

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

Кафедра радиотехники

**Генераторы синусоидальных колебаний  
с кварцевой стабилизацией частоты**

Лабораторная работа  
по курсам:

*Нелинейные преобразования и прием радиосигналов*

*Аналоговая радиоэлектроника*

*Электронные методы физических исследований*

*Радиоэлектроника*

*Радиотехника и схемотехника*

*Введение в электронику*

МОСКВА 2005

Составитель Куклев Л.П.

Генераторы синусоидальных колебаний с кварцевой стабилизацией частоты. Лабораторная работа по курсам: *Нелинейные преобразования и прием радиосигналов, Аналоговая радиоэлектроника, Электронные методы физических исследований, Радиоэлектроника, Радиотехника и схемотехника, Введение в электронику*. – М.: МФТИ (ГУ), 2005. – 31 с.

© Московский физико-технический институт  
(государственный университет), 2005

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Стабильность частоты автогенераторов.....	6
2. Кварцевый резонатор.....	9
2.1. Кристалл кварца. Пьезоэлектрический эффект....	9
2.2. Эквивалентная электрическая схема кварца .....	11
3. Генераторы с кварцевой стабилизацией частоты .....	14
3.1. Кварцевые генераторы с трансформаторной связью .....	14
3.2. Кварцевые генераторы на основе трехточечных генераторов .....	17
3.3. Генераторы с использованием кварца в качестве индуктивности .....	19
3.4. Кварцевый генератор на основе дифференциального усилителя .....	22
4. Задание .....	24
4.1. Резонансный усилитель .....	24
4.2. Кварцевый генератор с использованием последовательного резонанса кварца .....	26
4.3. Кварцевый генератор с использованием кварца в качестве индуктивности .....	29
Список литературы.....	30

## Введение

Цель этой работы заключается в ознакомлении студентов с некоторыми схемами и методами анализа генераторов синусоидальных колебаний, построенных на основе усилителей с обратной связью, в том числе – генераторов с кварцевой стабилизацией частоты.

Существенную роль в рассматриваемых схемах генераторов играет колебательный  $LC$ -контур, основные свойства которого известны студентам из курса общей физики. Схема параллельного  $LC$ -контура приведена на рис. 1.

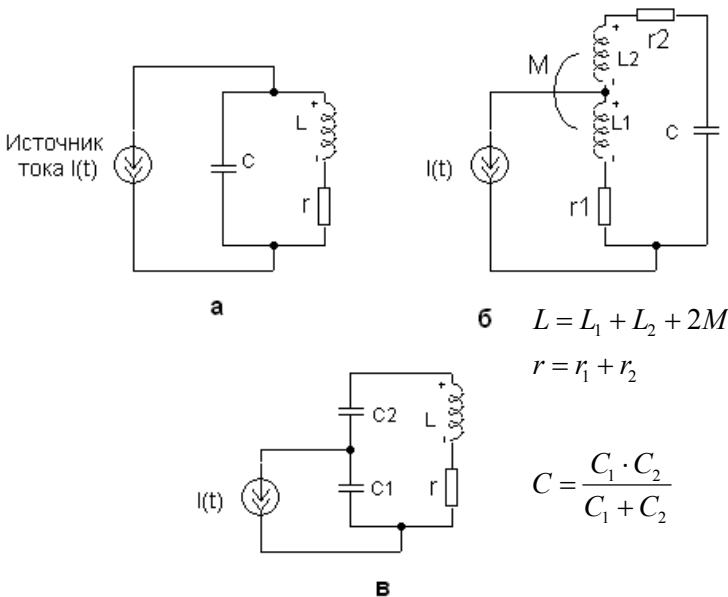


Рис. 1. Параллельный колебательный  $LC$ -контур: полное (а) и частичное (б, в) включение по отношению к внешнему источнику тока

В описании приняты следующие обозначения:

$L$  – катушка индуктивности; индуктивность (Генри, Гн)

$C$  – конденсатор; емкость (Фарада, Ф)

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} - \text{резонансная частота (Герц, Гц)}$$

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = 2\pi f_p L = \frac{1}{2\pi f_p C} -$$

характеристическое сопротивление контура (Ом)

$$Q = \frac{\rho}{r} - \text{добротность контура } (Q \gg 1)$$

$R_{\text{экв}} = \rho Q$  – эквивалентное сопротивление контура на резонансной частоте (Ом)

$$\Delta f_{0,7} = \frac{f_p}{Q} - \text{полоса пропускания контура (ширина резонансной кривой) на уровне } 1/\sqrt{2} \approx 0,707 \text{ (Гц)}$$

$M$  – взаимная индуктивность катушек  $L_1$  и  $L_2$  (Гн)

$N, n_1$  и  $n_2$  – число витков катушек  $L, L_1$  и  $L_2$

$p$  – коэффициент частичного включения контура:

$$p = \frac{L_1 + M}{L_1 + L_2 + 2M} \approx \frac{n_1}{n_1 + n_2} - \text{для схемы (б),}$$

$$p = \frac{C_2}{C_1 + C_2} - \text{для схемы (в)}$$

$R_{\text{экв}}^* = R_{\text{экв}} \cdot p^2 = \rho Q \cdot p^2$  – эквивалентное сопротивление контура по отношению к источнику тока на резонансной частоте (Ом).

Предполагается, что студенты имеют представление о свойствах транзисторов и их применении в усилителях.

При необходимости нужные сведения можно найти в [1–4].

## 1. Стабильность частоты автогенераторов

Стабильность частоты – одно из важнейших требований, предъявляемых к автогенераторам. Частота колебаний может изменяться вследствие изменения температуры, величины питающих напряжений, изменения параметров электронных приборов и по другим дестабилизирующим причинам.

Представим генератор в виде усилителя с комплексным коэффициентом усиления  $K$  и цепи обратной связи с коэффициентом передачи  $\beta$ , как показано на рис. 2.

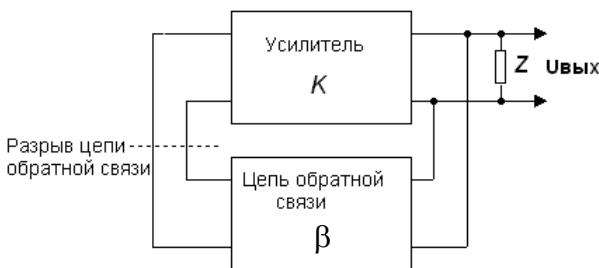


Рис.2. Структурная схема генератора, построенного на основе усилителя и цепи обратной связи

Если нагрузкой  $Z$  усилителя служит  $LC$ - контур, то генератор носит название  $LC$ -генератора. Анализ работы генератора проводится в два этапа: на первом этапе выясняются условия самовозбуждения, а на втором – проводится анализ установившегося (стационарного) режима, включающий в себя и исследование стабильности частоты колебаний.

