

## ИЗУЧЕНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

**Цель работы:** определение опытным и расчетным путем параметров колебательного контура при изучение затухающих электромагнитных колебаний в колебательном контуре при различных сопротивлениях контура.

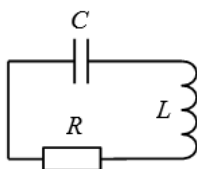
**Приборы и принадлежности:** генератор сигналов специальной формы, кассета ФПЭ-10 или панель с колебательным контуром, электронный осциллограф, магазин сопротивлений, соединительные провода.

**Объект измерений:** амплитуда колебаний разности потенциалов на конденсаторе.

**Средства измерений:** калибровочная сетка осциллографа.

### Теоретическая часть

На (рис. 1) изображена электрическая схема простейшего колебательного контура с сосредоточенными параметрами, содержащего конденсатор ёмкостью  $C$ , катушку индуктивности  $L$  и активное сопротивление  $R$ .



**Рис. 1.** Электрическая схема простейшего колебательного контура

Исследуем характер колебаний в идеальном контуре (т.е. для  $R=0$ ). При максимальном заряде конденсатора энергия электрического поля конденсатора ёмкостью  $C$  равна:

$$W_{C\max} = \frac{q_0^2}{2C} = \frac{CU_0^2}{2}, \quad (1)$$

где  $q_0$  – максимальный заряд конденсатора,  $U_0$  – максимальная разность потенциалов на обкладках конденсатора,  $C$  – емкость конденсатора.

Под действием сил электрического поля заряды начинают движение по замкнутому участку цепи, конденсатор разряжается, и в контуре возникает электрический ток разряда конденсатора:

$$I(t) = -\frac{dq(t)}{dt}, \quad (2)$$

где  $q(t)$  – заряд на обкладках конденсатора. Знак «минус» указывает на возрастание тока при убывании положительного заряда соответствующей пластины конденсатора ( $dq(t) < 0$ ).

Энергия электрического поля конденсатора уменьшается, переходя в энергию магнитного поля катушки. Возрастание тока ( $dI > 0$ ) в катушке индуктивности приводит к появлению, в ней ЭДС самоиндукции  $\varepsilon(t)$ , препятствующей изменению тока:

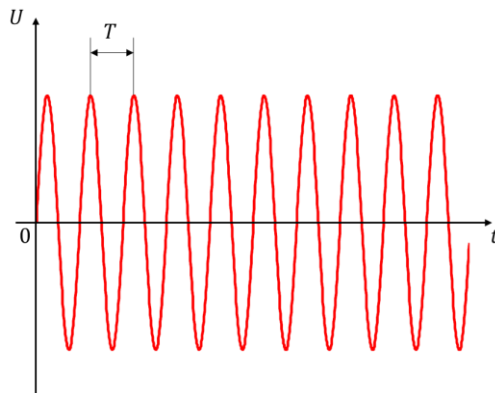
$$\varepsilon(t) = -L \frac{dI}{dt}. \quad (3)$$

Величина индуктивности  $L$  определяет инертные свойства контура. При полном разряде конденсатора его электрическое поле исчезает, а энергия магнитного поля катушки достигает наибольшего значения:

$$W_{L\max} = \frac{LI_0^2}{2}, \quad (4)$$

где  $I_0$  – максимальная величина ток в контуре.

С этого момента ток в контуре начинает убывать, вследствие чего ЭДС самоиндукции изменяет знак, препятствуя убыванию тока. При этом энергия магнитного поля катушки уменьшается, а энергия электрического поля конденсатора растёт, стремясь к максимальному значению, которому соответствует полная перезарядка конденсатора. В этот момент времени мгновенные значения электрического тока и энергии магнитного поля обращаются в нуль. Далее процесс повторяется в обратном порядке, и в контуре устанавливаются *незатухающие электромагнитные колебания* (рис. 2).



**Рис. 2.** Незатухающие электромагнитные колебания

Электромагнитные колебания в колебательном контуре можно возбудить двумя способами: зарядить конденсатор (т.е. сообщить электрический заряд одной из обкладок конденсатора) или создать условия для возникновения в катушке ЭДС индукции, а затем убрать источники возбуждения.

*Период колебаний  $T$*  - интервал времени между двумя последовательными максимальными значениями колеблющейся величины.

Заметим, что описанные выше колебания происходили бы бесконечно долго лишь при отсутствии испускания таким контуром электромагнитного излучения.

**Затухающие колебания.** Если колебательный контур содержит активное сопротивление  $R$ , то при протекании по нему тока часть общей энергии контура  $W$  необратимо переходит в другие виды энергии. Если не учитывать потери на электромагнитное излучение, то энергия выделяется в виде тепла, которое описывается законом Джоуля-Ленца при постоянных силе тока и сопротивлении:

$$Q = I^2 R t, \quad (5)$$

где  $Q$  - количество тепла, выделяемого за промежуток времени  $t$ ,  $I$  – сила тока,  $R$  - сопротивление.

При этом уменьшаются с течением времени амплитудные значения тока в контуре и разности потенциалов на обкладках конденсатора. Колебания затухают.

Временная зависимость разности потенциалов на обкладках конденсатора наблюдается в данной работе на экране осциллографа:

$$U(t) = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (6)$$

Эту зависимость можно получить теоретическим путем, используя закон Ома для участка цепи, содержащей ЭДС. Для мгновенных значений токов и напряжений в таком контуре:

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon = U - L \frac{dI}{dt}. \quad (7)$$

Преобразуем это уравнение, используя формулу (2) и соотношение  $q = CU$ . Тогда уравнение (7) примет вид:

$$LC \left( \frac{d^2 U}{dt^2} \right) + RC \left( \frac{dU}{dt} \right) + U = 0. \quad (8)$$

Разделим обе части уравнения (8) на  $LC$  и введём обозначения:

$$\frac{R}{2L} = \beta, \quad \frac{1}{LC} = \omega_0^2, \quad (9)$$

где  $\beta$  - коэффициентом затухания,  $\omega_0$  - собственная циклическая (круговая) частотой контура. Тогда из уравнения (8) получим *дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний напряжения на конденсаторе в колебательном контуре:*

$$\frac{d^2 U}{dt^2} + 2\beta \frac{dU}{dt} + \omega_0^2 U = 0, \quad (10)$$

решение которого дает искомую зависимость  $U(t)$ .

