

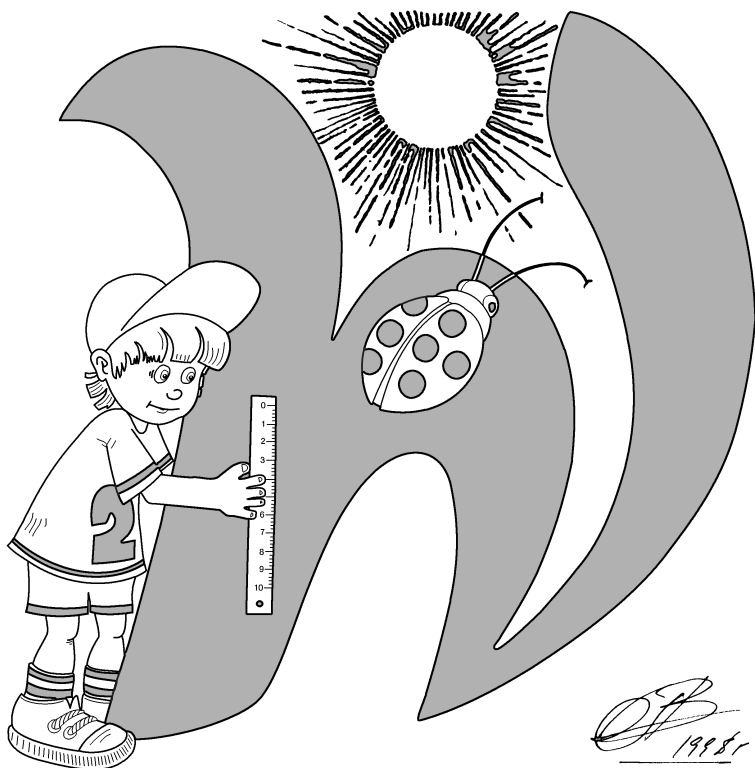
Федеральное агентство по образованию
Центральный оргкомитет Всероссийских олимпиад

XI Всероссийская олимпиада школьников по физике

Заключительный этап

Экспериментальный тур

Методическое пособие



, 2006 г.

Комплект задач подготовлен методической комиссией по физике
Центрального оргкомитета Всероссийских олимпиад школьников
Министерства образования и науки Российской Федерации
Телефоны: (095) 408-80-77, 408-86-95.
E-mail: fizolimp@mail.ru (с припиской **antispam** к теме письма)

Авторы задач

9 класс

1. Елькина Е.,
Карманов М.
2. Иголеви́ч И.

10 класс

1. Карманов М.
2. Иголеви́ч И.,
Карманов М.

11 класс

1. Марфенков Ю.
2. Иголеви́ч И.

Оформление и вёрстка — Чудновский А., Гусихин П.

При подготовке оригинал-макета
использовалась издательская система L^AT_EX 2_ε.
© Авторский коллектив
Подписано в печать 21 июня 2006 г. в 17:58.

141700, Московская область, г. Долгопрудный
Московский физико-технический институт

Задача 1. Механический «чёрный ящик»

Внутри «чёрного ящика» находится система из трёх пружин, соединённых друг с другом (рис. 1). В точке *A* две пружины прикреплены к корпусу «чёрного ящика». Упоры *B* и *C* ограничивают перемещение крючков. Начальные деформации пружин не известны. Определите жёсткости каждой из пружин при малых деформациях.

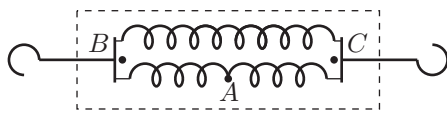


Рис. 1

Оборудование. «Чёрный ящик», динамометр, линейка, миллиметровка, липкая лента.

