

которой  $a$ ) обнаруживается *электродвижущая сила, пропорциональная произведению напряженности магнитного поля на градиент температуры:*

$$\frac{1}{a} \cdot \mathcal{E}_{\text{Нерст}} = QH \frac{T_1 - T_2}{l}. \quad (14)$$

Это явление было открыто Нернстом в 1886 г. Величину  $Q$  называют *постоянной Нернста*; она, как и постоянная Холла, не одинакова по величине и по знаку для разных металлов. Если учесть неодинаковую теплопроводность металлов, то между численными значениями постоянной Холла и постоянной Нернста обнаруживается некоторый параллелизм (отношение постоянной Нернста к коэффициенту теплопроводности приблизительно пропорционально постоянной Холла).

### § 68. Электродинамические измерительные приборы. Гальванометры. Осциллографы

Если гибкий провод из немагнитного металла натянуть в вертикальном положении, как показано на рис. 286, и расположить близ середины провода стальной магнит или, еще лучше, электромагнит, то при включении тока будет наблюдаться отклонение проводника (на рис. 286 — пунктир) в ту или другую сторону в зависимости от направления тока.

Этот опыт удается тем лучше, чем сильнее магнитное поле, создаваемое электромагнитом, и чем больше ток в проводе. Однако если провод взять достаточно тонкий, то заметные отклонения будут наблюдаться даже при очень малом токе. Последнее обстоятельство позволило применить схему только что описанного опыта к устройству очень чувствительных приборов для измерения самых незначительных токов. Приборы такого рода за последние десятилетия получили широкое распространение в лабораторной практике и известны под названием **струнных гальванометров**. Их чувствительность доходит до  $10^{-11}$  а, т. е. близка к чувствительности самых совершенных описанных ниже зеркальных гальванометров. У струнных гальванометров имеется ряд ценных преимуществ, позволяющих пользоваться этими приборами в тех случаях, в которых употребление зеркальных гальванометров было бы затруднительно.

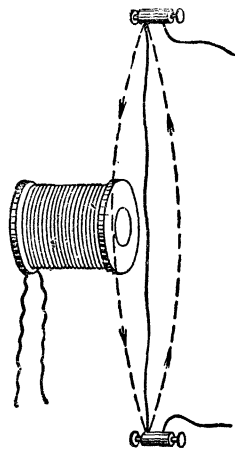


Рис. 286. Действие магнита на мягкий провод. При пропускании тока вверх или вниз провод отклоняется влево или вправо в соответствии с правилом левой ладони.

На рис. 287 представлена схема струнного гальванометра со стальным магнитом. Тонкая платиновая нить толщиной в несколько микронов и длиной от 60 до 150 мм натянута между зажимами  $C$  и  $C'$  в межполюсном пространстве стального магнита  $NS$ . Вблизи от полюсов магнита просверлены два отверстия  $a$  и  $b$ , через которые луч света, отраженный от зеркала  $L$ , попадает в объектив микроскопа с сильным увеличением (до 1000 раз). Отклонение нити гальванометра наблюдают в микроскоп и измеряют по шкале, находящейся в фокальной плоскости окуляра. Сама нить заключена в герметически закрытом корпусе (не показан на схеме) для предохранения ее от воздушных течений.

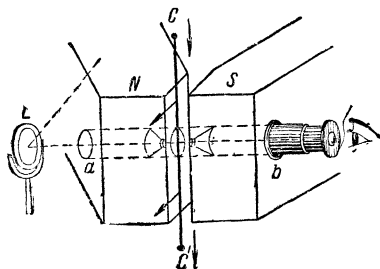


Рис. 287. Схема струнного гальванометра.

В настоящее время имеется огромное количество измерительных приборов как лабораторных (гальванометры), так и технических (амперметры, вольтметры), устройство которых основано на взаимодействии магнита и подвижной рамки с током; этот принцип

устройства был впервые применен в 1880 г. Дебре и д'Арсонвалем. Такие приборы называют **магнитоэлектрическими**.