Следует отметить, что аналогичные дифференциальные уравнения могут быть получены для различного рода механических, электромеханических и других колебательных систем. В этих системах отсутствуют внешние вынуждающие воздействия, а силы сопротивления при малых скоростях движения (скоростях изменения параметра системы, совершающей колебания) линейно зависят от скорости. При этом энергия, внесенная в систему извне, непрерывно уменьшается в процессе колебаний, переходя, в конечном счете, в тепловую энергию.

Уравнение (10) – линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами. В

частном случае, при слабом затухании  $\beta^2 < \omega_0^2$  его решение имеет вид:

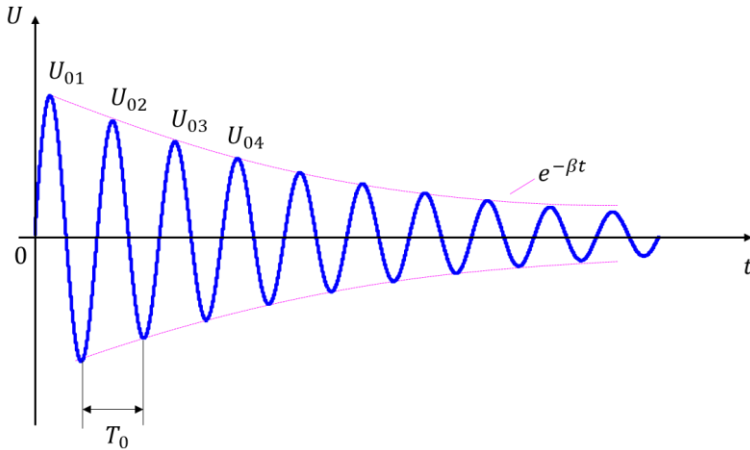
$$U(t) = U_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (11)$$

где  $\varphi_0$  – начальная фаза колебаний,  $U_0 e^{-\beta t}$  – амплитуда колебаний,  $U_0$  — максимально возможное значение амплитуды (при  $t = 0$ ),  $\omega$  – циклическая частота затухающих колебаний:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}. \quad (12)$$

Выражение (11) описывает затухающий колебательный процесс (рис. 3) с периодом:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}. \quad (13)$$



**Рис. 3.** Затухающие электромагнитные колебания при  $\beta^2 < \omega_0^2$

Вообще говоря, при  $\beta \neq 0$  разность потенциалов  $U(t)$  не является строго периодической функцией времени  $U(t) \neq U(t + T)$ . Периодом колебаний в этом случае принято считать минимальные промежутки времени между значениями  $A(t)$  одного знака.

Из формулы (11) следует, что изменение амплитуды колебаний, т.е. степень затухания колебаний или скорость затухания колебаний, зависит от величины коэффициента  $\beta$ ,

который называют *коэффициентом затухания*. Коэффициент затухания - физическая величина, обратная времени релаксации  $\tau$ :

$$\beta = \frac{1}{\tau}, \quad (14)$$

где  $\tau$  – время релаксации – время, в течение которого амплитуда колебаний уменьшается в  $e$  раз.

Таким образом, характер колебательного процесса определяется соотношениями между электрическими параметрами контура  $R$ ,  $L$  и  $C$ .

При  $\beta=0$  в контуре устанавливаются свободные гармонические незатухающие колебания (рис. 2):

$$U(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (15)$$

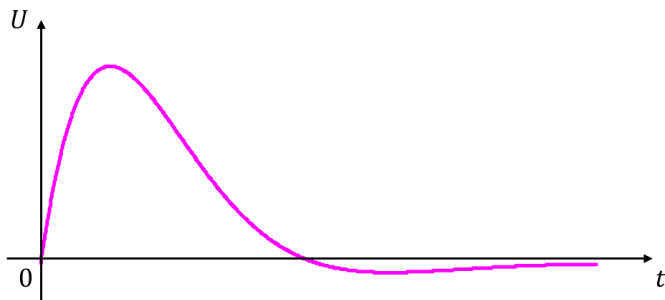
Период данных колебаний описывается формулой Томсона:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (16)$$

При  $\beta < \omega_0$  (при  $R < R_{KP}$ ) в контуре реализуется затухающий колебательный процесс (рис. 3).

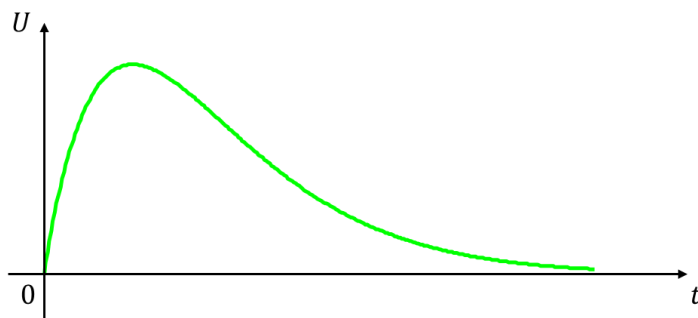
При  $\beta = \omega_0$  в контуре возникает апериодический процесс с бесконечным периодом, называемый *критическим режимом* (рис. 4), возможный при сопротивлении контура, равном критическому значению:

$$R = R_{KP} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (17)$$



**Рис. 4.** Апериодический процесс при критическом сопротивлении (критический режим)

При  $\beta > \omega_0$  (при  $R > R_{кр}$ ) циклическая частота  $\omega$  и период колебаний  $T$  становятся мнимыми величинами. Это соответствует аperiodическому процессу разряда конденсатора на большое активное сопротивление (рис. 5).



**Рис. 5.** Аperiodический процесс разряда конденсатора на большое активное сопротивление

**Характеристики колебаний.** Наряду с коэффициентом затухания  $\beta$  для характеристики затухающих колебаний используются и другие параметры: логарифмический декремент  $\delta$  и добротность контура  $Q$ .

