

Резонанс напряжений в последовательном контуре

Цель работы: исследование резонанса напряжений в последовательном колебательном контуре с изменяемой ёмкостью, включающее получение амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик, а также определение основных параметров контура.

В работе используются: генератор сигналов, источник напряжения, нагруженный на последовательный колебательный контур с переменной ёмкостью, двухлучевой осциллограф, цифровые вольтметры.

Перед выполнением работы следует изучить основы теории электрических колебаний по литературе из списка, приведённого в конце данного описания. Необходимые дополнения будут приведены ниже.

Резонанс напряжений

Схема экспериментального стенда для изучения резонанса напряжений в последовательном колебательном контуре показана на рис. 1а. Синусоидальный сигнал от генератора GFG-8255A поступает через согласующую RC-цепочку на вход источника напряжения, собранного на операционном усилителе ОУ. Питание операционного усилителя осуществляется встроенным блоком-выпрямителем от сети переменного тока 220 Вольт (цепь питания на схеме не показана). Источник напряжения, обладающий по определению нулевым внутренним сопротивлением, фактически обеспечивает с высокой точностью постоянство амплитуды сигнала $E = E_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$ на меняющейся по величине нагрузке – последовательном колебательном контуре, изображенном на рис. 1а в виде эквивалентной схемы. На рис. 1б контур представлен почти в натуральную величину. Источник напряжения с согласующей цепочкой, колебательный контур и блок питания заключены в отдельный корпус с названием «Резонанс напряжений», отмеченный на рисунке штриховой линией.

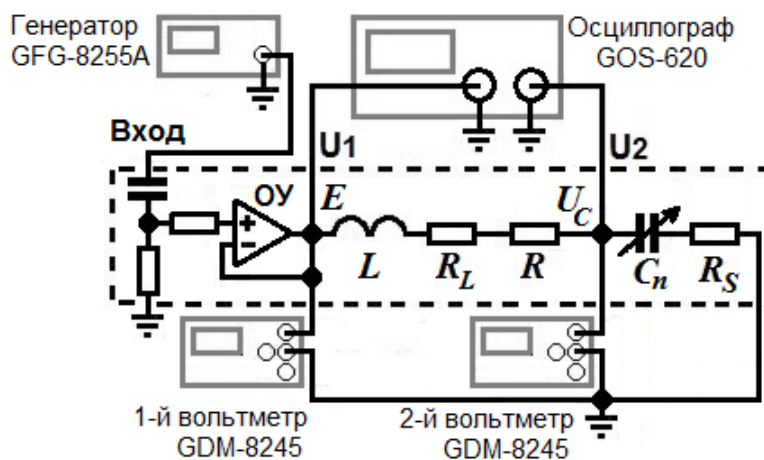


Рис. 1а. Схема экспериментального стенда.

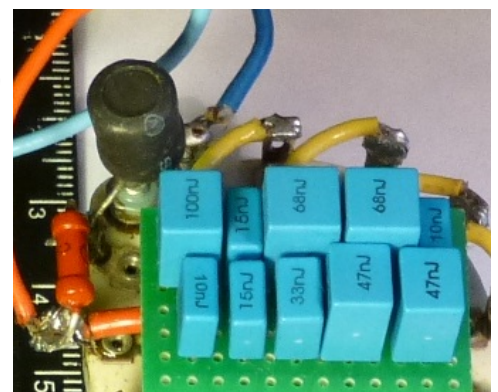


Рис. 1б. Колебательный контур.

На корпусе имеются коаксиальные разъёмы «Вход», «U₁» и «U₂», а также переключатель магазина ёмкостей C_n с указателем номера $n = 1, 2, \dots 7$. Величины ёмкостей C_n указаны в табличке на крышке корпуса. Напряжение E на контуре через разъём «U₁» попадает одновременно на канал 1 осциллографа GOS-620 и вход 1-го цифрового вольтметра GDM-8245. Напряжение на конденсаторе U_C подаётся через разъём «U₂» одновременно на канал 2 осциллографа и вход 2-го цифрового вольтметра GDM-8245.

