

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа фотоники, электроники и молекулярной физики

# Отчёт о выполнении лабораторной работы

## 3.2.6

Изучение гальванометра

Автор:  
Макаров Лев Евгеньевич  
Б04-306

Долгопрудный 2024

# 1 Введение

## Цель работы:

1. 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

## 2 Теоретические сведения

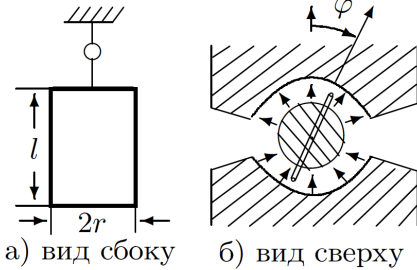


Рис. 1: Рамка

Главной частью высокочувствительного гальванометра магнитоэлектрической системы является подвешенная на вертикальной нити рамка, помещённая в поле постоянного магнита (рис. 1). Вырез цилиндрической формы в полюсах магнита и ферромагнитный цилиндр на оси системы делают поле в зазоре радиальным. Скреплённое с рамкой зеркальце служит для измерения угла поворота рамки. Магнит и подвижная система заключены в защитный кожух.

Запишем основное уравнение колебаний рамки:

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

где введены обозначения:  $2\gamma = \frac{(BSN)^2}{JR_\Sigma}$ ,  $\omega_0^2 = \frac{D}{J}$ ,  $K = \frac{BSN}{J}$ . Эти величины выражены через параметры установки:  $B$  — магнитное поле, в которое помещена рамка,  $I = \frac{\varepsilon}{R_\Sigma}$  — ток, текущий через рамку,  $R_\Sigma$  — сопротивление рамки и цепи,  $N$  — число витков рамки,  $S$  — площадь витка рамки,  $J$  — момент инерции системы,  $D$  — модуль кручения нити.

### 2.1 Стационарный режим

Если через рамку пропускать постоянный ток (достаточно долго, чтобы затухли колебания подвижной системы), то в уравнении (1) можно положить  $\ddot{\phi} = \dot{\phi} = 0$ , и угол поворота определится формулой

$$\phi = \frac{I}{C_I}, \quad C_I = \frac{D}{BSN} = \frac{I}{\phi} \quad (2)$$

где  $C_I$  — динамическая постоянная гальванометра.

## 2.2 Свободные колебания

При отсутствии внешнего источника тока, мы получаем, что левая часть уравнения (1) равна нулю. Это обычное уравнение колебаний, решение и свойства которого рассматривались в курсе механики и прошлой работе 3.2.4., не будем останавливаться на нем подробно, напомним лишь, что в зависимости параметра  $\gamma$  у нас есть колебательный режим, критический режим и случай переуспокоенного гальванометра, причем в последних двух случаях движение аperiodическое.

## 2.3 Баллистический режим

Период свободных колебаний баллистического гальванометра благодаря искусственному увеличению момента инерции рамки оказывается очень большим (порядка десяти секунд). Если пропустить через рамку короткий импульс тока, то можно считать, что весь ток успевает пройти при неотклоненном положении рамки. Рамка, однако, при этом получает толчок, в результате которого возникает движение, описываемое уравнением свободных колебаний при начальных условиях  $\phi(t) = 0, \dot{\phi}(0) = \dot{\phi}_0$ .

Для вычисления скорости  $\dot{\phi}_0$ , полученной в результате толчка, умножим уравнение (1) на  $dt$  и проинтегрируем его по времени от 0 до момента окончания токового импульса  $\tau$ . Пренебрегая малыми вторым и третьим членом в левой части, получаем,

$$\int_0^{\tau} \ddot{\phi} dt = K \int_0^{\tau} I dt \dot{\phi}(\tau) = Kq \quad (3)$$

где  $q$  — полный электрический заряд, прошедший через рамку за время импульса. При этом мы пренебрегаем зарядом индукционного тока.

