

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Отчет о выполнении лабораторной работы №3.2.6

Изучение гальванометра

Выполнил студент группы Б03-405
Тимохин Даниил

27 сентября 2025 г.

1. Аннотация

В данной работе исследуется поведение гальванометра в различных режимах работы. При постоянном токе и при быстром протекании заряда. Исследуется зависимость колебаний от сопротивления контура.

2. Теоретическая справка

Баллистический гальванометр - электроизмерительный прибор магнитоэлектрической системы, обладающей большой точностью и большим периодом колебаний.

Поле в нем построено так, что оно всегда направлено радиально в окрестности рамки, а значит мы при малых колебаниях можем пренебречь нелинейностью силы, создаваемой ЭДС катушки.

У гальванометра есть два режима:

- 1) Стационарный - когда ток через гальванометр постоянен.
- 2) Баллистический - когда пробегает короткий заряд и мы измеряем его.

Рассмотрим моменты сил, которые действуют на зеркальце в гальванометре.

Первый момент - момент порожденный силой упругости.

$$M_1 = -D\varphi$$

D - модуль кручения нити, а φ - угол поворота.

Второй - порожден силами вязкого трения

$$M_2 = -\beta_{тр}\dot{\varphi} \quad (2)$$

$\beta_{тр}$ - коэффициент вязкого трения.

Также в рамке за счет движения будет порождаться электрический ток I_{Σ} . Так как он движется по квадратной рамке, то эффективно будет работать все контуры в обмотке. Поэтому момент сил от силы ампера будет равен.

$$M_3 = (BSI_{\Sigma})N \quad (3)$$

При этом из-за того, что контур вращается, то поток меняется, а значит

$$\mathcal{E}_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt} = -BSN\dot{\varphi} \quad (4)$$

Тогда индуцированный ток равен $I_{ind} = \frac{\mathcal{E}_{ind}}{R_{\Sigma}}$, где R_{Σ} - полное сопротивление цепи.

Тогда момент от ЭДС индукции.

$$M_3^{ind} = BSN \cdot BSN\dot{\varphi} = \frac{(BSN)^2}{R_{\Sigma}}\dot{\varphi} \quad (5)$$

Причем обычно $M_3^{ind} \gg M_2$ т.е. $\frac{(BSN)^2}{R_{\Sigma}} \gg \beta_{тр}$, а значит можно пренебречь силами вязкого трения при расчете затухания, если R_{Σ} конечное, то есть пока цепь не разомкнута, то будем считать, что момент от ЭДС гораздо больше, чем от вязкого сопротивления.

При этом при подключении к цепи получим, что

$$I_{\Sigma} = \frac{\mathcal{E}_{ind} + \mathcal{E}}{R_{\Sigma}} = I_{ind} + I \quad (6)$$

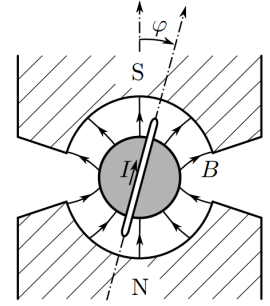


Рис. 1. Гальванометр

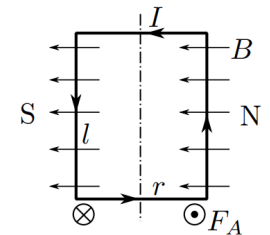


Рис. 2. Силы Ампера, действующие на рамку

Где I и \mathcal{E} - ЭДС и сила тока, порожденные внешней цепью.

Тогда с учётом этого, получим, что

$$J\ddot{\varphi} = M_{\Sigma} \quad (7)$$

Приводя к каноническому виду, получим, что

$$\ddot{\varphi} + 2\gamma\dot{\varphi} + \omega_0^2\varphi = KI \quad (8)$$

Где переменные будут выражаться

$$K = \frac{BNS}{J} \quad 2\gamma = \frac{(BSN)^2}{JR_{\Sigma}} + \frac{\beta_{mp}}{J} \approx \frac{(BSN)^2}{JR_{\Sigma}} \quad \omega_0^2 = \frac{D}{J} \quad (9)$$

Тогда в Стационарном режиме уравнение (9) должно перейти в стационарный режим, когда $\dot{\varphi} = 0$, а значит и $\ddot{\varphi} = 0$, что приводит к равенству

$$\varphi = \frac{KI}{\omega_0^2} = S_I I = \frac{I}{C_I} \quad (10)$$

S_I - чувствительность гальванометра, а C_I - динамическая постоянная.

