

(рис. 17.7). Вблизи одного из полюсов полюсового магнита подвешена на длинной нити круговой виток медной проволоки. Если тока в витке нет, то его магнитный момент $p_m = IS = 0$ и неподвижный полюсовый магнит не действует на виток. При пропускании через виток электрического тока виток поворачивается вокруг оси нити так, что его плоскость оказывается перпендикулярной плоскости чертежа. При этом магнитный момент витка совпадает по направлению с полем магнита. Затем виток притягивается к полюсу магнита и занимает положение, изображенное на рис. 17.7 пунктиром.

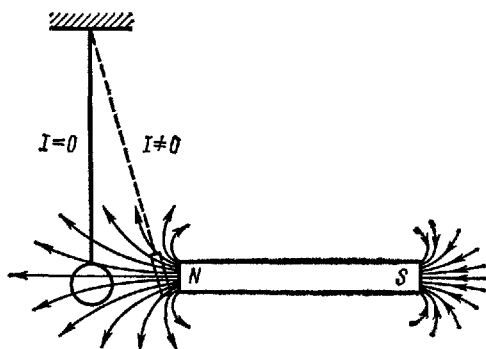


Рис. 17.7

В § 6.1 было показано, что в неоднородном электрическом поле на электрический диполь помимо момента M_e , стремящегося установить диполь в направлении внешнего поля, действует результирующая сила

$$F = p_e \frac{\partial E}{\partial l},$$

втягивающая диполь в область более сильного поля. Аналогичная сила действует на «магнитный диполь» — виток с током, находящийся в неоднородном магнитном поле:

$$F = p_m \frac{\partial B}{\partial l}. \quad (17.7)$$

Именно эта сила вызывает притяжение витка с током к полюсу полюсового магнита в опыте, изображенном на рис. 17.7.

В векторном анализе доказано, что выражение (17.7) можно представить в виде

$$F = p_{mx} \frac{\partial B}{\partial x} + p_{my} \frac{\partial B}{\partial y} + p_{mz} \frac{\partial B}{\partial z}, \quad (17.8)$$

где p_{mx} , p_{my} и p_{mz} — проекции вектора p_m на оси декартовой системы координат.

§ 17.2. Понятие о магнитоэлектрических и электродинамических измерительных приборах

1. Действие магнитного поля на рамку с током широко используется в различных электроизмерительных приборах. В зависимости от того, каким образом в приборах создается магнитное поле, они делятся на магнитоэлектрические и электродинамические.

2. В магнитоэлектрических приборах рамка с током помещается в магнитное поле сильного подковообразного магнита. Принципиальная схема магнитоэлектрического гальванометра показана на

рис. 17.8. Рамка D , состоящая из нескольких витков тонкой проволоки и подвешенная на упругой нити E , помещена в цилиндрический зазор между полюсными наконечниками магнита A и сплошным железным цилиндром C , укрепленными в корпусе прибора. Благодаря влиянию железного цилиндра C линии магнитной индукции в зазоре направлены радиально, а числовое значение индукции B постоянно. При пропускании через рамку измеряемого тока I на нее действует вращающий момент, равный

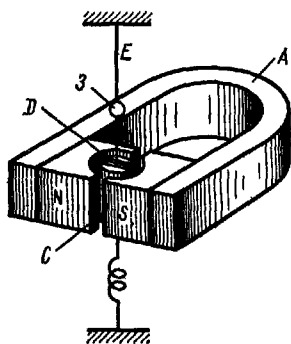


Рис. 17.8

$$M = ISNB,$$

где N — число витков провода в рамке, S — площадь рамки.

Под действием момента M рамка поворачивается, закручивая нить E на угол φ . В пределах упругой деформации угол кручения φ пропорционален моменту M :

$$\varphi = \alpha M, \quad (17.9)$$

где α — коэффициент, зависящий от упругих свойств материала нити и ее размеров. Таким образом, угол кручения нити пропорционален току в рамке:

$$\varphi = \alpha SNBI = \beta I, \quad (17.10)$$

где $\beta = \alpha SNB$ — постоянная прибора, определяемая при его градуировке путем пропускания через прибор тока, сила которого известна. Угол кручения φ регистрируется по смещению светового луча, отраженного от зеркальца Z , жестко связанного с нитью E .

Рамка поворачивается в противоположную сторону, если в ней изменить направление тока. Момент инерции подвижной системы магнитоэлектрического прибора нельзя сделать очень малым. Поэтому приборы такого типа пригодны только для измерения постоянных токов.

Для измерения силы тока прибор следует включить в цепь последовательно, а для измерения разности потенциалов на участке цепи — параллельно этому участку.

