

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СПбГУТ)

В. М. Деткова, В. Б. Федюшин, Ю. В. Шарихина

**ФИЗИКА
КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ**

Часть 1
**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ**

Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторной работы

СПб ГУТ)))

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2023

УДК 537.86(076)
ББК 22.336я73
Д38

Рецензент
кандидат технических наук,
доцент факультета фундаментальной подготовки СПбГУТ
Е. Ю. Передистов

*Утверждено редакционно-издательским советом СПбГУТ
в качестве учебно-методического пособия*

Деткова, В. М.

Д38 Физика. Колебания и волны. Часть 1. Исследование свободных электрических затухающих колебаний : учебно-методическое пособие по выполнению лабораторной работы / В. М. Деткова, В. Б. Федюшин, Ю. В. Шарихина ; СПбГУТ, – Санкт-Петербург, 2023. – 20 с.

Написано в соответствии с программой курса физики по разделу «Колебания и волны». Приведены описание лабораторной установки и метода измерения, порядок выполнения работы, задания к работе и контрольные вопросы.

Предназначено для студентов первого курса технических специальностей всех форм обучения.

УДК 537.86(076)
ББК 22.336я73

© Деткова В. М., Федюшин В. Б., Шарихина Ю. В., 2023

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Цель работы	4
Введение	4
Описание лабораторной установки	8
Порядок выполнения работы	9
Обработка результатов измерений	10
Контрольные вопросы	13
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	15
Приложение 1. УСТРОЙСТВО ОСЦИЛЛОГРАФА	16
Приложение 2. РЕГУЛИРОВКА ОСЦИЛЛОГРАФА	18

Цель работы

1. Исследование периодических свободных затухающих колебаний в электрическом колебательном контуре.
2. Исследование аperiodического процесса.
3. Определение физических характеристик свободных затухающих колебаний в электрическом колебательном контуре (коэффициента затухания, времени релаксации, сопротивления контура, индуктивности катушки, собственной циклической частоты, периода и циклической частоты затухающих колебаний, декремента затухания, логарифмического декремента затухания, числа колебаний N_e , в течение которых амплитуда убывает в e раз, добротности и критического сопротивления).
4. Составление уравнения затухающих колебаний по определенным физическим характеристикам электрического колебательного контура.

Введение

Колебания – это процессы, повторяющиеся с течением времени. В зависимости от физической природы различают механические, электромеханические, электромагнитные и другие колебания.

Электромагнитные колебания – это периодические изменения заряда, силы тока и напряжения в электрической цепи с течением времени.

На рис. 1 показана электрическая схема, с помощью которой можно получить свободные затухающие колебания в последовательном электрическом контуре. Он состоит из конденсатора C , катушки индуктивности L и резистора R . В положении 1 ключа K конденсатор C заряжается от источника \mathcal{E} , на обкладках конденсатора появляются заряды, равные по величине и противоположные по знаку. В конденсаторе появляется запас энергии. При переключении ключа K в положение 2 ключа 1 образуется последовательный *электрический колебательный контур*, начинается разряд конденсатора через катушку индуктивности и сопротивление.

Из-за явления самоиндукции возрастание силы тока в цепи происходит постепенно. Уменьшение энергии электрического поля в конденсаторе сопровождается увеличением энергии магнитного поля, обусловленного током, текущим через катушку индуктивности.

При полном разряде конденсатора ток через катушку индуктивности будет максимален. Затем благодаря явлению самоиндукции начнется процесс перезарядки обкладок конденсатора, сопровождающийся уменьшением силы тока. После полной перезарядки конденсатора сила тока в цепи станет равной нулю, и начнется возрастание силы тока, текущего в проти-

воположном направлении. В рассматриваемой цепи могут возникнуть свободные колебания напряжения, заряда и тока.