Величина  $C_Q = \frac{q}{\phi_{max}}$  называется баллистической постоянной гальванометра. Баллистическая постоянная наряду с динамической является важнейшей характеристикой гальванометра, но в отличие от динамической она существенно зависит от режима работы гальванометра (от сопротивления цепи).

Расчёт показывает, что максимальный отброс достигается при полном отсутствии затухания (тормозящий индукционный ток отсутствует при обрыве в цепи):

$$\phi_{max} = \frac{\dot{\phi}(\tau)}{\omega_0} = \frac{Kq}{\omega_0} \quad (4)$$

В этом случае, однако, возникшие в результате отброса колебания рамки не будут успокаиваться, и прибор не скоро сможет быть использован для повторных измерений.

Обычно удобнее всего работать в режиме, близком к критическому:

$$\phi_{max} = \frac{Kq}{\omega_0 e} \quad (5)$$

Таким образом, в критическом режиме максимальное отклонение зайчика в  $e$  раз меньше, чем в режиме свободных колебаний. Отсюда, в частности, следует, что отношение баллистических постоянных

$$\frac{C_Q}{C_Q} = e \quad (6)$$

## 3 Экспериментальная установка

### 3.1 Стационарный ток

В режиме стационарного тока можно легко вычислить ток по формуле

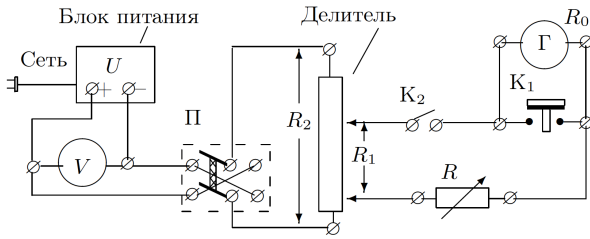
$$I = U_0 \frac{R_1}{R_2} \frac{1}{R + R_0} \quad (7)$$

Координата  $x$  зайчика связана с углом  $\phi$  простым соотношением  $x = a \operatorname{tg} 2\phi$ , и при малых  $\phi = \frac{x}{2a}$ , где  $a$  — расстояние от шкалы до зеркальца.

Отсюда из (2) получаем:

$$C_I = \frac{2aI}{x} \quad (8)$$

### 3.2 Критический режим и свободные колебания



Логарифмический декремент затухания определяется экспериментально по формуле

$$\Theta = \gamma T = \ln \frac{x_k}{x_{k+n}} \quad (9)$$

При этом мы можем выразить декремент как

Рис. 2: Схема установки для первой и второй частей работы

$$\Theta = \gamma T = \frac{2\pi\gamma}{\sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}} = \frac{2\pi R_3}{\sqrt{(R + R_0)^2 - R_3^2}} \quad (10)$$

где  $R_3 = R + R_0$ . Отсюда нетрудно получить формулу:

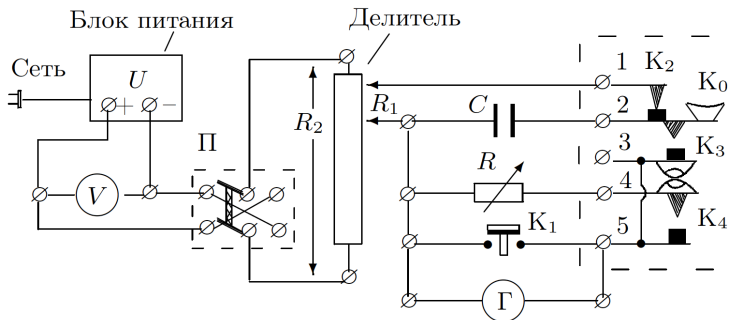
$$\frac{4\pi^2}{\Theta^2} = \frac{(R_0 + R)^2}{(R_0 + R)^2} - 1 \quad (11)$$

Для расчета  $R$  будем использовать следующую формулу:

$$R_{\text{кр}} = \frac{R + R_0}{1 + \frac{4\pi^2}{\Theta^2}} - R_0 = \text{const} \quad (12)$$

Таким образом, отношение  $f(R)$  и  $F(\Theta)$  из физического смысла должно быть постоянным.