Задача 2. Экспериментатор Глюк

Экспериментатору Глюку на день рождения подарили «чёрный ящик», в котором находится источник постоянного напряжения с присоединённым к нему последовательно неизвестным сопротивлением (рис. 2). Глюк захотел узнать, какой ток потечёт через источник, если соединить проводки, торчащие из «чёрного ящика». Поскольку под рукой у экспериментатора оказался далеко не идеальный амперметр, что не позволило измерить этот ток напрямую, он обратился за помощью к вам. Помогите Глюку. Для этого:

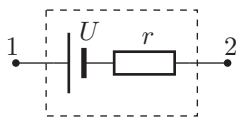


Рис. 2

1. изучите зависимость мощности, выделяющейся на внешней нагрузке, от силы тока через источник;

2. определите ток короткого замыкания «чёрного ящика» при помощи этой зависимости.

Примечание. Внешней нагрузкой называется всё, что подключается к выводам 1 и 2 «чёрного ящика».

Оборудование. «Чёрный ящик», переменное сопротивление, миллиамперметр (внутреннее сопротивление указано на приборе), вольтметр (внутреннее сопротивление 700 Ом), соединительные провода, миллиметровая бумага.

Задача 1. Шарик в трубке

Внутри цилиндрической трубки собрана конструкция, изображённая на рисунке 3. Трубка с пробками является симметричной (её центр масс расположен ровно посередине). Определите: массу трубки, массу шарика, жёсткость пружины. Массой пружины можно пренебречь.



Рис. 3

Примечание. Конец трубки, из которого выходит нить, погружать в воду запрещается. Плотность воды 1000 кг/м³.

Оборудование. Трубка в сборке, линейка, сосуд с водой, спичка.

Задача 2. Электрический «чёрный ящик» (1)

В «чёрном ящике» собрана схема из трёх элементов, соединённых «звездой» (рис. 4). Два элемента являются постоянными резисторами, а третий элемент имеет нелинейную вольтамперную характеристику. Определите:

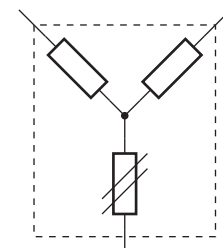


Рис. 4

1. провод какого цвета соединён с нелинейным элементом;

2. значения сопротивлений резисторов;

3. вольтамперную характеристику нелинейного элемента.

Оборудование. «Чёрный ящик», два мультиметра, регулируемый источник тока, соединительные провода, миллиметровая бумага.

11 класс

Задача 1. Дифракция и дисперсия

1. Используя дифракционную решётку, определите границы (максимальную λ_{\max} и минимальную λ_{\min} длины волн) спектра излучения выданного вам источника в видимой области.

2. С помощью щели направьте узкий пучок света на одну из граней призмы (рис. 5). Подберите угол падения φ_1 так, чтобы пучок проходил симметрично через призму ($\varphi_1 = \varphi_2$ для средней части спектра). Получите на экране спектр источника и измерьте углы отклонения $\delta(\lambda_{\max})$ и $\delta(\lambda_{\min})$ для границ спектра источника. Рассчитайте угловую дисперсию призмы $\Delta\delta/\Delta\lambda$ при симметричном ходе лучей.

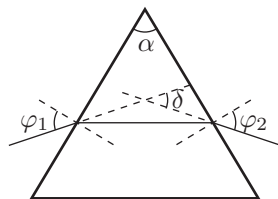


Рис. 5

3. Рассмотрите ход луча с некоторой длиной волны в призме и выразите показатель преломления n материала призмы через углы α и δ при симметричном ходе лучей. Рассчитайте показатель преломления призмы для средней части спектра.

4. Оцените дисперсию показателя преломления $\Delta n/\Delta\lambda$.

Оборудование. Источник света, призма, дифракционная решётка (100 штр/мм), прищепки, экран со щелью, миллиметровая бумага.

Задача 2. Электрический «Чёрный ящик» (2)

В «чёрном ящике» находятся три элемента, соединённые последовательно (возможные варианты: катушка индуктивности, конденсатор, резистор). Есть только два вывода, соединённые с крайними точками цепочки из трёх элементов.

1. Определите, какие элементы находятся в «чёрном» ящике.
2. Измерьте параметры этих элементов.

Оборудование. «Чёрный ящик», генератор гармонического сигнала с регулируемой частотой, двухлучевой осциллограф, дополнительное сопротивление с известным номиналом R_0 , соединительные провода.