*Логарифмический декремент*  $\delta$  вводится как натуральный логарифм отношения амплитуд колебаний, разделенных во времени на период  $T$  (рис. 3), т.е. он равен величине, обратной числу колебаний  $N$ , за которое амплитуда уменьшается в  $e$  раз:

$$\delta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \ln \frac{U_0 e^{-\beta t}}{U_0 e^{-\beta(t+T)}} = \beta T = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{N}. \quad (18)$$

*Добротность контура*  $Q$  – параметр, характеризующий быстроту потери энергии, запасенной в контуре. Добротность контура показывает, во сколько раз амплитуда вынужденных колебаний напряжения на конденсаторе при резонансе превышает амплитуду внешней прикладываемой электродвижущей силы, и определяется формулой:

$$Q = \frac{\omega_0}{2\beta}. \quad (19)$$

Для колебаний при малых  $\beta$  частота затухающих колебаний  $\omega$  приблизительно равна собственной частоте колебаний  $\omega_0$  (см. формулу (12)) и тогда, учитывая формулу (18), величина добротности:

$$Q = \frac{\omega_0}{2\beta} \approx \frac{\omega}{2\beta} = \frac{2\pi}{2\beta T} = \frac{\pi}{\delta}. \quad (20)$$

Для колебательного контура верны соотношения (9), тогда добротность:

$$Q = \frac{\omega_0}{2\beta} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (21)$$

*Характеристическое сопротивление*  $\rho$  является количественной мерой оценки энергии, запасенной реактивными элементами контура: катушкой индуктивности (энергия магнитного поля) и конденсатором (энергия электрического поля):

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (22)$$

Из соотношения (21) следует, что контур, имеющий большое активное сопротивление, обладает малой добротностью и интенсивно теряет электромагнитную энергию, колебания быстро затухают.

Все рассмотренные процессы относятся к колебательному контуру с сосредоточенными параметрами  $R$ ,  $L$  и  $C$ . В реальных колебательных контурах нельзя выделить ни одного участка цепи, не обладающего активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью, то есть параметры  $R$ ,  $L$  и  $C$  не являются сосредоточенными, а распределены по участкам цепи, что усложняет анализ колебательных процессов. При этом также необходимо учитывать входные электрические параметры измерительных приборов.

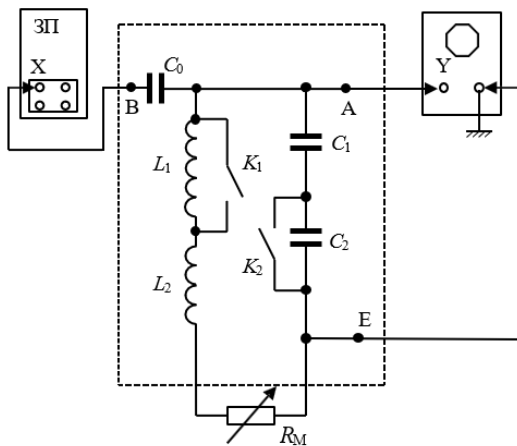
### **Методика проведения измерений и описание установки**

Схемы установок и экспериментальные установки немного различаются в зависимости от лаборатории. Ниже приведены

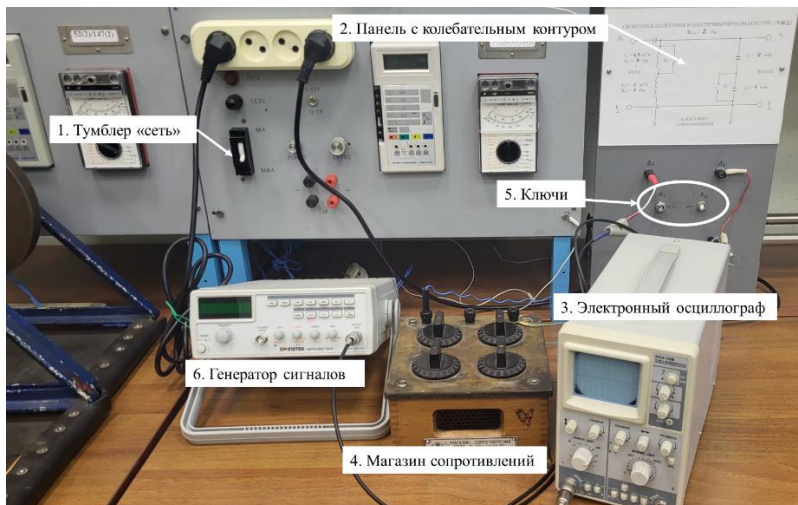


описания установок и методики измерений в зависимости от лаборатории.

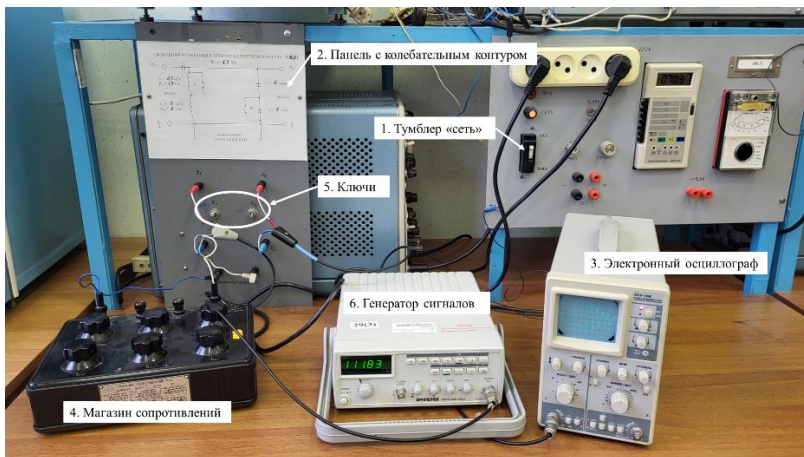
**Аудитория 14202.** На рис. 6 изображена схема установки для исследования затухающих колебаний в контуре  $RLC$ . На рис. 7 и 8 фотографии самих установок.



**Рис. 6.** Схема установки работы №29 в ауд. 14202



**Рис. 7.** Фотография установки работы №29(1) в ауд. 14202



**Рис. 8.** Фотография установки работы №29(2,3) в ауд. 14202

Колебательный контур состоит из последовательно соединенных конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  катушек  $L_1$  и  $L_2$ , магазина сопротивлений  $R_M$ . Разделительный конденсатор  $C_0$  в контур не входит и его емкость при расчетах не учитывается.

