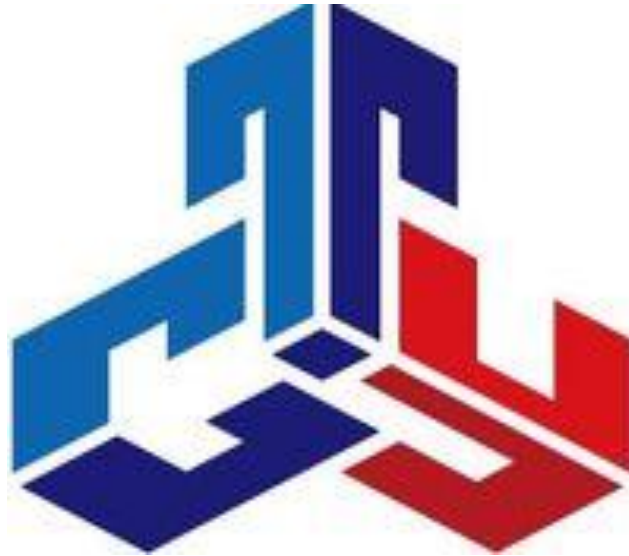


СОВРЕМЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



**ВИРТУАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ
ПО ФИЗИКЕ**

Электричество. Атомная и ядерная физика

Рязань 2018

УДК 530
ББК 22.3
В52

Виртуальные лабораторные работы по физике (Электричество. Атомная и ядерная физика): Методические указания/ сост. Коненков Н.В., Ширяев А.Г.
Совр. техн. универ-т. – Рязань, 2018. – 59 с. – 50 экз.

Рецензент: канд.техн.наук, директор ООО «Международная академическая кор-порации науки и техники» Трунин Е.Б.

В пособии приведены указания по выполнению лабораторных работ на компьютере по дисциплине «Физика» для всех специальностей

*Печатается по решению Ученого Совета
Современного технического университета*

УДК 530
ББК 22.3
В52
© Н.В.Коненков

© Современный технический университет, 2018

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.9

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА
НАПРЯЖЕНИЙ

Цель работы: изучить явление электрического резонанса напряжений в электрической цепи, содержащей активные и реактивные сопротивления (компьютерная модель), построить резонансные кривые при разных параметрах контура, определить добротность контура.

Приборы и принадлежности: компьютер с установленной программой¹ моделирования электрических схем «Начала электроники», мультиметра и калькулятора.

1 Теоретическая часть

В электрических цепях, так же как и в механических системах, могут наблюдаться резонансные явления при приближении частоты ω вынуждающего воздействия (электродвижущей силы или напряжения) к частоте собственных колебаний ω_0 контура.

Явление *электрического резонанса*², т.е. резкого возрастания силы тока или напряжения в цепи при приближении частоты ω вынуждающего воздействия к частоте собственных колебаний ω_0 контура открыто в 1868 году английским физиком М. Фарадеем³.

При рассмотрении электрических колебаний приходится иметь дело с токами, *изменяющимися со временем*. Закон Ома и вытекающие из него правила Кирхгофа были установлены для *постоянного тока*. Однако они остаются справедливыми и для мгновенных значений изменяющихся тока и напряжения, если только их изменения происходят не слишком быстро.

Электромагнитные возмущения распространяются по цепи с огромной скоростью, равной скорости света⁴ c . Если длина электрической цепи равна l и за время $\tau = l/c$, необходимое для передачи возмущения в самую отдалённую точку цепи, сила тока изменяется незначительно, то мгновенные значения силы

¹ Программа «Начала электроники» разработана в Казахском государственном национальном университете им. Аль-Фараби (<http://elektronika.newmail.ru>).

² Термин «резонанс» происходит от французского *resonance*, образованного от латинского *resono* – звучу в ответ, откликаюсь.

³ Майкл Фарадей (1791-1867), английский физик, химик и физико-химик, основоположник учения об электромагнитном поле.

⁴ По современным данным скорость света c в вакууме равна $2,99792458 \cdot 10^8$ м/с.

тока во всех сечениях цепи будут практически одинаковыми. Токи, удовлетворяющие такому условию, называются *квазистационарными*. Для периодически изменяющихся токов условие квазистационарности имеет вид

$$\tau = \frac{\ell}{c} \ll T$$

где T – период изменений (колебаний).

Для цепи длиной 3 м время передачи возмущения (запаздывание) $\tau = 10^{-8}$ с. Таким образом, вплоть до $T \sim 10^{-8}$ с (что соответствует частоте 10^6 Гц) токи в такой цепи можно считать квазистационарными. Переменный ток промышленной частоты ($\nu = 50$ Гц) квазистационарен для цепей длиной до ~ 100 км.

Переменный ток, в широком смысле – электрический ток, изменяющийся во времени. Обычно в технике под переменным током понимают периодический ток, в котором среднее значение за период силы тока и напряжения равно нулю (например, переменный *синусоидальный* ток в осветительной сети). Важной характеристикой переменного тока является его частота ν – число периодов в 1 с: $\nu = 1/T$. В электроэнергетических системах России и большинства стран мира принята стандартная частота $\nu = 50$ Гц, в США – 60 Гц. В технике связи применяются переменные токи высокой частоты (от 100 кГц до 30 ГГц). Для специальных целей в промышленности, медицине и других отраслях науки и техники используют переменные токи самых различных частот.

Электрические колебания могут возникать в электрической цепи, содержащей катушку индуктивности и конденсатор, называемой *колебательным контуром* (рис. 1).

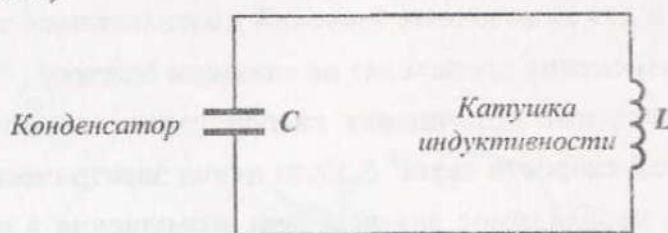


Рис. 1

Рассмотрим последовательно процессы, происходящие на участке цепи, содержащим резистор, катушку индуктивности и конденсатор, к концам которого приложено переменное напряжение

$$U = U_m \cos \omega t, \quad (1)$$

где U_m – амплитуда напряжения.

1. Переменный ток, текущий через резистор⁵ сопротивлением R (рис.2,а). При выполнении условия квазистационарности ток через резистор определяется законом Ома:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_m}{R} \cos \omega t = I_m \cos \omega t, \quad (2)$$

где $I_m = \frac{U_m}{R}$ – амплитуда силы тока.

Для наглядного изображения соотношений между переменными токами и напряжениями воспользуемся методом векторных диаграмм⁶. На рис. 2,б дана векторная диаграмма амплитудных значений тока I_m и напряжения U_m на резисторе (сдвиг фаз между I_m и U_m равен нулю).

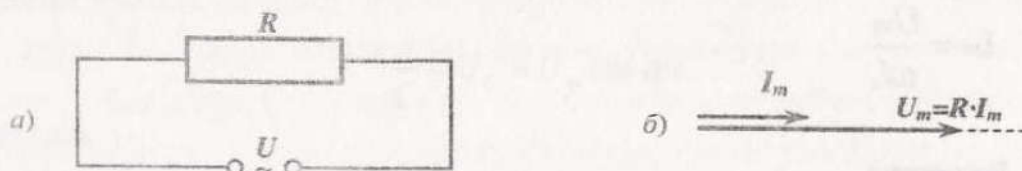


Рис. 2

2. Переменный ток, текущий через катушку⁷ индуктивностью L (рис.3,а). Если в цепи приложено переменное напряжение (1), то в ней потечёт переменный ток, в результате чего возникнет ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_c = -L \frac{dI}{dt}$. Тогда закон Ома для неоднородного участка цепи для нашего случая имеет вид

$$U_m \cos \omega t - L \frac{dI}{dt} = 0,$$

откуда

$$L \frac{dI}{dt} = U_m \cos \omega t. \quad (3)$$

⁵ Индуктивность и ёмкость резистора равны нулю.

⁶ Векторная диаграмма – графическое изображение значений периодически изменяющихся величин и соотношений между ними при помощи направленных отрезков – векторов. Векторные диаграммы широко применяются в электротехнике, акустике, оптике и т. п.

⁷ Сопротивление (омическое) и ёмкость катушки равны нулю.

Так как внешнее напряжение приложено к катушке индуктивности, то

$$U_L = L \frac{dI}{dt} \quad (4)$$

есть падение напряжения на катушке. Из уравнения (3) следует, что

$$dI = \frac{U_m}{L} \cos \omega t \cdot dt.$$

После интегрирования, учитывая, что постоянная интегрирования равна нулю (отсутствует постоянная составляющая тока), получим

$$I = \frac{U_m}{\omega L} \sin \omega t = \frac{U_m}{\omega L} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = I_m \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (5)$$

где. $I_m = \frac{U_m}{\omega L}$

Величина

$$X_L = \omega L \quad (6)$$

называется *реактивным индуктивным сопротивлением* (или *индуктивным сопротивлением*). Из выражения (6) вытекает, что для постоянного тока ($\omega = 0$) катушка индуктивности не имеет реактивного сопротивления. Постановка значения $U_m = \omega L I_m$ в выражение (3) с учётом (4) приводит к следующему значению падения напряжения на катушке индуктивности:

$$U_L = \omega L I_m \cos \omega t. \quad (7)$$

Сравнение выражений (5) и (7) приводит к выводу, что падение напряжения U_L опережает по фазе ток I , текущий через катушку, на $\pi/2$, что и показано на векторной диаграмме (рис.3,б).

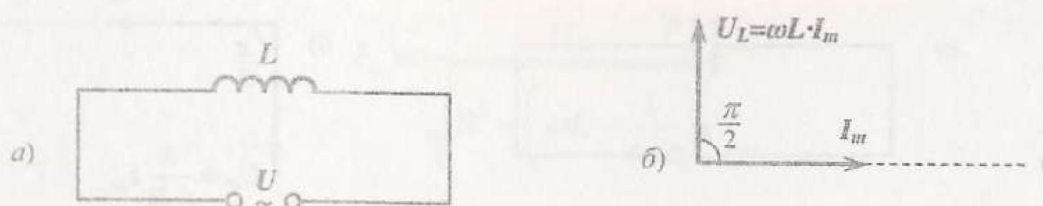


Рис. 3

3. Переменный ток, текущий через конденсатор⁸ ёмкостью C (рис.4,а). Если переменное напряжение (1) приложено к конденсатору, то он всё время перезаряжается, и в цепи течёт переменный ток. Так как всё внешнее напряжение приложено к конденсатору, а сопротивлением подводящих проводов можно пренебречь, то

$$\frac{q}{C} = U_C = U_m \cos \omega t.$$

Сила тока

$$I = \frac{dq}{dt} = -\omega C U_m \sin \omega t = I_m \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \quad (8)$$

где $I_m = \omega C U_m = \frac{U_m}{\frac{1}{\omega C}}$.

Величина

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (9)$$

называется *реактивным ёмкостным сопротивлением* (или *ёмкостным сопротивлением*). Из выражения (9) вытекает, что для постоянного тока ($\omega = 0$) сопротивление конденсатора бесконечно велико, т.е. постоянный ток через конденсатор течь не может.

Падение напряжения на конденсаторе в рассматриваемом случае

$$U_C = \frac{1}{\omega C} I_m \cos \omega t. \quad (10)$$

Сравнение выражений (8) и (10) приводит к выводу, что падение напряжения U_C отстаёт по фазе от текущего через конденсатор тока I на $\pi/2$. Это показано на векторной диаграмме (рис.4,б).

⁸ Индуктивность конденсатора равна нулю.

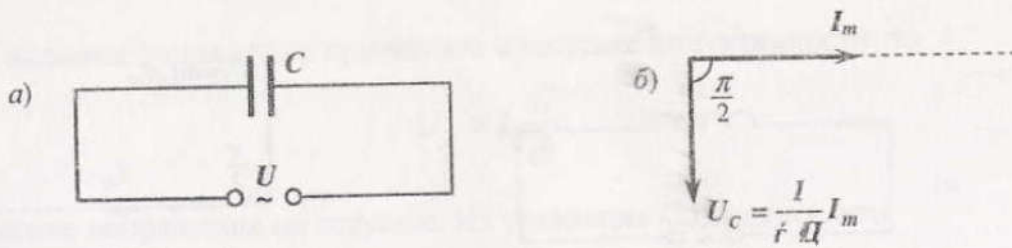


Рис. 4

4. Переменный ток, текущий через последовательно включенные резистор, катушку индуктивности и конденсатор. На рис.5,а представлен участок цепи, содержащий резистор сопротивлением R , катушку индуктивностью L и конденсатор ёмкостью C , к концам которого приложено переменное напряжение (1). В цепи возникает переменный ток, который вызовет на всех элементах цепи соответствующие падения напряжений U_R , U_L и U_C . На рис.5,б представлена векторная диаграмма амплитуд падений напряжений на резисторе (U_R), катушке (U_L) и конденсаторе (U_C).

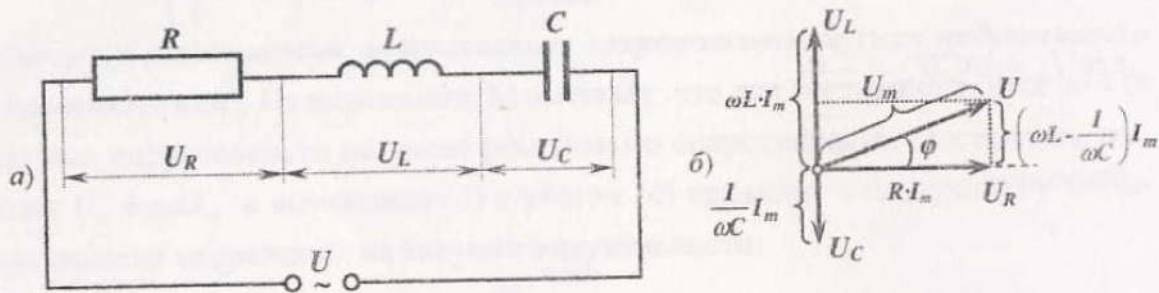


Рис. 5

Амплитуда U_m приложенного напряжения должна быть равна векторной сумме амплитуд этих падений напряжений. Как видно из рис. 5,б, угол φ определяет разность фаз между напряжением и силой тока. Из рисунка следует, что

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (11)$$

Из прямоугольного треугольника получаем

$$(R I_m)^2 + \left[\left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) I_m \right]^2 = U_m^2,$$

откуда амплитуда силы тока имеет значение

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (12)$$

Полученное выражение (12) называется *законом Ома для переменного тока*.

Если напряжение в цепи изменяется по закону $U = U_m \cos \omega t$, то в цепи течёт ток

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi), \quad (13)$$

где φ и I_m определяются соответственно формулами (11) и (12).

