

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

Исследование автогенератора с частотным модулятором

Цель работы – экспериментальная проверка принципов функционирования и практическое освоение методов исследования основных характеристик автогенератора с частотным модулятором.

Задачи работы – изучение приемов работы с контрольно-измерительным оборудованием, а также измерение с его помощью напряжений в различных точках схемы и получение основных характеристик автогенератора с частотным модулятором.

Основные теоретические сведения

Во многих радиоэлектронных системах для передачи информации используется частотная модуляция (ЧМ) излучаемых радиосигналов. Она находит применение и в радиоэлектронных системах извлечения информации, например, в радиолокационных, а также в системах радиоуправления и радионавигации.

Как правило, в настоящее время ЧМ-радиосигналы формируют в относительно маломощных (на уровне микроватт и милливатт) транзисторных автогенераторах (АГ), задающих перестраиваемые по частоте колебания, и синтезаторах радиопередающих устройств (РПДУ).

ЧМ является разновидностью угловой модуляции. При ЧМ изменяется частота и фаза радиочастотного-колебания $u(t)$ пропорционально мгновенному значению модулирующего сигнала $u_{\Omega}(t)$. При этом амплитуда ЧМ-колебания U_m постоянна и не зависит от мгновенного значения амплитуды модулирующего сигнала:

$$u(t) = U_m \cos \varphi(t) = U_m \cos [\omega_0 t + \varphi_0(t)],$$

где ω_0 – центральная круговая частота ЧМ-колебания; φ_0 – начальная фаза; $\varphi(t)$ – полная фаза.

При ЧМ частота $\omega(t)$ и полная фаза $\varphi(t)$ меняются во времени по сложному закону. При отсутствии модуляции колебание $u(t)$ является гармоническим – и его полная фаза меняется во времени по линейному закону:

$$\varphi(t) = \omega_0 t + \varphi_0(t).$$

При гармоническом модулирующем сигнале $u_\Omega(t) = U_\Omega \cos \Omega t$ в случае неискаженной ЧМ мгновенная частота модулированного сигнала меняется по закону

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega_m \cos \Omega t,$$

где Ω – циклическая частота модулирующего сигнала; U_Ω – амплитуда модулирующего сигнала; $\Delta\omega_m = S_\omega U_\Omega$ – девиация частоты (отклонение от среднего значения); S_ω – крутизна модуляционной характеристики частотного модулятора. ЧМ-сигнал при этом имеет вид

$$u(t) = U_m \cos(\omega_0 t + m_\omega \sin \Omega t),$$

где $m_\omega = \Delta\omega_m / \Omega$ – индекс ЧМ (рис. 4.1).

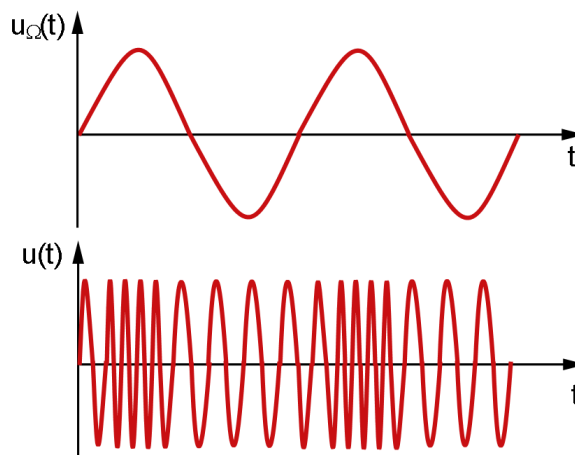


Рис. 4.1. ЧМ-сигнал во временной области

Итак, модуляция называется *частотной*, если девиация частоты $\Delta\omega_m$ от среднего значения ω_0 пропорциональна U_Ω и не зависит от частоты Ω , то есть если индекс модуляции m_ω пропорционален U_Ω и обратно

пропорционален Ω . При этом девиация фазы $\Delta\varphi_m = \Delta\omega_m/\Omega$ обратно пропорциональна частоте модулирующего колебания $u_\Omega(t)$.

Обычно модулирующий сигнал занимает некоторую полосу частот от низшей F_H до высшей F_B – и ЧМ оценивают по значению индекса.

Напомним, что круговая частота связана с частотой гармонического колебания как $\Omega = 2\pi F$, аналогично $\omega_0 = 2\pi f_0$.

Помехоустойчивость радиолинии при ЧМ пропорциональна индексу m_ω , однако с его увеличением растет полоса частот, занимаемая ЧМ-сигналом. В случае модуляции сигналом одной частоты F («чистым тоном») модулированный сигнал будет содержать бесконечное количество пар верхних и нижних боковых частот, равноотстоящих от центральной частоты f_0 на $\pm nf_0$, где $n = 1, 2, 3$ (рис. 4.2). Если же модулирующее колебание содержит гармоники, то частотный спектр усложняется – появляются еще и комбинационные боковые частоты.

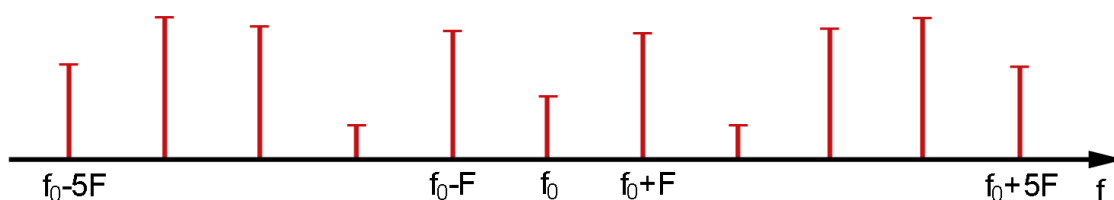


Рис. 4.2. Спектр ЧМ-сигнала

Наиболее интенсивными являются боковые частоты, непосредственно примыкающие к центральной. Отметим, что в спектре модулированного сигнала составляющая ω_0 может отсутствовать. По этой причине эту частоту называют центральной частотой ЧМ-сигнала, а не несущей.

На практике используют понятие действительной ширины полосы частот Π , под которой понимают такую полосу, вне которой амплитуда любой составляющей меньше 1% амплитуды немодулированного колебания. Ориентировочно полоса частот может быть определена как

$$\Pi \approx 2(m_\omega + \sqrt{m_\omega} + 1)F.$$

При узкополосной ЧМ ($m_\omega \ll 1$, быстрая ЧМ) полоса $\Pi \approx 2F$, т.е. практически не отличается от полосы, занимаемой сигналом с амплитудной модуляцией. При увеличении индекса m_ω спектр ЧМ-сигнала становится значительно шире спектра сигнала с амплитудной модуляцией. ЧМ-сигналы с большим индексом модуляции ($m_\omega \gg 1$, медленная ЧМ) имеют ширину спектра, равную примерно удвоенной девиации частоты. Поэтому ЧМ находит применение только на достаточно высоких частотах (обычно свыше сотен килогерц).

С точки зрения энергетики важным обстоятельством является неизменность во времени амплитуды ЧМ-сигнала. Это позволяет использовать усилительные каскады РПДУ в режимах (критическом или слегка перенапряженном), обеспечивающих высокий КПД.

В данной лабораторной работе исследуется получение ЧМ-сигнала с использованием частотного модулятора на основе генератора, управляемого напряжением. Модулируемым каскадом является транзисторный АГ, к LC-контуре которого параллельно подключается управляемый реактивный элемент емкостного типа – варикап. Это полупроводниковый диод, барьерная (или зарядная) емкость закрытого p - n -перехода которого изменяется в соответствии с модулирующим сигналом. Вместе с цепями, обеспечивающими выбор режима по постоянному напряжению, контроль режима и подвод модулирующего сигнала, варикап образует частотный модулятор.

