка пойдет за нуль.

Чтобы измерить ток, скажем, проходящий через электрическую лампочку, амперметр надо включить в цепь, как показано на рисунке 10; при этом весь ток через лампу пройдет также через амперметр. О таком соединении лампы и амперметра говорят как о последовательном. Поскольку амперметр имеет весьма низкое сопротивление, необходима предосторожность: амперметр следует включать последовательно с сопротивлением. В противном случае он перегорит.

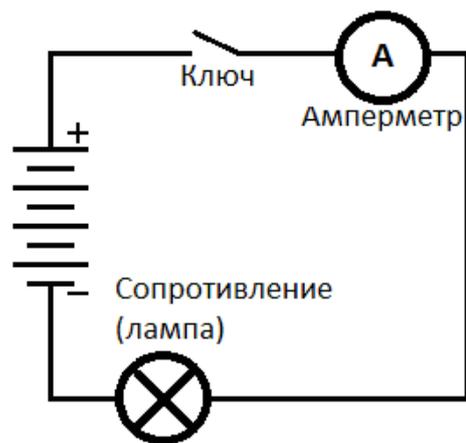


Рисунок 10 – Схема включения амперметра в цепь электрического тока

4.7 Исключение из общего правила введения амперметра в цепь

В то же время вы, вероятно, знаете, как амперметр применяется для испытания сухих элементов; при этом он включается в цепь без всякого дополнительного сопротивления. Это оказывается возможным прежде всего потому, что сам сухой элемент обладает некоторым сопротивлением. Если диапазон амперметра составляет 30 А или более, его можно присоединить прямо к зажимам сухого элемента.

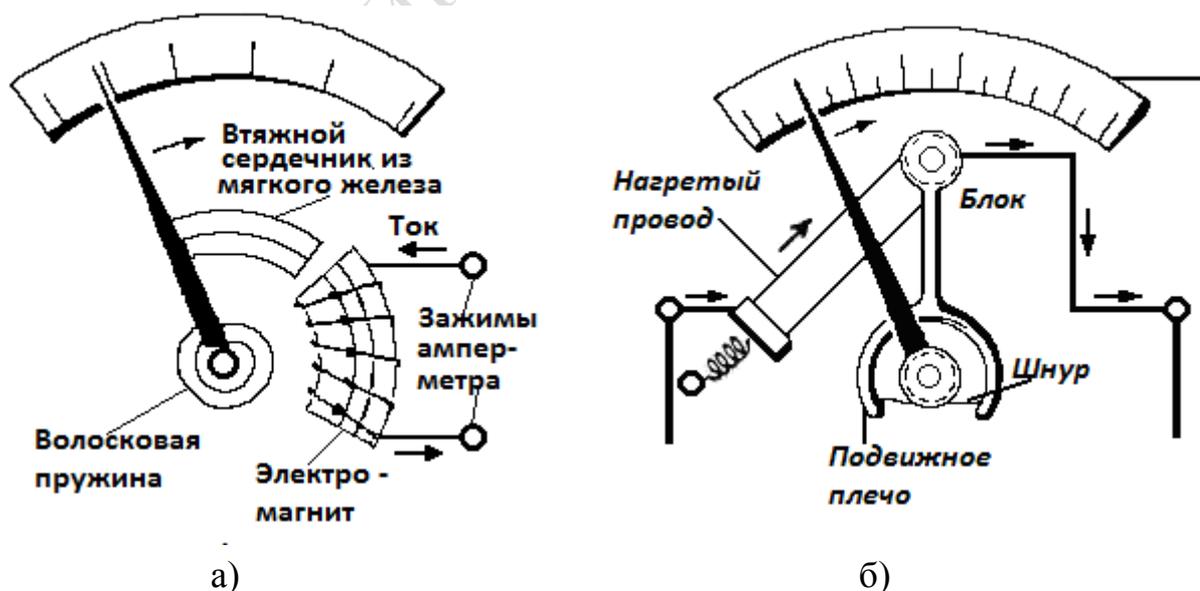


Рисунок 11 – Виды амперметров:
а) амперметр с втяжным сердечником; б) тепловой амперметр

Однако обычно служащие для этой цели амперметры не являются амперметрами типа д'Арсонваля или Вестона. Они состоят из маленького неподвижного электромагнита и подвижного втягивающегося сердечника из мягкого железа, с которым связана стрелка (рисунок 11,а). Чем сильнее ток через электромагнит, тем значительнее наведенный магнетизм в сердечнике и тем больше он отклоняет стрелку амперметра. В нулевое положение стрелка возвращается пружиной. Прибор этого типа установлен на приборной доске в некоторых марках автомашин. На рисунке 11,б показан тепловой амперметр.

