

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).

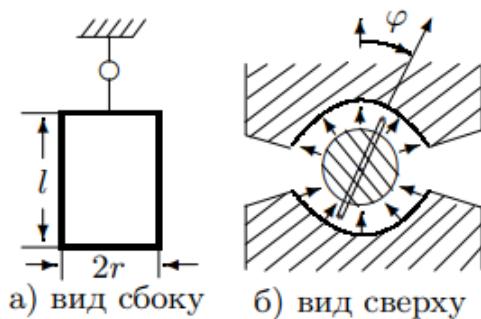


Рис. 1: Рамка с током в магнитном поле

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 γ – коэффициент затухания подвижной системы гальванометра, ω_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:

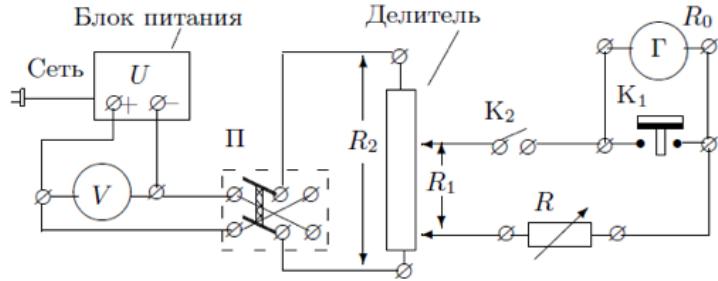


Рис. 2: Схема установки для работы гальванометра в стационарном режиме

Постоянное напряжение $U = 1,5$ В снимается с блока питания и измеряется вольтметром V . Ключ K_3 позволяет менять величину тока через гальванометр Γ , 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 Θ .

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

где введено обозначение:

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

Тогда при $R = R_{kp}$ 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

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

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.

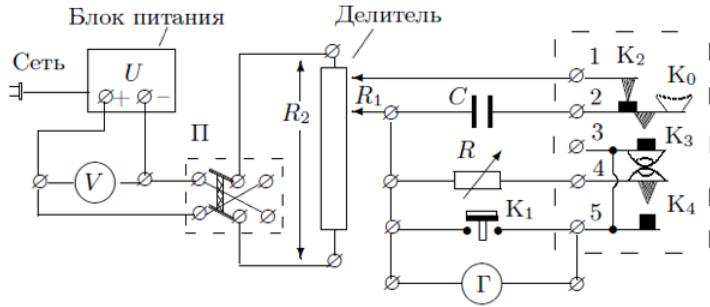


Рис. 3: Схема установки для определения баллистической постоянной

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 кнопку 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) остается трение в подвеске и трение рамки о воздух. Величину максимального отклонения гальванометра без затухания ϕ_0 можно, однако, рассчитать, если при разомкнутой цепи измерены максимальное отклонение рамки ϕ_1 и логарифмический декремент затухания θ_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 $I = f(x)$.

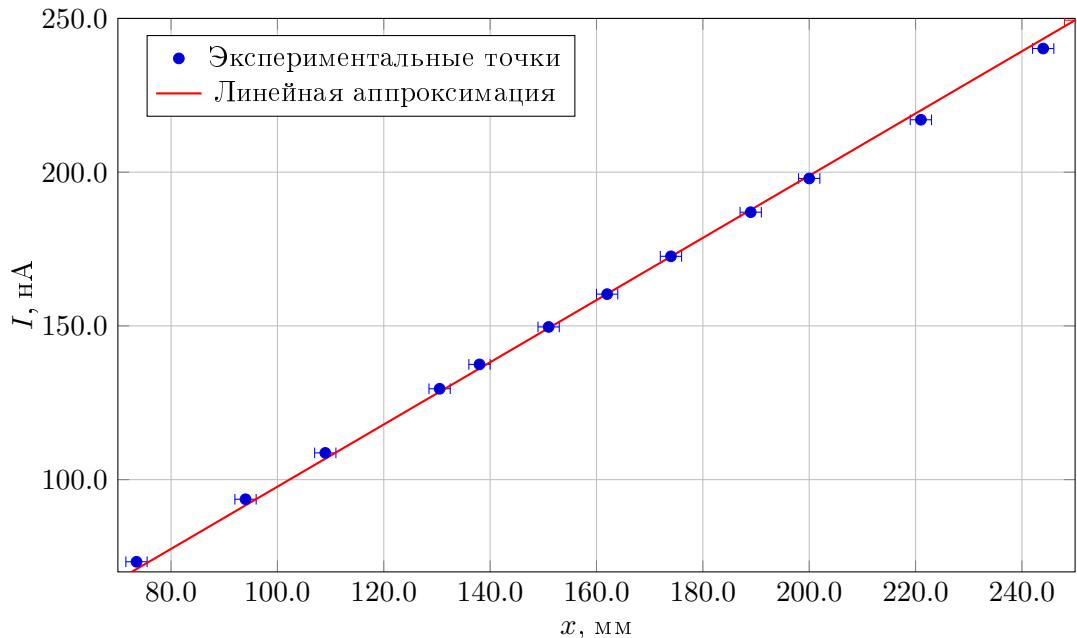


Рис. 4: Зависимость силы тока I через гальванометр от отклонения зайчика x

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

Угловой коэффициент прямой:

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

Динамическая постоянная гальванометра рассчитывается по формуле:

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

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

Таким образом,

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

Чувствительность гальванометра к току:

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

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 $1/\Theta^2 = f((R + R_0)^2)$.