На рис. 288 представлена схема прибора этого рода. Легкая алюминиевая рамка с обмоткой из нескольких сотен витков очень тонкой изолированной лаком проволоки свободно вращается на остриях из закаленной стали, упирающихся в агатовые подшипники. Концы обмотки рамки припаяны к двум плоским спиральным пружинкам 1 и 2, имеющим противоположную навивку. Измеряемый ток или непосредственно (если он достаточно слаб:  $10^{-3}$ — $10^{-4}$  а), или посредством шунта, ответвляющего лишь определенную его часть, подводится к прибору через провода и спиральные пружинки. Проходя по обмотке, ток испытывает взаимодействие с полем магнита, которое, как легко убедиться, применяя правило левой ладони, вызывает появление пары сил, приложенных к длинным сторонам рамки. Эта пара стремится повернуть рамку так, чтобы ее собственное магнитное поле стало параллельно и совпало по направлению с полем магнита.

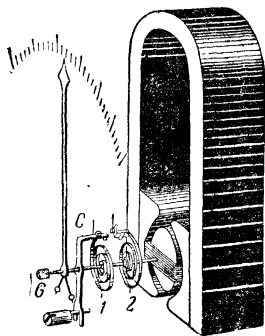


Рис. 288. Устройство магнитоэлектрического прибора

Для увеличения магнитного потока, пронизывающего рамку, внутри рамки находится железный цилиндр, скрепленный с арма-

турой прибора так, что он не препятствует свободному повороту рамки в известных пределах. Поводок *C*, показанный на рис. 288, прикреплен к концу одной из пружин и служит для установки стрелки на нуль. Грузики *G* уравнивают подвижную часть прибора.

При изменении направления тока в катушке изменяется направление ее вращения, поэтому *магнитоэлектрические приборы не пригодны для измерения переменных токов*. Но из всех систем приборов, применяемых для измерения величины и напряжения постоянного тока, магнитоэлектрические приборы наиболее точны и удобны.

Их изготовляют серийно на различные пределы измеряемых величин тока и напряжения и оформляют в круглых или прямоугольных металлических кожухах, приспособленных для монтирования на щитах, или в переносных деревянных ящичках. По принятому для всех электроизмерительных приборов стандарту погрешность приборов первого класса точности (лабораторных приборов) не превышает 0,2% измеряемой величины тока или напряжения. В менее чувствительных (лабораторных и технических) приборах второго и третьего классов точности обеспечивается точность измерения соответственно в 0,5 и 1%. В отличие от описанных ниже так называемых «электромагнитных приборов» (где стрелка скреплена не с рамкой, а с сердечником электромагнита) шкала магнитоэлектрических приборов имеет равномерные деления, так как угол поворота катушки пропорционален току, проходящему через катушку. Описанную систему приборов с подвижной рамкой обозначают на приборах и на схемах символом  $\cap$ .

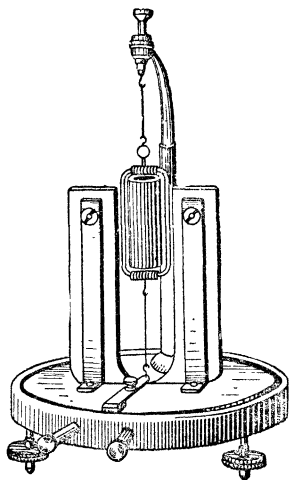


Рис. 289. Зеркальный гальванометр.

В лабораторной практике сейчас широко применяют один из видов магнитоэлектрических приборов — **зеркальные гальванометры** с подвешенной рамкой.

Один из простейших приборов этого рода представлен на рис. 289. Рамка скреплена с легким зеркальцем, поворот которого отсчитывают по методу трубы и шкалы. Ток в обмотку рамки подводится при помощи двух тонких металлических ленточек. Прибор защищен от воздушных течений стеклянним или металлическим корпусом. Пользуясь зеркальным гальванометром, применяют два способа определения угла поворота рамки: следят за перемещением по шкале пучка лучей, отраженных зеркальцем гальванометра, и (в пучке этих лучей) тени от нити, натянутой перед осветителем (верхняя

часть рис. 290), или наблюдают в зрительную трубу отраженные в зеркальце деления шкалы (нижняя часть рис. 290).

На рис. 290 и 291 показан внешний вид зеркальных гальванометров.

