

Лабораторная работа № 3.2.6  
Изучение гальванометра

Струков О. И.  
Б04-404

**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, эталонный конденсатор, вольтметр, переключатель, ключи, линейка.

## Теоретическая часть

Баллистический гальванометр – электроизмерительный прибор магнитоэлектрической системы, отличающийся высокой чувствительностью к току и сравнительно большим периодом свободных колебаний. Главной частью высокочувствительного гальванометра магнитоэлектрической системы является подвешенная на вертикальной нити рамка, помещённая в поле постоянного магнита (рис. 1).

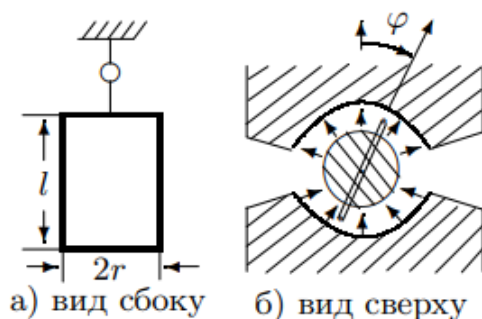


Рис. 1: Рамка с током в магнитном поле

На помещённую в магнитное поле обтекаемую током рамку гальванометра действуют момент закрученной нити, момент магнитных сил и тормозящий момент (зависит от сил сопротивления воздуха и от вихревых токов). Учитывая все эти моменты, уравнение движения рамки принимает вид

$$\ddot{\varphi} + 2\gamma\dot{\varphi} + \omega_0^2\varphi = KI,$$

где  $\gamma$  – коэффициент затухания подвижной системы гальванометра,  $\omega_0$  – собственная частота колебаний рамки,  $I$  – сила тока,  $K$  – коэффициент пропорциональности.

Динамическая постоянная гальванометра определяется при пропускании через рамку постоянного тока:

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

где  $B$  – индукция магнитного поля в рамке,  $S$  – площадь одного витка рамки,  $D$  – модуль кручения нити.

При пропускании коротких импульсов тока через баллистический гальванометр начальная скорость движения рамки пропорциональна электрическому заряду, прошедшему через рамку за всё время импульса. Отношение баллистических постоянных в критическом и свободном режимах равно  $e$ .

- 1) Определение динамической постоянной:

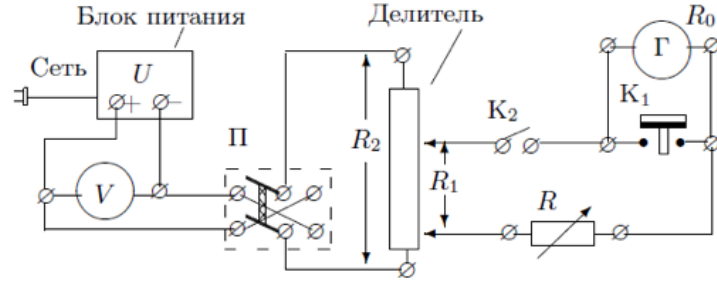


Рис. 2: Схема установки для работы гальванометра в стационарном режиме

Постоянное напряжение  $U = 1,5$  В снимается с блока питания и измеряется вольтметром  $V$ . Ключ  $K_3$  позволяет менять величину тока через гальванометр  $\Gamma$ , делитель напряжения - менять величину тока в широких пределах. Ключ  $K_2$  служит для включения гальванометра, кнопка  $K_1$  - для его успокоения. Магазин сопротивлений  $R$  позволяет менять режим работы гальванометра от колебательного до апериодического.

При малых  $R_1$  сила тока, протекающего через гальванометр, может быть вычислена по формуле

$$I = U_0 \frac{R_1}{R_2} \frac{1}{R + R_0}. \quad (1)$$

Динамическую постоянную вычисляется по формуле

$$C_I = \frac{2aI}{x}, \quad (2)$$

где  $a$  - расстояние от шкалы до зеркальца.

2) Определение критического сопротивления гальванометра:

Выполняется с помощью той же цепи, что и на рис. 1. При больших  $R$  движение рамки имеет колебательный характер, с уменьшением  $R$  затухание увеличивается, и колебательный режим переходит в апериодический.