Генератор способен самовозбудиться, если на некоторой частоте обратная связь является положительной, то есть аргумент усиления в разомкнутой петле равен нулю или целому числу  $2\pi$ , а модуль петлевого усиления на этой частоте больше единицы:

$$|K\beta| > 1 \text{ или } |\beta| > 1/|K| \quad (1)$$

При выполнении этих условий амплитуда колебаний будет нарастать, а петлевое усиление снижаться из-за нелинейности усилителя и – в некоторых случаях – из-за нелинейности цепи обратной связи. В установившемся режиме выполняются условия баланса фаз

$$\arg(K \cdot \beta) = 2\pi \cdot n, \quad n - \text{целое число}, \quad (2)$$

и баланса амплитуд

$$|K \cdot \beta| = 1. \quad (3)$$

Из фазового условия (2) определяется частота колебаний, а из амплитудного условия (3) – амплитуда установившихся колебаний.

В данной лабораторной работе изучаются вопросы, относящиеся к стабильности частоты установившихся колебаний. Определим сначала изменение частоты, связанное с изменением параметров  $LC$ -контура. В большинстве случаев частота генерируемых колебаний близка к собственной частоте контура:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Если  $L$  и  $C$  получают приращения  $\Delta L$  и  $\Delta C$ , то относительный сдвиг частоты составит

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_p} = -\frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \right).$$

В частности, температурный коэффициент частоты (ТКЧ – относительное изменение частоты при изменении температуры на  $1^\circ\text{C}$ ) равен сумме температурных коэффициентов индуктивности и емкости. Для стандартных  $LC$ -контуров ТКЧ составляет величину порядка  $10^{-3} \dots 10^{-4}$ . Термостатирование контура повышает стабильность частоты при работе в широком диапазоне изменения температуры внешней среды, но не способно устранить влияние на контур внешних цепей (например, межэлектродных емкостей транзисторов).

Другой источник нестабильности частоты связан с изменением величин, входящих в фазовое соотношение (2), что может иметь место и при неизменных параметрах контура. Допустим, что в усилителе возникает некоторый сдвиг фазы  $\Delta\Phi$ , например, вследствие изменения питающих напряжений. В этом случае для восстановления баланса фаз частота изменится настолько, чтобы сдвиг фазы в контуре и цепи обратной связи был равным по величине и противоположным по знаку сдвигу  $\Delta\Phi$ . В конечном итоге  $\Delta(\arg(K\beta)) = 0$ . Чтобы определить уход частоты  $\Delta\omega$ , вызванный сдвигом фазы  $\Delta\Phi$ , обратимся к фазовой характеристике параллельного  $LC$ -контура, описываемой формулой

$$\varphi(\omega) = \arg(Z) = -\arctg(2Q \frac{\omega - \omega_p}{\omega_p})$$

и представленной на рис. 3 для двух значений добротности контура  $Q$  ( $Q_2 > Q_1$ ).

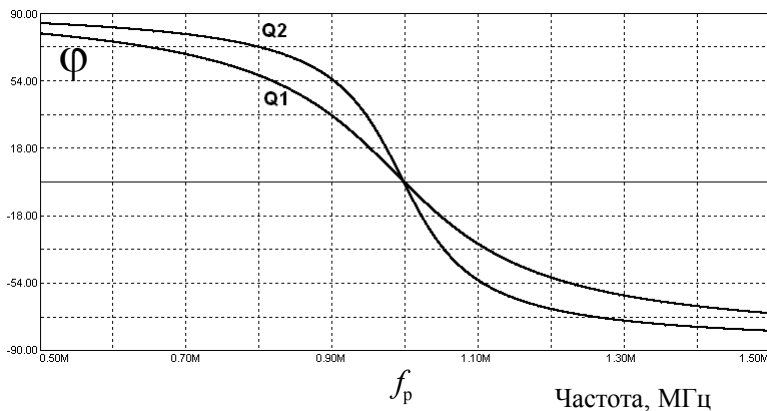


Рис. 3. Фазовая характеристика  $LC$ -контура

Фазовому сдвигу  $\Delta\Phi$  соответствует сдвиг по частоте



$$\Delta\omega = -\frac{\Delta\Phi}{d\varphi/d\omega}.$$

Следовательно, относительное изменение частоты, равное

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_p} = -\frac{\Delta\Phi}{(\omega_p \cdot \frac{d\varphi}{d\omega})},$$

будет тем меньше, чем больше крутизна фазовой характеристики на частоте  $\omega_p$ . Величина

$$\sigma_\omega = \omega_p \cdot |d\varphi/d\omega|$$

называется *фиксирующей способностью контура* по частоте. Для  $LC$ -контура

$$|d\varphi/d\omega| = 2Q/\omega_p,$$

следовательно,  $\sigma_\omega = 2Q$ . (4)

Таким образом, чем больше добротность контура, тем выше стабильность частоты. Обычные контуры имеют добротность  $Q$ , редко превышающую значение  $100 \dots 200$ , поэтому относительная нестабильность частоты генераторов, использующих стандартные контуры, имеет порядок  $10^{-3} \dots 10^{-4}$ , что недостаточно для многих практических целей. С целью повышения стабильности частоты применяют *эталонные кварцевые резонаторы*.

## 2. Кварцевый резонатор

### 2.1. Кристалл кварца. Пьезоэлектрический эффект.

Природный кварц (химическая формула  $SiO_2$ ), используемый для стабилизации частоты, кристаллизуется в форме шестигранных призм, оканчивающихся шестигранными пирамидами. В кристалле кварца различают *оптическую ось*  $Z$  (вдоль призмы), *электрические* оси  $X$ , проходящие через ребра призмы в плоскости, перпендикулярной оси  $Z$ , и *механические* оси  $Y$ , проходящие перпендикулярно граням призмы.

Кристалл кварца, как и кристаллы некоторых других веществ, в том числе не только природных, обладают способностью преобразовывать механическую энергию в электрическую и наоборот. Механическая сила, приложенная к такому кристаллу, вызывает появление на его поверхностях электрических зарядов противоположных знаков, причем изменение направления деформации кристалла изменяет знаки зарядов на противоположные. Это явление носит название прямого *пьезоэлектрического эффекта*.

