

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение

высшего профессионального образования

Московский физико-технический институт

(государственный университет)

Кафедра общей физики

# **КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР С НЕЛИНЕЙНОЙ ЁМКОСТЬЮ**

Лабораторная работа № 141

по курсу Общая физика

МОСКВА 2012



**Цель работы:** Изучение свободных и вынужденных колебаний в нелинейной системе.

**В работе используются:** смонтированный на отдельной плате колебательный контур с варикапом 2В105А в качестве ёмкости, звуковой генератор ГЗ-33, частотомер ЧЗ-54, универсальный источник питания (УНИП), электронный осциллограф GOS-620 (ЭО), мультиметр GDM-8145, дополнительные резисторы и конденсатор.

В работе изучаются резонансные свойства нелинейного колебательного контура. В качестве нелинейного элемента, входящего в состав колебательного контура, используется специальный полупроводниковый диод (варикап), ёмкость которого зависит от величины постоянного напряжения на нём.

Речь идёт о ёмкости  $p-n$ -перехода вблизи границы двух полупроводников  $p$ -типа и  $n$ -типа. В отсутствие внешней разности потенциалов между двумя этими областями на их совместной границе образуется двойной слой пространственного заряда — отрицательные заряды в  $p$ -области и положительные заряды в  $n$ -области (рис. 1). Следует подчеркнуть, что это не свободные заряды, которые могут участвовать в перемещении по полупроводнику при наложении электрического поля, а неподвижные заряды: в  $p$ -области это отрицательно заряженные акцепторные атомы, а в  $n$ -области, положительно заряженные донорные атомы (те и другие являются специальными примесями).



Рис. 1. Схема  $p-n$  перехода

Между  $p$ - и  $n$ -областями из-за наличия контактного электрического поля возникает разность потенциалов, которая обычно составляет десятые доли вольта.

Когда к  $p$ -области приложен отрицательный потенциал (а к  $n$ -области положительный) (обратное смещение), то контактная разность потенциалов возрастает, а это приводит к увеличению их объёмных зарядов. Поскольку объёмные заряды неподвижны и связаны с ионами доноров и акцепторов, увеличение объёмного заряда означает расширение области локализации этих зарядов. А это расширение эквивалентно увеличению расстояния между двойным слоем и, следовательно, приводит к уменьшению ёмкости (её называют зарядной ёмкостью). При прямом смещении к зарядной ёмкости добавляется так называемая диффузионная ёмкость. В работе будет использоваться только обратное смещение на диоде, когда ток через диод чрезвычайно мал и почти не зависит от величины напряжения. В таком режиме диод наиболее близок к идеальному конденсатору.

## 1. Уравнение колебательного контура с нелинейной ёмкостью

Принципиальная электрическая схема подключения колебательного контура к выходу генератора переменного напряжения показана на рис. 2.

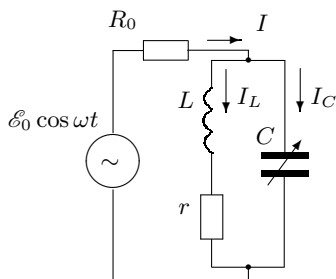


Рис. 2. Схема подключения контура

Нагрузочное сопротивление  $R_0$  много больше абсолютной величины импеданса контура даже на резонансной частоте:

$$R_0 \gg \frac{L}{rC}.$$

При этом условии ток через контур (речь идёт о переменном токе) при постоянной амплитуде переменного напряжения генератора не будет зависеть от частоты генератора и будет равен

$$I = \frac{\mathcal{E}_0 \cos \omega t}{R_0}.$$

Здесь  $I$  — мгновенное значение тока через контур. Связь между общим током и токами в ветвях контура (рис. 2):

$$I = I_L + I_C. \quad (1)$$

Пусть на варикапе  $C$  поддерживается постоянная разность потенциалов  $V = -V_0$  (рабочая точка). Зависимость ёмкости варикапа от напряжения на нём в окрестности рабочей точки запишем в виде:

$$C(U_{\sim}) = C_0 + \varkappa U_{\sim} + \beta U_{\sim}^2. \quad (2)$$

Здесь  $U_{\sim}$  — переменное напряжение, отсчитываемое от рабочей точки  $V = -V_0$ ,  $\varkappa$  и  $\beta$  — константы,  $C_0$  — ёмкость варикапа в рабочей точке.