Найдём логарифмический декремент затухания колебаний рамки  $\Theta$ .

$$\Theta = \ln \frac{x_n}{x_{n+1}} = \gamma T = \frac{2\pi\gamma}{\sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}} = \frac{2\pi R_3}{\sqrt{(R_0 + R)^2 - R_3^2}} \quad (3)$$

где введено обозначение:

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

Тогда при  $R = R_{кр}$  выполняется:  $\Theta \rightarrow \infty$ .

Преобразуя (3) получим

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

Из (3) можно получить уравнение прямой в координатах  $X = (R_0 + R)^2$  и  $Y = 1/\Theta^2$ :

$$\frac{1}{\theta^2} = \frac{(R_0 + R)^2}{4\pi^2 R_2^3} - \frac{1}{4\pi^2}$$

Тогда

$$R_{кр} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\Delta X}{\Delta Y}} - R_0 \quad (5)$$

3) Определение баллистической постоянной и критического сопротивления гальванометра, работающего в баллистическом режиме:

Для изучения работы гальванометра в режиме измерения заряда используется схема, представленная на рис. 2.

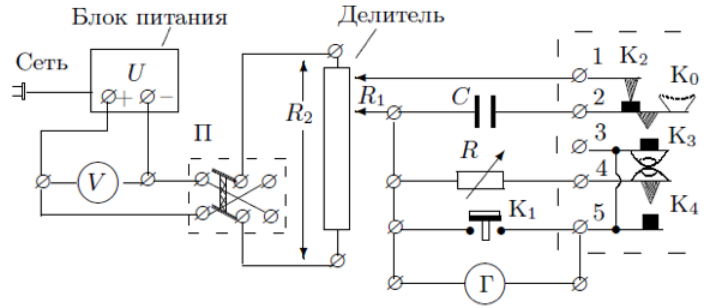


Рис. 3: Схема установки для определения баллистической постоянной

При нормальном положении кнопки  $K_0$  конденсатор  $C$  заряжается до напряжения

$$U_c = \frac{R_1}{R_2} U_0$$

Заряд конденсатора равен

$$q = \frac{R_1}{R_2} U_0 C$$

При нажатии на ключ  $K_0$  конденсатор отключается от источника постоянного напряжения и подключается к гальванометру. К моменту замыкания ключа  $K_4$  весь заряд успевает пройти через гальванометр, рамка получает начальную скорость. Баллистическая постоянная гальванометра определяется при критическом сопротивлении

$$CQ_{cr} = \frac{q}{\varphi_{maxkr}} = 2a \frac{R_1}{R_2} \frac{U_0 C}{l_{maxkr}} \quad (6)$$

Следует помнить, что наблюдать колебания рамки при полном отсутствии затухания, конечно, невозможно, т. к. даже при разомкнутой внешней цепи (бесконечное сопротивление) остаётся трение в подвеске и трение рамки о воздух. Величину максимального отклонения гальванометра без затухания  $\phi_0$  можно, однако, рассчитать, если при разомкнутой цепи измерены максимальное отклонение рамки  $\phi_1$  и логарифмический декремент затухания  $\theta_0$ :  $\phi_0 = \phi_1 \cdot e^{0,25\theta_0}$  или  $l_0 = l_1 \cdot e^{0,25\theta_0}$ .

## Ход работы

### 1. Определение динамической постоянной $C_I$

Для определения динамической постоянной гальванометра измерялась зависимость отклонения зайчика  $x$  от силы тока  $I$ , протекающего через рамку. Ток рассчитывался по формуле:

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

где  $U_0$  – напряжение источника,  $R_1/R_2$  – коэффициент делителя,  $R$  – сопротивление магазина,  $R_0$  – сопротивление рамки гальванометра.

Параметры установки:

$U_0$	1,35 В
$R_0$	610 Ом
$R_2$	10 кОм
Делитель $\frac{R_1}{R_2}$	$\frac{1}{2000}$
$2a$	2,8 м

По полученным данным был построен график зависимости  $I = f(x)$ .