Обратный пьезоэлектрический эффект заключается в появлении упругих деформаций, если вырезанную определенным образом пластину поместить в электрическое поле, вектор напряженности которого совпадает по направлению с электрической осью. Если электрическое поле переменное, то в пластине возникают механические колебания. На резонансной частоте этих колебаний преобразование механической энергии в электрическую чрезвычайно эффективно. В самом кристалле потери энергии малы и резонанс получается очень острым. Эквивалентная добротность кристалла кварца  $Q_k$  имеет значение  $10^4$  и выше. Кроме того, физические и электрические свойства кварца слабо зависят от температуры. Благодаря этому кварц является хорошим средством для стабилизации частоты генераторов синусоидальных колебаний.

Кварц для радиотехнических применений представляет собой прямоугольную или круглую пластину, вырезанную из кристалла кварца и определенным образом ориентированную по отношению к кристаллографическим осям [5]. Наиболее простыми срезами кварцевых пластин являются  $X$ -срез и  $Y$ -срез. При  $X$ -срезе толщина пластины совпадает по направлению с одной из трех осей  $X$ , а при  $Y$ -срезе толщина направлена по оси  $Y$ . Однако, пластины  $X$ - и  $Y$ -срезов имеют существенные недостатки, ограничивающие их применение в радиоустройствах: они имеют побочные резонансы и сравнительно большой температурный коэффициент частоты.

Лучшие результаты достигаются, если вырезать пластины  $X$ - и  $Y$ -срезов под определенными углами к оси  $Z$ . Существует обширная классификация кварцевых резонаторов с различными углами среза. Резонансная частота кварцевой пластины, помещенной в электрическое поле, определяется размерами пластины, типом среза и характером деформации (сдвиг, растяжение или изгиб). Резонансная частота кварца зависит также от температуры: максимальный уход частоты в диапазоне температур от  $-50^\circ$  до  $+100^\circ\text{C}$  для хороших кварцев не превышает величину  $10^{-5}$ . Для получения повышенной стабильности кварцы помещают в термостаты, в которых температура поддерживается практически постоянной. Среднесуточный уход в таких прецизионных генераторах может достигать  $10^{-11}$  в течение времени до нескольких часов [6].

В данной лабораторной работе используется кварц в виде круглой пластины АТ-среза с углом среза  $+35^\circ$ , толщиной  $h \approx 1,6$  мм, с внешним диаметром  $D \approx 14$  мм и диаметром центральных посеребренных электродов  $d \approx 8$  мм; вид деформации – сдвиг по толщине. Резонансная частота удовлетворяет соотношению

$$f_{\text{к}} (\text{МГц}) \approx \frac{1,66}{h(\text{мм})}$$

и составляет 1 МГц.

## 2.2. Эквивалентная электрическая схема кварца

Поведение кварца вблизи резонансной частоты достаточно хорошо описывает схема, показанная на рис. 4а. Зависимость от частоты активной и реактивной составляющей полного импеданса кварца ( $Z_{\text{к}} = R + jX$ ) показана на рис. 4б.

Элементы  $L_{\text{к}}$ ,  $C_{\text{к}}$ ,  $r_{\text{к}}$  образуют последовательный колебательный контур, собственная частота которого равна частоте механического резонанса кварца:

$$f_{\text{к}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\text{к}}C_{\text{к}}}}.$$

С учетом емкости кварцедержателя  $C_0$  (5...10 пФ) в схеме на рис. 4а будет наблюдаться также параллельный резонанс на частоте

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_K \cdot \frac{C_K C_0}{C_K + C_0}}} = f_K \sqrt{1 + \frac{C_K}{C_0}}.$$

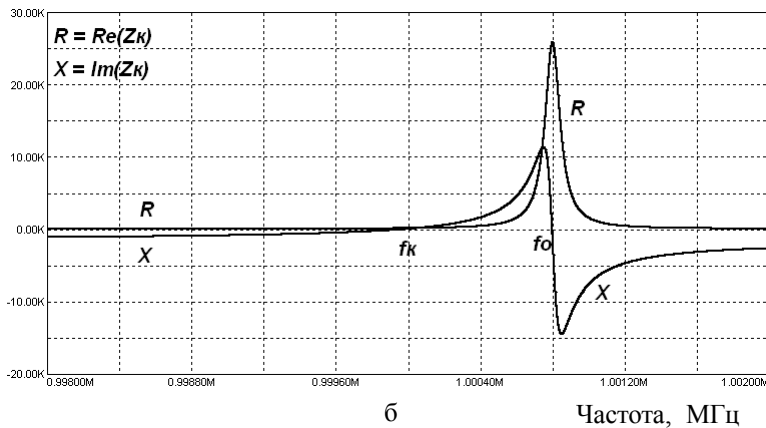
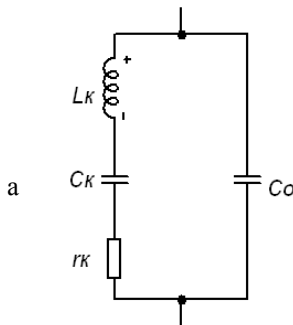


Рис.4: (а) – эквивалентная схема кварца; (б) – зависимость реактивного и активного сопротивления от частоты

Кварц с частотой  $f_K = 1$  МГц, используемый в данной работе, имеет примерно следующие параметры:

$$L_{\kappa} \approx 4,6 \text{ Гн}, \quad C_{\kappa} \approx 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ пФ}, \quad r_{\kappa} \approx 300 \text{ Ом}.$$

Следовательно, характеристическое сопротивление эквивалентного контура  $\rho_{\kappa} = \sqrt{L_{\kappa}/C_{\kappa}} \approx 3 \cdot 10^7 \text{ Ом}$ , а добротность

$$Q_{\kappa} = \rho_{\kappa}/r_{\kappa} = 10^5.$$

Так как эквивалентная емкость кварца  $C_{\kappa}$  очень мала ( $C_{\kappa} \ll C_0$ ), то частота параллельного резонанса  $f_0$  близка к частоте последовательного резонанса:

$$f_0 = f_{\kappa} \sqrt{1 + \frac{C_{\kappa}}{C_0}} \approx f_{\kappa} \cdot \left(1 + \frac{C_{\kappa}}{2C_0}\right).$$

Разность частот  $f_0$  и  $f_{\kappa}$  представляет собой величину порядка  $(10^{-4} \dots 10^{-3}) \cdot f_{\kappa}$  и уменьшается, если параллельно кварцу присоединяется дополнительная емкость внешней цепи. В этом случае

$$f_0 - f_{\kappa} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_{\kappa}}{C_0 + C} \cdot f_{\kappa}.$$

(На графиках рис. 4б, построенных для кварца с параметрами  $C_{\kappa} = 0,16 \text{ пФ}$ ,  $C_0 = 10 \text{ пФ}$ ,  $Q_{\kappa} = 10^4$  и с внешней емкостью  $C = 90 \text{ пФ}$ , разность  $f_0 - f_{\kappa}$  составляет 800 Гц.)