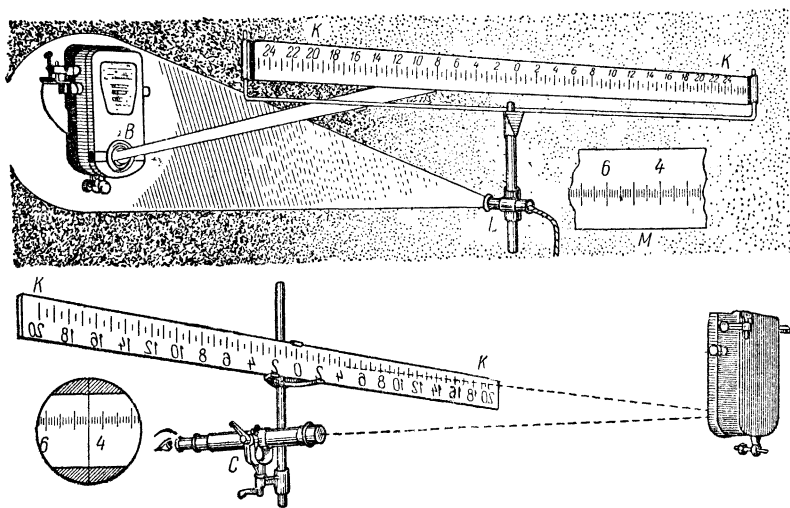


Рис. 290. Два способа наблюдения показаний зеркального гальванометра.

Зеркальные гальванометры, предназначенные для измерения малых токов, имеют рамку с сопротивлением обмотки порядка 500—2500 *ом*. Они пригодны для измерения токов  $10^{-9}$ — $10^{-11}$  *а* (т. е. в тысячные и стотысячные доли микроампера). Уникальные приборы этой системы позволяют измерять токи  $10^{-12}$ — $10^{-13}$  *а*. Насколько малы эти токи, видно из того, что ток в одну миллионную долю микроампера ( $10^{-12}$  *а*) мог бы выделить при электролизе 1 мг серебра за время около 30 000 лет. Измерение посредством гальванометров еще меньших величин тока недоступно, так как начинают сказываться флуктуации давления воздуха и флуктуации тока и поэтому показания прибора становятся беспорядочными (рис. 292).

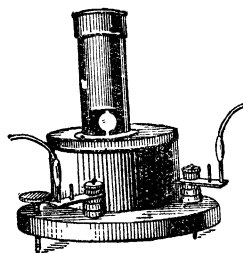


Рис. 291. Внешний вид зеркального гальванометра.

Зеркальные гальванометры, предназначенные для измерения малых напряжений, имеют рамку с сопротивлением обмотки порядка 10—60 *ом* и чувствительность  $10^{-8}$  *в* (т. е. сотые, а в уни-

кальных приборах тысячные доли микровольта). Эти напряжения во столько же раз меньше напряжения батарейки карманного фонаря, во сколько раз напряжение этой батарейки меньше напряжений, вызывающих самые сильные удары молний.

В электротехнических цепях чаще всего применяют измерительные приборы (амперметры и вольтметры) с неподвижной катушкой и подвижным ферромагнитным сердечником. Устройство такого, так называемого **электромагнитного прибора** пояснено на рис. 293. Внутри катушки  $K$ , обтекаемой измеряемым током, помещены две пластины  $S$  и  $S_1$ , из магнитно-мягкого железа или пермаллоя. Одна из них (пластина  $S_1$ ) прикреплена к корпусу прибора, другая

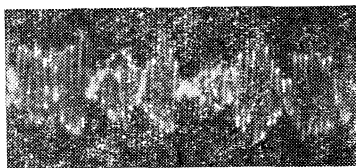


Рис. 292. Флуктуации давления в неподвижном воздухе, сообщаемые легкой рамке гальванометра толчки, записанные на движущейся фотопленке.

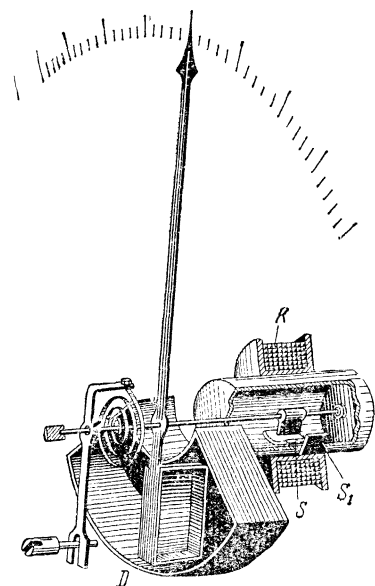


Рис. 293 Устройство электромагнитного прибора

прибора, другая прикреплена к корпусу прибора, другая прибора. Под действием тока, протекающего через катушку  $K$ , пластины  $S$  и  $S_1$  намагничиваются и отталкиваются одна от другой. Колебания стрелки успокаиваются (демпфируются) поршнем  $D$ .