Следовательно, в произвольный момент времени на конденсаторе  $C$  напряжение

$$U_C = -V_0 + U_{\sim}.$$

Ток через конденсатор

$$\begin{aligned} I_C &= \frac{d[(C_0 + \varkappa U_{\sim} + \beta U_{\sim}^2)(-V_0 + U_{\sim})]}{dt} = \\ &= [(C_0 - \varkappa V_0) + 2(\varkappa - \beta V_0)U_{\sim} + 3\beta U_{\sim}^2]\dot{U}_{\sim}. \end{aligned}$$

Введём обозначения:  $(C_0 - \varkappa V_0) = C_k$  — ёмкость контура,  $\varkappa - \beta V_0 = \alpha$ . В новых обозначениях зависимость  $I_C$  будет иметь вид:

$$I_C = (C_k + 2\alpha U + 3\beta U^2)\dot{U}. \quad (3)$$

Здесь и далее мы опускаем индекс « $\sim$ », поскольку речь будет идти о переменном напряжении на варикапе.

По правилу Кирхгофа для замкнутого контура, охватывающего колебательный контур, можно записать

$$-L\dot{I}_L = -U + I_L r. \quad (4)$$

С учётом (1) уравнение (4) принимает вид:

$$-L\dot{I} + L\dot{I}_C = -U + (I - I_C)r + LI. \quad (5)$$

Подставляя (3) в (5), получим

$$\begin{aligned} LC_k \left( 1 + 2\frac{\alpha}{C_k}U + 3\frac{\beta}{C_k}U^2 \right) \ddot{U} + rC_k \left( 1 + 2\frac{\alpha}{C_k}U + 3\frac{\beta}{C_k}U^2 \right) \dot{U} + \\ + U + L(2\alpha + 6\beta U)\dot{U}^2 = \frac{r}{R_0}\mathcal{E}_0 \cos \omega t - \frac{L\omega}{R_0}\mathcal{E}_0 \sin \omega t. \end{aligned}$$

Пренебрегая последним слагаемым в левой части этого уравнения, и первым слагаемым в правой части, получим уравнение для вынужденных колебаний в контуре с нелинейной ёмкостью:

$$\ddot{U} + 2\gamma\dot{U} + \frac{\omega_0^2}{1 + 2\frac{\alpha}{C_k}U + 3\frac{\beta}{C_k}U^2} \cdot U = -\frac{L\omega}{R_0}\omega_0^2\mathcal{E}_0 \sin \omega t.$$

Здесь  $\gamma = \frac{r}{2L}$ ,  $\omega_0^2 = \frac{1}{LC_k}$ .

Разлагая коэффициент при  $U$  и учитывая первые два члена разложения, окончательно получаем:

$$\ddot{U} + 2\gamma\dot{U} + \omega_0^2 \left( 1 - 2\frac{\alpha}{C_k}U - 3\frac{\beta}{C_k}U^2 + \frac{4\alpha^2}{C_k^2}U^2 \right) \cdot U = -\frac{L\omega}{R_0}\omega_0^2\mathcal{E}_0 \sin \omega t. \quad (6)$$

## 2. Эффект «удвоения частоты»

Перепишем уравнение (6) в виде:

$$\ddot{U} + 2\gamma\dot{U} + \omega_0^2 U = -\omega_0^2 U_0 \sin \omega t + \alpha' U^2 + \beta' U^3, \quad (7)$$

где

$$U_0 = \frac{L\omega}{R_0}\mathcal{E}_0, \quad \alpha' = \frac{2\alpha}{C_k}\omega_0^2, \quad \beta' = \frac{3\beta}{C_k}\omega_0^2.$$

Пусть частота колебаний внешнего напряжения  $\omega = \omega_0/2$ . В первом (линейном) приближении колебания в контуре описываются уравнением

$$\ddot{U} + 2\gamma\dot{U} + \omega_0^2 U = -\omega_0^2 U_0 \sin \left( \frac{\omega_0}{2} t \right). \quad (8)$$