Возможные решения

9 класс

Задача 1. Механический «чёрный ящик»

Прикрепляем динамометр к одному из крючков и исследуем зависимость удлинения l от величины приложенной силы F . Опыт проводим три раза: удерживаем конструкцию на столе, тянем за крючок B ; удерживаем конструкцию на столе, тянем за крючок C ; держим конструкцию на весу за один крючок, тянем за другой. Для каждого случая строим график зависимости удлинения от растягивающей силы. По начальному линейному участку графика определяем жёсткость системы $k = \Delta F/\Delta l$ для каждого варианта растяжения. Эти жёсткости можно выразить через жёсткости пружин:

$$\begin{cases} k_1 = k_{AB} + k_{BC}; \\ k_2 = k_{AC} + k_{BC}; \\ k_3 = \frac{k_{AB}k_{AC}}{k_{AB} + k_{AC}} + k_{BC}. \end{cases}$$

Решая систему уравнений, находим k_{AB} , k_{AC} , k_{BC} .

Рекомендации для организаторов.

1. В качестве пружин можно использовать резинки разной длины, одна из которых сложена вдвое.
2. В качестве корпуса «чёрного ящика» можно использовать ученический пенал.
3. Желательно присутствие небольшой начальной деформации или, наоборот, провисания пружин. Если в качестве пружин используются резинки приблизительно равной длины, верхнюю пружину можно «удлинить», привязав к крючкам нитками.
4. Решение задачи предполагает снятие трёх зависимостей величины деформации от приложенной силы (тянем за один крючок, за другой и за оба одновременно). Желательно, чтобы при каждом из этих опытов диапазон возможных деформаций был от 0 хотя бы до 3 см. Допускается наличие отклонений от линейности при больших деформациях, но на полученных графиках должен чётко выделяться начальный линейный участок зависимости.
5. При одновременном вытягивании крючков предполагается, что корпус «чёрного ящика» может свободно перемещаться по поверхности стола, и силы натяжения двух нижних пружин окажутся равными.
6. Длина линейки должна быть достаточной для прямого измерения расстояния между крючками, вытянутыми на максимальные расстояния. Желательно, помимо линейки, выдать участникам по полосе миллиметровой бумаги размером 1 м на 10 см. Крючки должны свободно перемещаться (без перекосов). Лучше, если резинки будут крепиться к крючкам в одной точке.
7. Миллиметровка нужна также для построения графиков.

Задача 2. Экспериментатор Глюк

1. Собираем электрическую цепь по схеме, изображённой на рисунке 6. Силу тока I измеряем непосредственно амперметром. Мощность, выделяющуюся на внешней нагрузке, рассчитываем по формуле $P = I^2 R_A + IU_V$, где R_A — сопротивление амперметра, U_V — показания вольтметра. Строим график зависимости $P(I)$ на миллиметровой бумаге.

2. Обозначим полное сопротивление внешней нагрузки (с учётом сопротивлений измерительных приборов) через R . Тогда мощность, выделяющаяся на внешней нагрузке, $P = I^2 R = (U - Ir)I = UI - I^2 r$. Заметим, что каждому значению мощности соответствует два значения силы тока I_1 и I_2 , причём $I_1 + I_2 = U/r = I_{кз}$, где $I_{кз}$ — ток короткого замыкания «чёрного ящика»! Таким образом, чтобы определить ток короткого замыкания, пользуясь графиком $P(I)$, находим суммы значений токов, соответствующих одинаковой мощности.

Рекомендации для организаторов.

1. «Чёрный ящик» можно изготовить, последовательно соединив батарейку с резистором и спрятав их в какой-нибудь корпус (например, в мыльницу) так, чтобы наружу были выведены только два провода.

2. Переменный резистор должен иметь только два вывода (от одного из концов обмотки и подвижного контакта).

3. Максимальное сопротивление переменного резистора должно быть в 2–3 раза больше сопротивления резистора, находящегося внутри «чёрного ящика».

4. В качестве вольтметра и амперметра предполагается использование стрелочных приборов.

5. Сопротивление вольтметра должно быть сравнимо с сопротивлением переменного резистора.

