

ФГАУ ВПО «МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»



Кафедра общей физики

Магнетометр

Выполнил: Корепанов Г.М.
512 группа

Преподаватель: Данилин Валерий Алексеевич

Долгопрудный, 2016 г.

1 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.*

Теоретическая часть

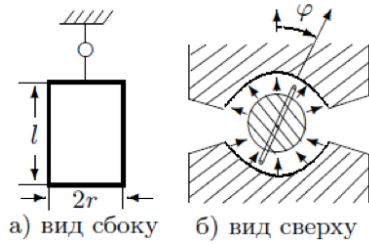


Рис. 1: Принцип работы

Параметры установки:

$$U_0 = 1.38 \text{ В}$$

$$R_2 = 10 \text{ кОм}$$

$$R_0 = 610 \text{ Ом}$$

$$a = 136,6 \text{ см}$$

$$J\ddot{\varphi} + \frac{(BSN)^2}{R_{\Sigma}}\dot{\varphi} + D\varphi = BSN I \quad (1)$$

D - модуль кручения нити, φ - угол поворота рамки от положения равновесия, B - индукция магнитного поля, N - число витков рамки, I - ток в рамке, S - площадь одного витка рамки, R_{Σ} - полное сопротивление цепи, J - момент инерции подвижной системы. Введем обозначения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{(BSN)^2}{JR_{\Sigma}} &= 2\gamma \\ \frac{D}{J} &= \omega_0^2 \\ \frac{BSN}{J} &= K \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Тогда уравнение движения рамки примет вид:

$$\ddot{\varphi} + 2\gamma\dot{\varphi} + \omega_0^2\varphi = KI \quad (3)$$

Величина γ называется *коэффициентом затухания* подвижной системы гальванометра, ω_0 - собственной частотой колебаний рамки.

Режим измерения постоянного тока

При измерении в режиме постоянного тока, когда затухают колебания: $\ddot{\varphi} = \dot{\varphi} = 0$, поэтому угол поворота можно определить формулой:

$$\varphi = \frac{KI}{\omega_0^2} = \frac{I}{C_I}$$

Постоянная $C_I = D/BSN$ называется динамической постоянной гальванометра.

Свободные колебания рамки

В отсутствии внешних источников тока ($I = 0$) будем исследовать свободное движение рамки. Если считать, что $\varphi(0) = 0$, $\dot{\varphi} = \dot{\varphi}_0$, уравнение примет вид:

$$\ddot{\varphi} + 2\gamma\dot{\varphi} + \omega_0^2\varphi = 0$$

общее решение такого уравнения имеет вид:

$$\varphi = A_1 e^{\lambda_1 t} + A_2 e^{\lambda_2 t} \quad (4)$$

Рассмотрим всевозможные соотношения между γ и λ .

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

В таком случае решением уравнения 4 является

$$\varphi = \frac{\dot{\varphi}}{\omega} e^{-\gamma t} \sin \omega t,$$

где $\omega^2 = \omega_0^2 - \gamma^2$. В таком режиме мы наблюдаем затухающие колебания с периодом:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{D}{J} - \frac{(BSN)^4}{(2JR_\Sigma)^2}}}$$

Если $\gamma \ll \omega_0$, то $\varphi = \frac{\dot{\varphi}}{\omega} \sin \omega t$,

2. $\gamma = \omega_0$ (критический режим)

Решение уравнения 4 в таком случае имеет вид:

$$\varphi = \dot{\varphi} t e^{-\gamma t}$$

Получаем, что после отклонения система экспоненциально приближается к нулю.

3. $\gamma > \omega_0$ (случай переуспокоенного гальванометра)

Решение в таком случае имеет вид:

$$\varphi = \frac{\dot{\varphi}}{\sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}} e^{-\gamma t} \operatorname{sh} \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} t,$$

Режим измерения заряда

Момент инерции рамки искусственно увеличен, поэтому период свободных колебаний будет больше, чем время прохода короткого импульса тока. Будем считать, что рамка не изменяет своего положения при прохождении импульса.