Величина

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (14)$$

называется *полным сопротивлением цепи* (или *импедансом*), а величина

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C} \quad \text{— реактивным сопротивлением.}$$

На реактивных сопротивлениях (в отличие от активных или омических сопротивлениях) энергия переменного тока не потребляется, однако они являются ответственными за установление фазовых соотношений между током и напряжением, влияющих на величину мощности, выделяемой в цепи. Мощность является наибольшей в том случае, если ток и напряжение в цепи совпадают по фазе.

2 Теория и методика эксперимента

Если в цепи переменного тока, содержащей *последовательно* включенные резистор сопротивлением R , катушку (соленоид) с индуктивностью L и конденсатор ёмкостью C (рис. 6) индуктивное и ёмкостное сопротивления равны между собой

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}, \quad (15)$$

то угол сдвига фаз между током и напряжением (11) обращается в ноль ($\varphi = 0$), т.е. изменения тока и напряжения происходят синфазно. Условию (15) удовлетворяет частота

$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (16)$$

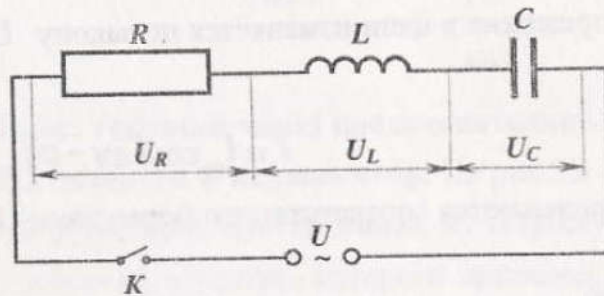


Рис. 6

В данном случае полное сопротивление цепи Z (14) становится минимальным, равным активному сопротивлению R цепи, и ток в цепи определяется этим сопротивлением, принимая максимальные (возможные при данном U_m) значения. При этом падение напряжения на активном сопротивлении равно внешнему напряжению, приложенному к цепи ($U_R = U$), а падения напряжений на конденсаторе (U_C) и катушке индуктивности (U_L) одинаковы по амплитуде и противоположны по фазе. Это явление получило название *резонанса напряжений (последовательного резонанса)*, а частота, определяемая формулой (16) называется *резонансной частотой*.

Векторная диаграмма для резонанса напряжений показана на рис. 7, а зависимость U_C (или U_L) от частоты ω переменного напряжения – на рис. 8.

В случае резонанса напряжений

$$(U_L)_{рез} = (U_C)_{рез}.$$

Подставив в эту формулу значения резонансной частоты и амплитуды напряжений на катушке индуктивности и конденсаторе, получим

$$(U_L)_{рез} = (U_C)_{рез} = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot I_m = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot U_m = Q \cdot U_m,$$

где $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ – добротность контура.

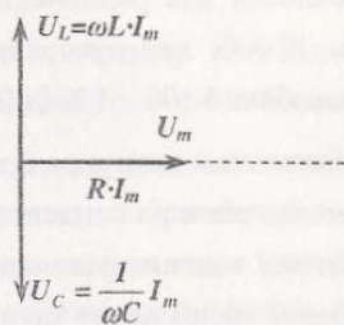


Рис. 7

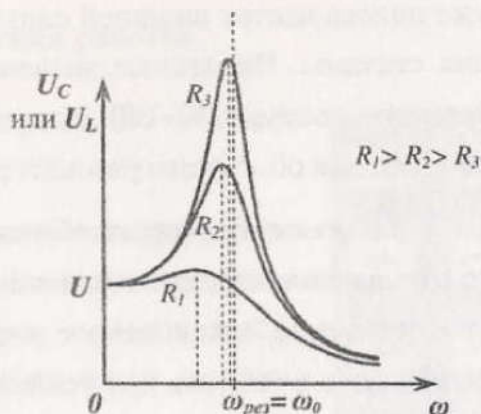


Рис. 8

Напомним, что под *добротностью* контура понимается отношение энергии, запасённой в (контуре) колебательной системе, к энергии, теряемой системой за один период колебания.

Добротность характеризует качество колебательной системы, т.к. чем больше добротность, тем меньше потери энергии в системе за одно колебание. Добротность связана с логарифмическим декрементом затухания λ ; при малых декрементах затухания $Q \approx \pi \lambda$.

Для колебательного контура с индуктивностью L , ёмкостью C и омическим сопротивлением R добротность можно рассчитать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} Q &= \frac{\pi}{\lambda} \\ \lambda &= \beta T \\ \beta &= \frac{R}{2L} \\ \text{при } \beta^2 \ll \omega_0^2, T = T_0 = \sqrt{LC} \end{aligned} \right\} Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (17)$$

где ω_0 — собственная частота контура.

Добротность — количественная характеристика резонансных свойств колебательной системы — показывает во сколько раз амплитуда установившихся вынужденных колебаний при резонансе превышает амплитуду вынужденных колебаний вдали от резонанса, т. е. в области столь низких частот, где амплитуду вынужденных колебаний можно считать не зависящей от частоты. На этом свойстве основан метод её измерения. Величина добротности характеризует также и избирательность колебательной системы; чем больше добротность, тем

уже полоса частот внешней силы, которая может вызвать интенсивные колебания системы. Численные значения добротности для радиочастотного колебательного контура 30–100; для камертона 10 000; для пластинки пьезокварца 100 000; для объёмного резонатора СВЧ колебаний 100 – 100 000.

Так как добротность обычных колебательных контуров больше единицы, то напряжение, как на катушке индуктивности, так и на конденсаторе превышает напряжение, приложенное к цепи. Поэтому явление резонанса напряжений используют в технике для усиления колебаний напряжения какой-либо определённой частоты. Например, в случае резонанса на конденсаторе можно получить напряжение с амплитудой QU_m , которое может быть значительно больше U_m . Это усиление напряжения возможно только для узкого интервала частот вблизи резонансной частоты контура, что позволяет выделить из многих сигналов одно колебание определённой частоты, т.е. радиоприёмник настроить на нужную частоту (длину волны). Явление резонанса напряжений необходимо учитывать при расчёте изоляции электрических линий, содержащих конденсаторы и катушки индуктивности, т.к. иначе может произойти их пробой.

Исследование электрического резонанса напряжения осуществляется на виртуальной монтажной плате, по схеме приведённой на рис. 6.

3 Порядок выполнения работы

1. Запустите программу «Начала электроники» с помощью преподавателя или лаборанта.
2. Соберите на виртуальной монтажной плате электрическую цепь по схеме, изображённой на рис. 6. Для этого на панели с радиодеталями (рис. 9) курсором «мышки» выберите необходимые элементы и переносите их на монтажную плату.
3. Выставьте параметры деталей: генератор переменного синусоидального напряжения: частота колебаний 45,5 Гц, эффективное значение напряжения 4,5 В; сопротивление резистора 3,0 Ом, мощность 500,0 Вт; индуктивность L катушки (соленоида) 1,0 Гн; ёмкость C конденсатора 10,0 мкФ, рабочее напряжение 800,0 В или другие, указанные преподавателем. Для этого откройте окно «Параметры детали» (рис. 10а), выделите нужный элемент цепи, щёлкнув на нём указателем «мышки», и в открывшемся списке выберите (или введите с клавиатуры) необходимые параметры элемента.
4. Вызовите мультиметр нажав клавишу, изображение которой приведено на рис. 10б, и подключите его клеммы к концам соленоида. Правила пользования цифровым мультиметром приведены в Приложении (см. ниже) или «Контекстной справке», вызываемой клавишей, изображение которой приведено на рис. 10в. Предел измерения переменного напряжения сначала лучше выставить равным 200 В, при необходимости увеличить до 750 В (см. п. 4 Приложения), а затем снова снизить до 200 В.
5. Замкните ключ K^* и запишите показания мультиметра в табл. 1 (в клетку на пересечении столбца с частотой 45,5 Гц и строки « U_L , В при $R=3,0$ Ом»).

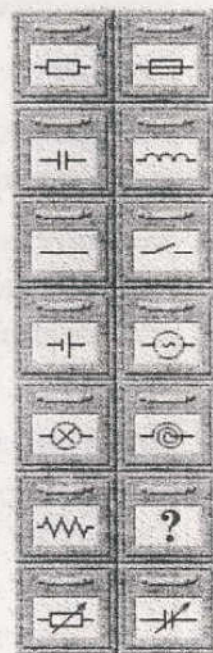


Рис. 9



а) б)



в) г)

Рис. 10

* Для замыкания и размыкания ключа используют любой из двух способов: 1) дважды быстро щёлкают курсором «мышки» по изображению ключа; 2) наведя на изображение ключа курсор «мышки», нажимают правую кнопку мыши и, в раскрывшемся меню, выбирают нужное действие.

6. Изменяя частоту колебаний генератора переменного синусоидального напряжения согласно данным табл. 1, записывайте показания мультиметра в соответствующие ячейки той же таблицы.
7. Разомкните ключ K .
8. Измените сопротивление резистора на 10,0 Ом. Мощность резистора оставьте прежнюю – 500,0 Вт.
9. Замкните ключ K и, изменяя частоту колебаний генератора переменного синусоидального напряжения согласно данным табл. 1, записывайте показания мультиметра в соответствующие ячейки строки « $U_L, В$ при $R=10,0$ Ом» той же таблицы.
10. После заполнения табл. 1 разомкните ключ K и закройте программу «Начала электроники» без сохранения изменений в схеме.

4 Обработка результатов эксперимента

1. По данным табл. 1 постройте резонансные кривые для напряжений на соленоиде при различных значениях активного сопротивления R (в одних координатных осях), откладывая по оси абсцисс частоту ν переменного синусоидального напряжения, а по оси ординат – напряжение U_L на соленоиде. График подпишите и сделайте соответствующие выводы.
2. По графику определите резонансные частоты $V_{рез}$ и максимальные значения напряжений U_L^{max} при резонансе для двух значений сопротивлений R_1 и R_2 . Это будут данные, полученные экспериментальным путём. Получающиеся значения величин записывайте в табл. 2.
3. Рассчитайте относительные и абсолютные погрешности для $V_{рез}$ и U_L^{max} по формулам:

$$\frac{\Delta V_{рез}}{V_{рез}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{2L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{2C}\right)^2}; \quad \Delta V_{рез} = V_{рез} \left(\frac{\Delta V_{рез}}{V_{рез}}\right),$$

$$\Delta U_L^{max} = 0,2 \text{ В для предела измерений } 200 \text{ В и } 2 \text{ В для предела } 750 \text{ В;}$$

$$\frac{\Delta U_L^{max}}{U_L^{max}} = \dots \%,$$

где $\Delta L = 0,1$ Гн, $\Delta C = 0,1$ мкФ.

4. По формуле (16), где $\omega_{рез} = 2\pi\nu_{рез}$ и $U_L^{max} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot U_{\Gamma}$, где U_{Γ} рассчитайте теоретическую резонансную частоту $\nu_{рез}$ и теоретическое максимальное значение напряжения U_L^{max} при резонансе.

5. Определите добротности контура по формуле (17) для двух значений сопротивлений $R_1 = 3,0 \text{ Ом}$, $R_2 = 10,0 \text{ Ом}$ и сравните их с полученными и

определите погрешности $Q_1 = \frac{U_{L \text{ при } R_1}^{max}}{U_{\Gamma}}$ и $Q_2 = \frac{U_{L \text{ при } R_2}^{max}}{U_{\Gamma}}$, где $U_{\Gamma} = 4,5 \text{ В}$. Относительные и абсолютные погрешности для Q_1 и Q_2 по формулам:

$$\frac{\Delta Q_1}{Q_1} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_{L \text{ при } R_1}^{max}}{U_{L \text{ при } R_1}^{max}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_{\Gamma}}{U_{\Gamma}}\right)^2}; \quad \Delta Q_1 = Q_1 \left(\frac{\Delta Q_1}{Q_1}\right),$$

$$\frac{\Delta Q_2}{Q_2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_{L \text{ при } R_2}^{max}}{U_{L \text{ при } R_2}^{max}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_{\Gamma}}{U_{\Gamma}}\right)^2}; \quad \Delta Q_2 = Q_2 \left(\frac{\Delta Q_2}{Q_2}\right),$$

где $\Delta U_{L \text{ при } R_1}^{max} = \Delta U_{L \text{ при } R_2}^{max} = \Delta U_L^{max} = 0,2 \text{ В}$ для предела измерений 2 В для предела измерений 750 В; $\Delta U_{\Gamma} = 0,05 \text{ В}$.

6. Сравните теоретические данные с данными, полученными из эксперимента.

7. Сделайте общий вывод о проделанной работе.

Таблица 1 Резонанс напряжений (данные для графика)

$\nu, \Gamma\text{ц}$	45,5	46,0	46,5	47,0	47,5	48,0	49,0	49,5	49,8	50,0	50,1	50,2	50,3	50,4	50,5	50,6	50,7	51,0	52,0	52,5	53,0	54,0	54,5	55,0	55,5	
U_L, B при $R=3 \text{ Ом}$																										
U_L, B при $R=10 \text{ Ом}$																										

Таблица 2 Резонанс напряжений (данные и расчёты)

Экспериментальные данные	$\frac{\Delta \nu_{\text{рез}}}{\nu_{\text{рез}}}, \%$	$\Delta \nu_{\text{рез}}, \Gamma\text{ц}$	$\Delta U_L^{\text{max}}, B$	$\frac{\Delta U_L^{\text{max}}}{U_L^{\text{max}}}, \%$	$\frac{\Delta Q_1}{Q_1}, \%$	ΔQ_1	$\frac{\Delta Q_2}{Q_2}, \%$	ΔQ_2	Теоретические данные	
									$\nu_{\text{рез}}, \Gamma\text{ц}$	U_L^{max}, B для R_1
$\nu_{\text{рез}}, \Gamma\text{ц}$ для R_1			—	—	—	—	—	—	$\nu_{\text{рез}}, \Gamma\text{ц}$	
$\nu_{\text{рез}}, \Gamma\text{ц}$ для R_2			—	—	—	—	—	—	U_L^{max}, B для R_1	
U_L^{max}, B для R_1		—	—	—	—	—	—	—	U_L^{max}, B для R_2	
U_L^{max}, B для R_2		—	—	—	—	—	—	—	Q_1	
Q_1		—	—	—	—	—	—	—	Q_2	

5 Контрольные вопросы

1. Что такое переменный электрический ток?
2. Что такое колебательный контур? Каково его назначение?
3. Что называется реактивным сопротивлением?
4. От чего зависит индуктивное, ёмкостное сопротивление?
5. Что называется векторной диаграммой?
6. Как сдвинуты по фазе колебания переменного напряжения и переменного тока, текущего через конденсатор? Катушку индуктивности? Резистор? Ответ обоснуйте также с помощью векторных диаграмм.
7. Нарисуйте и объясните векторную диаграмму для цепи переменного тока с последовательно включенными резистором, катушкой индуктивности и конденсатором.
8. Что такое электрический резонанс?
9. Какие виды электрического резонанса Вы знаете, в каких цепях они могут возникать?
10. Назовите характерные признаки резонанса напряжений.
11. Приведите и поясните графики резонанса напряжений.
12. Приведите примеры вредного и полезного проявления электрического резонанса.
13. Что понимают под добротностью контура, какую роль она играет?