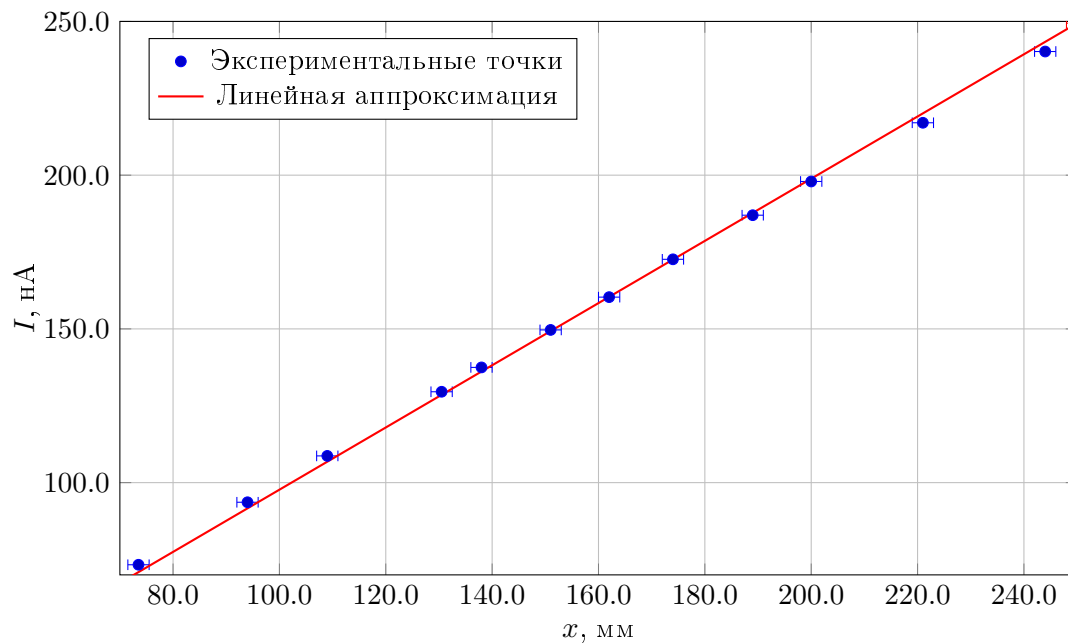


Рис. 4: Зависимость силы тока  $I$  через гальванометр от отклонения зайчика  $x$

Как видно из графика, экспериментальные точки хорошо ложатся на прямую линию, что свидетельствует о линейности шкалы гальванометра в исследуемом диапазоне.

Угловой коэффициент прямой:

$$k = \frac{I}{x} = 1,0115 \pm 0,0112 \text{ нА/мм.}$$

Динамическая постоянная гальванометра рассчитывается по формуле:

$$C_I = 2a \cdot \frac{I}{x} = 2a \cdot k,$$

где  $2a$  – удвоенное расстояние от зеркала гальванометра до шкалы.

Таким образом,

$$C_I = (2,83 \pm 0,03) \text{ нА} \cdot \text{м/мм.}$$

Чувствительность гальванометра к току:

$$S_I = \frac{1}{C_I} \approx (0,353 \pm 0,004) \text{ мм/м/нА.}$$

## 2. Определение критического сопротивления $R_{\text{кр}}$ подбором

Был измерен период свободных колебаний  $T_0 \approx 3,41$  с.

Подобрано наибольшее сопротивление  $R$ , при котором зайчик не переходит за нулевое деление шкалы после размыкания ключа  $K_3$ :

$$R_{\text{кр}} \approx 6190 \text{ Ом.}$$

## 3. Определение критического сопротивления $R_{\text{кр}}$ по зависимости логарифмического декремента

Для разных  $R$  были измерены отклонения  $x_n$  и  $x_{n+1}$ , вычислены  $\Theta = \ln(x_n/x_{n+1})$  и построен график  $1/\Theta^2 = f((R + R_0)^2)$ .