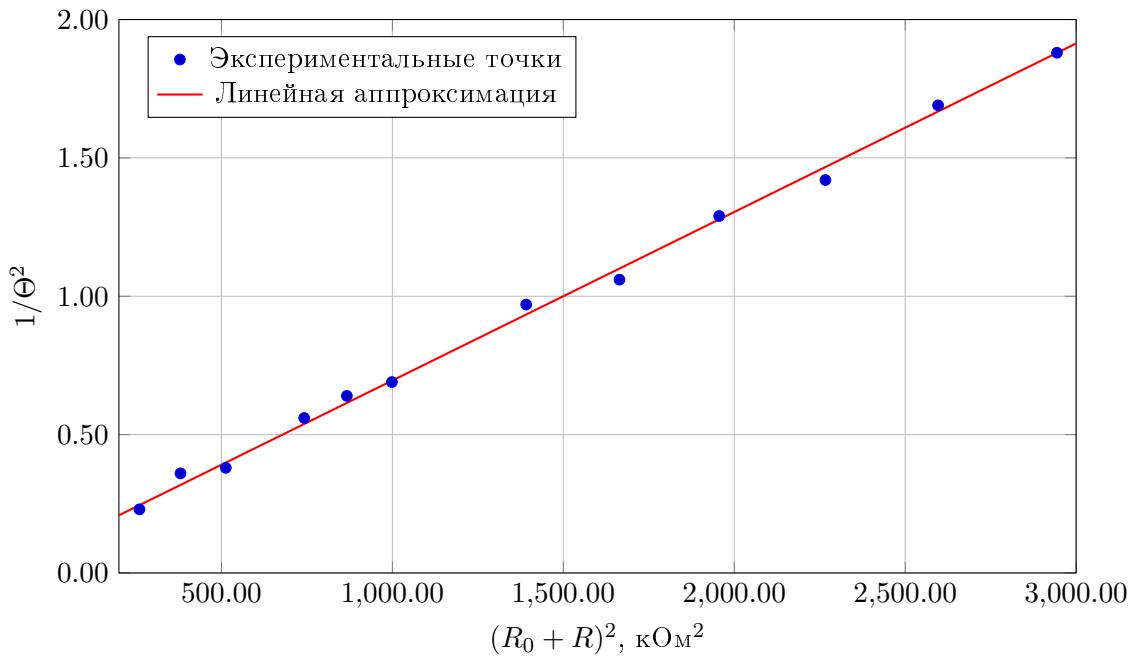


Рис. 5: Зависимость $1/\Theta^2$ от $(R_0 + R)^2$

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: $l_0 = 196 \text{ мм}$.

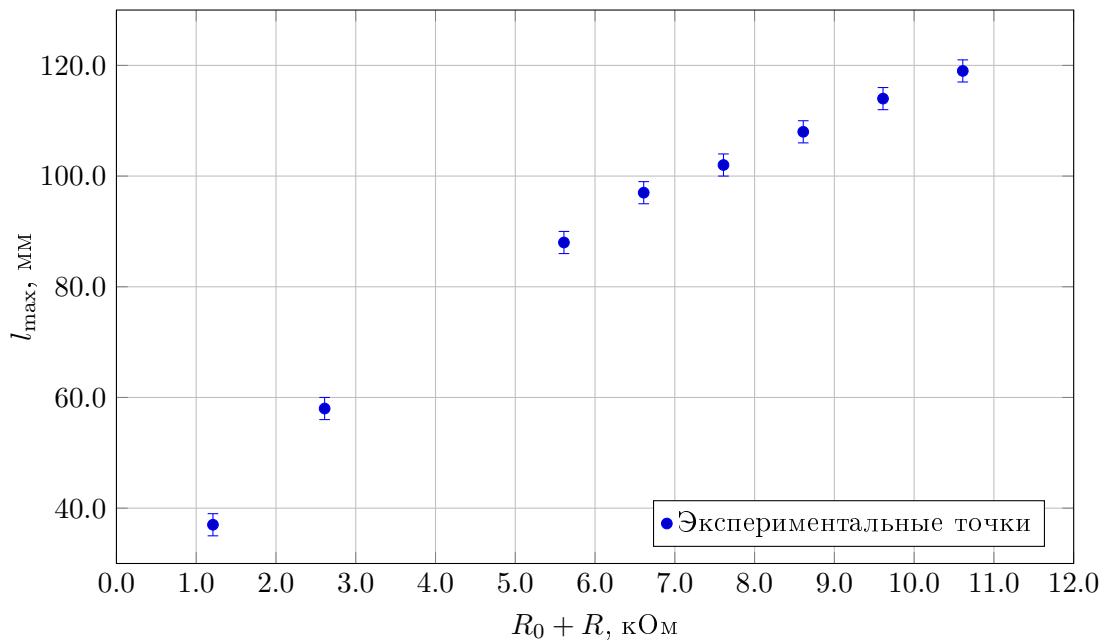


Рис. 6: Зависимость максимального отклонения l_{\max} от полного сопротивления $R_0 + R$

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:

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

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:

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

Рассчитаем баллистическую постоянную при R_{kp} . Заряд конденсатора:

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

Баллистическая постоянная:

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

С учётом погрешности:

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

Время релаксации:

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

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

Выводы

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

R_{kp} , Ом			C_I , $\frac{\text{nA}\cdot\text{м}}{\text{мм}}$	$C_{Q_{kp}}$, $\frac{\text{м}\cdot\text{нK}}{\text{мм}}$
Подбор	Метод $1/\Theta^2$	Балл. метод		
6190	5840 ± 50	5300 ± 300	$2,83 \pm 0,03$	51 ± 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 $R_{kp} = (5840 \pm 50)$ 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 $(5,3 \pm 0,3)$ кОм. Погрешность здесь выше из-за необходимости определения l_{\max} по графику.

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