6. Сопротивление амперметра должно быть по возможности большим.

7. ЭДС батарейки и сопротивления резисторов нужно подобрать так, чтобы батарейка разряжалась достаточно медленно, но при этом токи и напряжения можно было бы измерять при помощи имеющихся приборов.

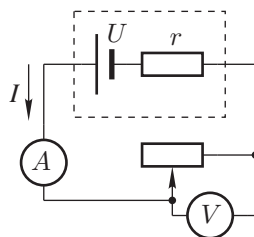


Рис. 6

10 класс

Задача 1. Шарик в трубке

1. Уравновесим трубку на ребре линейки в горизонтальном положении. Таким образом определим положение центра масс системы «трубка-шарик». С другой стороны, расстояние от центра масс системы до центра трубки (с учётом её симметричности)

$$x_c = \frac{mx}{m + M},$$

где x — расстояние от центра шарика до центра трубки, m — масса шарика, M — масса трубки. Перемещая шарик при помощи нити и фиксируя нить при помощи спички, каждый раз снова уравновешиваем трубку на ребре линейки. Перемещение центра масс системы

$$\Delta x_c = \frac{m \cdot \Delta x}{m + M}.$$

Находим отношение масс трубки и шарика

$$\frac{M}{m} = \frac{\Delta x}{\Delta x_c} - 1. \quad (1)$$

2. Опускаем трубку в воду герметичным концом вниз, аккуратно придерживая так, чтобы трубка плавала в вертикальном положении практически под действием только сил тяжести и Архимеда. Тогда

$$(M + m)g = \rho_0 V_n g,$$

где ρ_0 — плотность воды, V_n — объём погружённой в воду части трубки, $V_n = hS$, где h — высота погружённой в воду части трубки, площадь сечения трубки,

$$S = \frac{\pi d^2}{4},$$

d — диаметр трубки, который можно найти прокатыванием трубки по линейке. Таким образом определяем массу трубки с шариком

$$M + m = \rho_0 h \frac{\pi d^2}{4}.$$

Массу шарика находим, используя выражение (1). Чтобы определить жёсткость k пружины, располагаем трубку вертикально негерметичным концом вниз и измеряем растяжение пружинки Δl под действием веса шарика:

$$k = \frac{mg}{\Delta l}.$$

Рекомендации для организаторов.

1. Вместо шарика можно использовать и цилиндр. 2. Вместо пружинки можно использовать резинку.
3. Шарик должен свободно перемещаться внутри трубки. Нитка тоже.
4. Масса шарика должна быть немного меньше массы трубки вместе с пробками.
5. Левый конец трубки должен быть герметично закрыт.
6. Высота сосуда должна быть больше длины трубки.
7. Средняя плотность трубки должна быть немного меньше плотности воды. Желательно, чтобы при погружении в воду закрытым концом вниз конструкция устойчиво плавала в вертикальном положении.
8. Центр масс трубки с пробками должен располагаться посередине трубки.
9. При вертикальном удержании цилиндра ниткой вниз шарик не должен касаться правой пробки (она окажется под шариком).
10. Желательно, чтобы при вертикальном подвешивании данной конструкции на нитке шарик, наоборот, касался правой пробки (теперь она окажется над шариком).
11. Участникам необходимо иметь возможность фиксировать нитку, вытянутую на определённое расстояние. Для этого можно выдать спичку.
12. Желательно, чтобы на трубке можно было делать пометки карандашом или ручкой, и они не смывались водой.

Задача 2. Электрический «чёрный ящик» (1)

Снимаем вольтамперные характеристики для каждой пары выводов для двух полярностей подключения источника (рисунки 7, 8, 9, 10, 11 и 12).