### 3.3 Баллистический режим



Заряд конденсатора  $C$  равен

$$q = U_C C = C \frac{R_1}{R_2} U_0 \quad (13)$$

Из решения уравнения колебаний и формулы декремента следует формула

$$l_0 = l_1 e^{\Theta/4} \quad (14)$$

При сопротивлении, равном

Рис. 3: Схема установки для третьей части работы критическому, баллистическая постоянная будет определяться

$$C_Q = \frac{q}{\phi_{\text{max}}} = 2a \frac{R_1}{R_2} \frac{U_0 C}{l_{\text{max}}} \quad (15)$$

## 4 Результаты измерений и обработка данных

### I. Подготовка приборов к работе

1. Настроим осветитель гальванометра так, чтобы на шкале появилась четкая вертикальная риска и положение равновесия совпадало с нулем на шкале.
2. Установим делитель в положение  $R_1/R_2 = 1/2000$ , а сопротивление магазина  $R = 50$  кОм.
3. Соберем схему согласно рис. 2.
4. При разомкнутых ключах К2 и К3 включим в сеть блок питания и замкнем ключ К3.
5. Включим осветитель гальванометра
6. Замкнем ключ К2 и подберем сопротивление магазина, при котором зайчик отклоняется почти на всю шкалу,  $R = 12$  кОм.

### II. Определение динамической постоянной

7. Измерим зависимость отклонения зайчика от сопротивления, увеличивая сопротивление.  $U_0 = 2$  В,  $R_1/R_2 = 1/2000$ ,  $R_0 = 475$  Ом,  $R_2 = 10$  кОм. Результаты измерений запишем в таблицу 1.

Таблица 1: Зависимость  $I(x)$

$N$	$R$ , кОм	$x$ , см	$I$ , мкА
1	12	21.4	2.053
2	14	18.5	2.045
3	16	16.3	2.037
4	18	14.6	2.028
5	20	13.3	2.020
6	22	12.1	2.012
7	24	11.2	2.004
8	26	10.3	1.996
9	28	9.6	1.988
10	30	9.0	1.980

### III. Измерение критического сопротивления

8. Установим значение  $R$ , при котором зайчик отклоняется почти на всю шкалу.
9. Разомкнем ключ К2. Измерим два последовательных колебания в одну сторону и рассчитаем логарифмический декремент затухания  $\theta_0$ :

$$\theta_0 = \ln \frac{x_1}{x_2} = \ln \frac{21.3}{17.0} \approx 0.23$$

10. Измерим период свободных колебаний  $T_0$

$$T_n = 46.05 \text{ с}, n = 9 \implies T_0 = \frac{T_n}{n} \approx 5.12 \text{ с}$$

11. Замкнем ключ К2 и разомкнем ключ К3. Колебания затухают быстрее, так как тормозящий ток увеличился с уменьшением сопротивления.
12. Подберем наибольшее сопротивление  $R$ , при котором при размыкании ключа К3 зайчик не переходит за нулевое значение, оно близко к критическому

$$R_{\text{кр}} \approx 7.7 \text{ кОм}$$

13. Установим сопротивление  $R \approx 3R_{\text{кр}} \approx 23 \text{ кОм}$ . Подберем делитель так, чтобы зайчик отклонялся почти на всю шкалу. Измерим два последовательных затухания и посчитаем логарифмический декремент затухания, а также  $R_{\text{кр}}$ .
14. Повторим измерения предыдущего пункта для нескольких значений  $R$  и результаты измерений запишем в таблицу 2.

