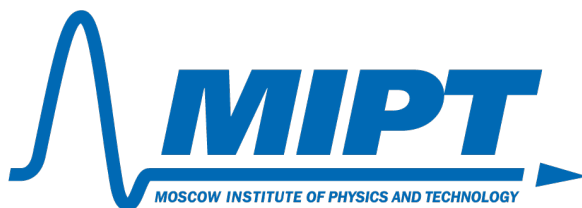


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
ФАКУЛЬТЕТ РАДИОТЕХНИКИ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



Лабораторная работа № 3.2.6  
**Изучение гальванометра**

Осташкин Максим  
Группа Б01-407

Долгопрудный, 2025 г.

# 1 Введение

## 1.1 Цель работы

изучение работы высокочувствительного зеркального гальванометра магнитоэлектрической системы в режимах измерения постоянного тока и электрического заряда.

## 1.2 Аннотация

Рамка, подвешенная на нити, помещена в центр цилиндрического выреза в полюсах магнита.

Поле в зазоре между ферромагнитным цилиндром на оси системы направлено радиально. Полый цилиндр, прикрепленный к рамке служит для увеличения периода колебаний. С рамкой скреплено зеркало, служащее для измерения угла отклонения. Гальванометр работает в баллистическом режиме, если время протекания заряда много меньше периода свободных колебаний, поэтому последний увеличивают до 5 - 15 секунд.

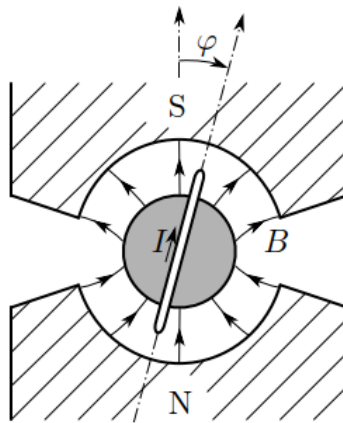


Рис. 1: рамка в магнитном поле

## 1.3 Уравнение движения рамки

На рамку при протекании тока действуют моменты:

1. Момент упругих сил нити

$$M_1 = -D\varphi, \quad (1)$$

где  $D$  - модуль кручения нити.

2. Сил вязкого трения:

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

3. сил ампера:

$$M_3 = 2rlBN I_{\Sigma} = BSNI_{\text{sum}} \quad (3)$$

4. вызванный индукцией (тормозящий):

$$M_3^{\text{инд}} = BSNI_{\text{инд}} = -\frac{(BSN)^2}{R_{\Sigma}}\dot{\varphi} \quad (4)$$

Для расчетов мы пренебрегаем величиной  $M_2$ , так как она много меньше тормозящего момента  $M_3$ .

Вращение рамки:

$$J\ddot{\varphi} = M_{\Sigma} \quad (5)$$

Представим в виде:

$$\ddot{\varphi} + 2\gamma\dot{\varphi} + \omega_0^2 = KI. \quad (6)$$

Связь параметров  $\gamma, \omega_0, K$  с параметрами гальванометра:

$$K = \frac{BNS}{J}, \quad 2\gamma = \beta_{\text{тр}} + \frac{(BSN)^2}{JR_{\Sigma}} \approx \frac{(BSN)^2}{JR_{\Sigma}}, \quad \omega_0^2 = \frac{D}{J}. \quad (7)$$

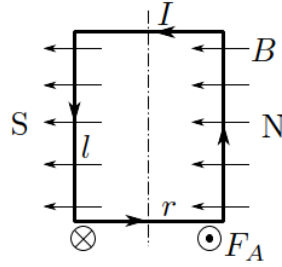


Рис. 2: силы, действующие на рамку в магнитном поле

## 1.4 Режим измерения постоянного тока

Если через рамку пропускать постоянный ток  $I = \text{const}$ , то заменой переменной  $\tilde{\varphi} = \varphi - KI/\omega_0^2$  уравнение (6) приводится к однородному уравнению вида

$$\ddot{U}_C + 2\gamma\dot{U}_C + \omega_0^2 U_C = 0, \quad (8)$$

описывающему свободные затухающие колебания. Если подождать достаточно долго, чтобы собственные колебания затухли, в уравнении (6) можно положить  $\dot{\varphi} = 0$ ,  $\ddot{\varphi} = 0$ , так что угол поворота рамки определится формулами

$$\varphi = \frac{K}{\omega_0^2} I = \frac{BSN}{D} I = S_I I = \frac{I}{C_I}, \quad (9)$$

где величина  $S_I = \varphi/I = BSN/D$  называется чувствительностью гальванометра к току, а обратная ей величина  $C_I = 1/S_I$  — динамической постоянной гальванометра.