Тогда проинтегрируем 3, домножив на dt от 0 до τ - время окончания импульса, и получим:

$$\dot{\varphi} = Kq$$

Величина $C_q = q/\varphi_{\max}$ называется *баллистической постоянной* гальванометра. Условия, при которых угол отклонения будет максимален при полном отсутствии затухания: $\varphi_{\max \text{ св}} = \frac{Kq}{\omega_0}$.

В критическом режиме: $\varphi_{\max \text{ кр}} = \frac{Kq}{\omega_0 e}$, то есть в e раз меньше, чем в режиме свободных колебаний.

2 Работа и измерения

Определение динамической постоянной

Соберем схему:

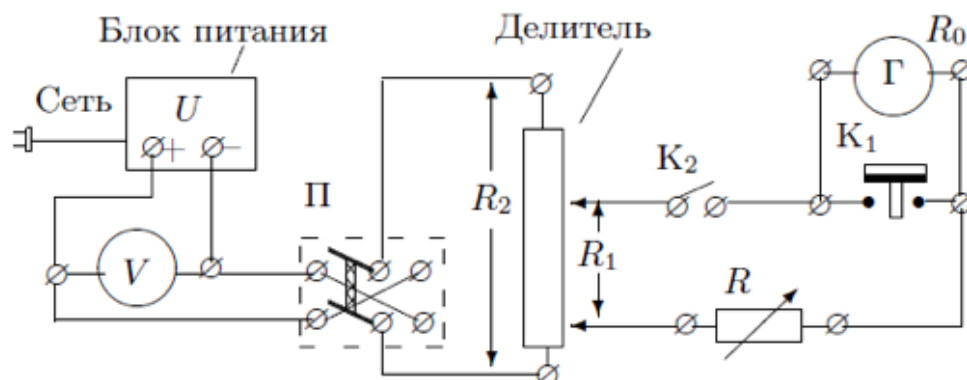


Рис. 2: Схема для определения динамической постоянной и критического сопротивления гальванометра

Угол отклонения рамки будем измерять с помощью осветителя, зеркальца и шкалы, находящейся на расстоянии a от зеркальца. Тогда координата x светового пятна будет выражаться:

$$x = a \operatorname{tg}(2\varphi) \approx 2a\varphi$$

Следовательно динамическая постоянная будет равна

$$C_I = \frac{I}{\varphi} = \frac{2aI}{x}$$

Значения силы тока найдем по формуле:

$$I = U_0 \frac{R_1}{R_2} \frac{1}{R + R_0}$$

x мм	250.0	238.0	188.0	170.0	198.5	149.0	155.0	162.0	178.5	143.0	137.5	132.5
σ_x мм	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
R Ом	830.0	900.0	1300.0	1500.0	1200.0	1800.0	1700.0	1600.0	1400.0	1900.0	2000.0	2100.0
I нА	479.2	457.0	361.3	327.0	381.2	286.3	298.7	312.2	343.3	274.9	264.4	254.6
σ_I нА	5.4	5.2	4.5	4.3	4.7	4.0	4.1	4.2	4.4	3.9	3.8	3.8

127.0	123.0	119.0	115.5	112.0	105	102	99	94	90	85	81.5	78	73.5	69
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2200.0	2300.0	2400.0	2500.0	2600.0	2800	2900	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4300	4600
245.6	237.1	229.2	221.9	215.0	202.3	196.6	191.1	181.1	172.1	163.9	156.5	149.7	140.5	132.4
3.7	3.6	3.6	3.5	3.5	3.4	3.4	3.3	3.2	3.2	3.1	3.1	3.0	2.9	2.9

64.5	59	55	47.5	42	38	29	25	21	14
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5000	5500	6000	7000	8000	9000	12000	14000	17000	27000
123.0	112.9	104.4	90.7	80.1	71.8	54.7	47.2	39.2	25.0
2.8	2.7	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0

