

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа радиотехники и компьютерных технологий

## Лабораторная работа 3.2.6

### Изучение гальванометра

Автор:  
Черниенко Владислав Антонович  
Группа Б01-110

**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.

## Теоретические сведения

*Баллистическим гальванометром* называют электроизмерительный прибор магнитоэлектрической системы, отличающийся высокой чувствительностью к току и сравнительно большим периодом колебаний подвижной системы (рамки).

### А. Определение динамической постоянной гальванометра

#### Экспериментальная установка

Схема для исследования гальванометра в стационарном режиме представлена на рис. 1. Постоянное напряжение  $U$  снимается с блока питания и измеряется вольтметром  $V$ . Ключ  $K_3$  позволяет менять направление тока через гальванометр  $\Gamma$ , делитель напряжения — менять величину тока в широких пределах. Ключ  $K_2$  служит для включения гальванометра, кнопка  $K_1$  — для его успокоения. Магазин сопротивлений  $R$  позволяет менять режим работы гальванометра от колебательного до апериодического.

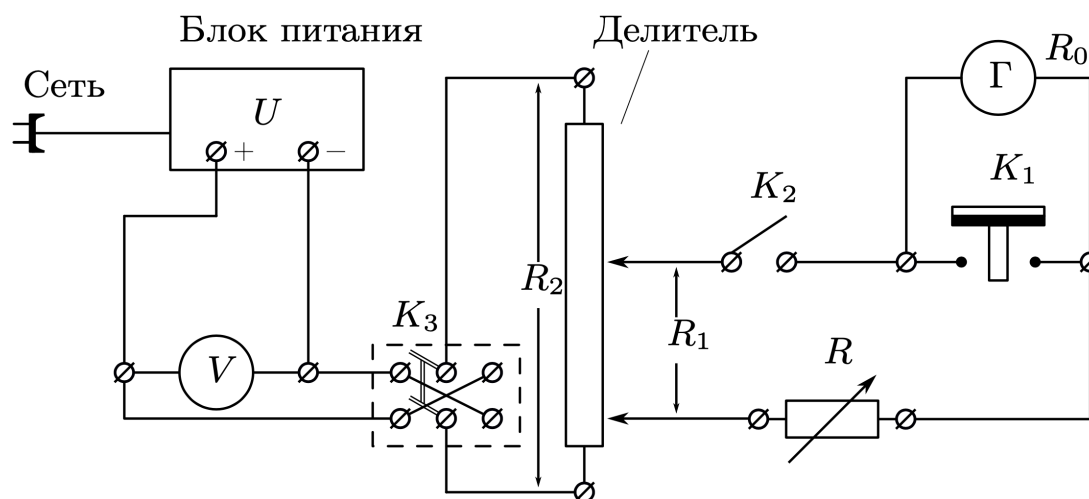


Рис. 1: Схема установки для работы гальванометра в стационарном режиме

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

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

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, зеркала, укрепленного на рамке, и шкалы, на которую отбрасывается луч света от зеркала. Координата  $x$  светового пятна на шкале связана с углом  $\varphi$  отклонения рамки формулой

$$x = a \operatorname{arctg}(2\varphi),$$

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

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

как правило, выражают в единицах  $\left[ \frac{\text{А}}{\text{мм/м}} \right]$  (ток  $I$  измеряется в амперах,  $x$  – в миллиметрах,  $a$  – в метрах).

## Б. Определение критического сопротивления гальванометра

Критическим сопротивлением баллистического гальванометра называется сопротивление его электрической цепи  $R_{\text{кр}}$ , при котором после начального толчка подвижная система почти экспоненциально возвращается к нулю. На практике критический режим, требующий строгого выполнения условия  $\gamma = \omega_0$ , не может быть точно реализован и имеет значение как пограничный между режимом затухающих колебаний ( $\gamma < \omega_0$ ) и режимом аperiodического затухания ( $\gamma > \omega_0$ ).

