Исследование гальванометра*

Иван Едигарьев
Московский Физико-Технический Институт
Факультет Общей и Прикладной Физики, 526т

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.

I. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОСТОЯННОЙ

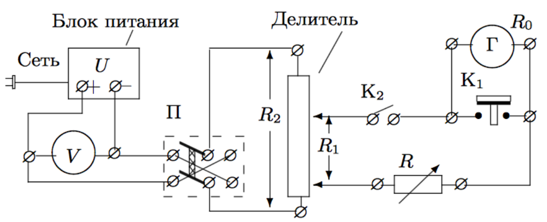


Рис. 1. Схема установки для работы гальванометра в стационарном режиме

Экспериментальная установка. Схема для исследования гальванометра в стационарном (или динамическом) режиме представлена на рис.1. Постоянное напряжение $U \simeq 1,5$ В снимается с блока питания и измеряется вольтметром V. Ключ П позволяет менять направление тока через гальванометр Г, делитель напряжения — менять величину тока в широких пределах. Ключ П 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 очевидной формуле:

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

где U_0 — показания вольтметра, R_1/R_2 — положение делителя, R — сопротивление магазина, R_0 — внутреннее сопротивление гальванометра.

Угол отклонения рамки от положения равновесия измеряется с помощью осветителя, зеркальца, укреплённого на рамке, и шкалы, на которую отбрасывается луч света от зеркальца. Координата x светового пятна на шкале связана с углом отклонения рамки формулой

$$x = a\,\mathrm{tg}(2\varphi),$$

где a — расстояние от шкалы до зеркальца. При малых углах можно считать, что $\varphi = x/2a$. Динамическую постоянную

$$C_I = \frac{I}{x/2a}, \tag{2}$$

как правило, выражают в единицах $\left[\frac{\text{А}}{\text{мм/м}}\right]$ (ток I измеряется в амперах, x — в мм, a — в метрах). Расстояние a обычно около метра, поэтому величина C_I определяет ток, при котором зайчик отклоняется на одно деление (1 мм).

II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГАЛЬВАНОМЕТРА, РАБОТАЮЩЕГО В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Измерение критического сопротивления гальванометра можно выполнить с помощью той же цепи (рис.1).

При больших R свободное движение рамки имеет колебательный характер. С уменьшением R затухание увеличивается, и колебательный режим переходит в апериодический.

Скорость затухания колебаний принято характеризовать декрементом затухания Δ, равным отношению углов двух последовательных отклонений в одну сторону. Легко показать, что:

$$\Delta = \frac{\varphi_n}{\varphi_{n+1}} = \frac{x_n}{x_{n+1}} = e^{\gamma T},$$

где T - период колебаний:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}. \tag{3}$$

Вместо декремента затухания Δ можно рассматривать логарифмический декремент затухания Θ:

$$\Theta = \ln \Delta = \gamma T = \ln \frac{x_n}{x_{n+1}}. \tag{4}$$

* 3.2.6

Измеряя зависимость логарифмического декремента затухания от сопротивления внешней цепи, можно найти $R_{\text{кр}}$, т. е. значение R, при котором $\Theta \to \infty$. Измерения логарифмического декремента при сильном затухании затруднены, поэтому исследуем зависимость Θ от R. Подставляя в (4) значения T из (3), ω, γ и ω_0, получим

$$\Theta = \gamma T = 2\pi\frac{\gamma}{\omega} = \frac{2\pi\gamma}{\sqrt{{\omega_0}^2 - \gamma^2}} = \frac{2\pi R_3}{\sqrt{(R_0+R)^2 - {R_3}^2}}, \tag{5}$$

где введено обозначение

$$R_3 = \frac{(BSN)^2}{2\sqrt{JD}} = R_0 + R_{\text{кр}}. \tag{6}$$

После простого преобразования равенства (5) получим

$$\frac{1}{\Theta^2} = \frac{(R_0+R)^2}{4\pi^2 {R_3}^2} - \frac{1}{4\pi^2}. \tag{7}$$

