

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

Кафедра телевидения и управления (ТУ)

А. Д. Бордус

УСТРОЙСТВА ГЕНЕРИРОВАНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ

**Методические указания
по выполнению лабораторных работ для студентов
направлений подготовки 11.03.01 «Радиотехника»
и 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии
и системы связи» (уровень бакалавриата)**

Томск 2018

Корректор: А. Н. Миронова

Бордус А. Д.

Устройства генерирования и формирования сигналов : методические указания по выполнению лабораторных работ для студентов направления подготовки 11.03.01 «Радиотехника» и 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (уровень бакалавриата) / А. Д. Бордус. – Томск : ФДО, ТУСУР, 2018. – 38 с.

Методические указания содержат описание методики проведения лабораторных работ и рекомендации по их выполнению. Для студентов направлений подготовки «Радиотехника» и «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

В пособие внесены изменения в 2020 г.

© Бордус А. Д., 2018
© Оформление.
ФДО, ТУСУР, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Основные сокращения и условные обозначения	4
1 Введение	5
2 Теоретическая часть	7
3 Лабораторная установка радиопередатчика	10
4 Требования к оформлению отчета	12
5 Лабораторная работа № 1 «Исследование нагрузочных и резонансных характеристик транзисторного каскада»	15
6 Лабораторная работа № 2 «Исследование автогенератора с кварцевым резонатором»	26
Литература	37
Приложение А Образец титульного листа отчета по лабораторной работе	38

ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

АЦ – антенная цепь

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика

ВАХ – вольт-амперная характеристика

ВЦ – входная цепь

СВ – диапазон длинных волн

УРЧ – усилитель радиочастоты

УМ – угловая модуляция

УРЧ – усилитель радиочастоты

ЭА – эквивалент антенны

d_k – конструктивное затухание

$d_э$ – эквивалентное затухание

L_k – индуктивность контура

Δf – абсолютная расстройка

f – текущая частота

f_0 – резонансная частота

C_k – емкость контура

r_k – сопротивление потерь в контуре

Q_k – конструктивная добротность контура

$Q_э$ – эквивалентная добротность контура

ρ_k – волновое сопротивление контура

$g_э$ – эквивалентная проводимость

m – коэффициент включения в контур

n – коэффициент трансформации

ρ – волновое сопротивление контура

ξ – обобщенная расстройка контура

1 ВВЕДЕНИЕ

В рамках дисциплины «Устройства генерирования и формирования сигналов» изучается процесс разработки современных радиопередающих устройств обработки радиосигналов. Изучение дисциплины нацелено на формирование у студента навыков применения современные теоретических и экспериментальных методов исследования с целью создания новых перспективных средств электросвязи, организации и проведения их испытания с целью оценки соответствия требованиям технических регламентов, международных и национальных стандартов и иных нормативных документов.

Дисциплина «Устройства генерирования и формирования сигналов» (Б1.В.ОД.5) относится к вариативной части обязательных дисциплин блока 1 по направлениям подготовки 11.03.01 «Радиотехника» и 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (уровень бакалавриата).

Целью проведения лабораторных работ по дисциплине является закрепление теоретических знаний и получение практических навыков исследования основных узлов и элементов радиопередающего устройства, а также привитие навыков в оформлении практических результатов экспериментального исследования.

При организации и проведении лабораторных работ решаются следующие задачи: освоение основ моделирования работы отдельных каскадов радиопередающего устройства, исследования стабильности частоты кварцевого автогенератора от параметров элементов схемы, получение практических навыков исследования основных элементов радиопередающего устройства.

Методические указания включают две лабораторные работы, где моделируется работа отдельных каскадов реального радиопередающего устройства и исследуется стабильность частоты кварцевого генератора.

В результате выполнения лабораторных работ обучающийся должен:

- закрепить знания по основам построения структурных схем устройств формирования и генерации сигналов;
- освоить основные принципы и методы расчета, проектирования и анализа качества радиопередающих устройств;
- развить навыки моделирования и конструирования отдельных узлов радиопередающего устройства.

Выполнение лабораторных работ базируется на основе знаний в области физико-математической подготовки и знания основ теории электрических цепей, радиотехнических цепей и сигналов, схемотехники аналоговых электронных устройств, радиоавтоматики.

Лабораторные работы выполняются на персональном компьютере с применением программы Electronics Workbench 5.12. ПО распространяется свободно, доступно для скачивания на официальном сайте: <http://electronics-workbench.updatestar.com/ru>. Возможно применение и других программ, например симуляторов для моделирования электронных схем Multisim 7, Multisim 14, Qucs.

Лабораторные работы выполняются в соответствии с порядком, описанным в методических указаниях.

Выбор варианта лабораторной работы осуществляется по общим правилам с использованием следующей формулы:

$$V = (N \times K) \text{ div } 100,$$

где V – искомый номер варианта,

N – общее количество вариантов,

div – целочисленное деление,

при $V = 0$ выбирается максимальный вариант,

K – код варианта.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Принцип работы транзисторного каскада с внешним возбуждением

Типовая схема усилителя мощности на транзисторе приведена на рисунке 2.1. Коэффициент включения контура:

$$p = L_2 / L_K < 1.$$

Сопротивление нагрузки для транзистора:

$$R'_{oe} = p^2 \cdot R_{oe},$$

где $R_{oe} = \rho^2 / r_C$ – эквивалентное сопротивление контура, r_C – собственное сопротивление контура.

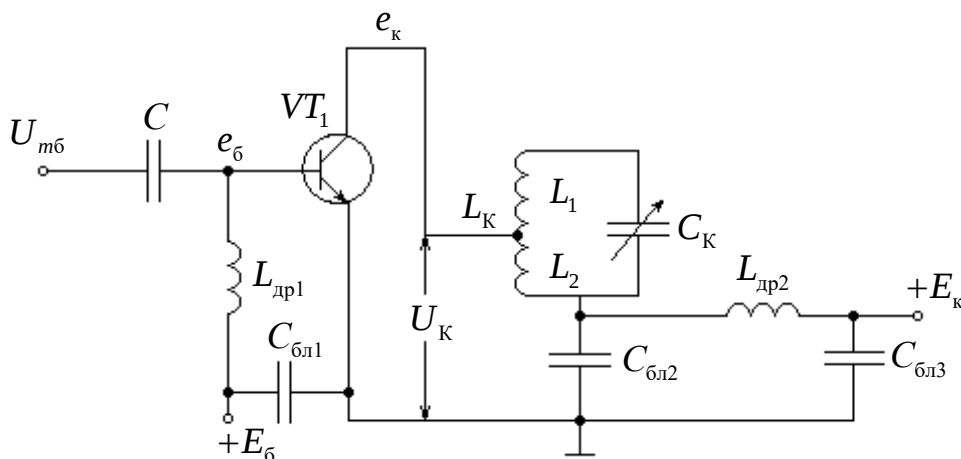


Рис. 2.1 – Схема усилителя мощности на транзисторе

В импульсе базового тока $i_б$ также появляется выброс обратной полярности, обусловленной инерционностью рассасывания заряда в базе.

В зависимости от соотношения токов базы и коллектора различают недонапряженный, критический и перенапряженный режимы.

Рассмотрим работу схемы, приведенной на рисунке 2.1.

Ток эмиттера $i_э = i_б + i_к$. При подаче на переход «база – эмиттер» напряжения возбуждения мгновенное напряжение:

$$e_б = E_б + U_{мб} \cos \omega t,$$

где $E_{\bar{6}}$ – напряжение смещения,

$U_{m\bar{6}}$ – амплитуда напряжения возбуждения.

Под действием этого напряжения $e_{\bar{6}}$ в цепи «коллектор – база» появится ток $i_{\bar{k}}$ в виде косинусоидальных импульсов, представляемых рядом Фурье.

$$i_{\bar{k}} = I_{KO} + I_{K1} \cos \omega t + I_{K2} \cos 2\omega t + \dots + I_{Kn} \cos n\omega t,$$

где I_{KO} – постоянная составляющая тока коллектора,

$I_{K1}, I_{K2}, \dots, I_{Kn}$ – соответственно первая, вторая и n -я гармоники коллекторного тока.

На нагрузке коллекторной цепи появится колебательное напряжение:

$$U_K = U_{mk} \cos \omega t = I_{K1} R_{oe} \cos \omega t,$$

где U_{mk} – амплитуда напряжения.