Теперь при свободных колебаниях. Т. к. за время прохождения тока рамке успеет отклониться, то начальными условиями будут $\varphi(0) = 0$ и $\dot{\varphi}(0) = \dot{\varphi}_0$ Если режим колебательный т.е. $\gamma < \omega_0$

$$\varphi(t) = \frac{\dot{\varphi}_0}{\omega_1} e^{-\gamma t} \sin \omega_1 t \quad \omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2} \quad (11)$$

А значит рамка движется колебательно с периодом

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = 2\pi \left[\frac{D}{J} - \frac{(BSN)^4}{(JR_{\Sigma})^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (12)$$

При критическом режиме, когда $\gamma = \omega_0$

$$R_{кр} = \frac{(BSN)^2}{2\sqrt{DJ}} \quad (13)$$

И уравнение угла будет выглядеть

$$\varphi(t) = \dot{\varphi}_0 t e^{-\gamma t} \quad (14)$$

Движение не будет иметь колебательного характера и гальванометр быстро успокоится.

При аperiодическом режиме $\gamma > \omega_0$

$$\varphi(t) = \frac{\dot{\varphi}_0}{\alpha} e^{-\gamma t} \sinh \alpha t \quad \alpha = \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} \quad (15)$$

Приближение к положению равновесия идет медленнее, чем в критическом процессе.

При быстром протекании тока, получим, что

$$\dot{\varphi}|_0^{\tau} + 2\gamma\varphi|_0^{\tau} + \omega_0^2 \int_0^{\tau} \varphi dt = Kq \quad (16)$$

И тогда, так как $\varphi(\tau) \approx \varphi(0) = 0$ и $\dot{\varphi}(0) = 0$, то

$$\dot{\varphi}(\tau) = Kq \quad (17)$$

Из уравнения колебаний мы можем получить, что максимальное отклонение при отсутствии колебаний.

$$\varphi_{max}^{cs} = \frac{\dot{\varphi}(\tau)}{\omega_0} = \frac{Kq}{\omega_0} \quad (18)$$

В критическом режиме, что используется для того, чтобы гальванометр быстрее вернулся в на изначальную позицию для следующего эксперимента, получим, что отклонение будет равно

$$\varphi_{max}^{kp} = \frac{\dot{\varphi}(\tau)}{e\omega_0} = \frac{Kq}{e\omega_0} \quad (19)$$

Также введем баллистическую постоянную $C_q = \frac{1}{S_q} = \frac{q}{\varphi_{max}}$

Тогда она превратится в две величины $C_q^{cs} = \frac{1}{S_q^{cs}} = \frac{q}{\varphi_{max}^{cs}}$ и $C_q^{kp} = \frac{1}{S_q^{kp}} = \frac{q}{\varphi_{max}^{kp}}$

Теперь рассмотрим схемы.

Первая:

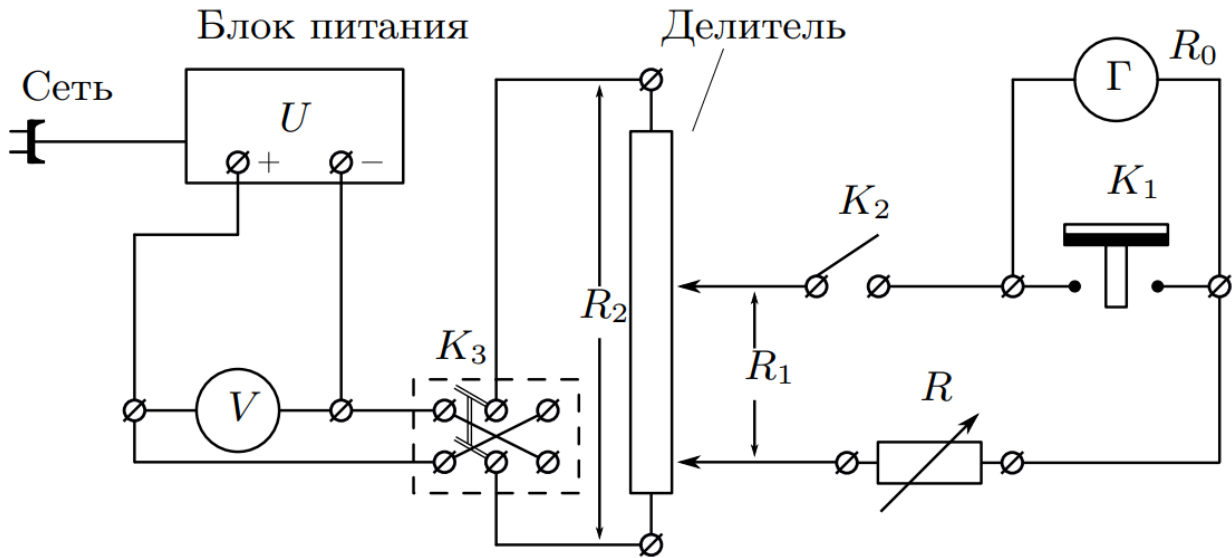


Рис. 3. Схема экспериментальной установки 1

Силу тока в цепи можно рассчитать по формуле

$$I = \frac{R_1}{R_2} \frac{U_0}{R + R_0} \quad (20)$$

Где U_0 - напряжение источника, R - сопротивление магазина, R_0 - сопротивление гальванометра.

Отклонение x зависит от угла поворота при малых отклонениях

$$x = a \cdot \tan 2\varphi \approx 2a\varphi \quad (21)$$

$$C_I = \frac{I}{\varphi} = \frac{2aI}{x} \quad (22)$$

Определение критического сопротивления.

Необходимо измерить зависимость логарифмического декремента Θ от сопротивления цепи R вне гальванометра.