## 1.5 Свободные колебания рамки

Введем начальные условия колебания рамки:

$$\varphi(0) = 0, \quad \dot{\varphi} = \dot{\varphi}_0, \quad (10)$$

то есть рамке сообщили начальную угловую скорость без смещения.  
Случаи движения рамки:

1.  $\gamma < \omega_0$  (колебательный режим).

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2} \quad (11)$$

2.  $\gamma = \omega_0$  (критический режим). Этот режим начинается при достижении сопротивления внешнего участка цепи критического значения:

$$R_{\text{кр}} = R_{\Sigma_{\text{кр}}} - R_0 = \frac{(BSN)^2}{2\sqrt{DJ}} - R_0. \quad (12)$$

движение не имеет колебательного характера.

3.  $\gamma > \omega_0$ . Затухание велико, движение аperiodическое.

## 1.6 Режим измерения заряда

Принимая за  $q$  полный электрический заряд, прошедший через рамку гальванометра за время импульса, получим соотношение:

$$\dot{\varphi}(\tau) = Kq \quad (13)$$

Величина  $C_q = q/\varphi_{\text{max}}$  называется баллистической постоянной гальванометра. Она характеризует режим работы гальванометра. Максимальный отброс достигается при полном отсутствии затухания:

$$\varphi_{\text{max}}^{\text{св}} = \frac{\dot{\varphi}(\tau)}{\omega_0} = \frac{Kq}{\omega_0} \quad (14)$$

Однако, в таком случае система не будет успевать релаксировать и прибор сможет быть использован лишь единожды. Поэтому удобно работать в режиме, близком к критическому:

$$\varphi_{\text{max}}^{\text{кр}} = \frac{Kq}{\omega_0 e} \quad (15)$$

## 2 Определение динамической постоянной гальванометра

### 2.1 Экспериментальная установка

При  $R_1 \ll R, R_0, R_2$  сила тока, протекающего через гальванометр может быть вычислена как:

$$I = \frac{R_1}{R_2} \frac{U_0}{R + R_0}, \quad (16)$$

где  $U_0$  - показания вольтметра,  $R_0$  - внутреннее сопротивление гальванометра. угол отклонения рамки связан с перемещением зайчика по шкале следующим соотношением:

$$x = a \arctg(2\varphi). \quad (17)$$

При малых углах можно считать, что  $\varphi = x/2a$ . Динамическую постоянную гальванометра

$$C_I = \frac{I}{\varphi} = \frac{2aI}{x}, \quad (18)$$

как правило, выражают в единицах  $[\frac{A}{mm/M}]$ .

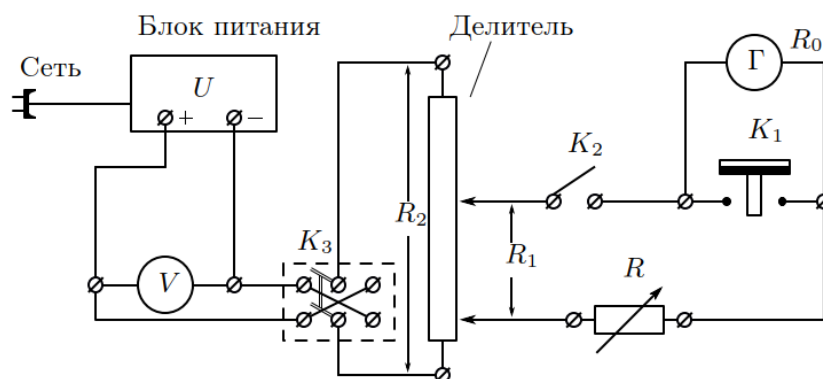


Рис. 3: Схема установки для работы гальванометра в стационарном режиме

## 2.2 Измерения

|                     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $R$                 | 20   | 23   | 26   | 29   | 32   | 35   | 38   | 41   | 44   | 47   | 50   |
| $x$                 | 23,5 | 20,5 | 18,3 | 16,5 | 15   | 13,7 | 12,6 | 11,7 | 10,9 | 10,1 | 9,4  |
| $\varepsilon_x, \%$ | 0.04 | 0.05 | 0.05 | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.10 | 0.11 |