Колебательный контур нашей установки собран из стандартных элементов, используемых в современных радиоэлектронных цепях. Известно, что в реальных конденсаторах и, особенно, в катушках индуктивности происходят необратимые потери энергии, обусловленные различными причинами. К ним относятся: утечки и диэлектрические потери в конденсаторах, вихревые токи и потери на перемагничивание в сердечниках катушек индуктивности, омические потери в проводниках, растущие с частотой за счёт скин-эффекта, и некоторые другие. Рост потерь приводит к увеличению действительных частей комплексных сопротивлений элементов контура, и, значит, к изменению его резонансных свойств, в частности, к уменьшению добротности.

Потери в элементах контура зависят как от частоты, так и от амплитуды тока (напряжения), температуры и ряда других факторов, например, от вида диэлектрика конденсатора, сердечника катушки и т.д. От перечисленных факторов в общем случае зависят и основные параметры контура: индуктивность L , ёмкость C и суммарное активное сопротивление R_Σ .

В нашем контуре катушка индуктивности L на ферритовом каркасе обладает малым сопротивлением по постоянному току и высокой собственной резонансной частотой $f_r \geq 1,3$ МГц. В общем случае каждая катушка, помимо индуктивности L , характеризуется также собственной (межвитковой) ёмкостью C_L и активным сопротивлением потерь R_L , распределёнными по её длине. Принимается, что эти величины сосредоточены в отдельных элементах схемы, образующих с индуктивностью L замкнутую колебательную цепь с собственной резонансной частотой $f_r = 1/2\pi\sqrt{LC_L}$. Вследствие влияния ёмкости C_L при измерении на частоте f определяется не истинная индуктивность L , а эффективное значение индуктивности $L_{eff} = L/(1 - f^2/f_r^2)$, которое может заметно отличаться от истинной величины L . В рабочем диапазоне частот нашего контура выполняется неравенство $f \ll f_r$, так что в эквивалентной схеме контура на рис. 1а индуктивность представлена своим истинным значением L и активным сопротивлением R_L .

Полипропиленовые конденсаторы, входящие в комплект магазина ёмкостей C_n ($n = 1, 2, \dots 7$), в рабочем диапазоне частот имеют пренебрежимо малые собственные индуктивности (менее 10^{-5} мГн на 1 см общей длины обкладок и выводов) и относительно малые активные потери. Для оценки возможного вклада активных потерь в конденсаторах в общий импеданс контура воспользуемся представлением конденсатора с ёмкостью C последовательной эквивалентной схемой, показанной на рис. 2а.

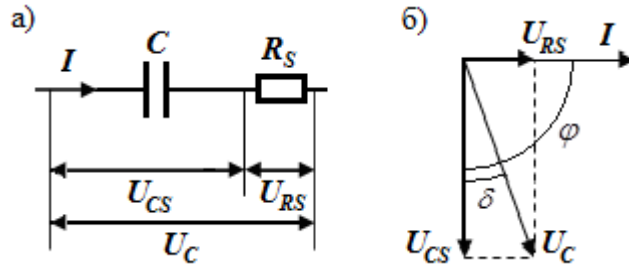


Рис. 2. Последовательная эквивалентная схема конденсатора с потерями.

На этой схеме R_s – так называемое эквивалентное последовательное сопротивление (ЭПС), обусловленное, главным образом, электрическим сопротивлением материала обкладок и выводов конденсатора и контактов между ними, а также потерями в диэлектрике. Из эквивалентной схемы и векторной диаграммы к ней (рис. 2б) видно, что активные потери в конденсаторе, пропорциональные, как известно, косинусу угла φ сдвига фаз между током и напряжением на ёмкости, убывают с ростом φ и, соответственно, с уменьшением угла $\delta = 90^\circ - \varphi$. Потери в конденсаторе принято характеризовать величиной $\operatorname{tg} \delta$, обычно приводимой в документации к изделию. Из рисунка 2 и закона Ома при этом получаем выражение для ЭПС на циклической частоте $\omega = 2\pi f$ в виде

$$R_s = \frac{U_{RS}}{I} = \frac{U_{RS}}{\omega C U_{CS}} = \frac{1}{\omega C} \operatorname{tg} \delta. \quad (1)$$

Конденсаторы магазина ёмкостей C_n в интересующем нас диапазоне частот имеют $\operatorname{tg} \delta < 10^{-3}$, что является очень хорошим (низким!) показателем для конденсаторов с твёрдым диэлектриком.