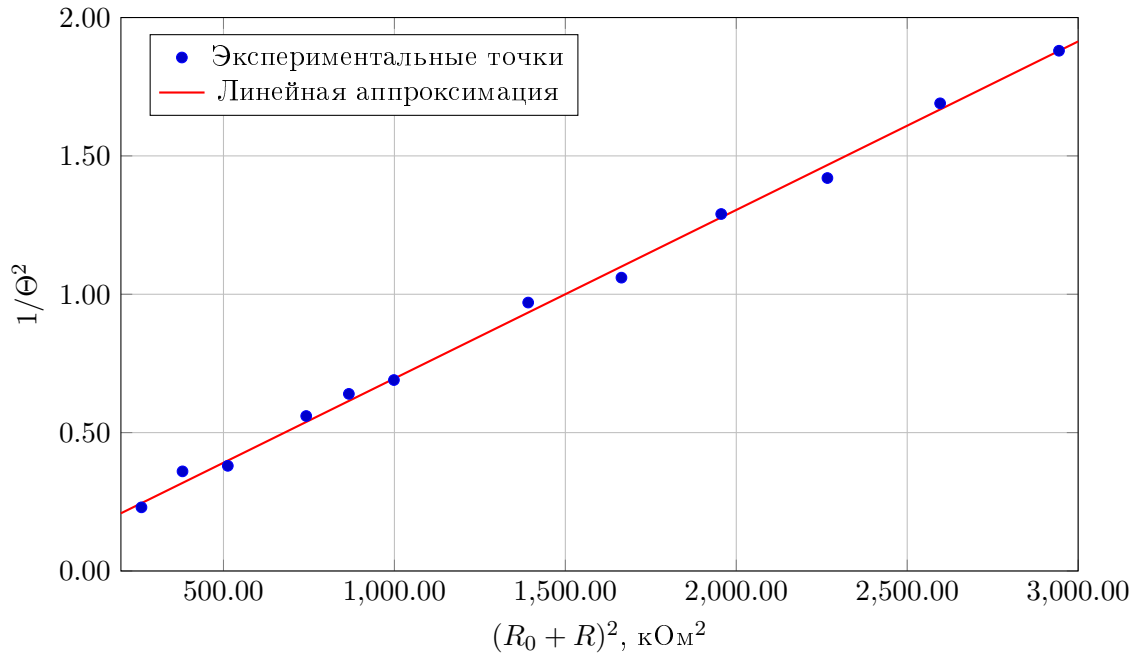


Рис. 5: Зависимость  $1/\Theta^2$  от  $(R_0 + R)^2$

По графику определён угловой коэффициент линейной зависимости:

$$k = (6,09 \pm 0,09) \cdot 10^{-4} \text{ кОм}^{-2}$$

Согласно формуле (4), угловой коэффициент графика равен:

$$k = \frac{1}{4\pi^2 R_3^2},$$

где  $R_3 = R_0 + R_{\text{кр}}$ .

Отсюда находим:

$$R_3 = \frac{1}{2\pi\sqrt{k}} \approx 6450 \text{ Ом.}$$

Таким образом,

$$R_{\text{кр}} = (5840 \pm 50) \text{ Ом.}$$

#### 4. Определение баллистической постоянной и $R_{\text{кр}}$ в баллистическом режиме

Была собрана схема номер 2. Зафиксировано  $C = 2,0 \text{ мкФ}$ , делитель напряжения  $R_1/R_2 = 1/20$ . Измерены отклонения в режиме свободных колебаний:  $l_0 = 196 \text{ мм}$ .