Решение этого уравнения при малом затухании ( $\gamma \ll \omega_0$ ):

$$U_1 = -\frac{4}{3}U_0 \sin\left(\frac{\omega_0}{2}t\right). \quad (9)$$

При учёте нелинейных членов (во втором приближении) решение (9) приведёт к появлению в правой части уравнения (7) члена с частотой  $2\omega = \omega_0$ . Поэтому решение в виде колебания с частотой  $\omega_0$  обозначим через  $U_2$  и суммарное решение  $U_1 + U_2$  подставим в (7). С учётом того, что  $U_1$  является решением уравнения (8), получим

$$\ddot{U}_2 + 2\gamma\dot{U}_2 + \omega_0^2 U_2 - \alpha'U_2^2 - \beta'U_2^3 = \alpha'U_1^2. \quad (10)$$

Подставляя (9) в (10), получим уравнение, которое описывает отклик колебательного контура на его резонансной частоте  $\omega_0$ :

$$\ddot{U}_2 + 2\gamma\dot{U}_2 + \omega_0^2 U_2 - \alpha'U_2^2 - \beta'U_2^3 = \frac{8\alpha'}{9}U_0^2 - \frac{8\alpha'}{9}U_0^2 \cos \omega_0 t. \quad (11)$$

Найдём решение уравнения (11) в линейном приближении (пренебрегая членами  $\alpha'U_2^2$ ,  $\beta'U_2^3$  и  $\alpha'U_1U_2$ ):

$$U_2 = -\frac{8\alpha'}{9\omega_0^2}U_0^2 - \frac{4\alpha'}{9\gamma\omega_0}U_0^2 \sin \omega_0 t. \quad (12)$$

Подведём итог: при воздействии на контур внешней ЭДС с частотой  $\omega_0/2$ , где  $\omega_0$  — резонансная частота контура, в контуре возникают как колебания с частотой внешней ЭДС (9), так и колебания с удвоенной частотой  $\omega_0$  (12). Помимо этого на конденсаторе возникает дополнительное постоянное напряжение [первый член в (12)].

В дальнейшем считаем  $\beta$  малым и рассматриваем уравнение только с квадратичной нелинейностью.

### 3. «Деление частоты на два»

Рассмотрим уравнение (7), пренебрегая слагаемым  $\beta'U^3$ :

$$\ddot{U} + 2\gamma\dot{U} + \omega_0^2 U = -\omega_0^2 U_0 \sin \omega t + \alpha'U^2. \quad (13)$$

Пусть теперь частота внешнего напряжения  $\omega = 2\omega_0$ . В первом (линейном) приближении колебания в контуре описываются уравнением

$$\ddot{U} + 2\gamma\dot{U} + \omega_0^2 U = -\omega_0^2 U_0 \sin 2\omega_0 t. \quad (14)$$

Решение этого уравнения при условии  $\gamma \ll \omega_0$  (первое приближение) имеет вид

$$U_1 = \frac{U_0}{3} \sin 2\omega_0 t. \quad (15)$$

Чтобы найти второе приближение, подставим  $U = U_1 + U_2$  в уравнение (13) и получим

$$\ddot{U}_2 + 2\gamma\dot{U}_2 + \omega_0^2 U_2 - \alpha' U_2^2 - 2\alpha' U_1 U_2 = \ddot{U}_2 + \omega_0^2 \left(1 - \frac{2\alpha' U_1}{\omega_0^2}\right) U_2 \simeq \alpha' U_1^2. \quad (16)$$

В отличие от предыдущего случая колебания (15) не приводят к появлению в правой части уравнения (7) члена с частотой  $\omega_0$ . Однако, возникает резонанс параметрического типа от члена, пропорционального произведению  $U_1 \cdot U_2$ , где  $U_2$  — решение с частотой  $\omega_0$ . Множитель перед  $\omega_0^2$  в (16) меняется по синусоидальному закону, как при параметрических колебаниях.