В колебательный контур нашей установки входит постоянный резистор R (см. рис. 1), снижающий его добротность. Это сделано для упрощения процедур получения и обработки резонансных кривых. Таким образом, суммарное активное сопротивление контура принимается равным

$$R_\Sigma = R + R_L + R_s. \quad (2)$$

Далее будем пользоваться методом комплексных амплитуд (см., например, [1], с. 37). Для импедансов индуктивности Z_L , ёмкости Z_C и последовательного контура $Z = Z_L + R + Z_C$ с учётом (2), (3) получаем формулы:

$$Z_L = R_L + i\omega L, \quad Z_C = R_s - i\frac{1}{\omega C}, \quad Z = R_\Sigma + i\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right). \quad (3)$$

Комплексные амплитуды тока в контуре $\vec{I} = E/Z$ и напряжений на индуктивности $\vec{U}_L = Z_L \vec{I}$ и ёмкости $\vec{U}_C = Z_C \vec{I}$ при нулевой начальной фазе φ_0 напряжения на контуре $\vec{E} = E e^{i\varphi_0}$ с учётом (1) – (3) удобно представить в виде

$$\vec{I} = \frac{E}{R_\Sigma} \frac{1}{1 + iQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}, \quad \vec{U}_L = iEQ \frac{\omega}{\omega_0} \frac{1 - iR_L/\rho}{1 + iQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}, \quad \vec{U}_C = -iEQ \frac{\omega_0}{\omega} \frac{1 + i \operatorname{tg} \delta}{1 + iQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}. \quad (4)$$

Здесь использованы стандартные обозначения для характеристик колебательного контура: $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ – собственная частота, определяемая из условия $\operatorname{Im} Z = 0$, то есть из условия действительности импеданса контура, $\rho = \sqrt{L/C}$ – реактивное, или волновое, сопротивление контура, Q – добротность колебательного контура, связанная с его параметрами соотношениями

$$Q = \rho/R_\Sigma = \omega_0 L/R_\Sigma = 1/\omega_0 C R_\Sigma \gg 1. \quad (5)$$

Сильное неравенство в (5) означает, что о резонансе, как правило, говорят, если добротность колебательного контура достаточно велика. При этом частоту ω_0 обычно называют резонансной. Условие (5) выполняется для всех контуров, используемых в нашей работе.

Из формул (4), (5) видно, что потерями в конденсаторах, явно представленных тангенсом угла потерь $\operatorname{tg} \delta$, в нашем случае меньшим 10^{-3} , можно пренебречь. В то же время вклад потерь в конденсаторах в суммарное активное сопротивление контура R_Σ вблизи резонанса, примерно равный $\rho \operatorname{tg} \delta$, можно будет оценить только по результатам эксперимента.

Наибольший практический интерес представляет случай, когда отклонение $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ частоты внешней ЭДС от частоты ω_0 удовлетворяет сильному неравенству

$$|\Delta\omega| \ll \omega_0. \quad (6)$$

При этом в первом порядке малости по безразмерному параметру $|\Delta\omega|/\omega_0$

$$\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} = \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}, \quad (7)$$

что позволяет упростить выражения (4) и представить их в виде

$$\vec{I} = \frac{E}{R_\Sigma} \frac{e^{i\varphi_I}}{\sqrt{1 + (\tau\Delta\omega)^2}}, \quad \varphi_I = -\operatorname{arctg}(\tau\Delta\omega), \quad (8a)$$

$$\vec{U}_L = EQ \frac{\omega}{\omega_0} \frac{e^{i\varphi_L}}{\sqrt{1 + (\tau\Delta\omega)^2}}, \quad \varphi_L = \frac{\pi}{2} - \frac{R_L}{\rho} - \operatorname{arctg}(\tau\Delta\omega), \quad (8б)$$

$$\vec{U}_C = EQ \frac{\omega_0}{\omega} \frac{e^{i\varphi_C}}{\sqrt{1 + (\tau\Delta\omega)^2}}, \quad \varphi_C = -\frac{\pi}{2} + \delta - \operatorname{arctg}(\tau\Delta\omega), \quad (8в)$$