Электрические параметры для работы №29(1):

- $C_1 = 2 \text{ мкФ}$
- $C_2 = 4 \text{ мкФ}$
- $L_1 = 4,5 \text{ мГн}$ ,  $R_{L1} = 3 \text{ Ом}$
- $L_2 = 5 \text{ мГн}$ ,  $R_{L2} = 3 \text{ Ом}$
- $R_{Ц} = 2 \text{ Ом}$

Электрические параметры для работы №29(2,3):

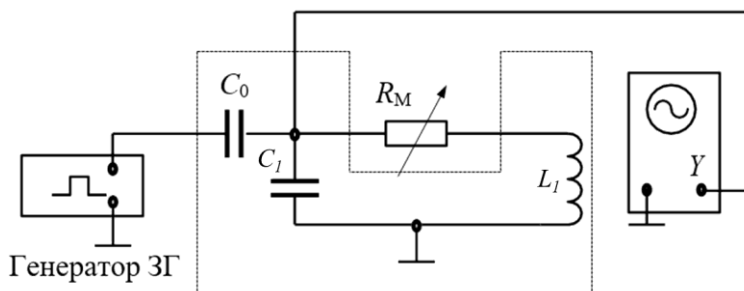
- $C_1 = 2 \text{ мкФ}$
- $C_2 = 5 \text{ мкФ}$
- $L_1 = 2,5 \text{ мГн}$ ,  $R_{L1} = 1,5 \text{ Ом}$
- $L_2 = 3 \text{ мГн}$ ,  $R_{L2} = 2 \text{ Ом}$
- $R_{Ц} = 1,5 \text{ Ом}$

С помощью ключей  $K_1$  и  $K_2$  можно изменять величины емкости и индуктивности контура.

Для возбуждения колебаний в данной работе используется напряжение генератора прямоугольной формы, которое через конденсатор  $C_0$  подается на контур для возбуждения электромагнитных колебаний. При нарастании напряжения

генератора устанавливается постоянный ток зарядки конденсатора  $C_0$ .

**Аудитория 14110.** На рис. 9 изображена схема установки для исследования затухающих колебаний в контуре  $RLC$ . На рис. 10 и 11 фотографии самих установок.



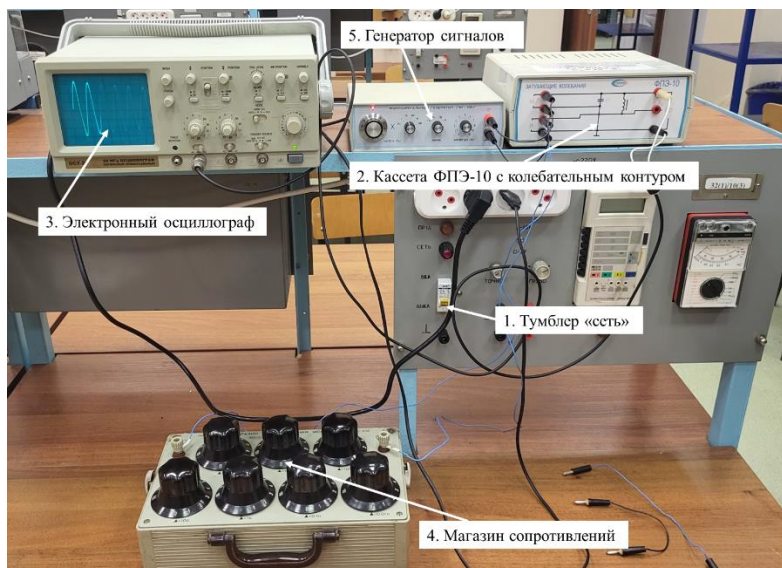
**Рис. 9.** Схема установки работы №29 в ауд. 14110

Колебательный контур состоит из конденсатора  $C$ , катушки  $L$  и магазина сопротивлений  $R_M$ . Разделительный конденсатор  $C_0$  в контур не входит и его емкость при расчетах не учитывается.

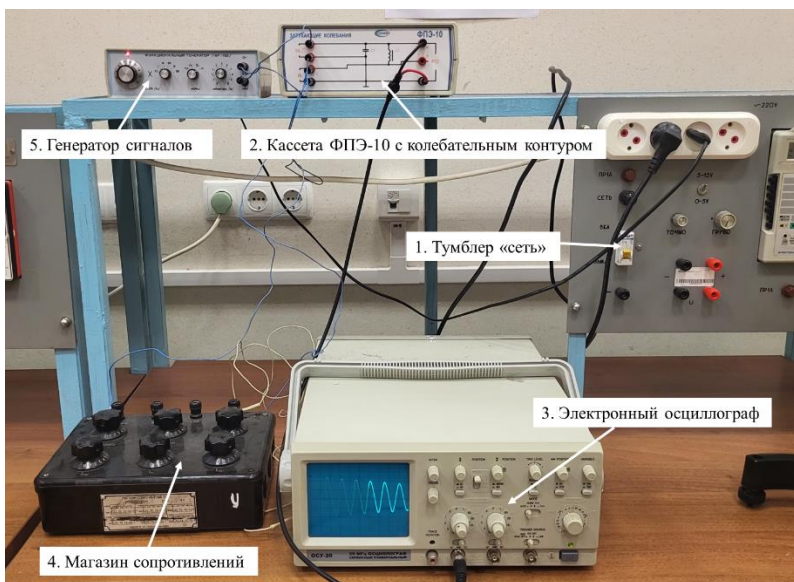
Электрические параметры для работы №29:

- $C_I = 10^{-7}$  Ф
- $L_I = 0,016$  мГн
- $R_{ц} = 0$  Ом

Для возбуждения колебаний в данной работе используется напряжение генератора прямоугольной формы, которое через конденсатор  $C_0$  подаётся на контур для возбуждения электромагнитных колебаний. При нарастании напряжения генератора устанавливается постоянный ток зарядки конденсатора  $C_0$ .

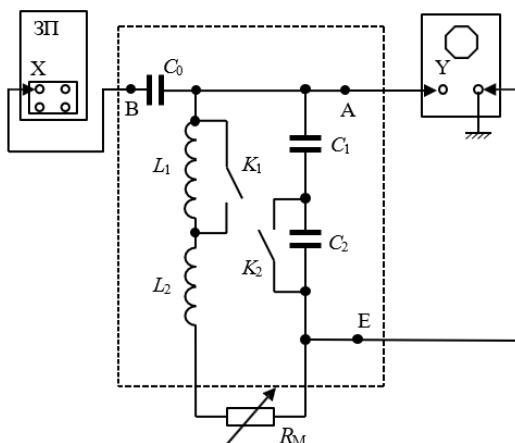


**Рис. 10.** Лабораторная установка работы №29 в ауд. 14110



**Рис. 11.** Лабораторная установка работы №29 в ауд. 14110

**Аудитория 14111.** На рис. 12 изображена схема установки для исследования затухающих колебаний в контуре  $RLC$ . На рис. 13 фотография самой установки.



