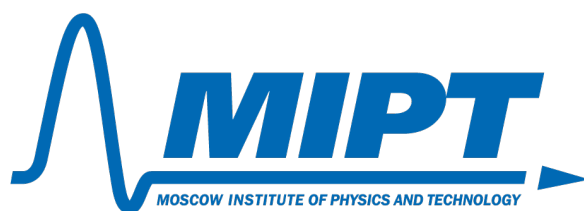


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
ФАКУЛЬТЕТ РАДИОТЕХНИКИ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



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.

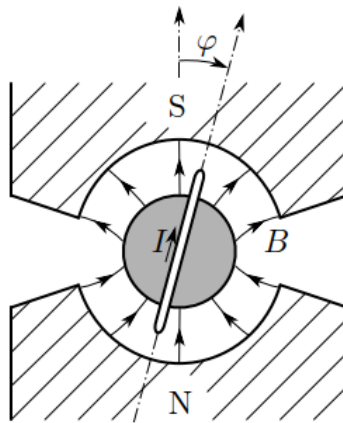


Рис. 1: рамка в магнитном поле

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:

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

4. вызванный индукцией (тормозящий):

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

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 γ, ω_0, K с параметрами гальванометра:

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

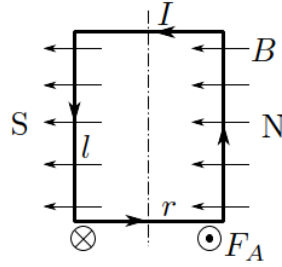


Рис. 2: силы, действующие на рамку в магнитном поле

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.

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:

$$I = \frac{R_1}{R_2} \frac{U_0}{R + R_0}, \quad (13)$$

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

$$x = a \operatorname{arctg}(2\varphi). \quad (14)$$

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

$$C_I = \frac{I}{\varphi} = \frac{2aI}{x}, \quad (15)$$

как правило, выражают в единицах $[\frac{\text{А}}{\text{мм/м}}]$.

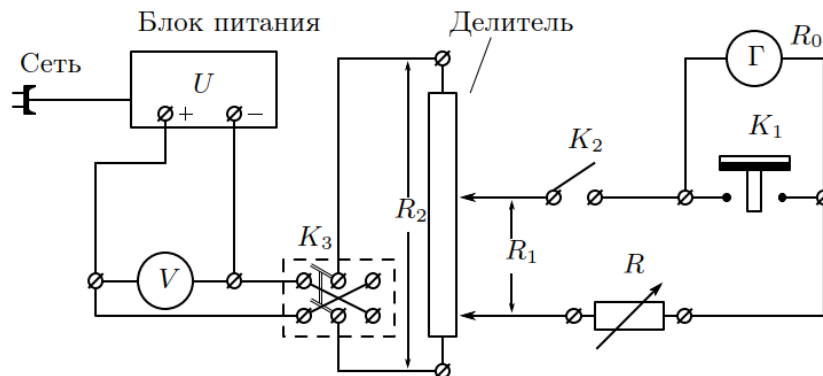


Рис. 3: Схема установки для работы гальванометра в стационарном режиме

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:

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

получим значения для токов, а погрешности посчитаем по формуле:

$$\varepsilon_I = \sqrt{\varepsilon_R^2 + \varepsilon_{U_0}^2} \quad (17)$$

. Результаты вычислений представлены в таблице ниже:

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

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.