Пусть, например, в результате флуктуации в контуре возникло колебание

$$U_2 = A \sin(\omega_0 t + \varphi).$$

Тогда суммарное решение

$$U_1 + U_2 = \frac{U_0}{3} \sin(2\omega_0 t) + A \sin(\omega_0 t + \varphi).$$

Из квадратичного члена в правой части уравнения (7) мы получим

$$U_1 \cdot U_2 \sim \sin(2\omega_0 t) \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi) \sim [\cos(\omega_0 t - \varphi) - \cos(3\omega_0 t + \varphi)].$$

Это решение в виду его сложности выходит за рамки нашего описания. Здесь мы изложим качественный результат. Решение  $U_2$  можно представить в виде:

$$U_2 = B \cos \left[ \left( \omega_0 + \frac{\varepsilon}{2} \right) t + \delta \right],$$

где  $\varepsilon$  — малый параметр:  $\varepsilon = \omega - 2\omega_0$ , а  $\omega$  — частота внешнего источника;  $\delta$  — фазовый сдвиг.

Нелинейность  $\beta'$  в (10) определяет небольшую поправку к собственной частоте  $\omega_0$ .

Качественная зависимость  $B(\varepsilon)$  для нашего контура изображена на рис. 3. Рассмотрим поведение контура при постепенном приближении частоты вынуждающей ЭДС к частоте  $2\omega_0$ . До достижения точки  $b$  на частоте  $\omega_0$  амплитуда колебаний  $B = 0$ , а затем (в точке  $b$ ) происходит резкое возрастание этой амплитуды с переходом на ветвь  $dc$ . При дальнейшем увеличении частоты амплитуда колебаний с частотой  $\omega_0$  уменьшается до нуля в точке  $c$ . При обратном ходе по кривой  $cd$  «срыв» происходит левее точки  $b$ , т.е. наблюдается гистерезис в зависимости  $B(\varepsilon)$ .

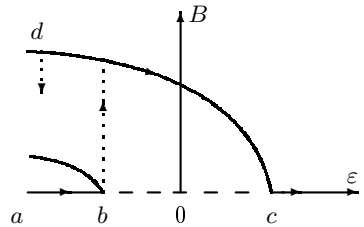


Рис. 3. Резонансные кривые параметрических колебаний

Точки  $b$  и  $c$  расположены симметрично относительно точки  $\varepsilon = 0$ , а их координаты равны

$$\varepsilon_{b,c} = \pm \sqrt{\left(\frac{4\alpha\omega_0^2 L}{3C_K R_0} \mathcal{E}_0\right)^2 - 4\gamma^2}. \quad (17)$$

**Экспериментальная установка.** Схема экспериментальной установки показана на рис. 4. В качестве источника переменной ЭДС используется звуковой генератор ГЗ-33 с диапазоном частот от 0 до 200 кГц. К выходу генератора подключается колебательный контур через нагрузочное сопротивление резистора  $R_0 \simeq 1$  МОм. Большое по сравнению с импедансом контура сопротивление резистора  $R_0$  позволяет поддерживать постоянный (по амплитуде) ток в цепи генератора, а контур выступает в качестве нагрузки, импеданс которой зависит от частоты.

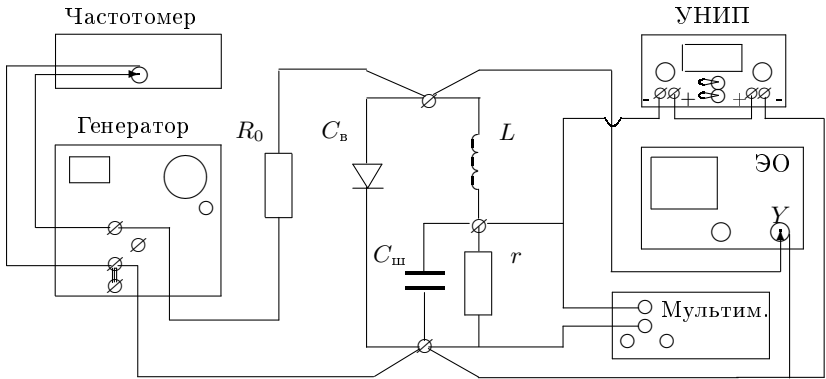


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

Колебательный контур включает в себя катушку индуктивности  $L$ , намотанную на ферритовый сердечник с воздушным зазором ( $L = 3,3$  мГн), а в качестве переменной ёмкости  $C_{\text{в}}$  — варикап 2В105А. Постоянное по величине напряжение смещения (обычно отрицательное — «запирающее») подаётся на варикап с универсального источника питания УНИП через резистор  $r$ , зашунтированный большой ёмкостью  $C_{\text{ш}} = 1$  мкф (ёмкостное сопротивление  $C_{\text{ш}}$  мало по сравнению с сопротивлениями варикапа  $C_{\text{в}}$ , катушки  $L$  и резистора  $r$ ).