4.8 Электрическое сопротивление и его единица

Все проводники оказывают некоторое сопротивление прохождению через них электрического тока; идеальных проводников не существует. Обычно используемой единицей сопротивления является *ом*, названный в честь немецкого физика Г. С. Ома. По международному соглашению *ом* равен сопротивлению столбика ртути постоянного сечения длиной 106,3 см и массой 14,452 г при 0 °С. Площадь поперечного сечения такого столбика почти в точности равна 1 мм². Обычно сопротивление в *ом* вычисляется из измеренной величины тока в амперах и измеренной разности потенциалов и вольтах. Однако прежде чем рассказать об этом методе, мы должны описать, как измеряется напряжение (в вольтах), и получить соотношение между вольт-ампером и омом.

4.9 Измерение разности потенциалов

Выше мы определили вольт, как такую разность потенциалов между двумя точками, при которой, для переноса 1 кулона из точки с меньшим потенциалом в точку с большим потенциалом, необходимо совершить работу в 1 джоуль.

Можно предположить и показать на опыте, что чем больше разность электрических потенциалов между двумя точками, тем большим будет поток электричества (ток) в связывающем эти две точки проводнике с постоянным сопротивлением.

Для измерения тока через определенное сопротивление мы располагаем гальванометром (рисунок 8). Остается лишь установить величину сопротивления, которое следует включить последовательно с катушкой гальванометра.

Вероятно, вам знакома одна трудность при измерении этим способом, скажем, напряжения сухого элемента. Как только возникает движение электронов в элементе, разность потенциалов между его электродами падает, причем тем значительно, чем сильнее ток. Значит, в идеальном случае мы должны были бы иметь такое устройство для измерения напряжения, через которое вообще бы не шел ток. Но так как «бесточный» гальванометр типа Вестона невозможен, то мы должны пойти на наилучшее приближение к этим условиям, включив большое сопротивление последовательно с чувствительной катушкой гальванометра. Конечно, при измерении низких напряжений сопротивление не должно быть столь большим, как при измерении высоких напряжений. Действительно, диапазон вольтметра определяется величиной электрического сопротивления прибора. Если его полное сопротивление, равное сумме постоянного сопротивления и сопротивления самого гальванометра, удваивается, то расширяется вдвое и измерительный диапазон прибора.

4.10 Включение вольтметра

Мы уже видели, что амперметр, включаемый в цепь последовательно, имеет очень низкое сопротивление, а значит, очень слабо влияет на ток. С другой стороны, вольтметр, с его высоким сопротивлением, при последовательном включении с электрической лампочкой или другим электроприбором резко уменьшит величину тока, который может проходить по цепи. Вольтметр всегда следует включать параллельно, как это показано на рисунке 12.

В таком случае напряжение измеряется при минимальном воздействии измерительного прибора на основную цепь.

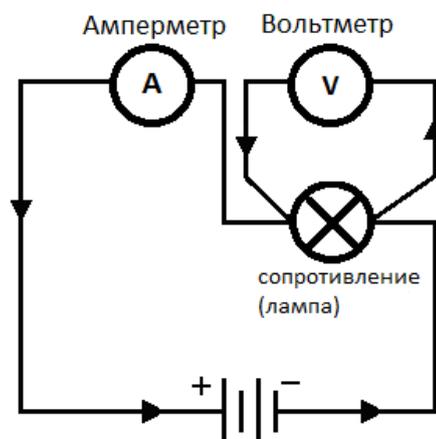


Рисунок 12 – Включение вольтметра в цепь электрического тока

4.11 Измерение сопротивления

Мы уже отметили, что сопротивление иногда вычисляется с помощью математического соотношения между вольт, ампером и омом. Чтобы установить это соотношение, включим в цепь последовательно с амперметром и батареей известное сопротивление. Параллельно сопротивлению к цепи подсоединим вольтметр (рисунок 12). Запишем показания приборов в первом измерении с помощью таблицы. Затем изменим напряжение E , включив новые секции батареи, и снова снимем показания. Полученные данные запишем в виде таблицы 1.