6 Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 2. Электричество и магнетизм: Учеб. пособие для вузов / И.В. Савельев. – М.: ООО «Издательство Астрель»: ООО «Издательство АСТ», 2002. – 336 с.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: Учеб. Пособие для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 1999. – 718 с.
3. Трофимова Т. И. Курс физики: Учеб. Пособие для вузов. – 7-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2001. – 542 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.10

ПРАВИЛА КИРХГОФА

Цель работы: проверить справедливость правил Кирхгофа на конкретной электрической цепи (компьютерная модель).

Приборы и принадлежности: компьютер с установленной программой моделирования электрических схем «Начала электроники», мультиметра и калькулятора.

1. Теоретическая часть

Электрическим током называется упорядоченное движение заряженных частиц или заряженных макроскопических тел.

Различают два вида электрических токов: *токи проводимости и конвекционные токи.*

Электрическим током проводимости называется упорядоченное движение в веществе или вакууме свободных заряженных частиц – носителей тока. Примеры таких токов: электрические токи в металлах, полупроводниках, электролитах, ионизированных газах, плазме, пучки заряженных элементарных частиц или ионов в вакууме.

Конвекционным электрическим током (током переноса) называется электрический ток, осуществляемый движением в пространстве заряженных макроскопических тел. Примером такого тока, в частности, может служить движущаяся заряженная лента электростатического генератора, изготовленная из диэлектрического материала.

За направление электрического тока условились принимать направление движения *положительных* зарядов, образующих этот ток. Если в действительности движутся не положительные, а отрицательные частицы (например, электроны проводимости, образующие электрический ток в металлическом проводнике), то направление электрического тока считается противоположным направлению движения отрицательных зарядов.

Силой тока (или просто током) называется скалярная физическая величина I , равная отношению заряда dq , переносимого при электрическом токе сквозь рассматриваемую поверхность S за малый промежуток времени, к длительности dt этого промежутка:

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (1)$$

* Программа «Начала электроники» разработана в Казахском государственном национальном университете им. Аль-Фараби (<http://elektronika.newmail.ru>).

В случае тока проводимости в какой-либо электрической цепи под поверхностью S понимают поперечное сечение проводника.

Если направление и сила тока с течением времени не изменяются, то такой ток называется *постоянным*. Для него справедливо выражение:

$$I = \frac{q}{t}. \quad (2)$$

В международной системе единиц (СИ) единицей силы тока является *ампер* (А).

Для характеристики направления электрического тока в разных точках рассматриваемой поверхности и распределения силы тока по этой поверхности вводится вектор плотности тока.

Плотностью электрического тока проводимости называется вектор \vec{j} , совпадающий с направлением электрического тока в рассматриваемой точке и численно равный отношению силы тока dI сквозь малый элемент поверхности, перпендикулярной направлению тока, к площади dS_{\perp} этого элемента:

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}}. \quad (3)$$

Зная вектор плотности тока в каждой точке проводника, можно найти силу тока через любую поверхность S :

$$I = \int_{(S)} \vec{j} \cdot d\vec{S} = \int_{(S)} j_n \cdot dS, \quad (4)$$

где $d\vec{S} = \vec{n} \cdot dS$ – вектор малого элемента поверхности;

\vec{n} – единичный вектор нормали;

j_n – проекция плотности тока на нормаль \vec{n} .

Опыты показали, что плотность постоянного электрического тока одинакова по всему поперечному сечению S однородного проводника. Поэтому для постоянного тока в однородном проводнике сила тока

$$I = j \cdot S. \quad (5)$$

Электрический ток проводимости возникает под действием электрического поля. Однако силы кулоновского взаимодействия зарядов вызывают такое перераспределение носителей тока (свободных носителей заряда) в проводнике, при котором потенциалы во всех его точках выравниваются и электрическое поле в проводнике исчезает.

Для поддержания в цепи *постоянного* тока проводимости нужно, чтобы на носители тока действовали помимо кулоновских сил ещё какие-то иные, неэлектрические, силы, называемые *сторонними силами*.

Если кулоновские силы вызывают соединение разноимённых зарядов, выравнивание потенциалов и исчезновение электрического поля в проводнике, то

сторонние силы вызывают разделение разноимённых зарядов и поддерживают разность потенциалов на концах проводника. Сторонние силы действуют на носители тока внутри источника электрической энергии (гальванических элементов, аккумуляторов, электрических генераторов и т.п.).

Источник сторонних сил так же необходим в цепи постоянного тока, как необходим насос для создания постоянной циркуляции жидкости в любой замкнутой гидравлической системе. Роль насоса в электрической цепи играет источник электрической энергии. Под действием сторонних сил носители тока движутся внутри источника электрической энергии *против* сил электростатического поля, так что на концах внешней цепи поддерживается постоянная разность потенциалов и в цепи идёт постоянный электрический ток. Перемещая заряды, сторонние силы совершают работу за счёт энергии, затрачиваемой в источнике электрической энергии. Так, например, в электромагнитном генераторе работа сторонних сил производится за счёт механической энергии, расходуемой на вращение ротора генератора, а в аккумуляторах и гальванических элементах – за счёт энергии химических реакций на электродах.

Сторонние силы можно охарактеризовать работой, которую они совершают над перемещающимися по цепи зарядами. Величина, равная работе сторонних сил над единичным положительным зарядом, называется *электродвижущей силой* (ЭДС) \mathcal{E} , действующей в цепи или на её участке. Следовательно, если работе сторонних сил над зарядом q равна A , то

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q}. \quad (6)$$

Измеряется ЭДС в вольтах (В).

ЭДС источника тока равна электрическому напряжению на его зажимах при разомкнутой цепи.

Физическая величина, численно равная суммарной работе, совершаемой кулоновскими и сторонними силами при перемещении по участку цепи $1-2$ единичного положительного заряда, называется *падением напряжения* или просто *напряжением* U

$$U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12}. \quad (7)$$

Участок цепи, на котором не действуют сторонние силы, т.е. $\mathcal{E}=0$, называется *однородным*. В противном случае участок цепи называется *неоднородным*. Для *однородного* участка цепи

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2, \quad (8)$$

т.е. напряжение совпадает с разностью потенциалов на концах участка цепи.

Основными законами для постоянного тока являются: закон Ома для однородного участка цепи, закон Ома для неоднородного участка цепи (обобщённый закон Ома для цепи, содержащей ЭДС) и закон Ома для полной (замкнутой) цепи.

Закон Ома для однородного участка цепи записывается в виде:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (9)$$

где I – сила тока на участке цепи;
 U – напряжение на концах этого участка цепи;
 R – сопротивление рассматриваемого участка цепи (в СИ $[R] = 1$ Ом).

Закон Ома для неоднородного участка цепи (обобщённый закон Ома для цепи содержащей ЭДС) записывается в виде:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 \pm \mathcal{E}_{12}}{R + r}, \quad (10)$$

где I – сила тока на неоднородном участке цепи;
 $(\varphi_1 - \varphi_2)$ – разность потенциалов на концах рассматриваемого участка цепи (рис. 1);
 \mathcal{E}_{12} – ЭДС, действующая на этом участке (рис. 1);
 R – сопротивление внешнего участка цепи;
 r – внутреннее сопротивление источника тока.

Правило знаков для ЭДС источников тока, включенных на участке цепи 1–2: знак «+» перед \mathcal{E}_{12} ставится когда ЭДС способствует движению положительных носителей тока в выбранном направлении 1–2 (т.е. внутри источника тока обход в направлении 1–2 связан с перемещением от катода к аноду, как на рис. 1) и знак «–» если ЭДС препятствует движению положительных носителей тока в данном направлении.

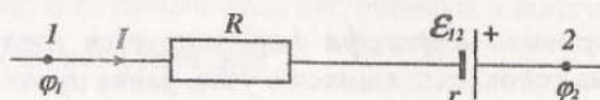


Рис. 1

Закон Ома для полной цепи (в этом случае $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$) записывается в виде:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}, \quad (11)$$

где I – сила тока в цепи;
 \mathcal{E} – ЭДС, действующая на этом участке (рис. 2);
 R – сопротивление внешнего участка цепи;
 r – внутреннее сопротивление источника тока.

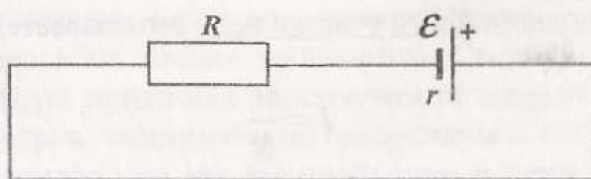


Рис. 2

2. Теория и методика эксперимента

Законы Ома (9) – (11) позволяют легко определить силу тока только для простейших неразветвлённых электрических цепей. Расчёт же *разветвлённых цепей* значительно упрощается, если использовать правила Кирхгофа*. Они устанавливают соотношения для токов и напряжений в разветвлённых электрических цепях постоянного тока.

Первое правило Кирхгофа применяется к узлам электрической цепи. *Узлом электрической цепи* называется место соединения трёх и более проводников (рис. 3).

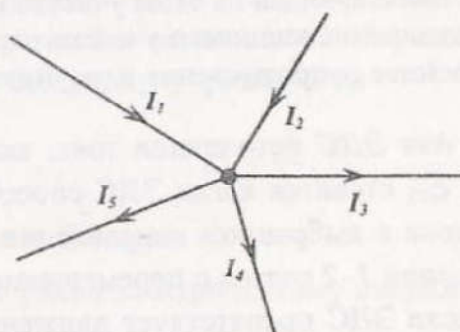


Рис.3

Первое правило Кирхгофа формулируется следующим образом: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю.

Математическая запись имеет вид:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0, \quad (12)$$

где n – число токов, сходящихся в узле.

Первое правило Кирхгофа является следствием закона сохранения электрического заряда, из которого следует, что при установившемся режиме заряд, приходящий к любой точке, должен равняться заряду, уходящему от точки за то же время.

* Густав Роберт Кирхгоф (1824-1887) – немецкий физик.

Условно принято считать ток, текущий к узлу, положительным, текущий от узла, – отрицательным. Например, для узла, изображённого на рис. 3, первое правило Кирхгофа записывается следующим образом:

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 - I_5 = 0.$$

Второе правило Кирхгофа относится к любому, произвольно выбранному в разветвлённой цепи, контуру. Например, в схеме (рис. 4) выделен контур 1-2-3-4-1 и показано направление его обхода, которое выбирается произвольно.

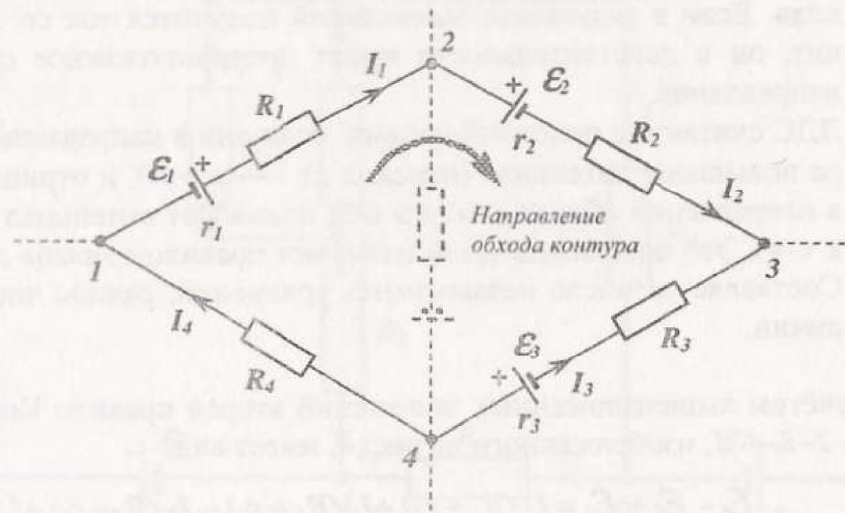


Рис. 4

Второе правило Кирхгофа формулируется следующим образом: в любом замкнутом контуре, произвольно выбранном в разветвлённой цепи, алгебраическая сумма падений напряжений на отдельных участках (включая падение напряжения на внутренних сопротивлениях источников токов) равна алгебраической сумме ЭДС всех источников тока, включённых в контур.

Математическая запись имеет вид:

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{i=1}^m \mathcal{E}_i, \quad (13)$$

- где n – количество участков выбранного замкнутого контура;
 m – число источников ЭДС, действующих в выбранном замкнутом контуре;
 I_k – силы токов на участках выбранного замкнутого контура;
 R_k – полное сопротивление рассматриваемого участка цепи;
 \mathcal{E}_i – ЭДС, действующие в выбранном замкнутом контуре.

Второе правило Кирхгофа является обобщением закона Ома на разветвлённые электрические цепи.

При расчёте электрических цепей с использованием правил Кирхгофа придерживаются следующих положений:

- 1) Направление обхода замкнутого контура выбирается произвольно (обычно по часовой стрелке, как это показано на рис. 4).
- 2) Указываются направления токов. Все токи, совпадающие с направлением обхода контура, считаются положительными, а несовпадающие – отрицательными (правило знаков для токов). Поскольку обычно направления токов неизвестны, можно считать их совпадающими с направлением обхода. Если в результате вычислений получится ток со знаком «-», значит, он в действительности имеет противоположное предполагаемому направление.
- 3) ЭДС считаются положительными, если они в направлении обхода контура повышают потенциал (переход от «-» к «+»), и отрицательными, если в направлении обхода контура они понижают потенциал (переход от «+» к «-»). Это положение часто называют правилом знаков для ЭДС.
- 4) Составляется число независимых уравнений, равное числу искомых величин.

С учётом вышеизложенных положений второе правило Кирхгофа для контура 1-2-3-4-1, изображённого на рис. 4, имеет вид:

$$\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = I_1(R_1 + r_1) + I_2(R_2 + r_2) - I_3(R_3 + r_3) + I_4 R_4,$$

где $\mathcal{E}_1, \dots, \mathcal{E}_3$ – ЭДС, действующие в выбранном контуре;

I_1, \dots, I_4 – силы токов на отдельных участках выбранного контура;

R_1, \dots, R_4 – сопротивления участков контура;

r_1, \dots, r_3 – внутренние сопротивления источников тока в выбранном контуре.

Проверка правил Кирхгофа осуществляется на виртуальной монтажной плате, схема которой приведена на рис. 5.

В схеме использованы следующие обозначения:

$\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3$ – ЭДС источников тока,

R_1, \dots, R_8 – сопротивления,

K_1 и K_2 – ключи,

r_1 и r_3 – внутренние сопротивления источников тока,

1, 2, 3, 4, 5 – номера узлов электрической цепи.

Направления токов I_1, \dots, I_8 указаны произвольно.