При изменении (в соответствии с модулирующим сигналом) обратного напряжения E на барьерном p - n -переходе емкость варикапа изменяется по следующему закону:

$$C_B(E) = C_0 \left(1 + \frac{|E|}{\varphi_\kappa} \right)^{-\gamma}, \quad (4.1)$$

где φ_κ – контактная разность потенциалов p - n -перехода (может считаться равной 0,5 В); C_0 – емкость перехода при $E = 0$; γ – показатель степени,

зависящий от типа p - n -перехода (для резких переходов $\gamma = 0,5$; для сверхрезких – от 1 до 2). График зависимости (4.1) приведен на рис. 4.3 и описывает так называемую вольт-фарадную характеристику варикапа.

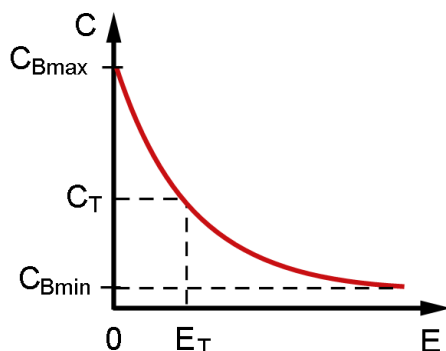


Рис. 4.3. График зависимости изменения барьерной емкости варикапа от обратного напряжения

При изменении емкости варикапа будет соответствующим образом изменяться результирующая емкость колебательного контура $L_k C_k$, а значит, и частота формируемых автоколебаний:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_k C(U_\Omega)}},$$

где $C(U_\Omega)$ – результирующая емкость колебательного контура АГ, зависящая от модулирующего сигнала.

Таким образом, возможность перестройки по частоте модулятора будет определяться изменением емкости варикапа от C_{Bmin} до C_{Bmax} .

Варикап, как правило, соединяют с колебательным контуром АГ посредством неполного включения (рис. 4.4).

В этом случае коэффициент связи определяется как

$$p_{св} = \frac{C_p}{C_p + C_T},$$

где C_p – емкость разделительного конденсатора; C_T – значение емкости варикапа в так называемой телефонной точке, т.е. в точке, выбранной

как начальная при модуляции и соответствующей режиму молчания (при нулевом модулирующем напряжении).

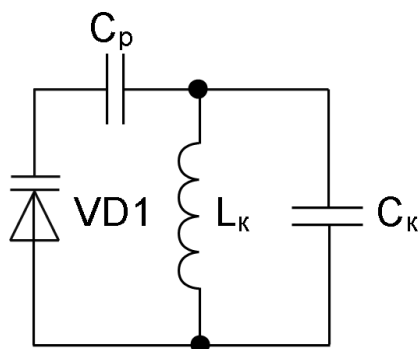


Рис. 4.4. Схема неполного включения варикапа в колебательный контур

Мгновенное значение напряжения, действующее на варикапе, является суммой напряжения смещения E_T , модулирующего и радиочастотного:

$$e(t) = E_T + u_{\Omega}(t) + U_m \cos \omega t. \quad (4.2)$$

Качество работы частотного модулятора во многом определяется *статической модуляционной характеристикой* (СМХ) $f_0 = \varphi(E)$. Эта характеристика должна быть достаточно линейной в пределах требуемой девиации частоты и иметь высокую крутизну. Нелинейность СМХ вызывает нелинейные искажения ЧМ-сигнала

Считая напряжение (4.2) равным нулю, а постоянное обратное напряжение – медленно меняющимся, можно получить приближенное уравнение СМХ:

$$\Delta f = 0,25 p_{cv} (C_T / C_k) (\Delta E / |E_T|) f_0,$$

где C_k – емкость контура. Если $C_p \gg C_T$, то $p_{cv} \approx 1$.

Динамическая модуляционная характеристика (ДМХ) при ЧМ – это зависимость девиации частоты Δf от амплитуды модулирующего сигнала U_{Ω} . Эта характеристика должна быть как можно более линейной. Приближенное уравнение для расчета ДМХ может быть представлено в следующем виде:

$$\Delta f = 0,25 \frac{C_T/C_\kappa}{1 + C_T/C_\kappa} \cdot \frac{U_\Omega}{\varphi_\kappa + E_T} f_0.$$

Для случая малой (по сравнению с центральной частотой) девиации нелинейные искажения в модуляторе на основе варикапа могут оказаться приемлемыми.

Частотная модуляционная характеристика (ЧМХ) при ЧМ – это зависимость девиации частоты Δf от частоты модулирующего сигнала F . Эта характеристика должна быть как можно более равномерной.

При выборе режима работы варикапа нужно иметь в виду, что напряжение на переходе E не должно выходить за пределы $E_{max} < E < 0$, где E_{max} – допустимое обратное напряжение на варикапе. Обычно оно выбирается равным $0,5E_{max}$.

Если E выйдет из указанного предела слева, то в варикапе может наступить электрический пробой перехода. Обычно на варикап оговаривается максимально допустимое обратное напряжение, которое часто лежит в пределах 10...90 В. Если окажется нарушенной правая граница неравенства, то переход варикапа откроется, его внутреннее сопротивление резко уменьшится, и генерация в АГ сорвется.

Существенным недостатком рассматриваемой схемы частотного модулятора является возможность появления паразитной амплитудной модуляции. Она связана с тем, что при модуляции одновременно с изменением емкости перехода варикапа изменяется также и его внутреннее сопротивление, а значит, и эквивалентное сопротивление колебательного контура АГ. Для уменьшения паразитной амплитудной модуляции следует уменьшать коэффициент связи, но при этом уменьшается также и девиация частоты.

Другой недостаток – снижение стабильности частоты – связан с тем, что к контуру АГ непосредственно подключается частотный модулятор.

Описание лабораторного стенда

Схема соединений лабораторного стенда приведена на рис. 4.5.

В его состав входят:

- лабораторный макет;
- осциллограф АКИП-4115/1А;
- вольтметр В7-38;
- блок питания Б5-47;
- генератор 33522В;
- анализатор спектра АКИП-4205/1;
- частотомер АКИП-5102;
- модулометр СКЗ-46.

Все перечисленные средства измерений, генератор и блок питания могут быть заменены другими, которые по своим функциональным возможностям, характеристикам и классу точности для соответствующих параметров не хуже указанных.

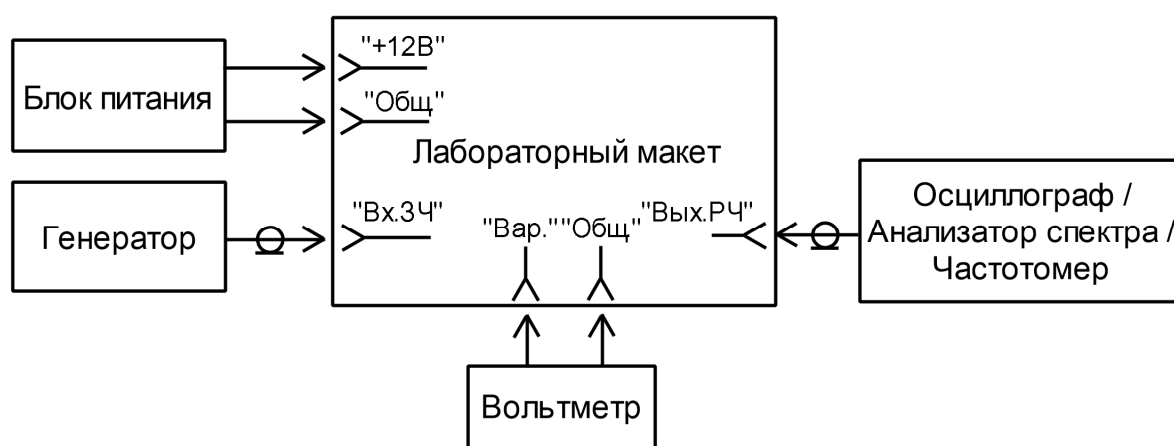


Рис. 4.5. Схема соединений лабораторного стенда

Выходное напряжения блока питания должно составлять 12 ± 3 В, максимальный ток – 1 А.