Таблица 1 – Полученные данные

Измерение	Напряжение U , в вольтах	Ток I , в амперах	Сопротивление R , в омах
1	1	0,2	5
2	2	0,4	5
3	3	0,6	5

Изучение полученных данных показывает, что напряжение равно произведению тока на сопротивление: $U = IR$. Это соотношение можно также проверить в другом опыте, в котором меняется величина сопротивления R . Итак,

$$U = IR, \quad (23)$$

$$I = \frac{U}{R}. \quad (24)$$

Соотношение $I = \frac{U}{R}$ было впервые установлено Омом и носит название закона Ома.

4.12 Вычисление работы, производимой электрическим током

Электромоторы, превращая электрическую энергию в механическую, приводят в движение трамваи, троллейбусы, стиральные машины, пылесосы и сотни других машин. Каково же соотношение между электрической и механической энергией?

Вспомним, что вольт определен как разность потенциалов между двумя точками, при которой для переноса 1 кулона от точки с меньшим к точке с большим потенциалом должна быть совершена работа в 1 джоуль. Так как согласно закону сохранения энергии, энергия не появляется из ничего и никуда не исчезает, электрический ток, двигаясь в проводнике под напряжением 1 вольт, совершает работу в 1 джоуль, перемещая один кулон; на перемещение 2 кулонов при напряжении в 1 вольт затрачивается работа в 2 джоуля и т. д.

Выше мы показали, что работа

$$A = qU, \quad (25)$$

но, кроме того, $q = It$,
 где I – ток в амперах;
 t – время в секундах.
 Получаем

$$A = IUt. \quad (26)$$

4.13 Превращение электрической энергии в тепловую энергию

Для доказательства того, что тепло, выделяемое электрическим током в проводнике, зависит от его сопротивления, сделаем следующий опыт. Возьмем два провода – медный и из нейзильбера, скрутим их концы и присоединим к аккумуляторной батарее, как показано на рисунке 13.



Рисунок 13 – Устройство превращения электрической энергии в тепловую

Через короткое время нейзильберовый провод раскалится докрасна и, возможно, даже расплавится, тогда как медный провод окажется всего лишь на ощупь теплым. Через оба провода идет ток одной и той же величины; но сопротивление нейзильберового провода во много раз больше сопротивления медного провода; поэтому мы снова приходим к заключению, что тепловое действие тока зависит от сопротивления проводника.

Это свойство проводников широко используется в электролампах, электронагревательных приборах – плитках, электropечах и т. п. Обычно ток к прибору подводится толстым медным проводом с малым сопротивлением; в качестве нагревательного элемента применяется тонкий провод с большим сопротивлением. В обычной 25-ваттной лампочке нагревательным элементом является тонкая (обычно вольфрамовая) нить длиной лишь в несколько сантиметров; тем не менее сопротивление ее превышает 400 Ом.

4.14 Мощность электрического тока

Мы дали определение мощности как «скорости» совершения работы, или как работы, произведенной в единицу времени. Мы также выяснили, что работа электрического тока (в Джоулях) дается выражением

$$A = IUt = I^2Rt. \quad (27)$$

Разделив это выражение на время (в секундах), получим мощность

$$P = \frac{A}{t} = UI = I^2R. \quad (28)$$

Единица мощности имеет название ватт, который определяется как один джоуль работы, произведенной за одну секунду.

4.15 Измерение электрической энергии

Электроэнергия, израсходованная потребителем, измеряется счетчиком ватт-часов. Этот прибор, в сущности, представляет собой маленький электромотор, скорость вращения которого пропорциональна потребляемой мощности.