Мгновенное напряжение $e_{\bar{k}}$ на переходе «коллектор – эмиттер»:

$$e_{\bar{k}} = E_K - U_{mk} \cos \omega t.$$

При работе на низких частотах, когда отсутствуют фазовые сдвиги между $U_{m\bar{6}}$ и током $i_{\bar{k}}$, уравнение тока коллектора имеет вид:

$$i_{\bar{k}} = S \left[(U_{m\bar{6}} - D_{кэ} U_{mk}) \cos \omega t + E_{\bar{6}} \right],$$

где S – статическая крутизна транзистора,

$D_{кэ}$ – проницаемость перехода «коллектор – эмиттер».

С увеличением рабочей частоты $f_{\text{раб}} > 0,5 f_{\beta}$ появляется фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ между напряжением возбуждения $U_{m\bar{6}}$ и напряжением на переходе «эмиттер – база». Фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ вызывается дрейфом носителей в базе $\varphi_{\text{д}}$ и падением напряжения на внутреннем сопротивлении базы $\varphi_{\text{эб}}$, которое на высоких частотах приобретает комплексный характер. В результате фазовый сдвиг:

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{д}} + \varphi_{\text{эб}},$$

где $\varphi_{эб}$ – фазовый угол между $U_{мб}$ и током эмиттера $i_э$,

$\varphi_d = \omega t_d$ – фазовый угол дрейфа. Здесь t_d – время дрейфа.

С учетом рассмотренного сдвига фаз ток коллектора на высокой частоте

$$i_{квч} = S[U_{мб} \cos \omega t - D_{кэ} U_{мк} \cos(\omega t - \Delta\varphi) + E_б].$$

С увеличением частоты $f_{раб}$ высота импульса тока коллектора уменьшается. В токе коллектора $i_к$ в перенапряженном режиме появляется отрицательный выброс, вызванный тем, что на эмиттер возвращается часть неосновных носителей.

Угол отсечки $\theta_{вч}$ тока коллектора зависит от частоты

$$\theta_{вч} = \theta_{нч} + \Delta\varphi,$$

где $\theta_{нч}$ – угол отсечки тока коллектора на низкой частоте.

Так как ток коллектора $i_к$ запаздывает по фазе относительно $U_{мб}$ на угол φ , то на высокой частоте $\theta_{вч} > \theta_{нч}$ на величину $\Delta\varphi$.

Вследствие малой величины $R'_{oe} = p^2 \cdot R_{oe}$ при настройке и регулировке мощных транзисторных усилителей необходимо учитывать симметрию фазовой и резонансной характеристик низкодобротного колебательного контура.

3 ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА РАДИОПЕРЕДАТЧИКА

Рассмотрим состав лабораторной установки, реально работающего радиопередатчика. На рисунке 3.1 приведена его принципиальная схема. В состав радиопередатчика входят кварцевый автогенератор, предварительный усилитель и усилитель мощности (выходной каскад), подвергаемый модуляции – коллекторной или базовой.

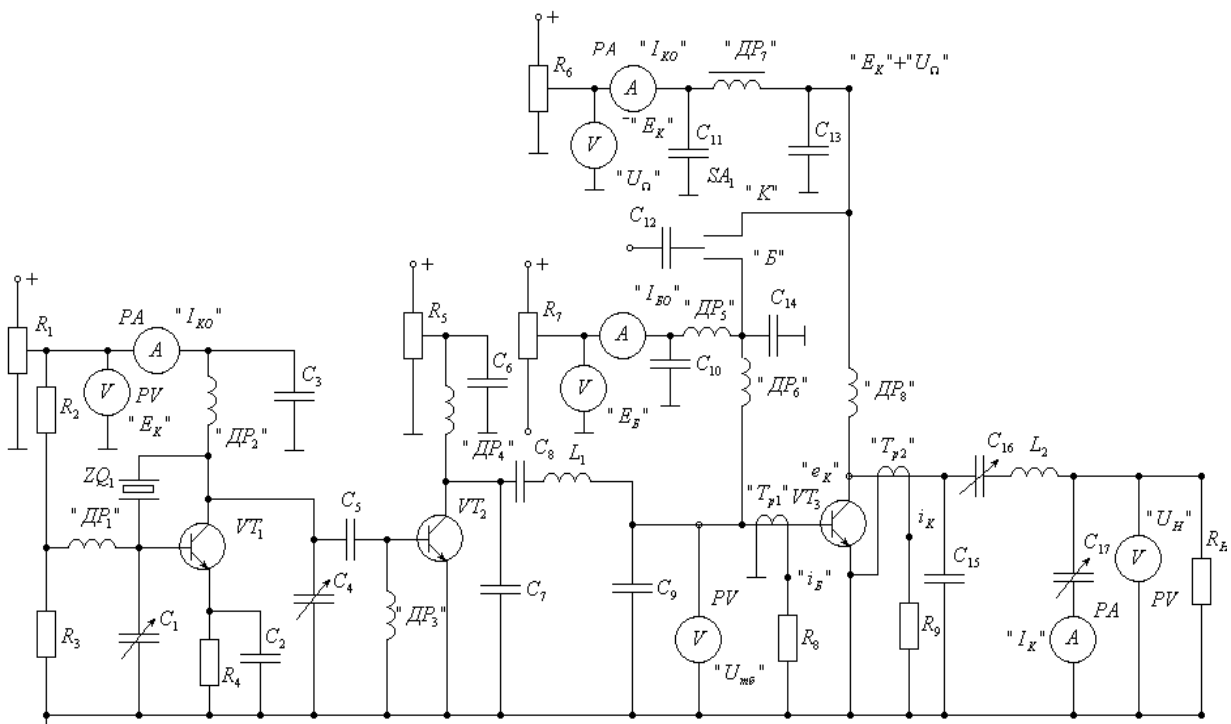


Рис. 3.1 – Принципиальная схема лабораторного радиопередатчика

Кварцевый автогенератор, собранный по схеме емкостной трехточки, выполнен с применением транзистора $VT1$ типа ГТ311. Частота колебаний кварцевого автогенератора равна 1,5 МГц. Питание автогенератора E_K регулируется потенциометром $R1$.

Предварительный усилитель, собранный на транзисторе $VT2$ типа КТ608Б, повышает мощность сигнала, приходящего с кварцевого автогенератора, в десятки раз. Питание усилителя E_K регулируется потенциометром $R5$.

На входе мощного выходного каскада, выполненного на транзисторе $VT3$ типа КТ805А, частота сигнала остается неизменной и равна 1,5 МГц. Амплитуда напряжения $U_{mб}$ регулируется потенциометром $R5$. Нагрузкой для выходного транзистора $VT3$ служит резистор $R_H = 75 \text{ Ом}$ (эквивалент антенны), подключенный к выходному каскаду с помощью согласующего П-контура. Выходная мощность передатчика в несущем режиме (режиме молчания) составляет порядка 2 Вт. Питание E_K выходного транзистора регулируется потенциометром $R6$. Смещение $E_б$ устанавливается потенциометром $R7$.

В выходном каскаде, выполненном на транзисторе $VT3$, может быть осуществлена базовая или коллекторная модуляция. Выбор типа модуляции осуществляется переключателем $SA1$. Напряжение модуляции подается на гнездо U_Ω от внешнего генератора звуковой частоты ГЗ-109.

Для контроля токов базы $i_б$ и коллектора i_k выходного транзистора $VT3$ служат соответственно гнезда $i_б$ и i_k , подключенные к токовым трансформаторам ТР1 и ТР2.

Напряжение на нагрузке R_H можно контролировать на выходе гнезда U_H .

4 ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Результатом выполнения лабораторной работы является отчет, оформленный в соответствии с требованиями, представленными в методических указаниях. Варианты исходного задания рассчитываются согласно формуле, представленной во введении.

Требования к содержанию отчета по лабораторным работам

Структура отчета:

- титульный лист;
- цель работы и задачи исследования;
- основная часть;
- выводы (заключение);
- ответы на контрольные вопросы;
- список использованной литературы;
- приложения.

Отчет по лабораторной работе должен содержать наименование темы лабораторной работы, цель и задачу исследования. В отчете приводится исследуемая электрическая принципиальная схема, ее краткое описание, эквивалентная схема. В основной части излагаются результаты теоретического расчета и результаты экспериментальных исследований. В завершение исследований представляются выводы по каждому пункту исследования. В выводах необходимо представить количественную и качественную оценку исследуемых зависимостей или/и схем с обязательным пояснением причин изменения их поведения и характера зависимостей или исследуемого параметра.

