ФГБОУ ВО “Ярославский государственный педагогический
университет им. К.Д. Ушинского”

Н.М. СОКОЛОВ, С.С. ФЕФЕЛОВ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО РАДИОТЕХНИКЕ

Часть II

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ КОНТУРЫ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПОСТОЯННЫМИ

Учебное пособие для студентов

Издание второе, переработанное

Ярославль
2017

Редактор П.И. ХАРНАШ

Коррекция второго издания — В.К. Мухин

Компьютерная верстка — Е.Н. Шевелева

© ФГБОУ ВПО "Ярославский государственный педагогический университет им. К.Д. Ушинского", 2017

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие предназначено для студентов педагогических институтов и содержит описание лабораторных работ по теме «Колебательные контуры» курса радиотехники.

Практикум имеет краткую теоретическую часть, вполне достаточную для подготовки и качественного выполнения заданий. Для каждой работы указаны ее цель, рекомендуемая литература, дано описание установки для исследования, имеются домашнее и лабораторное задания, контрольные вопросы для самопроверки и требования, предъявляемые к отчету.

Наличие теоретической части особенно оправдано, когда проведение лабораторных занятий опережает (полностью или в отдельных частях) прочитанный на лекциях материал. Домашнее задание стимулирует самостоятельную подготовку к лабораторным занятиям.

Пособие удобно и для студентов-заочников.

В зависимости от программы количество и перечень работ, а также объем заданий могут быть сокращены по усмотрению преподавателя.

В зависимости от программы количество и перечень работ, а также объем лабораторного задания могут быть сокращены по усмотрению преподавателя.

Правила выполнения лабораторных работ даны в части I пособия (Изд. ЯГПУ, 2016).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Н.Б. Догадин. Основы радиотехники [Текст]: учебник – С.-Пб.: Изд-во «Лань», 2007 г. — 272 с.: ил.

[2] Е.М. Гершензон, Г.Д. Полянина, Н.В. Соина. Радиотехника [Текст]: учебник – М.: «Просвещение», 1986 г.

[3] Е.М. Гершензон, Н.Н. Малов, Г.Д. Полянина, В.С. Эткин. Радиотехника [Текст]: учебник – М.: «Просвещение», 1971 г.

[4] И.П. Жеребцов. Радиотехника [Текст]: учебник – «Связь», изд. 5-е, 1963—1965.

[5] А.М. Калашников, Я.В. Стенук. Основы радиотехники и радиолокации. Колебательные системы [Текст]: – М.: Военное изд-во Министерства обороны СССР, 1972 г. (любое издание позднее)

[6] Инструкции к радиоизмерительной и другой используемой аппаратуре. [Текст].

1. Одиночный колебательный контур

1.1. Общие сведения

Колебательный контур с сосредоточенными постоянными — колебательная система, представляющая собой линейную цепь из индуктивности L, емкости C и активного сопротивления R, которые сосредоточены в отдельных участках цепи. Такие контуры называются закрытыми, так как они практически не излучают в окружающее пространство возбужденную в них электромагнитную энергию.

По физическому смыслу колебания в контуре — результат периодического процесса обмена реактивной энергии электрического поля конденсатора

$$W_C = \frac{CU_m^2}{2}$$

и магнитного поля катушки индуктивности

$$W_L = \frac{LI_m^2}{2}\,.$$

При этом напряжение опережает ток в цепи на 90°.

Для идеального контура, у которого $R = 0$, а значит

$$W_C = W_L$$

или

$$\frac{CU_m^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2}\,, \tag{1}$$

можно считать, что колебания будут происходить бесконечно долго.

В реальном контуре наличие активного сопротивления, характеризующего суммарные активные потери в цепи, приводит к затуханию колебаний. Мощность, рассеиваемая на R

$$P_R = I^2 R\,,$$

безвозвратно уходит из контура в виде тепла.

Если к цепи, состоящей из последовательно включенных L, C и R (рис. **??**), подвести внешнюю э.д.с.

$$e = E_m \sin \omega t\,,$$

то процесс в цепи описывается уравнением второго закона Кирхгофа

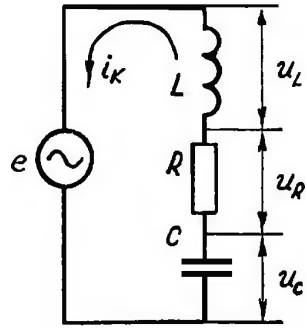

Рис. 1

$$U_L + U_R + U_C = e$$

или

$$L\frac{di}{dt} + iR + \frac{1}{C}\int idt = E_m \sin \omega t\,. \tag{2}$$

Общее решение этого уравнения для тока в колебательном контуре в зависимости от амплитуды первоначального возникшего тока I_m

$$i = I_m e^{-\frac{R}{2L}t} \sin \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}\, t\,. \tag{3}$$

Здесь изменение амплитуды тока характеризуется множителем

$$e^{-\frac{R}{2L}t}\,, \tag{4}$$

а частота свободных колебаний определяется выражением

$$\omega_c = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}\,. \tag{5}$$

Частное решение уравнения (**??**) имеет вид:

$$i = \frac{\dot{E}_m}{\dot{Z}} - \sin(\omega t + \varphi)\,, \tag{6}$$

где

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

— модуль полного сопротивления цепи.

1.2. Свободные колебания в одиночном контуре

При отсутствии внешней э.д.с. ($e = 0$) и наличии запаса энергии в реактивных элементах C или L ток в контуре описывается только общим решением (**??**) уравнения (**??**). Такие колебания в контуре, при которых однажды подведенная энергия более не пополняется, называются *свободными* или *собственными*, в отличие *от вынужденных*, для получения которых необходимо непрерывное пополнение энергии от внешнего источника.

Свободные колебания могут возникать при определенных соотношениях между L, C и R. Исследование подкоренного двучлена в выражении для частоты (**??**) показывает, что периодический процесс в контуре (кривая а, рис. **??**) возможен только при соблюдении условия

$$R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}\,. \tag{7}$$

Если же R велико, возникает апериодический разряд (кривая б, рис. **??**).

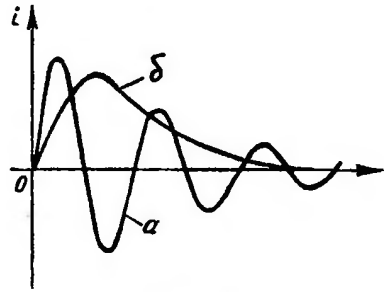

Рис. 2

В реальных контурах R весьма мало, поэтому для практических расчетов в формуле (**??**) вторым членом подкоренного выражения, учитывающим влияние R на частоту, пренебрегают и считают *частоту свободных колебаний* ω_c равной *собственной частоте* ω_o контура

$$\omega_c \approx \omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}\ [\text{рад}/c]\,, \tag{8}$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\ [\text{Гц}]\,, \tag{9}$$

а *период колебаний* контура

$$T_o = \frac{1}{f_o} = 2\pi\sqrt{LC}\,. \tag{10}$$

Длина волны для закрытого контура имеет только расчетный, но не физический смысл

$$\lambda_o = cT_o = \frac{c}{f_o} = c2\pi\sqrt{LC}\ [\text{м}]\,, \tag{11}$$

где c — скорость распространения электромагнитных колебании (света).

Из равенства (**??**) выявляется соотношение между амплитудами тока и напряжения в контуре

$$U_m = I_m\sqrt{\frac{L}{C}} = I_m\rho\,.$$

Величина

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}\ [\text{Ом}] \tag{12}$$

называется волновым *сопротивлением контура.* При процессе свободных колебаний

$$\rho = X_C = X_L\,.$$

Затухание процесса в контуре описывается выражением (**??**), в котором

$$\delta = \frac{R}{2L} \tag{13}$$

— *коэффициент затухания*, определяющий убывание амплитуды колебаний за 1 сек.

Изменение амплитуды колебаний за один период характеризуется *декрементом затухания*

$$\Delta = \frac{A_1}{A_2} = \frac{A_2}{A_3} = \ldots = \frac{A_{n-1}}{A_n} = e^{\delta T} = const\,, \tag{14}$$

где A_1, A_2, A_3, $\ldots A_n$ амплитуды смежных токов i_1, i_2, i_3, $\ldots i_n$ по выражению (**??**) (или напряжений), разделенных временем в один период (рис. **??**)

$$i_n = I_m e^{-\delta[t+(n-1)T]}\sin\omega[t+(n-1)T].$$

При определении Δ по осциллограмме амплитуды A_1, A_2, A_3, $\dots A_n$ измеряются в линейных единицах по сетке экрана осциллографа.