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

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

В качестве характеристики процесса затухания колебаний рамки гальванометра воспользуемся представленным формулой логарифмическим декрементом затухания:

$$\Theta = \gamma T_1 = \ln \frac{x_n}{x_{n+1}}, \quad (3)$$

где  $x_n$  и  $x_{n+1}$  — два последовательные отклонения колеблющейся величины в одну сторону. Измеряя зависимость  $\Theta(R)$  логарифмического декремента затухания от сопротивления внешней цепи  $R$ , можно найти критическое сопротивление  $R_{\text{кр}}$

$$R_{\text{кр}} = \frac{R + R_0}{\sqrt{\left(\frac{2\pi}{\Theta}\right)^2 + 1}} - R_0,$$

или

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

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

Для изучения работы гальванометра в режиме измерения заряда (в баллистическом режиме), используется схема, представленная на рис. 2.

Система ключей устроена так, что нормально ключ  $K_2$  замкнут, а ключи  $K_3$  и  $K_4$  разомкнуты. При нажатии на кнопку  $K_0$  сначала размыкается ключ  $K_2$ , затем замыкается  $K_3$  и через некоторое время —  $K_4$ . При нормальном положении кнопки  $K_0$  конденсатор  $C$  заряжается до напряжения  $U_C$  и получает заряд  $q$ :

$$U_C = \frac{R_1}{R_2} U_0, \quad q = C U_C = \frac{R_1}{R_2} U_0 C.$$

При нажатии на ключ  $K_0$  конденсатор отключается от источника постоянного напряжения (размыкается ключ  $K_2$ ) и подключается к гальванометру (замыкается ключ  $K_3$ ).

Ёмкость конденсатора выбрана так, что к моменту замыкания ключа  $K_4$  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  $K_3$  и  $K_4$ , равно нулю.

Первый отброс зайчика  $\varphi_{\text{max}}$  после нажатия на кнопку  $K_0$  зависит от сопротивления внешней цепи, подключённой к гальванометру. Для определения  $R_{\text{кр}}$  используется то обстоятельство,

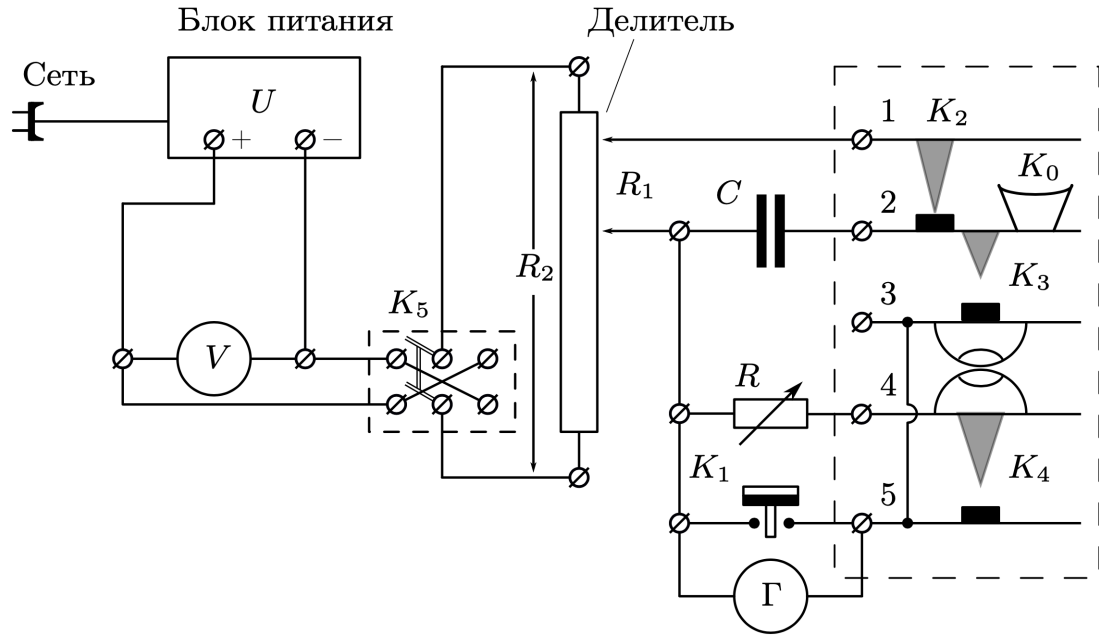


Рис. 2: Схема установки для определения баллистической постоянной

что в критическом режиме максимальное отклонение зайчика в  $\epsilon$  раз меньше, чем у гальванометра без затухания.