Так как $\Theta = \gamma T_1$, то

$$R_{kp} = \frac{R + R_0}{\sqrt{\frac{2\pi^2}{\Theta} + 1}} - R_0 \quad (23)$$

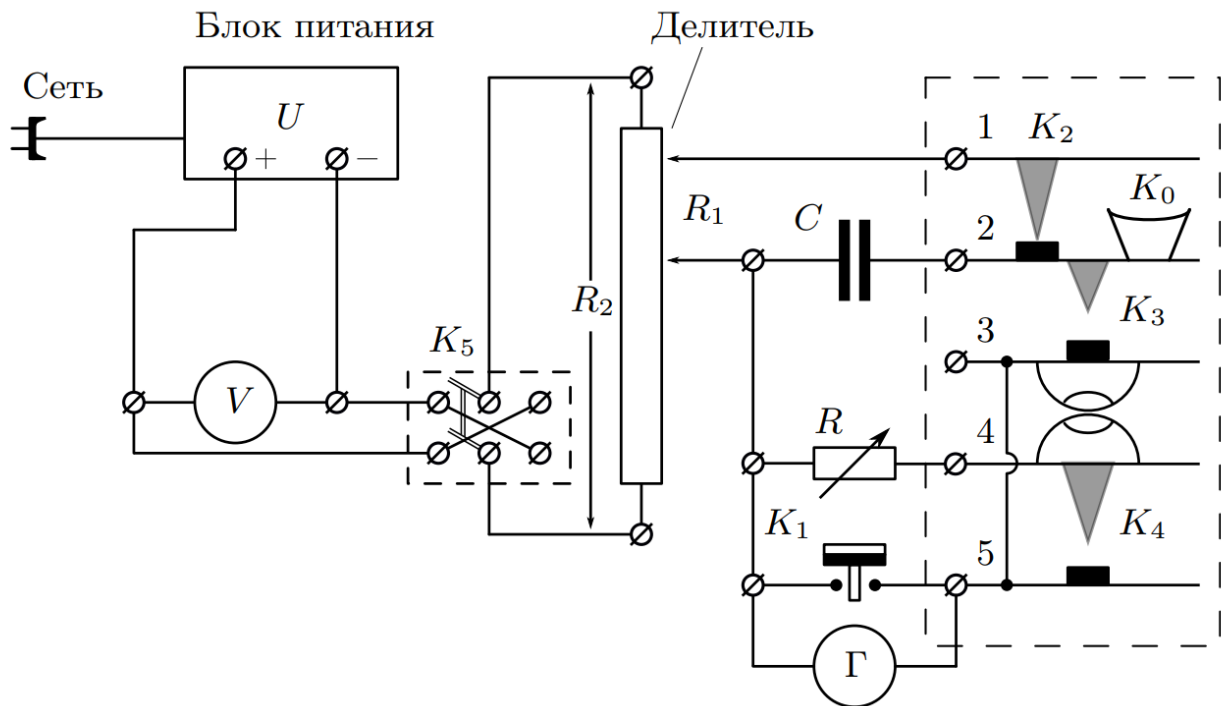


Рис. 4. Схема экспериментальной установки 1

При свободных колебаниях необходимо сначала изучить затухающие колебания при разрыве цепи, т. е. $R = \infty$. В этом режиме будет работать только сила вязкого трения, а значит мы сможем измерить связанный с ней декремент и по нему рассчитать максимальное отклонение.

$$\varphi_{max}^{cs} = \varphi_{max} \cdot e^{\frac{\Theta}{4}} \quad (24)$$

$$x_{max}^{cs} = x_{max} \cdot e^{\frac{\Theta}{4}} \quad (25)$$

При этом, так как мы знаем, что $U_C = \frac{R_1}{R_2} U_0 C$, то

$$C_q^{кр} = \frac{q}{\varphi_{max}^{кр}} = 2a \frac{R_1}{R_2} \frac{CU_0}{x_{max}^{кр}} \quad (26)$$

3. Оборудование

Гальванометр

Вольтметр

Ключ

Ключ переключающий

Волшебная белая коробочка с кнопками и блоком питания

Конденсатор

Магазин сопротивлений

Провода

Линейка с источником света

4. Проведение эксперимента и обработка результатов

Измерим ток в схеме 1 при различных сопротивлениях. Известно, что $U_0 = 1.2V$ и $R_1/R_2 = \frac{1}{5000}$

Таблица 1. Зависимость отклонения от силы тока

R , Ом	R_{Σ} , Ом	I , нА	Δx , см
10000	21408	22,6202	3,05
9000	20408	24,974	3,3
8000	19408	27,8746	3,65
7000	18408	31,5375	4,05
6000	17408	36,3086	4,38
5000	16408	42,7807	5,3
4000	15408	52,0607	5,9
3000	14408	66,482	8
2000	13408	91,954	10,9
1000	12408	149,068	17,4

Средняя ошибка при снятии отклонения $\sigma_{\Delta x} = 0.2$ см.