Величина напряжения смещения на варикапе измеряется с помощью мультиметра GDM-8145, подключённого параллельно выходу источника.

Переменное напряжение на варикапе (равное напряжению на контуре) наблюдается и измеряется с помощью осциллографа GOS-620. Частота колебаний напряжения в контуре определяется по частотомеру ЧЗ-54.



## ЗАДАНИЕ

### 1. Резонансный метод измерения зависимости емкости варикапа от величины запертого напряжения на нем

В этом упражнении предлагается визуально по экрану осциллографа определить резонансную частоту контура. Для этого с источника постоянного напряжения УНИП на варикап подаём запирающее напряжение (несколько вольт), которое измеряем мультиметром; с генератора на контур подаём переменное напряжение малой амплитуды, которое измеряем вольтметром генератора; изменяя частоту сигнала с ГЗ, находим резонансную частоту контура  $\omega_0$  и измеряем её частотомером. Величину ёмкости контура рассчитываем по формуле

$$C_{\text{к}} = \frac{1}{\omega_0^2 L}. \quad (18)$$

Суммарная ёмкость контура в наших условиях совпадает с ёмкостью варикапа.

1. Ознакомьтесь со схемой установки (см. рис. 4).
2. Перед включением звукового генератора установите ручку «РЕГ.ВЫХОДА» в нулевое положение (крайнее левое). Включите в сеть генератор, частотомер и осциллограф. Переключатели передней панели генератора установите в следующие положения:
  - «ШКАЛА ПРИБОРА» — « $\times 1$ »,
  - «ВЫХ. СОПРОТИВЛЕНИЕ  $\Omega$ » — «600»,
  - «ПРЕДЕЛЫ ШКАЛ» — «100 mV»,
  - «ВНУТР. НАГРУЗКА» — «ВКЛ.»,
  - «МНОЖИТЕЛЬ» — «1000».

Установите частоту выходного сигнала генератора вблизи 80 кГц и проверьте по частотомеру.

3. Сфокусируйте и отцентрируйте горизонтальную линию на экране ЭО.<sup>1</sup> При переводе переключателя в положение «DC» или «AC» (здесь безразлично)<sup>2</sup> горизонтальная линия должна оставаться на середине экрана, пока на ЭО не подано напряжение.
4. Установите УНИП на минимум выходного напряжения, используя обе ручки «РЕГ.НАПР.»; тумблер «5 В–15 В» установите в положение 5 В; положение

---

<sup>1</sup> Переведите переключатель «вид входа канала» ЭО в положение «ЗЕМЛЯ» — «GND» и ручкой вертикального смещения «POSITION» установите горизонтальную линию на центр экрана ЭО.

<sup>2</sup> «DC» (direct current) — «ОТКРЫТЫЙ ВХОД» — вход открыт постоянному и переменному сигналу;  
«AC» (alternate current) — «ЗАКРЫТЫЙ ВХОД» — вход открыт только переменному сигналу (подключается дополнительный конденсатор, который не пропускает постоянное напряжение).

тумблера «← — →» безразлично, т.к. этот вольтметр не используется для измерений.

Включите УНИП в сеть.

5. Включите мультиметр. Установите режим измерения напряжения «V», предел — «2 В», вход — «DC». Настройте УНИП на минимальное значение запирающего напряжения  $V_3$ . Измерьте его мультиметром (убедитесь, что оно близко к нулю).
6. Для определения резонансной частоты контура подайте с УНИП на варикап минимальное  $U_3$ ; подайте с ГЗ на контур переменное напряжение 50 мВ (при меньших напряжениях плохо работает частотомер)<sup>3</sup>; плавно меняя частоту генератора, определите резонансную частоту  $\omega_0 = 2\pi f_{\text{рез}}$  по максимуму сигнала на экране ЭО.

Для более точного определения максимума используйте ручку «РАССТРОЙКА» (изменение частоты  $\pm 1,5\%$ ) и каждый раз подбирайте чувствительность канала «CH2-Y» переключателем «VOLTS/DIV».