Вращающаяся часть этого мотора через передаточный механизм связана со стрелками десятичных циферблатов, и прибор градуируется

так, что отсчитывает количество использованных потребителем киловатт-часов. На рисунке 14 приведены два показания прибора, разделенные месячным промежутком времени. Верхнее показание соответствует 2352 кВт-ч.

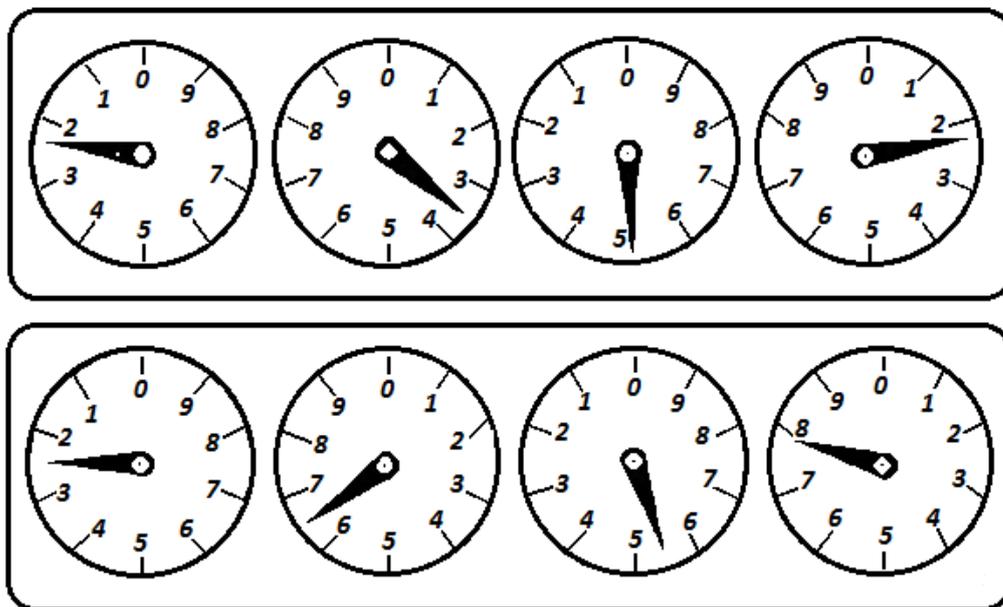


Рисунок 14 – Ватт-часы

Если известна стоимость киловатт-часа, то легко рассчитать необходимый взнос потребителя за пользование электроэнергией.

Выводы

1 Единицей количества электричества является кулон (Кл.).

2 Ампер (А) есть единица электрического тока. Ампер равен кулону в секунду.

3 1 Ом есть сопротивление столбика ртути длиной 106,3 см и площадью поперечного сечения 1 мм^2 . Вольт есть разность потенциалов двух точек, при которой для переноса 1 Кл из одной из этих точек в другую требуется совершить работу в 1 Дж. Вольт также есть напряжение, необходимое для прохождения тока в 1 А через сопротивление в 1 Ом?

4 Для измерения очень слабых токов служит гальванометр.

5 Амперметр является шунтированным гальванометром, имеющим малое сопротивление. Он включается в цепь последовательно с сопротивлением. Амперметр измеряет ток в амперах (А).

6 Вольтметр является гальванометром с высоким сопротивлением. Он включается в цепь параллельно с прибором или участком цепи, напряжение на котором он измеряет. Вольтметр измеряет разность потенциалов в вольтах (В).

7 Работа в джоулях (Дж)

$$A = IUt$$

или

$$A = I^2Rt.$$

8 Единицей электрической мощности является ватт (Вт).

9 1 Вт равен работе в 1 Дж, совершенной в 1 с.

10 Мощность тока $P = IU$.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф.СКОРИНЫ

Задачи для самостоятельной работы

1 Какая разность потенциалов необходима для прохождения тока в 3 A через сопротивления в $10, 15, 60\text{ Ом}$?