Построим аппроксимацию $I(\Delta x)$

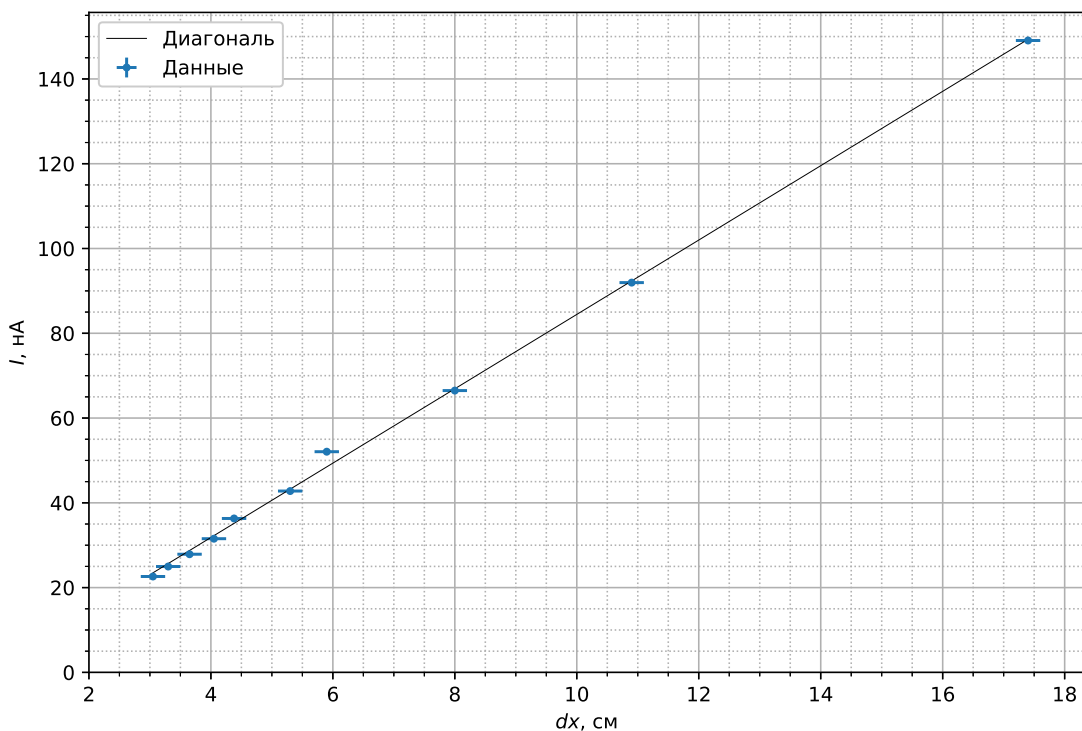


Рис. 5. Зависимость $I(\Delta x)$

В результате получим для прямой $y = ka \cdot x + kb$

$ka = 8.77 \frac{\text{нА}}{\text{см}}$ и $kb = -3.26 \text{ нА}$

А также $\varepsilon_{ka} = 0.01$ и $\varepsilon_{kb} = 0.13$

$$C_I = \frac{I}{\varphi} = 2a \cdot ka \quad (27)$$

Подставляя значение $a = 142.5 \text{ см}$, получим $C_I = 2.5 \frac{\text{нА}}{\frac{\text{мм}}{\text{м}}}$, $\varepsilon_{C_I} = 0.01$

Выполним подготовку к последующим измерениям.

Измерим затухание маятника и получим $\Theta_0 = 0.15$ и $\varepsilon_{\Theta_0} = 0.02$, а также $T_0 = 3.3 \text{ с}$, $\varepsilon_{T_0} = 0.03$

Далее Измерим сопротивление критическое перебором сопротивлений $R_{кр} = 6702 \text{ Ом}$

Затухание колебаний рамки

Таблица 2. Затухание при различных сопротивлениях

$R, \text{ Ом}$	$R1/R2, \text{ Ом}$	$\Delta, \text{ см}$	$\Delta x_{\text{изм}}, \text{ см}$	$\Delta x, \text{ см}$	Θ
22000	0,005	0,2	20,6	20,4	
		-0,2	7,7	7,9	0,95
32000	0,005	0,2	14,5	14,3	
		-0,2	7,1	7,3	0,67
42000	0,005	0,2	11	10,8	
		-0,2	6,1	6,3	0,54
39000	0,005	0,3	11,85	11,55	
		-0,3	6,3	6,6	0,56
49000	0,01	0,3	18,7	18,4	
		-0,3	11,2	11,5	0,47
56000	0,01	0,3	16,4	16,1	
		-0,3	10,3	10,6	0,42
63000	0,1	0,3	20,7	20,4	
		-0,3	13,7	14	0,38
70000	0,1	0,3	18,7	18,4	
		-0,3	12,8	13,1	0,34
22000	0,005	0,3	20,7	20,4	
		-0,3	7,8	8,1	0,92
29000	0,005	0,3	15,8	15,5	
		-0,3	7,2	7,5	0,73

Рассчитаем критические сопротивления

Таблица 3. лл

Θ	$R_{кр}$
0.98	6163
0.71	6829
0.54	6804
0.56	6345
0.47	6745
0.42	6869
0.38	7078
0.34	7089
0.92	5782
0.73	6068

Средним значением будет $R_{кр} = 6537 \text{ Ом}$ и $\varepsilon_{R_{кр}} = 0.06$