Последнее уравнение, представленное на графике в координатах $X = (R_0+R)^2$, $Y = 1/\Theta^2$ имеет вид прямой, угол наклона которой позволяет рассчитать критическое сопротивление:

$$R_{\text{кр}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\Delta X}{\Delta Y}} - R_0 \tag{8}$$

III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ПОСТОЯННОЙ И КРИТИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГАЛЬВАНОМЕТРА, РАБОТАЮЩЕГО В БАЛЛИСТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

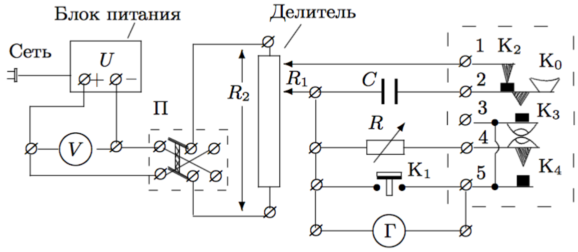


Рис. 2. Схема установки для определения баллистической постоянной

Экспериментальная установка. Для изучения работы гальванометра в режиме измерения заряда используется схема, представленная на рис. 2. Система ключей устроена так, что нормально ключ $К_2$ замкнут, а ключи $К_3$ и $К_4$ разомкнуты. При нажатии на кнопку $К_0$ сначала размыкается ключ $К_2$, затем замыкается $К_3$ и через некоторое время — $К_4$.

При нормальном положении кнопки $К_0$ конденсатор C заряжается до напряжения

$$U_{\text{C}} = \frac{R_1}{R_2}U_0.$$

Заряд конденсатора равен

$$q = CU_{\text{C}} = \frac{R_1}{R_2}U_0 C. \tag{9}$$

При нажатии на ключ $К_0$ конденсатор отключается от источника постоянного напряжения (размыкается ключ $К_2$) и подключается к гальванометру (замыкается ключ $К_3$).

Ёмкость конденсатора выбрана так, что к моменту замыкания ключа $К_4$ весь заряд успевает пройти через гальванометр, и рамка получает начальную скорость $\dot{\varphi}(\tau)$. При этом можно считать, что отклонение рамки, происходящее за время, протекающее между замыканием ключей $К_3$ и $К_4$, равно нулю.

При замыкании ключа $К_4$ гальванометр шунтируется внешним сопротивлением R, и в зависимости от величины этого сопротивления движение рамки описывается одним из уравнений.

Первый отброс зайчика $l_{\max}$ после нажатия на кнопку $К_0$ зависит от сопротивления внешней цепи, подключённой к гальванометру. Для определения $R_{\text{кр}}$ используется то обстоятельство, что в критическом режиме максимальное отклонение зайчика в e раз меньше, чем у гальванометра без затухания.

Следует помнить, что наблюдать колебания рамки при полном отсутствии затухания, конечно, невозможно, т. к. даже при разомкнутой внешней цепи ($R = \infty$) остаётся 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.

Легко показать, что

$$\varphi_0 = \varphi_1 e^{\Theta_0/4} \text{ или } l_0 = l_1 e^{\Theta_0/4}. \tag{10}$$

Баллистическая постоянная гальванометра $C_{Q_{\text{кр}}}$ $\left[\frac{\text{Кл}}{\text{мм/м}}\right]$ определяется при критическом сопротивлении ($R = R_{\text{кр}}$):

$$C_{Q_{\text{кр}}} = \frac{q}{\varphi_{\max\ \text{кр}}} = 2a\frac{R_1}{R_2}\frac{U_0 C}{l_{\max\ \text{кр}}}, \tag{11}$$

где $l_{\max\ \text{кр}}$ — величина первого отброса в критическом режиме, выраженная в делениях шкалы (мм), a — расстояние от зеркальца до шкалы, выраженное в метрах, произведение $U_0 C$ — заряд, выраженный в кулонах.