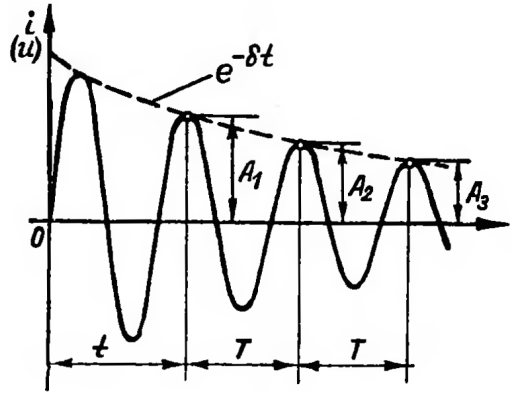

Рис. 3

Натуральный логарифм декремента затухания называется *логарифмическим декрементом затухания*

$$\theta = \ln \Delta = \ln \frac{A_{n-1}}{A_n} = 2,3 \lg \frac{A_{n-1}}{A_n} = \delta T_0 \,. \tag{15}$$

Его легко выразить через параметры контура

$$\theta = \delta T_0 = \delta 2\pi\sqrt{LC} = \pi R \sqrt{\frac{C}{L}} = \pi \frac{R}{\varrho} \,.$$

Величина, в π раз меньшая θ, носит название *затухание контура*

$$d = \frac{\theta}{\pi} = \frac{R}{X_L} = \frac{R}{X_C} = \frac{R}{\varrho} \,, \tag{16}$$

а величина, обратная затуханию, называется *добротностью* контура

$$Q = \frac{1}{d} = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} = \frac{\varrho}{R} =$$

$$= 2\pi \frac{LI_m^2}{RI_m^2 T_0} = 2\pi \frac{\text{энергия контура}}{\text{энергия, теряемая за период}} \,. \tag{17}$$

Принято считать колебательный процесс в контуре прекратившимся, если амплитуда колебаний составляет $0,01$ от максимальной величины. *Длительность процесса* колебаний в этом случае

$$t_n = NT_0 \approx \frac{4,6}{\delta}\ [\text{мкс}]\,, \tag{18}$$

где N — число полных колебаний.

1.3. Вынужденные колебания в последовательном контуре

Последовательное соединение элементов контура L, C и R с источником внешней э.д.с. образует *последовательный колебательный контур* (рис. **??**).

Ток в последовательном контуре определяется суммой общего (**??**) и частного (**??**) решений уравнения (**??**). Но выражение (**??**) представляет затухающие колебания, которые через достаточный промежуток времени (порядка нескольких мкс) исчезнут. Поэтому справедливо считать, что колебательный процесс в контуре под действием внешней э.д.с. описывается только частным решением уравнения (**??**). Возникающие колебания называются вынужденными. Очевидно, что они являются незатухающими и их частота ω равна частоте внешней э.д.с.

Из частного решения

$$i = \frac{\dot{E}_m}{\dot{Z}} \sin(\omega t + \varphi)$$

амплитуда тока вынужденных колебаний

$$I_m = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}}\,. \tag{19}$$

При равенстве реактивных сопротивлений

$$\frac{1}{\omega C} = \omega L; \qquad X_C = X_L \tag{20}$$

в контуре наблюдается резонанс — ток достигает максимума, сопротивление контура становится минимальным и имеет активный характер

$$\dot{Z} = R\,.$$

Резонансная частота определится выражением

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}\,. \tag{21}$$

Изменение частоты ω внешней э.д.с. (рис. **??**) приводит к изменению величины и характера сопротивления $\dot{Z}$ контура (емкостной характер — при $\omega < \omega_0$, ток I опережает e; индуктивный характер — при $\omega > \omega_0$, ток I отстает от e).

На основании 1 закона Кирхгофа

$$\frac{E_m}{R} = \frac{U_{C0}}{X_C} = \frac{U_{L0}}{X_L}\,,$$

учитывая равенство (**??**) напряжение на элементах контура при резонансе

$$U_0 - U_{C0} = U_{L0} = \frac{E_m \omega_0 L}{R} = \frac{E_m}{\omega_0 C R}\,.$$

Заменив ω_0 из (**??**), принимая во внимание (**??**) и (**??**), получаем

$$U_0 = E_m \frac{\sqrt{\dfrac{L}{C}}}{R} = E_m \frac{\varrho}{R} = E_m Q\,. \tag{22}$$

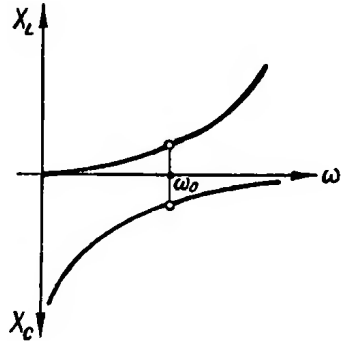

Рис. 4

Резонансные свойства колебательных контуров наглядно представляются *резонансными кривыми.* Для последовательного контура наиболее часто используются зависимости (рис. **??** а, б, в)

$$U_C = \varphi(\omega), \quad U_L = \varphi(\omega), \quad I = \varphi(\omega), \quad |\dot{Z}| = \varphi(\omega).$$

Эти зависимости часто строятся не в абсолютном, а в относительном масштабе (рис. **??**, г) — по оси абсцисс откладывается $\frac{\omega}{\omega_0}$, по оси ординат $\frac{U_C}{U_{C0}}$, $\frac{I}{I_0}$ или $\frac{|\dot{Z}|}{R}$. Использование относительного масштаба позволяет сравнивать резонансные кривые контуров с разными собственными частотами и добротностью.

Важными параметрами контура являются коэффициент передачи напряжения и полоса пропускания.

Коэффициент передачи напряжения определяется отношением напряжения на одном из реактивных элементов L или C к напряжению источника внешней э.д.с.

$$\dot{K}(\omega) = \frac{\dot{U}_{m\ \text{вых.}}(\omega)}{\dot{U}_{m\ \text{вх.}}(\omega)}\,.$$

На резонансной частоте из выражения (**??**) коэффициент передачи

$$K = \frac{U_0}{E_m} = Q\,. \tag{23}$$

Полоса пропускания — диапазон частот, в пределах которого коэффициент передачи или напряжение на реактивных элементах U_C и U_L составляют не менее $\frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,707$ от их максимального значения при резонансе. Полоса пропускания $2\Delta\omega$ (или $2\Delta f$) определяется по резонансным кривым (рис. **??**, а, г) или по формуле

$$2\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q}\,, \qquad 2\Delta f = \frac{f_0}{Q}\,. \tag{24}$$

Последовательные контуры в радиотехнических устройствах применяются для выбора сигнала нужной частоты (полосы частот) из суммы сигналов различных частот, поступивших па контур, и для получения выигрыша в напряжении от сигнала выделенной частоты.

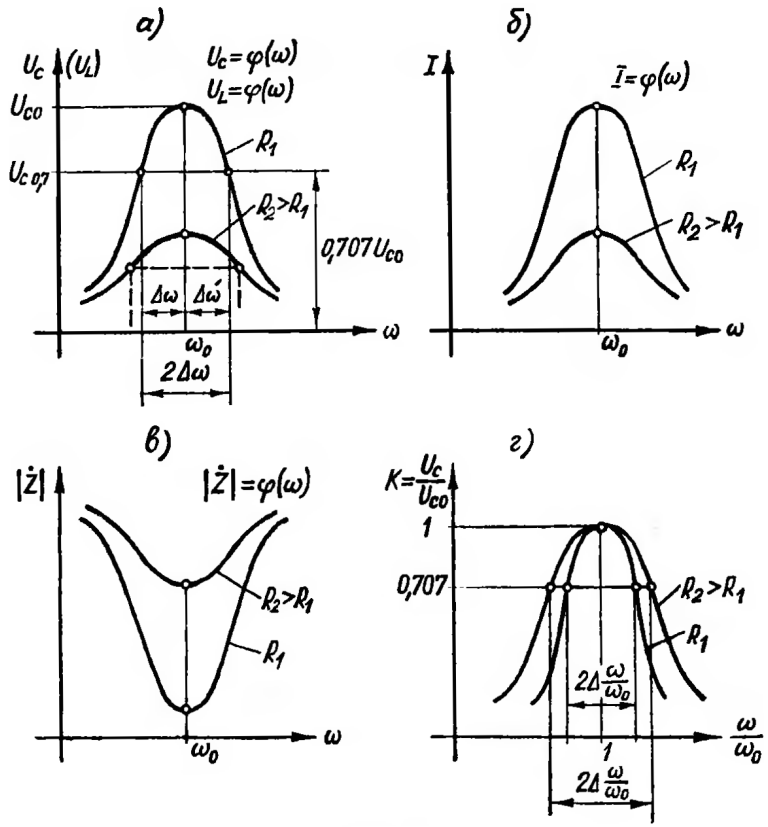

Рис. 5

Избирательные свойства контура характеризуются *избирательностью (селективностью)*

$$Se = \frac{K\omega_0}{K\omega} = \frac{U\omega_0}{U\omega} \tag{25}$$

при заданной величине расстройки $\Delta\omega = \omega_0 \pm \omega$ (рис. ??). Избирательность Se показывает, во сколько раз сигнал частоты ω ослабляется по сравнению с сигналом резонансной частоты ω_0.