Лицевая панель лабораторного макета, приведенная на рис. 4.6, содержит его упрощенную принципиальную схему, органы управления, а также гнезда для подключения средств измерения, генератора и блока питания.

В макете предусмотрена возможность плавного изменения напряжения смещения варикапа с помощью переменного резистора «Смещ.» для экспериментального снятия СМХ и установки режима работы варикапа.

Принципиальная схема лабораторного макета приведена на рис. 4.7.

В макете объединены АГ, выполненный на транзисторе $VT1$ (КТ3117А), и частотный модулятор на варикапе $VD1$ (КВ109А). АГ выполнен по схеме емкостной трехточки (схема Колпитца) с заземленным по радиочастоте коллектором (посредством блокировочного конденсатора $C5$), а значит, радиосигнал снимается с эмиттера транзистора $VT1$. Емкостные ветви трехточки образованы конденсаторами $C6$ и $C7$.

К LC-контур АГ параллельно включен варикап $VD1$ для управления частотой, преимущественно определяемой катушкой индуктивности $L1$ и конденсатором $C3$.

Резистивный делитель $R4$ - $R5$ обеспечивает отпирающее смещение на базу транзистора $VT1$, а резистор $R6$ – автосмещение за счет постоянной составляющей тока эмиттера.

При снятии ДМХ гармонический сигнал от генератора звуковой частоты, подключаемого к гнезду «Вх.ЗЧ», поступает через разделительный конденсатор $C1$ на варикап $VD1$. Резистивный делитель $R2$ - $R3$ обеспечивает смещение варикапа. Напряжение смещения можно контролировать с помощью вольтметра, подключенного к гнездам «Вар.»-«Общ.».

С целью обеспечения наибольшего эквивалентного выходного сопротивления АГ, в частности, для устранения реакции АГ на измерительную аппаратуру (иными словами, для согласования высокого выходного сопротивления АГ с малым входным сопротивлением измерительной аппаратуры), между ним и выходом включен двухкаскадный эмиттерный повторитель на биполярных транзисторах $VT2$ и $VT3$ (КТ315Ж).

Выход эмиттерного повторителя соединен с гнездом «Вых. РЧ». К этому гнезду осуществляется подключение осциллографа, частотомера и анализатора спектра.

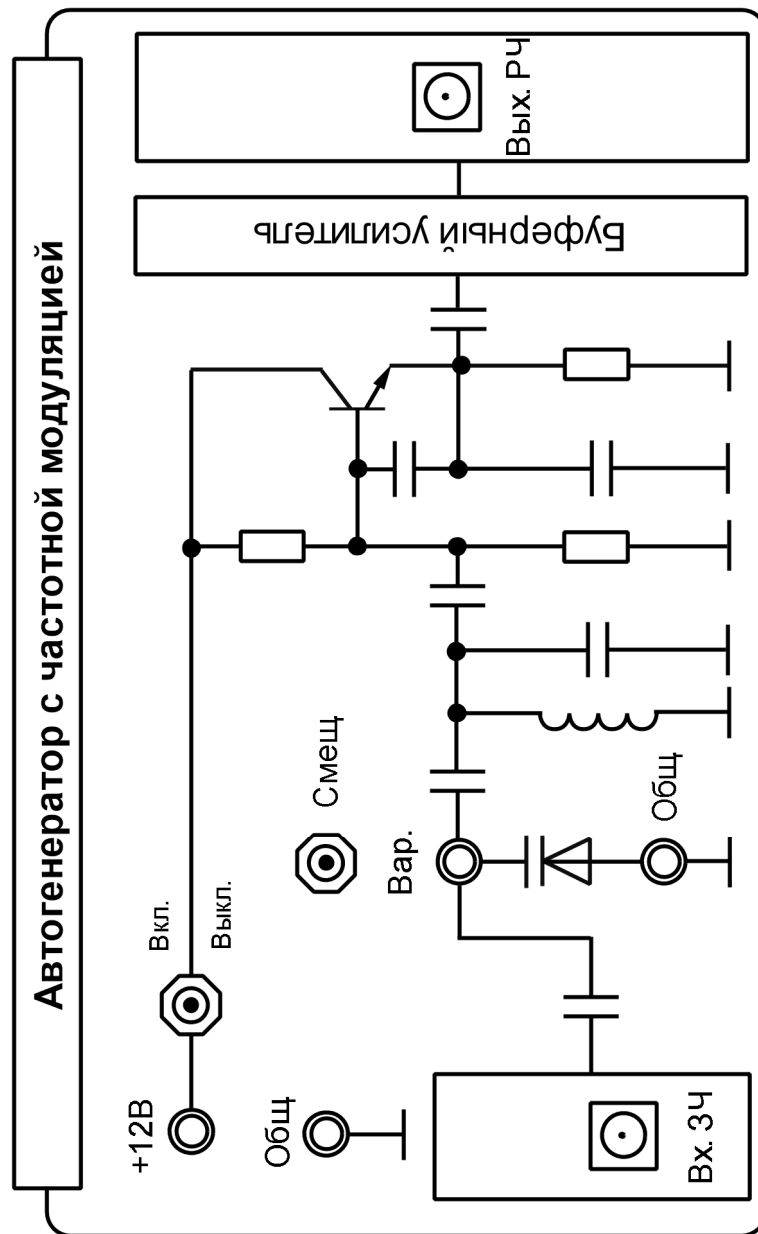


Рис. 4.6. Лицевая панель лабораторного макета

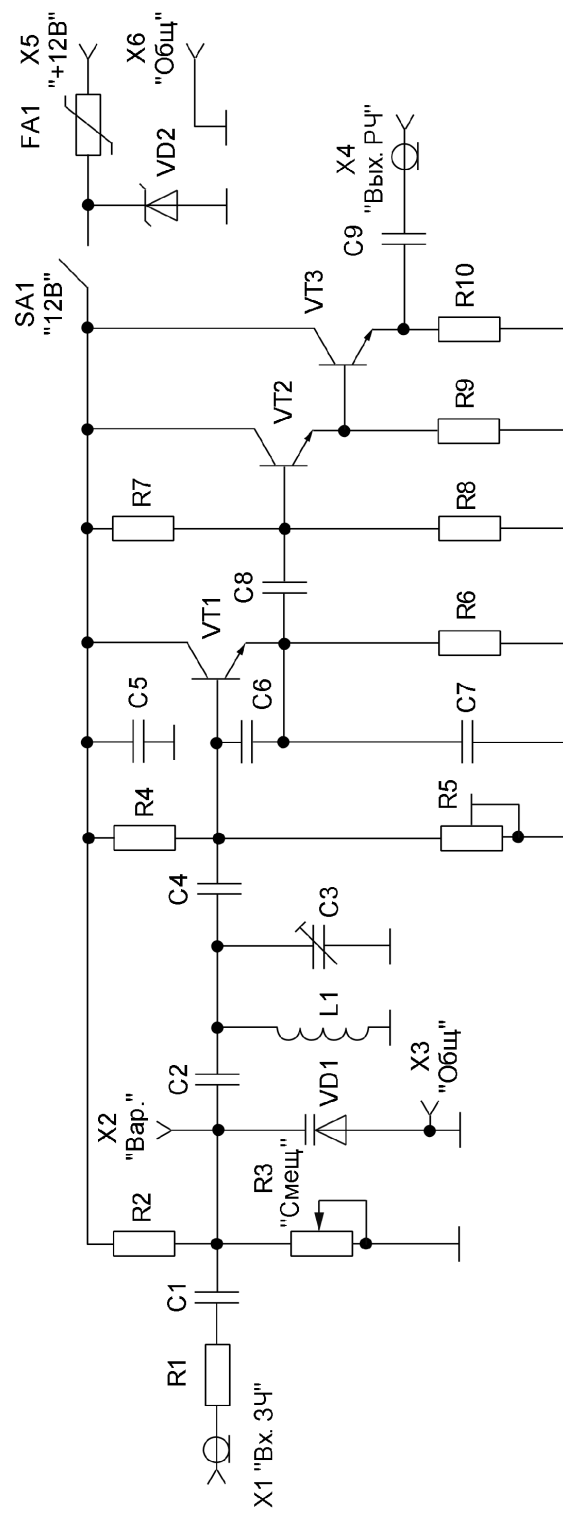


Рис. 4.7. Принципиальная схема лабораторного макета

Методика выполнения работы

Изучите теоретические сведения, приведенные в настоящих методических указаниях, по теме лабораторной работы. В случае наличия неясных моментов проконсультируйтесь у преподавателя (лаборанта).