Таблица 1: Полученные значения

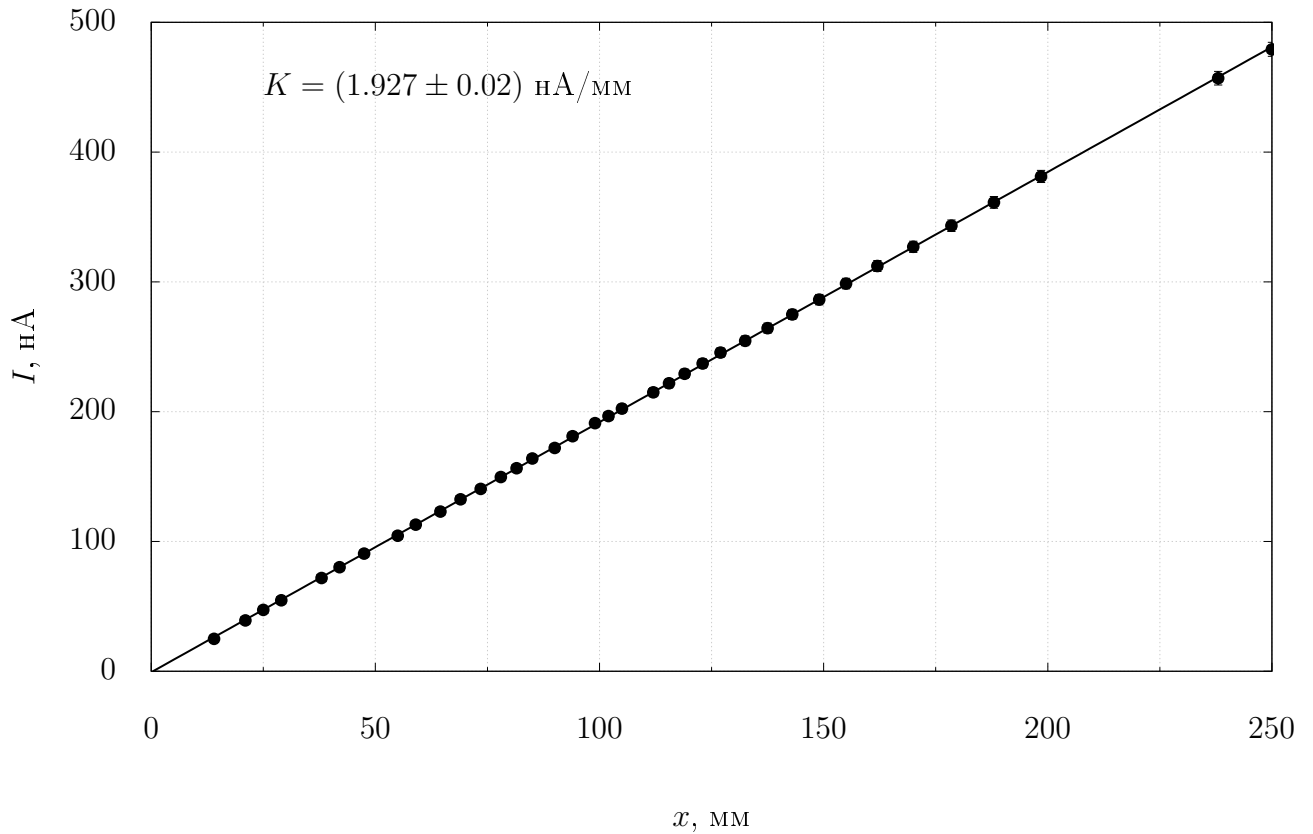


Рис. 3: График зависимости $I = f(x)$

Получаем, что $\frac{C_I}{2a} = 1,927 \pm 0,02 \frac{\text{нА}}{\text{мм}}$

Тогда $C_I = 5.27 \pm 0.05 \frac{\text{нА}}{\text{мм/м}}$

Определение критического сопротивления

$$x_n = 249 \text{ мм}$$

$$x_{n+1} = 220 \text{ мм}$$

$$\Theta_0 \simeq \ln \frac{x_n}{x_{n+1}} = 0.12$$

Оценим примерное значение периода свободных колебаний:

$t, \text{ с}$	66.9	66.9
$N, \text{ раз}$	27.0	27.0
$T, \text{ с}$	2.5	2.5

Таблица 2: Определение периода

$$T_0 = 2.48 \pm 0.04 \text{ с}$$

Оценим значение критического сопротивления, при котором зайчик не переходит за нулевое значение:

$$R_{\text{кр}} \approx 4330 \text{ Ом}$$

$R/R_{\text{кр}}$	$R, \text{ кОм}$	$x_n, \text{ мм}$	$x_{n+1}, \text{ мм}$	Θ	σ_Θ	$1/\Theta^2$	σ_{θ^2}	$(R + R_0)^2 \text{ кОм}^2$
3.00	13.0	222.0	22.0	2.31	0.25	0.19	0.04	185.0
3.50	15.2	192.0	26.0	2.00	0.16	0.25	0.04	248.5
4.00	17.3	224.0	39.0	1.75	0.09	0.33	0.03	321.5
4.50	19.5	200.0	41.0	1.58	0.07	0.40	0.04	403.8
5.01	21.7	180.0	43.0	1.43	0.06	0.49	0.04	497.7
5.50	23.8	245.0	64.0	1.34	0.04	0.55	0.03	596.6
6.00	26.0	225.0	67.0	1.21	0.03	0.68	0.04	707.0
7.00	30.3	193.0	67.0	1.06	0.03	0.89	0.05	956.0
8.00	34.6	241.0	94.0	0.94	0.02	1.13	0.05	1242.6
9.00	39.0	215.0	92.0	0.85	0.02	1.39	0.06	1566.6
10.00	43.3	194.0	89.0	0.78	0.02	1.65	0.08	1928.1

Таблица 3: Исследование зависимости Θ от R

$$\Theta = \gamma T = 2\pi \frac{\gamma}{\omega} = \frac{2\pi\gamma}{\sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}} = \frac{2\pi R_3}{\sqrt{R_\Sigma^2 - R_3^2}}, \quad (5)$$

где введено обозначение:

$$R_3 = \frac{(BSN)^2}{2\sqrt{JD}} = R_0 + R_{\text{кр}}$$

Тогда при $R = R_{\text{кр}}$ выполняется: $\Theta \rightarrow \infty$

Получим из 5 уравнение прямой в координатах $X = (R_0 + R)^2$ и $Y = 1/\Theta^2$:

$$\frac{1}{\Theta^2} = \frac{(R_0 + R)^2}{4\pi^2 R_3^2} - \frac{1}{4\pi^2}$$

$$\text{Тогда } R_{\text{кр}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\Delta X}{\Delta Y}} - R_0$$