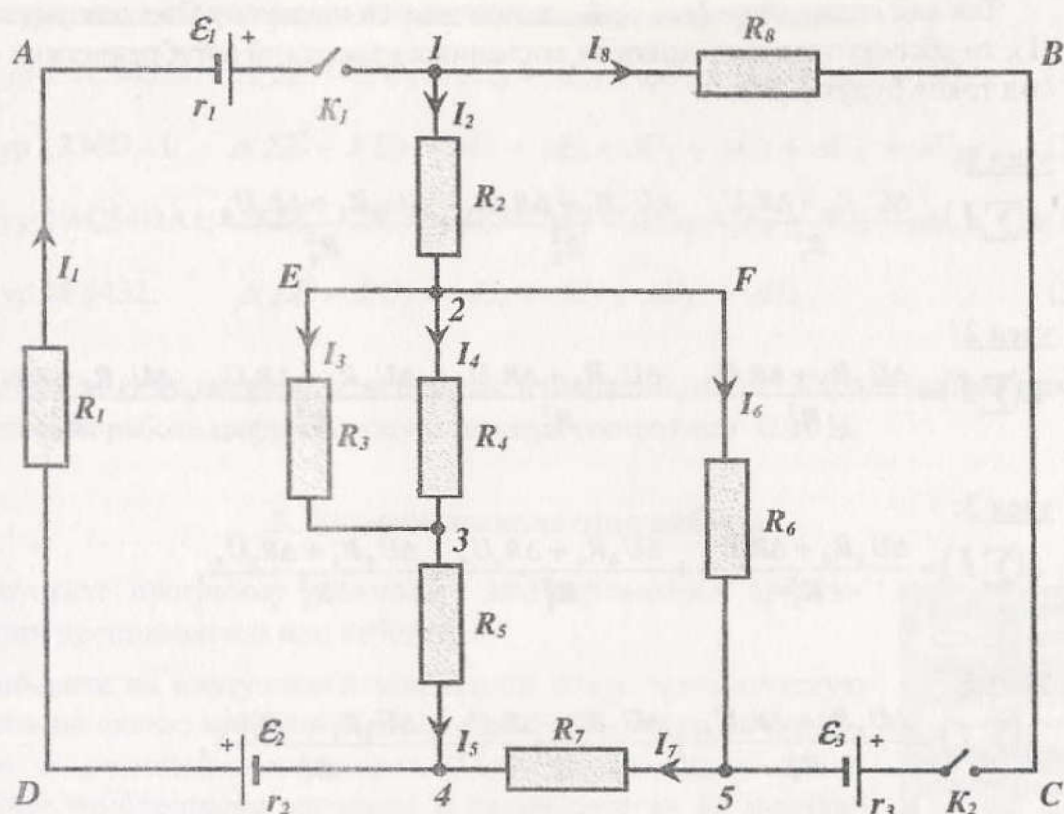


Рис. 5

Падение напряжений U_1, \dots, U_8 на участках цепи и ЭДС источников токов $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2$ и \mathcal{E}_3 измеряются мультиметром с большим внутренним сопротивлением, чтобы его подключение к участкам цепи практически не изменяло бы распределение токов в цепях. Реальные направления токов через сопротивления R_1, \dots, R_8 определяются с помощью мультиметра (см. п.б порядка выполнения работы).

Для измеренных значений напряжений U_1, \dots, U_8 на сопротивлениях R_1, \dots, R_8 и величин самих сопротивлений по закону Ома для участка цепи (1) рассчитываются силы токов I_1, \dots, I_8 для каждого участка цепи. Зная направления токов и их величины, проверяют справедливость первого правила Кирхгофа. Так, например, для электрической цепи, изображённой на рис.5, должно быть:

$$\text{узел 1: } \sum I = I_1 - I_2 - I_8 = 0, \quad (14)$$

$$\text{узел 2: } \sum I = I_2 - I_3 - I_4 - I_6 = 0, \quad (15)$$

$$\text{узел 3: } \sum I = I_3 + I_4 - I_5 = 0. \quad (16)$$

$$\text{узел 4: } \sum I = I_5 + I_7 - I_1 = 0. \quad (17)$$

$$\text{узел 5: } \Sigma I = I_6 + I_8 - I_7 = 0. \quad (18)$$

Так как силы токов I_1, \dots, I_8 вычисляются по закону Ома для участка цепи (1), то абсолютные погрешности косвенных измерений алгебраических сумм сил токов будут равны:

узел 1:

$$\Delta(\Sigma I) = \frac{\Delta U_1 R_1 + \Delta R_1 U_1}{R_1^2} + \frac{\Delta U_2 R_2 + \Delta R_2 U_2}{R_2^2} + \frac{\Delta U_8 R_8 + \Delta R_8 U_8}{R_8^2}, \quad (20)$$

узел 2:

$$\Delta(\Sigma I) = \frac{\Delta U_2 R_2 + \Delta R_2 U_2}{R_2^2} + \frac{\Delta U_3 R_3 + \Delta R_3 U_3}{R_3^2} + \frac{\Delta U_4 R_4 + \Delta R_4 U_4}{R_4^2} + \frac{\Delta U_6 R_6 + \Delta R_6 U_6}{R_6^2}, \quad (21)$$

узел 3:

$$\Delta(\Sigma I) = \frac{\Delta U_3 R_3 + \Delta R_3 U_3}{R_3^2} + \frac{\Delta U_4 R_4 + \Delta R_4 U_4}{R_4^2} + \frac{\Delta U_5 R_5 + \Delta R_5 U_5}{R_5^2}, \quad (22)$$

узел 4:

$$\Delta(\Sigma I) = \frac{\Delta U_5 R_5 + \Delta R_5 U_5}{R_5^2} + \frac{\Delta U_7 R_7 + \Delta R_7 U_7}{R_7^2} + \frac{\Delta U_1 R_1 + \Delta R_1 U_1}{R_1^2}, \quad (23)$$

узел 5:

$$\Delta(\Sigma I) = \frac{\Delta U_6 R_6 + \Delta R_6 U_6}{R_6^2} + \frac{\Delta U_8 R_8 + \Delta R_8 U_8}{R_8^2} + \frac{\Delta U_7 R_7 + \Delta R_7 U_7}{R_7^2}. \quad (24)$$

Второе правило Кирхгофа для некоторых контуров (рис.5) записывается в виде:

$$\begin{aligned} \text{контур 1BC54321: } & -\mathcal{E}_3 = U_8 + U_7 - U_5 - U_4 - U_2 \\ & \text{или } -\mathcal{E}_3 - U_8 - U_7 + U_5 + U_4 + U_2 = 0; \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \text{контур 1234DA1: } & \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 = U_2 + U_4 + U_5 + U_1 \\ & \text{или } \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 - U_2 - U_4 - U_5 - U_1 = 0; \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \text{контур 1BC54DA1: } & \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_2 = U_8 + U_7 + U_1 \\ & \text{или } \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_2 - U_8 - U_7 - U_1 = 0; \end{aligned} \quad (27)$$

$$\text{контур 2F5432: } \quad 0 = U_6 + U_7 - U_5 - U_4. \quad (28)$$

Абсолютные ошибки разности алгебраических сумм ЭДС и алгебраических сумм падений напряжений рассчитываются по формулам:

$$\text{контур 1BC54321: } \Delta(\Sigma \mathcal{E} - \Sigma U) = \Delta \mathcal{E}_3 + \Delta U_8 + \Delta U_7 + \Delta U_5 + \Delta U_4 + \Delta U_2; \quad (29)$$

$$\text{контур 1234DA1: } \Delta(\Sigma \mathcal{E} - \Sigma U) = \Delta \mathcal{E}_1 + \Delta \mathcal{E}_2 + \Delta U_2 + \Delta U_4 + \Delta U_5 + \Delta U_1; \quad (30)$$

$$\text{контур 1BC54DA1: } \Delta(\Sigma \mathcal{E} - \Sigma U) = \Delta \mathcal{E}_1 + \Delta \mathcal{E}_2 + \Delta \mathcal{E}_3 + \Delta U_8 + \Delta U_7 + \Delta U_1; \quad (31)$$

$$\text{контур 2F5432: } \Delta(\Sigma \mathcal{E} - \Sigma U) = \Delta U_6 + \Delta U_7 + \Delta U_5 + \Delta U_4. \quad (32)$$

Абсолютные погрешности прямых измерений ($\Delta \mathcal{E}$ и ΔU) для используемого в данной работе цифрового мультиметра составляют 0,02 В.

3. Порядок выполнения работы

1. Запустите программу «Начала электроники» при помощи преподавателя или лаборанта.
2. Соберите на виртуальной монтажной плате электрическую цепь по схеме, изображённой на рис. 5. Для этого на панели с радиодеталями (рис. 6) курсором «мышки» выберите необходимые элементы и переносите их на монтажную плату.
3. Выставьте номиналы резисторов: $R_1=580,0$ Ом, $R_2=510,0$ Ом, $R_3=620,0$ Ом, $R_4=430,0$ Ом, $R_5=120,0$ Ом, $R_6=510,0$ Ом, $R_7=300,0$ Ом, $R_8=270,0$ Ом или другие, указанные преподавателем. Для этого откройте окно «Параметры детали» (рис. 7а), выделите нужный резистор, щёлкнув на нём указателем «мышки», и в открывшемся списке выберите необходимый номинал резистора. Далее также щёлкая указателем «мышки» на других резисторах, в окне свойств элемента выберите необходимые номиналы.
4. Величины всех сопротивлений и их абсолютные погрешности (две единицы младшего разряда, например, $R_1=580,0$ Ом, $R_2=180$ кОм, тогда $\Delta R_1=0,2$ Ом, $\Delta R_2=2$ кОм) запишите в табл. 1.
5. Выставьте рабочие напряжения и полярности источников постоянного тока (батарей) аналогично тому, как выбирали номиналы резисторов: для первой батареи 9,0 В, для второй 4,5 В, для третьей 12,0 В или другие, указанные преподавателем.

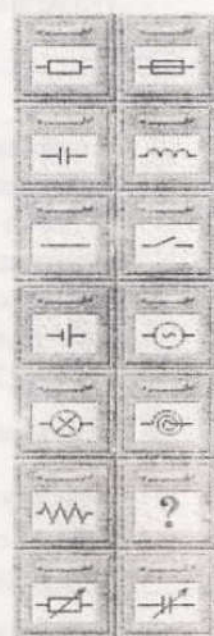


Рис. 6

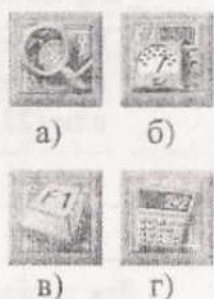


Рис. 7

6. Вызовите мультиметр, нажав клавишу, изображение которой приведено на рис. 7б, и измерьте ЭДС источников тока \mathcal{E}_1 , \mathcal{E}_2 и \mathcal{E}_3 (ключи K_1 и K_2 обязательно разомкнуты!^{*}). Правила пользования цифровым мультиметром приведены в Приложении (см. ниже) или «Контекстной справке», вызываемой клавишей, изображение которой приведено на рис. 7в.
7. Величины ЭДС и их абсолютные погрешности (две единицы младшего разряда) запишите в табл. 1.
8. Замкните ключи K_1 и K_2 .
9. Для узла и контура, указанных преподавателем или лаборантом, измерьте мультиметром падения напряжений и направления токов на соответствующих резисторах. Направления токов определяют по индикатору мультиметра – если на табло положительное число, то ток течёт от красной клеммы мультиметра («+») к тёмно-синей клемме («-»). Реальные направления токов поставьте на схеме в Вашем отчёте, исправив (если это необходимо) направления, указанные на рис.5, а значения измеренных напряжений занесите в табл. 1.

4. Обработка результатов эксперимента

1. Если направления токов, определённые в п. 9 Порядка выполнения работы, совпадают с направлениями, указанными на рис. 5, знак у соответствующего тока (напряжения) в уравнениях (14)-(18), (25)-(28) остаётся прежним. В противном случае измените знак на противоположный и соответствующие уравнения запишите в виде, адаптированном для Вашего конкретного случая. Нумерацию уравнений оставьте прежней: (14), (15), (16), (17), (18), (25), (26), (27), (28). Это будут ваши «рабочие формулы».
2. Применяя закон Ома для участка цепи $\left(I = \frac{U}{R}\right)$, рассчитайте величины соответствующих токов и запишите в табл. 1. Для расчётов можно использовать «Калькулятор», вызвав его нажатием клавиши, изображение которой приведено на рис. 7г.
3. Абсолютные погрешности измеренных напряжений (ΔU) будут равны $\Delta \mathcal{E}$ (см. п.7 Порядка выполнения работы), т.к. измерения проводятся одним и тем же мультиметром. Запишите эти погрешности для напряжений в табл. 1.
4. Произведите расчёты для указанного преподавателем узла и контура, используя соответствующие формулы (14), (15), (16), (17), (18), (25), (26), (27) или (28), и занесите полученные данные в табл. 2.

^{*} Для замыкания и размыкания ключей используют любой из двух способов: 1) дважды быстро щёлкают курсором «мышки» по изображению ключа; 2) наведя на изображение ключа курсор «мышки», нажимают правую кнопку мыши и в раскрывшемся меню выбирают нужное действие.

5. Для выбранных узла и контура рассчитайте погрешности $\Delta(\Sigma I)$ и $\Delta(\Sigma \mathcal{E} - \Sigma U)$ по соответствующим для Вашего контура и узла формулам (20), (21), (22), (23), (24), (29), (30), (31) или (32) и занесите в табл. 2.

При правильно выполненном эксперименте величина ΣI не должна отличаться от нуля более чем на величину абсолютной погрешности $\Delta(\Sigma I)$. Аналогично, величина $\Sigma \mathcal{E} - \Sigma U$ должна отличаться от нуля на величину не более абсолютной погрешности $\Delta(\Sigma \mathcal{E} - \Sigma U)$.

6. Закройте программу «Начала электроники».
7. Сделайте вывод о проделанной работе.