Требования к оформлению отчета о лабораторной работе

При оформлении отчетов по текстовым работам (контрольным и лабораторным) следует руководствоваться требованиями образовательного

стандарта вуза: ОС ТУСУР 01–2013. Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления. – Режим доступа:

<https://regulations.tusur.ru/documents/70>

Правила оформления результатов исследований

Все результаты теоретического расчета и экспериментального исследования рекомендуется приводить в виде таблиц и/или графиков (рисунков). Графические зависимости по возможности приводятся на одном рисунке. Такое представление дает возможность провести сравнительный анализ зависимостей при различных вариантах схмотехнической реализации или при различных изменениях входных параметров исследуемого объекта.

Требования к написанию выводов

Выполнение лабораторной работы завершается написанием выводов по каждому пункту задания на экспериментальное исследование. Формирование каждого вывода производится в три этапа: описательный, констатирующий и этап пояснения закономерностей и/или причин их изменения или отклонения от теории.

На первом этапе необходимо проиллюстрировать результаты экспериментального исследования в графическом или табличном виде и описать поведение зависимостей при различных режимах исследования.

На втором, констатирующем этапе необходимо представить качественную и количественную оценку исследуемой зависимости и описать характер изменения ее поведения.

На третьем этапе по каждому пункту исследования производится анализ причин поведения теоретических и экспериментальных зависимостей

с последующей оценкой результатов расчетной и экспериментальной зависимостей, также необходимо пояснить причину их расхождения.

В завершение необходимо представить общие закономерности поведения измеряемых зависимостей и их связи с параметрами исследуемой схемы или системы.

5 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 «ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЗОЧНЫХ И РЕЗОНАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРНОГО КАСКАДА»

Цель работы: исследование зависимости режима усилителя мощности от параметров радиоэлементов и настройки нагрузочного контура.

Краткие сведения из теории

Для выполнения лабораторной работы необходимо предварительно изучить цель работы, основные сведения из теории и принципы работы исследуемой электрической принципиальной схемы.

Нагрузочные характеристики представляют собой зависимости токов, напряжений и энергетических показателей режима генератора от входного сопротивления настроенного нагрузочного контура, включенного в цепь коллектора, при неизменных значениях питающих напряжений E_K , $U_{тб}$ и E_b . Известно, что от сопротивления нагрузочного контура R_{oe} зависит при прочих равных условиях напряженность режима генератора. При $R_{oe} = R_{oe\text{ кр}}$ наступает критический режим (**КР**), при $R_{oe} > R_{oe\text{ кр}}$ режим перенапряженный (**ПР**), при $R_{oe} < R_{oe\text{ кр}}$ – недонапряженный (**НР**).

На рисунке 5.1 приведены важнейшие из нагрузочных характеристик мощного усилителя. Из графиков видно, что в **НР** I_{K1} почти не зависит от R_{oe} , а в **ПР** с ростом R_{oe} происходит спад I_{K1} . Это поясняется диаграммой на рисунке 5.1.

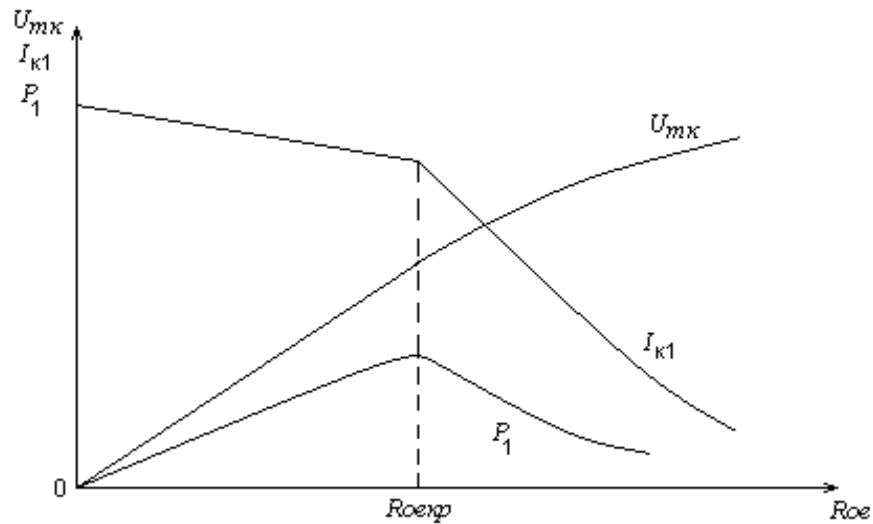


Рис. 5.1 – Нагрузочные характеристики генератора

Из рисунка 5.2 видно, что при переходе в **ПР** импульс тока коллектора уменьшается по высоте и в импульсе появляется провал, а это уменьшает амплитуду первой гармоники коллекторного тока I_{K1} .

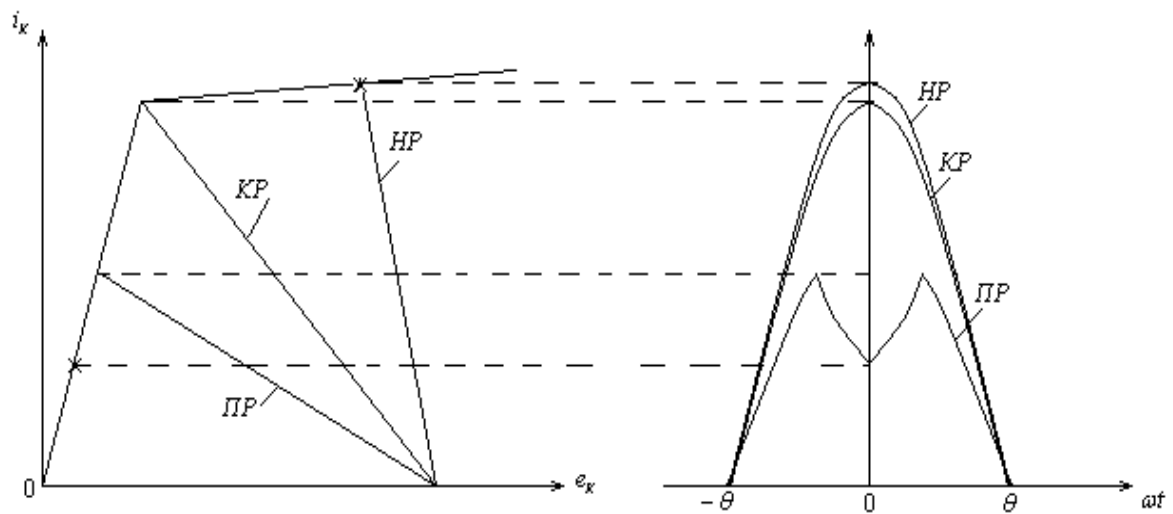


Рис. 5.2 – Влияние нагрузки R_{oe} на форму импульсов тока коллектора

Амплитуда переменного напряжения на коллекторе в **ПР** остается почти без изменений, т. к. рост R_{oe} компенсируется уменьшением I_{K1} :

$$U_{mk} = I_{K1} \cdot R_{oe} \approx \text{const.}$$

Ход графика $P_1 = f(R_{oe})$ можно пояснить следующим образом. В **НР** полезная мощность возрастает с ростом нагрузки, т. к.

$$U_{mk} = 0,5 \cdot I_{K1} \cdot U_{mk} = 0,5 \cdot I_{K1}^2 \cdot R_{oe}, \text{ где } I_{K1} \approx \text{const},$$

А в области **ПР** падает, т. к.

$$P_1 = 0,5 \cdot I_{K1} \cdot U_{mk} = 0,5 \cdot U_{mk}^2 / R_{oe}, \text{ где } U_{mk} \approx \text{const}.$$

Максимальное значение P_1 достигается в критическом или слегка перенапряженном режиме.

Таким образом, для настройки усилителя в режим максимальной мощности необходимо вначале настроить коллекторный контур в резонанс, а затем подобрать оптимальную связь контура с нагрузкой, при которой входное сопротивление контура становится $R_{oe \text{ кр}}$, т. е. наступает критический режим. Отметим, что при изменении питающих напряжений указанную настройку следует повторить.

Подбор оптимальной связи с нагрузкой другими словами называют согласованием транзистора с нагрузкой. В РПУ в качестве устройства согласования используется, как правило, колебательный контур, причем изменение связи с нагрузкой выполняется по-разному – трансформаторная связь, автотрансформаторная, емкостная и т. д.

В исследуемом каскаде использована цепь согласования транзистора с нагрузкой с улучшенной фильтрацией гармоник тока коллектора (рис. 5.3). С помощью конденсатора $C16$ обеспечивается настройка контура в резонанс, а изменением емкости конденсатора $C17$ подбирается оптимальная связь с нагрузкой R_H . Вносимое в контур сопротивление определяется по формуле:

$$r_{BH} = X_{CB}^2 / R_H,$$

где $X_{CB} = 1/\omega \cdot C17$ – сопротивление связи.