Фиксирующая способность кварцевого контура по частоте, равная  $\sigma_{\omega} = 2Q_{\kappa}$ , оказывается значительно более высокой (на 3 порядка и выше), чем стандартного LC-контура.

Для стабилизации частоты генераторов синусоидальных колебаний используют как последовательный, так и параллельный резонанс кварца.

В данной лабораторной работе изучаются различные схемы кварцевых генераторов, работающих или на частоте последовательного резонанса  $f_{\kappa}$ , или на частоте  $f_{\Gamma}$ , лежащей внутри диапазона  $(f_{\kappa}, f_0)$ , где импеданс кварца имеет индук-

тивный характер. Экспериментальная часть работы предусматривает исследование кварцевых генераторов, построенных на основе дифференциального усилителя.

### 3. Генераторы с кварцевой стабилизацией частоты

#### Кварцевые генераторы с трансформаторной обратной связью

Колебания в схемах генераторов, представленных на рис. 5а и 5б, возбуждаются на частоте *последовательного* резонанса кварца. При этом  $LC$ -контур в выходной цепи должен быть настроен на частоту кварца с помощью подстроечного конденсатора  $C_2$ . Необходимо также, чтобы фаза напряжения обратной связи, снимаемого с катушки  $L_2$ , была «правильной», как отмечено знаками «плюс» и «минус» на концах катушек  $L_1$  и  $L_2$ .

Определим условия самовозбуждения генераторов, приведенных на рис. 5.

В схеме на рис. 5а транзистор включен по схеме с общей базой (емкость конденсатора  $C_3$  должна быть большой, чтобы  $1/\omega C_3 \approx 0$ ), поэтому коэффициент усиления (от эмиттера до коллектора) можно записать в виде

$$K = S \cdot R_{\text{экв}},$$

где  $S = 1/r_s = I_s / U_T$  – крутизна транзистора,

$R_{\text{экв}} = \rho \cdot Q$  – эквивалентное сопротивление  $LC$ -контура на резонансной частоте.

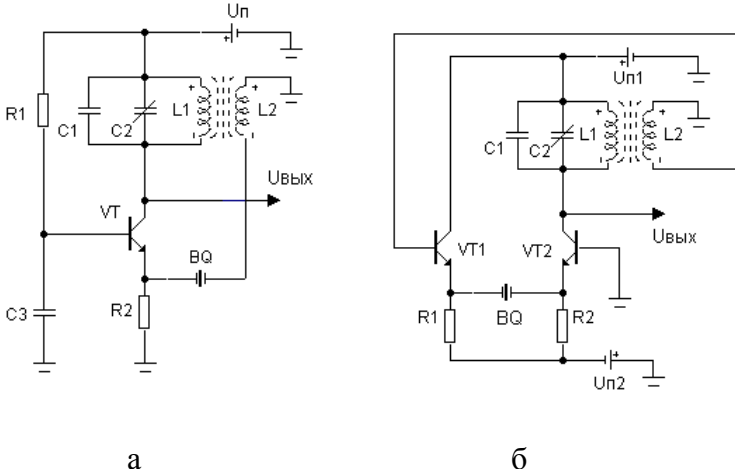


Рис. 5. Схемы кварцевых генераторов с трансформаторной обратной связью: (а) – на биполярном транзисторе, (б) – на основе дифференциального усилителя.

Коэффициент обратной связи  $\beta$  приближенно (с учетом неравенства  $R_2 \gg r_3$ ) равен

$$\beta = k_{\text{св}} \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{r_3}{r_3 + r_k},$$

$N_1$  и  $N_2$  – число витков катушек индуктивности  $L_1$  и  $L_2$ ,  
 $k_{\text{св}} = M / \sqrt{L_1 \cdot L_2}$  – коэффициент индуктивной связи между катушками  $L_1$  и  $L_2$ .

Амплитудное условие самовозбуждения состоит в выполнении неравенства  $\beta > 1/K$ :

$$k_{\text{св}} \cdot \frac{N_2}{N_1} > \frac{1}{S \cdot R_{\text{ЭКВ}}} \cdot \left(1 + \frac{r_k}{r_3}\right). \quad (5)$$

Для случая  $k_{\text{св}} = 1$  (полная связь) условие самовозбуждения можно записать в виде:

$$\frac{N_2}{N_1} > \frac{1}{S \cdot R_{\text{экв}}} \cdot \left(1 + \frac{r_{\text{к}}}{r_{\text{э}}}\right). \quad (5a)$$

Схема на рис. 5б использует пару транзисторов  $VT_1$  и  $VT_2$ , включенных по схеме дифференциального усилителя. Резисторы в эмиттерных цепях транзисторов, имеющие равные сопротивления  $R_1 = R_2 = R_{\text{э}}$ , задают токи эмиттеров:

$$I_{\text{э1}} = I_{\text{э2}} = I_{\text{э}} = \frac{U_{\text{п2}} - U_{\text{бэ}}}{R_{\text{э}}}.$$

Крутизна транзисторов в рабочей точке ( $S = I_{\text{э}} / U_T$ ) определяет коэффициент усиления (от базы  $VT_1$  до коллектора  $VT_2$ ):

$$K = \frac{r_{\text{э}}}{2r_{\text{э}} + r_{\text{к}}} \cdot SR_{\text{экв}}.$$

Принимая коэффициент обратной связи, равным

$\beta = k_{\text{св}} \cdot (N_2 / N_1)$ , условие самовозбуждения генератора по схеме на рис. 5б получим в виде:

$$k_{\text{св}} \cdot \frac{N_2}{N_1} > \frac{1}{SR_{\text{экв}}} \cdot \left(2 + \frac{r_{\text{к}}}{r_{\text{э}}}\right). \quad (6)$$

Если в неравенствах (5) и (6) принять  $r_{\text{к}} = 0$  (замыкание кварца накоротко), то получим условия самовозбуждения генераторов без кварца. Такая процедура (замыкание выводов кварца) применяется, в частности, чтобы экспериментально проверить, на какой частоте работает генератор без кварца и работает ли он вообще. (Схемами «генераторов без кварца» можно считать также схемы, в которых вместо кварца включен резистор  $R$ .)