где $\tau = 2L/R_\Sigma = 2Q/\omega_0$ – время затухания, или «постоянная времени», контура. Величина $\gamma = 1/\tau$ называется коэффициентом затухания. В выражениях (8б), (8в) мы пренебрегли относительными поправками порядка Q^{-2} , а величину δ сохранили исключительно для общно-

сти, положив её, однако, константой. Из формул (8) видно, что зависимости модулей тока \vec{I} в контуре и напряжений \vec{U}_L на индуктивности и \vec{U}_C на ёмкости от частоты ω внешней ЭДС имеют вблизи резонанса, то есть при условии (6), практически одинаковый характер.

При резонансе, когда $\omega = \omega_0$, $\Delta\omega = 0$, выражения для модулей комплексных амплитуд тока и напряжения на ёмкости, их фаз и производных фаз по частоте ω принимают вид:

$$I(\omega_0) = \frac{E}{R_\Sigma}, \quad \varphi_I(\omega_0) = 0, \quad (9a)$$

$$U_L(\omega_0) = QE, \quad \varphi_L(\omega_0) = \frac{\pi}{2} - \frac{R_L}{\rho}, \quad (9б)$$

$$U_C(\omega_0) = QE, \quad \varphi_C(\omega_0) = -\frac{\pi}{2} + \delta, \quad (9в)$$

$$\varphi'_I(\omega_0) = \varphi'_C(\omega_0) = -\tau. \quad (9г)$$

Из формул (8), (9) следует, что на частоте ω_0 , где импеданс контура Z становится чисто активным и равным R_Σ , амплитуда тока достигает максимального значения $I_{\max} = E/R_\Sigma$. Напряжения \vec{U}_L и \vec{U}_C на индуктивности и ёмкости на частоте ω_0 находятся почти в противофазе и в Q раз превышают по амплитуде напряжение \vec{E} внешней ЭДС. Последнее обстоятельство послужило поводом назвать резонанс в такой цепи «резонансом напряжений». Отметим, однако, что максимальные (резонансные) значения напряжений на индуктивности и ёмкости не строго равны QE и достигаются не строго на частоте ω_0 . Соответствующие относительные поправки, обусловленные множителями $(\omega/\omega_0)^{\pm 1}$ и малыми добавками к фазам в выражениях для \vec{U}_L (8б) и \vec{U}_C (8в), составляют доли Q^{-2} .

При отклонении $\Delta\omega$ частоты внешней ЭДС от ω_0 таким, что выполняется условие

$$\tau\Delta\omega = \pm 1, \quad (11)$$

амплитуда тока I , как видно из формул (8), уменьшается в $\sqrt{2}$ раз относительно своей максимальной (резонансной) величины, а фаза φ_I изменяется на угол $\mp \pi/4$. При условии (11), если не учитывать поправки в его правой части порядка Q^{-1} , происходят аналогичные изменения амплитуд U_L , U_C и фаз φ_L , φ_C напряжений на индуктивности и ёмкости: амплитуды уменьшаются в $\sqrt{2}$ раз, а фазы меняются на угол $\mp \pi/4$ по отношению к своим резонансным значениям.

Схожесть поведения вблизи резонанса частотных характеристик тока и напряжений на реактивных элементах последовательного контура с добротностью $Q \gg 1$ упрощает эксперимент, позволяя проводить измерения именно напряжений. В нашей работе – это напряжение на контуре E и напряжение на ёмкости U_C (см. рис. 1).

Величина $\delta\omega \equiv 2|\Delta\omega| = 2/\tau$ представляет собой важную характеристику колебательного контура – ширину резонансной кривой $U_c(\omega)$ на уровне $U_c(\omega_0)/\sqrt{2}$, по которой можно определить время релаксации $\tau = 2/\delta\omega$ и, зная резонансную частоту ω_0 , найти добротность контура $Q = \omega_0/\delta\omega$.