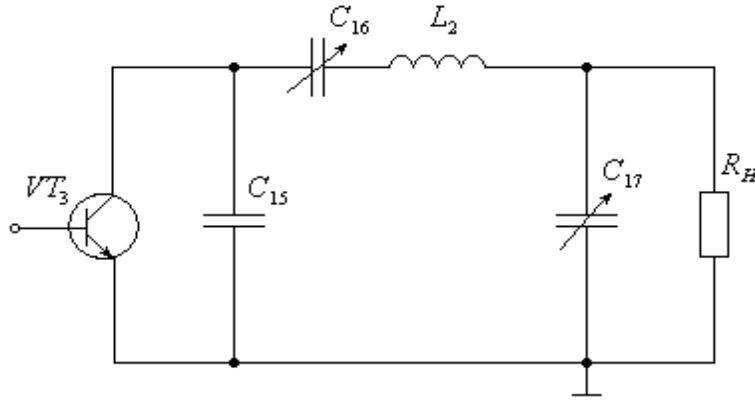


Рис. 5.3 – Цепь согласования транзистора с нагрузкой

Входное сопротивление контура, в свою очередь, равно:

$$R_{oe} = X_{15}^2 / (r_o + r_{вн}),$$

где $X_{15} = 1 / \omega \cdot C_{15}$, а r_o – сопротивление собственных потерь контура.

Таким образом, при увеличении C_{17} происходит уменьшение $r_{вн}$ и увеличение R_{oe} , т. е. увеличивается напряженность режима. При настройке каскада необходимо добиться согласования, т. е. установить такое значение C_{17} , при котором $R_{oe} = R_{oe\text{ кр}}$.

Следует учесть, что при изменении C_{17} происходит некоторая расстройка контура, поэтому нужно подстраивать контур в резонанс с конденсатором C_{16} после каждого изменения связи.

Зависимость режима генератора от настройки коллекторного контура называется настроечной или резонансной характеристикой. Резонансные характеристики могут быть объяснены на основе только что рассмотренных нагрузочных характеристик и, кроме того, с учетом свойств нагрузочного П-контура (рис. 5.3).

Прежде всего, отметим, что указанный контур имеет два резонанса: последовательный контур C_{16}, L_2, C_{17} , резонирующий на частоте f_1 , и параллельный контур $C_{15}, C_{16}, L_2, C_{17}$, резонирующий на частоте f_2 , причем, как видно из схемы, $f_2 > f_1$.

Настройка П-контура производится конденсатором $C16$. При настройке конденсатора $C16$ изменяются обе частоты. Настройка П-контура заключается в том, чтобы совместить частоту входного сигнала f_c с резонансной частоты П-контура f_2 . При выполнении равенства $f_2 = f_c$, т. е. при настройке параллельного контура $C15, C16, L2, C17$ на частоту сигнала, контур имеет чисто активное и максимальное входное сопротивление R_{oe} . Напряженность режима при этом максимальна, амплитуда переменной составляющей U_{mk} напряжения на коллекторе также максимальна, импульс коллекторного I_{kt} симметричен по форме, минимален по высоте и, если режим перенапряженный, в импульсе коллекторного тока I_{kt} имеется провал. Таким образом, момент параллельного резонанса $f_2 = f_c$ индицируется по минимуму I_{ko} , максимуму U_{mk} , симметричной форме импульса I_{kt} .

Если транзистор находится в перенапряженном режиме, то максимум полезной мощности P_1 в нагрузке может быть при этом и не достигнут. Действительно, расстраивая параллельный контур $C15, C16, L2, C17$ относительно частоты сигнала f_c , мы выводим каскад из перенапряженного режима в критический.

При этом увеличивается амплитуда импульса тока коллектора I_{kt} . Чтобы настроить контур, надо обеспечить выполнение равенства $f_1 = f_c$. Для этого надо настроить на частоту сигнала f_c последовательный контур $C16, L2, C17$. Тогда для протекания переменного тока через нагрузку R_H создаются условия. При этом полезная мощность в нагрузке P_1 достигает максимума, несмотря на то, что входное сопротивление контура будет не чисто активное. Оно будет меньше по модулю, чем при параллельном резонансе.

Программное обеспечение, приборы и элементы

1. Пакет моделирующих программ **Elektronics Workbench 5.12**, работающий в среде операционной системы **Windows XP** и более поздних версий **Windows**.

2. Транзистор $VT1$. Путь выбора: группа компонентов транзисторов – **NPN Transistor**.

3. Резисторы $R1$ – $R4$. Путь выбора: группа базовых компонентов – **Resistor**.

4. Источники питания $E_{п.}$. Путь выбора: группа компонентов источников – **Battery**.

5. Заземление. Путь выбора: группа компонентов источников – **Ground**.

6. Конденсаторы $C1$ – $C17$. Путь выбора: группа базовых компонентов – **Capacitor**.

7. Вольтметры $V1$ – $V4$. Путь выбора: группа компонентов индикаторные приборы – **Voltmeter**.

8. Амперметры $A1$ – $A4$. Путь выбора: группа компонентов индикаторные приборы – **Ammeter**.

9. Задающий генератор. Путь выбора: группа компонентов инструменты – **Function Generator**.

10. Осциллограф. Путь выбора: группа компонентов инструменты – **Oscilloscope**.

Порядок построения схемы

1. Изучить подлежащие исследованиям схемы усилителей мощности высокой частоты на биполярных транзисторах.

2. Ознакомиться с типами и моделями элементов, применяемых в схемах усилительных каскадов, уяснить пути их выбора и задания параметров.

3. На рабочем поле программы **Elektronics Workbench 5.12** собрать схему усилителя мощности и провести его исследование по нагрузочным и резонансным характеристикам, указанным в варианте.

4. Значения резисторов, конденсаторов и индуктивностей установить в соответствии со схемой на рисунке 5.4.

5. Модель транзистора TN2219A выбрать из библиотеки national 2 во вкладке Models свойств транзистора (NPN Transistor Properties).

6. Установить на задающем генераторе синусоидальный сигнал с частотой $f = 27$ МГц и амплитудой $U = 2$ В.

7. Установить источник питания E_{π} с напряжением $U = 27$ В.

8. Установить вольтметры V1, V2 по работе с постоянным напряжением – режим DC. Задать внутреннее сопротивление вольтметра $R = 1$ МОм.

9. Установить вольтметры V3, V4 по работе с переменным напряжением – режим AC. Задать внутреннее сопротивление вольтметра $R = 1$ МОм.

10. Установить амперметры A1, A2 по работе с постоянным током – режим DC. Задать внутреннее сопротивление амперметра $R = 1$ МОм.

11. Установить амперметр A3 по работе с переменным током – режим AC. Задать внутреннее сопротивление амперметра $R = 1$ МОм.

12. Вольтметр V1 измеряет напряжение питания E_{κ} коллекторной цепи.

13. Вольтметр V2 измеряет напряжение смещения E_{δ} на базе транзистора VT1.

14. Вольтметр V3 измеряет напряжение возбуждения $U_{\text{тб}}$ на базе транзистора VT1.

15. Вольтметр V4 измеряет напряжение U_n на нагрузке R_n .

16. Амперметр A1 измеряет постоянный ток базы $I_{\delta 0}$.

17. Амперметр A2 измеряет постоянный ток коллектора $I_{\kappa 0}$.

18. Амперметр A3 измеряет контурный ток I_{κ} .