Сравните показания вольтметра ГЗ с напряжением, измеренным с помощью ЭО<sup>4</sup>. Напомним, что вольтметр показывает эффективное значение напряжения, а на экране ЭО — амплитудное.

7. Повторите измерение  $f_{\text{рез}}$ , задав  $V_3 = V_0 = -0,3$  В (это рабочая точка для следующего упражнения). Определите добротность контура  $Q$  и затухание  $\gamma$  в этой точке по ширине резонансной кривой: разность резонансной частоты  $\omega_0$  и частоты  $\omega$ , при которой амплитуда падает до  $0,7 U_{\text{рез}}$ , равна  $\gamma$ , добротность  $Q = \omega_0/2\gamma$  (используйте ручку «РАССТРОЙКА» генератора).

Рассчитайте ёмкость варикапа  $C_0$  в рабочей точке по формуле (18).

8. Снимите зависимость резонансной частоты  $f_{\text{рез}}$  от величины запирающего напряжения  $V_3$  при напряжении с ГЗ 50 мВ: изменяя  $V_3$  в диапазоне от нуля до -1,5 В через 0,05 В, измеряйте  $V_3$  мультиметром и определяйте  $f_{\text{рез}}$  по сигналу на экране ЭО.
9. Вычислите значения ёмкостей варикапа и постройте график зависимости  $C_v$  от  $|V_3|$ . Через точку  $C_v$  при  $|V_3| = 0,3$  В проведите касательную; используя формулу

$$C(V) = C_0 + \varkappa(V - V_0) + \beta(V - V_0)^2,$$

определите из графика коэффициенты  $\varkappa$  и  $\beta$ , для любой точки  $V$  вблизи  $V_0$ ; рассчитайте параметры  $C_k$  и  $\alpha$ , используя формулу (2) и обозначения, принятые для формулы (3).

---

<sup>3</sup> При выборе предела шкалы 100 мВ используйте верхнюю шкалу вольтметра ГЗ (10дел. — 100 мВ).

Если выбранный предел кратен трём, используется вторая сверху шкала вольтметра ГЗ.

<sup>4</sup> Чувствительность каналов соответствует цифрам, указанным возле дискретных переключателей, ТОЛЬКО при установке ручек плавной регулировки усилителей на максимум — поворотом по часовой стрелке ДО ЩЕЛЧКА.

## II. Эффект «удвоения частоты»

В этом упражнении при малом значении  $V_3$  на варикапе и малых амплитудах  $U_{\sim}$  на контуре определяем резонансную частоту  $\omega_0$  контура; затем устанавливаем частоту вблизи  $\omega_0/2$ , увеличиваем до максимума амплитуду переменного напряжения, и плавно приближаясь к частоте  $\omega_0/2$ , следим за формой сигнала на экране ЭО.

При частоте генератора  $\omega_0/2$ , картина на экране будет иметь вид, изображённый на рис. 5. Такая форма сигнала соответствует сумме двух гармонических колебаний с частотами  $\omega_0/2$  и  $\omega_0$ :

$$U(t) = A_1 \cos \frac{\omega_0}{2}t - A_2 \cos \omega_0 t,$$

где амплитуды гармоник

$$A_1 = \frac{U_{\max} + U_{\min}}{2}, \quad A_2 = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2}. \quad (19)$$

Помимо появления гармоники на частоте  $\omega_0$ , можно наблюдать дополнительную постоянную составляющую напряжения на варикапе.

1. Установите на варикапе запирающее напряжение  $V_3 = 0,3$  В, подайте на схему переменное напряжение от генератора 50 мВ и ещё раз определите резонансную частоту  $\omega_0$ .
2. Настройте ГЗ на максимальную выходную мощность: переключите «ПРЕДЕЛЫ ШКАЛ» на ГЗ в положение 30 В, «ШКАЛА ПРИБОРА» — « $\times 2$ » и ручкой «РЕГ. ВЫХОДА» установите МАКСИМАЛЬНОЕ выходное напряжение (30 делений по второй шкале  $\times 2 = 60$  В).
3. Перестройте ГЗ на частоту  $\omega_0/2$ . Подстраивая частоту генератора, получите на экране осциллографа картину, подобную изображённой на рис. 5 (симметричную). Замерьте частоту генератора и сравните её с частотой  $\omega_0$  при  $U = 50$  мВ.

