

3.2.6 – Исследование гальванометра.

Цель работы. Изучение работы высокочувствительного зеркального гальванометра магнитоэлектрической системы в режимах измерения постоянного тока и электрического заряда.

В работе используются: зеркальный гальванометр с осветителем и шкалой, источник постоянного напряжения, делитель напряжения, магазин сопротивлений, конденсатор, вольтметр, ключи, линейка.

Теоретическая часть. Баллистический гальванометр – электроизмерительный прибор, принцип действия которого основан на измерении отклонения рамки с большим количеством витков при пропускании тока через них в радиальном поле внешнего постоянного магнита (см. рис. 1). Если рассмотреть все моменты силы, действующие на обтекаемую током рамку, мы без особых трудностей (см. литературу) получим уравнение движения рамки:

$$\ddot{\varphi} + 2\gamma\dot{\varphi} + \omega_0^2\varphi = KI, \quad (1)$$

где введены обозначения:

$$\frac{(BSN)^2}{JR} = 2\gamma, \quad \frac{D}{J} = \omega_0^2, \quad \frac{BSN}{J} = K.$$

Это совершенно обычное дифференциальное уравнение движения «богатой» (на трение, внешнее воздействие, упругость и проч.) механической системы. Здесь I – пропускаемый через рамку ток, R – полное сопротивление цепи (включая сам прибор), остальное – параметры самого гальванометра, в том числе B – поле магнита, S – площадь витка, N – число витков, J – момент инерции рамки, D – модуль кручения нити.

При измерениях баллистический гальванометр работает в двух режимах – измерение постоянного тока и электрического заряда. В первом случае в уравнении (1) $\ddot{\varphi} = \dot{\varphi} = 0$, и угол поворота рамки определяется выражением

$$\varphi = \frac{BSN}{D}I = \frac{I}{C_I},$$

где введено обозначение C_I – *динамическая постоянная* гальванометра. В случае же пропускания заряда делать это следует за промежуток времени меньший, чем период свободных колебаний рамки. Благо момент инерции рамки искусственно сделан весьма большим, тем самым увеличен период свободных колебаний и облегчен труд экспериментатора.

Найдем скорость, приобретаемую рамкой в результате толчка, сообщаемым пропусканием заряда, проинтегрировав уравнение (1). При этом полагаем $\varphi \approx \text{const}$, поскольку время течения тока τ очень мало. Отсюда получаем

$$\dot{\varphi}(\tau) = Kq,$$

где q – измеряемый заряд. Наибольший угол отклонения, очевидно, также пропорционален заряду. Величину

$$C_Q = \frac{q}{\varphi_{\max}}$$

называют *баллистической постоянной* гальванометра.

Удобнее всего работать в *критическом режиме* ($\gamma = \omega_0$), когда после начального импульса система достаточно быстро (экспоненциально) приближается к состоянию равновесия. Уравнение движения рамки при этом имеет вид $\varphi(t) = \dot{\varphi}_0 t e^{-\gamma t}$. Сравнивая максимальное отклонение зайчика в режиме свободных колебаний (трение отсутствует) и в критическом режиме, получаем, что

$$\frac{C_{Q\text{крит}}}{C_{Q\text{своб}}} = e.$$

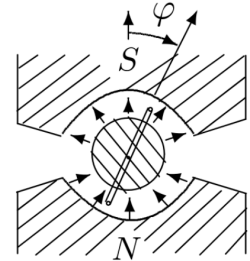


Рис. 1: Рамка с током в магнитном поле

Экспериментальная установка. Для измерения отклонения рамки используется метод «зайчика». Схемы используемых экспериментальных установок приведены на рисунках ниже и не представляют собой ничего сложного – обычная электрическая цепь. При работе в баллистическом режиме источником измеряемых зарядов служит конденсатор, что является причиной обилия ключей на рис. 3.