Таблица 1: Зависимость отклонения зайчика  $x$  от сопротивления магазина  $R$

постоянные установки:

$$U_0 = 1,32$$

$$R_2 = 10$$

$$R_0 = 500$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{1000}$$

## 2.3 Обработка результатов

Посчитаем силу тока  $I$  по формуле:

$$I = \frac{R_1}{R_2} \frac{U_0}{R + R_0}. \quad (19)$$

получим значения для токов, а погрешности посчитаем по формуле:

$$\varepsilon_I = \sqrt{\varepsilon_R^2 + \varepsilon_{U_0}^2} \quad (20)$$

. Результаты вычислений представлены в таблице ниже:

Построим график зависимости  $I(x)$ , по которому определим угол наклона, из которого вычислим динамическую постоянную  $C_I = 2ak$ , где  $a = 1.16 \pm 0.05$  - расстояние от зеркальца гальванометра до шкалы.

|                                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $R$                                | 20   | 23   | 26   | 29   | 32   | 35   | 38   | 41   | 44   | 47   | 50   |
| $I \cdot 10^{-8} \text{ A}$        | 6.44 | 5.62 | 4.98 | 4.47 | 4.06 | 3.72 | 3.43 | 3.18 | 2.97 | 2.78 | 2.61 |
| $\sigma_I \cdot 10^{-8} \text{ A}$ | 0.05 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| $\varepsilon_I, \%$                | 0.78 | 0.71 | 0.80 | 0.67 | 0.74 | 0.81 | 0.87 | 0.63 | 0.67 | 0.72 | 0.77 |