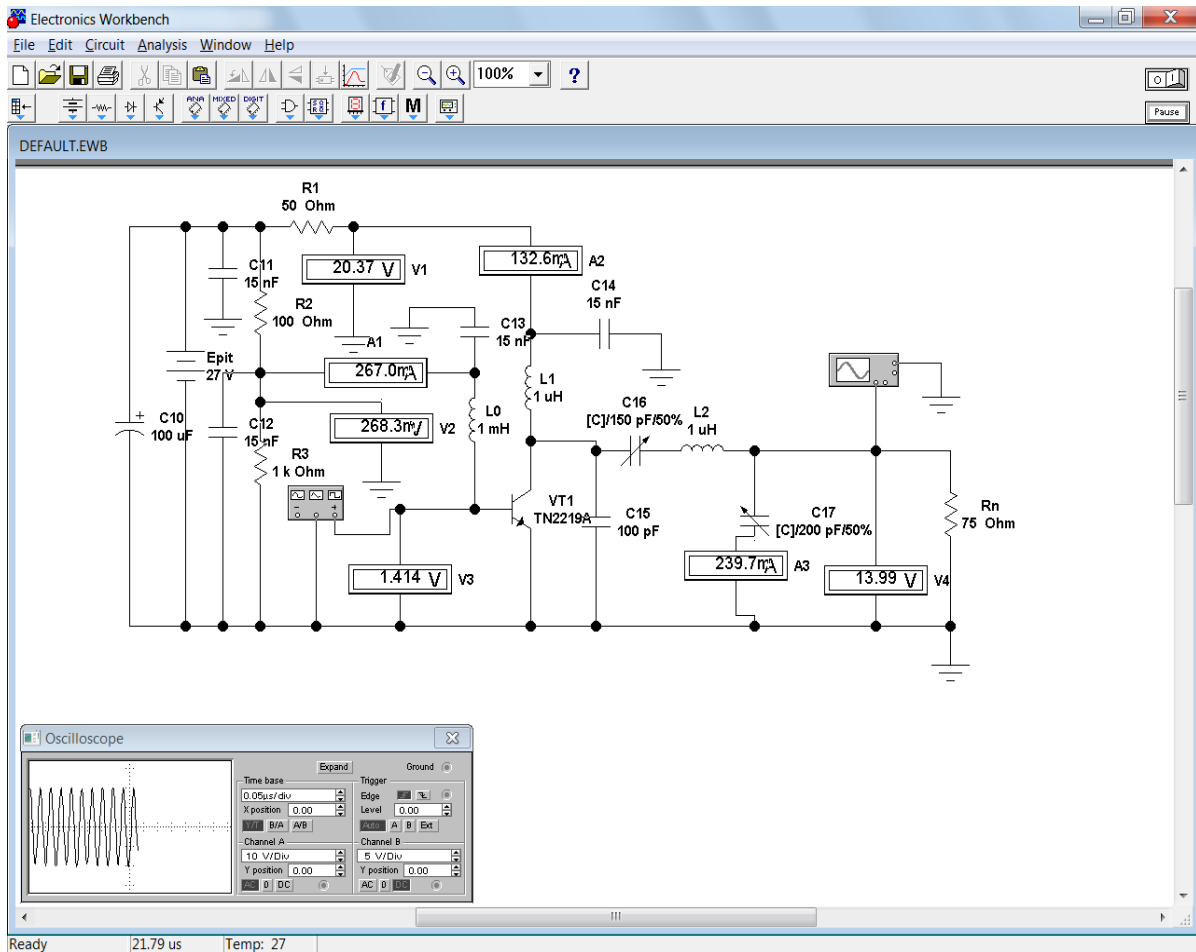


Рис. 5.4 – Компьютерный вариант схемы усилителя мощности высокой частоты

Порядок выполнения работы

1. Снять резонансные (настроечные) характеристики I_{KO} , I_{60} , U_H и $I_K = f(C16)$, где I_K – контурный ток. Значения емкости $C16$ менять через каждые 10 пФ, а число отсчетов в каждом из направлений должно быть не менее 5. Число столбцов в таблице 1 должно быть равным общему числу отсчетов.

Рассчитать величины:

$$P_1 = 0,5 \cdot U_H^2 / R_H, (R_H = 75 \text{ Ом}),$$

$$P_O = E_K \cdot I_{KO} - \text{подводимая мощность},$$

$$P_K = P_O - P_1 - \text{рассеиваемая на коллекторе мощность},$$

При каждом новом значении $C17$ подстраивать параллельный контур в резонанс с помощью конденсатора $C16$ на максимум U_H , т. е. обеспечить равенство $f_c = f_1$ (последовательный резонанс). Данные эксперимента и расчета свести в таблицу 5.2.

По полученным данным построить графики.

В отчете представить:

- компьютерный вариант схемы и краткое содержание устройства усилителя мощности и режимы его работы;
- таблицы и графики наблюдений;
- выводы по работе с объяснениями хода кривых.

Контрольные вопросы

1. Что значит согласовать каскад с нагрузкой?
2. Какими способами можно изменить нагрузку в коллекторной цепи транзистора?
3. Какие функции выполняет коллекторный контур усилителя?
4. Каковы преимущества критического режима работы усилителя?
5. Каковы признаки критического режима работы усилителя?
6. В какой режим перейдет каскад, если
 - а) отключить R_H ;
 - б) закоротить R_H ?
7. Почему не совпадают экстремумы графиков $I_{KO} = f(C16)$ и $U_H = f(C16)$?
8. Можно ли по форме импульса коллекторного тока судить о напряженности режима и правильности настройки нагрузочного контура?
9. Объясните ход настроечных характеристик.
10. Объясните ход нагрузочных характеристик.
11. Как правильно настроить коллекторный контур на частоту сигнала?

Варианты заданий к лабораторной работе № 1

В **примечании** таблицы 5.3 отмечены элементы схемы, требующие соответствующего подбора.

Таблица 5.3 – Варианты заданий к лабораторной работе № 1 «Исследование нагрузочных и резонансных характеристик транзисторного каскада»

№ варианта	Частота сигнала, МГц	Сопротивление нагрузки R_n , Ом	Тип транзистора $n-p-n$	Напряжение питания, V	Примечание
1	5	50	PN2484	27	L0, L1, L2, C15, C16, C17-Var.
2	6	60	PN3565	27	L0, L1, L2, C15, C16, C17-Var.
3	7	70	PN3641	27	L0, L1, L2, C15, C16, C17-Var.
4	8	80	PN3642	24	L0, L1, L2, C15, C16, C17-Var.
5	9	90	PN3643	24	L0, L1, L2, C15, C16, C17-Var.
6	10	100	PN3646	24	L0, L1, L2, C15, C16, C17-Var.
7	11	110	PN3694	20	L0, L1, L2, C15, C16, C17-Var.
8	12	120	PN4141	20	L0, L1, L2, C15, C16, C17-Var.
9	13	130	PN4274	20	L0, L1, L2, C15, C16, C17-Var.
10	14	140	PN4275	27	L0, L1, L2, C15, C16, C17-Var.
11	15	150	PN5128	27	L0, L1, L2, C15, C16, C17-Var.
12	16	160	PN5129	27	L0, L1, L2, C15, C16, C17-Var.
13	17	170	PN5133	24	L0, L1, L2, C15, C16, C17-Var.
14	18	180	PN5134	24	L0, L1, L2, C15, C16, C17-Var.
15	19	190	PN5135	24	L0, L1, L2, C15, C16, C17-Var.
16	20	200	PN5136	20	L0, L1, L2, C15, C16, C17-Var.
17	21	210	PN5137	20	L0, L1, L2, C15, C16, C17-Var.
18	22	220	PN5179	20	L0, L1, L2, C15, C16, C17-Var.
19	23	230	PN930	24	L0, L1, L2, C15, C16, C17-Var.
20	24	240	TN2219A	24	L0, L1, L2, C15, C16, C17-Var.

6 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 «ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОГЕНЕРАТОРА С КВАРЦЕВЫМ РЕЗОНАТОРОМ»

Цель работы: изучить транзисторный автогенератор с кварцем. Исследовать влияние параметров радиоэлементов на нестабильность частоты и на амплитуду выходного напряжения автогенератора.

Краткие сведения из теории

Стабильность частоты автогенератора существенно зависит от добротности и стабильности его колебательной системы.

В автогенераторах с LC -контурами (их добротность $Q \leq 100$) стабильность частоты не превышает 10^{-3} – 10^{-4} . Добротность кварцевых резонаторов во много раз превышает добротность прочих колебательных систем и составляет $Q_{\text{КВ}} = 10^4$ – 10^6 . Современный уровень развития пьезокварцевой техники, использование кварцевых резонаторов в качестве основных элементов стабилизации частоты позволяют получить кварцевые генераторы с нестабильностью до 10^{-11} за сутки.

Эквивалентная схема кварцевого резонатора в области основной резонансной частоты и зависимость реактивного сопротивления от частоты показаны на рисунке 6.1. Между частотами f_1 и f_0 (рис. 6.1, б) индуктивное сопротивление резонатора $\omega L_{\text{КВ}}$ изменяется от нуля до большой величины, в то время как частота меняется в узких пределах (менее 0,4%).