Измеряя  $U_{\max}$  и  $U_{\min}$  на экране ЭО в вольтах, определите амплитуды гармоник  $A_1$  и  $A_2$  по формуле (19).

4. Повторите предыдущие измерения, уменьшив выходное напряжение ГЗ до 30 В ручкой «РЕГ.ВЫХОДА».
5. Рассчитайте амплитуду  $A_2$  (гармоника на частоте  $\omega_0$ ) по формуле:

$$A_2 = \frac{4}{9} \frac{\alpha}{C_k} \frac{\omega_0 L}{2\gamma} \left( \frac{\omega_0 L}{R_0} \right)^2 \mathcal{E}_0^2 = \frac{4\alpha Q}{9C_k} \left( \frac{\omega_0 L}{R_0} \right)^2 \mathcal{E}_0^2, \quad (20)$$

где  $Q = \frac{\omega_0 L}{2\gamma}$  — добротность контура,  $\mathcal{E}_0$  — напряжение генератора,  $R_0 = 1$  МОм. Эта формула следует из (12) при  $\omega = \omega_0/2$  подстановкой выражения для  $\alpha'$ .

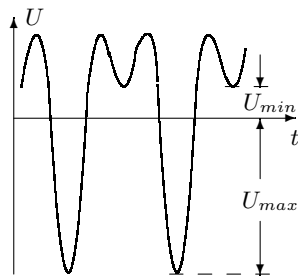


Рис. 5. Напряжение на варикапе при удвоении частоты

6. Изобразите экспериментальные результаты (две точки) на графике в координатах  $A_2$  и  $U^2$ . Определите по графику коэффициент  $K$  ( $A_2 = K \cdot U^2$ ) и сравните его с теоретическим [см. (20)].

### III. «Деление частоты на два»

В этом упражнении предлагается проследить за изменением амплитуды параметрических колебаний с частотой (см. рис. 3). Для этого устанавливаем выходную мощность ГЗ на максимум, а частоту — немного меньше  $\omega_0$ . При увеличении частоты наблюдаем резкое установление параметрических колебаний с частотой  $\omega_0$  (точка  $b$  на рис. рис. 3), а затем уменьшение амплитуды этой гармоники и её полное исчезновение в точке  $c$ .

1. При максимальном напряжении с генератора (30 делений по второй шкале  $\times 2 = 60$  В) установите частоту немного меньше  $\omega_0$  ( $\simeq 60$  кГц).
2. Медленно увеличивая частоту генератора, отметьте, при какой частоте  $\omega_1$  происходит скачкообразное возбуждение колебаний с частотой  $\omega_0$  в контуре (точка  $b$  на рис. 3). При этом напряжение смещения  $V_3$  на варикапе увеличивается.

Замерьте эту частоту с помощью частотомера. В контуре остаются и колебания с частотой  $2\omega_0$ , но их вклад мал.

3. Продолжая увеличивать частоту генератора, качественно наблюдайте уменьшение амплитуды гармоники с частотой  $\omega_0$ . Определите частоту  $\omega_2$ , при которой эта гармоника полностью исчезает и остаётся колебание с частотой  $2\omega_0$  (в точке  $c$  на рис. 3). Согласно теории частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$  должны быть расположены симметрично относительно частоты  $2\omega_0$  (точки  $b$  и  $c$  расположены симметрично относительно начала координат).

Проведите качественные наблюдения при уменьшении частоты от  $\omega_2$  до  $\omega_1$  (от точки  $c$  к точке  $d$  по кривой на рис. 3).

### Контрольные вопросы

1. Какова природа влияния запорного напряжения на ёмкость  $p - n$  перехода в полупроводниковом диоде?
2. Из каких соображений выбрана электрическая схема с использованием параллельного колебательного контура? Какой схеме она эквивалентна?
3. Чем отличаются дифференциальные уравнения колебательного контура при различных степенях приближения?
4. С каким членом в правой части нелинейного дифференциального уравнения для колебательного контура связан эффект «удвоения частоты»?
5. Чем принципиально отличается эффект «деления частоты на 2» от эффекта «удвоения частоты»?

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. — М.: Наука, 1973. § 29.

26-X-2012