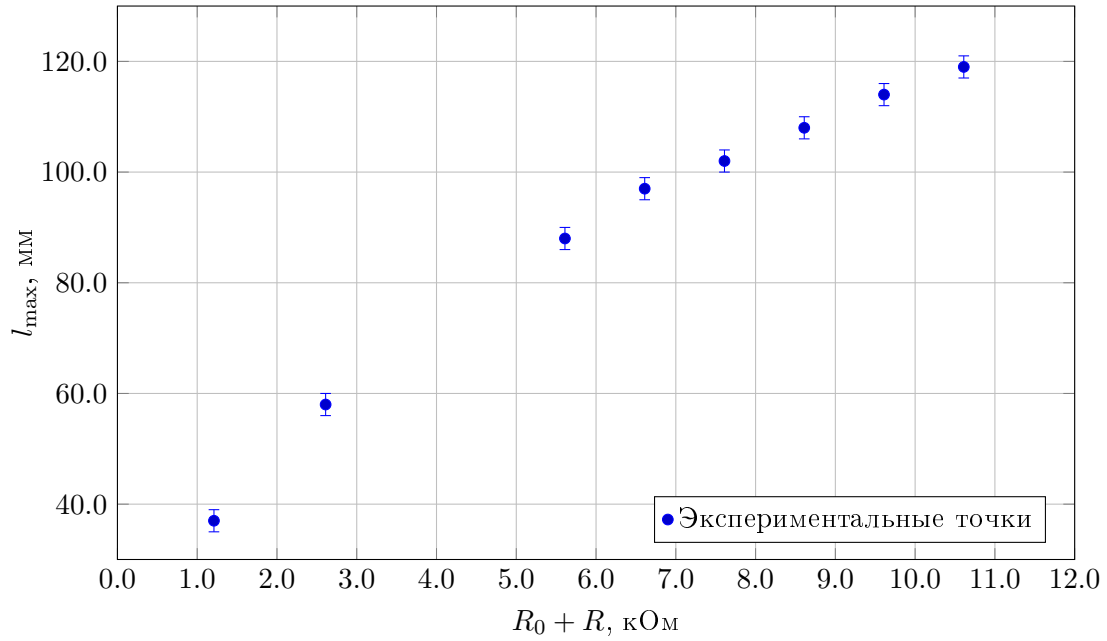


Рис. 6: Зависимость максимального отклонения  $l_{\max}$  от полного сопротивления  $R_0 + R$

Поправку на затухание при разомкнутой цепи:

$$l'_0 = l_0 \cdot e^{0,25\theta_0} = 196 \cdot e^{0,0275} \approx 201 \text{ мм.}$$

Максимальное отклонение в критическом режиме:

$$l_{\max \text{ кр}} = \frac{l'_0}{e} = \frac{201}{2,718} \approx 74 \text{ мм.}$$

По графику (рис. 6) найдено значение  $(R_0 + R)^{-1}$ , соответствующее  $l_{\max} = 74$  мм:

$$(R_0 + R)^{-1} \approx 0,00017 \text{ Ом}^{-1} = 0,17 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1}.$$

Отсюда полное сопротивление цепи:

$$R_0 + R \approx \frac{1}{0,00017} \approx 5880 \text{ Ом.}$$

Учитывая, что  $R_0 = 610$  Ом, получаем:

$$R \approx 5880 - 610 = 5270 \text{ Ом}$$

С учётом погрешности:

$$R_{\text{кр}} = (5300 \pm 300) \text{ Ом.}$$

Рассчитаем баллистическую постоянную при  $R_{\text{кр}}$ . Заряд конденсатора:

$$q = \frac{R_1}{R_2} \cdot C \cdot U_0 = 1,35 \cdot 10^{-7} \text{ Кл.}$$



Баллистическая постоянная:

$$C_{Q_{кр}} = \frac{q}{U_{\max \text{ кр}}} = 2a \cdot \frac{q}{l_{\max \text{ кр}}} \approx 5,11 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} \cdot \text{м} / \text{мм}.$$

С учётом погрешности:

$$C_{Q_{кр}} = (51 \pm 3) \text{ м} \cdot \text{нК} / \text{мм}.$$

Время релаксации:

$$t = R_0 C = 610 \cdot 2,0 \cdot 10^{-6} = 1,22 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Период свободных колебаний  $T_0 \approx 3,35 \text{ с}$ , следовательно  $t \ll T_0$  — условие баллистического режима выполняется.

## Выводы

В работе определены параметры зеркального гальванометра тремя методами. Результаты представлены в таблице:

$R_{кр}, \text{ Ом}$			$C_I, \frac{\text{нА} \cdot \text{м}}{\text{мм}}$	$C_{Q_{кр}}, \frac{\text{м} \cdot \text{нК}}{\text{мм}}$
Подбор	Метод $1/\Theta^2$	Балл. метод		
6190	$5840 \pm 50$	$5300 \pm 300$	$2,83 \pm 0,03$	$51 \pm 3$

Значения критического сопротивления, полученные тремя методами, находятся в диапазоне от 5300 до 6190 Ом. Наиболее точным является метод зависимости  $1/\Theta^2$  от  $(R_0 + R)^2$ , дающий  $R_{кр} = (5840 \pm 50) \text{ Ом}$ .

Метод подбора даёт наиболее высокое значение (6190 Ом), что может отличаться от истинного из-за неточности визуального определения положения зайчика.

Баллистический метод даёт промежуточное значение  $(5,3 \pm 0,3) \text{ кОм}$ . Погрешность здесь выше из-за необходимости определения  $l_{\max}$  по графику.

Все измерения подтверждают теоретические зависимости для магнитоэлектрического гальванометра. Расхождения в значениях  $R_{кр}$  могут быть объяснены особенностями экспериментальной установки и методики измерений.