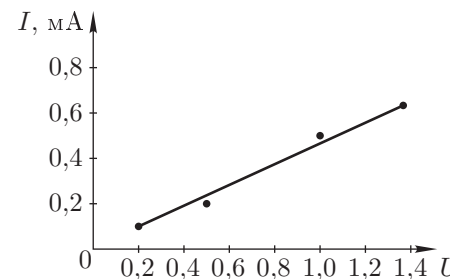


Рис. 7. Син(+) – Бел(-)

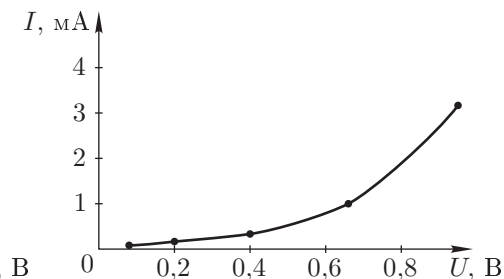


Рис. 8. Син(-) – Бел(+)

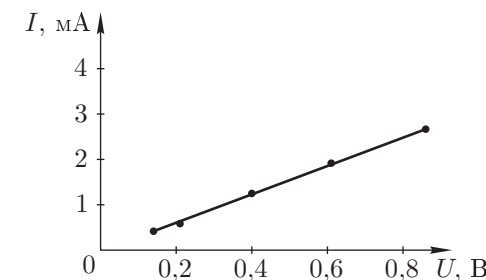


Рис. 9. Син(+) – Оранже(-)

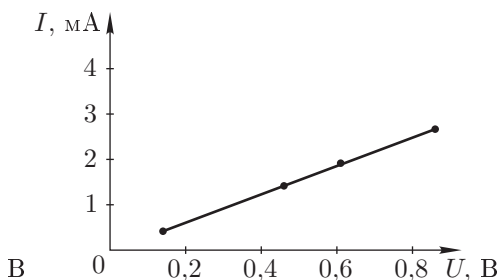


Рис. 10. Син(-) – Оранже(+)

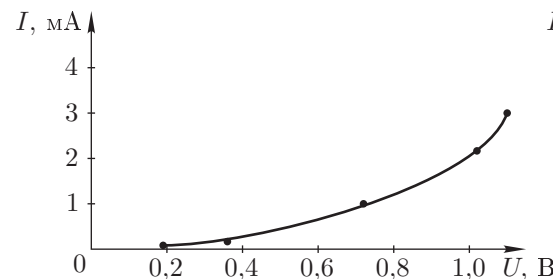


Рис. 11. Бел(+) – Оранже(-)

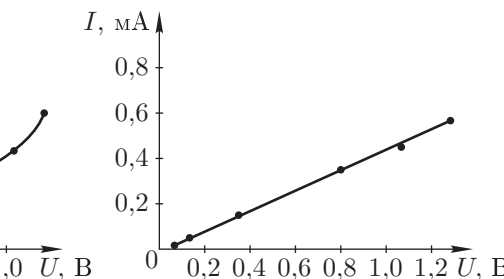


Рис. 12. Бел(-) – Оранже(+)

Определяем, что нелинейный элемент подключён к белому проводу.

Используя характеристики для пары контактов «синий – оранжевый», находим сумму сопротивлений резисторов $R_{\text{син}} + R_{\text{оранж}} \approx 330 \text{ Ом}$.

Используя характеристики «синий (-) – белый (+)» и «оранжевый (-) – белый (+)», находим $R_{\text{оранж}} - R_{\text{син}} \approx 110 \text{ Ом}$.

Решая полученную систему, находим $R_{\text{оранж}} \approx 220 \text{ Ом}$; $R_{\text{син}} \approx 110 \text{ Ом}$.

Зная сопротивления резисторов, можно получить ВАХ нелинейного элемента. Заметим, что при одной из полярностей (белый провод соединён с «минусом» источника) нелинейный элемент ведёт себя как постоянное сопротивление $R \approx 2$ кОм.

Рекомендации для организаторов.

1. Если нет достаточного количества регулируемых источников тока, их можно изготовить из батарейки и переменного резистора, включенного по схеме потенциометра. Всё это вместе с тумблером включения/выключения нужно поместить в некоторый корпус (например мыльницу), выведя наружу тумблер, регулирующую ручку потенциометра и контактные провода с указанием полярности.

2. Выводы «чёрного ящика» лучше промаркировать, например, используя провода трёх разных цветов.