Ознакомьтесь со схемами лабораторного стенда и макета, а также с размещением органов управления макетом. Изучите устройство и размещение органов настройки и регулировки измерительных приборов, генератора и блока питания.

ВАЖНО! Перед началом работы в лаборатории изучите правила техники безопасности!

Выполнение работы осуществляется в соответствии со следующей методикой.

1. Исследование СМХ

1.1 Собрать лабораторный стенд для экспериментального снятия СМХ. Подключить к сети переменного тока 230 В 50 Гц измерительные приборы, генератор и блок питания.

1.2 Не включая электропитания, перевести ручку переменного резистора «Смещ.» на лицевой панели лабораторного макета в крайне левое положение. Получить разрешение на включение макета у преподавателя (лаборанта).

1.3 Установить на блоке питания напряжение 12 В – и включить электропитание макета с помощью тумблера «12В» (положение «Вкл»).

1.4 Установить ручку переменного резистора «Смещ.» в среднее положение. С помощью осциллографа, подключенного к гнезду «Вых.РЧ», убедиться в наличии автоколебаний на выходе АГ. Измерить их амплитуду.

1.5 Снять СМХ $f_0 = \varphi(E)$. Напряжение на варикапе E изменять от 0 до 7 В через 0,5 В с помощью ручки переменного резистора «Смещ.». Напряжение E фиксировать с помощью вольтметра, подключенного к гнездам «Вар.»-«Общ.». Частоту сигнала на выходе АГ фиксировать с помощью частотомера, подключенного к гнезду «Вых.РЧ».

Данные измерений свести в табл. 4.1 и построить СМХ, на которой выделить квазилинейный участок, середину которого принять за телефонную точку.

Табл. 4.1. Результаты исследования СМХ

Напряжение смещения варикапа, E , В	Частота выходного сигнала, f_0 , МГц
0	
0,5	
1,0	
1,5	
2,0	
2,5	
3,0	
3,5	
4,0	
4,5	
5,0	
5,5	
6,0	
6,5	
7,0	

2. Исследование ДМХ

2.1 Собрать лабораторный стенд для экспериментального снятия ДМХ. Выставить на генераторе частоту синусоидального сигнала 2 кГц и амплитуду 1 В.

2.2 Снять ДМХ $\Delta f = \varphi(U_\Omega)$ при соответствующем телефонной точке напряжении на варикапе E_T . Амплитуду модулирующего напряжения U_Ω плавно менять от 0 до 1 В через 0,1 В. Девацию частоты Δf фиксировать с помощью модулометра, подключенного к гнезду «Вых.РЧ». Данные измерений свести в табл. 4.2 и построить ДМХ.

Табл. 4.2. Результаты исследования ДМХ

Амплитуда модулирующего напряжения, U_Ω , В	Девация частоты, Δf , кГц
0	
0,1	
0,2	
0,3	

Амплитуда модулирующего напряжения, U_{Ω} , В	Девияция частоты, Δf , кГц
0,4	
0,5	
0,6	
0,7	
0,8	
0,9	
1,0	

2.3 Подключить к гнезду «Вых.РЧ» анализатор спектра. Зафиксировать с его помощью ширину спектра ЧМ-сигнала при максимальном значении девиации частоты из табл. 4.2. Сравнить полученное значение с рассчитанным.

3. Исследование ЧМХ

3.1 Собрать лабораторный стенд для экспериментального снятия ЧМХ. Выставить на генераторе частоту синусоидального сигнала 100 Гц и амплитуду 1 В.

3.2 Снять ЧМХ $\Delta f = \varphi(F)$. Частоту модулирующего сигнала F изменять от 100 Гц до 1,5 кГц с шагом 200 Гц. Девияцию частоты Δf фиксировать с помощью модулометра, подключенного к гнезду «Вых.РЧ». Данные измерений свести в табл. 4.3 и построить ЧМХ.

Табл. 4.3. Результаты исследования ЧМХ

Частота модулирующего напряжения, F , Гц	Девияция частоты, Δf , кГц
100	
300	
500	
700	
900	
1100	
1300	
1500	

3.3 Выставить на генераторе частоту гармонического сигнала 1 кГц и амплитуду 1 В. Зафиксировать с помощью осциллографа, подключенного к гнезду «Вых.РЧ», и измерить глубину паразитной амплитудной модуляции сигнала на выходе АГ.

3.4 Отключить электропитание макета, переведя тумблер «12В» в положение «Выкл.».

3.5 Отключить измерительные приборы, генератор и блок питания от сети переменного тока 230 В 50 Гц и привести рабочее место в порядок. Доложить преподавателю (лаборанту) об окончании работы.

3.6 Рассчитать СМХ и ДМХ. Сопоставить расчетные и экспериментально полученные характеристики. Сделать выводы и подготовить отчет по проделанной работе.

Требования к оформлению и содержанию отчета

Отчет о работе составляется в бумажном и электронном виде на стандартных листах формата А4 в соответствии с ГОСТ 7.32-2017.

Отчет должен включать:

1. Идентификатор группы, фамилию студента, дату выполнения работы на титульном листе.
2. Название, цель и краткое содержание работы.
3. Структурную схему лабораторного стенда и перечень применяемого оборудования.
4. Принципиальную схему лабораторного макета.
5. Временные диаграммы расчетных и экспериментальных данных.
6. Анализ результатов, оценку, обобщения и выводы по работе.
7. Список использованной литературы, приложения (при необходимости).
8. Ответы на вопросы и решения задач для подготовки к защите.
9. Место для подписи преподавателя (лаборанта).

Отчет по лабораторной работе должен быть составлен аккуратно и последовательно. Схемы должны быть выполнены в соответствии с требованиями ЕСКД с применением специального программного обеспечения.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определения автогенератору и частотному модулятору.
2. Поясните принцип функционирования частотного модулятора с варикапом. Укажите достоинства и недостатки модулятора.
3. Дайте определение статической, динамической и частотной модуляционным характеристикам.
4. Почему напряжение на варикапе при его работе в частотном модуляторе не должно быть положительным?
5. Чем определяется возможность перестройки по частоте в исследуемом частотном модуляторе?
6. При каких условиях возможно появление паразитной амплитудной модуляции в частотном модуляторе? Как уменьшить глубину этой модуляции?
7. Нарисуйте принципиальную схему лабораторного макета и объясните назначение его элементов.
8. Поясните ход временных диаграмм токов и напряжений в исследуемом лабораторном макете.
9. Разработайте в программах компьютерного моделирования Micro-Cap или Matlab Simulink модель исследуемого автогенератора с частотной модуляцией. Получите временные диаграммы, характеризующие работу модели, и сравните их с полученными в результате проведения лабораторных исследований.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

Исследование автогенератора с кварцевой стабилизацией частоты

Цель работы – экспериментальная проверка принципов функционирования и практическое освоение методов исследования основных характеристик автогенератора с кварцевой стабилизацией частоты.

Задачи работы – изучение приемов работы с контрольно-измерительным оборудованием, а также измерение с его помощью напряжений в различных точках схемы и получение основных характеристик автогенератора с кварцевой стабилизацией частоты

Краткие теоретические сведения

Автогенераторы (АГ) являются источниками первичных колебаний в радиопередающих устройствах (РПДУ). Они широко применяются в самой различной радиоэлектронной аппаратуре в качестве составной части возбuditелей РПДУ, гетеродинов приемных устройств, а также источников опорных сигналов в цифровых устройствах обработки информации и системах синхронизации. Параметры АГ зачастую определяют характеристики всего радиоэлектронного комплекса.