Таблица 2: Измерение критического сопротивления

$N$	$R, \text{ кОм}$	$x_1, \text{ см}$	$x_2, \text{ см}$	$\theta$	$R_{\text{кр}}, \text{ Ом}$
1	23	20.7	2.9	1.97	1617
2	28	17.1	3.3	1.65	1329
3	32	15.1	3.5	1.46	1207
4	37	24.6	6.6	1.32	1096
5	42	21.8	6.7	1.18	957
6	46	19.9	6.6	1.10	922
7	54	17.1	6.6	0.95	745
8	62	24	9.2	0.96	938
9	69	21.7	9.6	0.82	681
10	77	19.5	9.4	0.73	556

#### IV. Баллистический режим

15. Соберем схему согласно рис. 3. Установим сопротивление  $R = 50 \text{ кОм}$ .
16. Разомкнем цепь  $R$  и подберем делитель так, чтобы при замыкании ключа К0 первый отброс соответствовал отклонению почти на всю шкалу.  $R_1/R_2 = 1/70$ .
17. Подключим магазин  $R$ . Получим зависимость величины первого отброса от  $R$ . Измерять будем, пока первый отброс не уменьшится в 4 раза, чтобы сохранялся критический режим. Результаты измерений запишем в таблицу 3.

Таблица 3: Зависимость максимального отброса от  $R$

$N$	$R$ , кОм	$x_{max}$ , см
1	50	13.5
2	45	12.9
3	40	13.4
4	35	12.4
5	30	12.6
6	25	11.5
7	20	11.7
8	15	10.5
9	10	9
10	5	6.7
11	4	5.8
12	3	5.2
13	2	4.3
14	1	3.2

18. Запишем положение делителя  $R_1/R_2 = 1/70$  и значение емкости  $C = 2$  мкФ. Измерим расстояние от шкалы до гальванометра  $a = 140$  см.

19. Разберем схему.

## V. Обработка результатов

20. Построим график зависимости  $I(x)$  на рис. 4

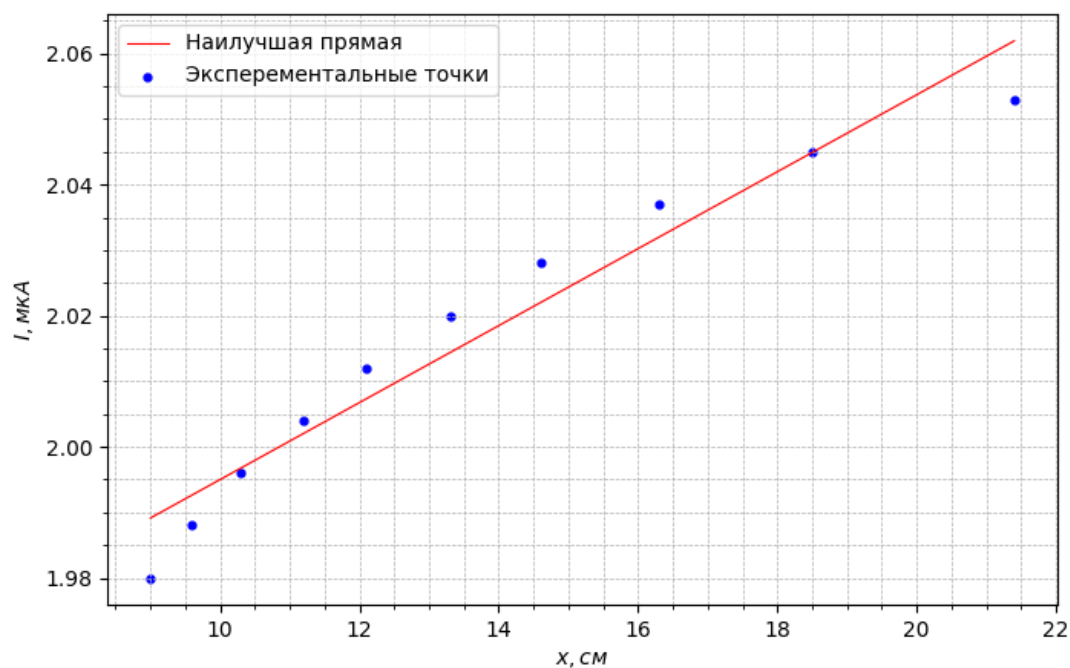


Рис. 4: График зависимости  $I(x)$

Как видно из графика шкала не является линейной.