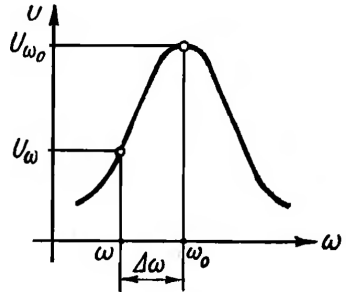

Рис. 6

1.4. Вынужденные колебания в параллельном контуре

Параллельное соединение элементов контура L и с источником внешней э.д.с. образует *параллельный колебательный контур.*

Полное сопротивление (импеданс) простейшего параллельного контура (рис. **??**, а) в комплексной форме, без учета внутреннего сопротивления R_i источника внешней э.д.с.

$$Z = \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}\,, \tag{26}$$

где $\dot{Z}_1 = R + j\omega L$ и $\dot{Z}_2 = -j\frac{1}{\omega C}$ — сопротивление его ветвей, а знаменатель $\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2$ — полное сопротивление последовательного контура.

Модули сопротивления ветвей соответственно равны:

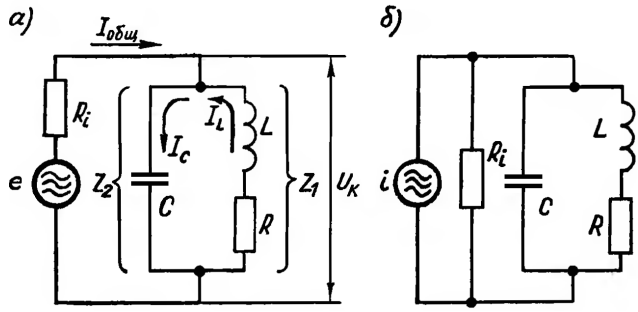

Рис. 7

$$\dot{Z}_1 = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}\,,$$
$$|\dot{Z}_2| = \frac{1}{\omega C}\,.$$

Вблизи резонанса $R \ll \omega L$, а из выражения (**??**), $\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2$ можно считать равным R. Тогда сопротивление Z_0 параллельного контура при резонансе, согласно (**??**), будет активным, максимальным и очень большим по величине

$$Z_0 = R_0 = \frac{\frac{L}{C}}{R} = \frac{\varrho^2}{R} = \varrho Q\,. \tag{27}$$

Если $\omega \neq \omega_0$, сопротивление контура Z уменьшается и приобретает реактивный характер (при $\omega < \omega_0$ — индуктивный, при $\omega > \omega_0$ — емкостный).

Внутреннее сопротивление R_i источника внешней э.д.с. существенно влияет на работу параллельного контура. В этом случае ток в неразветвленной части цепи

$$\dot{I}_{\text{общ}} = \frac{\dot{E}}{\dot{Z} + R_i}\,,$$

а напряжение на контуре

$$\dot{U}_{\text{к}} = \dot{I}_{\text{общ}}\dot{Z} = \frac{\dot{E}}{Z + R_i}\dot{Z}\,.$$

При $R_i \gg \dot{Z}$ ток $I_{\text{общ}}$ практически не зависит от $\dot{Z}$ и

$$\dot{U}_{\text{к}} \approx \frac{\dot{E}}{R_i}\dot{Z}\,.$$

Очевидно, что коэффициент передачи напряжения

$$K_U = \frac{U_{\text{к}}}{E} \ll 1\,,$$

а добротность Q, полоса пропускания $2\Delta\omega$ и другие характеристики контура определяются практически только его параметрами L, C, R.

Если Z_0 сравнимо с R_i, то последнее шунтирует контур (эквивалентная схема рис. **??**, б), *резонансное сопротивление* контура (*эквивалентное*) уменьшается

$$R_{0э} = \frac{R_i \cdot R_0}{R_i + R_0}\,, \tag{28}$$

добротность контура (эквивалентная) снижается

$$Q_э = \frac{Q}{1 + \dfrac{R_0}{R_i}} = Q\left(1 - \frac{R_{0э}}{R_i}\right)\,. \tag{29}$$

Здесь Q и R_0 соответственно собственные добротность и резонансное сопротивление контура (без учета влияния R_i).

При этом K_U приближается к единице, но ухудшаются резонансные свойства и расширяется полоса пропускания $2\Delta\omega$ параллельного контура

$$2\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q_э} = \frac{\omega_0}{Q\left(1 - \dfrac{R_{0э}}{R_i}\right)} = \frac{\omega_0}{Q}\left(1 + \frac{R_0}{R_i}\right)\,. \tag{30}$$

Резонансные кривые параллельных контуров (рис. **??**) по построению аналогичны резонансным кривым последовательных контуров, но могут быть противоположны по ходу кривой.

Параллельные контуры в радиотехнических устройствах применяются в качестве селективной нагрузки каскадов, обеспечивающей значительно большее усиление в полосе пропускания, чем за ее пределами, и для получения выигрыша в токе в ветвях контура от сигнала выделенной частоты.

2. Связанные колебательные контуры

2.1. Общие сведения

Одиночные колебательные контуры имеют непостоянный коэффициент передачи в области полосы пропускания и недостаточное подавление частот за ее пределами. Эти недостатки в значительно меньшей степени присущи связанным колебательным контурам.

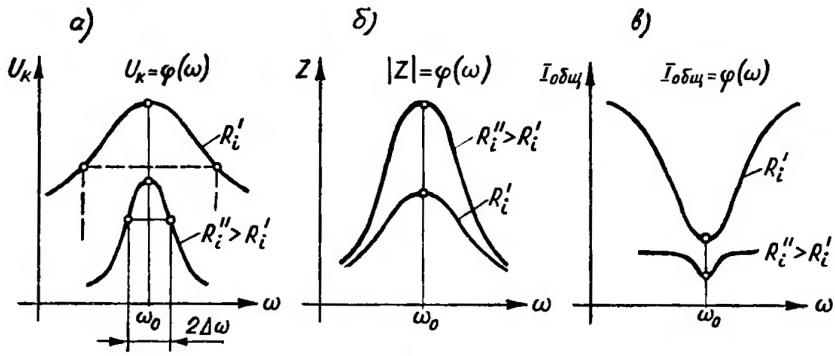

Рис. 8

Связанные контуры — система из двух или нескольких колебательных контуров, в которой изменение электрического состояния одного контура вызывает соответствующее изменение электрических состояний в других контурах. Связь между контурами осуществляется или через магнитное поле — индуктивная связь (трансформаторная – рис. **??**, а; автотрансформаторная — рис. **??**, б) или через электрическое поле — емкостная связь (внутренняя – рис. **??**, в; внешняя – рис. **??**, г).

Система связанных контуров позволяет уменьшить влияние внутреннего сопротивления источника сигнала и нагрузки на контур и получать резонансные кривые, близкие к П-образным или специальной формы.

В системе из двух связанных контуров, имеющих одинаковые собственные частоты ω_0, во вторичном контуре II наводится э.д.с.

$$\dot{E}_{2m} = \dot{Z}_{\text{св}}\dot{I}_{1m}\,. \tag{31}$$

Здесь $\dot{I}_{1m}$ — ток в первичном контуре, а $\dot{Z}_{\text{св}}$ — коэффициент пропорциональности, называемый *сопротивлением связи*. В зависимости от вида связи $\dot{Z}_{\text{св}}$ может иметь индуктивный, емкостный, активный или смешанный характер.