При этом частоты последовательного и параллельного резонанса соответственно равны:

$$f_1 = 1 / \left(2\pi \sqrt{L_{\text{КВ}} C_{\text{КВ}}} \right); \quad f_0 = 1 / \left(2\pi \sqrt{L_{\text{КВ}} \frac{C_{\text{КВ}} \cdot C_0}{C_{\text{КВ}} + C_0}} \right),$$

где C_0 – емкость кварцедержателя;

$L_{\text{КВ}}$, $C_{\text{КВ}}$, $r_{\text{КВ}}$ – динамические эквивалентные индуктивность, емкость и активное сопротивление кварца.

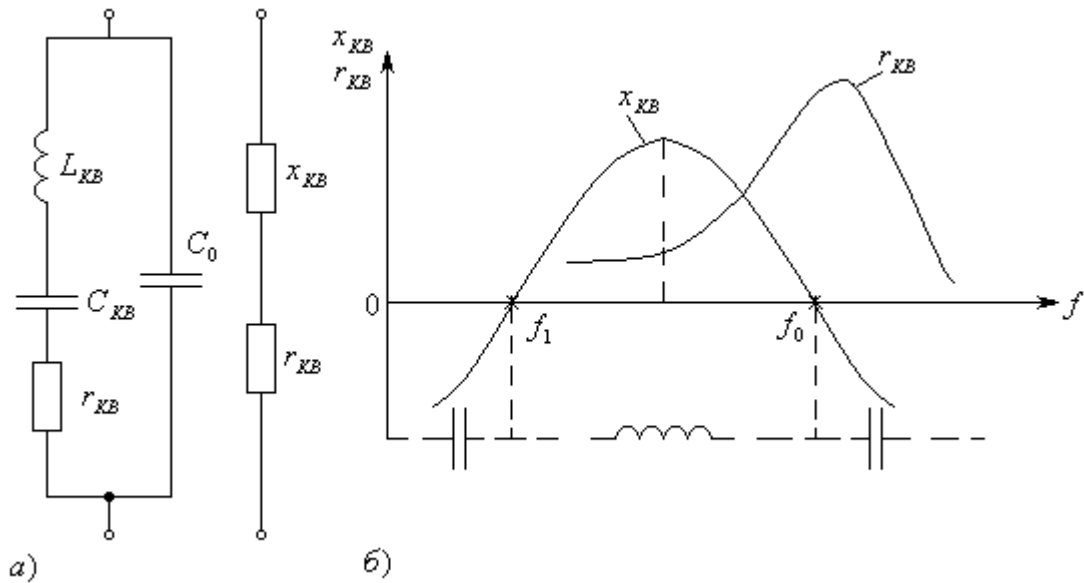


Рис. 6.1 – Эквивалентная схема и зависимости реактивного и активного сопротивлений кварцевого резонатора от частоты

Кварцевый резонатор характеризуется добротностью:

$$Q_{KB} = \rho / r_{KB} = \sqrt{L_{KB} C_{KB}} / r_{KB} = \omega_1 L_{KB} / r_{KB}.$$

В зависимости от частоты кварцевого резонатора величина r_{KB} может составлять от долей ом (при $f \geq 100$ МГц) до десятков килоом (при $f \leq 10$ кГц).

Условия работы кварцевого резонатора характеризуются мощностью, рассеиваемой на кварце P_{KB} . При меньшем напряжении возбуждения достигается большая стабильность частоты. Эту мощность можно вычислить по формуле:

$$P_{KB} \leq U_{KB}^2 / r_{KB} \cdot (1 + \xi_{KB})^2,$$

где U_{KB} – напряжение на кварцевом резонаторе,

$$\xi_{KB} = 2 \cdot (f - f_1) \cdot Q_{KB} / f_1 - \text{обобщенная расстройка частоты.}$$

В случае высоких требований к стабильности частоты $P_{KB} \leq 20$ мВт.

Существует большое разнообразие АГ с кварцевой стабилизацией. В зависимости от функции кварцевого резонатора и характера его полного

сопротивления, схемы кварцевых АГ разделяют по трем группам: осцилляторные, фильтровые и с затягиванием частоты.

В осцилляторных схемах кварц имеет индуктивную проводимость, и эти схемы получили наибольшее распространение. При фильтровых методах кварц играет роль узкополосного фильтра, включаемого последовательно с коллекторной цепью транзистора. В схеме с затягиванием частоты кварцевый резонатор входит в колебательную систему автогенератора как вторичный контур. Эти схемы применяются реже.

К группе осцилляторных схем относится и автогенератор, исследуемый в данном макете. Автогенератор собран по схеме емкостной трехточки на транзисторе VT1 типа IT311Б (рис. 6.2).

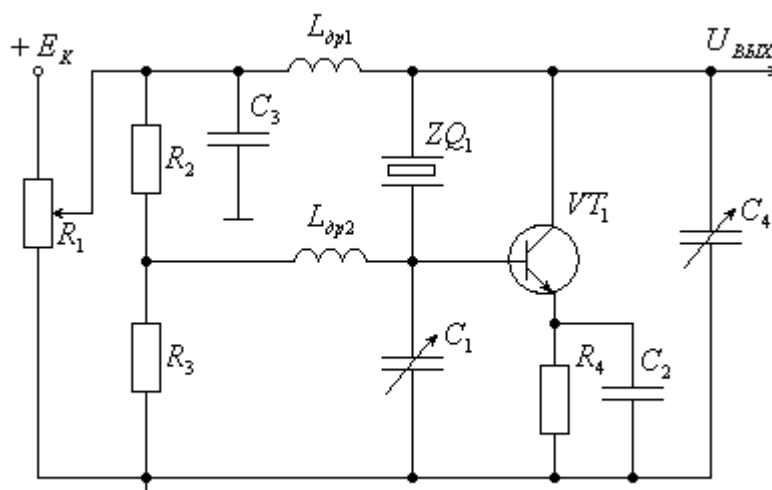


Рис. 6.2 – Схема кварцевого автогенератора (емкостная трехточка)

Кварцевый резонатор, включенный между коллектором и базой транзистора VT1, выполняет роль индуктивности в трехточке, а роль емкостей выполняют переменные конденсаторы C1 и C4. Кварцевый резонатор возбуждается на частоте $f_1 = 1,5 \text{ МГц}$.

Потенциометр R1 служит для регулирования напряжения питания E_K , подаваемого на автогенератор. Резисторы R2, R3, R4 обеспечивают внешнее и автоматическое смещение транзистора. Эквивалентное сопротивление

делителя $R_{\text{ДЕЛ}} = R_2 \cdot R_3 / (R_2 + R_3)$ выбирают больше сопротивления колебательного контура автогенератора, образованного кварцем, $C1$ и $C4$, что, практически, не шунтирует его. Сопротивления дросселей $L_{\text{др1}}$ и $L_{\text{др2}}$ по высокой частоте также много выше сопротивления указанного колебательного контура автогенератора. Конденсатор $C3$ служит для блокировки источника питания от токов высокой частоты. Конденсатор $C2$ служит для устранения отрицательной обратной связи за счет резистора $R4$ (рис. 6.2).

Программное обеспечение, приборы и элементы

1. Пакет моделирующих программ **Elektronics Workbench 5.12**, работающих в среде операционной системы **Windows XP** и более поздних версий **Windows**.

2. Транзистор $VT1$. Путь выбора: группа компонентов транзисторов – **NPN Transistor**.

3. Резисторы $R1$ – $R4$. Путь выбора: группа базовых компонентов – **Resistor**.

4. Источники питания $E_{\text{п}}$. Путь выбора: группа компонентов источников – **Battery**.

5. Заземление. Путь выбора: группа компонентов источников – **Ground**.

6. Конденсаторы $C1$ – $C5$. Путь выбора: группа базовых компонентов – **Capacitor**.

7. Амперметр $A1$. Путь выбора: группа компонентов индикаторные приборы – **Ammeter**.

8. Кварцевый резонатор. Путь выбора: группа базовых компонентов – **Crystal Properties**.

9. Осциллограф. Путь выбора: группа компонентов инструменты; **Oscilloscope**.

10. Источник напряжения переменного тока. Путь выбора: группа базовых компонентов – **Sources**.

Порядок построения схемы

1. Изучить подлежащие исследованиям схемы кварцевых автогенераторов на биполярных транзисторах.

2. Ознакомиться с типами и моделями элементов, применяемых в схемах кварцевых автогенераторов, уяснить пути их выбора и задания параметров.

3. На рабочем поле программы **Elektronics Workbench 5.12** собрать схему кварцевого автогенератора и провести исследования зависимости его частоты от конденсатора $C4$ и индуктивности $L1$ (рис. 6.3).

4. Значения резисторов, конденсаторов и индуктивностей установить в соответствии со схемой на рисунке 6.3.