Эти же параметры можно определить по фазово-частотной характеристике: расстояние по оси ω между точками, в которых фаза φ_c меняется от $-\pi/4$ до $-3\pi/4$, согласно (8в) равно $2/\tau$, а тангенс угла наклона функции $\varphi_c(\omega)$ в точке резонанса согласно (9г) определяет время релаксации τ .

Следует отметить, что в соотношении $\tau \cdot \delta\omega \sim 1$, которому подчиняется произведение времени релаксации и ширины резонансной кривой колебательного контура, проявляется фундаментальное *соотношение неопределённости*, связывающее, в частности, «время жизни» τ квантового осциллятора с шириной спектральной линии $\delta\omega$ его излучения (см., например, [2], с.255; [3], с.345).

Выполнение эксперимента

Символом «*» отмечены дополнительные задачи эксперимента и, соответственно, обработки и представления результатов, а также контрольные вопросы повышенной сложности.

1. Перед включением приборов проверьте правильность их соединения, которое должно соответствовать схеме на рис. 1а и рис. 3.

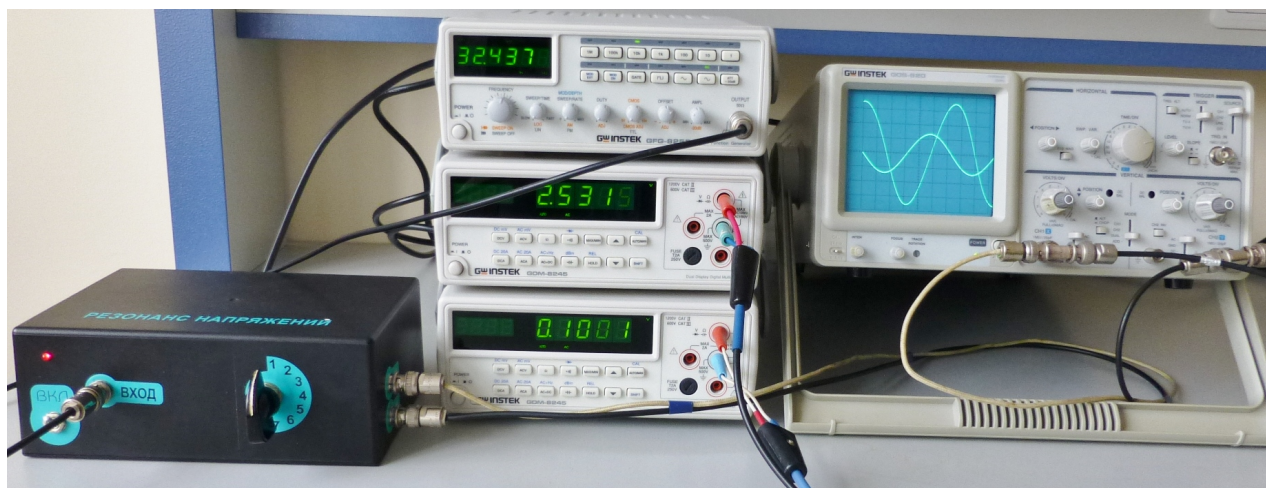


Рис. 3. Общий вид установки.

2. Поверните ручку AMPL на генераторе GFG-8255A в вытянутом состоянии в крайнее левое положение, включите генератор, нажмите кнопку “~” (синус) в нижнем ряду и кнопку “10k” (пятый частотный поддиапазон) в верхнем ряду, выставьте частоту ручкой FREQUENCY около 32 кГц, если переключатель ёмкостей стоит в положении 1, как на рис.
3. Погрешность установки частоты генератора GFG-8255A в пятом поддиапазоне составляет ± 1 Гц.
3. Включите питание блока «Резонанс напряжений» тумблером ВКЛ.