Таблица 2: Зависимость силы тока  $I$  от сопротивления магазина  $R$

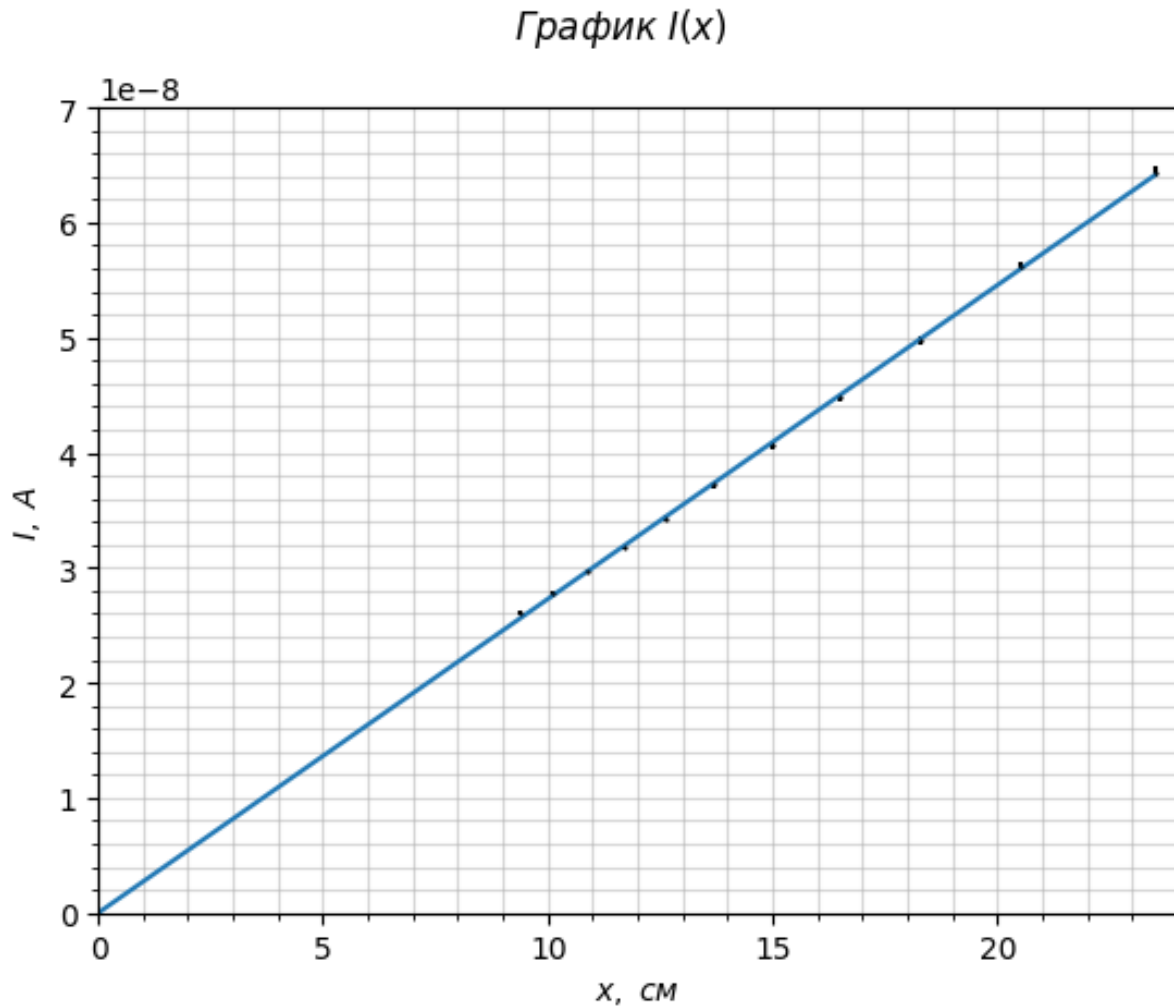


Рис. 4: график зависимости  $I(x)$ , аппроксимированный прямой с коэффициентом наклона

$$k = (2.73 \pm 0.02) \cdot 10^{-9} \cdot \frac{\text{A}}{\text{мм}}$$

$$\varepsilon_{C_I} = \varepsilon_{S_I} = \sqrt{\varepsilon_a^2 + \varepsilon_k^2} = \sqrt{0.043^2 + 0.007^2} = 0.0476$$

Итак,

$$C_I = (6.3 \pm 0.3) \cdot 10^{-10} \text{ A}/(\text{мм}/\text{м})$$

$$S_I = \frac{1}{C_I} = (1.58 \pm 0.07) \cdot 10^9 (\text{мм}/\text{м})/\text{A}$$

### 3 Определение критического сопротивления гальванометра

#### 3.1 Экспериментальная установка

Схема остается той же, что и при определении динамической постоянной. Изменяя зависимость логарифмического декремента затухания от сопротивления внешней цепи  $R$ , и используя формулу (12) можно выразить  $R_{кр}$  соотношением:

$$R_{кр} = \frac{R + R_0}{\sqrt{\left(\frac{2\pi}{\theta}\right)^2 + 1}} - R_0 \quad (21)$$

#### 3.2 Измерения

Измерим 2 последовательных отклонения зайчика при разомкнутом контуре:  
 $x_n = 23,5$  ,  $x_{n+1} = 19,0$

Логарифмический декремент  $\Theta_0 = \frac{1}{1} \left( \ln \frac{x_n}{x_{n+1}} \right)_i = 0,21$

Измерим период колебаний:

$$T_0 = 5с$$

$$\sigma_{T_0}^{случ} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n(n-1)}} = 0.107с$$

Итак,  $T_0 = 5.0 \pm 0.1с$

Подберем наибольшее сопротивление магазина, при котором при размыкании ключа зайчик не переходит за нулевое значение. Оно близко к  $R_{кр}$ :

$$R = 7,5кОм$$

Теперь для расчёта  $\Theta$  проведём измерение отклонений зайчика после размыкания ключа , увеличивая  $R$  магазина от примерно  $3R$  до  $10R$ . Подсчитаем при этом логарифмический декремент. Результаты сведём в таблицу 3:

| $N$ | $R$ , кОм | $x_n$ , см | $x_{n+1}$ , см | $\Theta$ | $R$ , кОм |
|-----|-----------|------------|----------------|----------|-----------|
| 3   | 22        | 21,1       | 15,8           | 2,13     | 1/1000    |
| 4   | 28        | 15,8       | 3,2            | 1,59     | 1/1000    |
| 5   | 37        | 20,7       | 5,1            | 1,4      | 1/500     |
| 6   | 45        | 17,2       | 5,4            | 1,15     | 1/500     |
| 7   | 52        | 15         | 5,3            | 1,04     | 1/500     |
| 8   | 60        | 13,1       | 7,3            | 0,96     | 1/300     |
| 9   | 67        | 17,3       | 7,2            | 0,87     | 1/300     |
| 10  | 75        | 21,8       | 9,2            | 0,86     | 1/200     |

Таблица 3: Результаты измерений при свободных колебаниях

### 3.3 Обработка результатов

$R_{кр}$  определяется из соотношения (21) определим мы его по= углу наклона графика зависимости величины  $\gamma$  от  $R$ :

$$\gamma = \sqrt{\frac{4\pi^2}{\theta^2} + 1} = \frac{R + R_0}{R_{кр} + R_0} \quad (22)$$

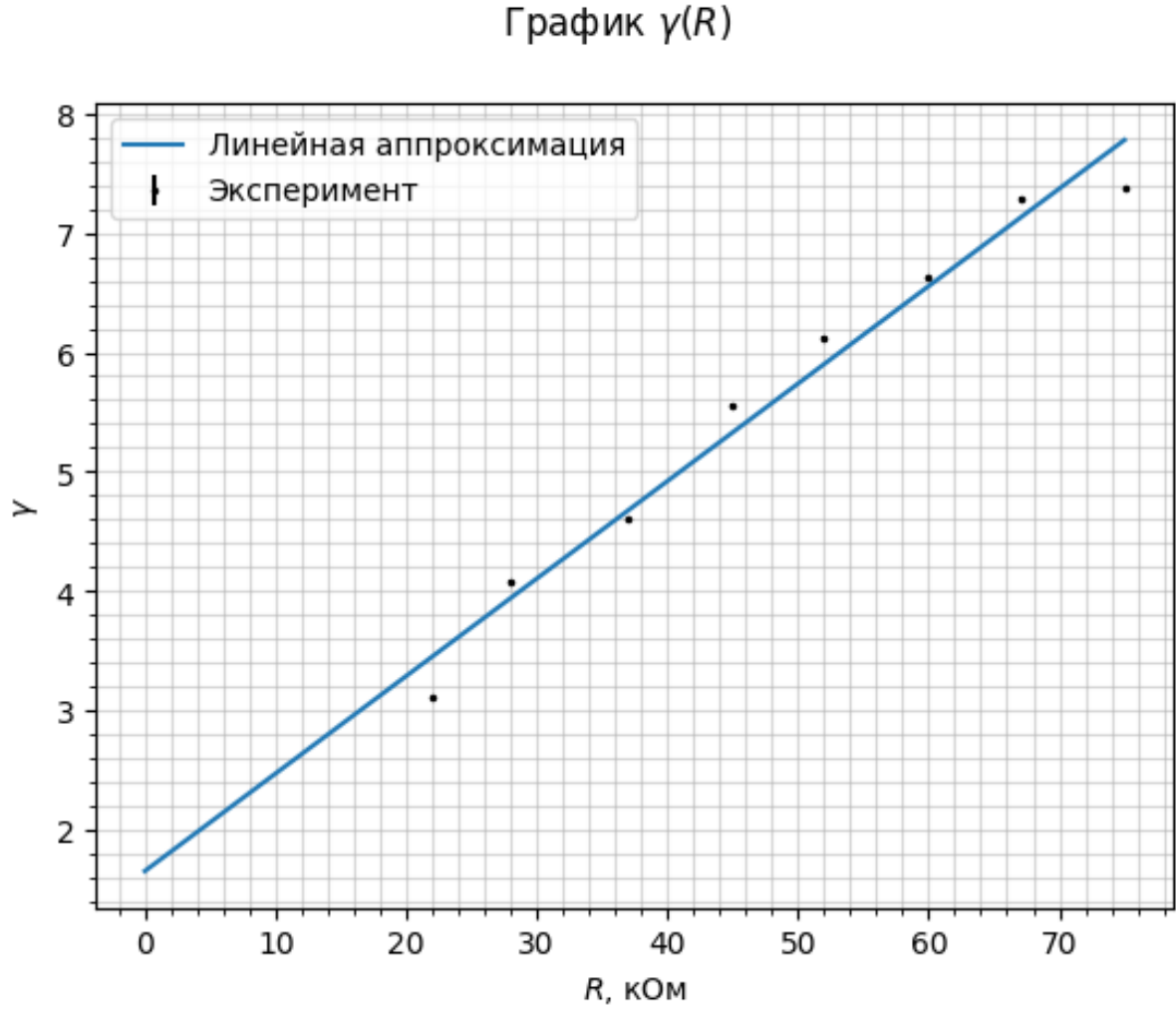