Таблица 1

	$R_i, \text{ Ом}$	$\Delta R_i, \text{ Ом}$	$U_i, \text{ В}$	$\Delta U_i, \text{ В}$	$I_i, \text{ А}$	
R_1						$\mathcal{E}_1 = \text{--- В}$
R_2						$\Delta \mathcal{E}_1 = \text{--- В}$
R_3						
R_4						$\mathcal{E}_2 = \text{--- В}$
R_5						$\Delta \mathcal{E}_2 = \text{--- В}$
R_6						
R_7						$\mathcal{E}_3 = \text{--- В}$
R_8						$\Delta \mathcal{E}_3 = \text{--- В}$

Таблица 2

№ узла	$\Sigma I, \text{ А}$	$\Delta(\Sigma I), \text{ А}$	Обозначение контура	$\Sigma \mathcal{E}, \text{ В}$	$\Sigma U, \text{ В}$	$\Sigma \mathcal{E} - \Sigma U, \text{ В}$	$\Delta(\Sigma \mathcal{E} - \Sigma U), \text{ В}$
1			1BC54321				
2			1234DA1				
3			2F5432				
4			1BC54DA1				
5							

5. Контрольные вопросы

1. Что называется электрическим током?
2. Какие виды электрических токов Вы знаете?
3. Какой участок цепи называется однородным? неоднородным? Приведите примеры.
4. Назовите основные законы для постоянного тока. Сформулируйте эти законы и запишите их математические выражения.
5. Поясните физический смысл электродвижущей силы, напряжения и разности потенциалов на участке электрической цепи.
6. Что понимают под сторонними силами и какова их роль в цепи постоянного тока?
7. Каковы правила знаков для силы тока и ЭДС при записи обобщённого закона Ома для участка цепи?
8. Запишите и сформулируйте правила Кирхгофа.
9. Следствиями каких законов являются правила Кирхгофа?
10. Какие положения следует помнить при решении задач с использованием правил Кирхгофа?
11. Запишите правила Кирхгофа для конкретной электрической цепи, предложенной преподавателем.
12. Как проверяется правильность выполнения эксперимента в данной работе?

6. Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 2. Электричество и магнетизм: Учеб. пособие для вузов / И.В. Савельев. – М.: ООО «Издательство Астрель»: ООО «Издательство АСТ», 2002. – 336 с.: ил.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 1999. – 718 с.: ил.
3. Трофимова Т. И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – 7-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2001. – 542 с.: ил.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ β -ИЗЛУЧЕНИЯ ВЕЩЕСТВОМ

Цель работы: изучение поглощающих свойств алюминия и определение максимальной энергии β -излучения (верхней границы β -спектра) на компьютерной модели.

Приборы и принадлежности: компьютер с установленной программой моделирования поглощения β -излучения алюминием «beta_rays.exe».

1. Теоретическая часть

Радиоактивностью называется явление самопроизвольного превращения нестабильных ядер одного элемента в ядра другого, сопровождаемое испусканием различных видов излучений и элементарных частиц. К числу радиоактивных процессов относятся: α -распад, β -распад и спонтанное (самопроизвольное) деление тяжёлых ядер.

Явление радиоактивности было открыто в 1896 году французским учёным А. Беккерелем. Большой вклад в изучение радиоактивных веществ внесли французские учёные П. Кюри, М. Складовская-Кюри и русские – А.П. Соколов, В.А. Бородавский.

Радиоактивный распад описывается статистическим законом, согласно которому число нераспавшихся радиоактивных ядер убывает со временем по закону:

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где N_0 – начальное число нераспавшихся ядер,
 N – число нераспавшихся ядер в момент времени t ,
 λ – постоянная радиоактивного распада для данного вещества.

Знак « $-$ » в формуле закона означает, что общее число нераспавшихся радиоактивных ядер в процессе распада уменьшается. Процесс изменения числа радиоактивных ядер N с течением времени t можно представить графически следующим образом:

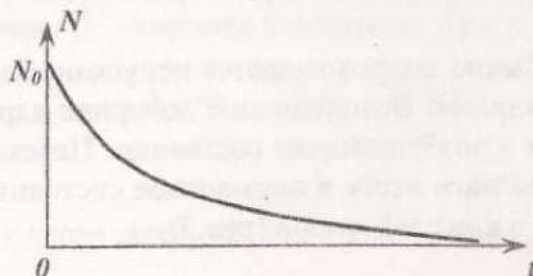


Рис.1

Различают три вида радиоактивных излучений: α -, β - частицы и γ лучи. Их можно разделить в магнитном или электрическом полях (см. рис.2).

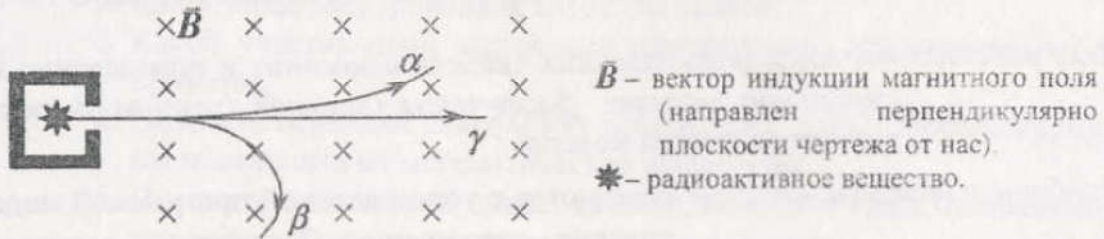


Рис.2

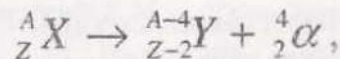
Альфа-излучение представляет собой поток ядер гелия ${}^4_2\text{He}$ (α -частиц). Оно обладает высокой ионизирующей способностью и малой проникающей способностью.

Бета-излучение представляет собой поток быстрых электронов или позитронов. Оно обладает меньшей ионизирующей способностью и большей проникающей способностью по сравнению с α -излучением.

Гамма-излучение представляет собой коротковолновое электромагнитное излучение с длиной волны меньше 10^{-10} м. Оно обладает относительно слабой ионизирующей способностью и очень большой проникающей способностью.

Явление α -распада состоит в том, что тяжёлое радиоактивное ядро самопроизвольно превращается в ядро другого элемента с испусканием α -частицы, состоящей из двух протонов и двух нейтронов, которые образуют устойчивую систему.

Альфа-распад протекает по схеме:



где X – химический символ распадающегося (материнского) ядра,

Y – химический символ образующегося (дочернего) ядра,

A – массовое число,

Z – зарядовое число, равное порядковому номеру химического элемента в периодической системе Д.И. Менделеева.

Альфа-распад обычно сопровождается испусканием γ лучей, которые излучаются дочерними ядрами. Возникающие дочерние ядра могут находиться как в нормальном, так и в возбуждённом состоянии. Переходя в состояние с меньшей энергией (в конечном итоге в нормальное состояние), такие ядра испускают избыток энергии в виде γ -фотонов (рис.3).

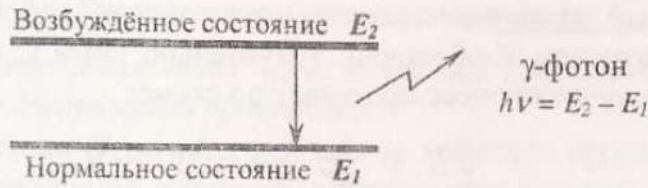
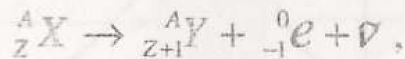


Рис. 3

Альфа-частицы, испускаемые ядром, обладают определённой энергией. Скорости, с которыми α -частицы вылетают из распавшегося ядра, очень велики ($\sim 10^7$ м/с; кинетическая энергия порядка нескольких мегаэлектронвольт). Проходя через вещество, α -частицы взаимодействуют с его молекулами или атомами, ионизируя их и теряя при этом энергию. На своём пути до полной остановки (это расстояние называют *пробегом*) α -частица образует 10^5 пар ионов. Пробег α -частиц в веществе весьма мал. Так в воздухе при нормальном давлении их пробег составляет несколько сантиметров, в твёрдом веществе пробег имеет величину порядка 10^{-2} мм (α -частицы полностью задерживаются обычным листом бумаги).

При β -распаде радиоактивные ядра самопроизвольно превращаются в ядра другого элемента, при этом испускаются β -частицы (электроны или позитроны). Их рождение происходит при взаимном превращении нуклонов ядра (протонов и нейтронов). Бета-радиоактивные ядра могут распадаться в результате одного из трёх процессов: β^- -распада (*электронного распада*), β^+ -распада (*позитронного распада*) или e^- -захвате (*электронного захвата*).

Электронный распад (β^- -распад) заключается в превращении одного ядра в другое с испусканием β^- -частицы (электрона ${}_{-1}^0e$) и протекает по схеме:

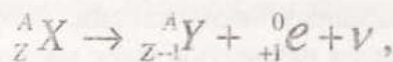


где $\bar{\nu}$ – антинейтрино.

При β^- -распаде внутри ядра один из нейтронов 1_0n превращается в протон 1_1p :

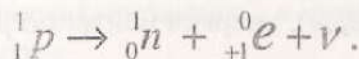


Позитронный распад (β^+ -распад) заключается в превращении одного ядра в другое с испусканием β^+ -частицы (позитрона ${}_{+1}^0e$) и протекает по схеме:

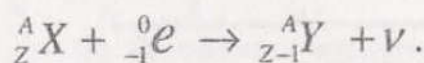


где ν – нейтрино.

При β^+ -распаде внутри ядра один из протонов 1_1p превращается в нейтрон 1_0n :



Электронный захват (*e*-захват) представляет собой поглощение ядром одного из электронов К-оболочки, значительно реже L или М-оболочки (см. рис.4). В этом случае процесс протекает по схеме:



В результате захвате ядром электрона один из протонов ${}^1_1 p$ ядра превращается в нейтрон ${}^1_0 n$, испуская при этом нейтрино ν :

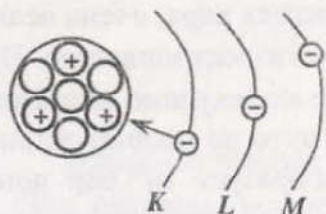
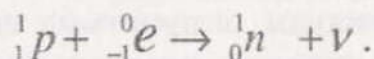


Рис.4

Возникшее новое ядро может оказаться в возбуждённом состоянии и переходя в более низкие энергетические состояния, испускает γ -фотоны. Место в электронной оболочке, освобождённое захваченным электроном, заполняется электронами из вышележащих слоёв, в результате чего возникают рентгеновские лучи (по которым *e*-захват легко и обнаруживается).

Бета-распад может сопровождаться испусканием γ -лучей (γ -фотонов). Механизм их возникновения тот же, что в случае α -распада.

В отличие от α -частиц, испускаемые при бета-распаде β -частицы обладают различными кинетическими энергиями от нуля до максимальной E_{max} и имеют непрерывный энергетический спектр (β -спектр), пример которого представлен на рис.5.

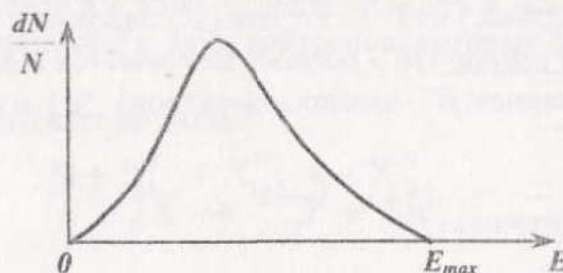


Рис.5

Бета-спектр представляет собой распределение β -частиц по энергиям и даёт возможность определить долю β -частиц dN/N , испускаемых в единицу времени, энергия которых заключена в интервале dE . Площадь, охватываемая кривой, пропорциональна общему числу частиц, испускаемых в единицу времени. Энергия E_{max} определяется разностью масс материнского ядра и массами электрона и дочернего ядра. Она называется верхней границей β -спектра и является характеристикой радиоактивного ядра. Непрерывность β -спектра объясняется тем, что энергия, выделяемая при β -распаде, распределяется случайным образом между частицей и нейтрино (антинейтрино). В том случае, когда β -частица получает всю энергию (E_{max}), энергия нейтрино равна нулю.

2. Теория и методика эксперимента

При прохождении β -излучения через вещество наблюдается его поглощение, обусловленное следующими процессами:

1. При взаимодействии β -частицы с атомами вещества происходит ионизация последнего (образование ионов из нейтральных атомов). С уменьшением скорости частицы растёт степень ионизации. Энергия β -частицы постепенно уменьшается и в конце концов частица поглощается веществом.
2. При прохождении β -частиц вблизи атомного ядра они тормозятся его электрическим полем, вследствие чего возникает рентгеновское излучение. Чем больше заряд ядра, тем сильнее тормозное взаимодействие.
3. Для β -частиц с малыми скоростями заметную роль играет упругое рассеяние на электронах атомов и ядрах.

Процесс поглощения излучения веществом описывается экспоненциальным законом:

$$I = I_0 e^{-\mu x},$$

- где I_0 – интенсивность излучения, падающего на вещество (рис. 6),
 I – интенсивность излучения после прохождения слоя вещества толщиной x ,
 μ – линейный коэффициент поглощения β -частиц, зависящий от вида излучения и рода вещества,
 x – толщина слоя вещества.

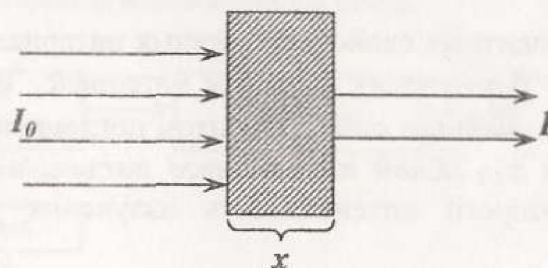


Рис. 6

Так как интенсивность β -излучения пропорциональна числу частиц, зарегистрированных в единицу времени, то закон поглощения можно записать в виде:

$$n = n_0 e^{-\mu x},$$

- где n_0 – число частиц, зарегистрированных в единицу времени без поглощающего слоя;
 n – число частиц, зарегистрированных в единицу при прохождении слоя вещества толщиной x .

График зависимости $n = f(x)$ изображён на рис. 7.

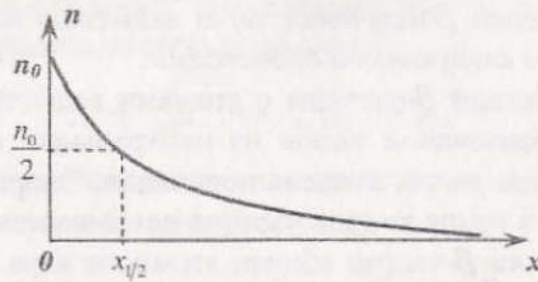


Рис.7

Для характеристики поглощения излучений в веществе используется величина x_{max} – слой полного поглощения β -излучения, зависящий от максимальной энергии β -частиц и свойств поглощающего вещества. Так при $E_{max} = 2$ МэВ для воздуха $x_{max} = 8$ м, воды – 1 см, алюминия – 3 мм, свинца – 1 мм.

Для удобства сравнения поглощающих свойств веществ используют величину R_{max} , равную произведению толщины слоя полного поглощения на плотность данного вещества, т.е.

$$R_{max} = \rho x_{max} \quad (1)$$

Величина R_{max} связана с максимальной энергией β -частиц E_{max} выражением

$$E_{max} = 0,16 \cdot R_{max}^{0,725} \quad (2)$$

При оценке защитных свойств различных материалов необходимо знать, каково поглощение β -излучения в данном материале. Защитные свойства можно характеризовать линейным коэффициентом поглощения μ или слоем половинного поглощения $x_{1/2}$. Слой половинного поглощения – слой вещества, при прохождении которого интенсивность излучения уменьшается вдвое (см. рис.7).