Связь между контурами характеризуется *коэффициентом связи*

$$k = \frac{|X_{\text{св}}|}{\sqrt{|X_{1\ \text{св}}| \cdot |X_{2\ \text{св}}|}}\,.$$

Для индуктивной трансформаторной связи с взаимной индуктивностью M (рис. **??**, а)

$$X_{1\,\text{св}} = \omega L_1, \quad X_{2\,\text{св}} = \omega L_2, \quad X_{\text{св}} = \omega M\,.$$

Тогда

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}\,, \quad \text{а при } L_1 = L_2 \quad k = \frac{M}{L}\,. \tag{32}$$

Вторичный контур, в котором возникают вынужденные колебания, в свою очередь оказывает обратное воздействие на контур первичный, изменяя его параметры и внося в него добавочное сопротивление. Для двух связанных контуров второй закон Кирхгофа выражается системой уравнений:

$$\dot{I}_{1m}\dot{Z}_1 + \dot{I}_{2m}\dot{Z}_{\text{св}} = \dot{E}_m$$

$$\dot{I}_{2m}\dot{Z}_2 + \dot{I}_{1m}\dot{Z}_{\text{св}} = 0\,,$$

в которой

$$\begin{aligned}
\dot{Z}_1 &= R_1 + j\left(\omega L_1 + \frac{1}{\omega C_1}\right);\\
\dot{Z}_2 &= R_2 + j\left(\omega L_2 + \frac{1}{\omega C_2}\right);\\
\dot{Z}_{\text{св}} &= j\omega M.
\end{aligned} \tag{33}$$

Отсюда ток в I контуре

$$I_{1m} = \frac{\dot{E}_m}{\dot{Z}_1 - \dfrac{\dot{Z}_{\text{св}}^2}{\dot{Z}_2}} = \frac{\dot{E}_m}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_{\text{вн}}} = \frac{\dot{E}_m}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_{\text{э}}}\,, \tag{34}$$

где $\dot{Z}_{\text{вн}} = -\dfrac{\dot{Z}_{\text{св}}^2}{\dot{Z}_2}$ — называют *вносимым сопротивлением,*

а $\dot{Z}_{\text{э}} = \dot{Z}_1 + \dot{Z}_{\text{вн}}$ — *эквивалентным сопротивлением.*

Вносимое сопротивление можно выразить через параметры связанных контуров.

$$\dot{Z}_{\text{вн}} = \frac{(\omega M)^2}{R_2 + jX_2} = \frac{(\omega M)^2}{Z_2^2}R_2 - j\frac{(\omega M)^2}{Z_2^2}X_2\,.$$

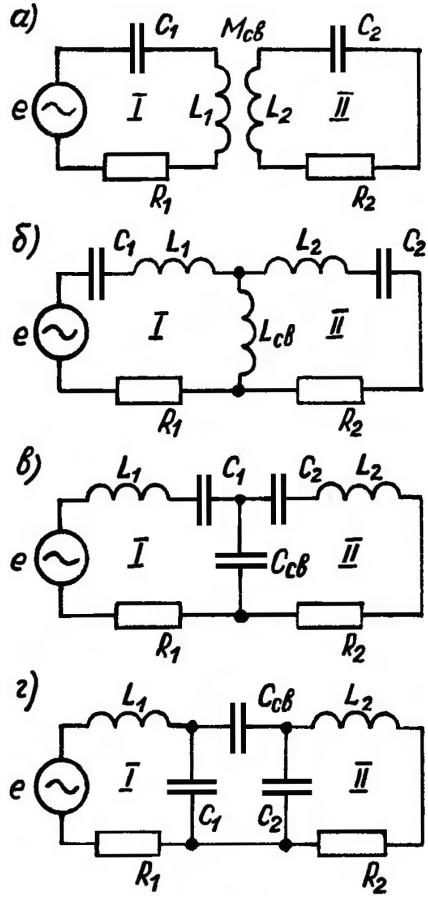

Рис. 9

Обозначая

$$\frac{\omega M}{\dot{Z}_2} = \frac{\dot{Z}_{\text{св}}}{\dot{Z}_2} = \dot{h}\,, \tag{35}$$

получаем

$$\dot{Z}_{\text{вн}} = h^2 R_2 - jh^2 X_2\,.$$

Тогда эквивалентное сопротивление равно:

$$\dot{Z}_{\text{э}} = (R_1 + h^2 R_2) + j(X_1 - h^2 X_2) = R_{\text{э}} + jX_{\text{э}}\,. \tag{36}$$

Введение понятий $Z_{\text{вн}}$ и $Z_{\text{э}}$ позволяет заменить реальную систему связанных контуров (рис. **??**) ее эквивалентной схемой (рис. **??**).

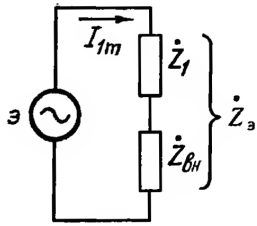

Рис. 10

Ток во II контуре, учитывая (**??**) и (**??**),

$$\dot{I}_{2m} = -\frac{\dot{Z}_{\text{св}}}{\dot{Z}_2}\dot{I}_{1m} = -\dot{h}\dot{I}_{1m} = -\frac{\dot{h}\dot{E}_m}{\dot{Z}_{\text{э}}}\,. \tag{37}$$

2.2. Резонанс в системе двух связанных контуров

Резонанс в системе связанных контуров имеет место при минимальном значении $Z_{\text{э}}$, т.е. при равенстве нулю его реактивной составляющей $X_{\text{э}}$.

В случае, если контуры одинаковые ($L_1 = L_2 = L$, $C_1 = C_2 = C$, $R_1 = R_2 = R$, а $\dfrac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$), подстановка X_1 и X_2 из (**??**) даст выражение $X_{\text{э}}$ через параметры системы

$$X_{\text{э}} = \omega L\left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}\right) - h^2\omega L\left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}\right) = \omega L\left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}\right)(1 - h^2)\,.$$

Для определения резонансных частот системы положим $X_{\text{э}} = 0$, а это возможно в двух случаях:

$$1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} = 0\,, \tag{38}$$

$$1 - h^2 = 0\,. \tag{39}$$

Решение уравнения (**??**) определит *основную резонансную частоту* системы

$$\omega_1 = \omega_0.$$

Уравнение (**??**) имеет два решения[1]

$$\omega_{2,3} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 \pm \sqrt{k^2 - d^2}}}\,. \tag{40}$$

Эти частоты называют *резонансными частотами связи*, их появление объясняется взаимным влиянием связанных контуров друг на друга. Частоты связи вещественны только в случае $k \geq d$. При $k < d$ имеется единственная резонансная частота ω_1, при $k > d$ наблюдается два резонанса на частотах ω_2 и ω_3. Связь, при которой $k = d$, называется *критической*, а соответствующий коэффициент связи — *критическим* $k_{\text{кр}}$. Зависимость резонансных частот от k приведена на рис. **??**.

Ток в контуре II вблизи резонанса из (**??**) и (**??**), принимая во внимание (**??**) и опуская знак минус, равен:

$$I_{2m} = \frac{hE_m}{R_э} = \frac{hE_m}{R(1+h^2)}\,.$$

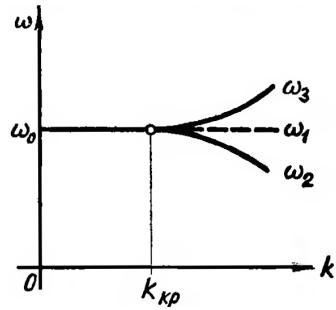

Рис. 11

[1] Выразим h из (**??**) и с учетом (**??**) подставим в уравнение (**??**)

$$R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 + \omega^2 M^2 = 0\,.$$

Заменим M из (**??**), поделим на $(\omega L)^2$ и учитывая, что вблизи резонанса $\frac{R}{\omega L} \approx \frac{R}{\omega_0 L} = d$:

$$\left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}\right)^2 = k^2 - d^2\,.$$

Откуда получим (**??**).

Тогда, на основной резонансной частоте ω_1 с учетом $h = kQ$:

$$I_{2m0} = \frac{E_m}{R} \cdot \frac{kQ}{1 + (kQ)^2} \,. \tag{41}$$

и на резонансных частотах связи ω_2, ω_3, когда $h = 1$ (т.к. $X_э = 0$):

$$I_{2mc} = \frac{E_m}{2R} \,. \tag{42}$$

Зависимость $I_{2m0} = \varphi(k)$ приведена на рис. **??**, а I_{2mc} от k не зависит.