Следует помнить, что наблюдать колебания рамки при полном отсутствии затухания, конечно, невозможно, так как даже при разомкнутой внешней цепи ( $R = \infty$ ) остаётся трение в подвеске и трение рамки о воздух. Величину максимального отклонения рамки гальванометра без затухания  $\varphi_{max}^{cb}$  можно, однако, рассчитать, если при разомкнутой цепи тах измерить реальное максимальное отклонение рамки  $\varphi_0$  и логарифмический декремент затухания  $\Theta_0$  (при  $R = \infty$  величина  $\Theta_0$  определяется только внутренним трением в рамке). Из уравнений движения рамки при  $\gamma \ll \omega_0$  вытекают равенства

$$\varphi_0 = \varphi(T_1/4) = \varphi_{max}^{cb} e^{-\Theta_0/4},$$

так что максимальное отклонение рамки гальванометра без затухания

$$\varphi_{max}^{cb} = \varphi_0 e^{\Theta_0/4} \approx \varphi_0 \left( 1 + \frac{\Theta_0}{4} \right).$$

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

$$C_q^{кр} = \frac{q}{\varphi_{max}^{кр}} = 2a \frac{R_1 C U_0}{R_2 x_{max}^{кр}}, \quad (5)$$

где  $x_{max}^{кр}$  – величина первого отброса в критическом режиме, выраженная в делениях шкалы (мм),  $a$  – расстояние от зеркала до шкалы, выраженное в метрах, произведение  $C U_0$  – заряд, выраженный в кулонах.

## Ход работы/Обработка результатов эксперимента

1. Подготовим к работе приборы, настроим гальванометр. Установим делитель напряжения на небольшое входное напряжение:  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{2000}$ . Соберём электрическую схему согласно рис. 1. Запишем также величину  $R_2$ , расстояние от шкалы до зеркала гальванометра и внутреннее сопротивление гальванометра  $R_0$ , указанное на установке:  $R_2 = 10$  кОм;  $a = 136,8$  см;  $R_0 = 610$  Ом.

Измерим зависимость отклонения зайчика  $x$  от сопротивления магазина  $R$ , увеличивая сопротивление магазина, но не меняя делителя. По полученным данным рассчитаем токи  $I$  через гальванометр по формуле (1) и построим график  $I(x)$ . Результаты будем заносить в табл. 1, а график изобразим на рис. 3.

$R$ , кОм	50	40	30	20	15	10	8	6	5	4
$x$ , мм	0	3	8	13	28	47	62	84	101	125
$I$ , нА	12,45	15,51	20,58	30,57	40,36	59,38	73,17	95,31	112,30	136,66