Среди всех параметров АГ, определяющих качество его работы, наиболее важным является стабильность частоты. В настоящее время высокая стабильность частоты достигается при использовании в АГ кварцевых резонаторов. АГ на основе кварцевых резонаторов – одни из наиболее часто применяемых, что обусловлено их высокой добротностью, низкими значениями фазовых шумов и джиттера, возможностью получения колебаний фиксированной частоты с высокой температурной и временной стабильностью частоты.

Кварцевый резонатор является самой совершенной электромеханической колебательной системой с малым затуханием. По своему устройству кварцевый

резонатор подобен плоскому конденсатору, у которого между проводящими обкладками (электродами) помещена пластина кристалла кварца (чаще всего плоская и круглая), вырезанную специальным образом (под углом – с целью компенсации температурной нестабильности частоты).

Кварцевая пластина, как всякое упругое твердое тело, обладает резонансными частотами механических колебаний, а наличие пьезоэлектрического эффекта обеспечивает преобразование механических колебаний в электрические и наоборот. Поэтому при включении кварцевого резонатора в электрическую цепь он ведет себя колебательный контур.

Эквивалентная схема кварцевого резонатора приведена на рис. 5.1а. На рисунке $L_{кв}$ – эквивалентная индуктивность кварцевого резонатора (эквивалент колеблющейся массы под электродами резонатора); $C_{кв}$ – эквивалентная емкость (эквивалент механической жесткости кварцевой пластины); $R_{кв}$ – активное сопротивление эквивалентного контура, учитывающее потери на трение в колеблющейся пластине и потери энергии при преобразовании механических колебаний в электрические. Между обкладками резонатора существует емкость, зависящая от диэлектрической проницаемости кварца как диэлектрика. На электрической схеме (см. рис. 5.1а) она учтена включением емкости кварцедержателя C_d .

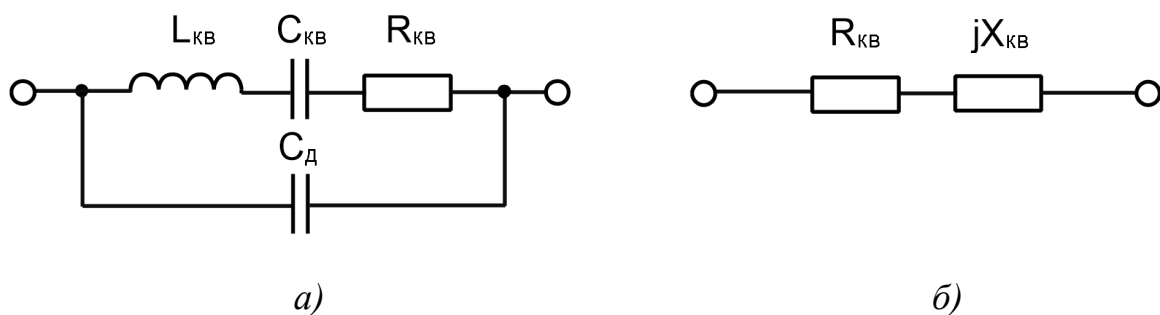


Рис. 5.1. Эквивалентная схема кварцевого резонатора

a – полная; *б* – последовательная схема замещения

Если частота колебаний приложенного напряжения приближается к резонансной частоте упругих механических колебаний кварцевой пластины, то амплитуда колебаний пластины и протекающий через нее ток резко

возрастают. При этом кварцевая пластина эквивалентна последовательному колебательному контуру с резонансной частотой

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_{кв} C_{кв}}}.$$

В дальнейшем с ростом частоты выше частоты последовательного резонанса эквивалентное сопротивление кварца как последовательного колебательного контура приобретает индуктивный характер и в совокупности с емкостью кварцедержателя образует параллельный колебательный контур с резонансной частотой

$$\omega'_p = \frac{1}{\sqrt{L_{кв} C'_кв}} = \omega_p \sqrt{1 + \frac{C_{кв}}{C_\partial}},$$

где $C'_кв = C_\partial C_{кв} / (C_\partial + C_{кв})$.

Разность этих частот между собой очень мала, так как емкость кварцедержателя много больше емкости кварца.

Наличие двух резонансов иллюстрирует рис. 5.2, на котором приведены частотные зависимости полного $Z_{кв} = R_{кв} + jX_{кв}$ и реактивного $X_{кв}$ сопротивлений кварцевого резонатора (см. рис.5.1б).

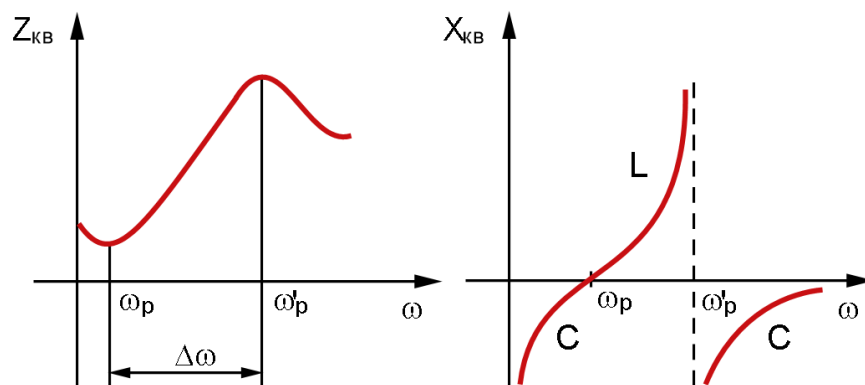


Рис. 5.2. Амплитудно-частотная характеристика кварцевого резонатора

Разнос частот между ними называется резонансным промежутком. Поскольку $C_{кв}/C_\partial \ll 1$, то относительный разнос частот можно определить как

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_p} \approx \frac{C_{кв}}{2C_0}.$$

Особенностью кварцевых резонаторов является то, что параметры контура $L_{кв}$ и $C_{кв}$ эквивалентной схемы лежат в таких пределах, которые не могут быть реализованы при использовании обычных катушек индуктивности и конденсаторов. Например, $C_{кв} = 10^{-2} \dots 10^{-3}$ пФ, а $L_{кв} = 10^{-1} \dots 10^{-2}$ Гн. При этом волновое сопротивление кварца

$$\rho_{кв} = L_{кв} \omega_p = \frac{1}{C_{кв} \omega_p}$$

оказывается очень велико, и, несмотря на значительное сопротивление потерь $R_{кв} \approx 10 \dots 100$ Ом, добротность контура оказывается очень большой:

$$Q_{кв} = \frac{\rho_{кв}}{R_{кв}} = 10^5 \dots 10^7.$$

Геометрические размеры, вид колебаний и тип среза пластины определяют электрические параметры кварцевого резонатора: частоту последовательного резонанса ω_p , добротность $Q_{кв}$, отношение емкостей $C_{кв}/C_0$, температурный коэффициент частоты и допустимую мощность рассеивания.

Из-за высокой добротности крутизна фазочастотной характеристики кварцевого резонатора велика. Другой особенностью кварцевых резонаторов является высокая стабильность резонансных частот $\omega_{кв}$ и $\omega'_{кв}$. Однако резонансная частота $\omega_{кв}$ стабильнее частоты $\omega'_{кв}$, так как последняя зависит от емкости кварцедержателя, в которую входят нестабильные межэлектродные емкости усилительного прибора, а также монтажная емкость.

Существенное влияние на стабильность частоты кварцевого резонатора оказывает амплитуда приложенного напряжения. Чем больше ее значение, тем сильнее разогревается кварцевая пластина, а значит, больше уход частоты.