Электромагнитные приборы имеют неравномерную шкалу и чувствительны к внешним магнитным полям. Но они просты, дешевы, выдерживают без вреда значительную перегрузку и пригодны для измерения переменных токов (при изменении направления тока изменяется направление намагниченности у обеих пластин и сохраняется их взаимное отталкивание). Приборы с подвижным ферромагнитным сердечником обычно обозначают символом  $\text{M}$ .

Наряду с описанными выше приборами в лабораторной практике широко применяют также *тепловые* и *термоэлектрические* приборы, устройство которых было пояснено

на страницах 125 и 156. (Тепловые приборы обозначают символом

$\text{Y}$ , термоэлектрические — символом  $\text{U}$ ).

Для измерения количеств электричества, переносимых кратковременными импульсами тока, применяют так называемые **баллистические гальванометры**. Подвижную часть баллистического гальванометра (обычно рамку, подвешенную в поле постоянного магнита) конструируют так, чтобы собственный период качания подвижной части значительно превосходил время протекания измеряемого тока, например имел порядок 10 сек.

Импульс тока сообщает подвижной части баллистического гальванометра толчок, и первое наибольшее отклонение подвижной части гальванометра от состояния равновесия, происходящее по инерции («баллистический отброс»), оказывается пропорциональным произведению величины тока на время его действия  $I\Delta t$  (точнее, сумме  $\int Idt$ ), т. е. количеству перенесенного током электричества  $Q$ .

Кроме непосредственного измерения импульсов тока, баллистические гальванометры применяют для измерения емкости конденсаторов по величине заряда, получаемого конденсатором при некотором заданном напряжении на его обкладках.

Разновидностью баллистических гальванометров являются **флюксометры**<sup>1)</sup> (или **крихгальванометры**<sup>2)</sup>), отличающиеся особенно большим собственным периодом качания подвижной части (порядка минут). В них вследствие интенсивных «сил трения», создаваемых магнитным полем, подвижная рамка при любом, но, конечно, не чрезмерном, угле поворота находится почти в безразличном равновесии, подобно ложке, наполовину опущенной в очень вязкую среду, например в патоку. Отклонение, вызванное импульсом тока, сохраняется достаточно долго; последующий импульс тока того же направления увеличивает это отклонение; в связи с этим указанные приборы пригодны для измерения замедленных импульсов тока. Такие гальванометры применяют (см. стр. 384) для измерения магнитного потока по импульсу тока, индуцированного в пробной катушке, включенной в цепь гальванометра.

Измерение весьма кратковременных импульсов тока и запись электрических колебаний осуществляют посредством осциллографов<sup>3)</sup>.

**Шлейфовый осциллограф** представляет собой прибор, в сущности аналогичный струнному гальванометру (который описан в начале данного параграфа). Схема шлейфового осциллографа показана на рис. 294. Между полюсами магнита натянута тонкая (толщиной в тысячные доли миллиметра) металлическая лента («шлейф») в виде п е т л и из двух параллельных полосок длиной каждая от 1 до 3 см. К середине этих полосок прикреплено маленькое, очень легкое зеркальце, на которое через узкое отверстие направ-

<sup>1)</sup> От англ. flux—магнитный поток.

<sup>2)</sup> От немец. kriechen—ползать (гальванометр с «ползущим указателем»).

<sup>3)</sup> От лат. oscillum — качание, колебание и греч. grapho — пишу.

ляют луч света, отражаемый зеркальцем на движущуюся фотографическую бумагу. Исследуемый ток подводят к шлейфу осциллографа. Так как по одной полоске шлейфа ток идет в одном направлении, а по другой — в противоположном, то взаимодействие магнита и тока выгибает эти полоски в противоположные стороны, вследствие чего зеркальце поворачивается и отражаемый зеркальцем луч света вычерчивает на движущейся фотографической бумаге не прямую линию, а кривую, ординаты которой пропорциональны углу поворота зеркальца и характеризуют мгновенное значение величины тока, подведенного к шлейфу осциллографа. Получаемая таким образом фотографическая запись изменений (например, колебаний) величины тока носит название *осциллограммы*.

Для получения неискаженных осциллограмм необходимо, чтобы частота собственных колебаний зеркальца значительно (в 20—30 раз) превышала частоту изменений величины исследуемого тока (собственная частота зеркальца и шлейфа достигает 20 000 герц). Вторым условием хорошей работы осциллографа является правильно подобранное затухание собственных колебаний зеркальца и шлейфа.