Таблица 1: Зависимость отклонения зайчика от сопротивления, постоянный ток

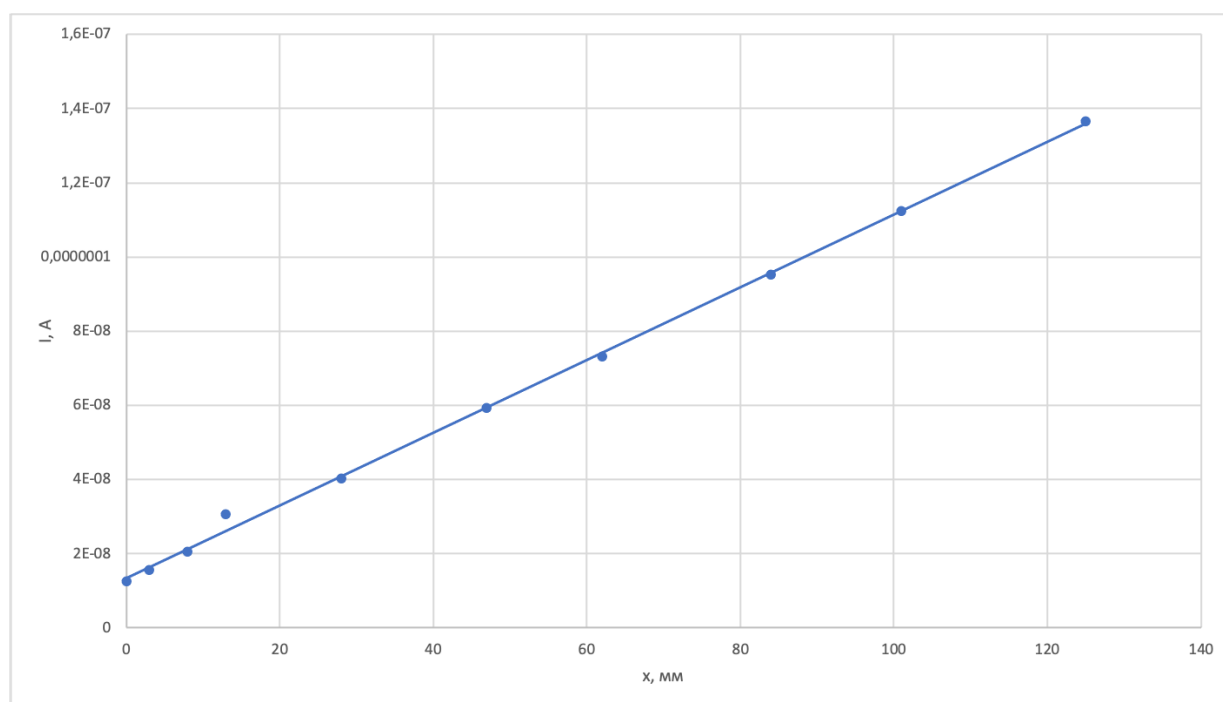


Рис. 3: График зависимости  $I = f(x)$

Пользуясь наклоном графика на рис. 3, рассчитаем динамическую постоянную  $C_I$  гальванометра по формуле (2). Получим результат:

$$C_I = (2,68 \pm 0,01) \cdot 10^{-9} \left[ \frac{\text{А}}{\text{мм/м}} \right]$$

Рассчитаем также чувствительность гальванометра к току:

$$S_I = \frac{1}{C_I} = (3,73 \pm 0,12) \cdot 10^8 \left[ \frac{\text{мм/м}}{\text{А}} \right].$$

2. Установим такое значение  $R$ , при котором зайчик отклоняется почти на всю шкалу:  $R = 2$  кОм. Разомкнём ключ  $K_2$  и понаблюдаем за свободными колебаниями рамки. Измерим

два последовательных отклонения зайчика в одну сторону для расчёта логарифмического декремента затухания  $\Theta_0$  разомкнутого гальванометра. Получим результаты:

$$x_1 = 192 \text{ мм}, \quad x_2 = 160 \text{ мм}.$$

Также приближённо измерим период  $T_0$  свободных колебаний рамки. Получим:

$$T_0 = 3,35 \text{ с}.$$

Пользуясь данными, полученными нами ранее, по формуле (3) рассчитаем логарифмический декремент затухания разомкнутого гальванометра. Получим:

$$\Theta_0 = (1,82 \pm 0,08) \cdot 10^{-1}.$$

3. Снова замкнём ключ  $K_2$  и убедимся, что зайчик находится на краю шкалы. Разомкнём ключ  $K_3$ . Теперь подберём наибольшее сопротивление магазина  $R$ , при котором при замыкании ключа  $K_3$  зайчик не переходит за нулевое значение. Это сопротивление близко к критическому:  $R_{кр} \approx 4,5 \text{ кОм}$ .

Установим сопротивление магазина  $R \approx 3R_{кр}$  и подберём делитель так, чтобы в стационарном режиме зайчик отклонялся почти на всю шкалу:  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{300}$ . Рассчитаем декремент затухания  $\Theta$ , измеряя два последовательных отклонения зайчика в одну сторону после размыкания ключа  $K_3$ . Повторим измерения декремента затухания для других значений  $R$ , постепенно увеличивая сопротивление магазина до  $10R_{кр}$ . Результаты будем заносить в табл. 2.

$R$ , кОм	13,50	18,00	20,25	22,50	24,75	27,00	31,50	36,00	40,50	45,00
$x_1$ , мм	55	64	62	62	62	62	58	65	54	49
$x_2$ , мм	3	7	9	11	13	14	15	20	19	19
$\Theta$	2,91	2,21	1,93	1,73	1,56	1,49	1,35	1,18	1,04	0,95

Таблица 2: Зависимость декремента затухания от сопротивления магазина

Пользуясь данными табл. 2, построим график  $1/\Theta^2 = f[(R + R_0)^2]$  и по формуле (4) рассчитаем значение критического сопротивления  $R_0$  (в области малых  $R$ ). График приведём на рис. 4.