4. Включите вольтметры и переведите их в режим измерения переменного напряжения с автоматическим выбором предела измерения, нажав кнопки ACV и AUTO/MAN. При этом на табло вольтметров должны появиться крупные цифры, а на нижней строке – мелким шрифтом надписи AUTO и AC. Погрешность вольтметров GDM-8245 в интересующем нас диапазоне частот $\leq 3\%$.
5. Вращая ручку AMPL на генераторе GFG-8255A, выставьте с максимальной точностью на входе контура среднеквадратичное значение напряжения E , заданное преподавателем (в пределах $50 \div 300$ мВ), контролируя его по показанию 1-го вольтметра (см. рис. 3).
6. Включите осциллограф GOS-620, краткое описание которого находится на рабочем столе, в следующем режиме.

- Развёртка (панель HORIZONTAL): ручка плавной развёртки SWP.VAR – в крайнем правом положении, ручка TIME/DIV – в положении “5 μ ”, если переключатель ёмкостей стоит в положении 1, как на рис. 3.

- Синхронизация (панель TRIGGER): кнопка TRIG.ALT – отжата, мода – NORM, источник – CH 1, полярность SLOPE – нажата, ручка уровня LEVEL – в положении “0”.

- Вертикальное отклонение (панель VERTICAL): вход каналов – AC, кнопка ALT/CHOP – отжата, мода – DUAL.

Отцентрируйте по оси Y положение осей X обоих каналов. Для этого, не меняя источника синхронизации (CH1), заземлите CH2, поставив переключатель вида сигнала в положение GND, и ручкой VERTICAL POSITION приведите луч CH2 к середине экрана. Верните переключатель вида сигнала CH2 в положение AC. Прodelайте ту же процедуру для CH1, выбрав CH2 в качестве источника синхронизации. После настройки снова сделайте источником синхронизации CH1, не забыв вернуть его в положение AC.

При правильно выставленном режиме на экране осциллографа должны появиться две синусоиды. Подберите удобные для измерений частоты развёрток ручкой TIME/DIV и усиления каналов ручками VOLTS/DIV. Картина на экране осциллографа должна выглядеть примерно так, как на рис. 3. Начало развёртки лучей специально сдвинуто ручкой HORIZONTAL POSITION на видимую часть экрана, чтобы проверить настройку синхронизации: луч CH1 должен выходить из начала координат с отрицательным наклоном и быть симметричным относительно оси X. Для устранения возможной асимметрии воспользуйтесь ручкой уровня LEVEL на панели TRIGGER.

7. Меняя частоту f генератора, убедитесь по осциллографу и вольтметрам, что у синусоиды $U_C(t)$ меняется амплитуда и фаза относительно начала координат, тогда как синусоида $E(t)$ «привязана» к началу отсчёта, а её амплитуда остаётся неизменной с относительной погрешностью не более 1%. Теперь можно приступить к измерениям.
8. Для контуров с семью различными ёмкостями, меняя их с помощью переключателя на блоке, измерьте резонансные частоты f_{0n} и напряжения $U_C(f_{0n})$. Регистрируйте также

напряжения $E(f_{0n})$, игнорируя отклонения в пределах относительной погрешности 1%. Приближение к резонансу удобно наблюдать по фигуре Лиссажу на экране осциллографа в режиме X-Y, который включается поворотом ручки TIME/DIV в крайнее левое положение. При этом фигура Лиссажу представляет собой эллипс, оси которого на резонансной частоте f_{0n} направлены вдоль осей X, Y. Напомним, что максимальные значения напряжения U_C достигаются на частотах, несколько отличных от резонансных частот f_{0n} .

- 8.* Дополнительное упражнение. Прodelайте измерения п.8 ещё для двух напряжений E , существенно отличающихся друг от друга и от напряжения, использованного в п.8.
9. Для контуров с двумя разными ёмкостями (по указанию преподавателя) снимите амплитудно-частотные характеристики $U_C(f)$ для значений $U_C(f) \geq 0,6U_C(f_{0n})$ (16-17 точек в сумме по обе стороны от резонанса) при том же напряжении E , что и в п.8.
10. Для тех же двух контуров снимите фазово-частотные характеристики $\varphi_C(f)$ для значений $U_C(f) \geq 0,3U_C(f_{0n})$ (16-17 точек в сумме по обе стороны от резонанса) при том же напряжении E , что и в п.8.