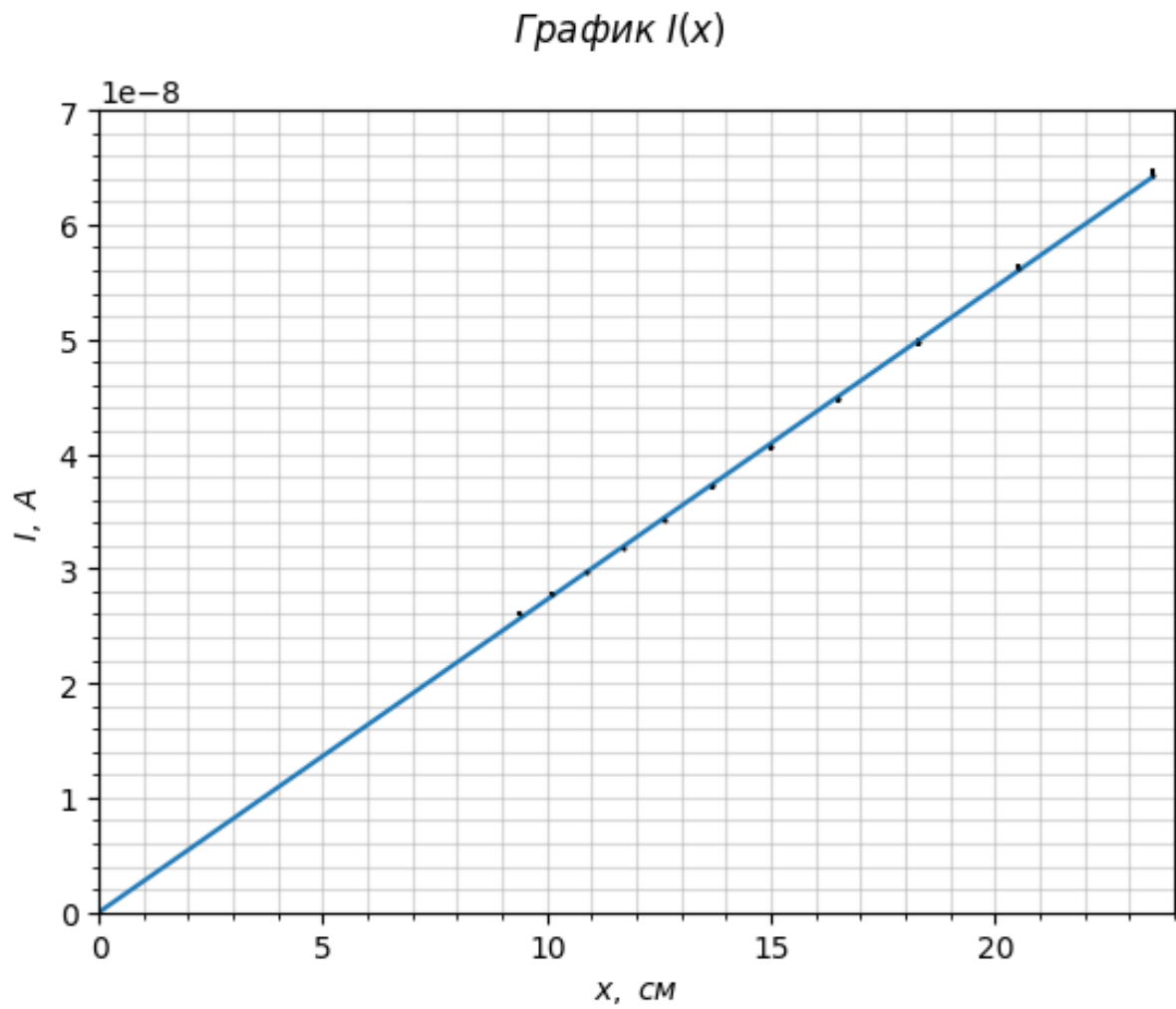


Рис. 4: график зависимости $I(x)$, аппроксимированный прямой с углом наклона $k = (2.73 \pm 0.017) \cdot 10^{-9}$

Итак,

$$C_I = (6.3 \pm 0.3) \cdot 10^{-12}$$

$$S_I = \frac{1}{C_I} = (1.6 \pm 0.7) \cdot 10^{11}$$

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:

$$R_{кр} = \frac{R + R_0}{\sqrt{\left(\frac{2\pi}{\theta}\right)^2 + 1}} - R_0 \quad (18)$$

3.2 Измерения

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

$$\text{Логарифмический декремент } \Theta_0 = \frac{1}{1} \sum_1^3 \left(\ln \frac{x_n}{x_{n+1}} \right)_i = 0,21$$

