

Лабораторная работа 3.2.6

Герасименко Д.В.

2 курс ФРКТ, группа Б01-104

Аннотация

Тема:

Изучение гальванометра

Цель работы:

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

Оборудование:

Зеркальный гальванометр с осветителем и шкалой, источник постоянного напряжения, делитель напряжения, магазин сопротивлений, эталонный конденсатор, вольтметр, переключатель, ключи, линейка

Теория

Баллистический гальванометр – электроизмерительный прибор магнитоэлектрической системы, отличающийся высокой чувствительностью к току и сравнительно большим периодом свободных колебаний.

На помещённую в магнитное поле обтекаемую током рамку гальванометра действуют момент закрученной нити, момент магнитных сил и тормозящий момент (зависит от сил сопротивления воздуха и от вихревых токов). Учитывая все эти моменты, уравнение движения рамки принимает вид

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

где параметры колебательной системы:

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

γ – коэффициент затухания подвижной системы гальванометра, ω_0 – собственная частота колебаний рамки

Динамическая постоянная гальванометра (и обратная к ней величина – чувствительность) определяется при пропускании через рамку постоянного тока:

$$C_I = \frac{I}{\varphi} = \frac{D}{BSN}; \quad S_I = \frac{1}{C_I} \quad (2)$$

где B – индукция магнитного поля в рамке, S – площадь одного витка рамки, D – модуль кручения нити.

При пропускании коротких импульсов тока через баллистический гальванометр начальная скорость движения рамки пропорциональна электрическому заряду, прошедшему через рамку за всё время импульса. Отношение баллистических постоянных в критическом и свободном режимах равно e .

Экспериментальная установка

I. Определение динамической постоянной

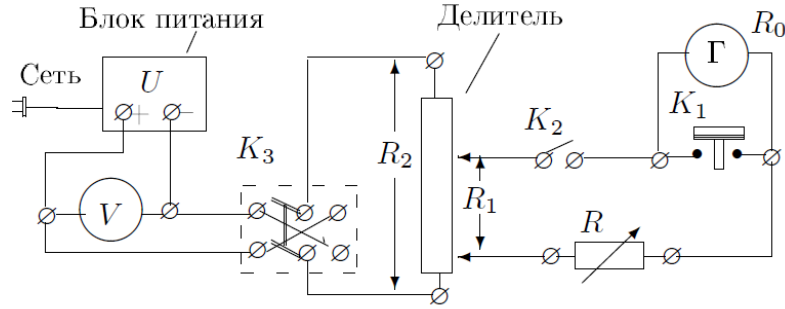


Рис. 1: Схема установки для работы гальванометра в стационарном режиме

Постоянное напряжение $U = 1,26\text{В}$ снимается с блока питания и измеряется вольтметром V . Ключ K_3 позволяет менять величину тока через гальванометр Γ , 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.

При малых R_1 сила тока, протекающего через гальванометр, может быть вычислена по формуле

$$I = U_0 \frac{R_1}{R_2} \frac{1}{R + R_0}. \quad (3)$$

Динамическую постоянную вычисли по формуле

$$C_I = \frac{2aI}{x}, \quad (4)$$

где a - расстояние от шкалы до зеркала.

II. Определение критического сопротивления гальванометра

Выполняется с помощью той же цепи, что и на рис. 1. При больших R движение рамки имеет колебательный характер, с уменьшением R затухание увеличивается, и колебательный режим переходит в апериодический. Свяжем декремент затухания колебаний с критическим сопротивлением.

В критическом режиме выполняется условие: $\omega_0 = \gamma$, откуда из ур-я (1) следует:

$$R_{\text{кр}} = R_{\Sigma_{\text{кр}}} - R_0 = \frac{(BNS)^2}{2\sqrt{DJ}} - R_0 = R_{\Sigma} \frac{\gamma}{\omega_0} - R_0$$

В колебательном режиме свободная частота колебаний: $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2} = \frac{2\pi}{T_1}$.