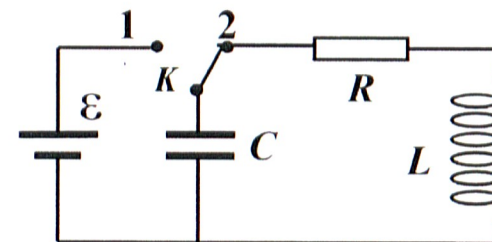


Рис. 1. Электрическая схема для получения свободных затухающих колебаний в последовательном электрическом контуре

Свободными называются колебания, которые совершаются в системе за счет первоначально сообщенной энергии при последующем отсутствии внешних воздействий. В процессе колебаний происходит периодическое превращение энергии электрического поля конденсатора в энергию магнитного поля катушки индуктивности и обратно. Наличие в контуре сопротивления R приводит к тому, что энергия этих полей постепенно переходит во внутреннюю энергию (происходит нагревание элементов контура). Вследствие этого энергия электрического и магнитного полей контура будет убывать и колебания станут затухающими, либо совсем пропадут.

В процессе колебаний в контуре возникает ЭДС самоиндукции ε_i , которая по второму закону Кирхгофа равна сумме падений напряжения в замкнутом контуре:

$$\varepsilon_i = IR + U_C, \quad (1)$$

где U_C – напряжение на конденсаторе; I – сила тока в контуре.

Эти величины связаны с зарядом конденсатора q соотношениями:

$$U_C = \frac{q}{C}; \quad I = \frac{dq}{dt}; \quad \varepsilon_i = -L \frac{dI}{dt} = -L \frac{d^2q}{dt^2}, \quad (2)$$

где C – емкость конденсатора; L – индуктивность катушки; R – сопротивление резистора. Подставляя формулы (2) в равенство (1), деля обе части получившегося уравнения на L и вводя обозначения

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}; \quad \alpha = \frac{R}{2L}, \quad (3)$$

получаем линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\alpha \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0. \quad (4)$$

Решение этого уравнения при $\omega_0 > \alpha$ имеет вид:

$$q(t) = q_{m0} e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (5)$$

где

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}. \quad (6)$$

Величина $\varphi = \omega t + \varphi_0$ называется *фазой колебаний*, а φ_0 – начальной фазой (определяется начальными условиями). Величина ω определяет скорость изменения фазы и называется *циклической частотой* затухающих колебаний, а величина α определяет быстроту затухания и называется *коэффициентом затухания* (зависит от сопротивления и индуктивности цепи).

Период колебаний T , т. е. время, за которое фаза колебания меняется на 2π (за это время совершается одно полное колебание), связан с циклической частотой формулой $T = 2\pi/\omega$. *Частота колебаний* ν , т. е. число колебаний в единицу времени, связана с этими величинами формулами $\nu = 1/T = \omega/2\pi$.

Величину

$$q_m(t) = q_{m0} e^{-\alpha t} \quad (7)$$

называют *амплитудой* колебаний, q_{m0} – начальной амплитудой колебаний (определяется начальными условиями). Для напряжения $U_C = \frac{q}{C}$ на конденсаторе получается формула, аналогичная формуле (5).

Формулу для амплитуды колебаний заряда или напряжения можно представить в виде:

$$A(t) = A_0 e^{-\alpha t} = A_0 e^{-t/\tau}, \quad (8)$$

где $A(t)$ – амплитуда колебаний в момент времени t ; A_0 – амплитуда в начальный момент времени. Время τ называется *временем релаксации*. При $\alpha = 0$ колебания становятся незатухающими, гармоническими. Циклическая частота колебаний при отсутствии затухания $\omega = \omega_0$. Она называется *собственной частотой* колебательного контура.

На рис. 2 показаны зависимости от времени величины заряда конденсатора от времени $q(t)$ (сплошная кривая) и амплитуды колебаний от времени $q_m(t)$ (пунктирная кривая).

Рассмотрим физический смысл величин, характеризующих затухание колебаний в контуре. Из формулы (8) видно, что *коэффициент затухания* α – величина обратная времени τ , за которое амплитуда убывает в e раз.