Заметим, что в схемах на рис. 5 последовательно с кварцем включено сопротивление – обозначим его через  $r_{\text{посл}}$ , снижающее добротность кварца. Для схемы на рис. 5а сопротивление  $r_{\text{посл}}$  складывается из сопротивления  $r_{\text{э}}$  эмиттерного



перехода транзистора и выходного сопротивления  $R_{\text{вых2}}$  усилителя со стороны катушки связи  $L_2$ , равного

$$R_{\text{вых2}} = R_{\text{экв}} \cdot \left( k_{\text{св}} \cdot \frac{N_2}{N_1} \right)^2.$$

При слабой обратной связи, когда  $k_{\text{св}} \cdot (N_2/N_1) \ll 1$ , и при сравнительно небольшом значении  $R_{\text{экв}}$  (единицы кОм) можно принять, что  $R_{\text{вых}} < r_{\text{э}}$  и  $r_{\text{посл}} \approx r_{\text{э}}$ .

Для схемы на рис. 5б  $r_{\text{посл}} \approx 2r_{\text{э}}$ . В обеих схемах желательно правильным выбором тока эмиттера транзисторов обеспечить выполнение неравенства  $r_{\text{посл}} < r_{\text{к}}$ .

### 3.2. Кварцевые генераторы на основе трехточечных генераторов

Генераторы, схемы которых показаны на рис. 6, являются трехточечными генераторами с индуктивной (рис. 6а) и емкостной (рис. 6б) обратной связью.

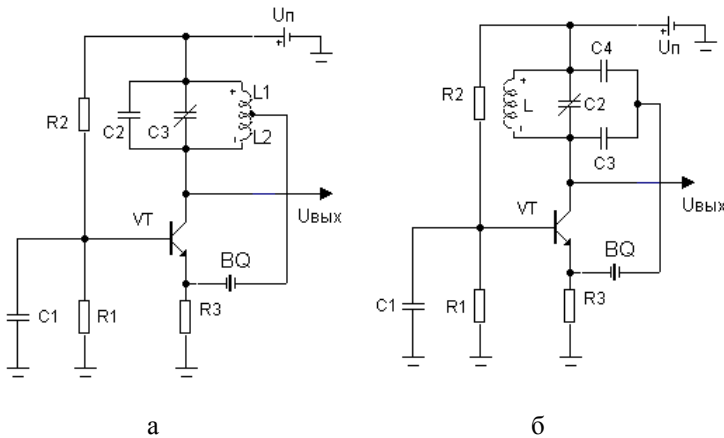


Рис. 6. Схемы кварцевых генераторов на основе трехточечных генераторов: (а) – с индуктивной обратной связью, (б) – с емкостной обратной связью.

Генераторы возбуждаются на частоте последовательного резонанса кварца, включенного в цепь положительной обратной связи. Колебательные  $LC$ -контур в коллекторных цепях должны быть настроены в резонанс на частоту кварца с помощью подстроечных конденсаторов. Так как транзисторы включены по схеме с общей базой, то фазовое условие самовозбуждения генераторов выполняется, поскольку на резонансной частоте фазовые сдвиги в усилителе и цепи обратной связи равны нулю.

Определим амплитудные условия самовозбуждения.

Для схемы на рис. 6а коэффициент усиления (от эмиттера до коллектора) равен

$$K = S \cdot R_{\text{экв}},$$

а коэффициент обратной связи

$$\beta = \frac{n_1}{N} \cdot \frac{r_3}{r_3 + r_k}, \quad (k_{\text{св}} = 1),$$

где  $N$  и  $n_1$  – число витков контурной катушки  $L$  и ее части  $L_1$ .  
Условие самовозбуждения ( $\beta > 1/K$ ) можно записать в виде

$$\frac{n_1}{N} > \frac{1}{SR_{\text{экв}}} \cdot \left(1 + \frac{r_k}{r_3}\right). \quad (7)$$

Для схемы на рис. 6б коэффициент усиления записывается так же, как и для схемы на рис. 6а, но коэффициент обратной связи здесь равен

$$\beta = \frac{C_3}{C_3 + C_4} \cdot \frac{r_3}{r_3 + r_k}.$$

Условием самовозбуждения является неравенство

$$\frac{C_3}{C_3 + C_4} > \frac{1}{SR_{\text{экв}}} \cdot \left(1 + \frac{r_k}{r_3}\right). \quad (8)$$

Как и для схем на рис. 5, желательно выполнение неравенства  $r_3 < r_k$ , чтобы не снижать добротность кварца.

### 3.3. Кварцевые генераторы с использованием кварца в качестве индуктивности

На рис. 7 представлены упрощенные схемы генератора с кварцем, включенным между коллектором и базой.

Генератор возбуждается на частоте  $f_{\Gamma}$ , на которой полный импеданс кварца имеет индуктивный характер, то есть на частоте параллельного резонанса эквивалентного колебательного контура:

$$f_{\Gamma} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{\kappa} \cdot \frac{C_{\kappa} \cdot (C_0 + C)}{C_{\kappa} + C_0 + C}}} \approx f_{\kappa} \left(1 + \frac{C_{\kappa}}{2(C_0 + C)}\right), \quad (9)$$

где  $C = C_1 \cdot C_2 / (C_1 + C_2)$  – внешняя по отношению к кварцу емкость контура. Из (9) следует, что частота генерации  $f_{\Gamma}$  находится внутри интервала резонансных частот ( $f_{\kappa}, f_0$ ).

Ввиду того, что  $C_{\kappa} \ll C$ , частота генерации близка к частоте кварца  $f_{\kappa}$ . Заметим также, что учет сравнительно небольшой емкости кварцедержателя  $C_0$  сводится к ее добавлению к емкости  $C$ .