Логарифмический декремент затухания:

$$\Theta = \ln \frac{x_n}{x_{n+1}} = \gamma T_1 = 2\pi \frac{\gamma}{\sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}} = 2\pi \frac{1}{\sqrt{\frac{\omega_0^2}{\gamma^2} - 1}} \rightarrow \frac{\gamma}{\omega_0} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2\pi}{\Theta}\right)^2 + 1}}$$

Подставляя это в уравнение выше и учитывая $R_{\Sigma} = R + R_0$, получаем:

$$R = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\Theta}\right)^2 + 1} (R_{\text{кр}} + R_0) - R_0 = (R_{\text{кр}} + R_0)\xi - R_0 \quad (5)$$

Соответственно для определения критического сопротивления построим график зависимости $R(\xi)$ и найдем значение углового коэффициента наклона прямой.

III. Баллистической постоянной и критического сопротивления в баллистическом режиме

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

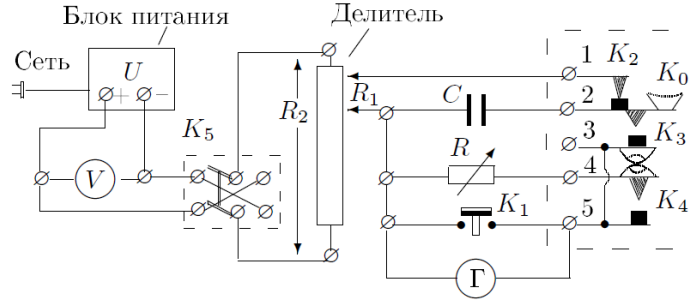


Рис. 2: Схема установки для определения баллистической постоянной

При нормальном положении кнопки K_0 конденсатор C заряжается до напряжения

$$U_c = \frac{R_1}{R_2} U_0$$

Заряд конденсатора равен

$$q = \frac{R_1}{R_2} U_0 C$$

Проинтегрируем уравнение (1) по времени от 0 до τ — время протекания короткого импульса заряда. Пренебрегая значением угла отклонения за это время, получим:

$$\dot{\varphi}(\tau) = Kq \Rightarrow \varphi_{max} = \frac{\dot{\varphi}}{\omega_0} = \frac{Kq}{\omega_0} \quad (6)$$

Но такое измерение трудно выполнить, так как необходимо добиться полного отсутствия затухания (свободный колебательный режим). Удобнее же всего измерять в критическом режиме:

$$\varphi(t) = \dot{\varphi}_0 t e^{-\gamma t} \Rightarrow \dot{\varphi}(t_0) = 0 \Rightarrow t_0 = \frac{1}{\gamma} \Rightarrow \varphi_{max}^{кр} = \frac{1}{e} \frac{\dot{\varphi}_0}{\gamma} = \frac{1}{e} \frac{\dot{\varphi}_0}{\omega_0} = \frac{\varphi_{max}^{св}}{e} \quad (7)$$

В нём максимальное отклонение в e раз меньше, чем при случае свободных колебаний

Характеристика $C_q = \frac{q}{\varphi_{max}}$ называется баллистической постоянной гальванометра. В критическом режиме

$$C_{q_{кр}} = \frac{q}{\varphi_{max}^{кр}} = 2a \frac{R_1}{R_2} \frac{U_0 C}{l_{max}^{кр}} \quad (8)$$

где x_{max} — максимальное отклонение зайчика при разомкнутой внешней цепи ($R = \infty$), а — расстояние от зеркала до шкалы

Выполнение

1. Подготовим к работе приборы, настроим гальванометр. Соберём схему согласно рис. 1. Снимем зависимость отклонения зайчика x от сопротивления магазина R , увеличивая сопротивление магазина, но не меняя делителя. Результаты запишем в табл. 1. Ток в цепи рассчитаем по формуле (1) ($R_1/R_2 = 1/2000$, $U_0 = 1.26$ В, $R_0 = 610$ Ом.)