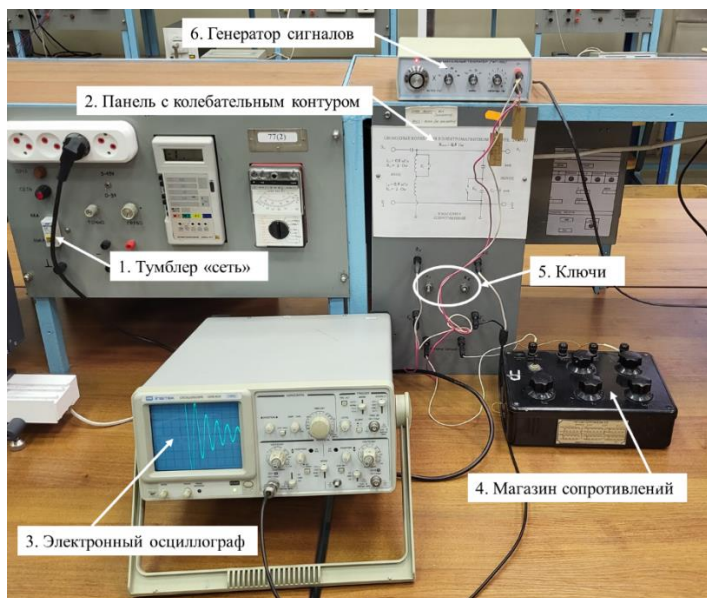
**Рис. 12.** Схема установки работы №29(3) в ауд. 14111

Колебательный контур состоит из последовательно соединенных конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  катушек  $L_1$  и  $L_2$ , магазина сопротивлений  $R_M$ . Разделительный конденсатор  $C_0$  в контур не входит и его электроемкость при расчетах не учитывается.

Электрические параметры для работы №29(3):

- $C_1 = 2 \text{ мкФ}$
- $C_2 = 4 \text{ мкФ}$
- $L_1 = 0,6 \text{ мГн}$ ,  $R_{L1} = 1 \text{ Ом}$
- $L_2 = 0,6 \text{ мГн}$ ,  $R_{L2} = 1 \text{ Ом}$
- $R_{Ц} = 0,5 \text{ Ом}$

Для возбуждения колебаний в данной работе используется напряжение генератора прямоугольной формы, которое через конденсатор  $C_0$  подаётся на контур для возбуждения электромагнитных колебаний. При нарастании напряжения генератора устанавливается постоянный ток зарядки конденсатора  $C_0$ .



**Рис. 13.** Лабораторная установка работы №29(3) в ауд. 14111

### **Порядок выполнения работы**

#### **а) проведение измерений в лаборатории**

##### **Аудитория 14202.**

1. Проверьте установку в соответствии с рис. 7 или 8.
2. Включите тумблер «сеть»-1 (рис. 7,8) и осциллограф-3, дайте осциллографу прогреться 2 – 3 мин и отрегулируйте яркость и фокусировку луча. Плохая фокусировка увеличивает погрешность измерений.

3. Рассчитайте, при каком подключении ключей-5  $K_1$  и  $K_2$  на панели установки (рис. 14, 15) будет максимальное значение индуктивности  $L$  и минимальное значение  $C$  с учетом того, что при последовательном соединении:

$$L = L_1 + L_2, \quad C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \quad (23)$$

Замыкание ключа выключает элемент из схемы, размыкание – подсоединяет его последовательно другим элементам контура.



Запишите данные значения  $L$  и  $C$  в таблицу 1. Установите ключи-5 в нужное положение в соответствии с рассчитанными  $L$  и  $C$ .

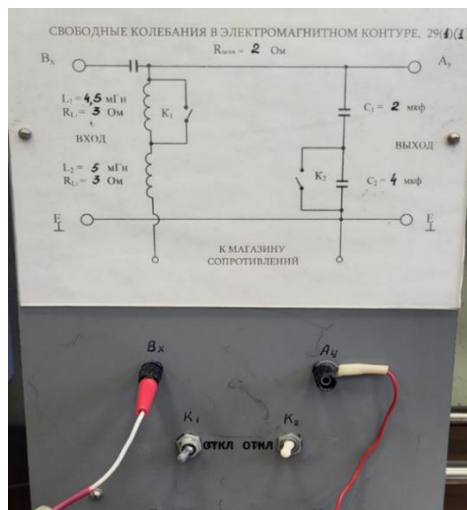


Рис. 14. Панель установки работы №29(1)

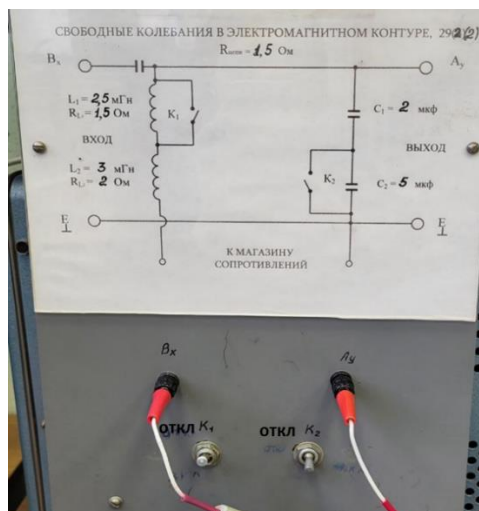


Рис. 15. Панель установки работы №29(2,3)

4. Установите на магазине сопротивлений-4 (рис. 7, 8)  $R_M = 0$ . На экране осциллографа должна наблюдаться характерная картина затухающих колебаний. Если она отсутствует, то проверьте положение тумблеров и переключателей в соответствии с рис. 16-19.

Для установки №29(1).

На передней панели осциллографа (рис. 16) тумблер «вольт/дел» установить в положение «20мВ», тумблер «время/дел» - в положение «.2мс». Все кнопки должны быть в отжатом положении. Тумблеры «плавно» установить в положение, как на рис.16. Тумблеры « $\updownarrow$ » и « $\leftrightarrow$ » перемещают график в вертикальном и горизонтальном направлениях.



**Рис. 16.** Фотография электронного осциллографа работы №29(1)

На передней панели генератора сигналов-6 (рис. 17) установить значение частоты  $\sim 110$  Гц, в верхнем ряду кнопок нажать кнопку «100», чтобы над ней загорелся индикатор, в нижнем ряду – кнопку прямоугольного сигнала, чтобы над ней загорелся индикатор. Кнопка «ATT -20dB» — это аттенуатор, который уменьшает амплитуду электромагнитных сигналов без



существенного искажения их формы. Её можно нажать, чтобы график полностью поместился в экран осциллографа. Также тумблером «AMPL» также можно регулировать амплитуду.