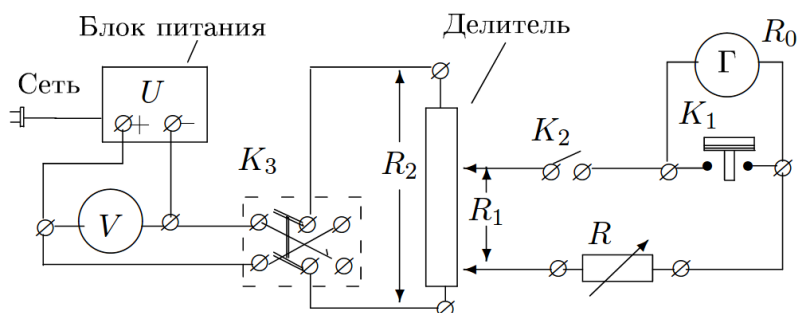


Рис. 2: Схема установки для исследования работы гальванометра в стационарном режиме

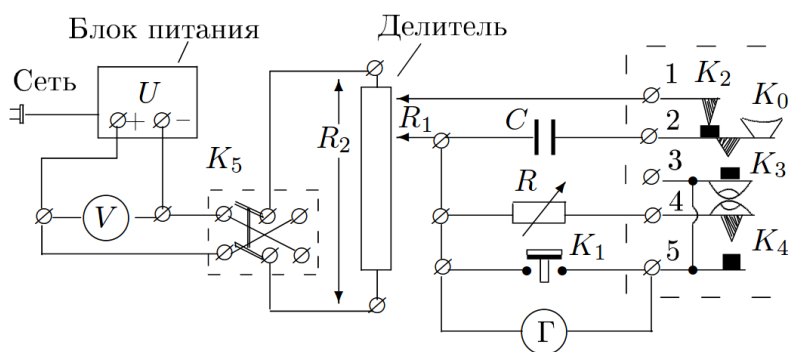


Рис. 3: Схема установки для исследования работы гальванометра в баллистическом режиме

Определение динамической постоянной. Работаем в стационарном режиме, используя установку, описанную на рис. 2. На блоке питания постоянное напряжение $U_0 \simeq 1.5$ В. Сила тока через гальванометр определяется по формуле

$$I = U_0 \frac{R_1}{R_2} \frac{1}{R + R_0},$$

где $R_1/R_2 = 1/2000$ – положение делителя, R – сопротивление магазина, $R_0 \simeq 610$ Ом – внутреннее сопротивление гальванометра.

Отклонение светового пятна на шкале связано с поворотом рамки выражением

$$x = a \tan(2\varphi) \simeq 2a\varphi,$$

где мы учли малость углов; $a \simeq 140$ см – расстояние от шкалы до зеркальца.

Построим зависимость $I = f(x)$, по наклону полученной прямой определим $C_I = 2aI/x$.

| | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| R , кОм | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 6 | 7 | 10 | 15 | 20 |
| x , см | 24.5 | 20.6 | 17.8 | 15.6 | 13.9 | 11.4 | 9.7 | 6.1 | 4.5 | 3.2 |
| I , $10^{-8} \times \text{А}$ | 21 | 18 | 16 | 15 | 13 | 11 | 10 | 7 | 5 | 4 |

Таблица 1: Экспериментальные данные.