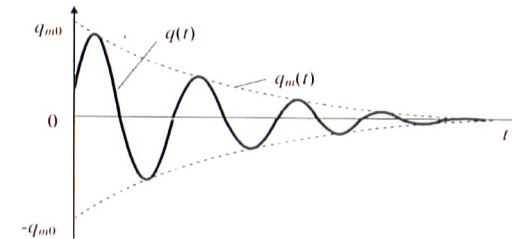


Рис. 2. Зависимости от времени величины заряда $q(t)$ (сплошная кривая) и амплитуды колебаний $q_m(t)$ (пунктирная кривая) в случае затухающих колебаний

Декремент затухания показывает, во сколько раз убывает амплитуда за один период колебаний:

$$D = \frac{A(t)}{A(t+T)} = e^{\alpha T}. \quad (9)$$

Логарифмический декремент затухания определяется по формуле:

$$\lambda = \ln D = \alpha T. \quad (10)$$

Так как $\alpha = 1/\tau$, то $\lambda = T/\tau = 1/N_e$, где $N_e = \tau/T$. Таким образом, логарифмический декремент затухания – это величина, обратная числу колебаний, в течение которых амплитуда убывает в e раз.

Добротность электрического контура можно найти по формуле

$$Q = \frac{\pi}{\lambda}. \quad (11)$$

Если величина активного сопротивления такова, что $\omega_0 \leq \alpha$, то колебания в цепи не возникают. Происходит *апериодический* разряд конденсатора (рис. 3), при этом величина заряда, напряжения с течением времени асимптотически стремится к нулю. Сопротивление $R_{кр}$, при котором колебательный режим переходит в апериодический, можно найти из условия $\omega_0 = \alpha$. Режим, соответствующий этому условию, называется *критическим*. Сопротивление $R_{кр}$ также называется критическим. Подставляя в это условие формулы (3), для критического сопротивления получаем:

$$R_{кр} = 2\sqrt{L/C}. \quad (12)$$

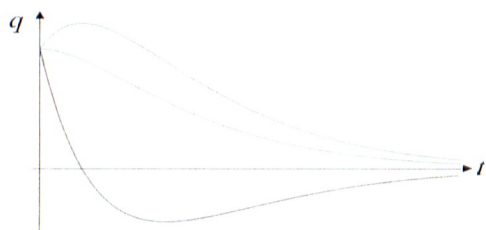


Рис. 3. Возможные зависимости величины заряда конденсатора от времени в случае аperiodического процесса

Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки показана на рис. 4.

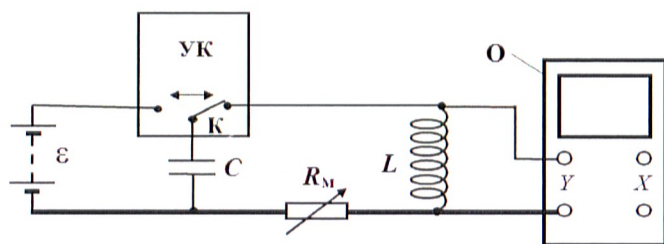


Рис. 4. Схема лабораторной установки

С помощью устройства коммутации УК электронный ключ К периодически переводится из левого положения в правое и обратно. В левом положении ключа К происходит зарядка конденсатора. В правом положении ключа конденсатор C разряжается через магазин сопротивлений R_M и катушку индуктивности L . При этом в колебательном контуре возникают свободные затухающие колебания.

Напряжение с катушки L , имеющее при таких колебаниях вид

$$U_L = U_{m0} e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (13)$$

подаётся на вертикально отклоняющие пластины осциллографа (вход Y на рис. 4), его описание дано в прил. 1. Вертикальное смещение от нулевого