2 Чему должно быть равно сопротивление шунта для удвоения диапазона измерений гальванометра, если сопротивление последнего составляет 30 Ом . Как называется такой прибор?

3 Какую величину имеет сопротивление, которое надо добавить к вольтметру, чтобы расширить вдвое его диапазон, если сопротивление вольтметра составляет 100 Ом и источник напряжения 10 В вызывает отклонение стрелки прибора на всю шкалу?

4 Напряжение на лампе равно 100 В , сопротивление ее 75 Ом . Чему равен ток через лампу?

5 Через лампу сопротивлением 110 Ом идет ток 1 A . Чему равны напряжение на лампе и ее мощность?

6 40 Вт лампа предназначена для включения в сеть с напряжением 120 В . На какой ток рассчитана лампа?

7 Чему равно сопротивление 60 Вт лампы, рассчитанной на включение в сеть с напряжением 120 В ?

8 Каково сопротивление 100 Вт лампы, предназначенной для работы в сети 220 В ?

9 Сколько энергии (в джоулях) потребит 100 Вт мотор за 10 мин. работы?

10 Через спираль электроплитки шел ток 5 A в течение 2 мин. Какое количество электричества прошло через плитку?

11 Через лампу при напряжении 40 В течение 10 мин шел ток 2 A . Какое количество энергии (в Джоулях) при этом потребила лампа?

12 Какое количество теплоты выделит в течение 1 мин ток $0,5\text{ A}$, проходя через лампу сопротивлением 220 Ом ?

13 Утюг массой 2 кг работает при токе 5 A сети с напряжением 220 В . Сколько времени потребуется для его нагревания от 20 до 200 °C , если считать, что никаких теплопотерь при этом не происходит (удельная теплоемкость железа $0,113\text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$)?

14 Какую работу совершит 1000 -ваттный мотор на 10 с ?

15 600 Вт электроутюг работает 1 час в день, 200 -ваттная электроплитка – 2 часа в день. Какова стоимость электроэнергии, потребленной за месяц, при цене $4\text{ коп. за кВт}\cdot\text{ч}$?

Примеры решения задач

Задача 1. Сопротивление электрической лампочки равно 100 Ом . Ток через лампу составляет 1 А . Какова мощность лампы? Каково напряжение на лампе? Каков расход электроэнергии при работе лампы в течение 20 с ?

Решение.

$$P = I^2 R = 100 \text{ Вт},$$

$$U = IR = 100 \text{ В},$$

$$W = UIt = 200 \text{ Дж}.$$

Проверьте последний ответ, используя формулу $W = Pt$. Мощность обычных электроламп может быть от 10 до 200 Вт ; мощность электроплиток может составлять 500 Вт и выше.

Задача 2. Мотор в цепи с напряжением 110 В потребляет ток 5 А в течение 10 минут: Какова энергия, израсходованная мотором?

Решение.

$$W = UIt,$$

подставляем числовые данные:

$$W = 110 \cdot 5 \cdot 600 = 330\,000 \text{ Дж}.$$

Задания для самостоятельной работы

1 Как измерить мощность электроприборов?

Выключите в доме все электроприборы, кроме ламп 100 Вт или двух 60 Вт . Последите за алюминиевым диском электрического счетчика и отметьте время, за которое он сделает 25 полных оборотов. Выключите лампу, а затем включите радиоприемник или какой-либо другой электроприбор. Снова определите время, за которое диск счетчика сделает 25 полных оборотов. Составив отношение этих двух времен, найдите мощность, потребляемую радиоприемником или иным прибором.

2 Как сделать гальванометр?

Возьмите пробку от бутылки и обрежьте ее по прямоугольному сечению. Намотайте на нее затем от 15 до 20 витков тонкого провода. Возьмите подковообразный магнит и вставьте в него пробковую катушку. После этого включите катушку в цепь последовательно с сухим элементом и реостатом. Увеличивайте и уменьшайте величину тока и проследите за поведением катушки. Кроме того, понаблюдайте за отклонением катушки при изменении направления тока на обратное.

3 Видоизмените ваш гальванометр так, чтобы превратить его в амперметр. Продемонстрируйте также, как можно изменить его диапазон измерений.