Рис. 5: График зависимости  $\sqrt{\frac{4\pi^2}{\theta^2} + 1}$  от  $R$

Коэффициент наклона графика  $k = 0.082 \pm 0.005 \frac{1}{\text{КОМ}}$ .

$$\varepsilon_{R_{кр}} = \varepsilon_k / k$$

Из этого получаем:

$$R_{кр} = 1/k - R_0 = 11.741 \pm 0.009 \text{ КОМ}$$



## 4 Определение баллистической постоянной и критического сопротивления гальванометра, работающего в баллистическом режиме

### 4.1 Экспериментальная установка

В баллистическом режиме работы гальванометра используется схема:

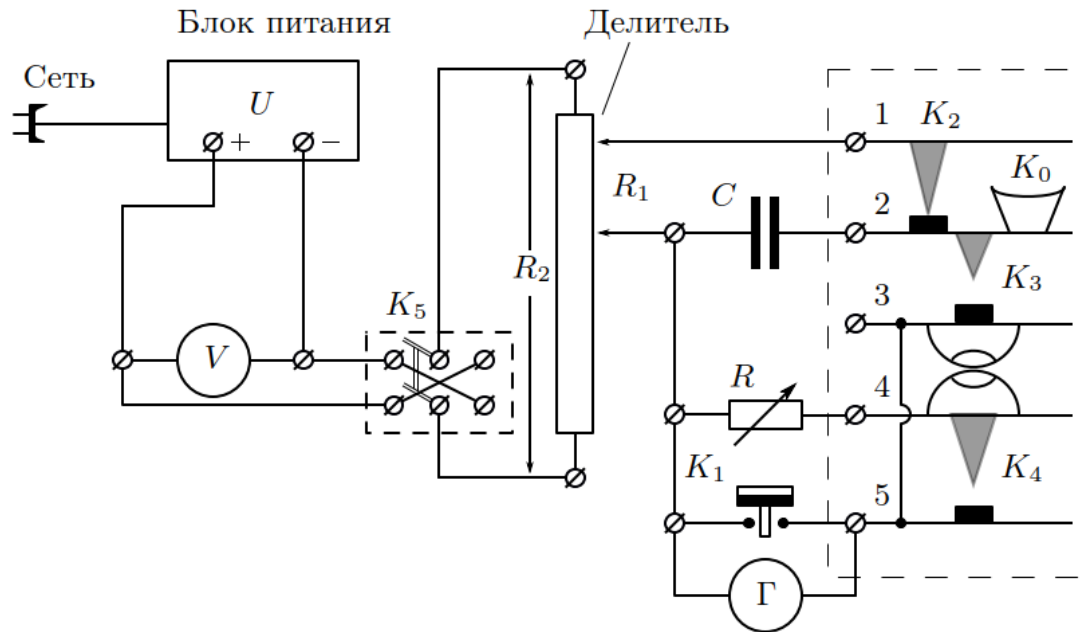


Рис. 6: Схема установки для определения баллистической постоянной

$K_2$  - замкнут,  $K_3$  и  $K_4$  - разомкнуты. Конденсатор заряжается до напряжения  $U_c = \frac{R_1}{R_2} U_0$  и получает заряд  $q = CU_c = \frac{R_1}{R_2} U_0 C$ . При нажатии на ключ  $K_0$  конденсатор отключается от источника ( $K_2$ ) и подключается к гальванометру ( $K_3$ ). Емкость конденсатора подобрана так, что к моменту замыкания  $K_4$  заряд успевает пройти через гальванометр, и далее колебания начинаются при нулевом отклонении и с начальной угловой скоростью.