5. Модель транзистора Q2N956 выбрать из библиотеки motorol 1 во вкладке Models свойств транзистора (NPN Transistor Properties).

6. Установить источник питания $E_{\text{п}}$ с напряжением $U = 9 \text{ В}$.

7. Установить амперметр **A1** по работе с постоянным током – режим **DC**. Задать внутреннее сопротивление амперметра $R = 1 \text{ мОм}$.

8. Амперметр **A1** измеряет постоянный ток коллектора $I_{\text{ко}}$.

9. Тип кварцевого резонатора **HC-49/U 1.5 MHz** выбрать из группы базовых компонентов **Crystal Properties**.

10. Установить источник напряжения переменного тока **Source** с выходным напряжением $U = 5 \text{ В}$ и опорной частотой $f = 1500 \text{ kHz}$.

11. По полученным данным построить графики.

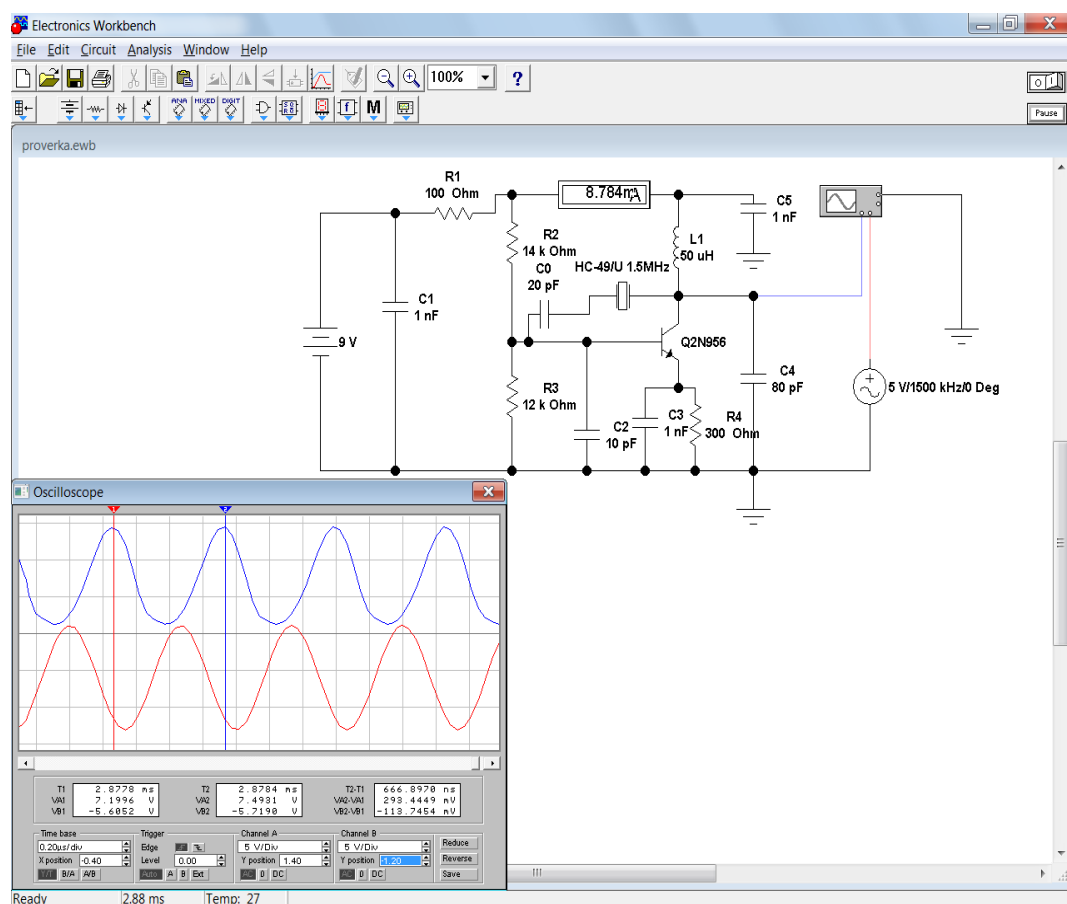


Рис. 6.3 – Компьютерный вариант схемы кварцевого автогенератора

Порядок выполнения работы

Исследование зависимости ухода частоты Δf от изменения емкости C4 и индуктивности L1.

Измерения частоты и амплитуды сигнала на выходе автогенератора следует проводить с помощью осциллографа (рис. 6.3).

Для удобства отсчетов необходимо увеличить экран осциллографа. Для этого надо нажать клавишу Expand на передней панели осциллографа. Для повышения точности измерений в осциллографе предусмотрена внешняя синхронизация, которую можно осуществить с помощью сигнала с выхода автогенератора. Удобно контролировать изменение частоты автогенератора с помощью опорного сигнала, подаваемого на второй вход осциллографа от отдельного генератора сигналов (рис. 6.3). Чтобы лучше различать эпюры двух сигналов, необходимо выбрать разные цвета проводников, подводимых к двум каналам А и В осциллографа. Тогда эпюры

сигналов будут окрашены в выбранные цвета. С помощью двух визиров удобно устанавливать период опорного (контрольного) сигнала от источника напряжения переменного тока Source (рис. 6.3). Разность в длительности периодов исследуемого (синие эюры) и опорного (красные эюры) сигналов служит информацией для расчета искомого изменения частоты Δf кГц и занесения их в таблицы 6.1 и 6.2.

Достаточно удобным методом для определения разности частот $\Delta f = f_1 - f_2$ является вариант схемы, приведенный на рисунке 6.4, где, в частном случае, для примера, показана разность частот $\Delta f = 1$ кГц между двумя стандартными генераторами сигналов. Длительность огибающей высокочастотного сигнала, с учетом цены одной клетки шкалы осциллографа, и является искомой величиной.

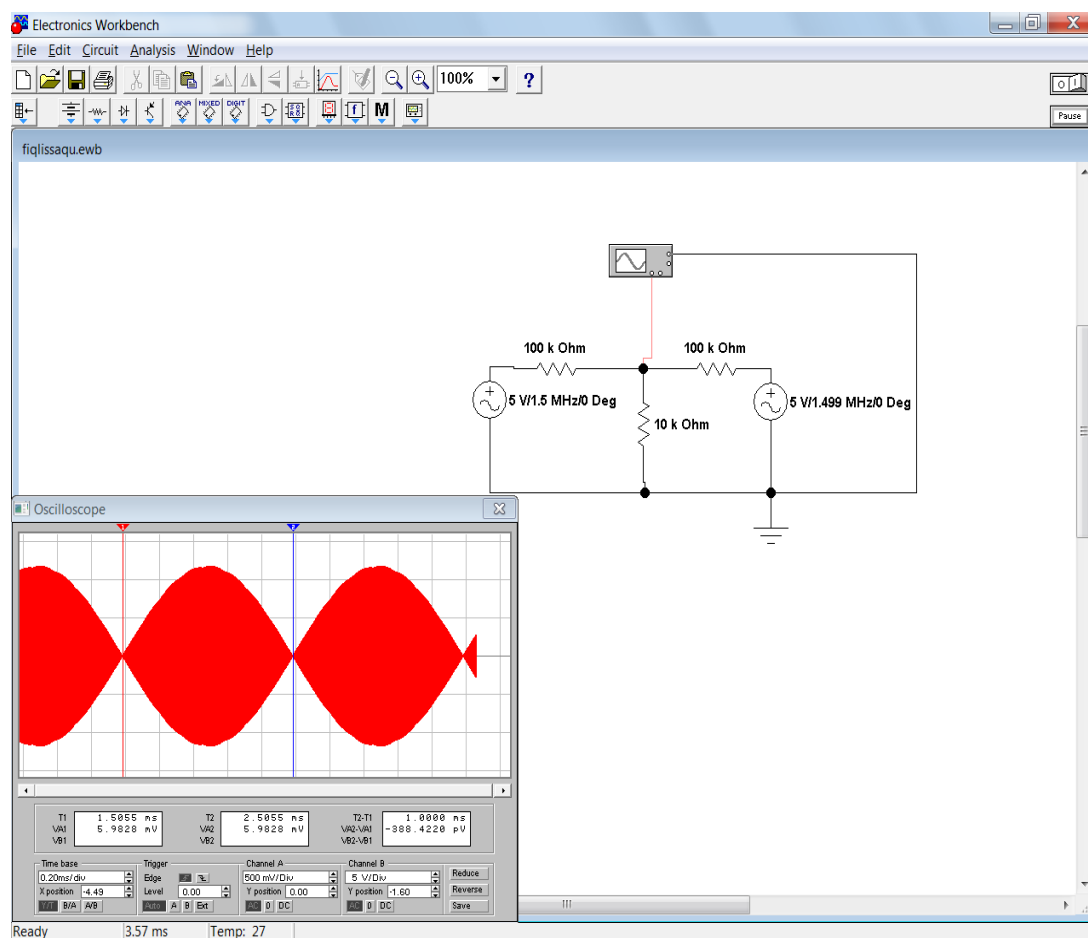


Рис. 6.4 – Вариант схемы для измерения ухода частоты кварцевого автогенератора

Для проведения лабораторных исследований источник напряжения переменного тока Source (рис. 6.4), надо заменить кварцевым автогенератором, то есть его выходным сигналом. Пересчитывая длительность (период) низкочастотной огибающей в частоту, получим искомые значения разностной частоты Δf . Заносим их в таблицы 6.1 и 6.2. По полученным данным строим графики.