Кварцевые АГ в настоящее время разрабатывают на полупроводниковых приборах, в том числе в интегральном исполнении. При этом используют область фазочастотной характеристики кварца между точками $\omega_{кв}$ и $\omega'_{кв}$,

где полное сопротивление кварца носит индуктивный характер и очень резко зависит от частоты. Области, где полное сопротивление кварца имеет емкостный характер, не используют вследствие того, что частота возбуждения АГ неоднозначна и слабо контролируется кварцем.

Существующие схемы кварцевых АГ делят на две группы:

- схемы, получающиеся путем замены кварцевым резонатором одной из индуктивностей в трехточечной схеме, так называемые осцилляторные схемы (в этих АГ колебания устанавливаются на такой частоте, при которой сопротивление резонатора является индуктивным);

- схемы, в которых кварцевый резонатор включают как последовательный элемент цепи обратной связи, так называемые фильтровые схемы (здесь колебания возбуждаются на такой частоте, при которой сопротивление резонатора минимально или близко к нему).

Чаще применяют осцилляторные схемы кварцевых АГ. Во-первых, кварцевый резонатор может иметь индуктивное сопротивление только в том случае, если он исправен и кварцевая пластина в нем колеблется. В противном случае, а также в случае отсутствия в схеме кварцевого резонатора автоколебания невозможны. Во-вторых, в этом случае обеспечивается более высокая стабильность частоты АГ.

В лабораторной работе исследуется схема АГ, в котором кварцевый резонатор включен либо между базой и коллектором, либо между базой и эмиттером транзистора. В обоих случаях кварцевый резонатор включен как индуктивное сопротивление (рис. 5.3).

Если кварцевый резонатор включен между базой и коллектором транзистора, то схема АГ представляет собой емкостную трехточку. Если же кварцевый резонатор включен между базой и эмиттером транзистора, то схема АГ представляет собой индуктивную трехточку.

При включении кварцевого резонатора между базой и коллектором, колебания в АГ возникают при большем значении емкости контура, чем при включении резонатора между базой и эмиттером, т.е. тогда, когда контур имеет

емкостную реакцию. При уменьшении емкости вблизи резонансной частоты кварца колебания срываются, так как реактивное сопротивление контура изменяет свой знак. При этом не выполняются условия самовозбуждения.

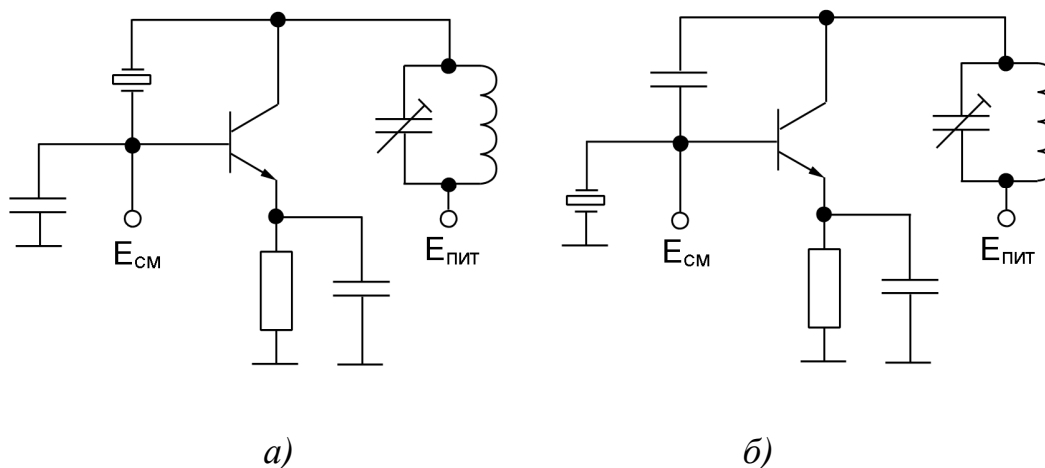


Рис 5.3. Включение кварцевого резонатора в осцилляторную схему автогенератора (*а* – между коллектором и базой; *б* – между эмиттером и базой)

Параллельный колебательный контур в коллекторной цепи позволяет повысить мощность на выходе АГ. Кроме того, наличие контура дает возможность получить автоколебания на той из собственных частот кварца, которая желательна, что особенно важно при работе на механических гармониках кварца.

Наибольшая амплитуда колебаний в коллекторном контуре и наименьшее значение тока $I_{к0}$ наблюдаются при настройке контура на частоту, близкую к частоте кварца, так как при этом сопротивление коллекторного контура максимально. При сильной расстройке контура в сторону от частоты $\omega_{кв}$ происходит срыв колебаний вследствие уменьшения сопротивления коллекторного контура. После срыва генерации транзистор оказывается в резко недонапряженном режиме.

При расстройке коллекторного контура наблюдается повышение стабильности частоты, так как фазовый угол полного сопротивления контура коллектора при этом изменяется менее резко. Поэтому обычно

в высокостабильных кварцевых АГ коллекторный контур расстраивают на десятки процентов от частоты $\omega_{кв}$.

Отмеченные закономерности наблюдаются также при включении кварцевого резонатора между базой и эмиттером. Однако стабильность частоты при включении кварца между базой и коллектором выше, так как включенная параллельно кварцу емкость p - n -перехода транзистора меньше и стабильнее, чем емкость между базой и эмиттером. Кроме того, емкости трехточки конструктивно могут быть выполнены более стабильными, чем индуктивность в схеме АГ с кварцем между эмиттером и базой. Поэтому чаще используется схема АГ, у которого кварцевый резонатор включен между базой и коллектором.

Так как основное назначение кварцевого АГ – быть источником колебаний стабильной частоты, то к его энергетическим показателям не предъявляют высоких требований. Чаще всего мощность АГ составляет 1-10 мВт, КПД 5-10%, выходное напряжение от 50 мВ до 1 В.

Основными факторами при выборе кварцевого резонатора являются рабочая частота и требуемая стабильность частоты. Кварц можно изготовить на частоты до сотен мегагерц. Однако с ростом частоты уменьшается толщина кварцевой пластины резонатора и уже на частоте 25 МГц она составляет порядка 0,1 мм, что приводит к уменьшению механической прочности резонатора и его удорожанию. Поэтому в АГ стараются использовать кварцы с частотами до 10 МГц; если же нужно получить более высокую частоту, то применяют последующее умножение частоты или строят АГ, в котором кварц возбуждается на нечетной механической гармонике (а строже говоря, на оберitone).

Описание лабораторного стенда

Схема соединений лабораторного стенда приведена на рис. 5.4. Стенд включает в себя:

- лабораторный макет;
- блок питания Б5-47;
- вольтметр В7-38;
- осциллограф АКИП-4115/1А;
- анализатор спектра АКИП-4205/1;
- частотомер АКИП-5102;
- набор конденсаторов.

Все перечисленные средства измерений и блок питания могут быть заменены другими, которые по своим функциональным возможностям, характеристикам и классу точности для соответствующих параметров не хуже указанных.

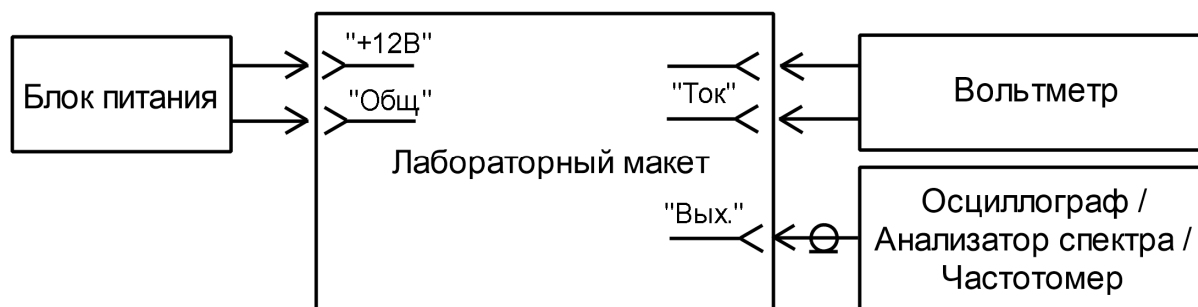


Рис. 5.4. Схема соединений лабораторного стенда

Пределы регулировки выходного напряжения блока питания должны составлять 10...14 В, максимальный ток – 1 А.