И, наконец, баллистический режим

Максимальное отклонение при разомкнутой цепи 20 см , а значит $x_{\text{макс}}^{cg} = 20.76\text{ см}$, тогда максимальное отклонение в критическом режиме будет равно $x_{\text{макс}}^{kp} = 7.64\text{ см}$

Таблица 4. Максимальные отбросы при различных сопротивлениях цепи

R	x
4000	7,4
7310	10,8
15000	13,7
22000	15,9
30000	16,7
37000	17,2
44000	18,5

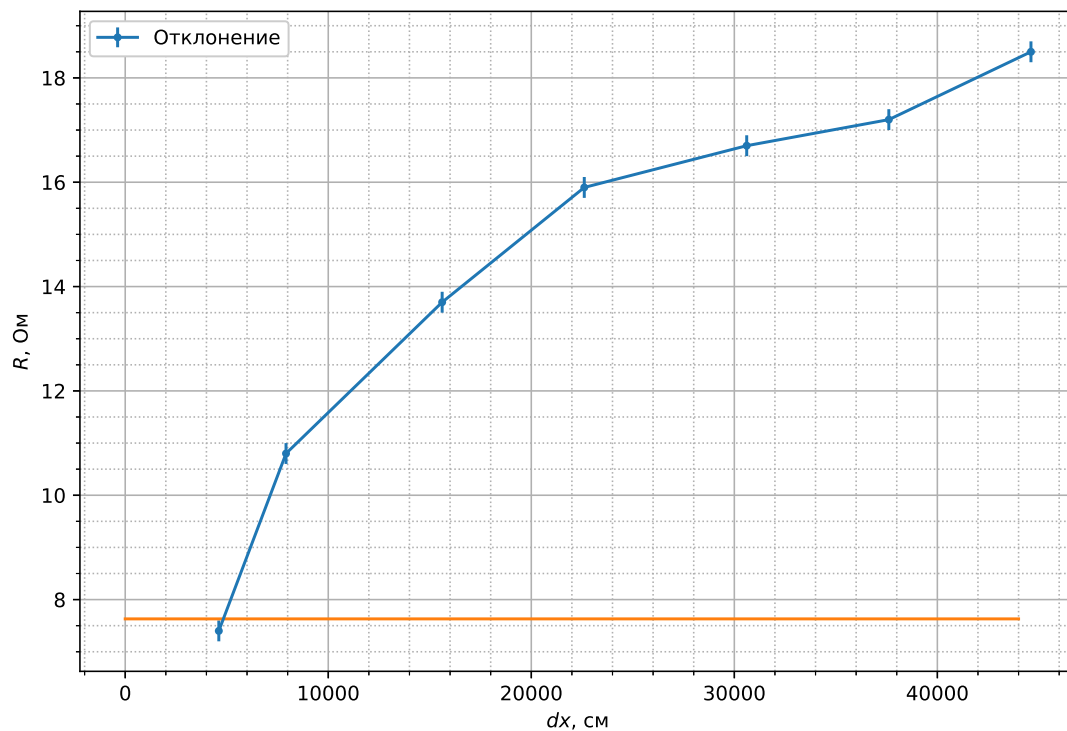


Рис. 6. Зависимость $x(R)$

Используя достаточную линейность и близость вблизи критического сопротивления. Получаем $R_{kp} = 4175\text{ Ом}$. При напряжении $U_0 = 1.2B$, $R_1/R_2 = \frac{1}{70}$ и $C = 2\text{ мкФ}$, получаем $C_q^{kp} = 1.28 \cdot 10^{-6}$

Время релаксации при данных параметрах $\tau = 0.008\text{ с}$, а $T_0 = 3.3\text{ с}$. То есть время релаксации гораздо меньше времени колебаний, а значит можно пренебрегать временем протекания заряда.

5. Обсуждение результатов и выводы

Был изучен принцип работы гальванометра, изучены способы его применения и особенности работы.

Также подтверждена линейная зависимость в динамическом режиме. Найдены баллистическая и динамическая постоянные.

Найдены критические сопротивления для различных режимов работы.