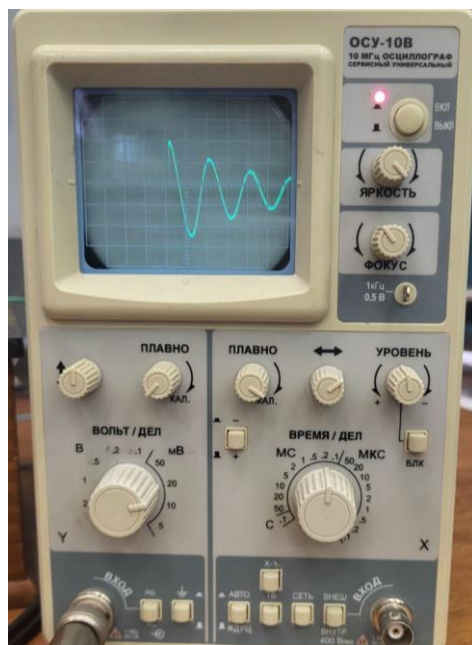


**Рис. 17.** Фотография генератора сигналов работы №29(1)

Для установки №29(2,3).

На передней панели осциллографа (рис. 18) тумблер «вольт/дел» установить в положение «20мВ», тумблер «время/дел» - в положение «.2мс». Все кнопки должны быть в отжатом положении. Тумблеры «плавно» установите в положение, как на рис.11. Тумблеры « $\updownarrow$ » и « $\leftrightarrow$ » перемещают график в вертикальном и горизонтальном направлениях.

На передней панели генератора сигналов-6 (рис. 19) установите значение частоты ~110Гц, в верхнем ряду кнопок нажать кнопку «100», чтобы над ней загорелся индикатор, в нижнем ряду – кнопку прямоугольного сигнала, чтобы над ней загорелся индикатор. Кнопка «ATT -20dB» — это аттенуатор, который уменьшает амплитуду электромагнитных сигналов без существенного искажения их формы. Её можно нажать, чтобы график полностью поместился в экран осциллографа. Также тумблером «AMPL» также можно регулировать амплитуду.



**Рис. 18.** Фотография электронного осциллографа работы №29(2,3)



**Рис. 19.** Фотография генератора сигналов работы №29(2,3)

Получите изображение затухающих колебаний при сопротивлении  $R_M = 0$ .

5. Пользуясь калибровочной сеткой осциллографа, измерьте величины любых четырех последовательно расположенных (через период) амплитуд колебаний:  $U_{01}$ ;  $U_{02}$ ;  $U_{03}$ ;  $U_{04}$  (рис. 3). Данные измерений занесите в таблицу 1.

6. Увеличивая сопротивление, получите на экране осциллографа апериодический колебательный процесс (рис. 4), при котором  $R$  будет равно  $R_{кр}$ . Повторите этот опыт несколько раз и определите среднее значение критического сопротивления контура. Запишите полученное значение сопротивления  $R_{кр\text{ эксп.}}$ .

7. Не изменяя величины индуктивности и емкости контура, проведите измерения, описанные в п.5 при трех различных значениях сопротивления  $R_M \ll R_{кр}$ . Данные измерений занесите в таблицу 1.

### **Аудитория 14110.**

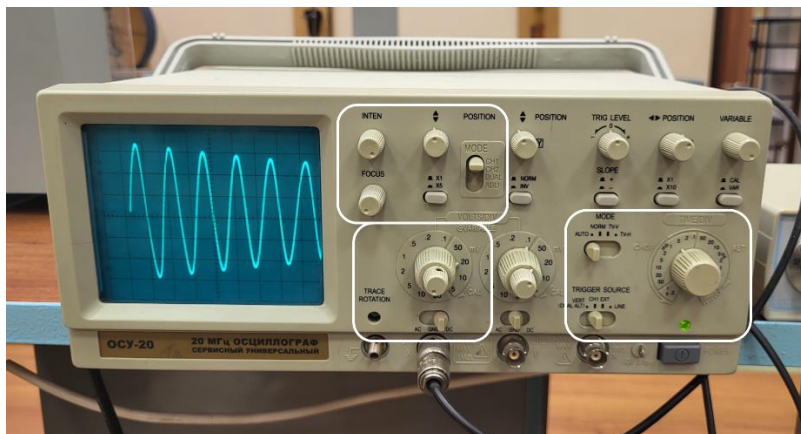
1. Проверьте установку в соответствии с рис. 10 и 11.

2. Включите тумблер «сеть»-1 (рис. 10, 11) и осциллограф-3, дайте осциллографу прогреться 2 – 3 мин и отрегулируйте яркость и фокусировку луча. Плохая фокусировка увеличивает погрешность измерений.

3. Запишите данные значения  $L_I$  и  $C_I$  в таблицу 1 (данные написаны сверху 2-кассеты ФПЭ-10 с колебательным контуром).

4. Установите на магазине сопротивлений-4 (рис. 10, 11)  $R_M = 0$ . На экране осциллографа должна наблюдаться характерная картина затухающих колебаний. Если она отсутствует, то проверьте положение тумблеров и переключателей в соответствии с рис. 20, 21.

На передней панели осциллографа (рис. 20) тумблер «VOLTS/DIV» установить в положение «20mV», тумблер под ним – в положение «DC». Тумблер «TIME/DIV» установить в положение «.5мс». Один переключатель «MODE» должен находиться в положении «CH1», другой – в положении «AUTO». Переключатель «TRIGGER SOURCE» - «CH1». Все кнопки должны быть в отжатом положении. Остальные тумблеры и переключатели поставьте в положения в соответствии с рис. 20. Тумблеры « $\updownarrow$  POSITIN» и « $\leftrightarrow$  POSITION» перемещают график в вертикальном и горизонтальном направлениях.



**Рис. 20.** Фотография электронного осциллографа работы №29

На передней панели генератора сигналов-5 (рис. 21) установите значение частоты на порядок 10Гц. Форму сигнала выберете прямоугольную. Тумблером «амплитуда» можно регулировать амплитуду колебаний.



**Рис. 21.** Фотография генератора сигналов работы №29

Получите изображение затухающих колебаний при сопротивлении  $R_M = 0$ .

5. Пользуясь калибровочной сеткой осциллографа, измерьте величины любых четырех последовательно расположенных (через период) амплитуд колебаний:  $U_{01}$ ;  $U_{02}$ ;  $U_{03}$ ;  $U_{04}$  (рис. 3). Данные измерений занесите в таблицу 1.