IV. ЗАДАНИЕ

В работе предлагается определить динамическую постоянную, критическое сопротивление и оценить линейность шкалы гальванометра, работающего в стационарном (токовом) режиме; определить критическое сопротивление и баллистическую постоянную гальванометра, работающего в баллистическом режиме (режиме измерения заряда).

1. Соберите электрическую цепь по рис.1 и подготовьте приборы к работе.

2. Для определения динамической постоянной снимите зависимость отклонения зайчика x от сопротивления магазина R, увеличивая сопротивление магазина, но не меняя делителя (8–10 значений).

3. Запишите показания вольтметра U_0, положение делителя R_1/R_2, величину R_2 и внутреннее сопротивление гальванометра R_0, указанное на установке.

4. Проведите измерение логарифмического декремента затухания Θ_0 в режиме свободных колебаний.

5. Измерьте период T_0 свободных колебаний рамки (приближённо).

6. Определите критическое сопротивление. Для этого подберите **наибольшее** сопротивление магазина, при котором при размыкании ключа П зайчик не переходит за нулевое значение. Это сопротивление близко к критическому сопротивлению цепи $R_{\text{кр}}$.

7. Для расчёта Θ проведите измерение отклонений зайчика после размыкания ключа П, увеличивая R от $\simeq 3R_{\text{кр}}$ (близкое целое) до $10R_{\text{кр}}$.

8. Для исследования работы гальванометра в баллистическом режиме соберите схему по рис.2.

В режиме свободных колебаний (при разомкнутой цепи R) определите первый отброс зайчика после замыкания ключа К$_0$. Подберите делитель так, чтобы при замыкании ключа К$_0$ первый отброс $l_{\max}$ соответствовал отклонению зайчика почти на всю шкалу.

Вновь подключите магазин R. Не меняя положения делителя, снимите зависимость первого отброса от величины R (8–10 значений).

9. Запишите положение делителя R_1/R_2 и значение ёмкости C. Измерьте расстояние a от шкалы до зеркальца гальванометра.

Обработка результатов

1. Рассчитайте токи I по формуле (1) и постройте график $I = f(x)$. Оцените линейность шкалы гальванометра. По наклону прямой рассчитайте динамическую постоянную C_I [А/(мм/м)] по формуле (2).

2. Рассчитайте логарифмический декремент затухания Θ_0 разомкнутого гальванометра по формуле (4).

3. Постройте график $1/\Theta^2 = f[(R + R_0)^2]$ и по наклону прямой (в области малых R) рассчитайте критическое сопротивление по формуле (8).

4. Постройте график $l_{\max} = f[(R_0 + R)^{-1}]$. Определите по графику критическое сопротивление гальванометра [с учётом (10)].

5. Рассчитайте баллистическую постоянную в критическом режиме $C_{Q_{\text{кр}}}$ [Кл/(мм/м)] по формуле (11).

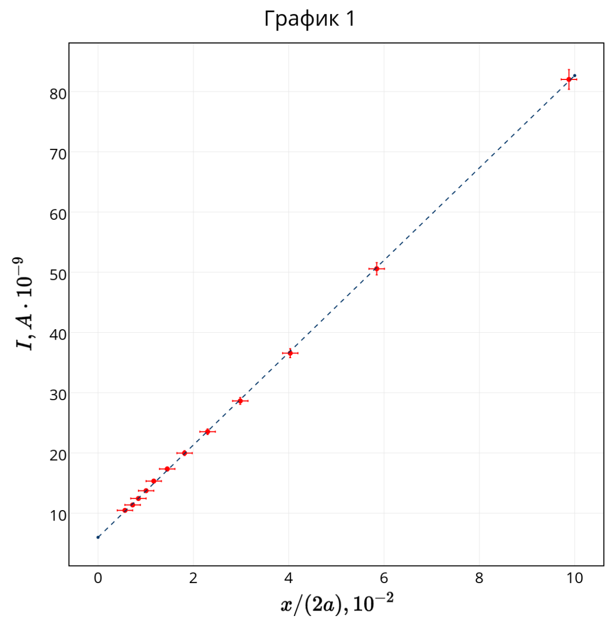
6. Сравните время релаксации $t = R_0C$ и период свободных колебаний гальванометра T_0.