Максимальное отклонение рамки меньше идеального по причине сопротивления ее движению, однако его можно приближенно рассчитать по формуле:

$$\varphi_{\max}^{\text{св}} = \varphi_0 e^{\theta_0/4} \approx \varphi_0 \left(1 + \frac{\theta_0}{4}\right). \quad (23)$$

Баллистическая постоянная гальванометра:

$$C_q^{\text{кр}} = \frac{q}{\varphi_{\max}^{\text{кр}}} = 2a \frac{R_1}{R_2} \frac{CU_0}{x_{\max}^{\text{кр}}} \quad (24)$$

где  $x_{\max}^{\text{кр}}$  - величина первого отброса в мм,  $a$  - расстояние от зеркала до шкалы (в м),  $CU_0$  - заряд, в кулонах.

### 4.2 Измерения

Теперь соберем схему согласно рис.6. Емкость конденсатора  $C = 2$  мкФ. Установив делитель на положение 1/40, найдем такое первое отклонение зайчика после

замыкания  $K_0$ , при котором он занимает всю шкалу:

$$l_0 = 24.4 \pm 0.1 \text{ см}$$

|                 |      |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |     |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $R$ , кОм       | 50.0 | 40.0 | 30.0 | 20.0 | 15.0 | 10.0 | 7.5 | 5.0 | 4.0 | 3.0 | 2.5 | 1.0 |
| $l_{\max}$ , см | 16.0 | 15.6 | 14.6 | 13.2 | 12.0 | 10.4 | 9.1 | 7.4 | 6.6 | 5.6 | 5.1 | 4.6 |

Таблица 4: зависимость максимального отклонения от сопротивления

### 4.3 Обработка результатов

Построим график зависимости отклонений гальванометра от суммарного сопротивления  $x_{\max} = f(R + R_0)$ .