Рассчитаем значение  $R_0$ , пользуясь первыми пяти точками. В итоге получим:

$$R_0 = 5580 \pm 123 \text{ Ом}.$$

4. Перейдём к работе гальванометра в баллистическом режиме. Соберём схему согласно рис. 2. Запишем параметры и показания вспомогательных приборов:  $C = 2 \text{ мкФ}$ ;  $U_0 = 1,26 \text{ В}$ . Установим на магазине сопротивление  $R = 50 \text{ кОм}$ . Разомкнём цепь  $R$ , отсоединив одну из клемм от магазина. Подберём делитель так, чтобы при замыкании ключа  $K_0$  первый отброс  $l_{max}$  соответствовал отклонению зайчика почти на всю шкалу:  $R_1/R_2 = 1/20$ . Запишем значение первого отброса для свободных колебаний:  $l_0 = 237 \text{ мм}$ . Вновь подключим магазин  $R$ . Получим зависимость первого отброса от величины  $R$ . Будем уменьшать  $R$  до тех пор, пока первый отброс не уменьшится до  $1/3$ – $1/4$  от максимальной величины. Результаты будем заносить в табл. 3.

Теперь построим график зависимости  $l_{max} = f[(R + R_0)^{-1}]$ . График представим на рис. 5.

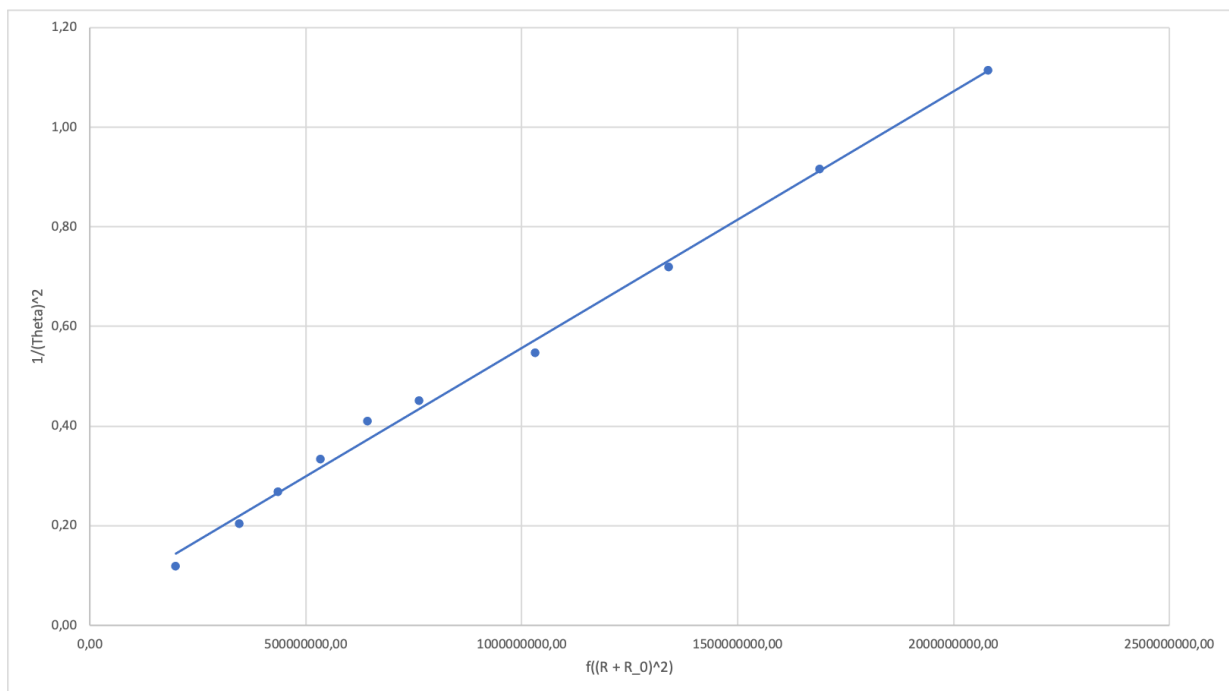


Рис. 4: График зависимости  $1/\Theta^2 = f[(R + R_0)^2]$

$R$ , кОм	50	40	35	30	25	20	15	10	5	2,5
$l_{max}$ , мм	163	157	155	148	149	138	120	96	61	40