Измерим период колебаний:

$$T_0 = 5$$

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

Итак, $T_0 = 5.0 \pm 0.1c$

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

$$R = 7,5$$

Теперь для расчёта Θ 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	Θ	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 (18) определим мы его по= углу наклона графика зависимости величины γ от R :

$$\gamma = \sqrt{\frac{4\pi^2}{\theta^2} + 1} = \frac{R + R_0}{R_{кр} + R_0} \quad (19)$$

График $\gamma(R)$

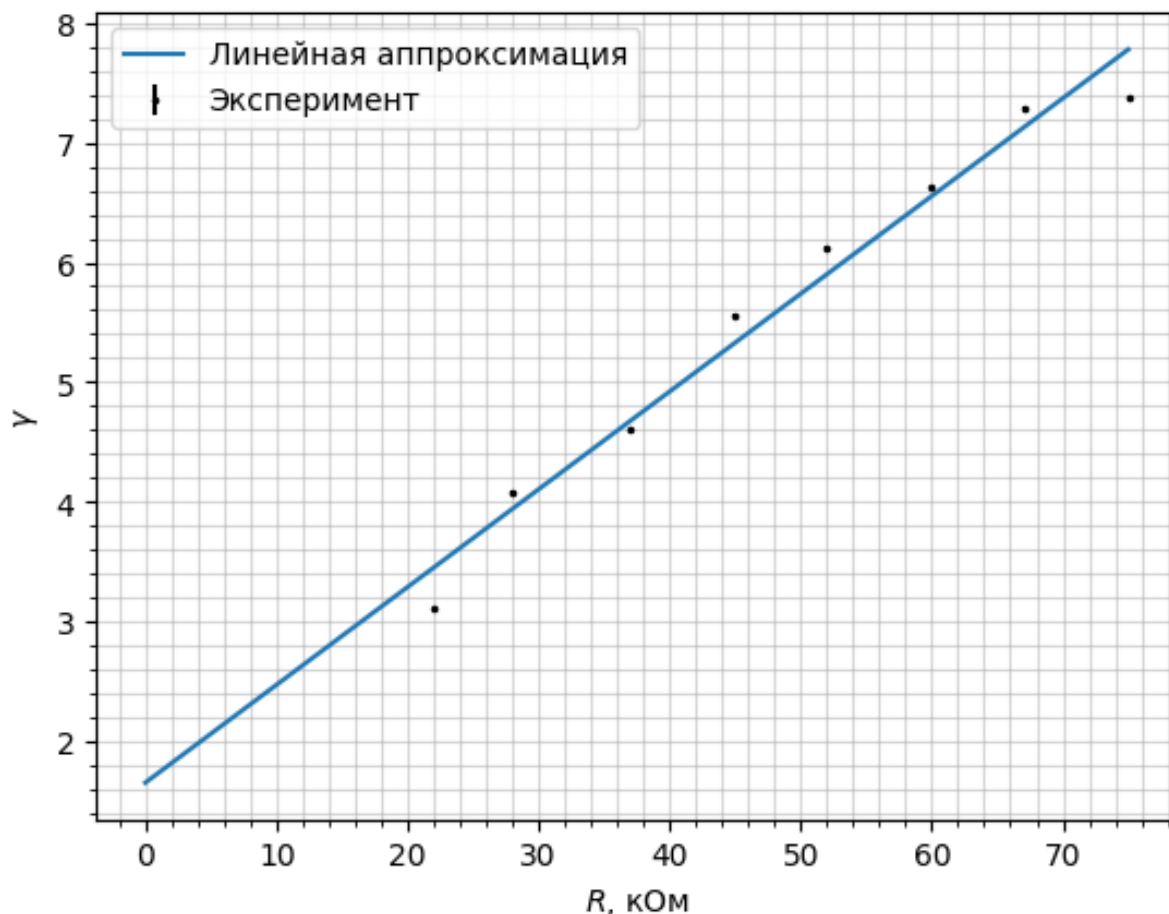


Рис. 5: График зависимости $\sqrt{\frac{4\pi^2}{\theta^2} + 1}$ от R

Коэффициент наклона графика $k = 0.082 \pm 0.005 \frac{1}{\text{кОм}}$.
Из этого получаем:

$$R_{кр} = 1/k - R_0 = 11.74 \pm 0.71$$

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

4.1 Экспериментальная установка

В баллистическом режиме работы гальванометра используется схема:

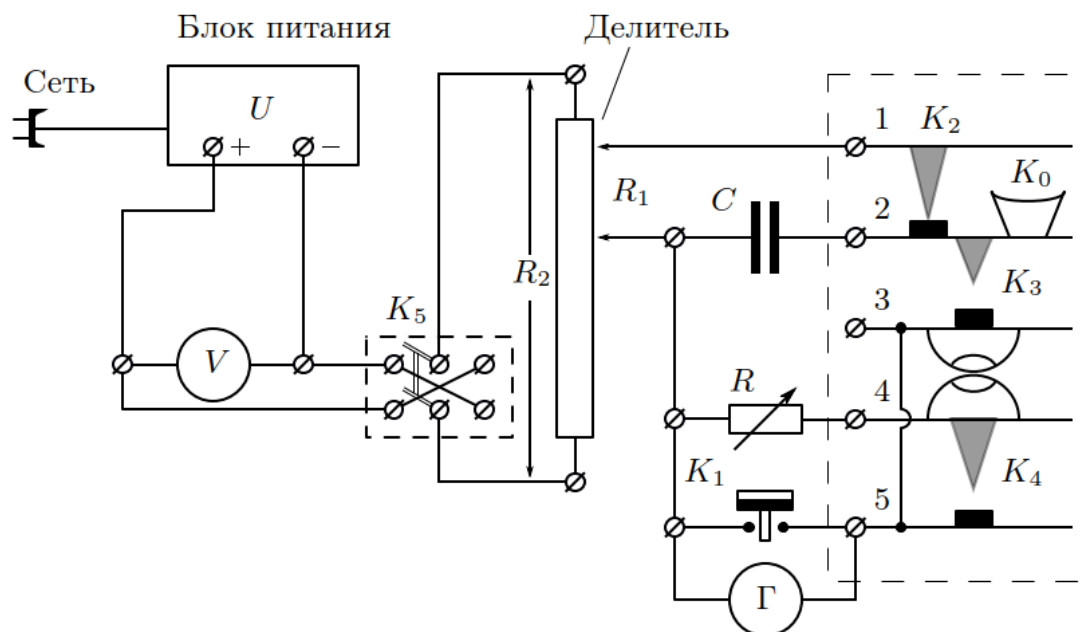


Рис. 6: Схема установки для определения баллистической постоянной

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:

$$\varphi_{max}^{cb} = \varphi_0 e^{\theta_0/4} \approx \varphi_0 \left(1 + \frac{\theta_0}{4}\right). \quad (20)$$

Баллистическая постоянная гальванометра:

$$C_q^{кр} = \frac{q}{\varphi_{max}^{кр}} = 2a \frac{R_1}{R_2} \frac{CU_0}{x_{max}^{кр}} \quad (21)$$

где $x_{max}^{кр}$ - 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.???. 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:

$$l_0 = 26.0 \pm 0.1 \text{ см}$$

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 $x_{max} = f(R + R_0)$.