Таблица 1. Зависимость отклонения зайчика от сопротивления при постоянном токе

x , мм	254	213	183	161	143	129	117	108
R , кОм	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
I , нА	241.38	202.57	174.52	153.28	136.66	123.29	112.30	103.11

x , мм	100	92	86	81	77	72	68	65
R , кОм	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5
I , нА	95.31	88.61	82.79	77.68	73.17	69.15	65.56	62.31

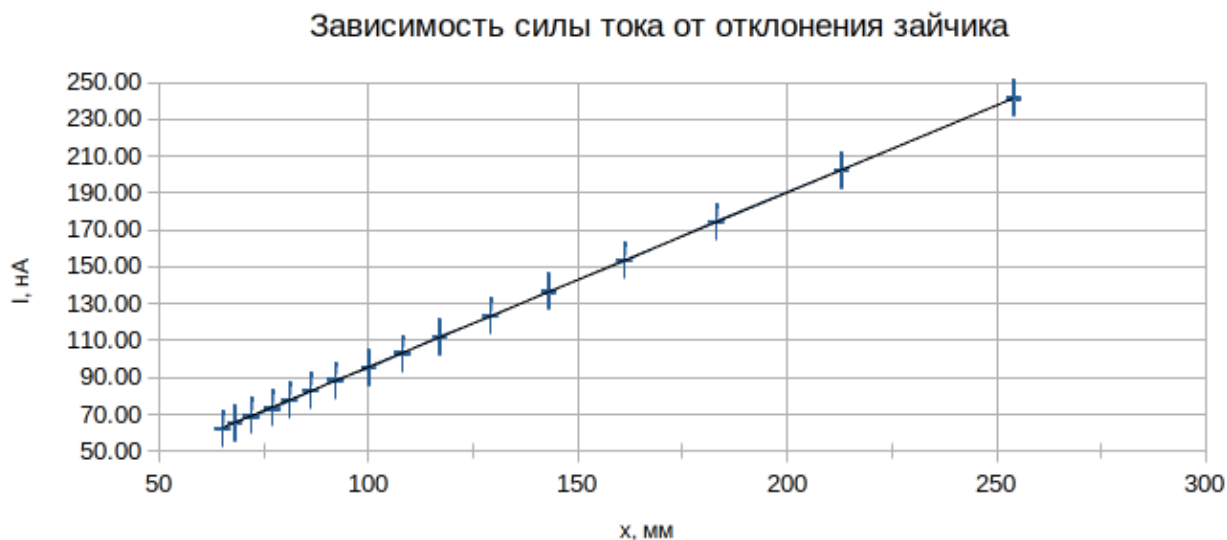


Рис. 3: Определение динамической постоянной гальванометра

Графически представим результаты на графике $I = f(x)$ (рис. 3). Воспользуемся методом наименьших квадратов для определения наклона прямой и погрешности его определения.

$$C_I = 2.57 \frac{\text{нА}}{\text{мм/м}} \quad \sigma_{C_I} = 0.02 \frac{\text{нА}}{\text{мм/м}} \quad (9)$$

Итого получаем

$$C_I = 2.57 \pm 0.02 \text{ нА}/(\text{мм/м})$$

$$S_I = 0.39 \pm 0.01 \text{ нА}/(\text{мм/м})^{-1}$$

- Рассчитаем логарифмический декремент затухания свободных колебаний рамки разомкнутого гальванометра. Результаты измерений занесём в табл. 2. Также определим приблизительно период свободных колебаний рамки.

$x_1, \text{ мм}$	$x_2, \text{ мм}$	$x_3, \text{ мм}$	$x_4, \text{ мм}$	$x_5, \text{ мм}$	Θ_{12}	Θ_{23}	Θ_{34}	Θ_{45}	Θ	σ_Θ	$T, \text{ с}$
254	212	179	150	126	0.180	0.169	0.176	0.174	0.174	0.002	2.8

Таблица 2. Для определения декремента затухания

Получили значение логарифмического декремента затухания свободных колебаний рамки