Величины μ и $x_{1/2}$ можно выразить из закона поглощения $n = n_0 e^{-\mu x}$,

$$\ln \frac{n_0}{n} = \mu x.$$

Отсюда

$$\mu = \frac{\ln \frac{n_0}{n}}{x}; \quad (3)$$

так при $x = x_{1/2}$, $n = \frac{n_0}{2}$ имеем

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (4)$$

Для определения верхней границы β -спектра необходимо знать величину x_{max} , её можно определить из графика зависимости $\ln \frac{n_0}{n}$ от толщины поглощающего слоя x (рис.8).

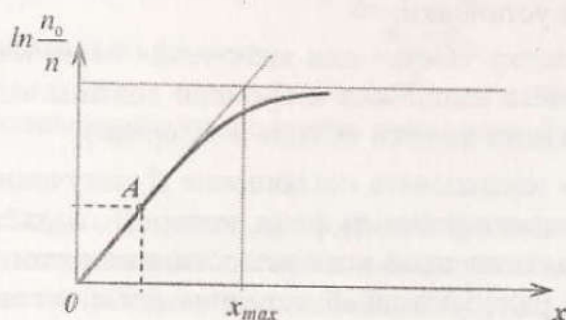


Рис.8

Прямолинейная часть OA графика свидетельствует о выполнении экспоненциального закона поглощения. Точка пересечения продолжения прямолинейной части кривой поглощения с горизонтальной асимптотой соответствует толщине слоя поглощения x_{max} (см. рис.8).

Для снятия кривой поглощения используется виртуальная установка, принципиальная схема которой представлена на рис.9.

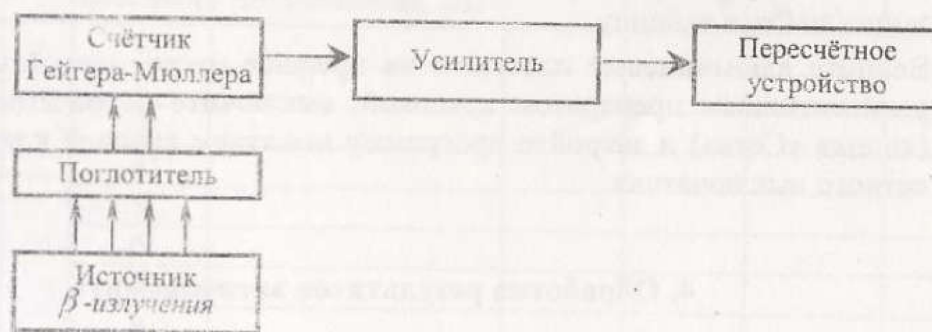


Рис.9

3. Порядок выполнения работы

1. Запустите программу «beta_gays.exe» с помощью преподавателя или лаборанта.
2. Нажмите кнопку «Пуск» пакетного выключателя для подачи напряжения для питания установки.
3. Нажмите кнопку «Сеть» для включения пересчётного устройства (на индикаторах отсчёта импульсов и времени должны высвечиваться нули, если это не так – нажмите кнопки «Стоп» и «Сброс»).
4. Прежде чем исследовать поглощение β -излучения, измерьте величину естественного радиоактивного фона, который создаётся космическими частицами и радиоактивностью всех веществ, находящихся в лаборатории. Для этого закройте радиоактивный источник поглотителем (свинцовая крышка) если Вы перед этим его снимали.

Нажмите кнопку «Пуск» пересчётного устройства. Начнётся отсчёт времени и количества импульсов. По истечении трёх минут нажмите кнопку «Стоп» и запишите показания N числа импульсов в таблицу.

5. Откройте радиоактивный источник и измерьте число импульсов n_0 за одну минуту. Для этого нажмите кнопки «Сброс», «Пуск» и через одну минуту – кнопку «Стоп». Полученный результат занесите в таблицу.
6. Помещая между источником и счётчиком поочерёдно одну, две, три, ..., девять алюминиевых пластин толщиной по 0,25 мм каждая, определите соответствующие значения n_i за одну минуту (каждый раз нажимаются клавиши кнопки «Сброс», «Пуск» и через одну минуту – кнопку «Стоп»). Результаты записывайте в таблицу.
7. Верните алюминиевые пластины на прежнее место, закройте контейнер с радиоактивным препаратом крышкой, выключите пересчётное устройство (кнопка «Сеть») и закройте программу нажатием красной клавиши «С» пакетного выключателя.

4. Обработка результатов эксперимента

1. Подсчитайте скорость счёта частиц фона n_ϕ (число импульсов в минуту) по формуле $n_\phi = \frac{N}{t}$. Результат запишите в таблицу.
2. Используя полученные данные, вычислите $n_i - n_\phi$ и занесите в таблицу.
3. Рассчитайте $\frac{n_0 - n_\phi}{n_i - n_\phi}$ и $\ln \frac{n_0 - n_\phi}{n_i - n_\phi}$ для соответствующего значения n_i и результат занесите в таблицу.
4. По данным таблицы постройте график зависимости $\ln \frac{n_0 - n_\phi}{n_i - n_\phi}$ от толщины поглощающего слоя x .

5. Вычислите линейный коэффициент поглощения μ . Для этого на середине прямолинейного участка построенного графика возьмите точку (см. рис.8, точка A) и для неё найдите соответствующие значения $\ln \frac{n_0 - n_\phi}{n_i - n_\phi}$ и x . По

$$\text{этим данным вычислите } \mu \text{ по формуле } \mu = \frac{\ln \frac{n_0 - n_\phi}{n_i - n_\phi}}{x}.$$

6. Рассчитайте слой половинного поглощения алюминия β -излучения по формуле (4).
7. Из графика найдите x_{\max} . Для этого продолжите прямолинейную часть кривой поглощения до пересечения с горизонтальной асимптотой. Проекция точки пересечения на ось абсцисс даст значение x_{\max} (см. рис.8).
8. Вычислите R_{\max} по формуле (1). Плотность алюминия $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$.
9. Вычислите E_{\max} в МэВ (мегаэлектронвольтах) по формуле (2).
10. Сделайте вывод о проделанной работе с указанием полученных результатов.

N	n_ϕ	n_0	Число пластин	Толщина слоя поглотителя, мм	n_i	$n_i - n_\phi$	$\frac{n_0 - n_\phi}{n_i - n_\phi}$	$\ln \frac{n_0 - n_\phi}{n_i - n_\phi}$
			1					
			2					
			3					
			4					
			5					
			6					
			7					
			8					
			9					

5. Контрольные вопросы

1. Что называется радиоактивностью?
2. Какие виды радиоактивных излучений Вы знаете? Каковы их основные свойства?
3. Что называется α -распадом? Запишите и поясните схему α -распада.
4. Что называется β -распадом? Какие существуют виды β -распада?
5. Запишите и поясните схемы β -распадов. Напишите реакции взаимного превращения нуклонов в ядре при β -распадах.
6. Что называется β -спектром? Изобразите графически β -спектр.
7. Как взаимодействует β -излучение с веществом?
8. Что называется слоем половинного поглощения излучения?
9. Каков закон поглощения β -излучения веществом?
10. Что такое верхняя граница β -спектра и как определить её экспериментально?

6. Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твёрдого тела и элементарных частиц: Учеб. пособие для втузов / И.В. Савельев. – М.: ООО «Издательство Астрель»: ООО «Издательство АСТ», 2002. – 368 с.: ил.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: Учеб. Пособие для втузов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 1999. – 718 с.: ил.
3. Трофимова Т. И. Курс физики: Учеб. Пособие для втузов. – 7-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2001. – 542 с.: ил.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ РИДБЕРГА И МАССЫ ЭЛЕКТРОНА

Цель работы: изучение спектров испускания разреженных газов с помощью монохроматора, определение постоянной Ридберга и массы электрона.

Приборы и принадлежности: компьютер с установленной программой моделирования работы монохроматора УМ-2 «monochromator.exe».

1. Теоретическая часть

В течение длительного времени, вплоть до конца XIX века, в науке господствовало убеждение, что мельчайшие частицы вещества – *атомы*⁹ – являются неделимыми частицами материи, «кирпичиками» мироздания. Однако к концу того же самого XIX века начали накапливаться сведения о свойствах атомов, указывающих на их сложную структуру.

Э. Резерфорд¹⁰, исследуя (1908-1911 гг.) прохождения α -частиц с энергией в несколько мегаэлектрон-вольт через тонкие плёнки золота, пришёл к выводу, что атом состоит из компактного *положительно заряженного ядра* размером порядка 10^{-15} м и окружающих его *электронов* (линейные размеры атома порядка 10^{-10} м).

На основании своих исследований Резерфорд в 1911 г. предложил *ядерную (планетарную, по аналогии со строением Солнечной системы) модель атома*, согласно которой вокруг положительного ядра, имеющего заряд Ze (Z – порядковый номер элемента в таблице Менделеева, e – элементарный заряд) и массу, практически равную массе атома, по замкнутым орбитам движутся электроны, образуя электронную оболочку атома. Так как атом в целом нейтрален, то положительный электрический заряд ядра численно равен суммарному отрицательному заряду электронов, т.е. вокруг ядра вращаются Z электронов.

⁹ Атом (от греческого *атомос* – неразрезаемый, неделимый) – наименьшая часть химического элемента, способная к самостоятельному существованию и являющаяся носителем его свойств.

¹⁰ Эрнест Резерфорд (1871-1937) – английский физик.

Сразу же после создания Резерфордом ядерной модели атома стало ясно, что она находится в *противоречии* с законами классической механики и электродинамики. В частности:

1. Электроны, двигаясь по круговым орбитам с центростремительным ускорением, должны непрерывно излучать электромагнитные (световые) волны и, вследствие потери энергии, должны, в конечном счете, по спирали упасть на ядро. Расчёты дают время падения порядка 10^{-8} с;
2. При падении на ядро электроны должны испускать всё более и более коротковолновое излучение, а, следовательно, спектр излучения атома должен быть сплошным.

Из практики, однако, известно, что время жизни атомов может исчисляться многими сотнями и даже миллионами лет, т.е. атом – устойчивое образование. Кроме того, атомы дают не сплошной спектр излучения, а *линейчатый*, состоящий из набора отдельных узких линий для определённых частот (например, такой спектр дают святающиеся разреженные газы).

Выход из создавшегося тупика был найден в 1913 году Н. Бором¹¹, ценой введения предположений (постулатов), *противоречащих* классическим представлениям. Бор впервые предпринял попытку построения новой – *квантовой* – теории атома, ставя перед собой цель связать в единой целое эмпирические (т.е. полученные опытным путём) закономерности линейчатых спектров, ядерную модель атома Резерфорда и квантовый характер излучения и поглощения света.

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний): в атоме существуют стационарные (неизменяющиеся со временем) состояния, в которых он не излучает энергии. Стационарным состояниям атома соответствуют стационарные орбиты, по которым движутся электроны. Движение электронов по стационарным орбитам не сопровождается излучением электромагнитных волн.

В стационарном состоянии атома электрон, двигаясь по круговой орбите, должен иметь дискретные квантованные значения момента импульса, удовлетворяющее условию (**правило квантования орбит**)

$$m_e v_n r_n = n \hbar, \quad (1)$$

где m_e – масса электрона; v_n – скорость электрона на n -ой орбите радиуса r_n ; n – любое целое число ($n = 1, 2, 3, \dots$), называемое *главным квантовым числом*.

¹¹ Нильс Бор (1885-1962) – датский физик

Оно определяет принадлежность электрона к той или иной орбите; $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ – постоянная Планка с чертой ($h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка).

Второй постулат Бора (правило частот): при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую излучается (поглощается) один фотон с энергией

$$h\nu = E_n - E_m, \quad (2)$$

где ν – частота фотона; n и m – номера стационарных орбит; E_n и E_m – соответственно энергии стационарных состояний атома до и после излучения (поглощения).

При $E_n > E_m$ происходит излучение фотона (атом переходит из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией, т.е. электрон переходит с более удалённой от ядра орбиты на менее удалённую). При $E_n < E_m$ – поглощение фотона (атом переходит в состояние с большей энергией, т.е. электрон переходит на более удалённую от ядра орбиту). Набор возможных дискретных частот

$$\nu = \frac{E_n - E_m}{h}$$

квантовых переходов и определяет линейчатый спектр атома.

Существование в атомах стационарных состояний и правило частот блестяще подтвердилось опытами, проведёнными в 1914 году немецкими физиками Джеймсом Франком (1882-1964) и Густавом Герцем (1887-1975).

На основании постулатов Бора и законов классической механики рассчитаем длины волн, которые соответствуют спектральным линиям в спектре излучения атома **водорода** ($Z = 1$).

Как известно, длина волны и частота излучения связаны соотношением

$$\lambda = \frac{c}{\nu}, \quad (3)$$

где $c = 2,99792458 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

Тогда с учётом выражения (2), имеем:

$$\lambda = \frac{ch}{E_n - E_m}. \quad (4)$$

Энергия электрона на n -ой (m -ой) орбите складывается из кинетической энергии $\frac{m_e v_n^2}{2}$ и потенциальной энергии в электростатическом поле ядра $-e\phi = -e \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e}{r_n}$ (знак «-» означает, что электрон связан с ядром;

$\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная):

$$E_n = \frac{m_e v_n^2}{2} + \left(-e \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e}{r_n} \right). \quad (5)$$

Скорость электрона на n -ой орбите и радиус этой орбиты найдём, учитывая, что при движении электрона по стационарной орбите на него со стороны ядра действует кулоновская сила $F_k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e \cdot e}{r_n^2}$, создающая центростремительное ускорение $a_n = \frac{v_n^2}{r_n}$. По второму закону Ньютона $F_k = m_e a_n$, т.е.

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r_n^2} = m_e \cdot \frac{v_n^2}{r_n}$$

или

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r_n} = m_e v_n^2. \quad (6)$$

Решая совместно выражение (6) и правило квантования орбит (1) относительно v_n , после преобразований получим

$$v_n = \frac{e^2}{n \cdot 2\epsilon_0 h}. \quad (7)$$

Из правила квантования орбит (1) и полученного выражения (7), находим r_n :

$$r_n = \frac{n^2 \epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2}. \quad (8)$$

Из выражений (5), (7) и (8), после преобразований получаем, что энергия электрона на n -ой орбите равна

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{n^2 \cdot 8\epsilon_0^2 h^2}. \quad (9)$$

Соответственно, энергия электрона на m -ой орбите равна

$$E_m = -\frac{m_e e^4}{m^2 \cdot 8\mathcal{E}_0^2 h^2}. \quad (10)$$

Искомые длины волн, которые соответствуют спектральным линиям в спектре излучения атома водорода, найдём из выражений (4), (9) и (10) после несложных преобразований:

$$\lambda = \frac{c \cdot h^3 8\mathcal{E}_0^2}{m_e e^4 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)} = \frac{1}{R' \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)}, \quad (11)$$

где $R' = \frac{m_e e^4}{c \cdot h^3 8\mathcal{E}_0^2} = 1,0974 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ – постоянная Ридберга¹². (11a)

Формула (11) может быть записана и для частот:

$$\nu = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (12)$$

где $R = R' \cdot c = 3,2898 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ – также постоянная Ридберга¹³.