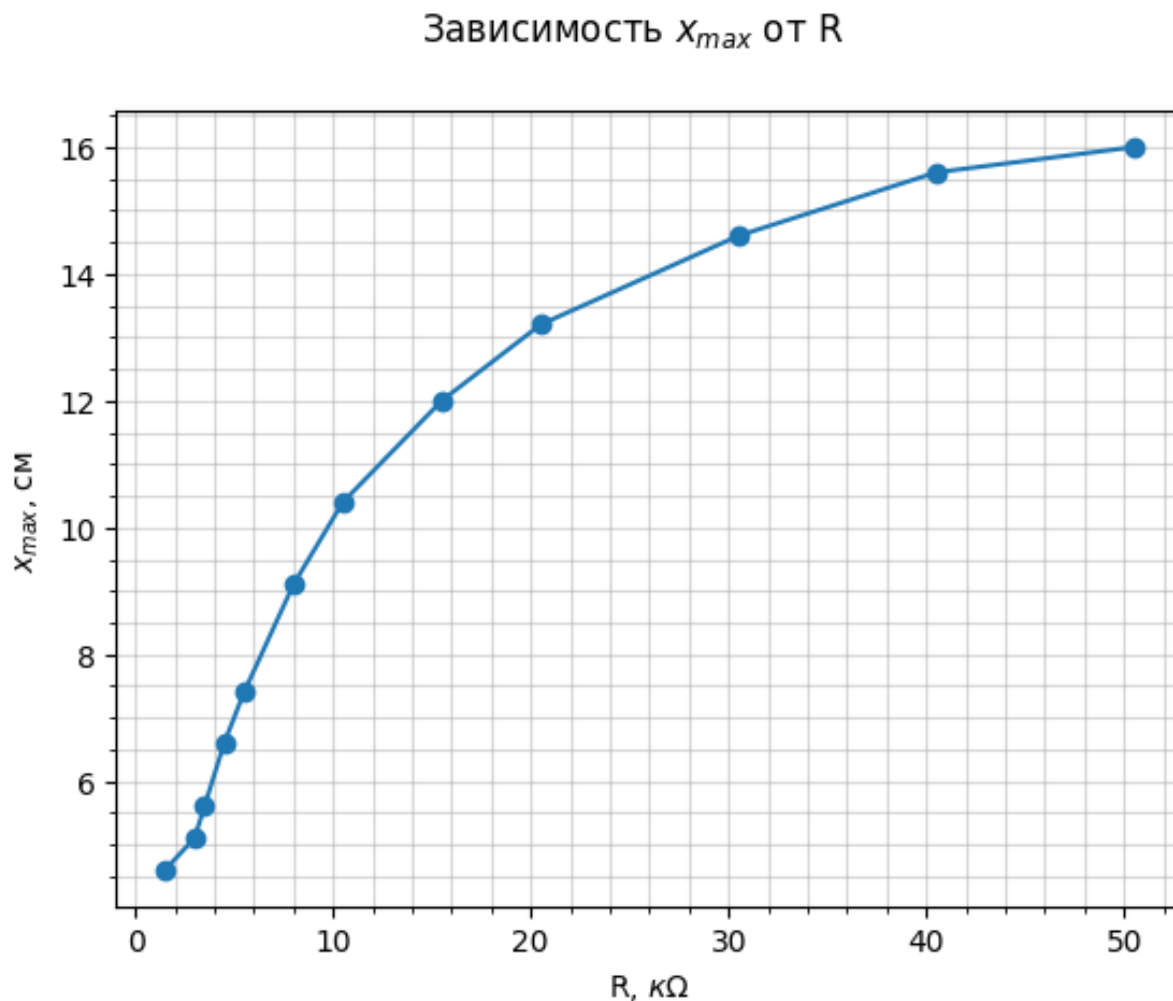


Рис. 7: график зависимости $x_{max} = f(R + R_0)$

По графику определим критическое сопротивление гальванометра:

$$l_{кр} = l_{max}/e = 9.6 \pm 0.06 \text{ см}$$

$$R_{кр} = 9 \text{ кОм}$$

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

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

$$C_q^{кр} = (4.494 \pm 0.007) \cdot 10^{-12}$$

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

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

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 измерения отражены в таблице:

Метод	Подбор	По графику в стационарном режиме	По графику в баллистическом режиме
R_{cr} , кОм	7.5	11.7 ± 0.7	9.0 ± 0.5

Таблица 5: Значения $R_{кр}$