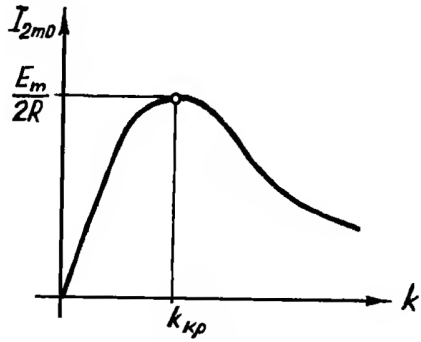

Рис. 12

Коэффициент передачи напряжения K для связанных контуров

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_{2m}}{\dot{E}_m} \,,$$

его выражение на основной резонансной частоте из (**??**):

$$K_0 = \frac{\varrho}{R} \cdot \frac{kQ}{1 + (kQ)^2} \,. \tag{43}$$

Максимальное значение K имеет при $k = k_{\text{кр}}$ — на основной резонансной частоте и при $k > k_{\text{кр}}$ — на резонансных частотах связи:

$$K_{\text{макс}} = \frac{\varrho}{2R} \,. \tag{44}$$

В этих условиях имеет место максимальная передача мощности во вторичный контур.

Анализ выражений (??) и (??) позволяет выявить ход резонансных кривых связанных контуров (рис. ??).

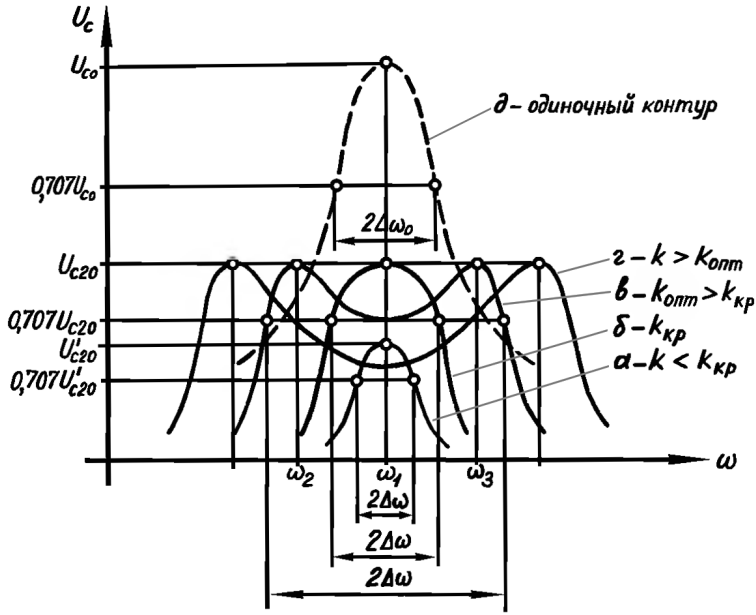

Рис. 13

Если $0 < k \leq k_{\text{кр}}$ (кривые а, б), резонансные кривые имеют один максимум и полоса пропускания $2\Delta\omega$ лежит соответственно в пределах:

$$0,64\frac{\omega_1}{Q} < 2\Delta\omega \leq 1,41\frac{\omega_1}{Q}\,. \tag{45}$$

Если $k > k_{\text{кр}}$, резонансные кривые становятся двугорбыми.

При некотором значении k, называемом оптимальным $k = k_{\text{опт}} = 2,41k_{\text{кр}}$, коэффициент передачи напряжения K на основной резонансной частоте ω_1 становится равным $0,707$ от $K_{\text{макс}}$ форма кривой наиболее близка к П-образной (кривая в) и полоса пропускания оказывается максимальной

$$2\Delta\omega = 3,1\frac{\omega_1}{Q}\,. \tag{46}$$

При $k > k_{\text{опт}}$ (кривая г) определение $2\Delta\omega$ теряет смысл, т.к. провал на резонансной кривой становится глубже уровня $0,707$. Очень сильная связь применяется в специальных случаях.

Очевидно, что изменение коэффициента связи k в системах связанных контуров позволяет регулировать полосу пропускания от $0,64$ до $3,1$ полосы пропускания одиночного контура. Коэффициент передачи связанных контуров при любых значениях k не может быть более половины коэффициента передачи одиночного контура (кривая д). Однако крутизна скатов резонансных кривых связанных контуров больше, а значит, и их избирательность лучше, чем у одиночных контуров.

Работа № 9
Свободные колебания в одиночном контуре

Цель работы — изучение свободных колебаний в одиночном колебательном контуре, исследование влияния изменения параметров контура на характер свободных колебаний.

Литература. Л. [1], [2], [3], [4], [5], [6].

I. Оборудование и приборы

1. Лабораторная панель.
2. Генератор импульсов Г5-15.
3. Электронный осциллограф С1-5.

II. Описание установки

На лабораторной панели (рис. **??**) собран колебательный контур. Перемычками П1—П3 в цепь контура можно включать одну из двух катушек индуктивности $L1$ или $L2$ и резисторы $R1$ (последовательно) или $R2$ (параллельно). Переменный конденсатор C отградуирован в пФ с учетом собственной емкости приборов и соединительных кабелей.

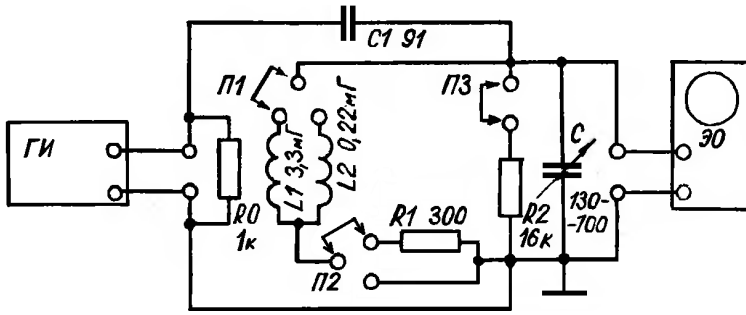

Рис. 14

Для получения осциллограммы свободных колебаний контур возбуждается кратковременными прямоугольными импульсами от генератора импульсов *ГИ*. В цепь питания контура введены согласующий резистор $R0$ и разделительный конденсатор $C1$, уменьшающие влияние малого выходного сопротивления генератора на процесс свободных колебаний.

Наблюдение колебаний и требуемые измерения производятся электронным осциллографом.

III. Домашнее задание

1. Определить f_c, T_c, Q, δ, $t_\text{п}$ и N для контура с параметрами $L = 0,0045\,\text{Г}$, $C = 25100\,\text{пФ}$ и $R = 4,2\,\text{Ом}$.

2. Рассчитать период T_c и частоту f_c свободных колебаний контура для одной из катушек индуктивности, при трех положениях ротора переменного конденсатора ($C_\text{мин} = 130\,\text{пФ}$, $C_\text{ср} = 300\,\text{пФ}$ и $C_\text{макс} = 700\,\text{пФ}$) и отключенных резисторах $R1$ и $R2$.

Результаты расчета поместить в таблицу **??**.

IV. Лабораторное задание

1. Собрать схему установки, ознакомиться с измерительными приборами и подготовить их к работе.

2. Предъявить преподавателю материалы домашней подготовки, собранную схему и получить указания по выполнению лабораторного задания.

3. Получить на экране осциллограмму свободных колебаний при $C_{\text{ср}}$ и отключенных резисторах $R1$, $R2$.

   Устойчивые и удобные для наблюдения осциллограммы получаются при возбуждении контура импульсами положительной полярности, длительностью 2 мкс и частотой следования $400 \div 1000$ Гц. Осциллограф включается в режим идущей развертки, качество изображения регулируется ручками «ДЕЛИТЕЛЬ», «УСИЛЕНИЕ», «СИНХРОНИЗАЦИЯ» и «РАЗВЕРТКА».

   Изменяя емкость C, а также включая в контур последовательно и параллельно резисторы $R1$ и $R2$, пронаблюдать за изменением характера свободных колебаний.

4. С помощью электронного осциллографа измерить T_c, ориентировочно определить длительность процесса $t_{\text{п}}$ и число колебаний N для случаев п. **??** домашнего задания.

   Результаты измерений свести в таблицу **??**. В графе «измерения» f_c определяется по измеренному T_c.

Таблица **??**

Катушка № ; $L = \ldots$ мГ.

C	Расчет		Измерения			
	T_c	f_c	T_c	f_c	N	$t_{\text{п}}$
пФ	мкс	кГц	мкс	кГц		мкс

Измерения T_c и $t_{\text{п}}$ производятся путем наложения калибрационных меток на осциллограмму процесса:

1) Получить на экране устойчивое изображение одного – двух периодов исследуемых колебаний при измерении T_c и всего процесса для $t_{\text{п}}$.
2) Переключателем «МЕТКИ» наложить на осциллограмму удобные для подсчета калибрациониые метки. Изображение получится похожим на пунктирную линию. За одну метку принимается светящийся штрих и интервал.