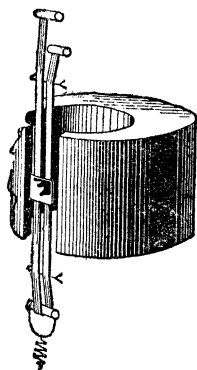


Рис. 294. Схема шлейфового осциллографа.

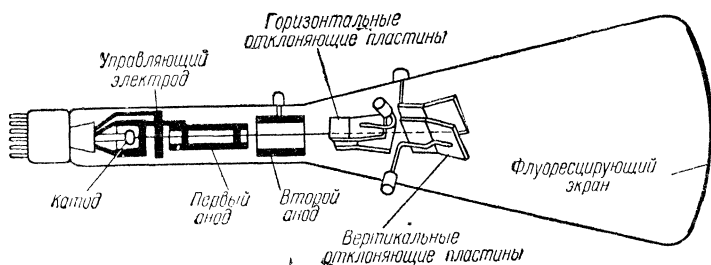


Рис. 295. Схема электронного осциллографа.

Иногда нужное затухание достигается помещением шлейфа и зеркальца в ванну с маслом, имеющим строго рассчитанную вязкость. В осциллографах новейших систем правильное затухание собственных колебаний подвижной части прибора обеспечивается электродинамическим взаимодействием между скрепленным с зеркальцем небольшим замкнутым контуром тока и магнитом.

Лучший, безынерционный прибор — это **электронный (катодный) осциллограф**. Схема этого прибора, получившего разнообразные применения, показана на рис. 295. Электроны, испускаемые катодом, который накаливается током, проходят через диафрагму в «управляющем электроде», от потенциала которого зависит интен-

сивность пропускаемого диафрагмой электронного пучка. Далее электроны проходят через отверстия в первом аноде, к которому подведено постоянное положительное напряжение в несколько сотен вольт и который расположен и устроен так, что полем анода концентрируется электронный пучок. Еще более высокое напряжение второго анода ускоряет электроны. В целом эту первую часть электронного осциллографа часто называют *электронной пушкой* (или *электронным прожектором*).

Тонкий пучок электронов, образуемый электронной пушкой, пропускают через два конденсатора, пластинки которых расположены перпендикулярно одна к другой. На первый конденсатор накладывают электрическое поле, периодически меняющееся по определенному закону, например возрастающее в течение периода пропорционально времени и резко спадающее к нулю в конце периода («пилообразная развертка»). На другой конденсатор подается и з у ч а е м о е напряжение.

Отклонениями электронного пучка в горизонтальном направлении изображаются промежутки времени, отклонения в вертикальном направлении пропорциональны напряжению изучаемого тока. Таким образом, электронный пучок оставляет на фотографической пластинке или на флуоресцирующем экране след, представляющий собой развернутую картину изучаемых электрических колебаний. Ничтожная инерция электронного пучка позволяет изучать электрические явления, протекающие весьма быстро (до  $10^{-7}$  сек.). В осциллографах, используемых для визуальных наблюдений, флуоресцирующий экран изготавливают из виллемита ( $ZnO + SiO_2$ ; Mn); виллемитовые экраны дают зеленое свечение. В осциллографах, используемых для фотографирования, экран изготавливают из сульфида цинка ( $ZnS$ ) или из вольфрамата кадмия ( $CdO + WO_3$ ); получается синее свечение. Чтобы получить белое свечение, применяют более сложные составы.

Часто в осциллографах (в особенности предназначенных для телевидения) отклонение электронного пучка осуществляют действием магнитного поля катушек, расположенных около узкого горла трубки во взаимно-перпендикулярных плоскостях.

Имея осциллограмму с записью изменения величины тока в зависимости от времени, нетрудно определить количество электричества  $Q$ , перенесенное импульсом тока: оно равно площади под кривой, изображающей изменение тока.

## § 69. Формулы электродинамики в практической системе единиц

В предыдущем изложении некоторые формулы, относящиеся к учению о магнитном поле, были приведены в начертаниях, обычных для курсов физики, но мало применяемых в учебниках электротехники.

В практической системе электрических и магнитных единиц (§ 9) основными единицами являются ампер, вольт, секунда и соответственно этому за еди-