7. Сведите результаты эксперимента в таблицу.

8. Оцените погрешности и сравните полученные значения $R_{\text{кр}}$.

V. ДАННЫЕ

Рассчитаем токи I по формуле (1) и построим график зависимости $I = f(x)$:



Построим линейную регрессию вида $f(x) = \alpha + \beta x$ с квадратичной функцией потерь. По наклону регрессионной прямой рассчитаем динамическую постоянную гальванометра C_I [А/(мм/м)] по формуле (2).

$$\alpha = (6.0{\pm}0.1^{\text{stat}}),\ A{\cdot}10^{-9},\ \beta = (3.09{\pm}0.02^{\text{stat}}),\ A{\cdot}10^{-9}{\cdot}cm^{-1}$$

$$C_I = 2ka = (77 \pm 2^{\text{syst}}) \cdot 10^{-10}\ \frac{A}{\text{mm/m}}$$

По Графику 1 легко видеть, что линейность шкалы гальванометра подтверждается.

Рассчитаем логарифмический декремент затухания Θ_0 разомкнутого гальванометра по формуле (4) и оценим ошибку. Получим:

$$\Theta_0^{12} = 0.30{\pm}0.02^{\text{syst}},\ \Theta_0^{23} = 0.31{\pm}0.03^{\text{syst}},\ \Theta_0 = 0.30{\pm}0.3^{\text{syst}}$$

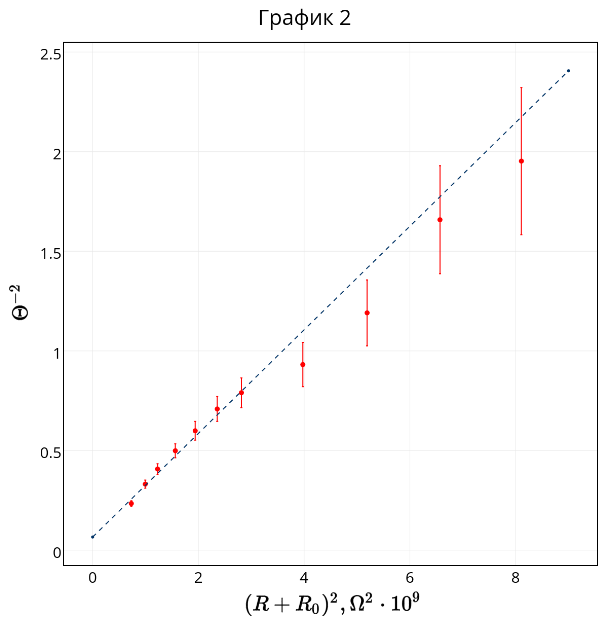
Измерим период T_0 свободных колебаний рамки:

$$3T_0 = (18 \pm 1^{\text{syst}})\ s,\quad T_0 = (6 \pm 0.3^{\text{syst}})\ s$$

Подберём наибольшее сопротивление R магазина, при котором зайчик не проходит через нулевое положение. Это сопротивление близко к критическому $R_{\text{кр}}$:

$$R_{\text{кр}} = (9.4 \pm 0.1^{\text{syst}}),\ \Omega \cdot 10^3$$

Следующим этапом вычислим значения логарифмического декремента затухания Θ для соответствующих значений R. Построим график $1/\Theta^2 = f[(R+R_0)^2]$:



Мы предполагаем некоторую линейную зависимость $1/\Theta^2 = f[(R+R_0)^2]$ (7) в области малых R. Построим вариационный ряд измерений по R, выберем первые семь точек, и построим по ним линейную регрессию вида $f(x) = \alpha + \beta x$ с квадратичной функцией потерь. Получим:

$$\alpha = (7 \pm 2^{\text{stat}}) \ \cdot 10^{-2}, \quad \beta = (26 \pm 1^{\text{stat}}), \ \Omega^2 \cdot 10^{-11}$$

Легко видеть, что параметр модели α с точностью до двух значений статистической ошибки согласуется с теоретически предсказанным.