положения электронного луча на экране осциллографа будет пропорционально напряжению на катушке. На горизонтально отклоняющие пластины в этот промежуток времени подается линейно изменяющееся со временем напряжение развертки (от генератора пилообразного напряжения, имеющегося в осциллографе). Поэтому одновременно с колебаниями в вертикальной плоскости электронный луч на экране осциллографа будет равномерно с течением времени смещаться от левого края экрана к правому. Следовательно, на экране осциллографа увидим график зависимости напряжения от времени в соответствии с формулой (13). На экране осциллографа имеется сетка, позволяющая проводить отсчеты как величины напряжения (по вертикальной оси), так и времени (по горизонтальной оси). Меняя значение сопротивления контура R с помощью магазина сопротивлений R_M , можно менять коэффициент затухания в контуре.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, показанную на рис. 4.
2. Занести в протокол указанные на рабочем месте значения емкости конденсатора C и сопротивления катушки индуктивности R_L колебательного контура, а также погрешности этих величин.
3. Установить указанное на рабочем месте первое из значений дополнительного сопротивления на магазине сопротивлений R_M .
4. Включить осциллограф. Получить на экране картину затухающих колебаний (рис. 2). Установить эту картину симметрично относительно горизонтальной оси.
5. С помощью ручки регулировки масштаба времени (ручка 2 на рис. 6 в прил. 2) получить на экране осциллографа зависимость для 6–8 полных колебаний. Заполнить таблицу измерительных приборов. Амплитудные значения напряжения отсчитывают по вертикальной оси на экране осциллографа. Горизонтальная ось – это ось времени.
6. По указанию преподавателя зарисовать полученную на экране осциллографа картину затухающих колебаний на миллиметровке, отметить на ней масштаб времени и амплитудного значения напряжения (т. е. указать значения этих величин, соответствующие одному большому делению горизонтальной и вертикальной шкалы соответственно) или сфотографировать эту картину с последующей распечаткой. На фотографиях должны также быть положения ручек регулировки осциллографа по вертикальной и горизонтальной осям (прил. 2).
7. Указать в табл. 1 значение установленной величины R_M . Занести в табл. 1 значения амплитуд колебаний напряжения U_{mk} на катушке

индуктивности в делениях (только положительных или отрицательных, по указанию преподавателя) и соответствующие им моменты времени t_k в делениях (k – номер амплитуды и момента времени, $k \geq 6$). При этом наибольшую амплитуду следует принять за U_{m0} , а соответствующий ей момент времени – за начало отсчета времени, т. е. за $t = 0$.

Таблица 1

Измеряемая величина	$R_{M1} = \dots \text{ Ом}$						$R_{M2} = \dots \text{ Ом}$						$R_{M3} = \dots \text{ Ом}$					
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
k																		
U_{mk} , В																		
$\frac{U_{m0}}{U_{mk}}$																		
$z_k = \ln \frac{U_{m0}}{U_{mk}}$																		
t_k , мс																		

8. Выполнить пп. 6 и 7 для других значений сопротивления R_M магазина сопротивлений, указанных на рабочем месте.

9. Увеличивая сопротивление магазина сопротивлений R_M , найти то его значение $R_{M \text{кр}}$, при котором колебательный режим переходит в апериодический. При апериодическом процессе кривая $U(t)$ пересекает ось времени не более одного раза (рис. 3). Записать значение $R_{M \text{кр}}$ в табл. 2.

10. Повторить п. 9 еще 4 раза.

11. Показать результаты измерений преподавателю.

12. Выключить осциллограф.

Таблица 2

№ изм.	1	2	3	4	5
$R_{M \text{кр}}$, Ом					

Обработка результатов измерений

1. Занести в табл. 3 значения амплитуд U_{mk} (В) и соответствующих им моментов времени t_k (мс). При этом моменты времени следует переводить из миллиметров в микросекунды, пользуясь масштабом времени, записанным в п. 5 раздела «Порядок выполнения работы».

Таблица 3

Измеряемая величина	$R_{M1} = \dots \text{ Ом}$						$R_{M2} = \dots \text{ Ом}$						$R_{M3} = \dots \text{ Ом}$					
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
k																		
U_{mk} , В																		
$\frac{U_{m0}}{U_{mk}}$																		
$z_k = \ln \frac{U_{m0}}{U_{mk}}$																		
t_k , мс																		

2. Вычислить отношения $\frac{U_{m0}}{U_{mk}}$ и величины $z = \ln \frac{U_{m0}}{U_{mk}}$.

3. Как следует из формулы (8), зависимости

$$z = \ln \frac{A_0}{A(t)} = \alpha t \quad (14)$$

представляют собой прямые линии, проходящие через точку $t = 0$. Поэтому графики зависимостей z_k от t_k должны проходить через эту точку. Нужно построить эти прямые так, чтобы число экспериментальных точек выше и ниже прямых было примерно равным. Объяснить наличие отклонений экспериментальных точек от проведенных прямых.