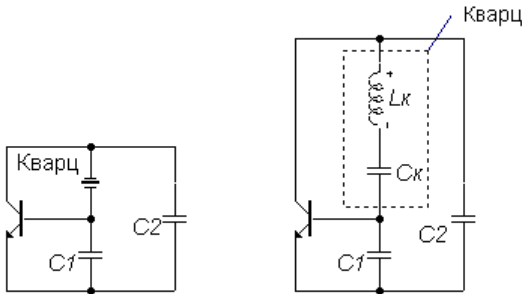


Рис. 7. Схематическое изображение генератора с включением кварца между коллектором и базой

Схема кварцевого генератора на рис. 7 соответствует схеме емкостного трехточечного генератора с коэффициентом обратной связи

$$\beta = C_2/C_1. \quad (10)$$

Условие самовозбуждения может быть получено в результате мысленного размыкания петли обратной связи в цепи базы транзистора и определения коэффициента усиления на резонансной частоте эквивалентного контура:

$$K = S\rho_k Q_k \cdot p^2,$$

где  $S$  – крутизна транзистора,  $p = (C^*/C_2)$  – коэффициент включения контура,  $C^* = C_k \cdot C/(C_k + C)$  – полная емкость эквивалентного контура. Так как  $C_k \ll C$ , то  $C^* \approx C_k$  и  $p \approx C_k/C_2$ . Следовательно,

$$K \approx S\rho_k Q_k \cdot \left(\frac{C_k}{C_2}\right)^2. \quad (11)$$

Для самовозбуждения генератора необходимо выполнить неравенство  $\beta > 1/K$ .

На рис. 8 приведены две схемы кварцевых генераторов с использованием кварца в качестве индуктивности.

Схема на рис. 8а построена на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером. Резистор  $R_2$  в цепи базы задает начальный ток эмиттера:

$$I_{\text{э}} = \frac{U_{\text{п}} - U_{\text{БЭ}}}{R_1 + R_2/(h_{21\text{э}} + 1)}.$$

Крутизна транзистора, входящая в выражение (11) для коэффициента усиления, равна  $S = I_{\text{э}}/U_T$ .

Схема на рис. 8б подобна схеме на рис. 8а, но построена с использованием полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$ -переходом. Крутизна транзистора  $S$  определяется по стоко-затворной характеристике при напряжении затвора относительно истока, равном нулю.

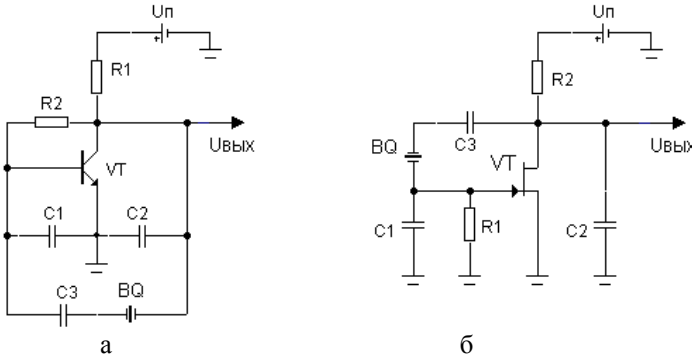


Рис. 8. Схемы кварцевых генераторов с использованием кварца в качестве индуктивности: (а) – на биполярном транзисторе, (б) – на полевом транзисторе.

Условие самовозбуждения обеих схем имеет обычный вид неравенства  $\beta > 1/K$ , в котором  $\beta$  и  $K$  определяются формулами (10) и (11) соответственно.

В отличие от упрощенной схемы генератора (рис.7), в схемах на рис. 8 последовательно с кварцем включен конденсатор  $C_3$ , изменением емкости которого можно в небольших пределах перестраивать частоту кварцевого генератора. Из формулы (9) находим

$$\frac{\Delta f_{\Gamma}}{f_{\kappa}} = -\frac{C_{\kappa} \cdot \Delta C}{2C^2}.$$

Так как  $C = (1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3)^{-1}$ , то  $\Delta C/C^2 = \Delta C_3/C_3^2$  и

$$\frac{\Delta f_{\Gamma}}{f_{\kappa}} = -\frac{C_{\kappa} \cdot \Delta C_3}{2C_3^2}. \quad (12)$$

Например, если  $C_3 = 1000$  пФ и  $\Delta C_3 = 500$  пФ, то для кварца с параметрами  $f_{\kappa} = 1$  МГц и  $C_{\kappa} = 6 \cdot 10^{-3}$  пФ относительное изменение частоты составит

$\Delta f_{\Gamma}/f_{\kappa} = -1,5 \cdot 10^{-6}$ . Абсолютное изменение частоты  $\Delta f_{\Gamma}$  будет равно  $-1,5$  Гц.

Заметим, что небольшую перестройку генератора по частоте можно осуществить также путем изменения емкости конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ , но это изменит коэффициент обратной связи  $\beta = C_2/C_1$  и может нарушить амплитудное условие самовозбуждения.

### 3.4. Кварцевый генератор на основе дифференциального усилителя

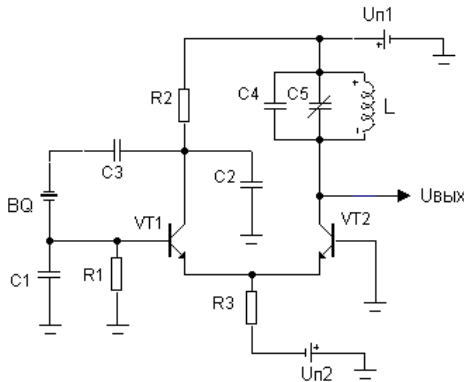


Рис. 9. Схема кварцевого генератора на основе дифференциального усилителя

Генератор возбуждается на частоте параллельного резонанса эквивалентного колебательного контура:

$$f_{\Gamma} = f_{\kappa} \cdot \sqrt{1 + \frac{C_{\kappa}}{C}} \approx f_{\kappa} \cdot \left(1 + \frac{C_{\kappa}}{2C}\right), \quad (13)$$

где  $C = (1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3)^{-1}$ .

По существу, генератор на рис. 9, как и генератор на рис. 8, является емкостным трехточечным генератором с коэффициентом обратной связи  $\beta = C_2/C_1$ , но коэффициент усиления здесь (пренебрегая шунтирующим действием резистора  $R_2$ ) равен:

$$K \approx \frac{1}{2} \cdot S_{\rho_k} Q_k \cdot \left( \frac{C_k}{C_2} \right)^2. \quad (14)$$

Крутизна транзисторов  $VT_1$  и  $VT_2$  в рабочей точке определяется формулой  $S = I_0/2U_T$ , в которой общий ток  $I_0$  равен:

$$I_0 = I_{\Sigma 1} + I_{\Sigma 2} = \frac{U_{п2} - U_{БЭ}}{R_3}.$$

Контур в коллекторной цепи транзистора  $VT_2$  не входит в петлю обратной связи; он служит для снятия выходного напряжения генератора без прямого подключения к генераторной части схемы. При настройке контура в резонанс на частоту генератора (с помощью подстроечного конденсатора  $C_5$ ) амплитуда выходного колебания

$$U_{m \text{ Вых}} = I_m \cdot R_{\text{ЭКВ}},$$

где  $I_m$  – амплитуда первой гармоники тока коллектора  $VT_2$ ,

$R_{\text{ЭКВ}} = \rho Q$  – эквивалентное сопротивление  $LC$ -контура.