Формула (12) называется *серийной формулой* или *обобщённой формулой Бальмера*.

Экспериментальное определение постоянной Ридберга является основной задачей настоящей работы. По найденному значению постоянной Ридберга, пользуясь формулой (11a) рассчитывают массу электрона.

¹² Йоханнес Роберт Ридберг (1854-1919) – шведский учёный, специалист в области спектроскопии.

¹³ Обычно в литературе оба значения постоянной Ридберга обозначаются одной буквой R и лишь указывается, в каких единицах она выражена: с^{-1} или м^{-1} .

2. Теория и методика эксперимента

Метод работы по определению постоянной Ридберга, а, следовательно, и массы электрона основан на изучении закономерностей в атомных спектрах, в частности атома водорода. Совокупность спектральных линий в спектре атома водорода, лежащих в *видимой области спектра*, называется *серией Бальмера*¹⁴, впервые установившего закономерности в расположении спектральных линий видимой части спектра водорода. Длины волн спектральных линий серии Бальмера получаются, если в сериальной формуле (12) положить $m=2$, а $n=3, 4, 5, \dots$

$$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (13)$$

В спектре атома водорода есть ещё несколько серий. В *ультрафиолетовой области спектра* находится *серия Лаймана*:

$$\nu = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 2, 3, 4, \dots).$$

В *инфракрасной области спектра* находятся:

$$\text{серия Пашена: } \nu = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 4, 5, 6, \dots);$$

$$\text{серия Брэкета: } \nu = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 5, 6, 7, \dots);$$

$$\text{серия Пфунда: } \nu = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 6, 7, 8, \dots);$$

$$\text{серия Хэмфри: } \nu = R \left(\frac{1}{6^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 7, 8, 9, \dots) \text{ и т.д.}$$

Все приведённые выше серии в спектре атома водорода могут быть описаны одной формулой (12):

$$\nu = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

поэтому она и называется *обобщённой формулой Бальмера*. В этой формуле m имеет в каждой данной серии постоянное значение, $m = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ (*определяет серию*), n принимает целочисленные значения, начиная с $m+1$ (*определяет отдельные линии данной серии*).

¹⁴ Иоганн Якоб Бальмер (1825-1898) – швейцарский физик и математик.

Все записанные выше серии являются как бы «отображением» энергии, которая излучается атомом водорода при переходе его единственного электрона с более высоких энергетических уровней на более низкие энергетические уровни (см. рис. 1).

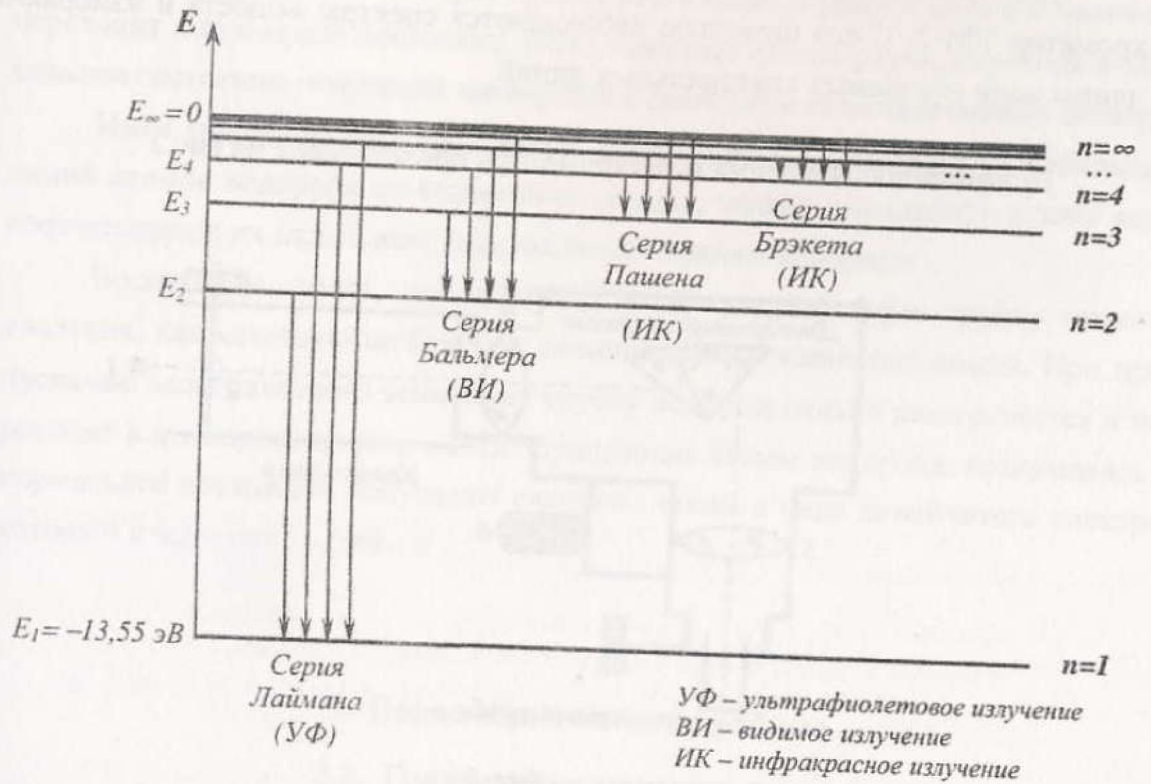


Рис. 1

В изучаемой нами серии Бальмера атома водорода находятся четыре линии: красная, зелёная, синяя и фиолетовая. Наименьшая энергия, а стало быть спектральная линия с большей длиной волны – красная (H_α), появляется когда электрон переходит с третьего энергетического уровня на второй; зелёная (H_β) появляется когда электрон переходит с четвёртого энергетического уровня на второй; синяя (H_γ) появляется когда электрон переходит с пятого энергетического уровня на второй; фиолетовая (H_δ) появляется когда электрон переходит с шестого энергетического уровня на второй. На рис. 1 переходы, соответствующие испусканию красной, зелёной, синей и фиолетовой спектральных линий в серии Бальмера, показаны стрелками, идущими соответственно слева на право.

Таким образом, экспериментально определяя длины волн в видимой области спектра атома водорода, по формуле (11) можно вычислить постоянную Ридберга, а по ней и массу электрона.

Для исследования спектров излучения применяется универсальный монохроматор УМ-2. С его помощью наблюдаются спектры веществ и измеряются длины волн изучаемых спектральных линий.

Принципиальная схема монохроматора представлена на рис.2

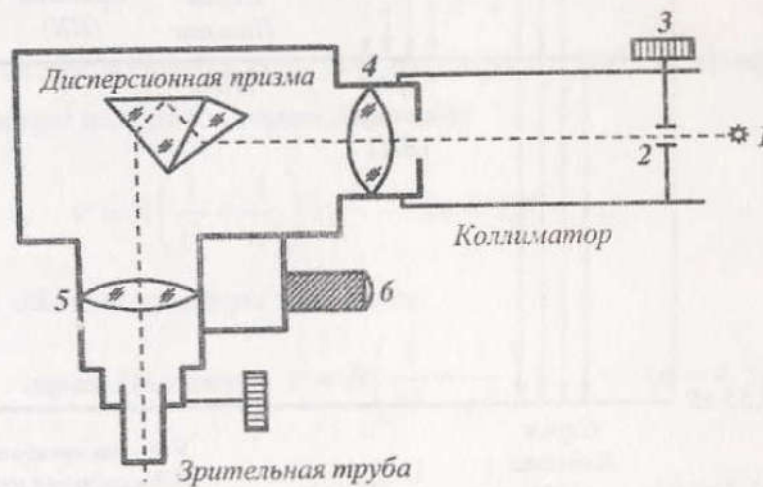


Рис. 2

Основными частями монохроматора (см. рис. 2) являются: *коллиматор*, *дисперсионная призма* и *зрительная труба*. Свет от источника *I* падает на щель *2* коллиматора, ширина которой может регулироваться винтом *3*. Входная щель находится в фокусе объектива *4* коллиматора. Пучок лучей, вышедший из объектива *4*, будет параллельным и, пройдя дисперсионную призму (связанную с поворотным барабаном *б*), создаёт в поле зрения зрительной трубы картину спектра. В фокусе объектива *5* имеется указатель, на который с помощью барабана *б* и наводится исследуемая спектральная линия. На барабане нанесены градусные деления от 0 до 3500° , цена каждого деления равна 2° .

Для определения длин волн, излучаемых атомами водорода, с помощью монохроматора необходимо знать *градуировочную кривую* прибора, т.е. графическую зависимость числа делений барабана (углового расположения спектральных линий в поле зрения окуляра) от длины волны. Градуировочная кривая

вая строится по исследованию линейчатого спектра *ртути*, даваемого ртутной лампой. Длины волн отдельных спектральных линий спектра ртути известны.

Ртутная лампа представляет собой газоразрядную трубку низкого давления, наполненную парами ртути, помещенную в защитный кожух. При пропускании электрического тока через трубку ртуть сильно разогревается и частично переходит в атомарное состояние. Возбужденные атомы ртути, переходя в нормальное состояние, испускают интенсивное свечение в виде линейчатого спектра.

Имея градуировочную кривую и сняв отсчеты положений спектральных линий атомов водорода от водородной лампы, можно определить длины волн соответствующих отдельным спектральным линиям водорода.

Водородная лампа представляет собой газоразрядную трубку низкого давления, наполненную водородом, помещенную в защитный кожух. При пропускании электрического тока через трубку водород сильно разогревается и переходит в атомарное состояние. Возбужденные атомы водорода, возвращаясь в нормальное состояние, испускают свечение также в виде линейчатого спектра, который и изучается в работе.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Градуировка монохроматора

1. Запустите программу «monochromator.exe» с помощью преподавателя или лаборанта и выберите номер установки из предложенных пяти вариантов.
2. Зацепив мышкой ртутную лампу и, удерживая левую кнопку мыши нажатой, перетащите лампу на стойку перед входной щелью монохроматора.
3. Включите блок питания (кнопка «Сеть») и нажмите кнопку подачи напряжения на лампу.
4. Вращение барабана б (рис. 2) осуществляется двумя ползунками: «Вращение барабана *грубо*» – для быстрого просмотра всего спектра излучения и нахождения нужной спектральной линии, и «Вращение барабана *точно*» – для тонкой подводки выбранной спектральной линии под указатель. Когда указатель указывает точно на середину исследуемой спектральной линии, в окне «показания барабана» отображается отсчет по шкале барабана в градусах.
5. Вращая барабан б, просмотрите через окуляр весь линейчатый спектр ртути, схематично он представлен на рис. 3.

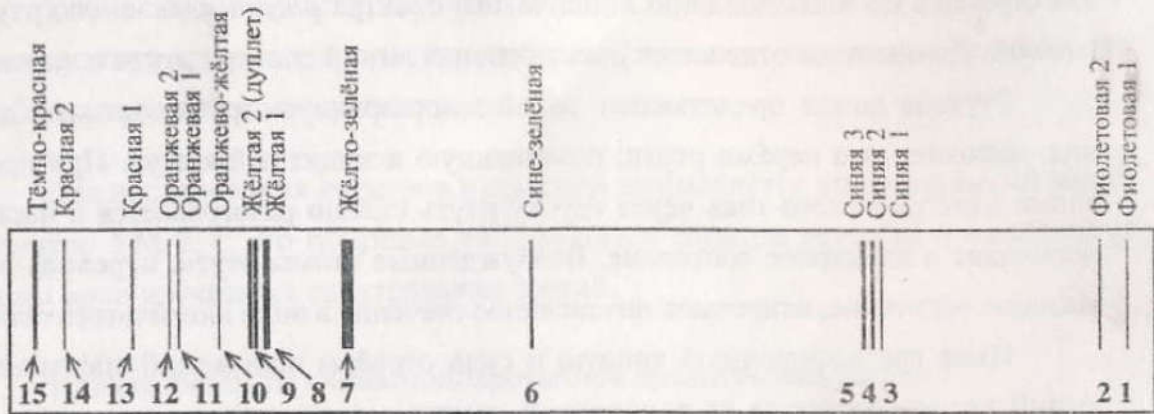


Рис. 3. Видимая часть линейчатого спектра атома ртути

6. Вращая барабан, совмещайте исследуемые спектральные линии (указаны в табл. 1) с указателем и данные отсчёта записывайте в табл. 1.
7. Выполнив измерения, отключите питание лампы, нажав кнопку выключения питания лампы.
8. Зацепив мышкой ртутную лампу и, удерживая левую кнопку мыши нажатой, перетащите лампу со стойки перед входной щелью монохроматора на её первоначальное место.
9. По данным табл. 1 постройте (желательно на миллиметровой бумаге) градуировочный график, откладывая по оси абсцисс длины волн, а по оси ординат соответствующие им показания отсчётов по шкале барабана.

3.2. Определение постоянной Ридберга и массы электрона.

1. Зацепив мышкой водородную лампу и, удерживая левую кнопку мыши нажатой, перетащите лампу на стойку перед входной щелью монохроматора.
2. Нажмите кнопку подачи напряжения на лампу.
3. Вращая барабан 6, посмотрите через окуляр весь линейчатый спектр водорода, схематично он представлен на рис. 4.