4. Из формулы (14) следует, что угловой коэффициент построенных прямых $\frac{\Delta z}{\Delta t}$ равен коэффициенту затухания α (рис. 5). Найти для каждой прямой величину α графическим способом. По формуле $\tau = 1/\alpha$ вычислить время релаксации τ , за которое амплитуда колебаний убывает в e раз. Записать эти значения в табл. 4. Другой способ определения α изложен ниже, в п. 13. Использовать его по указанию преподавателя.

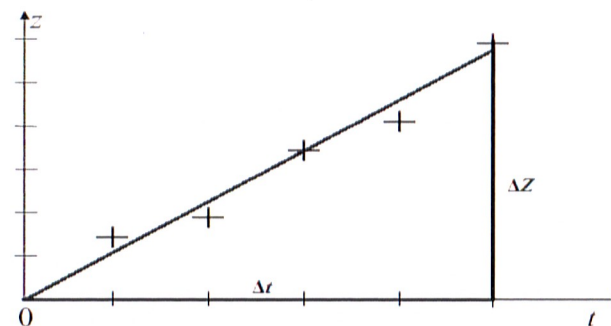


Рис. 5. График зависимости величины $z = \ln \frac{U_{m0}}{U_{mk}}$ от времени t

5. Вычислить значение сопротивления контура R , а также индуктивности катушки L для каждого значения сопротивления магазина R_M :

$$R = R_M + R_L; \quad L = \frac{R}{2\alpha} \quad (15)$$

Занести эти значения в табл. 4.

Таблица 4

R , Ом	α , с^{-1}	τ , с	L , Гн	T , с	ω , с^{-1}	D	λ	Q	N_e

6. Определить среднее значение индуктивности \bar{L} . Задав доверительную вероятность и пренебрегая систематической погрешностью, найти случайные погрешности ΔL и δL и записать доверительный интервал $\bar{L} \pm \Delta L$. Рядом указать доверительную вероятность.

7. Вычислить с помощью первой из формул (3) собственную циклическую частоту ω_0 , используя для этого среднее значение \bar{L} .

8. Вычислить для всех значений сопротивления контура R период затухающих колебаний T и циклическую частоту ω этих колебаний:

$$T = \frac{t_k}{k}; \quad \omega = 2\pi/T, \quad (16)$$

взяв в качестве k наибольшее из значений из табл. 3.

9. Для всех значений сопротивления контура R вычислить по второй из формул (10) логарифмический декремент затухания λ , а по второй из формул (9) – декремент затухания D . Из формулы $\lambda = 1/N_e$ найти число колебаний N_e , в течение которых амплитуда убывает в e раз. По формуле (11) вычислить добротность электрического контура. Занести эти значения в табл. 4.

10. По результатам измерений при критическом режиме найти значения критического сопротивления $R_{кр} = R_{Mкр} + R_L$. Вычислить среднее значение этого сопротивления, случайные погрешности $\Delta R_{кр}$ и $\delta R_{кр}$ и записать доверительный интервал $R_{кр} \pm \Delta R_{кр}$, указав рядом доверительную вероятность.

11. Вычислить $R_{кр}$ по формуле (12) и сравнить с найденным в п. 10. В качестве L в формуле (12) взять среднее значение индуктивности.

12. Написать уравнение затухающих колебаний для напряжения при использовании одного из значений сопротивления контура, взяв $U_{m0} = 5$ В, $\varphi_0 = 0$.

13. Для более строгого определения коэффициента затухания можно применить метод наименьших квадратов (МНК). При этом коэффициент затухания вычисляется по формуле

$$\alpha = \frac{(\sum_{k=1}^n t_k z_k)}{(\sum_{k=1}^n t_k^2)}, \quad (17)$$

где n – число измерений. Доверительный интервал $\alpha \pm \Delta\alpha$ определяется в МНК с помощью формулы

$$\Delta\alpha = \frac{t_{\alpha,n}}{n-1} \left(\frac{\sum_{k=1}^n z_k^2}{\sum_{k=1}^n t_k^2} - \alpha^2 \right)^{1/2}, \quad (18)$$

где $t_{\alpha,n}$ – коэффициент Стьюдента. Так как α – угловой коэффициент прямой $z = \alpha t$, то по найденному значению α можно провести эту прямую.