Перед выполнением этой части работы измените с помощью ручек POSITION и TIME/DIV горизонтальной развёртки настройки осциллографа таким образом, чтобы картинка на экране имела вид, подобный представленным на рис. 4. Из осциллограмм рис. 4 видно, что синхронизирующий сигнал $E(t)$ «привязан» к общему началу отсчёта времени и напряжений на экране, лежащему на оси X координатной сетки экрана, и оба сигнала симметричны относительно этой оси.

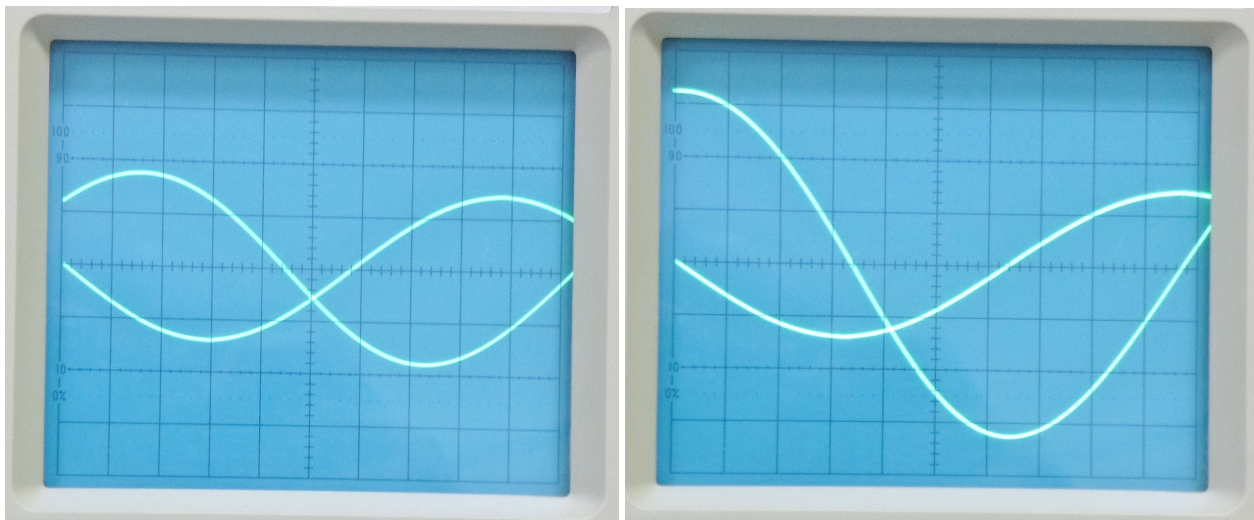


Рис. 4. Осциллограммы сигналов $E(t)$ и $U_C(t)$.

Если это не так, то следует повторить процедуру центрировки горизонтальных осей каналов, как описано в п.6.

Расстояние x от начала отсчёта до точки первого обращения в нуль напряжения $U_C(t)$ на участке спада характеризует разность фаз $\Delta\varphi$ сигналов. Эта величина, выра-

женная в радианах, очевидно, даётся формулой $\Delta\varphi = (x/x_0)\pi$, где x_0 – расстояние от начала отсчёта до точки первого обращения в нуль напряжения $E(t)$ на участке подъёма, соответствующее полупериоду этого сигнала. Так, на осциллограммах рис. 4 $\Delta\varphi/\pi \approx -0,76$ (слева) и $\Delta\varphi/\pi \approx -0,52$ (справа).

Обработка и представление результатов

Настоятельно рекомендуется для обработки и представления результатов измерений использовать электронные таблицы (например, Microsoft Excel) или Mathcad.

11. Результаты измерений п.8 внесите в табл. 1 (ЗАГЛАВНЫМИ БУКВАМИ в круглых скобках в таблице записаны названия соответствующих функций в Microsoft Excel).