3. В качестве нелинейного элемента предполагается использование диода, соединённого параллельно с резистором. Резистор нужен для того, чтобы при обратной полярности подключения ток всё же протекал через нелинейный элемент.

4. Сопротивление, подключаемое параллельно диоду, должно быть на порядок больше сопротивления диода в открытом состоянии. Нелинейность ВАХ должна очень чётко прослеживаться после открывания диода. Вместе с тем ток, текущий через нелинейный элемент при закрытом диоде, должен быть заметен на том же пределе измерений амперметра, на котором снимается оставшая часть ВАХ.

5. Сопротивления резисторов в «чёрном ящике» должны быть сравнимы с сопротивлением диода в открытом состоянии и отличаться друг от друга в 1,5 – 2 раза.

6. Значения сопротивлений и ЭДС источника подбираются в зависимости от характеристик диода из соображений, изложенных выше, а также с учётом ограничения на максимальный ток, который может течь через диод.

7. Миллиметровка выдается для построения ВАХ, её должно быть достаточно для построения всех ВАХ.

11 класс

Задача 1. Дифракция и дисперсия

1. Спектральный состав излучения источника определяем при помощи дифракционной решётки. Схема опыта показана на рисунке 13.

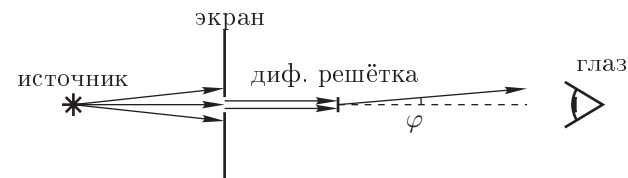


Рис. 13

Для отсчёта углов возле щели на экране расположим полоску миллиметровой бумаги перпендикулярно щели и направлению распространения световых лучей. Границы спектра определяем по формуле дифракционной решётки $d \sin \varphi = k\lambda$, где d — период решетки, k — порядок спектра. Для $\varphi \ll 1$

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{L},$$

где x — расстояние от щели до границы спектра, L — расстояние от решётки до экрана.

2. Положим призму на лист миллиметровой бумаги и обведём контур карандашом. Направляем свет от источника через щель на призму, как показано на рисунке 14. Карандашом зарисовываем на миллиметровке ход лучей до и после преломления в призме. Убираем призму. Продолжаем лучи до пересечения (как показано пунктиром на рисунке в условии задачи). При помощи миллиметровки измеряем максимальный и минимальный углы отклонения. Вычисляем

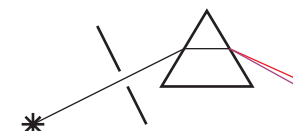


Рис. 14

$$\frac{\Delta \delta}{\Delta \lambda} = \frac{\delta(\lambda_{\max}) - \delta(\lambda_{\min})}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}.$$

3. Для преломления на границе «воздух-стекло»:

$$\sin \varphi_1 = n \sin \psi_1. \quad (2)$$

При симметричном ходе лучей (рис. 15)

$$\psi_1 = \psi_2 = \frac{\alpha}{2}, \quad (3)$$

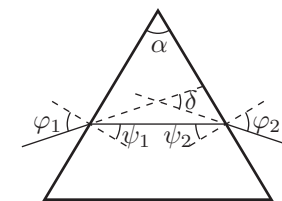


Рис. 15

$$\delta = (\varphi_1 - \psi_1 + \varphi_2 - \psi_2) = (\varphi_1 + \varphi_2) - (\psi_1 + \psi_2) = 2\varphi_1 - \alpha. \quad (4)$$

Таким образом,

$$n = \frac{\sin\left(\frac{\alpha+\delta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (5)$$