При большой амплитуде колебания, когда амплитуда напряжения на входе дифференциального усилителя  $U_{m \text{ Вх}} \gg U_T$ , транзисторы  $VT_1$  и  $VT_2$  работают в режиме переключения тока  $I_0$ . В этом режиме

$$I_m = \frac{2I_0}{\pi},$$

и амплитуда выходного колебания будет

$$U_{m \text{ Вых}} = \frac{2I_0}{\pi} \cdot \rho Q, \quad (15)$$

если эта величина не превысит порога ограничения на уровне, примерно равном  $U_{п1}$ .

## 4. Задание

Экспериментальная часть работы выполняется на стандартной макетной плате, имеющей контактные гнезда. Сборка исследуемых схем производится путем соединения элементов схем с помощью отрезков одножильного провода.

### 4.1. Резонансный усилитель

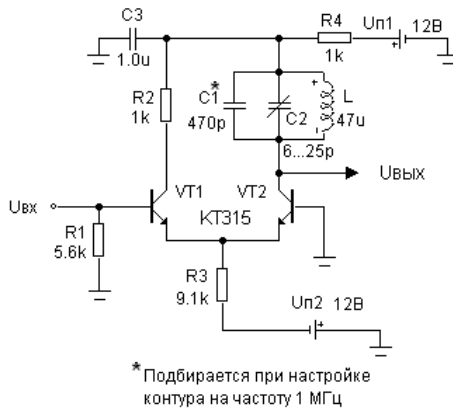


Рис. 10. Схема резонансного усилителя

1. Соберите схему, представленную на рис. 10. Измерьте потенциалы на всех электродах транзисторов. По этим измерениям определите общий ток  $I_0 = I_{\text{Э1}} + I_{\text{Э2}}$ , а также – коллекторные токи и крутизну транзисторов в рабочей точке, используя соотношение  $S = I_K / U_T$ .

2. Подайте входной сигнал  $U_{\text{вх}}$  от генератора синусоидальных колебаний. Изменяя частоту этого сигнала и наблюдая переменное напряжение на выходе  $U_{\text{вых}}$ , найдите резонанс (максимум напряжения). Если частота резонанса заметно отличается от частоты  $f_p = 1 \text{ МГц}$ , то необходимо осуще-



свить подстройку частоты, изменяя величину емкости конденсатора  $C_1$  и подстроечного конденсатора  $C_2$ .

3. На резонансной частоте  $f_p$  снимите амплитудную характеристику усилителя (зависимость амплитуды выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  от амплитуды входного сигнала  $U_{\text{вх}}$ ), изменяя амплитуду  $U_{\text{вх}}$  от 5 мВ до 100...200 мВ. Постройте графики зависимости  $U_{\text{вых}}$  и коэффициента усиления  $K = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$  от амплитуды входного сигнала.

*Указания.*

1) Коэффициент усиления каскада при малом входном сигнале определяется формулой

$$K = \frac{1}{2} \cdot SR_{\text{экв}},$$

где  $R_{\text{экв}} = \rho Q$  – сопротивление контура на резонансной частоте.

2) При большой амплитуде входного сигнала

( $U_{m \text{ вх}} \gg U_T$ ), амплитуда выходного колебания может достигать значения

$$U_{m \text{ вх}} = \frac{2I_0}{\pi} \cdot R_{\text{экв}},$$

если эта величина не превышает порога ограничения на уровне, примерно равном  $U_{\text{пл}} - I_0 \cdot R_4$ .

4. Снимите зависимость коэффициента усиления (или выходного напряжения при постоянном входном) от частоты входного сигнала при амплитуде  $U_{m \text{ вх}}$ , соответствующей линейному участку амплитудной характеристики. Измерения должны содержать 3...5 точек по обе стороны от резонанса с фиксацией, в частности, значения граничных частот, на которых коэффициент усиления в  $\sqrt{2}$  раз меньше, чем при резонансе. Определите полосу пропускания  $\Delta f_{0,7}$  на уровне 0,707 относительно максимума и добротность  $Q = f_p / \Delta f_{0,7}$ .

## 4.2. Кварцевый генератор с использованием последовательного резонанса кварца

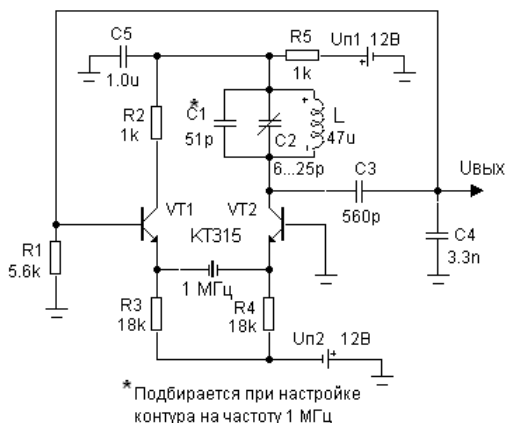


Рис.11. Схема кварцевого генератора с использованием последовательного резонанса кварца

1. Соберите схему генератора, представленную на рис. 11. Убедитесь, что рабочие токи транзисторов не отличаются от значений, измеренных в п. 4.1.

*Замечание.* Выходным напряжением генератора в этой схеме является напряжение на выходе емкостного делителя  $C_3, C_4$  с коэффициентом деления, равным коэффициенту обратной связи

$$\beta = \frac{C_3}{C_3 + C_4} \approx \frac{1}{7}.$$

2. Включите вместо кварцевого резонатора резистор сопротивлением  $R = 300 \text{ Ом}$ , примерно равным сопротивлению кварца на частоте последовательного резонанса. Убедитесь в наличии колебаний генератора без кварца. Подстройкой частоты (путем подбора емкости конденсатора  $C_1$  и изменения

емкости подстроечного конденсатора  $C_2$ ) добейтесь, чтобы частота генерируемых колебаний была близка к 1 МГц.