3) Подсчитать число меток, уложившихся на изображении одного периода для T_c (всего процесса для $t_{\text{п}}$) и умножить его на цену одной метки. Это даст длительность исследуемого процесса в мкс.

Точность измерений будет тем больше, чем меньше цена меток.

5. Исследовать влияние активных потерь на процесс свободных колебаний.

   Для этого при $C_{\text{ср}}$ определить по осциллограммам декремент затухания Δ и вычислить по формулам логарифмический декремент затухания θ, коэффициент затухания δ, затухание d, добротность Q и активное сопротивление R контура для случаев:

   а) резисторы $R1$ и $R2$ отключены;

   б) резистор $R1$ включен в контур последовательно;

   в) резистор $R2$ подключен параллельно.

   Результаты измерений и расчетов свести в таблицу **??**. Привести в отчете расчетные формулы.

Таблица **??**

Катушка № ; $L = \ldots$ мГ; $C = \ldots$ пФ.

	A_1	A_2	A_3	Δ_1	Δ_2	$\Delta = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2}$	θ	δ	d	Q	R, Ом
$R1$ и $R2$ — отключены											
$R1 = \ldots$Ом — последовательно											
$R2 = \ldots$Ом — параллельно											

Порядок определения Δ по осциллограммам описан в § **??**(рис. **??**). Для повышения точности измерение производится дважды.

V. Содержание отчета

1. Схема исследования.
2. Результаты расчетов и измерений к домашнему заданию и п.п. **??**, **??** лабораторного задания.
3. Рисунок к п. **??** лабораторного задания, поясняющий определение Δ.

VI. Контрольные вопросы

1. Чем отличается апериодическая цепь от колебательной?
2. Какие колебания называются свободными и каковы их свойства?
3. Объяснить процесс возникновения свободных колебаний в колебательном контуре.
4. При каком соотношении между L, C и R периодические колебания в контуре возможны?
5. Дать определение δ, Δ, θ, d. Каков их физический смысл?
6. Что такое добротность Q контура и какими способами можно ее увеличить?
7. Почему при изменении емкости контура изменяется не только частота, но и амплитуда свободных колебаний?
8. Какова связь между Q и θ; между d и θ? Как эти величины связаны с параметрами L, C и R контура?
9. Как оценивается продолжительность процесса свободных колебаний в контуре?

Работа № 10
Последовательный колебательный контур

Цель работы — изучение резонансных явлений в последовательном колебательном контуре и определение параметров контура.

Литература. Л. [1], [2], [3], [4], [5], [6].

I. Оборудование и приборы

1. Лабораторная панель.
2. Генератор высокой частоты Г4-18А.
3. Ламповый вольтметр ВК7-9 или В7-26.

II. Описание установки

На лабораторной панели установки (рис. **??**) собрана схема последовательного контура. С помощью перемычки $П1$ и переключателя $П2$ в цепь контура можно включать одну из двух катушек индуктивности $L1$ или $L2$ и резистор $R1$. К катушкам придан съемный алюминиевый экран для исследования влияния экранирования катушки индуктивности на добротность и резонансную частоту контура.

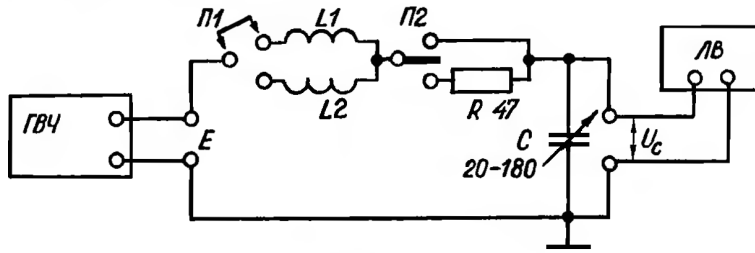

Рис. 15

Возбуждающее напряжение E подводится к контуру от генератора высокой частоты $ГВЧ$. Напряжение на емкости измеряется ламповым вольтметром $ЛВ$.

$ГВЧ$ имеет малое $R_{вых}$, а ламповый вольтметр — весьма большое $R_{вх}$, поэтому их влияние на контур незначительно и в данной работе не учитывается. Входная емкость вольтметра учтена при градуировке емкости конденсатора C.

III. Домашнее задание

1. Определить f_0, Q, I_0, U_C, U_L при резонансе, если $L = 316\,\text{мкГ}$, $C = 222\,\text{пФ}$, $R = 15\,\text{Ом}$ и $E = 1,5\,\text{В}$. Построить векторную диаграмму.

2. Изобразить в одной системе координат ориентировочные резонансные кривые контура без экрана и того же контура, помещенного в экран.

IV. Лабораторное задание

1. Собрать схему исследования и подготовить измерительные приборы к работе.
2. Предъявить преподавателю собранную схему, материалы домашней подготовки и получить указания по выполнению лабораторного задания.
3. Снять резонансные кривые $U_C = \varphi(f)$ последовательного контура с заданной катушкой индуктивности без экрана, с отключенным и подключенным резистором $R1$, при неизменных C и E.
   Результаты измерений свести в таблицу **??**, по данным которой построить резонансные кривые — в абсолютном масштабе на одном чертеже, в относительном масштабе — на другом.

Таблица **??**

$U_C = \varphi(f)$; катушка № ; $E = 1B = const$; $C = \ldots$ пФ.

f, кГц	$R1$ — отключено, $U_{C0} = \ldots B$			$R_1 = 47\,\text{Ом}$; $U_{C0} = \ldots B$		
	U_C B	$\frac{f}{f_0}$	$\frac{U_C}{U_{C0}}$	U_C B	$\frac{f}{f_0}$	$\frac{U_C}{U_{C0}}$

Порядок снятия резонансных кривых:

1) Определить резонансную частоту f_0 контура при отключенном $R1$ и $E = 1B$. Для этого, изменяя частоту сигнала *ГВЧ* (ручками «f» и «ДИАПАЗОНЫ MHz»), добиться резонанса. При резонансе показания вольтметра *ЛВ* будут максимальными.

   Записать полученные величины f_0 и U_{C0}.

2) Не подключая $R1$, при том же E, уменьшить частоту *ГВЧ* до получения напряжения на емкости $U_C \approx 0,1U_{C0}$ — определится частота, с которой следует начинать снятие резонансных кривых.

3) Затем, поддерживая ручкой *ГВЧ* «УСТАНОВКА УРОВНЯ «К» $E = 1B$, снять одновременно (манипулируя переключателем $П2$) требуемые резонансные кривые $U_C = \varphi(f)$.

Увеличение частоты производить до тех пор, пока напряжение U_C, пройдя через максимум, вновь не уменьшится до $0,1U_{C0}$. Отсчеты сделать примерно в 15 точках до резонанса и в 15 точках после него. Шаг отсчета выбирать, учитывая цену деления шкалы частоты *ГВЧ*, при необходимости пользоваться верньером.

4. По снятым резонансным кривым (с $R1$ и без него) определить полосы пропускания $2\Delta f$, выполнив соответствующие построения на графиках.
Определить добротность Q контура по резонансным кривым и методом непосредственного отсчета.
Для каждого случая вычислить активное сопротивление R контура.
Результаты измерений и вычислений свести в таблицу **??**.

Таблица **??**

Катушка № ; $C = \ldots$ пФ; $R1 = \ldots$ Ом.

	по резонансным кривым			методом непосредственного отсчета	
	$2\Delta f$, кГц	$Q = \frac{f_0}{2\Delta f}$	R, Ом	$Q = \frac{U_{C0}}{E}$	R, Ом
$R1$ — вкл.					
$R1$ — откл.					

5. Выявить и объяснить влияние экрана на резонансную частоту f_0, индуктивность L и добротность Q контура.

Для этого при отключенном $R1$ определить f_0 и Q контура без экрана и с экраном.
Рассчитать для обоих случаев индуктивность L и активное сопротивление R контура.
Результаты измерений и расчетов свести в таблицу **??**.

Таблица **??**

Катушка № ; $C = \ldots$ пФ.

	f_0, кГц	U_{C0} В	Q	L, мГ	R, Ом
Без экрана					
С экраном					

6. Определить расчетным и экспериментальным путем диапазон частот исследуемого контура, перекрываемый переменным конденсатором (экран снят, резистор $R1$ — отключен).
Результаты поместить в таблицу **??**.