4 Превратите гальванометр в вольтметр. Покажите также, как можно увеличить его диапазон измерений.

Задачи на расчёт погрешностей

Задача 1. К зажимам элементов с $\mathcal{E} = 10 \text{ В}$ и $r = 1 \text{ Ом}$ подсоединили вольтметр с сопротивлением $R = 100 \text{ Ом}$.

Определите показания вольтметра и вычислите абсолютную погрешность, возникновение которой обусловлено тем, что вольтметр имеет не бесконечно большое сопротивление.

Классифицируйте погрешность.

Ответ: 1 $U = \mathcal{E} [1 - r / (r + R)] = 9,9 \text{ В}$.

Если $R = \infty$, $r / (r + R) = 0$, то $U = \mathcal{E} = 10 \text{ В}$.

Тогда $\Delta = 9,9 \text{ В} - 10 \text{ В} = -0,1 \text{ В}$.

2 Измерение прямое и абсолютное, непосредственной оценки, так как со шкалы вольтметра сняты показания, выраженные в единицах измеряемой величины; однократные, так как результат получен путем одного измерения не изменялась. Погрешность систематическая.

Задача 2. В цепь с сопротивлением $R = 49 \text{ Ом}$ и источником тока с $\mathcal{E} = 10 \text{ В}$ и $r = 1 \text{ Ом}$ включили амперметр сопротивлением $R_A = 1 \text{ Ом}$.

Определите показания амперметра и вычислите относительную погрешность 5, возникающую из-за того, что амперметр имеет определенное сопротивление, отличное от нуля.

Классифицируйте погрешность.

Ответ: 1. $I = \mathcal{E} / (r + R + R_A) = 0,166 \text{ A}$.

Если $R = 0$, то $I_0 = E / (r + R) = 0,2 \text{ A}$.

Тогда $\delta = [(0,17 - 0,2) / 0,2] \cdot 100 \% = -15 \%$.

2. Погрешность – относительная, систематическая, методическая, так как возникает из-за вынужденных теоретических допущений, известных при создании прибора. Отклонение K от номинала при изготовлении прибора может дать также систематическую погрешность, но уже инструментальную.

Задача 3. Классифицируйте измерение силы электрического тока с помощью амперметра прямого включения на 5 A и измерение сопротивления в электрической цепи методом «амперметра–вольтметра» с использованием зависимости закона Ома для цепи постоянного тока.

Ответ. Первое измерение осуществлено с использованием метода непосредственной оценки в результате прямых измерений абсолютной величины. Измерение однократное.

Во втором случае результат получен путем расчета – решения уравнения, что характеризует это измерение как косвенное. Измерялись две разноименные величины – измерение совместное. Заметим, что данные для расчета получены методом непосредственной оценки по показаниям амперметра и вольтметра – в результате прямых измерений.

Контролирующие тесты

Ответьте на вопросы и дополните утверждения, выбрав вариант из предложенных.

1 В каких единицах измеряется напряженность электрического поля (E)?

- 1) $V \cdot m$; 2) V / m ; 3) $V^2 \cdot m$; 4) $V \cdot m^2$.

2 В каких единицах измеряется магнитная постоянная?

- 1) $Gн \cdot m$; 2) $m / Gн$; 3) $Gн / m$; 4) $Gн$.

3 Какие из перечисленных ниже частиц имеют положительный заряд?

- 1) Атом; 2) нейтрон; 3) электрон; 4) протон.

4 В СИ единицей потенциала является...

- 1) 1 В; 2) 1 Ф; 3) 1 А; 4) 1 Дж.

5 В СИ единица емкости называется...

- 1) тесла; 2) фарад; 3) ампер; 4) генри.

6 Как изменится сила кулоновского взаимодействия двух точечных неподвижных зарядов, если расстояние между ними увеличить в n раз?

- 1) Увеличится в n раз;
2) уменьшится в n раз;
3) уменьшится в n^2 раз;
4) увеличится в n^2 раз.

7 Если напряжение на концах проводника и площадь его сечения увеличить в 2 раза, то сила тока, протекающая по нему...