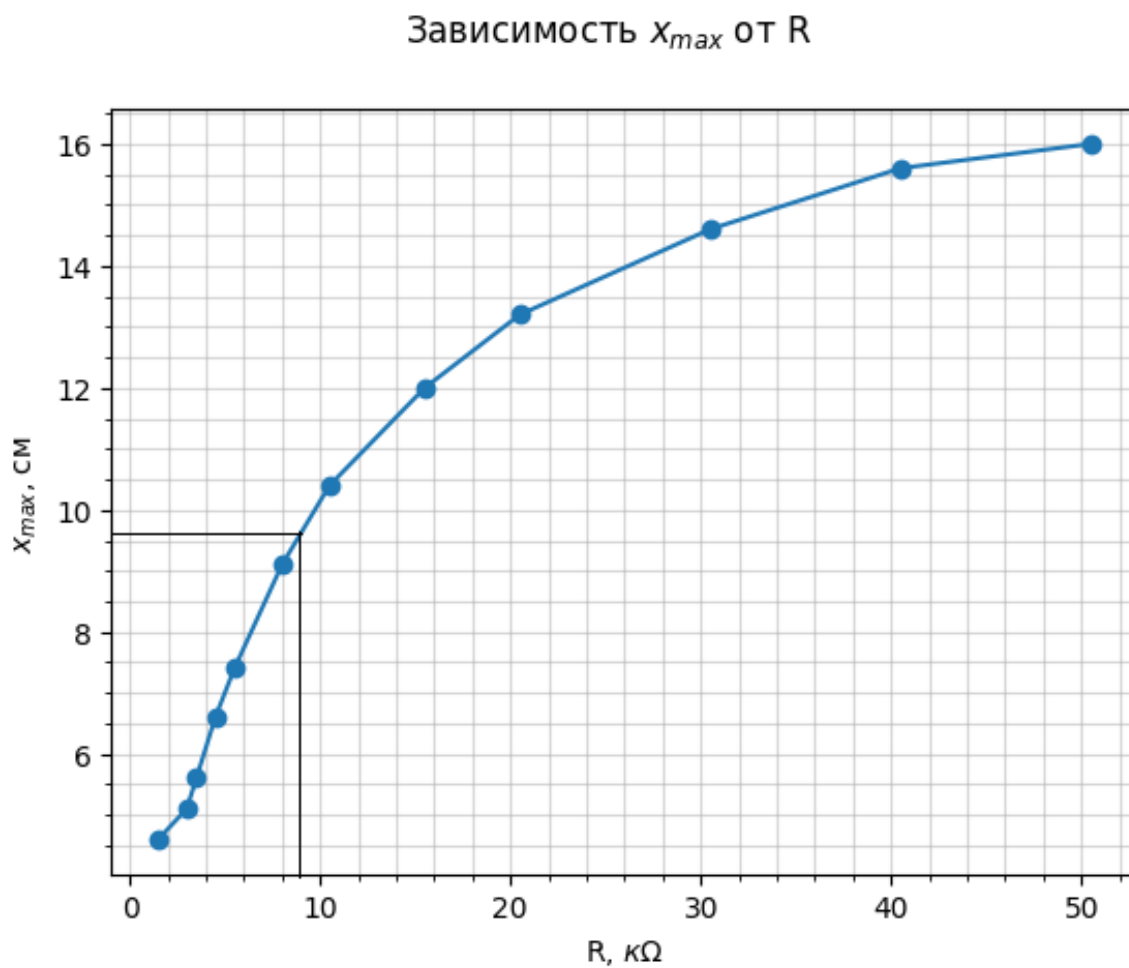


Рис. 7: график зависимости  $x_{\max} = f(R + R_0)$

Найдем максимальное  $l_{\max}$  с учетом поправки на неидеальность гальванометра:

$$\varepsilon_{l_{\max}} = \sqrt{\varepsilon_{l_0}^2 + \left( \frac{\Delta\theta_0}{4(1 + \frac{\theta_0}{4})} \right)^2}$$

$$l_{\max} = l_0 \cdot (1 + \theta_0/4) = 25.4 \pm 0.2 \text{ см}$$

По графику определим критическое сопротивление гальванометра:

$$l_{кр} = l_{max}/e = 9.40 \pm 0.06 \text{ см}$$

$$R_{кр} = 9 \text{ кОм}$$

Сравним значения  $R_{кр}$ , определенные подбором, по результатам для стационарного режима и по результатам для баллистического режима:

Рассчитаем баллистическую постоянную в критическом режиме  $C_q^{кр}[\frac{\text{Кл}}{\text{мм/м}}]$ :

$$\sigma_{C_{кр}} = C_{кр} \cdot \sqrt{\varepsilon_a^2 + \varepsilon_{U_0}^2 + \varepsilon_x^2} = C_{кр} \cdot \sqrt{0.043^2 + 0.008^2 + 0.006^2} = 3.177 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{\text{А}}{\text{мм/м}}$$

$$C_q^{кр} = (1.628 \pm 0.003) \cdot 10^{-9} \cdot \frac{\text{А}}{\text{мм/м}}$$

Сравним период свободных колебаний гальванометра  $T_0$  и во время релаксации  $\tau = R_0 C$ :

$$\tau = (1 \pm 0.01) \cdot 10^{-3} \text{ с} \ll T_0 = 5.0 \pm 0.1 \text{ с}$$

Время релаксации много меньше периода свободных колебаний.

## 5 Вывод

В ходе работы были измерены такие характеристики гальванометра как баллистическая и динамическая постоянные.

$$C_I = (0.63 \pm 0.03) \text{ нА/(мм/м)}$$

$$C_{Q_{cr}} = (4.494 \pm 0.007) \cdot 10^{-12} \text{ К/(мм/м)}$$

Критическое сопротивление гальванометра было измерено тремя разными способами. Результаты этих измерение отражены в таблице:

| Метод          | Подбор | По графику в стационарном режиме | По графику в баллистическом режиме |
|----------------|--------|----------------------------------|------------------------------------|
| $R_{cr}$ , кОм | 7.5    | $11.741 \pm 0.009$               | $9.0 \pm 0.5$                      |

Таблица 5: Значения  $R_{кр}$