Измерьте амплитуду выходного колебания и сравните ее с ожидаемым значением.

3. Восстановите схему кварцевого генератора, включив между эмиттерами кварцевый резонатор вместо резистора  $R$ .

Если колебания возбуждаются, то осуществите дополнительную подстройку  $LC$ -контура в резонанс на частоту кварца, о чем будет свидетельствовать максимум выходного напряжения. Измерьте частоту колебаний.

Если колебания не возбуждаются, то, убедившись в исправности схемы, следует увеличить коэффициент обратной связи.

4. Измерьте добротность кварцевого резонатора.

Для этого произведите расстройку  $LC$ -контура, изменив емкость подстроечного конденсатора  $C_2$  (путем механического поворота подвижной пластины) от значения  $C_{2\min} \approx 6$  пФ до значения  $C_{2\max} \approx 25$  пФ. Определите в этих условиях изменение частоты колебаний  $\Delta f$  генератора без кварца (с заменой кварца резистором  $R = 300$  Ом) и с кварцем  $\Delta f_k$ .

Из соотношения

$$\frac{\Delta f_k}{\Delta f} = \frac{Q}{Q_k},$$

где  $Q$  – добротность  $LC$ -контура ( $Q$  – из п. 4.1 Задания), найдите добротность кварцевого резонатора  $Q_k$ .

5. Восстановите настройку контура в резонанс.

Определите электрические параметры кварцевого резонатора. С этой целью включите последовательно с кварцем дополнительный конденсатор  $C_{\text{посл}}$  емкостью 100...150 пФ и измерьте сдвиг частоты генератора  $\Delta f_k$ .

Из формулы  $\frac{\Delta f_k}{f_k} = \frac{C_k}{2C_{\text{посл}}}$  определите значение  $C_k$ .

Остальные параметры найдите расчетным путем:

$$L_k = \frac{1}{4\pi^2 f_k^2 C_k},$$

$$\rho_k = 2\pi f_k L_k = \frac{1}{2\pi f_k C_k} = \sqrt{\frac{L_k}{C_k}},$$

$$r_k = \frac{\rho_k}{Q_k} \quad (Q_k - \text{из п. 4}).$$

6. Исследуйте стабильность частоты кварцевого генератора при изменении питающего напряжения  $U_{п2}$ .

Снимите зависимость частоты генерируемых колебаний от напряжения  $U_{п2}$ , изменяемого от 8 до 15 В с шагом 1 В. Измерения частоты проводите с точностью 0,1 герца.

Результаты измерений занесите в таблицу.

Снимите аналогичную зависимость для генератора без кварца (с заменой кварца резистором  $R = 300 \text{ Ом}$ ). Результаты занесите в ту же таблицу и сравните их с измерениями для схемы с кварцем.

#### **4.3. Кварцевый генератор с использованием кварца в качестве индуктивности**

1. Соберите схему, представленную на рис. 12. Убедитесь, что рабочий режим транзисторов тот же, что и в схеме на рис. 11 (п. 4.2 Задания).

2. Измерьте частоту колебаний генератора, предварительно подстроив в резонанс  $LC$ -контур в коллекторной цепи транзистора  $VT_2$ . Сравните результат измерения с расчетом по формуле (13).

*Замечание.* Измерение частоты в этом пункте и далее (п.п. 3 и 4) проводите с точностью 0,1 герца.

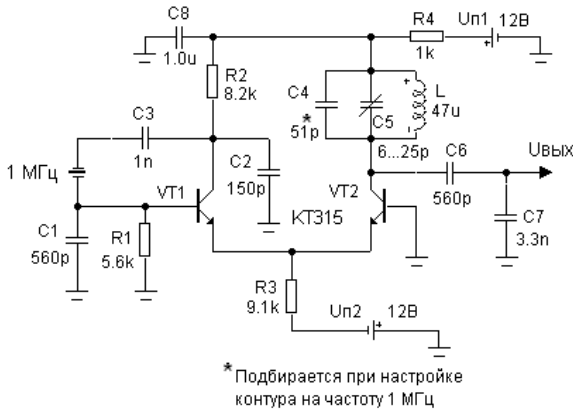


Рис. 12. Схема кварцевого генератора с использованием кварца в качестве индуктивности

3. Измерьте уход частоты колебаний генератора при изменении емкости конденсатора  $C_3$ , включив параллельно  $C_3$  дополнительный конденсатор емкостью 300...500 пФ.

Сравните результат измерения с расчетом по формуле (12).

4. Исследуйте стабильность частоты кварцевого генератора при изменении питающего напряжения  $U_{п2}$ .

Снимите зависимость частоты генерируемых колебаний от напряжения  $U_{п2}$ , изменяемого от 8 до 15 В с шагом 1 В.

Результаты измерений занесите в таблицу. Сравните эти измерения с результатами, полученными в п. 4.2.

5. Включите вместо кварца катушку индуктивности  $L = 200$  мкГн. Выполните для этой схемы генератора без кварца те же измерения, что и в пунктах 3 и 4.

Сравните полученные результаты с измерениями для схемы генератора с кварцем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воронов Е.В., Ларин А.Л.* Усиление электрических сигналов: Учебное пособие / МФТИ, М., 1994.

2. *Габидулин Э.М., Куклев Л.П.* Генерирование синусоидальных колебаний и нелинейные преобразования сигналов: Учебное пособие.— М.: Изд. МФТИ, 1980. 92 с.

3. *Манаев Е.И.* Основы радиоэлектроники.—3-е изд., перераб. и доп.— М.: Радио и связь, 1990. 512 с.

4. *ТитцеУ., Шенк К.* Полупроводниковая схемотехника / Пер. с нем. М.: Мир, 1982. 512 с.

5. *Плонский А.Ф.* Пьезокварц в технике связи.— М.: Госэнергоиздат, 1951. 223 с.

6. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники: в 3-х т./ Пер. с англ. М.: Мир, 1993. Т. 1. 416 с.

**Лабораторная работа**

по курсам:

*Нелинейные преобразования и прием радиосигналов**Аналоговая радиоэлектроника**Электронные методы физических исследований**Радиоэлектроника**Радиотехника и схемотехника**Введение в электронику***Составитель:****Куклев Леонид Петрович**

Редактор

Корректор

Подписано в печать 2005.

Формат 60 x 84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л..

Уч.- изд. л.. Тираж 450 экз. Заказ № .

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)Отдел автоматизированных издательских систем  
“ФИЗТЕХ-ПОЛИГРАФ”141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский  
пер., 9