6. Увеличивая сопротивление, получите на экране

осциллографа апериодический колебательный процесс (рис. 4), при котором  $R$  будет равно  $R_{кр}$ . Повторите этот опыт несколько раз и определите среднее значение критического сопротивления контура. Запишите полученное значение сопротивления  $R_{кр \text{ эксп.}}$ .

7. Не изменяя величины индуктивности и емкости контура, проведите измерения, описанные в п.5 при трех различных значениях сопротивления  $R_M \ll R_{кр}$ . Данные измерений занесите в таблицу 1.

### **Аудитория 14111.**

8. Проверьте установку в соответствии с рис. 13.

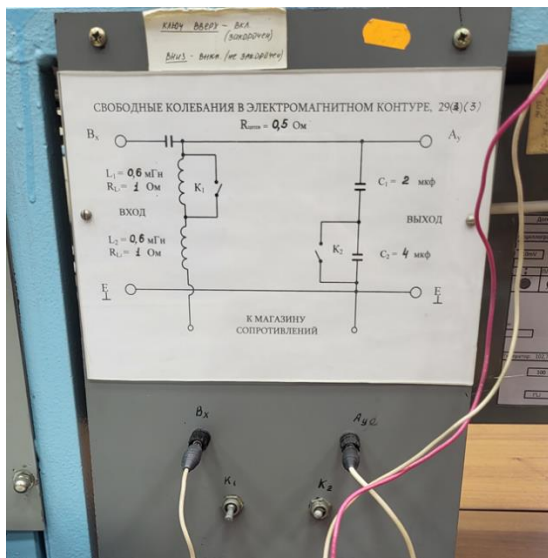
9. Включите тумблер «сеть»-1 (рис. 13) и осциллограф-3, дайте осциллографу прогреться 2 – 3 мин и отрегулируйте яркость и фокусировку луча. Плохая фокусировка увеличивает погрешность измерений.

10. Рассчитайте, при каком подключении ключей-5  $K_1$  и  $K_2$  на панели установки (рис. 22) будет максимальное значение индуктивности  $L$  и минимальное значение  $C$  с учетом того, что при последовательном соединении:

$$L = L_1 + L_2, \quad C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \quad (24)$$

Замыкание ключа выключает элемент из схемы, размыкание – подсоединяет его последовательно другим элементам контура.

Запишите данные значения  $L$  и  $C$  в таблицу 1. Установите ключи-5 в нужное положение в соответствии с рассчитанными  $L$  и  $C$ .

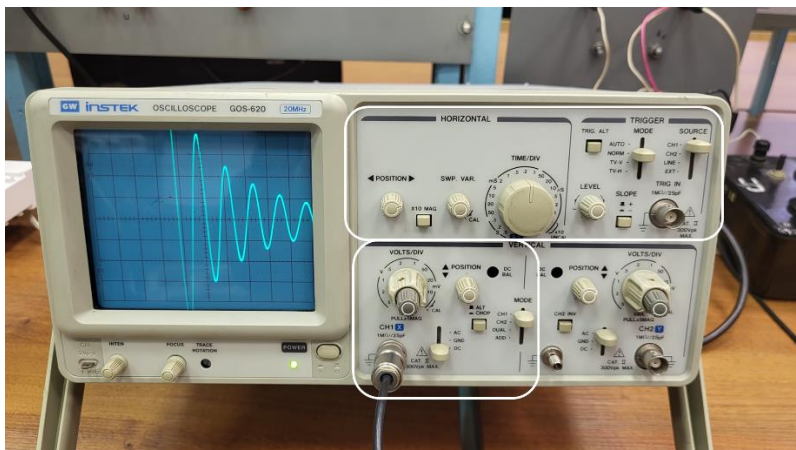


**Рис. 22.** Панель установки работы №29(1)

11. Установите на магазине сопротивлений-4 (рис. 13)  $R_M = 0$ . На экране осциллографа должна наблюдаться характерная картина затухающих колебаний. Если она отсутствует, то проверьте положение тумблеров и переключателей в соответствии с рис. 23, 24.

Для установки №29(3).

На передней панели осциллографа (рис. 23) тумблер «VOLTS/DIV» установить в положение «20мВ», тумблер «TIME/DIV» - в положение «.2мс». Переключатель «MODE» в области VERTICAL должен находиться в положении «CH1», в области TRIGGER - «NORM». Все кнопки должны быть в отжатом положении. Остальные тумблеры и переключатели поставьте в положения в соответствии с рис. 23. Тумблеры « $\updownarrow$  POSITIN» и « $\leftrightarrow$  POSITION» перемещают график в вертикальном и горизонтальном направлениях.



**Рис. 23.** Фотография электронного осциллографа работы №29(1)

На передней панели генератора сигналов-6 (рис. 24) установите значение частоты на порядок 100Гц. Форму сигнала выберите прямоугольную. Тумблером «амплитуда» можно регулировать амплитуду колебаний.



**Рис. 24.** Фотография генератора сигналов работы №29(1)

Получите изображение затухающих колебаний при сопротивлении  $R_M = 0$ .

12. Пользуясь калибровочной сеткой осциллографа, измерьте величины любых четырех последовательно расположенных (через период) амплитуд колебаний:  $U_{01}$ ;  $U_{02}$ ;  $U_{03}$ ;  $U_{04}$  (рис. 3). Данные измерений занесите в таблицу 1.

13. Увеличивая сопротивление, получите на экране осциллографа аperiodический колебательный процесс (рис. 4), при котором  $R$  будет равно  $R_{кр}$ . Повторите этот опыт несколько раз и определите среднее значение критического сопротивления контура. Запишите полученное значение сопротивления  $R_{кр \text{ эксп.}}$ .

14. Не изменяя величины индуктивности и емкости контура, проведите измерения, описанные в п.5 при трех различных значениях сопротивления  $R_M \ll R_{кр}$ . Данные измерений занесите в таблицу 1.