Таблица **??**

Катушка № ; $C_{\text{мин}} = \ldots$ пФ; $C_{\text{макс}} = \ldots$ пФ.

	$f_{\text{мин}}$, кГц	$f_{\text{макс}}$, кГц	$\lambda_{\text{мин}}$, м	$\lambda_{\text{макс}}$, м
Расчет				
Измерение				

V. Содержание отчета

1. Схема исследования.
2. Расчеты и ориентировочные кривые к домашнему заданию.
3. Результаты измерений и расчетов к пп. **??**-**??**, графики с требуемыми построениями к п.п. **??** и **??** лабораторного задания.

VI. Контрольные вопросы

1. В чем отличие вынужденных колебаний от свободных?

2. При каких условиях в последовательном колебательном контуре возникает резонанс? Каковы основные свойства последовательного контура при резонансе?

3. Что называют резонансной кривой контура?

4. Чем отличается резонансная частота колебательного контура от частоты собственных колебаний?

5. Что называется полосой пропускания колебательного контура?

6. Как определяются по резонансной кривой резонансная частота, полоса пропускания и добротность контура?

7. Как и почему изменяется добротность контура и полоса пропускания при включении в контур дополнительного сопротивления?

8. Как влияет на работу колебательного контура алюминиевый экран, надетый на катушку индуктивности? Объяснить причины изменения индуктивности, добротности и резонансной частоты.

9. Привести примеры применения последовательных колебательных контуров.

Работа № 11
Параллельный колебательный контур

Цель работы — изучение резонансных явлений в параллельном колебательном контуре, выявление влияния внутреннего сопротивления источника внешней э.д.с. на основные характеристики контура.

Литература. Л. [1], [2], [3], [4], [5], [6].

I. Оборудование и приборы

1. Лабораторная панель.

2. Генератор высокой частоты Г4-18А.

3. Ламповые милливольтметры В3-3 – 2 шт.

II. Описание установки

Параллельный контур собран на панели лабораторной установки (рис. **??**). Перемычкой $П1$ в контур можно включать одну из катушек индуктивности $L1$ или $L2$. Источником внешней э.д.с. является генератор высокой частоты $ГВЧ$, имеющий весьма малое выходное сопротивление (порядка 100 Ом). В неразветвленную часть цепи включаются резисторы $R1$ или $R2$, имитирующие внутреннее сопротивление генератора внешней э.д.с. Переключение резисторов позволяет исследовать влияние величины внутреннего сопротивления источника питания на контур.

Напряжение на контуре U_K измеряется ламповым вольтметром $ЛВ1$, ток $I_{общ}$, определяется путем измерения падения напряжения U_{R0} на эталонном резисторе $R0$ ламповым вольтметром $ЛВ2$. Сопротивлением $R0$ при расчетах пренебречь.

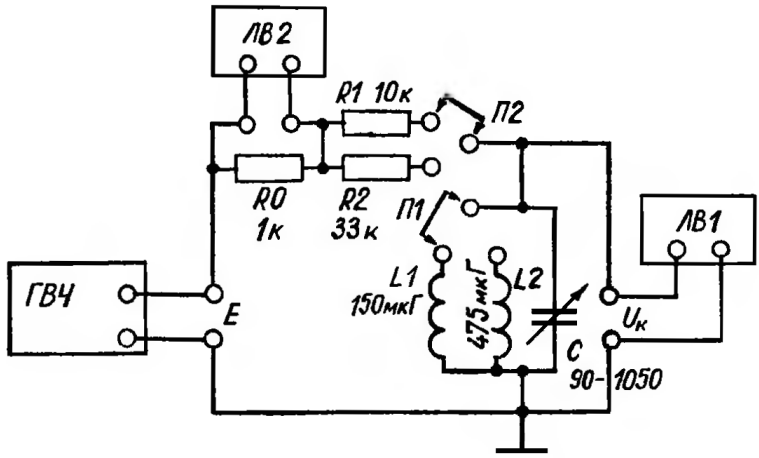

Рис. 16

III. Домашнее задание

1. Определить C, R_0, $R_{оэ}$, Q, $Q_э$, U_K и $I_{общ}$, если $f_0 = 1\,МГц$, $L = 40\,мкГ$, $R = 5\,Ом$, $E = 226\,В$ и $R_i = 10\,кОм$.

2. Изобразить на одном рисунке ориентировочный ход резонансных кривых $U_K = \varphi(f)$ параллельного контура при использо-

вании его в качестве нагрузки усилительного каскада, работающего на вакуумном триоде, транзисторе, пентоде.

IV. Лабораторное задание

1. Собрать схему исследования и подготовить измерительные приборы к работе.

2. Предъявить преподавателю собранную схему, материалы домашней подготовки и получить указания но выполнению лабораторного задания.

3. Для заданных L и рассчитать резонансную частоту контура f_0 и его волновое сопротивление ρ.

4. Снять резонансные кривые $U_K = \varphi(f)$ и $I_{\text{общ}} = \varphi(f)$ при неизменной э.д.с. генератора $E = 1\,\text{В}$, для случаев $R_i = R1$ и $R_i = R2$.

   Для всех отсчетных частот определить модуль эквивалентного сопротивления $Z_\text{э}$ контура.

   Результаты измерений и подсчетов свести в таблицу **??**.

   Таблица **??**

   $U_K = \varphi(f)$; $\quad I_{\text{общ}} = \varphi(f)$; $\quad |Z_\text{э}| = \varphi(f)$.

f,	$R_i = R1 = 10\,\text{кОм}$				$R_i = R2 = 33\,\text{кОм}$			
	U_K,	U_{R0},	$I_{\text{общ}}$,	$Z_\text{э}$,	U_K,	U_{R0},	$I_{\text{общ}}$,	$\lvert Z_\text{э}\rvert$,
кГц	мВ	мВ	мкА	кОм	мВ	мВ	мкА	кОм

   Порядок снятия резонансных кривых:

   1) Установить на *ГВЧ* рассчитанную f_0 (п. **??**) и подстройкой *ГВЧ* добиться резонанса. При резонансе $U_K = U_{K0}$ будет наибольшим, а падение напряжения U_{R0} — наименьшим.
   2) Уменьшить частоту *ГВЧ* до значения, при котором $U_K \approx 0,3U_{K0}$ — определится частота, с которой следует начинать снятие резонансных кривых.

3) Затем при $E = 1B = const$, увеличивая частоту, измерять U_K и U_{R0}. Отсчеты производить примерно в 15 точках до резонанса и в 15 точках после него. Шаг отсчетов выбирать, учитывая цену делений шкалы частот *ГВЧ*; при необходимости пользоваться верньером.

5. По данным таблицы **??** построить резонансные кривые по напряжению $U_K = \varphi(f)$ на одном графике, по току $I_{\text{общ}} = \varphi(f)$ на другом графике, кривые изменения эквивалентного сопротивления контура с частотой $Z_э = \varphi(f)$ — на третьем графике. Масштаб по оси частот на всех графиках один и тот же.

   По резонансным кривым $U_K = \varphi(f)$ определить полосы пропускания $2\Delta f$, выполнив соответствующие построения на графике, и эквивалентную добротность $Q_э$ контура.

   Результаты поместить в таблицу **??**.

Таблица **??**

Параметр	$R_i = R1 = 10$ кОм		$R_i = R2 = 33$ кОм	
	Расчет	По графику	Расчет	По графику
$Q_э$				
R, Ом		—		—
$2\Delta f$, кГц				
Q		—		—

6. Используя данные таблицы **??**, рассчитать на резонансной частоте эквивалентную добротность $Q_э$, сопротивление потерь R, полосу пропускания $2\Delta f$ и собственную добротность Q контура.

   Результаты для сравнения свести в таблицу **??**.

V. Содержание отчета

1. Схема исследования.
2. Расчеты и ориентировочные кривые к домашнему заданию.
3. Результаты измерений и расчетов к пп. **??**–**??**, графики с требуемыми построениями к п. **??** лабораторного задания.

VI. Контрольные вопросы

1. При каких условиях возникает резонанс в параллельном контуре? Каковы свойства параллельного контура при резонансе?
2. От чего зависит резонансная частота параллельного контура?
3. Как влияет внутреннее сопротивление генератора, питающего параллельный контур, на резонансные свойства этого контура?
4. Чем определяется эквивалентное резонансное сопротивление параллельного контура?
5. Почему снижается добротность контура, если параллельно ему включается сопротивление?
6. Чем определяется полоса пропускания параллельного контура?
7. Как определить полосу пропускания по резонансной кривой?