4. Поскольку полученная формула справедлива только для средней части спектра, дисперсию показателя преломления можно оценить, например, из следующих соображений. Чтобы ход лучей для границ спектра стал симметричным, нужно повернуть призму так, чтобы выполнялось условие $\varphi_1 = \varphi_2$ сначала для λ_{\max} , затем для λ_{\min} . При этом изменение величины угла отклонения δ для каждой длины волны при поворотах призмы будет пренебрежимо малым по сравнению с $\Delta\delta = \delta(\lambda_{\max}) - \delta(\lambda_{\min})$. Поэтому можно повернуть призму мысленно и использовать в формулах (2) и (3) $(\varphi_1 + \varphi_2)/2$ вместо φ_1 . Таким образом получаем то же соотношение между δ и показателем преломления n для любой части спектра, что и для средней части при симметричном ходе лучей (формула (5)). По формуле (5) находим $n(\lambda_{\max})$ и $n(\lambda_{\min})$. Вычисляем искомую дисперсию

$$\frac{n(\lambda_{\max}) - n(\lambda_{\min})}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}.$$

Заметим, что эта величина отрицательная!

Рекомендации для организаторов.

1. В качестве источника света можно использовать светодиодные фонарики (брелки) со сплошным спектром излучения в видимой области.

2. Ширина щели в экране и характеристики источника света должны позволять формировать достаточно яркий, узкий, практически не расходящийся пучок света.

3. Необходимо подобрать призмы, дающие широкий спектр для данного источника. Хорошо подходят призмы из флинтových сортов стекла.

4. В качестве экрана для получения изображения спектра предполагается использовать загнутый край миллиметровки.

5. Рекомендуется выдать тонко отточенный карандаш для нанесения необходимых пометок на миллиметровку и выполнения построений.

6. Необходимо, чтобы при выполнении эксперимента на миллиметровке чётко просматривался ход лучей.

7. Прищепки нужны для установки дифракционной решетки и фиксации кнопки включения фонарика.

Задача 2. Электрический «Чёрный ящик» (2)

1. Соберём измерительную цепь по схеме, изображённой на рисунке 16. Сигнал, снимаемый со входа Y , будет нам показывать суммарное напряжение на «чёрном ящике» и известном сопротивлении. Сигнал, снимаемый с сопротивления R_0 , — силу тока, проходящего через «чёрный ящик»

$$I = \frac{U_X}{R_0},$$

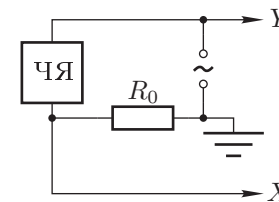


Рис. 16

где U_X — напряжение на «чёрном ящике» (здесь и далее I , U_X , U_Y — амплитудные значения токов и напряжений). Снимем зависимости U_X и U_Y от частоты сигнала f . По этим данным построим зависимость импеданса $Z = U_X R_0 / U_Y$ от частоты. Схематичный график этой зависимости представлен на рисунке 17. На графике наблюдается резонанс. Следовательно, в «чёрном ящике» должны находиться и конденсатор, и катушка. Третий элемент — это включенное последовательно с катушкой и конденсатором сопротивление, ограничивающее амплитуду силы тока при резонансе.

2. Для произвольной частоты f импеданс цепи равен

$$Z = \sqrt{(R + R_0)^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2}, \quad (6)$$

где R — сопротивление в «чёрном ящике», C — ёмкость конденсатора в «чёрном ящике», L — индуктивность катушки в «чёрном ящике». При резонансе $Z = R + R_0$. Таким образом,

$$R = \left(\frac{U_{\text{рез}Y}}{U_{\text{рез}X}} - 1\right) R_0.$$

Резонансная частота совпадает с частотой собственных колебаний в контуре

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad \text{откуда} \quad LC = \frac{1}{4\pi^2 f_{\text{рез}}^2}. \quad (7)$$

3. Из (6) видно, что при частотах, значительно превышающих резонансную,

$$Z \approx 2\pi fL.$$

Это подтверждается экспериментальными данными: зависимость $Z(f)$ при больших частотах линейна. По наклону линейного участка определяем L . После чего с помощью (7) определяем C .

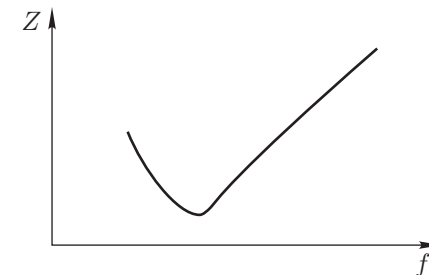


Рис. 17