Таблица 1

Измеренные значения амплитуд колебаний напряжения

| № | $R_M$ | $U_{01}$ | $U_{02}$ | $U_{03}$ | $U_{04}$ | $\frac{U_{01}}{U_{02}}$ | $\frac{U_{02}}{U_{03}}$ | $\frac{U_{03}}{U_{04}}$ |
|---|-------|----------|----------|----------|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 |       |          |          |          |          |                         |                         |                         |
| 2 |       |          |          |          |          |                         |                         |                         |
| 3 |       |          |          |          |          |                         |                         |                         |
| 4 |       |          |          |          |          |                         |                         |                         |

$C=$

$L=$

$R_{II}=$

$R_L=$

$R_{кр \text{ эксп.}} =$

### б) обработка результатов измерений

1. Рассчитайте, используя данные таблицы 1, величины логарифмического декремента  $\delta_i$  и значения добротности  $Q_i$  для всех исследуемых сопротивлений  $R$  по формулам (25), а также средние значения данных величин  $\delta_{ср}$ ,  $Q_{ср}$ . Результаты занесите в таблицу 2.

$$\delta_i = \ln \left( \frac{U_{oi}}{U_{oi+1}} \right), \quad Q_i = \frac{\pi}{\delta_i}. \quad (25)$$



Таблица 2

Экспериментальные и теоретические значения характеристик  
затухающих колебаний

| № | Экспериментальные значения |            |            |               |       |       |       |          | $R=R_L+R_M+R_{II}$ |
|---|----------------------------|------------|------------|---------------|-------|-------|-------|----------|--------------------|
|   | $\delta_1$                 | $\delta_2$ | $\delta_3$ | $\delta_{cp}$ | $Q_1$ | $Q_2$ | $Q_3$ | $Q_{cp}$ |                    |
| 1 |                            |            |            |               |       |       |       |          |                    |
| 2 |                            |            |            |               |       |       |       |          |                    |
| 3 |                            |            |            |               |       |       |       |          |                    |
| 4 |                            |            |            |               |       |       |       |          |                    |

2. Рассчитайте значение сопротивления катушки индуктивности  $R_L$  через среднее значение добротности  $Q_{cp}$  при  $R_M = 0$  по формуле (26) и запишите под таблицей 1:

$$R_L = \frac{1}{Q_{cp}} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (26)$$

3. С помощью полученного значения  $R_L$  рассчитайте значения полных сопротивлений для каждого  $R_M$  и запишите в таблицу 2.

4. Рассчитайте величины характеристического сопротивления  $\rho$ , критического сопротивления  $R_{KP\text{теор.}}$ , собственной частоты  $\omega_0$  и периода  $T_0$  колебаний контура по формулам (27).

$$\begin{aligned} \rho &= \sqrt{\frac{L}{C}}, & R_{KP\text{теор.}} &= 2\sqrt{\frac{L}{C}}, \\ \omega_0 &= \frac{1}{\sqrt{LC}}, & T_0 &= \frac{2\pi}{\omega_0}. \end{aligned} \quad (27)$$

5. Рассчитайте величины теоретических коэффициента затухания  $\beta$ , декремента затухания  $\delta_T$  и добротности  $Q_T$  контура по формулам (28) и занесите результаты расчетов в таблицу 3.

$$\beta = \frac{R}{2L}, \quad \delta_T = \beta T_0, \quad Q_T = \frac{\rho}{R}. \quad (28)$$

Таблица 3.

| № | Теоретические значения |            |       |              |
|---|------------------------|------------|-------|--------------|
|   | $\beta$                | $\delta_T$ | $Q_T$ | $R_{KРтеор}$ |
| 1 |                        |            |       |              |
| 2 |                        |            |       |              |
| 3 |                        |            |       |              |
| 4 |                        |            |       |              |

6. Сравните полученные расчетные значения  $R_{KРтеор}$ ,  $\delta_T$ ,  $Q_T$  с экспериментальными.

7. Рассчитайте погрешность измерения добротности для сопротивления  $R_M = 0$ . Для этого определите коэффициент Стьюдента  $\alpha$  при доверительной вероятности  $P = 0,95$  и при числе полученных значений добротности  $n=3$ .

8. Вычислите абсолютную  $\Delta Q$  и относительную  $\delta Q$  погрешности добротности контура по формулам (29).

$$\Delta Q = \alpha \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{cp} - Q_i)^2}{n(n-1)}}, \quad \delta Q = \frac{\Delta Q}{Q_{cp}} \cdot 100\%. \quad (29)$$

Здесь  $Q_{cp}$  берётся для случая  $R_M = 0$ .

9. Запишите окончательный результат измерений, округлив  $Q_{cp}$  в соответствии с полученной абсолютной погрешностью, в виде (30):

$$Q = Q_{cp} \pm \Delta Q. \quad (30)$$

## Контрольные вопросы

1. Каковы условия возникновения собственных колебаний?
2. Чем обусловлено затухание колебаний в контуре?
3. Укажите возможные способы возбуждения колебаний в колебательном контуре?
4. Как происходит возбуждение колебаний в исследуемом контуре?
5. Напишите дифференциальное уравнение колебаний для колебательного контура и его решение для случая  $\beta < \omega_0$ .
6. Для каких физических величин в исследуемом контуре могут наблюдаться колебательные процессы
7. Напишите закон убывания амплитуды колебаний при затухающих колебаниях. Как в этом случае понимают термин «амплитуда»?
8. Назовите величины, характеризующие затухание колебаний, укажите их физический смысл и размерности.
9. Какое, условие необходимо выполнить при подборе электрических параметров  $R$ ,  $L$  и  $C$  для колебательного контура, чтобы изменение напряжения на предварительно заряженном конденсаторе осуществлялось по колебательному закону?
10. Как влияет коэффициент затухания на условный период затухающих колебаний контура?
11. Как изменяется логарифмический декремент затухания и добротность контура, если при изменении электрических параметров контура  $R$ ,  $L$  и  $C$  число колебаний, за которое амплитуда уменьшится в  $e$  раз, увеличилось на десять колебаний?
12. К изменению, каких характеристик колебаний и колебательного контура приведет изменение индуктивности в цепи?
13. Почему при выводе основного уравнения свободных затухающих колебаний в контуре, где протекают переменные токи, используют закон Ома, полученный для постоянного тока?

### **Рекомендуемая литература**

В качестве литературы для изучения затухающих электромагнитных колебаний можно рекомендовать [1, §13.2, §13.3; 2, §208-210; 3, §122-124]. Там же можно найти ответы на некоторые контрольные вопросы.

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 тт. Т. 2. Электричество и магнетизм: Учебное пособие. 5-е изд., испр. — СПб.: «Лань», 2021. — 352 с.
2. Калашников С.Г. Электричество: Учебн. пособие. – 6-е изд., стер. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 624 с.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 3. Электричество. – М.: Наука, 1977. – 704 с.