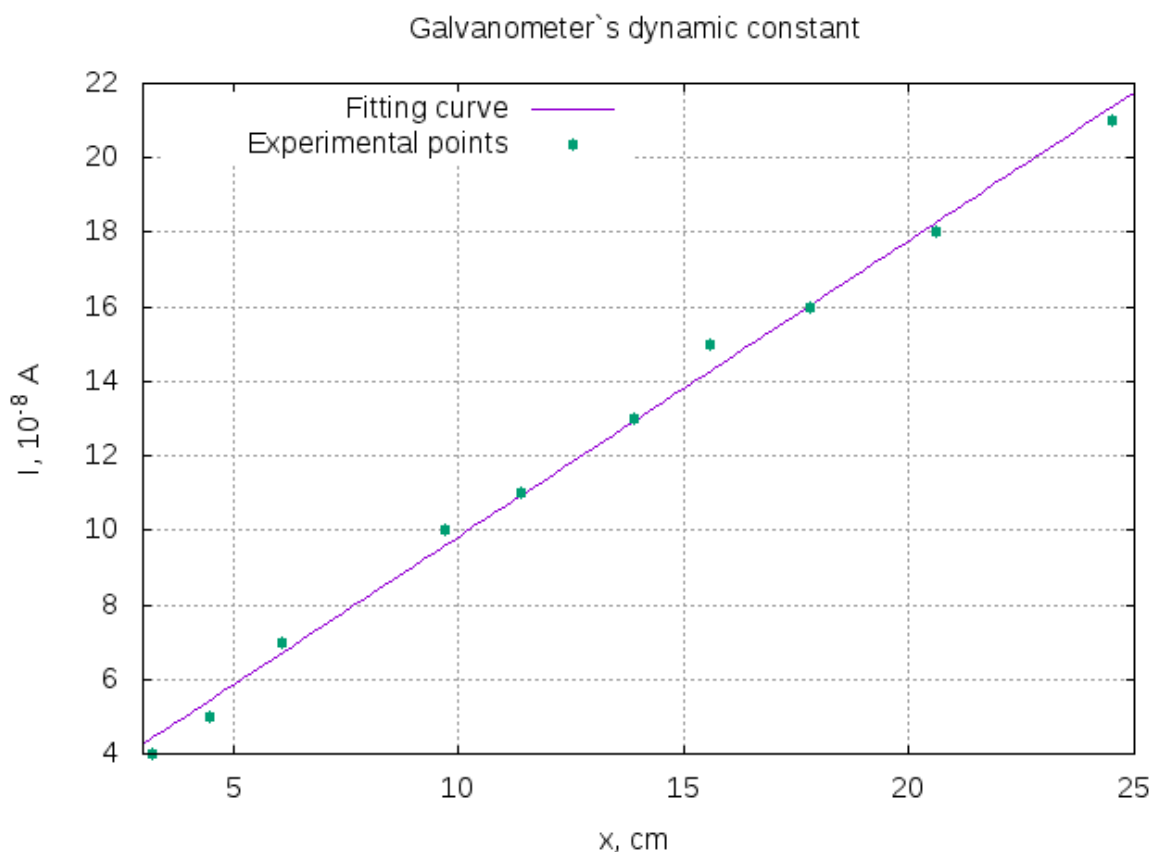


Рис. 4: К определению динамической постоянной гальванометра

Отсюда получаем динамическую постоянную:

$$C_I = (2.23 \pm 0.05) \times 10^{-11} \frac{\text{A}}{\text{мм/м}}.$$

Определение критического сопротивления. Исследуем затухание в системе. При разомкнутой цепи имеем следующие последовательные положения зайчика при затухании:

| | | | | |
|-----------------|------|------|------|------|
| $x, \text{ см}$ | 24.5 | 20.5 | 17.0 | 14.5 |
|-----------------|------|------|------|------|

Отсюда

$$\Theta_0 = \log \frac{x_n}{x_{n+1}} = 0.17 \pm 0.01$$

Мы хотим найти критический режим, когда затухание происходит наиболее быстро, т. е. $\Theta \rightarrow \infty$. Для систем с трением частота есть $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma}$, потому

$$\Theta = \gamma T = \frac{2\pi\gamma}{\sqrt{\omega_0^2 - \gamma}} = \frac{2\pi R_3}{\sqrt{(R_0 + R)^2 - R_3^2}},$$

где введено обозначение

$$R_3 = \frac{(BSN)^2}{2\sqrt{JD}} = R_0 + R_{\text{крит}}.$$

Перепишем в виде

$$\frac{1}{\Theta^2} = \frac{(R_0 + R)^2}{4\pi^2 R_3^2} - \frac{1}{4\pi^2};$$

критическое сопротивление можно определить по наклону графика $1/\Theta^2 = f[(R_0 + R)^2]$:

$$R_{\text{крит}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\Delta X}{\Delta Y}} - R_0.$$

| R , кОм | x_0 | x_1 | x_2 | x_3 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
| 21 | 16.9 | 14.5 | 12.4 | 10.5 |
| 28 | 12.7 | 10.6 | 9 | 7.6 |
| 35 | 10.2 | 8.5 | 7.6 | 6 |
| 42 | 8.5 | 7.1 | 6 | 5.1 |
| 56 | 6.4 | 5.5 | 4.6 | 3.9 |
| 70 | 5.2 | 4.4 | 3.8 | 3.3 |

Таблица 2: Затухание колебаний.