- 1) не изменится;
2) увеличится в 2 раза;
3) уменьшится в 4 раза;
4) увеличится в 4 раза.

8 Как изменится мощность, потребляемая электрической лампой, если, не изменяя её электрическое сопротивление, уменьшить напряжение на ней в 3 раза?

- 1) Увеличится в 9 раз;
2) уменьшится в 9 раз;
3) не изменится;
4) уменьшится в 3 раза.

9 Что нужно сделать для того, чтобы изменить полюса магнитного поля катушки с P током?

- 1) Ввести в катушку сердечник;
2) изменить направление тока в катушке;
3) отключить источник тока;
4) увеличить силу тока.

10 Как изменится емкость конденсатора, если заряд на его обкладках увеличить в n раз при неизменной разности потенциалов?

- 1) Увеличится в n раз;
- 2) уменьшится n раз;
- 3) не изменится;
- 4) увеличится в n^2 раз.

11 За направление вектора напряженности электростатического поля принято...

- 1) направление вектора силы, действующей на точечный положительный заряд, помещенный в поле;
- 2) направление вектора силы, действующей на точечный отрицательный заряд, помещенный в поле;
- 3) направление вектора скорости положительного точечного заряда, который перемещается под действием поля;
- 4) направление вектора скорости отрицательного точечного заряда, который перемещается под действием поля.

12 Физическая векторная величина, определяемая отношением силы, с которой электростатическое поле действует на положительный электрический заряд, к числовому значению этого заряда, называется...

- 1) напряженностью электростатического поля;
- 2) потенциалом электростатического поля;
- 3) напряжением электростатического поля;
- 4) плотностью энергии электростатического поля.

Литература

- 1 Кортнев, А. В. Практикум по физике / А. В. Кортнев, Ю. В. Рублев, А. Н. Куценко. – М. : «Высшая школа», 1963. – 560 с.
- 2 Физический практикум / под ред. проф. В. И. Ивероновой. – М. : ГИТТЛ, 1955. – 463 с.
- 3 Богданова, Т. Н. Руководство к практическим занятиям по физике : в 2 ч. Ч. 1 / Т. Н. Богданова, Е. П. Субботина. – М. : «Советская наука», 1950. – 524 с.
- 4 Фриш, С. Э. Курс общей физики : в 3 т. Т. 1 / С. Э. Фриш, А. В. Тиморева. – М. : ГИТТЛ, 1958. – 384 с.
- 5 Сена, Л. А. Единицы измерения физических величин / Л. А. Сена. – М. : ГИТТЛ, 1951. – 238 с.
- 6 Глебов, Г. Д. Единицы физических величин в электронике / Г. Д. Глебов. – М. : Высшая школа, 1983. – 88 с.
- 7 Арутюнов, В. О. Электрические измерительные приборы и измерения / В. О. Арутюнов. – М. : Госэнергоиздат, 1958. – 120 с.
- 8 Попов, В. С. Электрические измерения и приборы / В. С. Попов. – М. : Госэнергоиздат, 1958. – 125 с.
- 9 Электрические измерения. Общий курс / под ред. А. Н. Фремке. – М. : Госэнергоиздат, 1954. – 198 с.
- 10 Шабалин, С. А. Прикладная метрология в вопросах и ответах / С. А. Шабалин. – М. : Высшая школа, 1986. – 98 с.
- 11 Вострокнутов, Н. Г. Электрические измерения / Н. Г. Вострокнутов. – М. : Высшая школа, 1966. – 271 с.

Производственно-практическое издание

Желонкина Тамара Петровна,
Лукашевич Светлана Анатольевна

Электрические измерения

Практическое пособие

Редактор *В. И. Шкредова*
Корректор *В. В. Калугина*

Подписано в печать 17.11.2017. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ. л. 2,8.
Уч.-изд. л. 3,1. Тираж 25 экз. Заказ 877.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017.

Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013.

Ул. Советская, 104, 246019, Гомель.

Т. П. ЖЕЛОНКИНА, С. А. ЛУКАШЕВИЧ

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
ИЗМЕРЕНИЯ**

Гомель
2017