Лицевая панель лабораторного макета (рис. 5.5) содержит его упрощенную принципиальную схему, органы управления и гнезда для подключения средств измерения и блока питания.

Принципиальная схема лабораторного макета приведена на рис. 5.6.

Автогенератор выполнен на биполярном транзисторе *VT1* (КТ3117А). Если кварцевый резонатор включен между базой и коллектором транзистора (ручка тумблера «Кварц» установлена в положение «К-Б»), то схема АГ представляет собой емкостную трехточку. Емкостный характер сопротивления в цепь база-эмиттер вносит конденсатор *C2*. Для выполнения условия баланса

фаз коллекторный контур с помощью конденсаторов, устанавливаемых в разъемы $X1-X2$ («Емкость»), настраивают на частоту $\omega_{\text{конт}} < \omega_{\text{кв}}$ где он обеспечивает емкостную реакцию. Эти конденсаторы позволяют осуществить перестройку контура в широком интервале частот.

При включении кварцевого резонатора между базой и эмиттером транзистора (ручка тумблера «Кварц» установлена в положение «Б-Э») так же используется индуктивное сопротивление кварца. Емкость между базой и коллектором обеспечивает конденсатор $C1$. В этом случае схема АГ представляет собой индуктивную трехточку. Для обеспечения индуктивного сопротивления коллекторный контур перестраивают в сторону более высоких частот $\omega_{\text{конт}} > \omega_{\text{кв}}$.

В коллекторной цепи исследуемых схем АГ применено последовательное электропитание. Отпирающее положительное напряжение смещения подано на базу транзистора посредством резистивного делителя $R1-R2$. Цепь автосмещения $R3-C3$ обеспечивает мягкий режим самовозбуждения АГ и его работу в недонапряженном режиме. За счет отрицательной обратной связи резистор $R3$ при колебаниях температуры стабилизирует режим работы АГ.

Для измерения постоянной составляющей коллекторного тока $I_{\text{к0}}$ в схему включен резистор $R4$. Снимаемое с него напряжение пропорционально протекающему через него току.

С целью обеспечения наибольшего эквивалентного выходного сопротивления АГ, в частности, для устранения реакции АГ на измерительную аппаратуру (иными словами, для согласования высокого выходного сопротивления АГ с малым входным сопротивлением измерительной аппаратуры), между ним и выходом включен эмиттерный повторитель на биполярном транзисторе $VT2$ (КТ3102А).

Выход эмиттерного повторителя соединен с гнездом «Вых.». К этому гнезду осуществляется подключение осциллографа, анализатора спектра и частотомера.