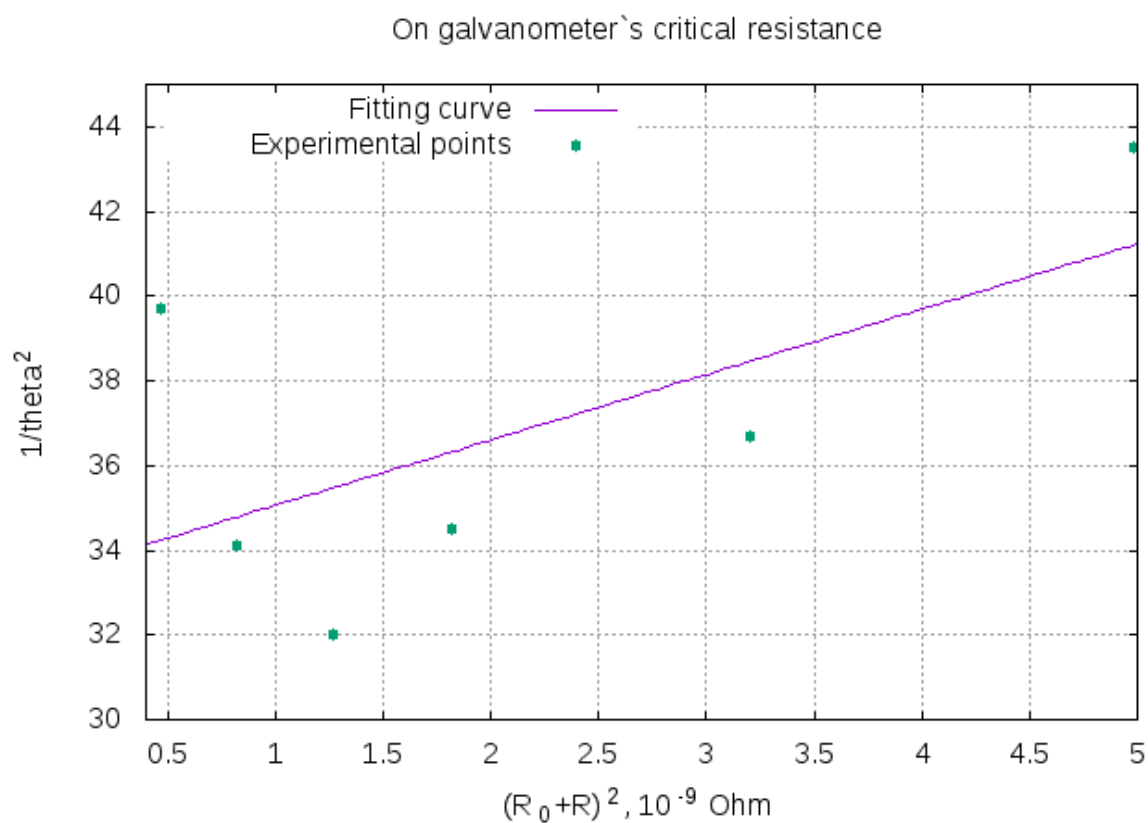


Рис. 5: К определению критического сопротивления гальванометра

Отсюда получаем:

$$R_{\text{крит}} \simeq 2.6 \pm 0.2 \text{ кОм}$$

И вот уже постфактум оказывается, что работали мы совсем не в той области...

Баллистический режим. В данном режиме мы пускаем заряд порциями, используя конденсатор $C = 2$ нФ. Работаем при положении делителя $R_1/R_2 = 1/20$. Ранее было установлено, что в критическом сопротивлении максимальное отклонение зайчика в ϵ раз меньше, чем при отсутствии затухания. Если $\gamma \ll \omega_0$, то

$$\varphi_1 = \varphi_0 e^{\Theta_0/4},$$

где φ_1 – максимальное отклонение рамки при разомкнутой цепи, φ_0 – максимальное отклонение без затухания. Используя данные соображения, по графику $l_{\max} = f[(R_0 + R)^{-1}]$ мы можем определить критическое сопротивление.

| R , кОм | 2 | 4 | 8 | 12 | 16 |
|-----------------|-----|-----|----|------|------|
| l_{\max} , см | 5.2 | 9.5 | 12 | 14.5 | 14.5 |