Табл. 1

C_n , нФ	f_{0n} , кГц	U_C , В	E , В	L , мкГн	Q	ρ , Ом	R_Σ , Ом	$R_{S\max}$, Ом	R_L , Ом	I , мА
C_1	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
C_7	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
Среднее значение: СРЗНАЧ(--:--)				----					----	
Среднеквадратичная погрешность среднего значения: КОРЕНЬ((КВАДРОТКЛ(--:--))/(n*(n-1)))				----					----	
Коэффициент Стьюдента $t_{n\alpha}$ для n=7, $\alpha=0,95$				----					----	
Случайная погрешность				----					----	

В первый столбец этой таблицы запишите значения ёмкостей C_n , приведённые в табличке на корпусе блока «Резонанс напряжений». Для каждого значения C_n по формулам вводной части и данным эксперимента проведите последовательно расчёт L , Q , ρ , R_Σ , $R_{S\max} = 10^{-3} \rho$, R_L , I . Затем определите $\langle L \rangle \pm \Delta L$ и $\langle R_L \rangle \pm \Delta R$, где угловыми скобками отмечено среднее значение, а символом "Δ" – случайная погрешность величин L и R_L , полученных в результате косвенных измерений, проделанных в работе. Оцените вклад активных потерь в конденсаторах, представленных в табл.1 сопротивлением $R_{S\max}$, рассчитанным для максимального значения $\text{tg } \delta = 10^{-3}$, в суммарное активное сопротивление контура. Оцените влияние погрешностей приборов на результаты измерений.

11.*Дополнительное упражнение. Выполните задание п.11 для данных, полученных в п.8*. Сравните с результатами п.11. Объясните причины расхождения результатов, если они обнаружатся.

12. По данным измерений п.9 постройте на одном графике амплитудно-частотные характеристики в координатах f , $U_C(f)$ для выбранных контуров. Проведите сравнительный анализ характеристик.

13. По данным измерений п.9 также постройте на одном графике амплитудно-частотные характеристики в безразмерных координатах $x \equiv f/f_{0n}$, $y \equiv U_C(x)/U_C(1)$. По ширине резонансных кривых на уровне 0,707 определите добротности Q соответствующих контуров. Оцените погрешности. Сравните эти величины с данными табл. 1 из п.11.
14. По данным измерений п.10 постройте на одном графике фазово-частотные характеристики в координатах $x \equiv f/f_{0n}$, $y \equiv \varphi_C/\pi$ для выбранных контуров. По этим характеристикам определите добротности контуров одним из двух способов: по расстоянию между точками по оси x , в которых y меняется от $-1/4$ до $-3/4$, равному $1/Q$, или по формуле $Q = 0,5 d\varphi_C(x)/dx$ при $x=0$. Оцените погрешности. Сравните с результатами пп.11, 13.
15. По данным табл. 1 постройте зависимость $R_L(f_{0n})$ в системе координат с началом в точке $(0,6f_{0n};0)$; нанесите на график прямую $\langle R_L \rangle$. Назовите возможные причины изменения R_L с частотой.
16. По данным табл. 1 из п.11 постройте векторную диаграмму (см., например, [1], с. 41) тока и напряжений для контура с наименьшей добротностью в резонансном состоянии. Ось абсцисс направьте по вектору \vec{E} . Масштаб по этой оси сделайте в 2 раза более крупным, чем по оси ординат.

Контрольные вопросы

1. Приведите определение добротности колебательного контура в «энергетических» терминах.
2. Объясните, почему оси эллипса на экране осциллографа в п.8 ориентированы в резонансе, то есть при $\omega = \omega_0$, вдоль направлений X , Y .
3. Как оценить добротность контура по векторной диаграмме в п.16?
4. По каким причинам потери в контуре зависят от частоты?
- 5*. Зависят ли потери в контуре от амплитуды сигнала и, если зависят, то по каким причинам?
- 6*. Получите более точное, чем ω_0 , выражение для частоты ω_m , на которой напряжение U_C достигает максимума. Чему равно $U_C(\omega_m)$?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лабораторный практикум по общей физике. – Т. 2. – Электричество и магнетизм. – М.: МФТИ, 2007. С.30-51.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. – Т. III. – Электричество. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. §§126, 127.
3. Кириченко Н.А. Электричество и магнетизм. – М.: МФТИ, 2011. §§17.1-17.3.