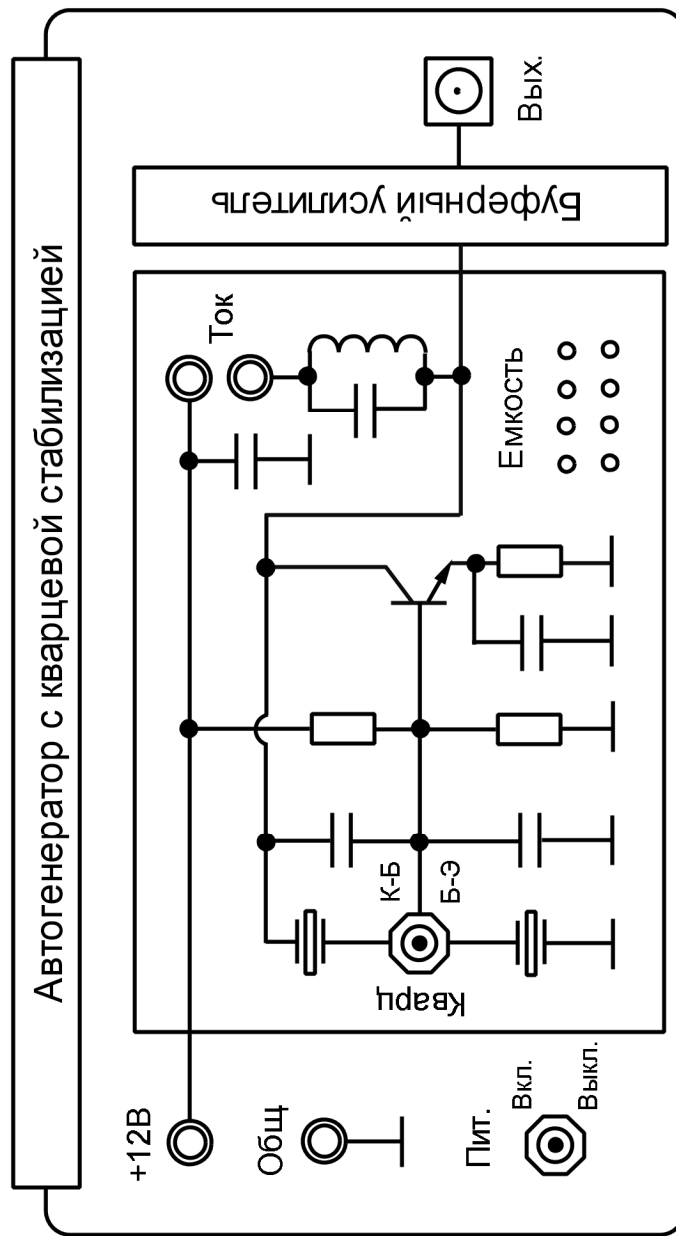


Рис. 5.5. Лицевая панель лабораторного макета

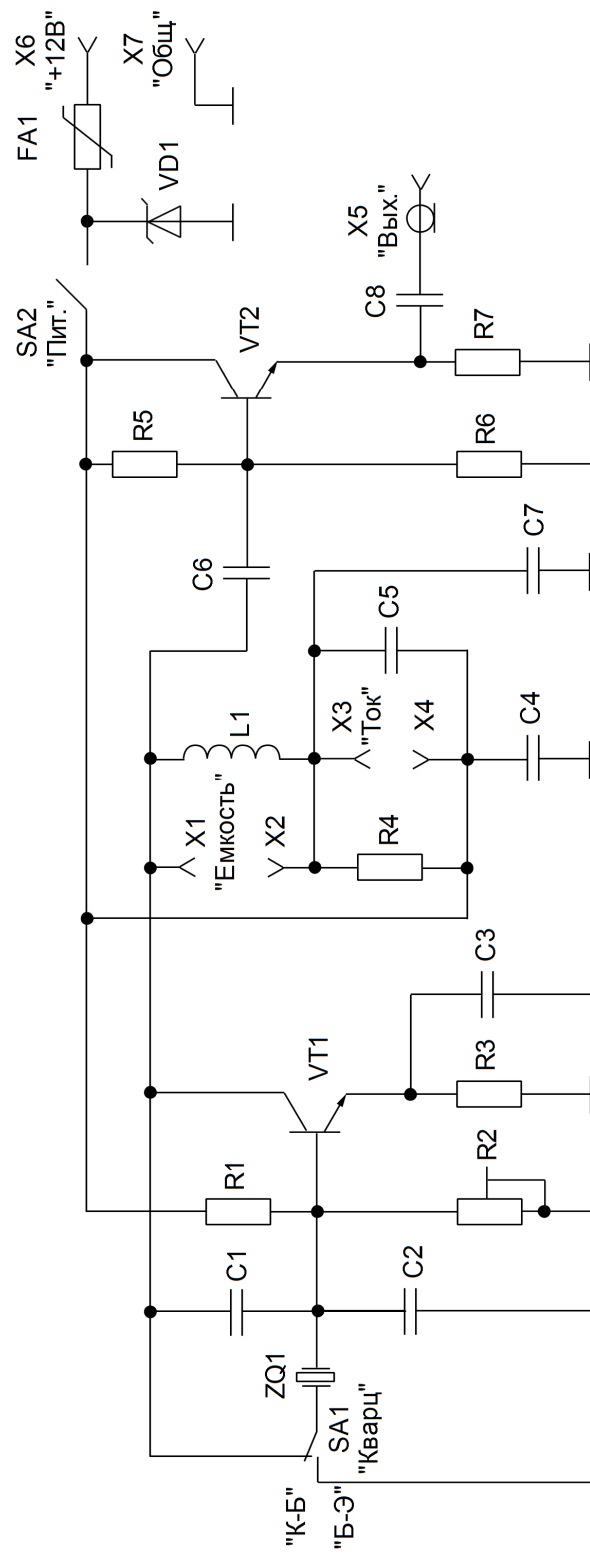


Рис. 5.6. Принципиальная схема лабораторного макета

Для защиты АГ от перенапряжения по цепи электропитания предусмотрен супрессор *VD1*. Как только напряжение электропитания превысит допустимое значение, ток через супрессор резко увеличится – и сработает самовосстанавливающийся предохранитель *FAl*, который отключит АГ от блока питания. Также отключение произойдет и в том случае, если ток потребления АГ по какой-то причине станет выше допустимого.

Методика выполнения работы

Изучите теоретические сведения, приведенные в настоящих методических указаниях, по теме лабораторной работы. В случае наличия неясных моментов проконсультируйтесь у преподавателя (лаборанта).

Ознакомьтесь со схемами лабораторного стенда и макета, а также с размещением органов управления макетом. Изучите устройство и размещение органов настройки и регулировки измерительных приборов и блока питания.

ВАЖНО! Перед началом работы в лаборатории изучите правила техники безопасности!

Выполнение работы осуществляется в соответствии со следующей методикой.

1. Не включая электропитания, подключить к лабораторному макету блок питания (гнезда «+12В»-«Общ.»). Установить на выходе блока питания напряжение 12 В. Подключить к гнезду «Вых.» осциллограф.

2. Перевести тумблер «Кварц» в положение «К-Б» (кварцевый резонатор включен между базой и коллектором транзистора). Установить в разъем «Емкость» конденсаторы суммарной емкостью 2,4 нФ.

3. Включить электропитание макета с помощью тумблера «Пит.» (положение «Вкл.»).

4. Зафиксировать с помощью осциллографа, подключенного к гнезду «Вых.», форму напряжения на выходе АГ. Измерить частоту автоколебаний с помощью частотомера, подключенного к гнезду «Вых.».

5. Исследовать зависимость амплитуды выходного напряжения $U_{\text{твых}}$ АГ и постоянной составляющей коллекторного тока $I_{\text{к0}}$ от емкости коллекторного контура $C_{\text{конт}}$. Емкость контура изменять от бóльшего значения к меньшему вплоть до срыва автоколебаний путем установки конденсаторов в разъем «Емкость». Результаты измерений занести в табл. 5.1.

Табл. 5.1. Результаты измерений

Параметры	Емкость коллекторного контура, $C_{\text{конт}}$, нФ							
Амплитуда выходного напряжения, $U_{\text{твых}}$, В								
Постоянная составляющая коллекторного тока, $I_{\text{к0}}$, мА								

6. Измерить нестабильность частоты автоколебаний АГ при изменении напряжения электропитания от 10 до 14 В при двух значениях емкости контура, соответствующих настройке контура вблизи срыва автоколебаний и при сильной расстройке контура.

Построить график зависимости нестабильности частоты от напряжения электропитания. Убедиться в более высокой стабильности автоколебаний при сильной расстройке коллекторного контура.

7. При настройке контура вблизи срыва автоколебаний измерить уровень мощности фазового шума на выходе АГ в полосе 1 Гц на отстройках 20 Гц и 160 Гц с помощью анализатора спектра, подключенного к гнезду «Вых.».

8. Отключить электропитание макета с помощью тумблера «Пит.» (положение «Выкл.»).

9. Перевести тумблер «Кварц» в положение «Б-Э» (кварцевый резонатор включен между базой и эмиттером транзистора). Установить в разъем «Емкость» конденсаторы суммарной емкостью 1,4 нФ.

10. Включить электропитание макета с помощью тумблера «Пит.» (положение «Вкл.») и выполнить п. 4.

11. Исследовать зависимость амплитуды выходного напряжения $U_{вых}$ АГ и постоянной составляющей коллекторного тока $I_{к0}$ от емкости коллекторного контура $C_{конт}$. Емкость контура изменять от меньшего значения к большему до срыва автоколебаний путем установки конденсаторов в разъем «Емкость». Результаты измерений так же занести в табл. 5.1.

12. Измерить нестабильность частоты автоколебаний АГ при изменении напряжения электропитания от 10 до 14 В при двух значениях емкости контура, соответствующих настройке контура вблизи срыва автоколебаний и при сильной расстройке контура. Построить график зависимости нестабильности частоты от напряжения электропитания. Выполнить п. 7.

13. Отключить электропитание макета с помощью тумблера «Пит.» (положение «Выкл.»).

14. Отключить блок питания и измерительные приборы от сети переменного тока 230 В 50 Гц и привести рабочее место в порядок. Доложить преподавателю (лаборанту) об окончании работы.

15. Сделать выводы и подготовить отчет по проделанной работе.

Требования к оформлению и содержанию отчета

Отчет о работе составляется в бумажном и электронном виде на стандартных листах формата А4 в соответствии с ГОСТ 7.32-2017.

Отчет должен включать:

1. Идентификатор группы, фамилию студента, дату выполнения работы на титульном листе.

2. Название, цель и краткое содержание работы.

3. Структурную схему лабораторного стенда и перечень применяемого оборудования.

4. Принципиальную схему лабораторного макета.

5. Временные диаграммы расчетных и экспериментальных данных.

6. Анализ результатов, оценку, обобщения и выводы по работе.

7. Список использованной литературы, приложения (при необходимости).
8. Ответы на вопросы и решения задач для подготовки к защите.
9. Место для подписи преподавателя (лаборанта).

Отчет по лабораторной работе должен быть составлен аккуратно и последовательно. Схемы должны быть выполнены в соответствии с требованиями ЕСКД с применением специального программного обеспечения.

Контрольные вопросы и задания

1. Приведите условия самовозбуждения автоколебаний и принцип действия автогенератора. Назовите факторы, определяющие частоту генерируемых автоколебаний.

2. Нарисуйте простейшую принципиальную схему трехточечного автогенератора на биполярном транзисторе. Укажите назначение каждого элемента схемы.

3. Поясните устройство и принцип функционирования кварцевого резонатора.

4. Чем обусловлена высокая стабильность частоты автоколебаний в кварцевых автогенераторах?

5. Приведите схемы включения кварцевого резонатора в автогенератор. Поясните принцип их функционирования.

6. Как влияет изменение емкости колебательного контура на стабильность частоты кварцевого автогенератора? Почему коллекторный контур кварцевого автогенератора целесообразно расстраивать на десятки процентов по отношению к собственной частоте кварцевого резонатора?

7. Как влияет изменение напряжения электропитания на стабильность частоты кварцевого автогенератора? При какой схеме включения кварцевого резонатора это влияние меньше?

8. Поясните, каковы главные недостатки кварцевого автогенератора по сравнению с автогенератором на основе LC-контура.

9. Объясните назначение элементов принципиальной схемы лабораторного макета.

10. Поясните ход временных диаграмм токов и напряжений в исследуемом лабораторном макете.

11. Разработайте в программе компьютерного моделирования Micro-Cap или Matlab Simulink модель исследуемой схемы кварцевого автогенератора с параметрами, как в схеме лабораторного макета. Получите временные диаграммы, характеризующие работу модели, и сравните их с полученными в результате проведения лабораторных исследований.