Согласно МНК она обладает тем свойством, что сумма квадратов отклонений экспериментальных точек от этой прямой будет наименьшей по сравнению с любой другой прямой.

Найдите с помощью МНК значение α для одного из проведенных опытов (по указанию преподавателя).

Контрольные вопросы

1. Нарисуйте электрическую схему колебательного контура, в котором происходят свободные затухающие колебания.
2. Что такое свободные колебания?
3. Выведите дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний.
4. Напишите зависимости от времени заряда на обкладках конденсатора, напряжения между обкладками конденсатора, силы тока в контуре при свободных затухающих колебаниях.
5. Нарисуйте графики зависимости от времени величины U/L и амплитудного значения напряжения на катушке индуктивности при свободных затухающих колебаниях.
6. Что такое частота и период колебаний?
7. От чего зависят частота и период колебаний в электрическом колебательном контуре?
8. Что такое собственная частота колебаний контура?
9. Что такое фаза и амплитуда свободных затухающих колебаний?
10. При каком условии свободные затухающие колебания становятся незатухающими?

11. В чем физический смысл коэффициента затухания, декремента затухания, логарифмического декремента затухания?

12. Что такое время релаксации?

13. Что такое критический режим? Как установить критический режим в контуре?

14. Что такое критическое сопротивление?

15. В конечном счете свободные колебания в электрическом колебательном контуре затухают. В какой вид энергии переходит первоначально запасенная в контуре энергия?

16. Нарисуйте возможные зависимости от времени мгновенного значения заряда в случае аperiodического процесса.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Андреев, А. Д.* Обработка результатов измерений в физическом практикуме / А. Д. Андреев, Л. М. Черных ; СПбГУТ. – Санкт-Петербург, 2009. – 19 с.

2. *Андреев, А. Д.* Физика. Колебания : конспект лекций / А. Д. Андреев, Л. М. Черных ; СПбГУТ. – Санкт-Петербург, 2013. – 38 с.

3. *Савельев, И. В.* Курс общей физики. Т. 1 / И. В. Савельев. – Москва : Наука, 1970. – 517 с.

4. *Сивухин, Д. В.* Общий курс физики. Т. 1 Механика / Д. В. Сивухин. – Москва : Наука, 1979. – 520 с.

Приложение 1

УСТРОЙСТВО ОСЦИЛЛОГРАФА

Осциллограф – измерительный прибор, предназначенный для визуального наблюдения и исследования электрических сигналов. Осциллограф преобразует подаваемый на его вход электрический сигнал в видимое изображение. Главным элементом осциллографа является электронно-лучевая трубка (ЭЛТ). ЭЛТ представляет собой запаянную стеклянную колбу, узкую с одной стороны и расширяющуюся с другой.

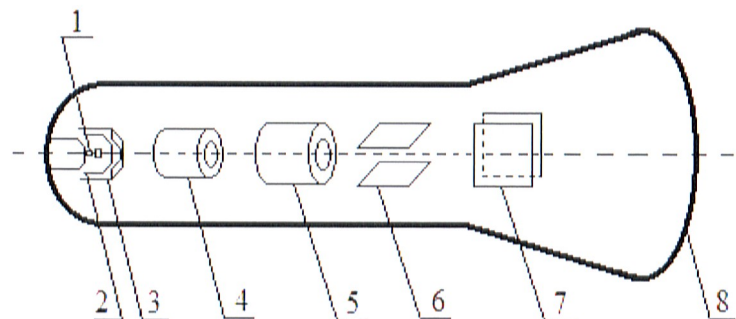


Рис. 6. Схема электронно-лучевой трубки

Обычно трубка имеет цилиндрическую форму, а ее расширяющаяся часть может быть как цилиндрической, так и прямоугольной формы. Расширяющаяся часть трубки заканчивается поверхностью, которая образует экран 8 (рис. 6). Внутренняя часть экрана покрыта люминофором, который способен светиться при бомбардировке его электронным пучком. Внутри трубки расположены два независимых устройства: электронный прожектор и система отклоняющих пластин. Электронный прожектор формирует узкий пучок электронов. В состав электронного прожектора входят катод, управляющий электрод и два анода. Катод 2 является источником электронов. Он подогревается спиралью 1, на которую подается напряжение накала. В результате термоэлектронной эмиссии электроны покидают поверхность катода. Первым на пути электронов располагается управляющий электрод 3, который фокусирует электронный луч и регулирует его яркость на экране. Затем поток электронов проходит два анода 4 и 5, имеющих цилиндрическую форму. Перемещаясь внутри анодов, электронный пучок сужается, дополнительно фокусируется и ускоряется в направлении экрана. Все электроды прожектора выполнены в виде полых цилиндров,