Таблица 3: Зависимость первого отброса от сопротивления магазина

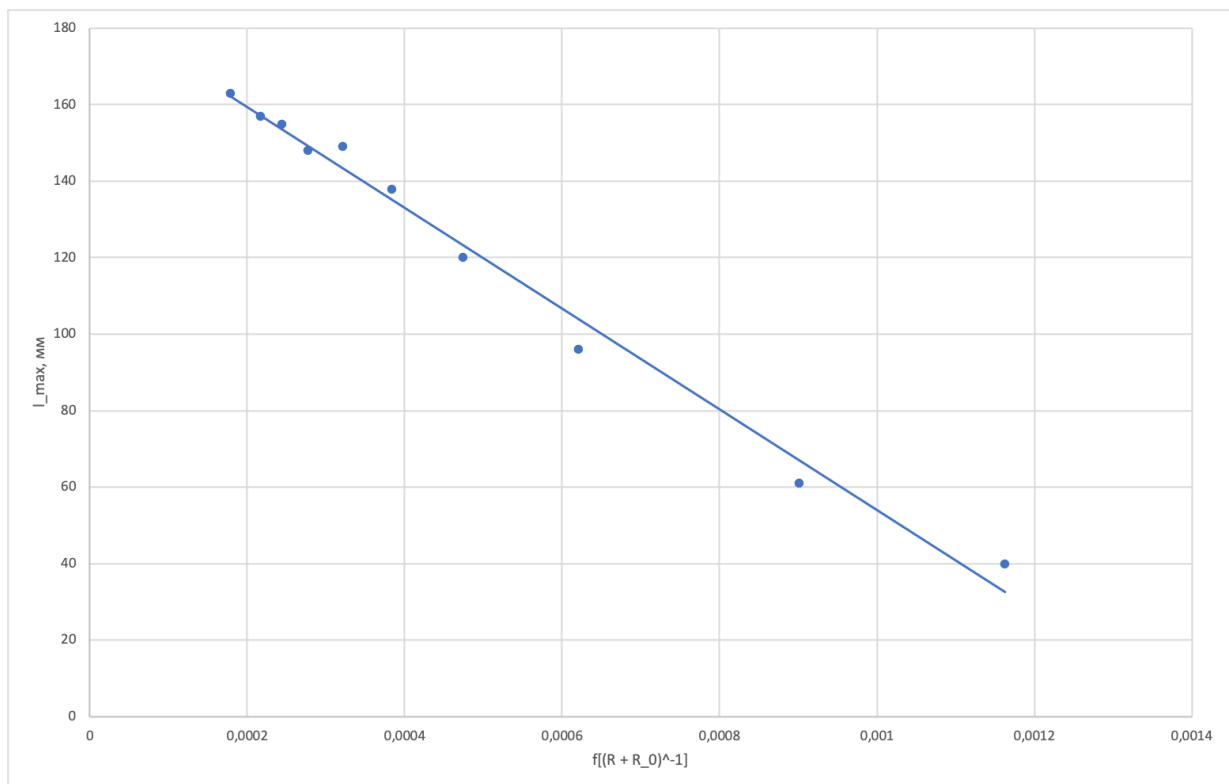


Рис. 5: График зависимости  $l_{max} = f[(R + R_0)^{-1}]$

Определим по рис. 5 критическое сопротивление гальванометра:

$$R_{\text{кр}} \approx 723 \text{ Ом.}$$

5. Рассчитаем баллистическую постоянную в критическом режиме  $C_q^{\text{кр}}$  по формуле (5). Получим:

$$C_q^{\text{кр}} = (4,00 \pm 0,23) \cdot 10^{-9} \left[ \frac{\text{Кл}}{\text{мм/м}} \right].$$

6. Сравним время релаксации  $t = R_0 C$  и период свободных колебаний гальванометра  $T_0$ :

$$t = 0,00122 \text{ с} \ll T_0 = 3,35 \text{ с},$$

время релаксации сильно меньше периода свободных колебаний. Значит эксперимент и данные полученные нами корректны.

## Вывод

В ходе данной работы нами были получены динамическая постоянная и баллистическая постоянная гальванометра, а также тремя разными способами было получено значение критического сопротивления гальванометра. В конце обработки результатов была проверена корректность данного эксперимента и всех полученных результатов, путём сравнения времени релаксации и периода свободных колебаний гальванометра.