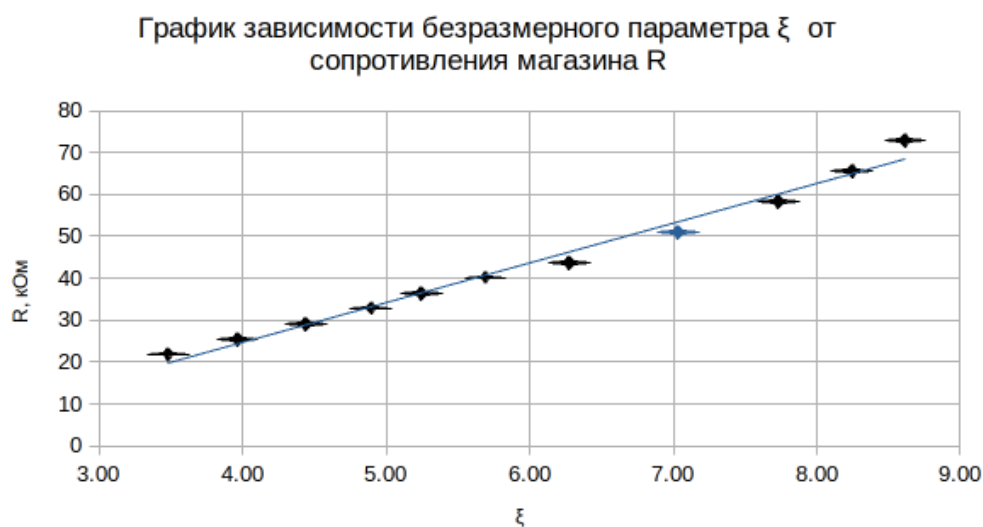
$$\Theta = 0.174 \pm 0.002$$

- При разомкнутом ключе K_3 определим наибольшее сопротивление магазина R , при котором при размыкании ключа зайчик не переходит за нулевое значение шкалы. Это сопротивление близко к критическому $R_{cr} \approx 7.3 \text{ кОм}$.
- Установим сопротивление магазина $R \approx 3R_{cr}$ и подберем делитель так, чтобы в стационарном режиме зайчик отклонялся на всю шкалу. Для расчёта Θ будем измерять два последовательных отклонения зайчика в одну сторону. Повторим измерения, увеличивая сопротивление магазина до $10R_{cr}$. Результаты занесём в табл. 3.

Таблица 3. Зависимость отклонения зайчика от сопротивления, после размыкания ключа K_3

R , кОм	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
x_1 , мм	250	216	188	167	149	132	124	1106	93	84	75
x_2 , мм	38	42	44	45	44	44	45	43	41	39	36
Θ	1.884	1.636	1.452	1.311	1.220	1.121	1.014	0.902	0.819	0.767	0.734
ξ	3.48	3.96	4.44	4.89	5.24	5.69	6.28	7.03	7.73	8.25	8.61

Построим график зависимости декремента затухания колебаний от сопротивления на магазине в координатах $R(\xi)$ (рис. 4). Используя формулу (4) и метод наименьших квадратов, определим по нему критическое сопротивление гальванометра. Также используя метода наименьших квадратов, оценим погрешность определения этой величины (так как погрешность измерения отклонения зайчика пренебрежимо мала по сравнению с погрешностью по МНК): $k = 9.5$ кОм; $\sigma_k = 0.4$ кОм; $\frac{\sigma_k}{k} = 4.2\%$



Откуда получим значение критического сопротивления в данном методе:

$$R_{кр} = 8.9 \pm 0.4 \text{ кОм}$$

5. Перейдём к работе гальванометра в баллистическом режиме. Соберём схему по рис. 2. Разомкнём цепь R , отсоединив одну из клемм от магазина. Подберём делитель так, чтобы первый отбор соответствовал отклонению зайчика на всю шкалу. Для свободных колебаний $l_{max} = 203$ мм.

Подключим магазин назад. Снимем зависимость величины первого отброса от R . Результаты занесём в табл. 4.