расположенных вдоль оси ЭЛТ. Сформированный электронным прожектором узкий электронный пучок проходит между двумя парами отклоняющих пластин 6 и 7. Одна пара пластин смещает электроны вдоль оси X , а вторая – вдоль оси Y . Если на пластины подать напряжение (создать между ними разность потенциалов), то между пластинами образуется электрическое поле. Сила, действующая со стороны этого поля на движущийся электронный пучок, направлена перпендикулярно скорости электронов и отклоняет пучок или вдоль оси X или вдоль оси Y .

Приложение 2

РЕГУЛИРОВКА ОСЦИЛЛОГРАФА

Ручки регулировки осциллографа, изображенные на рис. 7, выполняют следующие функции:

1 – задает масштаб по вертикальной оси $U(t)$ в вольтах на одно большое деление масштабной сетки;

2 – задает масштаб времени по горизонтальной оси в миллисекундах или в микросекундах в расчете на одно большое деление масштабной сетки;

3 – плавно регулирует масштаб напряжения; ручка должна находиться в крайнем правом положении;

4 – перемещает график в вертикальном направлении;

5 – перемещает график в горизонтальном направлении.

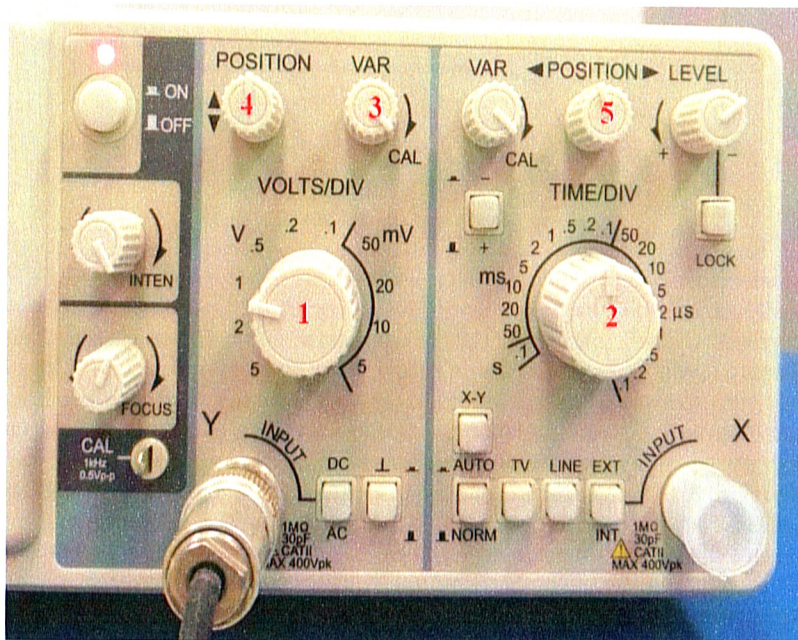


Рис. 7. Расположение ручек регулировки осциллографа

При исследовании зависимости $U(t)$ с помощью ручки регулировки 4 нужно расположить график симметрично относительно горизонтальной

оси. С помощью ручки регулировки 5 совместить первый максимум $U(0)$ с крайней левой вертикальной линией масштабной сетки. Ручку регулировки 1 нужно поставить в положение 1 В/дел, ручку регулировки 2 – в положение 0,2 мс/дел.

При нахождении критического сопротивления с помощью ручки регулировки 1 нужно увеличить вертикальный масштаб до (0,1–0,05) В/дел; с помощью ручки регулировки 2 – увеличить горизонтальный масштаб до (0,1–0,05) мс/дел.