1. Снять зависимость частоты автогенератора от конденсатора $C4$. Результаты занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Зависимость частоты автогенератора от конденсатора

Значение емкости $C4$, pF	f , мГц	Δf , кГц	Примечание
80	1.5		Уменьшение, а потом увеличение емкости $C4$ необходимо начинать с оптимального значения $C4 = 80$ pF
70			
60			
50			
40			
30			
80	1,5		
90			
100			
110			
120			
130			

Уход частоты автогенератора равен

$$\Delta f = f_1 - f_2,$$

где f_2 – частота, соответствующая значению емкости $C4 = 80$ pF (рис. 6.3).

В данном случае $f_2 = 1,5$ мГц.

f_1 – текущее значение частоты при изменении емкости $C4$.

Максимальный относительный уход частоты $\delta_{\max} = \Delta f_{\max} / f_2$.

По полученным данным построить графики.

2. Снять зависимость частоты, а также значения тока коллектора I_{K0} от величины индуктивности $L1$. Результаты занести в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 – Зависимость частоты и значения тока коллектора от величины индуктивности

Значение индуктивности $L1$, мН	f , мГц	I_{K0} , мА	Δf , кГц	Примечание
50 49 48 47 46 45 ----- 50 51 52 53 54 55	1,5 1,5			Уменьшение, а потом увеличение индуктивности $L1$ необходимо начинать с оптимального значения $L1 = 50$ мН

Уход частоты автогенератора равен

$$\Delta f = f_1 - f_2,$$

где f_2 – частота, соответствующая значению индуктивности $L1 = 50$ мН (рис. 6.3). В данном случае $f_2 = 1,5$ мГц.

f_1 – текущее значение частоты при изменении индуктивности $L1$.

Максимальный относительный уход частоты $\delta_{\max} = \Delta f_{\max} / f_2$.

По полученным данным построить графики.

В отчете представить:

- компьютерный вариант схемы кварцевого автогенератора и краткое описание режима его работы;
- таблицы и графики наблюдений;
- выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какие физические свойства кварца позволяют использовать его для создания высокостабильной колебательной системы?

2. Что представляет собой эквивалентная схема кварцевого резонатора и что отображают отдельные элементы этой схемы?

3. Какова зависимость реактивного сопротивления кварца $X_{\text{кв}}$ от частоты?

4. Чем определяется стабилизирующее действие кварцевого резонатора на частоту автогенератора?

5. К какой эквивалентной трехточке сводится схема исследуемого автогенератора?

6. Какое достоинство имеет схема кварцевого автогенератора?

Варианты заданий к лабораторной работе № 2

В **примечании** таблицы 6.3 отмечены элементы схемы, требующие соответствующего подбора.

Таблица 6.3 – Варианты заданий по лабораторной работе «Исследование автогенератора с кварцевым резонатором»

№ варианта	Тип кварцевого резонатора	Тип транзистора $n-p-n$	Тип трехточки автогенератора	Напряжение питания, V	Примечание
1	НС-49/U1.5	Q2N930	Емкостная	5	L1, C0, C2, C3, C4, C5-Var.
2	НС-49/U3	Q2N720	Емкостная	7	L1, C0, C2, C3, C4, C5-Var.
3	НС-49/U5	Q2N956	Емкостная	9	L1, C0, C2, C3, C4, C5-Var.
4	НС-49/U7	Q2N718A	Емкостная	12	L1, C0, C2, C3, C4, C5-Var.
5	НС-49/U11	Q2N697	Емкостная	15	L1, C0, C2, C3, C4, C5-Var.
6	НС-49/U15	Q2N6517	Емкостная	12	L1, C0, C2, C3, C4, C5-Var.
7	НС-49/U11	Q2N2222A	Емкостная	9	L1, C0, C2, C3, C4, C5-Var.
8	НС-49/U7	Q2N2270	Емкостная	7	L1, C0, C2, C3, C4, C5-Var.
9	НС-49/U5	Q2N2369A	Емкостная	5	L1, C0, C2, C3, C4, C5-Var.

Окончание табл. 6.3

№ вариан-та	Тип кварце-вого резона-тора	Тип транзи-стора <i>n-p-n</i>	Тип трехточки автогене-ратора	Напряже-ние пита-ния, V	Примечание
10	НС-49/U3	Q2N2484	Емкостная	7	<i>L1, C0, C2, C3, C4, C5-Var.</i>
11	НС-49/U1.5	Q2N2895	Емкостная	9	<i>L1, C0, C2, C3, C4, C5-Var.</i>
12	НС-49/U3	Q2N2712	Емкостная	12	<i>L1, C0, C2, C3, C4, C5-Var.</i>
13	НС-49/U5	Q2N3019	Емкостная	15	<i>L1, C0, C2, C3, C4, C5-Var.</i>
14	НС-49/U7	Q2N3020	Емкостная	12	<i>L1, C0, C2, C3, C4, C5-Var.</i>
15	НС-49/U11	Q2N3053A	Емкостная	9	<i>L1, C0, C2, C3, C4, C5-Var.</i>
16	НС-49/U15	Q2N3500	Емкостная	7	<i>L1, C0, C2, C3, C4, C5-Var.</i>
17	НС-49/U11	Q2N3501	Емкостная	5	<i>L1, C0, C2, C3, C4, C5-Var.</i>
18	НС-49/U7	Q2N3700	Емкостная	7	<i>L1, C0, C2, C3, C4, C5-Var.</i>
19	НС-49/U5	Q2N3903	Емкостная	9	<i>L1, C0, C2, C3, C4, C5-Var.</i>
20	НС-49/U3	Q2N3904	Емкостная	12	<i>L1, C0, C2, C3, C4, C5-Var.</i>

ЛИТЕРАТУРА

1. Радиопередающие устройства / под ред. В. В. Шахгильдяна. – М. : Радио и связь, 2003. – 560 с.
2. Шахгильдян В. В. Проектирование устройств генерирования и формирования сигналов в системах подвижной радиосвязи : учебник для вузов / В. В. Шахгильдян, В. Л. Карякин. – М. : Солон-пресс, 2011. – 400 с.
3. Бордус А. Д. Устройства генерирования и формирования сигналов : учеб. пособие / А. Д. Бордус. – Томск : ФДО, ТУСУР, 2018. – 261 с.
4. Шостак И. В. Устройства генерирования и формирования радиосигналов : учеб. пособие / И. В. Шостак. – М. : Изд-во МГОИ, 2012. – 461 с.
5. Программный продукт Electronics Workbench 5.12 [Электронный ресурс]. – Режим доступа для скачивания: soft.sibnet.ru/soft/25729-electronic-workbench-5-12/ (дата обращения: 22.02.2017).
6. Электронный симулятор Multisim (MS) [Электронный ресурс]. – Режим доступа для скачивания: <http://ni.com> (дата обращения: 22.02.2017).
7. Программный продукт Qucs [Электронный ресурс]. – Режим доступа для скачивания: <http://qucs.sourceforge.net/download.html> или <https://sourceforge.net/projects/qucs/files/qucs-binary/0.0.19-snapshots/qucs-0.0.19.150523-git-0046130-win32.exe/download> (дата обращения: 22.02.2017).

ПРИЛОЖЕНИЕ А**Образец титульного листа отчета по лабораторной работе**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра телевидения и управления (ТУ)

ОТЧЕТ

по лабораторной работе №
(название лабораторной работы)

по дисциплине «Устройства генерирования и формирования сигналов».

Выполнил: ст. гр. _____

(ФИО)

(дата)

Проверил: _____

(должность, кафедра)

(ФИО)

(оценка, подпись)

(дата)

Томск 2018