Таблица 4. Зависимость максимального отклонения зайчика от сопротивления внешней части цепи в режиме измерения заряда

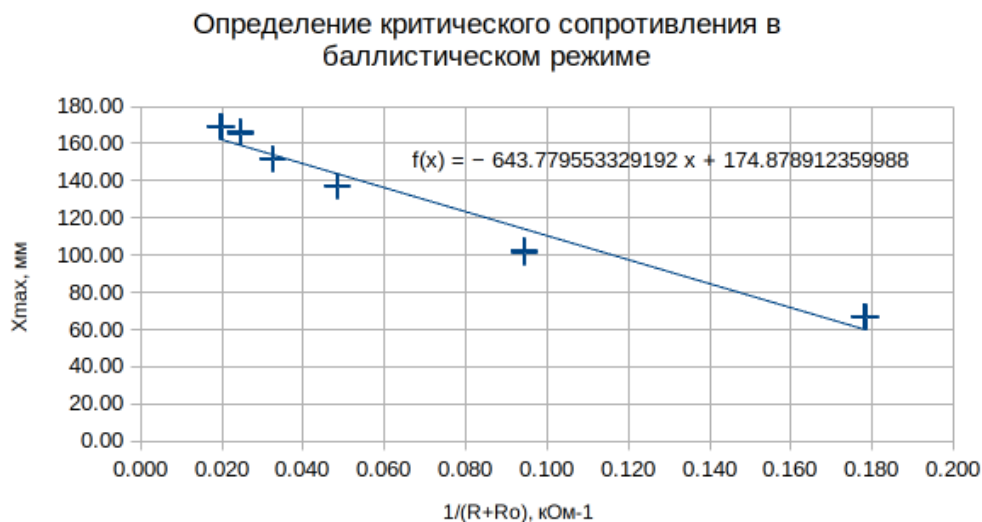
l_{max} , мм	169	166	152	137	102	67
R , кОм	50	40	30	20	10	5

Построим график $l_{max} = f[(R_0 + R)^{-1}]$. По графику, используя метод наименьших квадратов, определим критическое сопротивление гальванометра ($l_{кр} = l_{max}/e$). Для уравнения $l_{max} = kt + l$, получим

$$\begin{aligned}
 k &= -643 \text{ кОм мм}^{-1}; l = 174 \text{ мм} \\
 \sigma_k &= 106 \text{ кОм мм}^{-1}; \sigma_l = 9 \text{ мм} \\
 R_{кр} &= \left(\frac{l_{кр} - l}{k} \right)^{-1} - R_0 = (5.9 \pm 0.9) \text{ кОм}
 \end{aligned}$$

6. По формуле (5) рассчитаем баллистическую постоянную в критическом режиме:

$$\begin{aligned}
 C_q^{кр} &= 2a \frac{R_1}{R_2} \frac{CU_0}{l_{max}^{кр}}; \frac{\sigma_{C_q^{кр}}}{C_q^{кр}} = \frac{\sigma_{l_{max}}}{l_{max}} \\
 C_q^{кр} &= (1.71 \pm 0.02) 10^{-9} \text{ К / (мм/м)}
 \end{aligned}$$



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

$$t = 5.2 \cdot 10^{-6} \text{с} \ll T = 2.6 \text{с}$$

Время релаксации много меньше периода свободных колебаний. Эксперимент корректен.

Вывод

В ходе эксперимента был исследован принцип работы гальванометра в режиме постоянного тока и в баллистическом режиме. Определены динамическая и баллистическая постоянные гальванометра:

$$C_I = (2.57 \pm 0.02) \text{ нА/(мм/м)} \quad C_q^{\text{кр}} = (1.71 \pm 0.02) \cdot 10^{-9} \text{ К/(мм/м)}$$

Тремя разными способами было исследовано критическое сопротивление гальванометра. Результаты отличны в пределах погрешности.

Таблица 5. Значения R_{cr} , полученные разными способами

R_{cr} , кОм - подбор	R_{cr} , кОм - по графику в стационарном режиме	R_{cr} , кОм - по графику в баллистическом режиме
7.3	8.9 ± 0.4	5.9 ± 0.9

Наиболее точным считаем значение сопротивления, которое было измерено в режиме постоянного тока по следующей причине: эксперимент в баллистическом режиме менее точен ввиду больших требований к установке (необходимо достичь максимальную чувствительность гальванометра к заряду и сократить время, затрачиваемое на измерение).