3. Магнитоэлектрический гальванометр можно использовать для измерения электрического заряда q , проходящего через поперечное сечение цепи при кратковременном токе (например, при разрядке конденсатора). Такой гальванометр называется баллистическим. В нем искусственно увеличен момент инерции J_0 подвижной системы. Благодаря этому период T_0 свободных колебаний рамки гальванометра сравнительно велик. Обозначим буквой τ время прохождения тока через гальванометр ($\tau \ll T_0$). Импульс момента сил, действующих на рамку при прохождении кратковременного тока I , равен

$$\int_0^{\tau} M dt = \int_0^{\tau} ISNB dt = SNB \int_0^{\tau} I dt.$$

По определению (см. § 8.2), $I = dq/dt$, поэтому

$$\int_0^{\tau} M dt = SNBq,$$

где q — искомый электрический заряд, прошедший через рамку гальванометра.

Так как $\tau \ll T_0$, то можно считать, что за время τ рамка практически не успевает выйти из положения равновесия, а лишь приобретает начальный момент импульса $J_0 \omega_0$. Из основного закона вращательного движения [см. т. I, формула (4.15)] имеем

$$J_0 \omega_0 = \int_0^{\tau} M dt = SNBq, \quad (17.11)$$

где ω_0 — угловая скорость, приобретенная подвижной системой гальванометра за время τ .

Начальная кинетическая энергия $W_{к0}$ подвижной системы равна см. т. I, формула (4.18)]

$$W_{к0} = \frac{J_0 \omega_0^2}{2} = \frac{S^2 N^2 B^2}{2J_0} q^2. \quad (17.12)$$

В дальнейшем при движении рамки происходит закручивание нити E (рис. 17.8), сопровождающееся переходом кинетической энергии подвижной системы в потенциальную энергию W_n упругодеформированной нити, равную $W_n = \int_0^{\varphi} M d\varphi$. Подставив сюда значение M

из (17.9), получим

$$W_n = \int_0^{\varphi} \frac{\varphi d\varphi}{\alpha} = \frac{1}{\alpha} \frac{\varphi^2}{2}, \quad (17.13)$$

т.е. энергия W_n пропорциональна квадрату деформации φ .

При максимальном угле φ_0 отклонения подвижной системы ее начальная кинетическая энергия переходит в потенциальную. Поэтому положим в (17.13) $\varphi = \varphi_0$ и приравняем начальную кинетическую энергию (17.12) потенциальной:

$$\frac{S^2 N^2 B^2}{2J_0} q^2 = \frac{1}{\alpha} \frac{\varphi_0^2}{2},$$

откуда

$$q = C_6 \varphi_0, \quad (17.14)$$

где $C_6 = \frac{1}{SNB} \sqrt{\frac{J_0}{\alpha}}$ — постоянная прибора.

Формула (17.14) позволяет определить заряд, прошедший через баллистический гальванометр, по максимальному углу отклонения Φ_0 подвижной системы гальванометра из положения равновесия.

4. В электродинамических приборах магнитное поле, действующее на рамку с током, создается соленоидом. Ось вращения рамки σ током, помещенной внутри соленоида, перпендикулярна его оси. В отсутствие тока плоскость рамки параллельна оси соленоида. Соленоид и рамка включаются последовательно, так что по ним проходит один и тот же измеряемый ток I . Вращающий момент M , действующий на рамку, можно определить по формуле (17.4):

$$M = IS_1 N_1 B_2 \sin \alpha = IS_1 N_1 B_2 \cos \varphi, \quad (17.15)$$

где N_1 — число витков провода в рамке, S_1 — площадь витка, $\alpha = (\pi/2) - \varphi$ — угол между осью соленоида и нормалью к плоскости рамки, φ — угол поворота рамки из положения равновесия, а $B_2 = \mu_0 n_2 I$ — магнитная индукция поля соленоида, содержащего n_2 витков на единицу длины.

Из формул (17.9) и (17.15) следует, что угол поворота подвижной системы равен

$$\varphi = \alpha S_1 N_1 n_2 \cos \varphi \cdot \mu_0 I^2. \quad (17.16)$$

Так как обычно угол φ небольшой, то $\cos \varphi \approx 1$ и

$$\varphi = \gamma I^2, \quad (17.17)$$

где $\gamma = \alpha S_1 N_1 n_2 \mu_0$ — постоянная прибора.

5. Электродинамический гальванометр неудобен тем, что в силу квадратичной зависимости (17.17) его шкалу нельзя сделать равномерной. Зато гальванометр такого типа универсален — он пригоден для измерения как постоянных, так и переменных токов. Действительно, при изменении направления тока в рамке одновременно изменяется на противоположное и направление магнитного поля соленоида. Поэтому направление отклонения рамки в магнитном поле соленоида сохраняется.

6. Электродинамический гальванометр можно использовать для измерения мощности, развиваемой электрическим током на пассивном участке цепи. Для этого обмотку соленоида следует включить параллельно участку цепи, а обмотку рамки — последовательно. Тогда ток I_2 в соленоиде и индукция B_2 его магнитного поля будут пропорциональны не силе тока I в цепи, а напряжению U на рассматриваемом участке:

$$B_2 = \mu_0 n_2 I_2 = \mu_0 n_2 U / R_2.$$

Следовательно,

$$\varphi = \frac{\gamma}{R_2} UI = \gamma' UI, \quad (17.18)$$

где R_2 — сопротивление цепи соленоида, UI — измеряемая мощность тока.