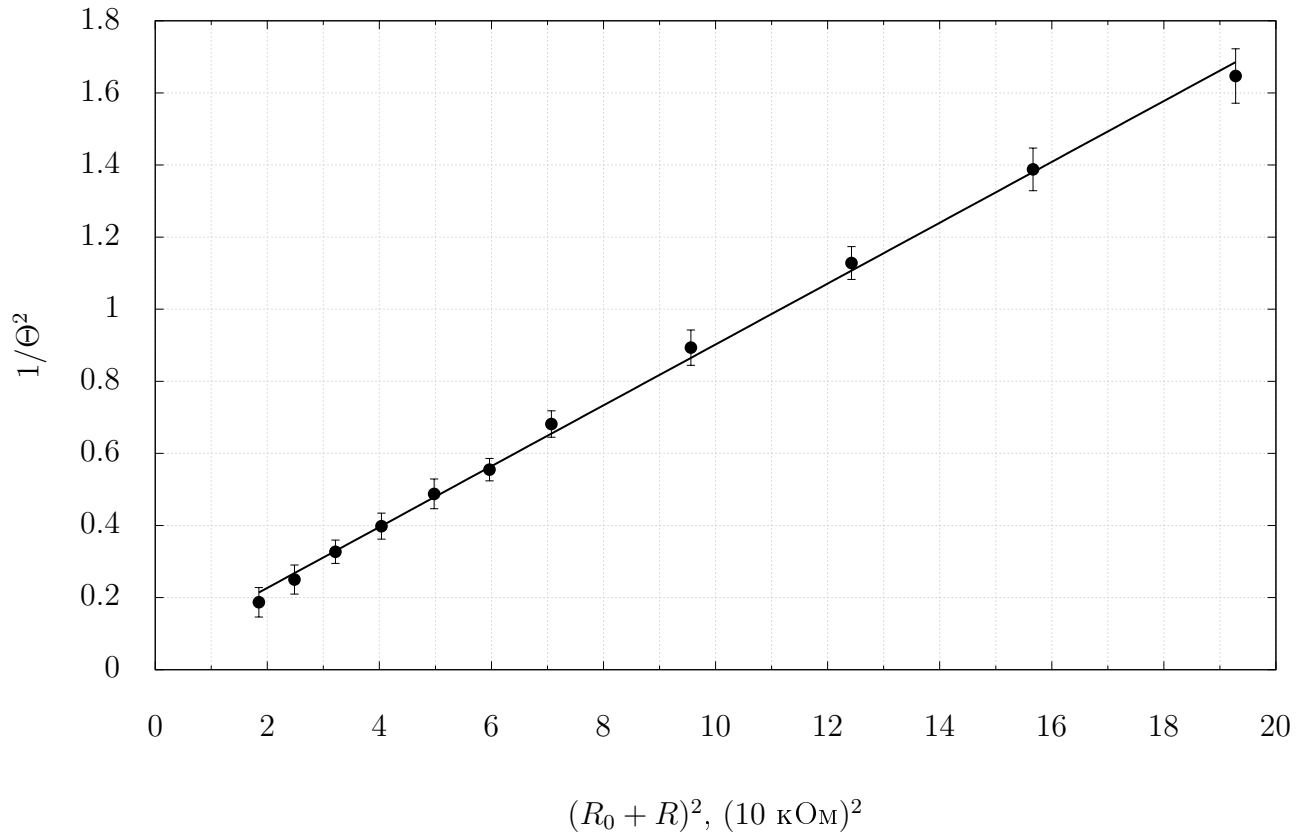


Рис. 4: График зависимости $1/\Theta^2 = f((R_0 + R)^2)$

Из графика $\frac{\Delta X}{\Delta Y} = 11.8 \pm 0.6 (10 \text{ кОм})^2$, поэтому

$$R_{\text{кр}} = 4.85 \pm 0.12 \text{ кОм}$$

Баллистический режим

$$C = 2 \text{ мкФ}$$

$$R_1/R_2 = 1/15$$

$$l_{\text{max}} = 19,4 \text{ см}$$

$$l_{\text{своб}} = l_{\text{max}} \cdot e^{\theta_0/4} = 20,0 \text{ см}$$

Соберем схему:


$$R_{\text{кр}} = R(l_{\text{своб}}/e) =$$

Определим баллистическую постоянную гальванометра $C_{Q_{кр}} \left[\frac{\text{Кл}}{\text{мм/м}} \right]$:

$$C_{Q_{кр}} = \frac{q}{\varphi_{\text{max кр}}} = 2a \frac{R_1}{R_2} \frac{U_0 C}{l_{\text{max кр}}} =$$

Время релаксации $t = R_0 C = 610 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 1.22 \cdot 10^{-3} \text{ с} \ll T_0 = 2.48 \text{ с}$

3 Вывод

В данной лабораторной работе мы измерили значение динамической постоянной гальванометра, критического сопротивления тремя способами и баллистической постоянной. В измерениях динамической постоянной значения $R_{кр}$ совпадают с учетом погрешности. Наибольшая погрешность в третьем эксперименте, так как большой вклад в погрешность дает скорость реакции человека (отклонения зайчика происходят быстро, необходимо успевать замыкать ключ и считывать значения).