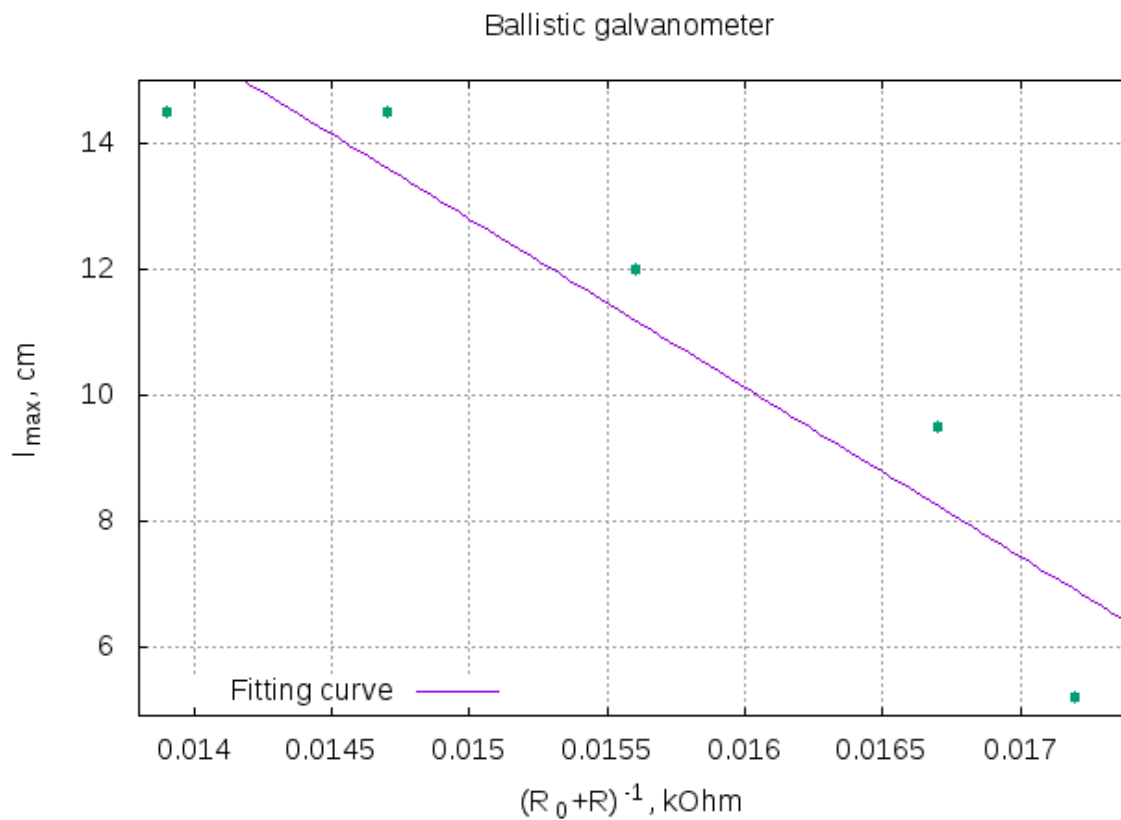


Рис. 6: К определению критического сопротивления гальванометра в баллистическом режиме

$$R_{\text{крит}} \simeq 2.7 \pm 0.5 \text{ кОм}$$

Мы видим, что полученный результат согласуется с измерением в стационарном режиме, хотя имеет большую погрешность.

Определим баллистическую постоянную гальванометра (по-прежнему $a = 140$ см):

$$C_{Q\text{крит}} = \frac{q}{\varphi_{\max}} = 2a \frac{R_1}{R_2} \frac{U_0 C}{l_{\max \text{ крит}}} \simeq (2.03 \pm 0.4) \times 10^{-9} \frac{\text{К}}{\text{мм/М}}.$$

Выводы. Изучена работа гальванометра в стационарном и баллистическом режимах. Найдены экспериментально его параметры:

$$\begin{aligned}C_I &= (2.23 \pm 0.05) \times 10^{-11} \frac{\text{А}}{\text{мм/м}}, \\R_{\text{крит стaц}} &\simeq 2.6 \pm 0.2 \text{ кОм}, \\R_{\text{крит балл}} &\simeq 2.7 \pm 0.5 \text{ кОм}, \\C_{Q_{\text{крит}}} &= (2.03 \pm 0.4) \times 10^{-9} \frac{\text{К}}{\text{мм/м}}.\end{aligned}$$