Работа № 12
Связанные контуры

Цель работы — изучение резонансных явлений в связанных контурах, исследование зависимости формы резонансной кривой и полосы пропускания от величины связи между контурами.

Литература. Л. [1], [2], [3], [4], [5], [6].

I. Оборудование и приборы

1. Лабораторная панель.
2. Генератор высокой частоты Г4-18А.
3. Ламповые вольтметры ВК7-9 или В7-26 — 2 шт.

II. Описание установки

На лабораторной панели (рис. **??**) установлены два одинаковых, индуктивно связанных контура ($L1C1$, $L2C2$). Величина взаимоиндукции M между контурами регулируется изменением расстояния между катушками индуктивности, которое может быть зафиксировано по шкале.

Первичный контур питается от *ГВЧ*, напряжение на емкостях контуров измеряется ламповыми вольтметрами *ЛВ*1 и *ЛВ*2.

Во вторичном контуре предусмотрена перемычка *П* для разрыва цепи.

III. Домашнее задание

1. Определить k, f_1, f_2, f_3, I_{2mc}, I_{2m0}, U_{C20} и U_{C2c} для одинаковых связанных контуров $L1 = L2 = L = 450\,\text{мкГ}$, $C1 = C2 = C = 200\,\text{пФ}$, $R1 = R2 = R = 10\,\text{Ом}$, $M = 50\,\text{мкГ}$, если э.д.с. генератора $E = 10\,\text{В}$.

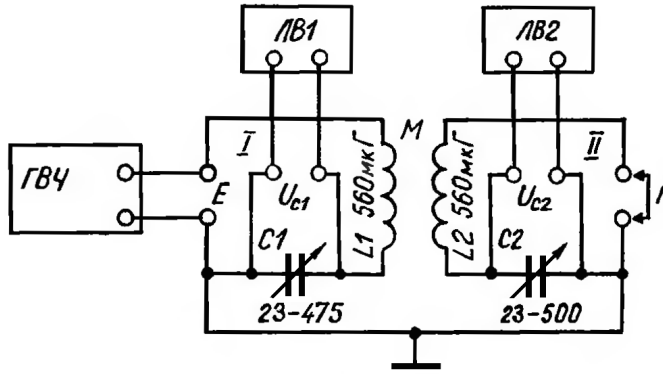

Рис. 17

2. Изобразить ориентировочный ход кривых, которые должны быть получены при выполнении п. **??** лабораторного задания.

IV. Лабораторное задание

1. Собрать схему установки и подготовить измерительные приборы к работе.

2. Предъявить преподавателю собранную схему, материалы домашней подготовки и получить указания по выполнению лабораторного задания.

3. По заданным L и C рассчитать резонансную частоту f_0 контуров.

4. Подготовить установку к работе:

   1) Установить заданные $C1$ и $C2$ и минимальную связь между катушками $L1$ и $L2$, раздвинув их на максимальное расстояние.

   2) Подать на первичный контур от *ГВЧ* сигнал рассчитанной частоты (п. **??**) величиной 1В. Разомкнуть перемычку *П* и по ламповому вольтметру *ЛВ*1, подстройкой *ГВЧ* добиться резонанса. Точное значение f_0 зафиксировать.

      Определить Q контура.

   3) Замкнув перемычку *П*, переменным конденсатором $C2$ по ламповому вольтметру *ЛВ*2 подстроить вторичный контур в резонанс.

   Предупреждение. В дальнейшем при выполнении всей работы настройку конденсаторов $C1$ и $C2$ не изменять.

5. Снять резонансные кривые — зависимости напряжения на емкости второго контура от частоты генератора $U_{C2} = \varphi(f)$ для четырех случаев:

   1) $k < k_{\text{кр}}$ — слабая связь. Катушки $L1$ и $L2$ раздвинуты на половину длины шкалы;

   2) $k = k_{\text{кр}}$ — критическая связь. Расстояние между катушками $L1$ и $L2$ определяется на резонансной частоте f_0 (зафиксированной в п. **??**), сближением катушек до получения $U_{C2\text{макс}}$ — максимальных показаний *ЛВ*2;

3) $k = k_{\text{опт}}$ — оптимальная связь. Расстояние между катушками подбирается также на частоте f_0 дальнейшим сближением катушек до получения *ЛВ*2, равных $0,7U_{C2\text{макс}}$;
4) $k > k_{\text{опт}}$ — сильная связь. Катушки $L1$ и $L2$ сдвинуты на минимальное расстояние.

Снятие резонансных кривых начинать с частоты $f_{\text{мин}}$, при которой $U_{C2} \approx 0,3U_{C20}$, и продолжать до тех пор, пока напряжение U_{C2}, пройдя максимумы, вновь не уменьшится до $0,3$ резонансного значения. Шаг отсчета в каждом случае выбирать таким, чтобы на склонах кривых было по $10 \div 15$ точек. При необходимости пользоваться верньером.

Результаты измерений занести в таблицу **??**, по данным которой на одном чертеже в одинаковом масштабе построить все четыре резонансные кривые.

Таблица **??**

$U_{C2} = \varphi(f)$; $L_1 = L_2 = 560\,\text{мкГ}$; $f_0 = \ldots\,\text{мГц}$.

$k < k_{\text{кр}}$		$k = k_{\text{кр}}$		$k = k_{\text{опт}}$		$k > k_{\text{опт}}$	
f, кГц	U_{C2}, В	f, кГц	U_{C2}, В	f, кГц	U_{C2}, В	f, кГц	U_{C2}, В

6. Проанализировать влияние коэффициента связи k на форму резонансных кривых $U_{C2} = \varphi(f)$. Для каждого случая рассчитать величину k.

   По резонансным кривым для первых трех случаев определить полосы пропускания $2\Delta f$, выполнив соответствующие построения на графике. Для $k = k_{\text{кр}}$ и $k = k_{\text{опт}}$ рассчитать $2\Delta f$.

   Результаты свести в таблицу **??**.

Таблица **??**

	$k < k_{\text{кр}}$	$k = k_{\text{кр}}$	$k = k_{\text{опт}}$	$k > k_{\text{опт}}$
k — по формулам				
$2\Delta f$ (кГц) — по кривым				—
$2\Delta f$ (кГц) — по формулам	—			—

V. Содержание отчета

1. Схема исследования.
2. Расчеты и ориентировочные кривые к домашнему заданию.
3. Результаты измерений и расчетов к пп. **??**–**??**, графики с требуемыми построениями к п. **??**, **??** лабораторного задания.

VI. Контрольные вопросы

1. Какие контуры называются связанными?
2. Что такое коэффициент связи?
3. Какие методы настройки связанных контуров существуют?
4. Какая связь двух контуров называется критической?
5. Почему индуктивная связь наименьшая, если витки катушек первичного и вторичного контуров расположены под прямым углом друг к другу?
6. Почему резонансные частоты системы связанных контуров меньше и больше собственных частот каждого из контуров?
7. Что называется наведенной э.д.с.?
8. Объяснить физический смысл понятия “вносимое сопротивление”.
9. Нарисовать типовые схемы связанных контуров при различных видах связи.

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ 2
ЛИТЕРАТУРА 3
1. Одиночный колебательный контур 4
1.1. Общие сведения 4
1.2. Свободные колебания в одиночном контуре . . . 6
1.3. Вынужденные колебания в последовательном контуре 9
1.4. Вынужденные колебания в параллельном контуре 13
Вынужденные колебания в параллельном контуре . . . 13
2. Связанные колебательные контуры 15
2.1. Общие сведения 15
2.2. Резонанс в системе двух связанных контуров . . 19
Работа № 9. Свободные колебания в одиночном контуре 23
I. Оборудование и приборы 23
II. Описание установки 23
III. Домашнее задание 24
IV. Лабораторное задание 24
V. Содержание отчета 27
VI. Контрольные вопросы 27
Работа № 10. Последовательный колебательный контур 27
I. Оборудование и приборы 28
II. Описание установки 28
III. Домашнее задание 29
IV. Лабораторное задание 29
V. Содержание отчета 31
VI. Контрольные вопросы 31

Работа № 11. Параллельный колебательный контур . . 32
I. Оборудование и приборы 32
II. Описание установки 33
III. Домашнее задание 33
IV. Лабораторное задание 34
V. Содержание отчета 35
VI. Контрольные вопросы 36
Работа № 12. Связанные контуры 36
I. Оборудование и приборы 36
II. Описание установки 37
III. Домашнее задание 37
IV. Лабораторное задание 38
V. Содержание отчета 40
VI. Контрольные вопросы 40