$$k = (0.0059 \pm 0.0005) \text{ мкА/см} \implies C_l \approx 1.65 \text{ мкА}$$

21. Логарифмический декремент затухания для разомкнутого гальванометра

$$\theta_0 = 0.23$$

22. Рассчитаем значения декрементов затухания  $\theta$  для каждого  $R$  и определим значение  $R_{\text{кр}}$ .  
Результаты в таблице 2.

23. Построим график зависимости  $x_{\text{max}} = f(R + R_0)$  на рис. 5.

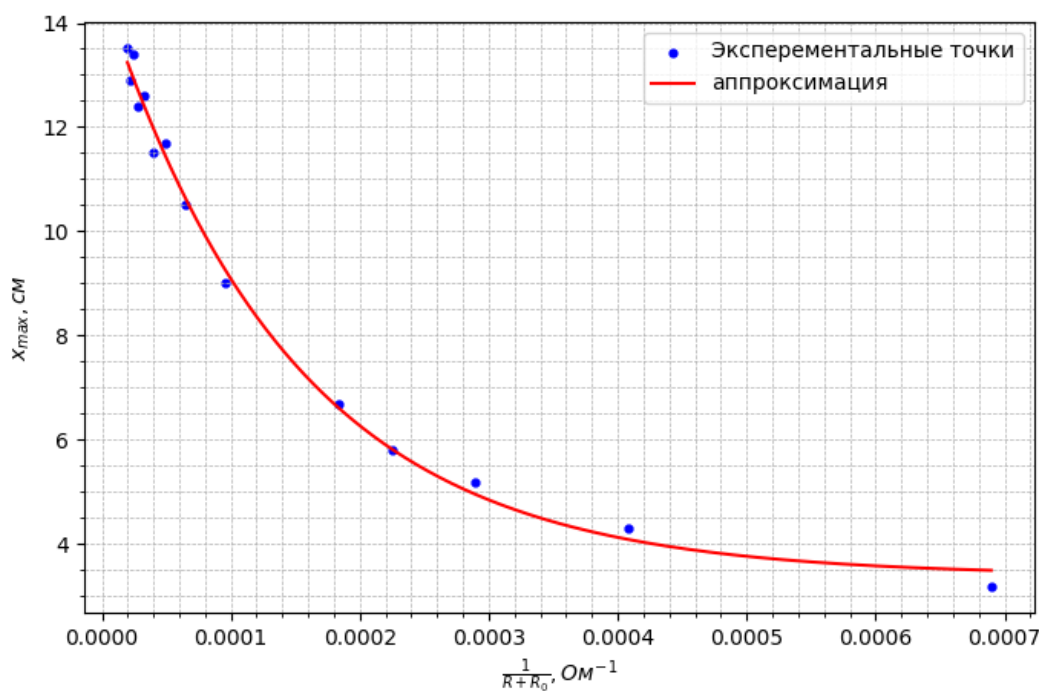


Рис. 5: График зависимости  $x_{\text{max}} = f(R + R_0)$

24. Усредненное значение  $R_{\text{кр}}$  из таблицы приблизительно совпадает с подобранным.

Значение  $l_e = l_0 e^{\theta_0/4} \approx 14.4$  см. Отсюда найдем соответствующую точку на графике и рассчитаем  $R_{\text{кр}} = 5.26$  кОм.

25. Рассчитаем баллистическую постоянную в критическом режиме.

$$C_q = 2a \frac{R_1}{R_2} \frac{U_0 C}{l_e} \approx 1.7 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

26. Сравним время релаксации и период свободных колебаний в гальванометре.

$$\tau = R_0 C \approx 1 \text{ мс} \ll T_0$$