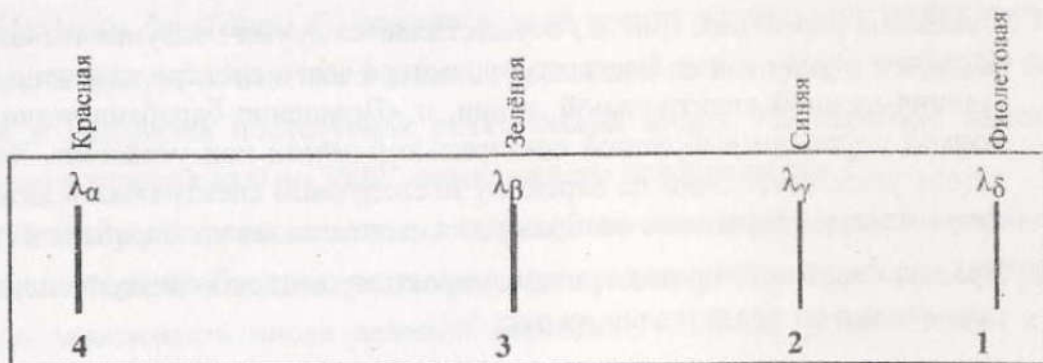



Рис. 4. Видимая часть линейчатого спектра атома водорода

4. Вращая барабан, совмещайте исследуемые спектральные линии (указаны в табл. 2) с указателем и данные отсчёта записывайте в табл. 2.
5. Выполнив все измерения, отключите питание лампы, нажав кнопку выключения питания лампы, и выключите блок питания (кнопка «Сеть»).
6. Зацепив мышкой **водородную лампу** и, удерживая левую кнопку мыши нажатой, перетащите лампу со стойки перед входной щелью монохроматора на её первоначальное место.
7. Закройте программу «monochromator.exe» нажав кнопку  (крестик в правом верхнем углу окна программы, предварительно нажав кнопку «Esc»).
8. По градуировочной кривой найдите (по отсчётам шкалы барабана) длины волн красной, зелёной, синей и фиолетовой спектральных линий атома водорода и запишите полученные данные в табл. 2.
9. Из формулы (11) выразите постоянную Ридберга и рассчитайте её значение по красной λ_α линии, по зелёной λ_β линии, по синей λ_γ линии и по фиолетовой λ_δ линии.
10. Из четырёх полученных значений $R_\alpha, R_\beta, R_\gamma, R_\delta$ найдите среднее значение постоянной Ридберга R ¹⁵.
11. Оцените погрешность определения постоянной Ридберга для каждого случая $\Delta R_i = |R - R_i|$, где $i = \alpha, \beta, \gamma, \delta$.
12. Оцените среднюю погрешность определения постоянной Ридберга

$$\Delta R = \frac{\sum_{i=1}^4 \Delta R_i}{4}$$

13. По каждому значению $R_\alpha, R_\beta, R_\gamma, R_\delta$ с помощью формулы (11а) вычислите массу электрона $m_{e_1}, m_{e_2}, m_{e_3}, m_{e_4}$ и найдите её среднее значение m_e .
14. Оцените погрешность определения массы электрона для каждого случая $\Delta m_{e_i} = |m_e - m_{e_i}|$, где $i = 1, 2, 3, 4$.
15. Оцените среднюю погрешность определения массы электрона

$$\Delta m_e = \frac{\sum_{i=1}^4 \Delta m_{e_i}}{4}$$

¹⁵ Здесь и далее штрих у R для упрощения записи опустим (смотрите сноску 13 на с.45).

16. Вычисленные значения R и m_e сравните с табличными значениями.
17. Все результаты вычислений запишите в табл. 2.
18. Сделайте вывод о проделанной работе с указанием окончательного результата в виде:

$$R_{\text{изм}} = (R \pm \Delta R) \text{ м}^{-1}; \quad \frac{\Delta R}{R} \approx \dots\% \quad \text{и} \quad m_{e_{\text{изм}}} = (m_e \pm \Delta m_e) \text{ кг}; \quad \frac{\Delta m_e}{m_e} \approx \dots\%.$$

Таблица 1

Р т у т н а я л а м п а			
Номер линии	Цвет линии	Длина волны, нм	Отсчёт по шкале барабана, °
1	Фиолетовая 1	404,7	
2	Фиолетовая 2	407,8	
3	Синяя 1	433,9	
4	Синяя 2	434,8	
5	Синяя 3	435,8	
6	Сине-зелёная	502,5	
7	Жёлто-зелёная	546,1	
8	Жёлтая 1	577,0	
9	Жёлтая 2 (дуплет)	579,0	
		579,1	
10	Оранжево-жёлтая	607,3	
11	Оранжевая 1	612,3	
12	Оранжевая 2	623,4	
13	Красная 1	671,6	
14	Красная 2	690,7	
15	Темно-красная	708,2	

Таблица 2

В о д о р о д н а я л а м п а									
Номер линии	Цвет линии	Отсчёт по шкале барабана, °	Длина волны, нм	m		$R_i, \text{ м}^{-1}$	$\Delta R_i, \text{ м}^{-1}$	$m_{e_i}, \text{ кг}$	$\Delta m_{e_i}, \text{ кг}$
				m	n				
1	Фиолетовая								
2	Синяя								
3	Зелёная								
4	Красная								
Ср.	-	-	-	-	-				

4. Контрольные вопросы

1. Что представляет из себя ядерная модель атома и каковы её трудности?
2. Сформулируйте постулаты Бора.
3. Вычислите по теории Бора радиус орбиты электрона, скорость движения электрона по орбите, энергию электрона на орбите для атома водорода.
4. Запишите и поясните сериальную формулу.
5. Покажите на схеме энергетических уровней как образуются основные серии в атоме водорода. Как они называются и в каких областях спектра лежат?
6. Объясните принцип работы монохроматора и назначение его основных частей.
7. Что представляет собой линейчатый спектр? При каких условиях он получается?
8. Что называют градуировочной кривой и для чего она применяется?
9. В чём заключается методика определения постоянной Ридберга и определения массы электрона?

5. Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твёрдого тела и элементарных частиц: Учеб. пособие для вузов / И. В. Савельев. – М.: ООО «Издательство Астрель»: ООО «Издательство АСТ», 2002. – 368 с.: ил.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 1999. – 718 с.: ил.
3. Трофимова Т. И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – 7-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2001. – 542 с.: ил.

ПРИЛОЖЕНИЯ

I. ЦИФРОВОЙ МУЛЬТИМЕТР

(правила работы с мультиметром)

1. Мультиметр (см. рис. 1) вызывается на экран (рабочий стол) нажатием кнопки «Получить мультиметр» на верхней панели окна программы. Следующее нажатие на эту кнопку вызывает второй прибор (при этом кнопка блокируется). Для удаления прибора нужно щелкнуть на кнопке в правом верхнем углу окна мультиметра. Прибор вместе со своими зажимами исчезает с экрана.

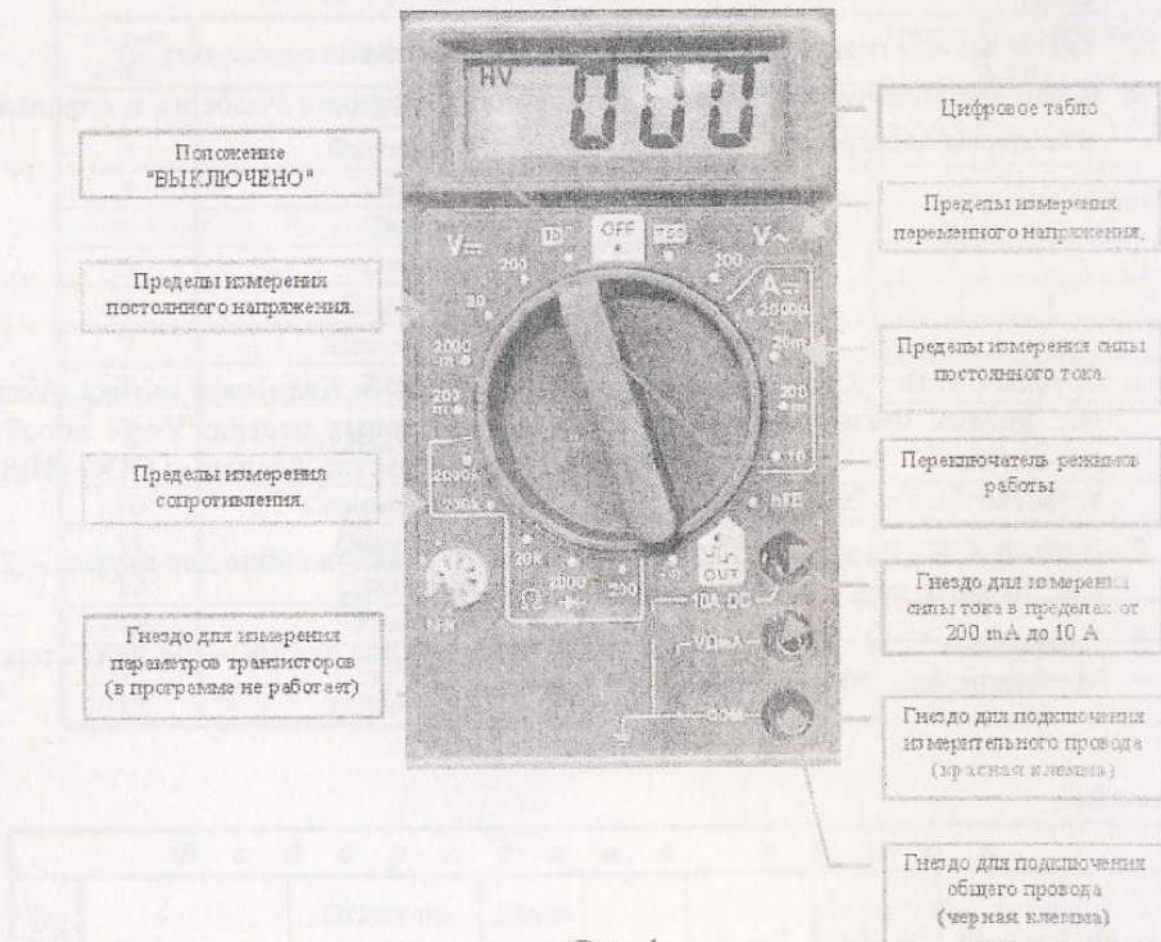


Рис. 1

2. Подключение мультиметра к точкам исследуемой схемы производится установкой в нужные места общего (темно-синего) и измерительного (красного)

зажимов, соединенных с соответствующими гнездами прибора. Соединительные провода прибора на экране не показываются, чтобы не загромождать монтажный стол.

Для подключения прибора к исследуемой схеме необходимо:

- установить указатель "мышки" на нужный зажим прибора (указатель примет вид руки);
- нажать и удерживать левую кнопку "мышки";
- перетащить зажим (удерживая кнопку) в нужную точку схемы и отпустить кнопку "мышки".

Если в процессе работы требуется переключить зажимы в другие места схемы, то используется эта же процедура. Перенос зажима на область прибора приводит к его автоматической "парковке" на соответствующее входное гнездо мультиметра.

3. Переключение режимов работы прибора осуществляется установкой указателя "мышки" на соответствующую точку панели прибора (при этом указатель изменяет свой вид) и щелчком левой кнопки "мышки". Переключатель режимов работы мультиметра поворачивается в отмеченную позицию.
4. На цифровом табло прибора отображается числовое значение измеряемой величины (тока, напряжения, сопротивления) в единицах, указанных на выбранном пределе измерения. Если в левой части табло высвечивается -1 (переполнение), это говорит о том, что значение измеряемой величины превышает максимальное значение выбранного предела измерения. Необходимо переключить прибор на другой предел.
5. Вы можете использовать для работы один или два мультиметра, которые имеют номера 1 и 2. Зажимы приборов также имеют соответствующие номера. Приборы могут использоваться одновременно и независимо. Например, первым прибором можно измерять напряжение, а вторым – ток, в разных частях исследуемой схемы.

II. СЧЁТЧИК ГЕЙГЕРА-МЮЛЛЕРА

Гейгера-Мюллера счётчик, газоразрядный прибор для обнаружения и исследования различного рода радиоактивных и других ионизирующих излучений: α - и β -частиц, γ -квантов, световых и рентгеновских квантов, частиц высокой энергии в космических лучах* и на ускорителях.

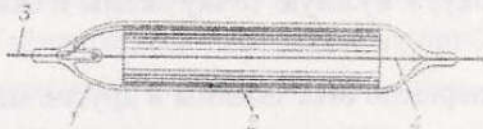


Рис.2. Схема стеклянного счётчика Гейгера-Мюллера: 1 – герметически запаянная стеклянная трубка; 2 – катод (тонкий слой меди на трубке из нержавеющей стали); 3 – вывод катода; 4 – анод (тонкая натянутая нить).

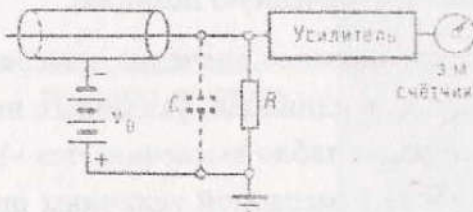


Рис.3. Схема включения счётчика Гейгера-Мюллера.

В счётчиках Гейгера-Мюллера рабочий объём представляет собой газоразрядный промежуток с сильно неоднородным электрическим полем. Чаще всего применяют счётчики с коаксиально расположенными цилиндрическими электродами: внешний цилиндр – катод, тонкая нить, натянутая вдоль его оси, – анод (рис.2). Электроды заключены в герметически замкнутый резервуар, наполненный каким-либо газом до давления $13-26 \text{ кН/м}^2$ ($100-200 \text{ мм.рт.ст.}$). К электродам счётчика прикладывается напряжение в несколько сот вольт. На нить подаётся знак «+» через сопротивление R (рис.3). Если в рабочем объёме счётчика нет свободных электронов, электрический разряд в нём не возникает.

При попадании в счётчик ионизирующей частицы в газе образуются свободные электроны, которые движутся к положительно заряженной нити. Вблизи нити напряжённость электрического поля велика и электроны ускоряются настолько, что начинают, в свою очередь, ионизовать газ. В результате по мере приближения к нити число электронов лавинообразно нарастает. Возникает вспышка коронного разряда и через счётчик течёт ток. При достаточно большом R (10^8-10^{10} Ом) на нити скапливается отрицательный заряд и разность потенциалов между

* Космические лучи, поток частиц высокой энергии, преимущественно протонов, проходящих на Землю из мирового пространства (первичное излучение), а также рожденное ими в атмосфере Земли в результате взаимодействия с атомными ядрами вторичное излучение, в котором встречаются практически все известные элементарные частицы.

нитью и катодом быстро падает, в результате чего разряд обрывается. После этого чувствительность счётчика восстанавливается через 10^{-1} - 10^{-3} с (время разрядки ёмкости C через сопротивление R). Такое большое время нечувствительности неудобно для многих применений. Ввиду этого несамогасящиеся счётчики, в которых гашение разрядов обеспечивается сопротивлением R , были вытеснены самогасящимися счётчиками (предложены Тростом), которые к тому же более стабильны. В них благодаря специальному газовому наполнению (инертный газ с примесью сложных молекул, например паров спирта, и небольшой примесью галогенов – хлора, брома, иода) разряд сам собой обрывается даже при малых сопротивлениях R . Время нечувствительности самогасящегося счётчика $\sim 10^{-4}$ с.

Электрические импульсы во внешней цепи, возникающие при вспышках разряда в счётчике, усиливаются и регистрируются электромагнитным счётчиком или пересчётной схемой.

Счётчики Гейгера-Мюллера используют во многих областях физики, в биологии и медицине, в археологии, геологии и технике.

Содержание

Лабораторная работа № 3.9 «Изучение электрического резонанса напряжений».....	3
Лабораторная работа № 3.10 «Правила Кирхгофа».....	18
Лабораторная работа № 4.1 «Исследование поглощения β -излучения веществом».....	31
Лабораторная работа № 4.2 «Определение постоянной Ридберга и массы электрона».....	41
Приложение I Правила работы с цифровым мультиметром.....	54
Приложение II Счётчик Гейгера-Мюллера	56

Подписано в печать 17.03.18. Формат 84x108/32

Гарнитура Таймс. Печать офсетная.

Бумага мелованная. Усл. Печ. л. – 3,1

Тираж 50 экз.

Издательство Современного технического университета

390048, г. Рязань, ул. Новоселов, 35А.

(4912) 300630, 30 08 30