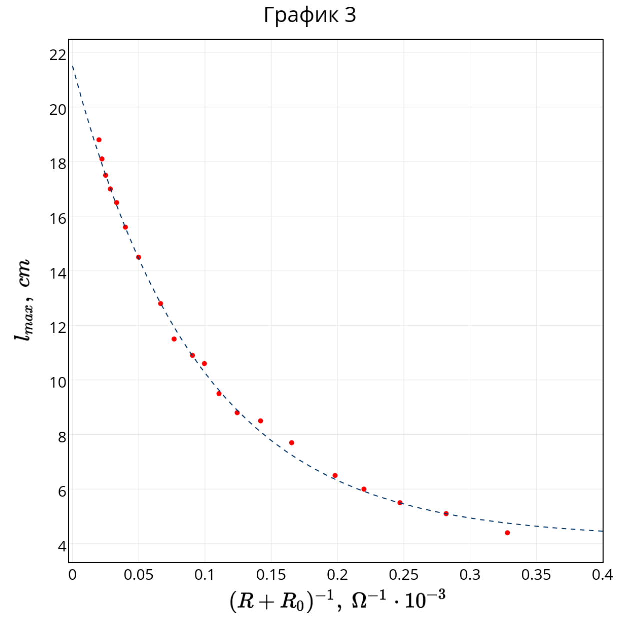
С помощью параметра β рассчитаем и оценим ошибку критического сопротивления гальванометра по формуле (8):

$$R_{\text{кр}} = (9.8 \pm 0.4^{\text{stat}}) \ \Omega \cdot 10^3$$

Теперь проанализируем данные в баллистическом режиме работы гальванометра. Измерим первый отброс зайчика в режиме свободных колебаний:

$$l_{\textbf{max, св}} = (20.0 \pm 0.1^{\text{syst}}) \ cm$$

Построим график зависимости $l_{\max} = f[(R_0+R)^{-1}]$:



Построим трёхпараметрический фит, под зависимость:

$$f(x) = \alpha + \exp\left[\beta + \gamma x\right]$$

Получим:

$$\alpha = (4.2 \pm 0.2^{\text{stat}}) \ cm, \quad \beta = 2.8 \pm 0.1^{\text{stat}},$$

$$\gamma = (-10.5 \pm 0.1^{\text{stat}}) \ \Omega \cdot 10^3$$

Вычислим приблизительное значение $R_{\text{кр}}$ из нашей модели, которое будет соответствовать точке на графике с $l_{\max} = 7.4 \ cm$:

$$R_{\text{кр}} = (6 \pm 1) \ \Omega \cdot 10^3$$

Рассчитаем по формуле (11) баллистическую постоянную в критическом режиме $C_{Q_{\text{кр}}}$ [Кл/(мм/м)]:

$$C_{Q_{\text{кр}}} = 2a \frac{R_1}{R_2} \frac{U_0 C}{l_{\max \text{ кр}}} = (34.4 \pm 0.2^{\text{syst}}) \ 10^{-10} \frac{C}{mm/m}$$

Оценим время релаксации системы t, и сравним это значение с периодом свободных колебаний гальванометра T_0:

$$t \approx R_0 C = 10^{-4} \ s \ \ll \ T_0$$

Как можно видеть, наше рассуждение о том, что в баллистическом режиме можно пренебречь начальным углом и начальной угловой скоростью было верным.

Сведём результаты в итоговую таблицу: