

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

А. В. Башкиров, А. В. Турецкий, М. В. Хорошайлова

ОСНОВЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЭС

Практикум

Воронеж 2021

УДК 621.396.6 (075.8)
ББК 32.844я7
Б334

Рецензенты:

*кафедра основ радиотехники и электроники ФКОУ ВО
Воронежского института ФСИИ России
(начальник кафедры канд. техн. наук, доцент Р. Н. Андреев);
д-р физ.-мат. наук, доцент Ю. Э. Корчагин*

Башкиров, А. В.

Основы функционального проектирования РЭС: практикум [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые и граф. данные (5,0 Мб) / А. В. Башкиров, А. В. Турецкий, М. В. Хорошайлова - Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2021. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: ПК 500 и выше; 256 Мб ОЗУ; Windows XP; SVGA с разрешением 1024×768; Adobe Acrobat; CD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-7731-0934-1

В практикуме рассматриваются вопросы, связанные с моделированием различных функциональных узлов, таких как усилители, генераторы, цифровые ключи и др., а также различные методики их расчета в системе автоматизированного проектирования. Изложены принципы построения схем генераторов гармонических колебаний и стабилизаторов постоянного напряжения.

Издание предназначено для студентов, обучающихся по направлению 11.03.03 «Конструирование и технология ЭС», может быть использовано в самостоятельной работе, при подготовке к лабораторным и практическим занятиям, а также в курсовом и дипломном проектировании как справочное пособие по перспективной элементной базе САУ и РЭС.

Ил. 127. Табл. 89. Библиогр.: 24 назв.

**УДК 621.396.6 (075.8)
ББК 32.844я7**

ISBN 978-5-7731-0934-1

© Башкиров А. В., Турецкий А. В.,
Хорошайлова М. В., 2021
© ФГОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», 2021

ВВЕДЕНИЕ

Создание РЭС базируется на принципах автоматизированного конструкторского проектирования, высокой технологичности изделий, предполагает микроминиатюризацию, использование современной элементной базы и перспективных материалов, учитывает высокие эргономические и экологические требования.

Одним из основных этапов при создании РЭС является функциональное проектирование. Целью функционального проектирования РЭС является аппаратная реализация составных частей системы (комплексов, устройств, узлов). При этом выбирают элементную базу, принципиальные схемы и оптимизируют параметры (осуществляют структурный и параметрический синтез схем) с точки зрения обеспечения наилучшего функционирования и эффективного производства.

Практикум содержит 2 части, первая из которых содержит 16 лабораторных работ, а вторая 16 практических работ. Каждая работа посвящена изучению, разработке и моделированию одного из узлов РЭС.

Издание содержит сведения о различных каскадах предварительного усиления, операционных усилителях и устройствах на их основе. Широко также представлены различные генераторы: RC-генераторы, LC-генераторы, к ним относятся генератор Колпитца, генератор Клаппа. Также представлены логические элементы на КМОП транзисторах, преобразователи цифро-аналоговые и аналогово-цифровые.

1. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Лабораторная работа № 1.1

Исследование резисторного каскад предварительного усиления

Цель работы: исследование схем каскадов предварительного усиления, изучение влияния элементов схемы на выходные характеристики.

Задание 1.1.1. Каскад усилителя с общим эмиттером

Для исследования каскада усилителя с общим эмиттером необходимо собрать схему, приведенную на рис. 1.1.1.

Основные элементы схемы:

R_2, R_3 – делитель для подачи смещения на транзистор;

$R_5 - C_4$ – схема термостабилизации;

C_1, C_2, C_3 – разделительные конденсаторы;

R_4 – коллекторная нагрузка;

$C_n(C_5, C_0)$ – емкость нагрузки;

$R_n(R_6, R_7)$ – сопротивление нагрузки.

Основными элементами каскада являются: источник питания (E_K), биполярный транзистор n-p-n типа (V1) и резистор коллекторной цепи R_K (на схеме R4), образующие главную усилительную цепь, в которой за счет протекания управляемого тока базы I_b коллекторного тока $I_K = \beta I_b$, на коллекторе транзистора создается усиленное переменное напряжение $U_{Kэ} = E_K - I_K R_K$, которое, далее, через разделительный конденсатор (на схеме через ключ переключения S1 обозначены как C2 и C2) передается на нагрузочное сопротивление R_n (на схеме на схеме через ключ переключения S2 обозначены как R6 и R7). Резисторы R_2, R_3, R_5 обеспечивают необходимый режим транзистора по постоянному току (режим покоя или рабочую точку транзистора). За счет включения в эмиттерную цепь резистора R_3 (на схеме R5), в схеме возникает отрицательная обратная связь (ООС) по постоянному и переменному току, осуществляет температурную стабилизацию рабочей точки транзистора. Разделительные конденсаторы (C_1, C_2, C_3) разделяют источник сигнала и нагрузки от каскада по постоянному току и связывают их по переменной составляющей между собой.

$r_{\text{вх}}$ – входное сопротивление без учета делителя R_6 в цепи смещения базы
 $r_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{бх}}}{I_{\text{б}}} = r_{\text{б}} + (1 + h_{21\text{э}})r_{\text{э}}$, где $r_{\text{э}} = \frac{26}{I_{\text{э}}}$ ($r_{\text{э}}$ в Омах, при $I_{\text{э}}$ в миллиамперах), для расчета принять $r_{\text{б}} = 100 \text{ Ом}$; $r_{\text{к}} = 1 \text{ МОм}$, $U_{\text{ок}} = 7,5 \text{ В}$; $I_{\text{ок}} = 10 \text{ мА}$; $E_{\text{к}} = 15 \text{ В}$; $U_{\text{вых}} = 2 \text{ В}$.

2. Для снятия частотных характеристик и определения диапазона рабочих частот в настройках генератора импульсов XFG1 указать частоту 1 кГц, выбрать синусоидальные импульсы, переключателем S2 выбрать сопротивление нагрузки 1 кОм, входную амплитуду генератора выбрать $U_{\text{мвх}} = 100 \text{ мВ}$. Заполнить табл. 1.1.2 с различными значениями разделительных конденсаторов C2 и C3, используя переключатель S1, и при подключенном/отключенном конденсаторе C0, имитирующем паразитную емкость, используя переключатель S3. Частоту для табл. 1.1.2 выбирать в зависимости от диапазона рабочих частот (от $f_{\text{н}}$ до $f_{\text{в}}$).

Для определения диапазона рабочих частот, а именно верхней и нижней частоты рабочего диапазона на панели выбрать simulate→analyses→AC analyses. Откроется окно AC analyses. В этом окне открыть вкладку Output для выбора точки моделирования. Для ее определения на схеме два раза щелкнуть клавишей левой кнопки мыши на необходимую линию, и в строке net name и есть имя проводника (в данном случае это точка V(10)).

После добавления точки моделирования в окне AC analyses нажать кнопку simulate. Получаем два графика: верхний соответствует амплитудно-частотной характеристике, нижний – фазово-частотной характеристике. На частотной характеристике значение верхней линии умножаем на 0,707, разводим два курсора по разные стороны. Это и есть значения нижней и верхней частот, на рис. 1.1.2 они выделены прямоугольниками.

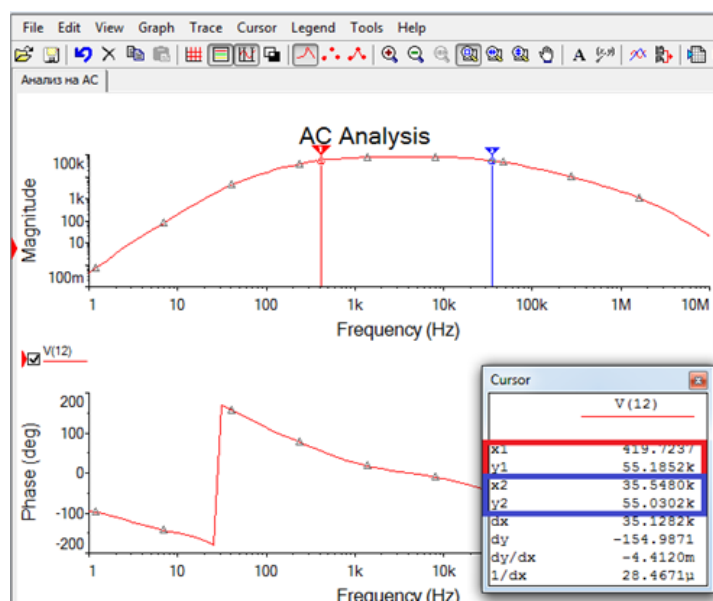


Рис. 1.1.2. Определения верхней и нижней частоты рабочего диапазона по частотной характеристике

Таблица 1.1.2

Измерение зависимостей влияния величины разделительного конденсатора и наличия/отсутствия конденсатора нагрузки на выходное напряжение

f, кГц																
U _{мвх} , В (C2, C0)																
U _{мвх} , В (C3, C0)																
U _{мвх} , В (C2)																
U _{мвх} , В (C3)																

Построить графики зависимостей.

3. Рассчитать входное $R_{вх}$ и выходное $R_{вых}$ сопротивления каскада, коэффициент усиления по току K_I , используя приведенные ниже формулы.

Для измерения входного сопротивления $R_{вх}$ усилительного каскада необходимо измерить напряжение до ($E_{ист}$) и после ($U_{вх}$) добавочного резистора R_1 , включенного в цепь базы:

$$R_{ВХ} = R_{доп} \frac{U_{вх}}{E_{ист} - U_{вх}}, \text{ т. е. } R_{ВХ} \text{ измеряется косвенным путем. Отноше-}$$

ние $\frac{E_{ист} - U_{вх}}{R_{доп}}$ является действующим значением переменной составляющей тока базы.

Выходное сопротивление $R_{вых}$ определяется измерением выходного напряжения $U_{вых1}$ на сопротивлении нагрузки $R_{н1}$ и напряжения $U_{вых2}$ на сопротивлении $R_{н2}$ при измеренной величине $E_{ист}$:

$$R_{вых} = (U_{мвх1} - U_{мвх2}) / (I_{н2} - I_{н1}), \text{ где } I_{н2} = U_{мвх2} / R_{н2}; I_{н1} = U_{мвх1} / R_{н1}.$$

Внутреннее сопротивление источника сигнала равно сопротивлению $R_{доб}(R_1)$.

Коэффициент усиления по току рассчитывается по формуле:

$$K_I = h_{21э} \frac{R_{\sigma}}{R_{\sigma} + r_{ex}} \cdot \frac{R_k}{R_k + R_n}.$$

Задание 1.1.2. Исследование каскада усилителя с общим истоком

Для снятия частотной характеристики каскада с общим истоком и измерения его входного сопротивления собрать схему, приведенную на рис. 1.1.3.

При снятии АЧХ каскада установить амплитуду сигнала на входе $U_{мвх} = 100 \text{ мВ}$.

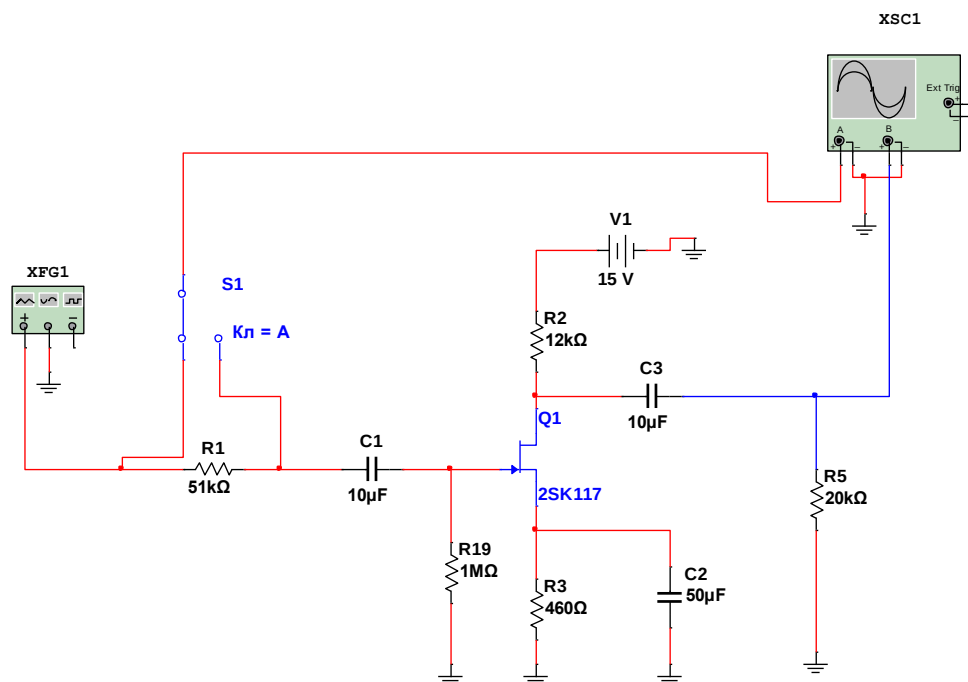


Рис. 1.1.3. Принципиальная схема каскада усилителя с общим истоком

Таблица 1.1.3

Измерение АЧХ каскада с общим истоком

f , кГц	0,1	0,5	1	3	10	15	25	45	65	80	120	200	250	350
$U_{\text{мвхх}}$, В														

По полученному графику сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Дать определение амплитудной характеристике усилителя.
2. Как влияют элементы схемы усилителя на АЧХ?
3. Что называется фазовой характеристикой?
4. Что называют частотными искажениями?

Лабораторная работа № 1.2

Исследование усилителей с обратной связью

Цель работы: исследование схем усилителей с обратной связью, влияние обратной связи на выходные характеристики.

Задание 1.2.1. Исследование двухкаскадного усилителя с ОС

Для исследования двухкаскадного усилителя с обратной связью собрать схему, приведенную на рис. 1.2.1.

Элементы двухкаскадного усилителя

R1 – сопротивление источника сигнала;

C1, C2, C5 - элементы межкаскадной связи, разделительные конденсаторы, передающие на вход каскада переменную составляющую сигнала;

R2 и R3, R6 и R7, - делитель в цепи базы, служит для создания напряжения смещения на базе (напряжение в точке покоя);

R_к (R4, R8) - резисторы в коллекторной цепях, служат для выделения усиленного сигнала и через них подается питание на коллектор;

R_э (R5, R9)- резистор эмиттерной стабилизации, служит для стабилизации рабочего режима транзистора и создает в каскаде местную отрицательную обратную связь по постоянному току;

C_э (C4, C3) – шунтирующие конденсаторы создают путь для переменной составляющей тока транзистора, устраняют ООС по переменному току, которая стабилизирует режим работы транзистора, но уменьшает коэффициент усиления;

R_н(R₁₁, R₁₂) – сопротивление нагрузки;

C_н(C₇) – емкость нагрузки.

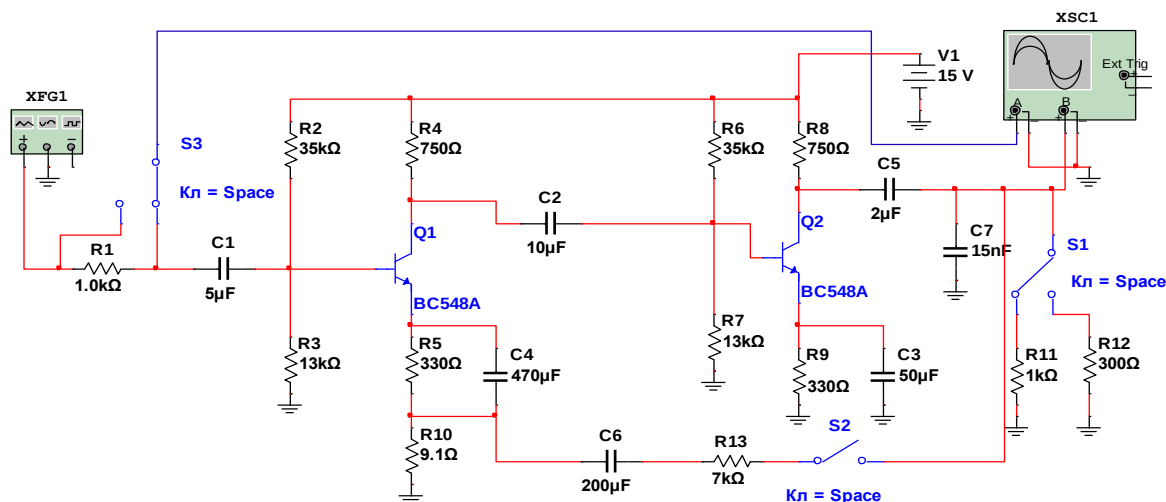


Рис. 1.2.1. Принципиальная схема двухкаскадного усилителя с обратной связью

1. В генераторе импульсов (XFG1) настроить частоту $f = 1\text{кГц}$, выбрать сопротивлении нагрузки 1кОм , снять амплитудные характеристики усилителя при наличии / отсутствии обратной связи, используя переключатель S2.

Полученные измерения занести в табл. 1.2.1.

Таблица 1.2.1

Зависимость амплитудной характеристики от наличия ОС

$U_{\text{мвх}}, \text{мВ}$	40	70	100	130	160	190	220	250	280	310	340
$U_{\text{мвх}}, \text{В};$ без ОС											
$U_{\text{мвх}}, \text{В};$ с ОС											

Построить графики зависимостей.

2. Снять амплитудно-частотные характеристики усилителя при наличии / отсутствии обратной связи при том же значении сопротивления нагрузки. Определить верхнюю и нижнюю частоты рабочего диапазона.

Частоту для табл. 1.2.2 выбирать в зависимости от диапазона рабочих частот (от f_H до f_B).

Для определения верхней и нижней частот рабочего диапазона на панели выбрать simulate→analyses→AC analyses, как показано на рис. 1.2.2. Откроется окно AC analyses. В этом окне открыть вкладку Output для выбора точки моделирования (в данном случае это точка V(12)). Для ее определения на схеме два раза щелкнуть клавишей левой кнопки мыши на линии, выделенной прямоугольником на рис. 1.2.2, и в строке net name и есть имя проводника.

После добавления точки моделирования в окне AC analyses нажать кнопку simulate. Получаем два графика: верхний график соответствует амплитудно-частотной характеристике, нижний – фазо-частотной характеристике. На частотной характеристике значение верхней линии умножаем на 0,707, разводим два курсора по разные стороны. Это и есть значения нижней и верхней частот, на рис. 1.2.3 они выделены прямоугольниками.

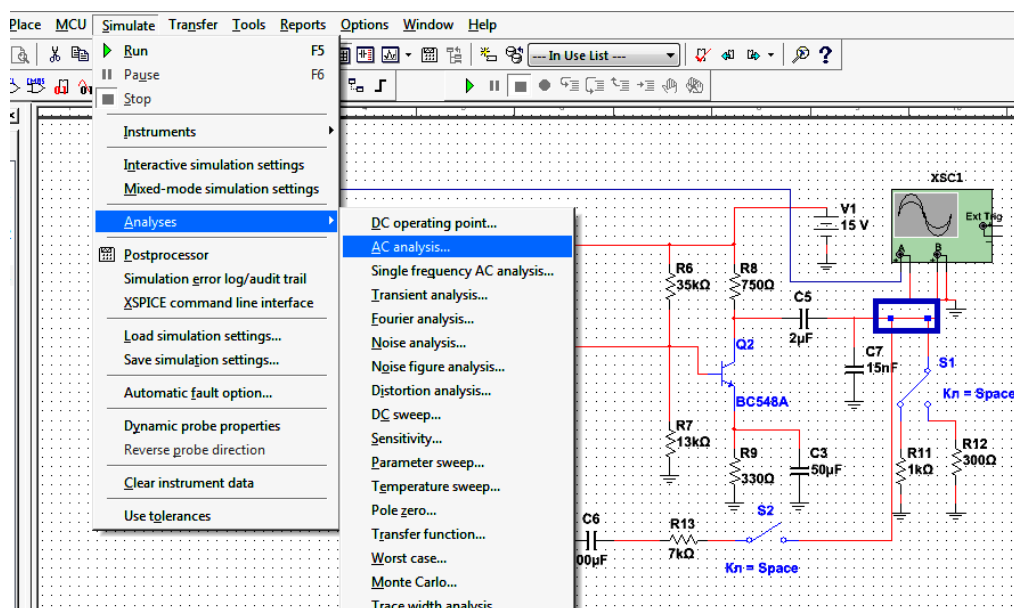


Рис. 1.2.2. Настройка панели для определения частоты рабочего диапазона

На рис. 1.2.3 на верхнем графике представлена АЧХ каскада, где по линии ординат показан коэффициент усиления напряжения K_U , а по линии абсцисс – изменение частоты.

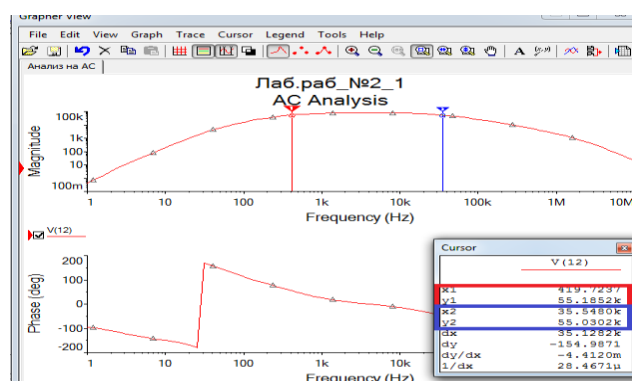


Рис. 1.2.3. Определения верхней и нижней частот

Повторить проделанные манипуляции с использованием обратной связи.

Для получения амплитудно-частотной характеристики по значениям осциллографа заполнить табл. 1.2.2.

Таблица 1.2.2

Зависимости АЧХ от частоты при наличии / отсутствии ОС

f, кГц											
U _{твых} , В; без ОС											
U _{твых} , В; с ОС											

По полученным значениям построить графики зависимостей.

3. Используя приведенные в лабораторной работе № 1.1 формулы, рассчитать входное и выходное сопротивления при наличии/отсутствии обратной связи, используя частоту $f = 1$ кГц.

4. При наличии / отсутствии обратной связи измерить изменение сквозного коэффициента усиления в зависимости от значений сопротивления нагрузки используя частоту $f = 1$ кГц.

Задание 1.2.2. Исследование эмиттерного повторителя

Для исследования эмиттерного повторителя собрать схему на рис. 1.2.4.

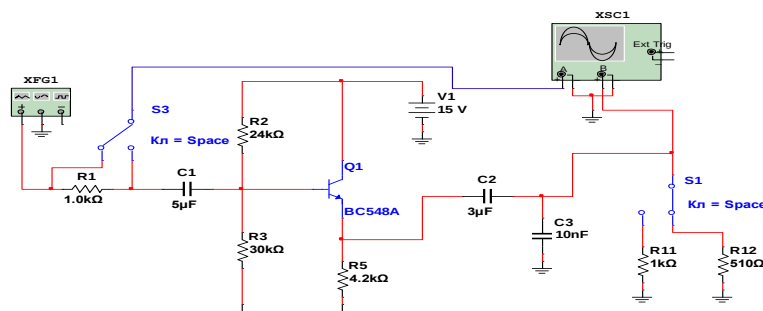


Рис. 1.2.4. Схема эмиттерного повторителя

1. Рассчитать сопротивления резистора в цепи R_3 и номиналы резисторов R_{61} , R_{62} в цепи смещения базы, используя приведенные ниже формулы.

$$R_3 = \frac{U_{R_3}}{I_{O3}}, \text{ где } U_{R_3} \text{ может быть определено из соотношения}$$

$$\frac{E_{уст}}{R_{уст} + R_{6x}} \cdot R_{6bx} \leq U_{R_3} \leq 0,5E_K, \text{ а ток покоя } I_{ок} \approx I_H + (5 \div 10)I_{ко},$$

$$\text{где ток нагрузки } I_H = \frac{U_H}{R_H} \approx \frac{E_{уст}}{R_{уст} + R_{6x}} \cdot \frac{R_{6x}}{R_H};$$

$I_{ко}$ – обратный ток коллектора.

Ток делителя цепи смещения базы определяется из соотношения $I_D \approx (3 \div 5)I_{об}$, где $I_{об} \approx I_{O3} / h_{21K}$.

Сопротивления делителя смещения:

$$R_{61} = \frac{E_K - U_{об} - U_{R_3}}{I_D + I_{об}}, \quad R_{62} = \frac{U_{R_3} + U_{об}}{I_D},$$

где $U_{об}$ – напряжение смещения базы.

Определение сопротивления эмиттерного повторителя:

- без учета делителя R_6 : $r_{bx} \approx h_{11K} + h_{21K} \cdot R_{3\sim}$;

- с учетом делителя: $R_{bx} = r_{bx} || R_6$;

где $R_{3\sim} = R_3 || R_H$ – сопротивление нагрузки эмиттера по переменному току;

$R_6 = R_{61} || R_{62}$.

Если после проведенных расчетов величина входного сопротивления R_{bx} получится меньше заданной, тогда необходимо увеличить сопротивление эмиттера R_3 и увеличить до максимально возможной величины напряжение сопротивления эмиттера U_{R_3} , или выбрать транзистор с большим значением статического коэффициента h_{213} и провести расчет заново.

$$\text{Выходное сопротивление } R_{6bx} \approx \frac{R_{уст} + h_{11K}}{h_{21K}}.$$

$$\text{Коэффициент усиления по напряжению: } K_u = \frac{h_{21K} \cdot R_{3\sim}}{h_{21K} + h_{21K} \cdot R_{3\sim}}$$

$$\text{Напряжение сигнала на нагрузке: } U_H = U_{6bx} = \frac{R_{6bx}}{R_{6x} + R_{уст}} \cdot K_u \cdot E_{уст}, \text{ где}$$

$\frac{R_{6bx}}{R_{6x} + R_{уст}} = \alpha$ – коэффициент передачи напряжения источника сигнала во внутреннюю цепь.

Емкости разделительных конденсаторов: $C_1 \geq \frac{0,16}{f_n \cdot (R_{ист} + R_{ex}) \cdot \sqrt{M_n^2 - 1}}$;

$C_2 \geq \frac{0,16}{f_n \cdot (R_{ex} + R_n) \cdot \sqrt{M_n^2 - 1}}$, где M_n – коэффициент частотных искажений на нижней частоте рабочего диапазона.

2. Снять АЧХ эмиттерного повторителя, измерить его выходное и входное сопротивления. Амплитуду сигнала на входе установить $U_{мвх} = 1$ В.

Таблица 1.2.3

Таблица для снятия АЧХ эмиттерного повторителя

f, кГц	0,03	0,05	0,1	0,15	0,4	1	10	20	50	100	300	600	1300
U _{мвх} , В													

Построить график зависимости амплитуды выходного напряжения от частоты эмиттерного повторителя. Сделать выводы.

Лабораторная работа № 1.3

Исследование усилителя с двухтактным выходным каскадом

Цель работы: исследование усилителя с мощным двухтактным выходным каскадом в режимах классов В и АВ.

Задание 1.3.1. Усилитель мощности в режиме класса В

Для выполнения лабораторного задания собрать схему, приведенную на рисунке, сначала перевести усилитель мощности в режим класса В переключателем S1 замкнуть резистор смещения R12.

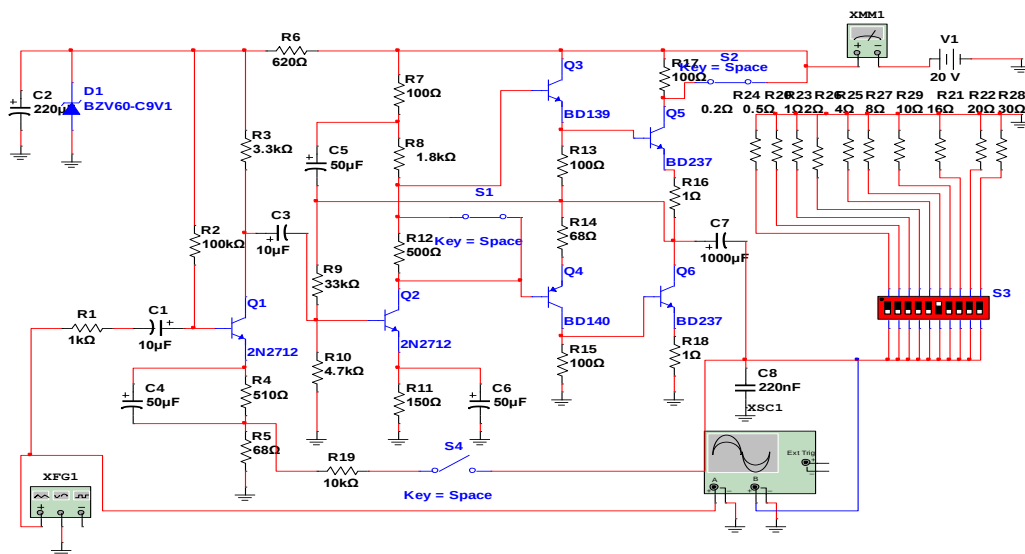


Рис. Усилитель с мощным двухтактным выходным каскадом

1. Для снятия амплитудных характеристик усилителя при $R_n = 8 \text{ Ом}$ отключить обратную связь (переключатель S4), и настроить генератор импульсов на частоту $f = 1 \text{ кГц}$, выбрать синусоидальный вид сигнала, амплитуду выбирать из табл. 1.3.1.

Таблица 1.3.1

Зависимость амплитудной характеристики при постоянной частоте
при отсутствии ОС

$U_{\text{вх}}, \text{ мВ}$	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$										

Построить график зависимост.

2. Заполнить табл. 1.3.2 при отключенной обратной связи на частоте $f = 1 \text{ кГц}$, измерить выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ и потребляемый от источника питания ток I_0 . Среднее значение тока I_0 определяется при помощи мультиметра ХММ1.

Расчет произвести по формулам ниже.

$$P_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}^2}{R_n} - \text{выходная мощность усилителя};$$

$$P_0 = E_{\text{пит}} \cdot I_0 - \text{мощность, потребляемая от источника питания, } E_{\text{пит}} = 7,5 \text{ В};$$

$$P_k = P_0 - P_{\text{вых}} - \text{мощность, рассеиваемая на коллекторах транзисторов};$$

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_0} \cdot 100\% - \text{КПД усилителя.}$$

Таблица 1.3.2

Зависимости выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ и потребляемого тока I_0
от входного напряжения

$U_{\text{вх}}, \text{ мВ}$	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$										
$I_0, \text{ А}$										
$P_{\text{вых}}, \text{ Вт}$										
$P_0, \text{ Вт}$										
$P_k, \text{ Вт}$										
$\eta, \%$										

Построить графики зависимостей $P_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$; $P_0 = f(U_{\text{вх}})$; $P_k = f(U_{\text{вх}})$; $\eta = f(U_{\text{вх}})$ и сделать выводы.

3. Снять частотные характеристики при наличии / отсутствии обратной связи и заполнить табл. 1.3.3.

Таблица 1.3.3

Таблица для снятия АЧХ двухтактного усилителя

f, кГц	0,01	0,05	0,1	0,2	0,4	0,7	1	2	5	10	15	20	30	50
$U_{\text{мвых}}, \text{В};$ без ОС														
$U_{\text{мвых}}, \text{В};$ с ОС														

По данным табл. 1.3.3 построить графики зависимостей, сделать выводы о влиянии обратной связи на выходное напряжение $U_{\text{мвых}}$.

4. Переключателем S2 разомкнуть резистор R17, имитирующий разбаланс плеч, на частоте $f=1\text{кГц}$ проследить искажения формы выходного сигнала.

Задание 1.3.2. Усилитель мощности в режиме класса АВ

Для перевода усилителя в режим класса АВ необходимо разомкнуть переключателем S1 резистор R12, обеспечивающий небольшое начальное смещение выходному каскаду и добавить в отчет осциллограммы выходного сигнала на частоте $f=1\text{кГц}$ при отсутствии обратной связи. Сравнить полученный результат с осциллограммами с результатами при выполнении п. 5 задания 1.3.1.

Лабораторная работа № 1.4

Исследование генераторов с базовой, эмиттерной и коллекторной амплитудной модуляциями

Цель работы: изучение принципа работы амплитудно-модулирующего генератора с базовой, эмиттерной и коллекторной амплитудной модуляцией, анализ спектрального состава колебаний до и после фильтрации.

Характеристики транзисторов в среде Multisim

BJT Analyzer – прибор в среде multisim, используется для получения входных характеристик транзисторов. Его необходимо подключить к транзистору как показано на рис. 1.4.1.

На рисунке b – база транзистора, e – эмиттер транзистора, c – коллектор транзистора. В Device Type необходимо выбрать тип устройства, здесь это NPN транзистор.

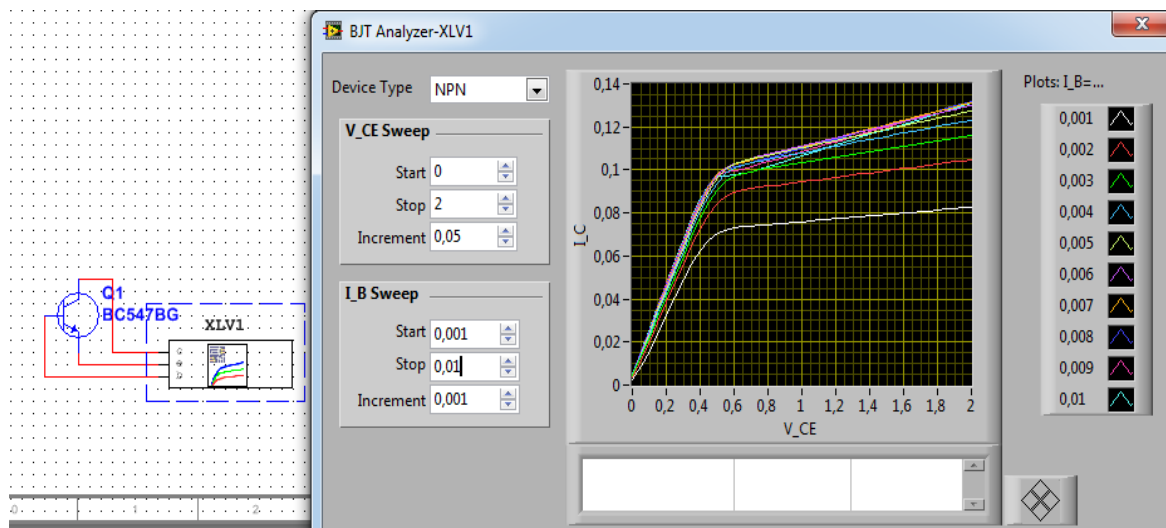


Рис. 1.4.1. Входные характеристики транзистора BC547BG на BJT Analyzer

Два гармонических сигнала, подаваемых на транзистор, являются несущим и модулирующим (ВЧ и НЧ). Спектр данного бигармонического сигнала состоит из новых гармоник, полученных за счет нелинейности характеристик транзистора. Необходимо выделить только три составляющих спектра, которые определяют амплитудно-модулированный сигнал: $BЧ$, $BЧ - НЧ$ и $BЧ + НЧ$, для этого необходим полосовой фильтр.

Задание 1.4.1. Амплитудный модулятор с базовой модуляцией

Для исследования амплитудного модулятора с базовой модуляцией построить схему, приведенную на рис. 1.4.2.

Для моделирования на генераторе XFG1, подающем несущее колебание, настроить частоту 105 кГц и амплитуду 0,4 В, а на генераторе XFG2, определяющем модулирующее колебание, задать частоту равную $f=3,5$ кГц и амплитуду составляющую 0,15 В. Контур L1C2 настроен на несущую частоту. Транзистор Q2 является простейшим усилителем и подавляет боковые составляющие спектра амплитудно-модулированного сигнала за счет «непрямоугольности» АЧХ контура, который выполняет роль полосового фильтра. Нелинейный режим работы транзистора Q1 с отсечкой коллекторного тока задает напряжение питания с V1, и линейный режим для транзистора Q2 без угла отсечки. Транзисторы Q1 и Q2 работают в разных режимах при одном поданном напряжении питания и одинаковых резистивных делителях, т.к. они разные. Бигармонический сигнал частично «срезается» нелинейным элементом, изменяя его спектральный состав, затем при помощи фильтрации избавляемся от ненужных гармоник.

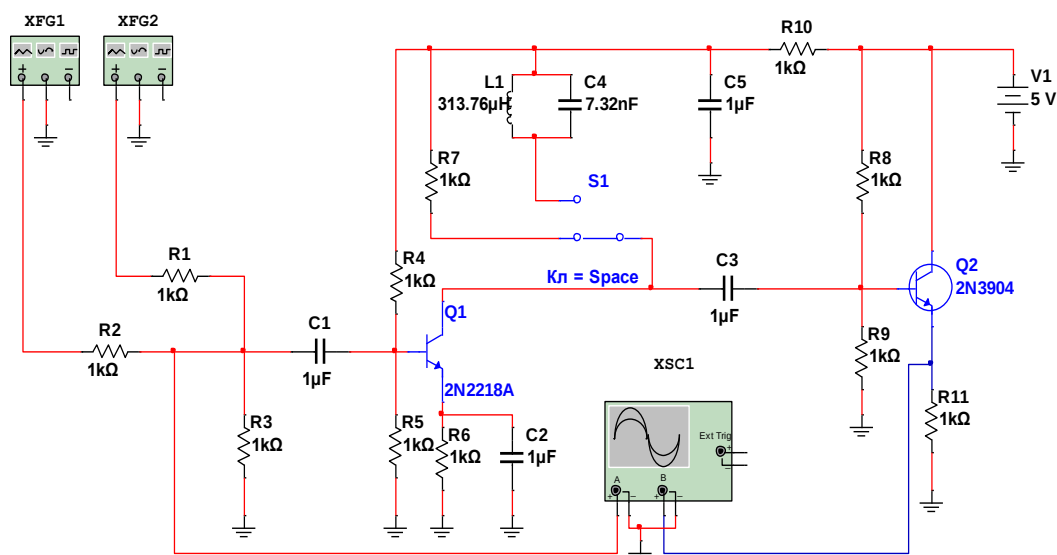


Рис. 1.4.2. Схема амплитудного модулятора с базовой модуляцией

На рис. 1.4.3 на канал А поступает сигнал с базы транзистора и на канал Б сигнал с выхода генератора при резистивной нагрузке, т. е. без фильтра.

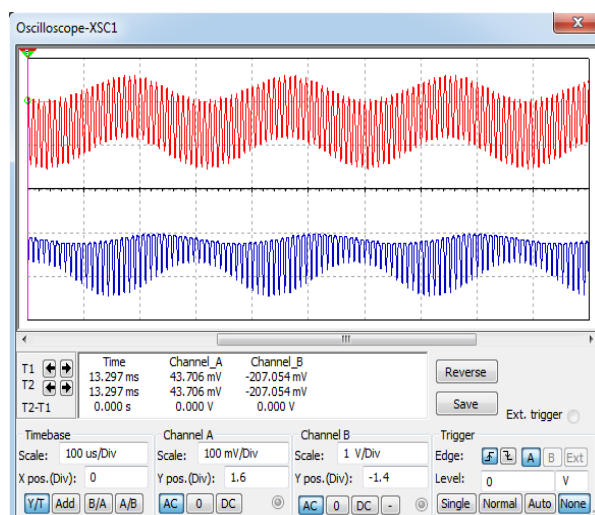


Рис. 1.4.3. Осциллограммы бигармонического сигнала до/после отсечки при резистивной нагрузке

При подключенном контуре L1C4, который выступает в роли фильтра, получаем амплитудно-модулированный сигнал без лишних гармоник (рис. 1.4.4).

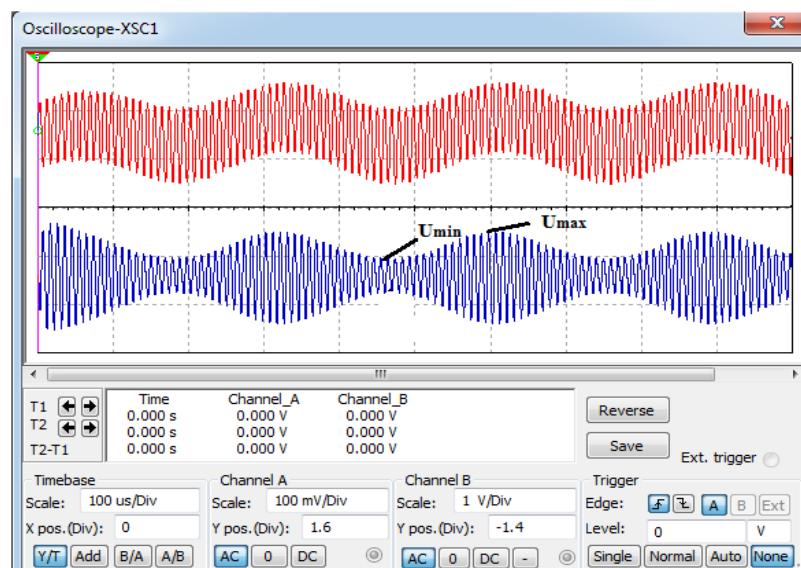


Рис. 1.4.4. Осциллограммы бигармонического сигнала до / после отсечки при колебательной нагрузке

1. Изучить порядок выполнения работы и описание исследуемой схемы. Снять входную и семейство выходных характеристик транзисторов при помощи BJT Analyzer.

В программе моделирование/вид анализа/Фурье построить амплитудный спектр выходного амплитудно-модулированного колебания до фильтрации, и снять АЧХ рассчитанного контура.

2. Снять амплитудно-модуляционные характеристики для $M = \varphi(U_{\Omega})$ и заполнить табл.1.4.1, где М рассчитывается по формуле

$$M = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}} \cdot 100$$

Таблица 1.4.1

Зависимость АБМ от амплитуды

U_{Ω}, B									
$M, \%$									

Построить график зависимости.

3. Снять частотно-модуляционные характеристики $M = \varphi(\Omega)$ и заполнить табл. 1.4.2.

Таблица 1.4.2

Зависимость АБМ от частоты

$\Omega, кГц$									
$M, \%$									

Построить график зависимости.

Задание 1.4.2. Генератор с амплитудной эмиттерной модуляцией

Для выполнения задания построить схему генератора с амплитудной модуляцией, изображенную на рис. 1.4.5. В этой схеме на эмиттер подается модулирующее колебание, а на базу транзистора подается несущее колебание.

Для моделирования установить значения несущей частоты 200 кГц (V1) и модулирующей частоты 5 кГц (V3), амплитуду несущей выбрать 2,5 В, а амплитуду модулирующих колебаний выбрать 0,5 В, контур L1C2R2 рассчитан в резонанс с несущей, источник питания подобран по входной характеристике транзистора 2N3904 на 12 В, резисторы R4R5 задают рабочую точку;

На рис. 1.4.6 приведена осциллограмма с выхода генератора при эмиттерной модуляции, где в качестве нагрузки используется колебательный контур.

1. Изучить порядок выполнения работы и описание исследуемой схемы. Снять входную и семейство выходных характеристик данного транзистора при помощи BJT Analyzer.

В программе моделирование/вид анализа/Фурье построить амплитудный спектр выходного амплитудно-модулированного колебания, и снять АЧХ рассчитанного контура.

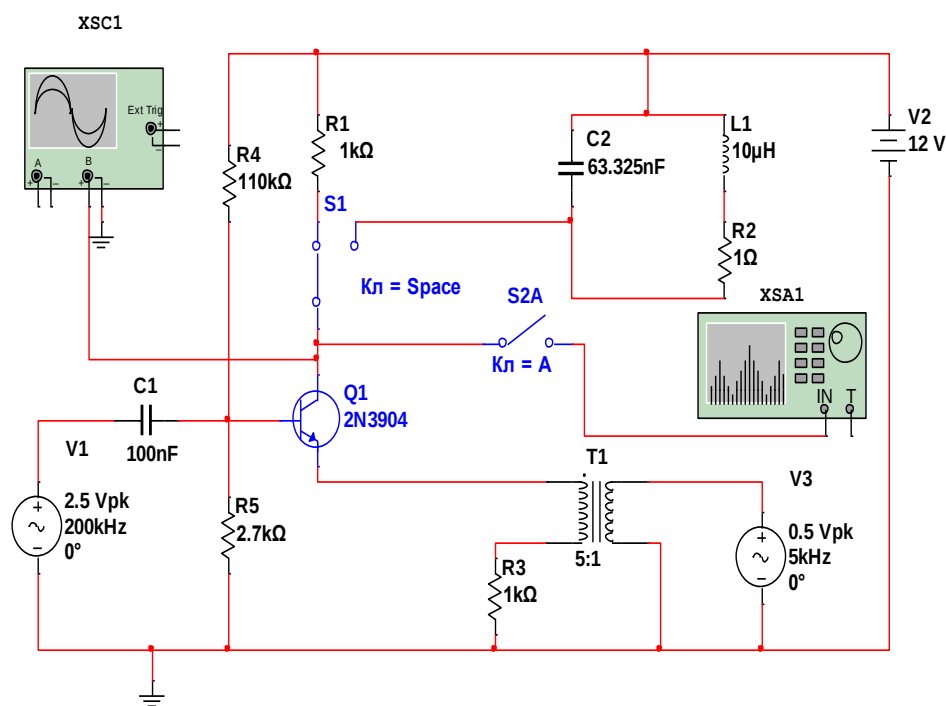


Рис. 1.4.5. Схема генератора с амплитудной эмиттерной модуляцией

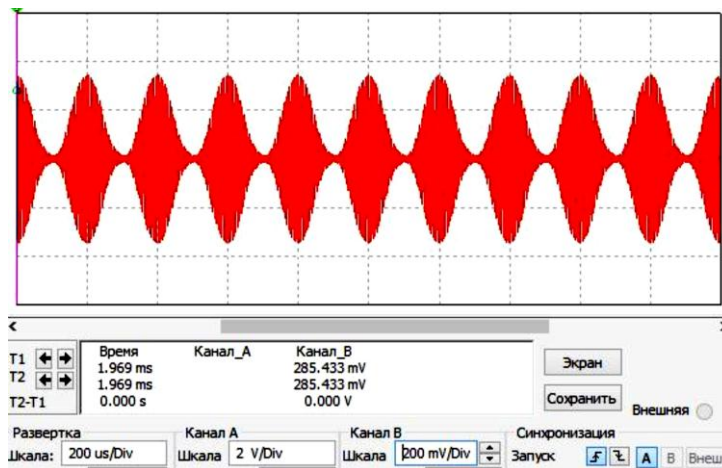


Рис. 1.4.6. Осциллограмма с выхода генератора

2. Снять амплитудно-модуляционные характеристики для АЭМ $M = \varphi(U_\Omega)$ и заполнить табл. 1.4.3.

Таблица 1.4.3

Зависимость АЭМ от амплитуды

U_Ω, B									
$M, \%$									

Построить график зависимости.

3. Снять частотно-модуляционные характеристики $M = \varphi(\Omega)$ и заполнить табл. 1.4.4.

Таблица 1.4.4

Зависимость АЭМ от частоты

$\Omega, кГц$									
$M, \%$									

Построить график зависимости.

Задание 1.4.3. Генератор с амплитудной коллекторной модуляцией (АКМ)

Для выполнения задания построить схему, приведенную на рис. 1.4.7. В данной схеме в качестве фильтра будет использоваться полноценный полосовой фильтр, созданный при помощи встроенного в программу Multisim создателя схем, который будет оформлен в виде отдельного блока.

Для моделирования генератора настроить следующие входные характеристики: несущая частота установить равной 200 кГц, модулирующая частота выбрать 5 кГц, амплитуда несущего сигнала взять 2 В, амплитуда модулирующего колебания установить 0,2 В, полосовой фильтр спроектирован в соответствии с ожидаемым спектром АМ колебания транзистора 2N3904.

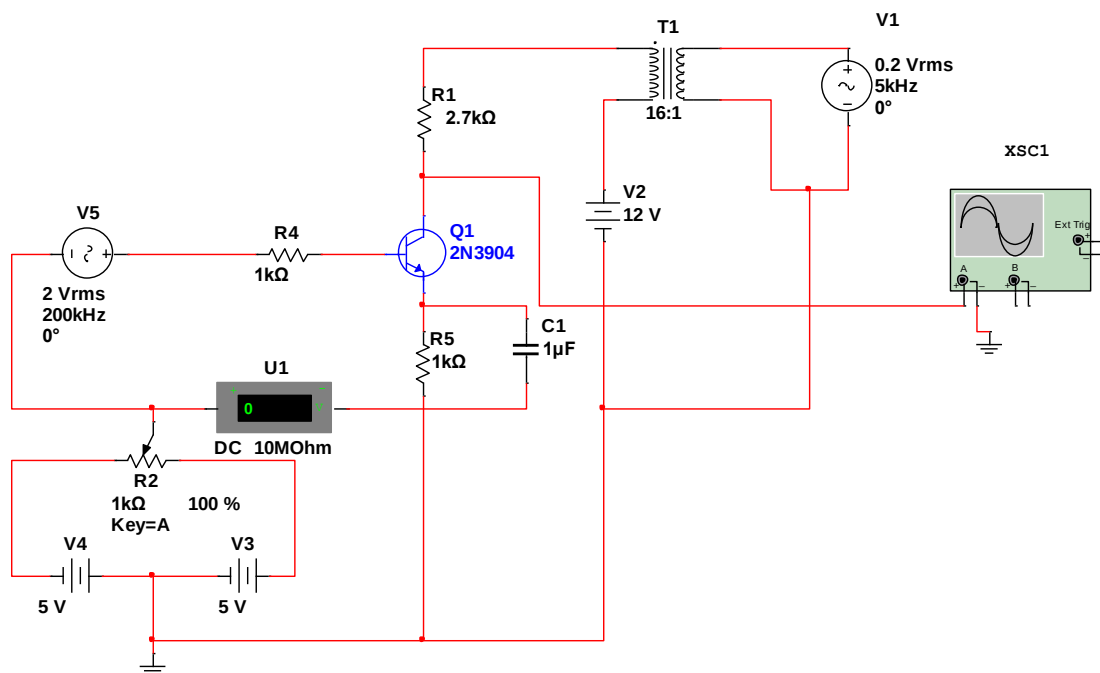


Рис.1.4.7. Схема генератора с АКМ без фильтра

После установки входных значений и запуска моделирования схемы с коллекторной модуляцией получаем бигармонический сигнал с отсечкой при резистивной нагрузке, приведенный на рис. 1.4.8.



Рис. 1.4.8. Бигармонический сигнал с отсечкой при резистивной нагрузке с коллекторной модуляцией

Запускаем анализ Фурье (выбираем точку V(12)), видим спектральные составляющие, присущие амплитудно-модулированному колебанию, показанные на

рис. 1.4.9. На рис. 1.4.9 по центру виден спектр АМ колебания, а так же слева низкочастотные составляющие и справа приведены гармоники высших порядков. Необходимо оставить «чистый» спектр, т.е. с помощью полосового фильтра убрать низкочастотный сигнал и высшие гармоники.

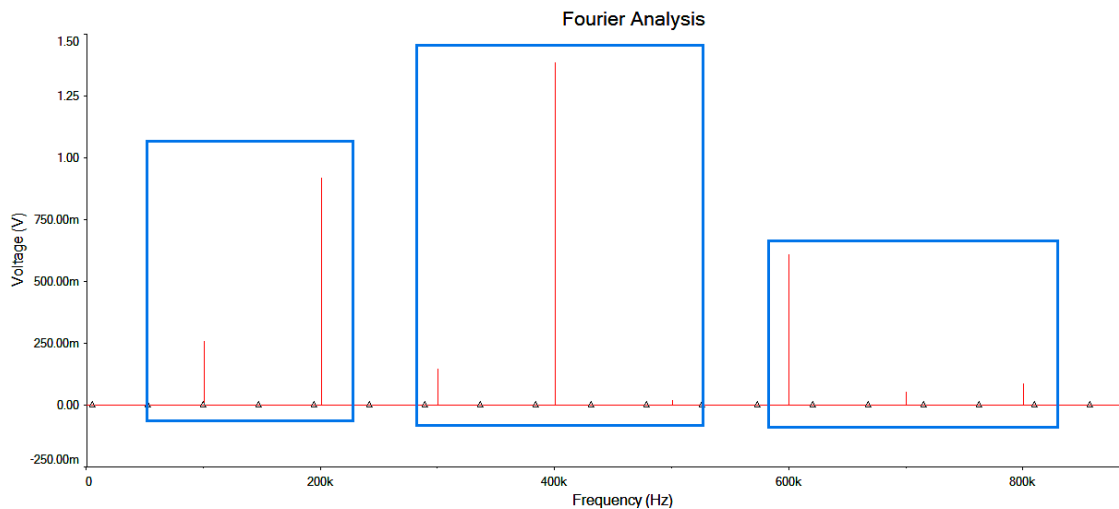


Рис. 1.4.9. Спектр колебания с выхода генератора

Открываем создатель фильтров (рис. 1.4.10), и выбираем тип полосовой (рис. 1.4.11).

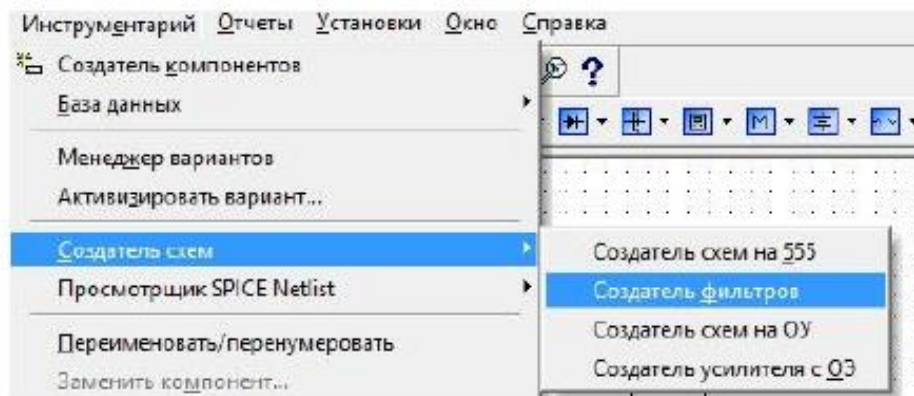


Рис. 1.4.10. Нахождение приложения по созданию фильтров

В окне «Создатель фильтров» настраиваем первые четыре параметра: нижнюю частоту среза берем равной $f_n=190$ кГц, нижнюю частоту подавления устанавливаем 160 кГц, верхнюю частоту среза установим $f_v=210$ кГц, верхнюю частоту подавления установим 220 кГц. Это делается на основании ранее полученного спектра, приведенного на рис. 1.4.9, и в окне справа приведена графическая подсказка.

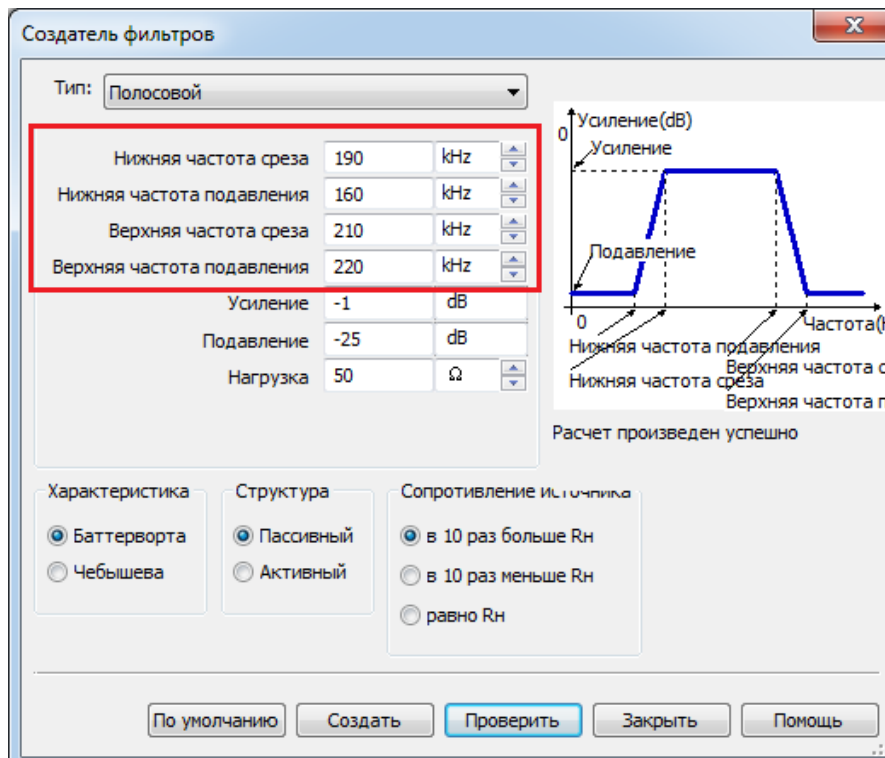


Рис. 1.4.11. Параметры создания полосового фильтра

На рис. 1.4.12 изображен полосовой фильтр известной АЧХ. Теперь посмотрим его настоящую АЧХ: Моделирование → Вид анализа → Режим АС.

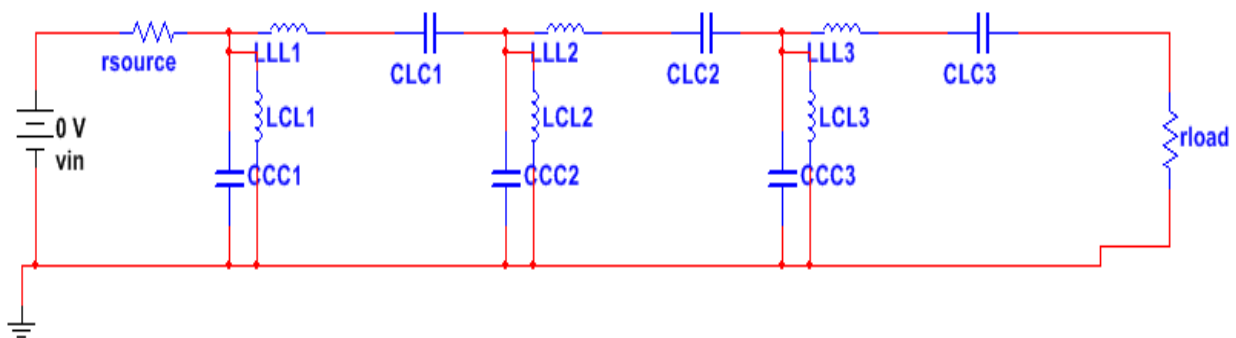


Рис. 1.4.12. Автоматически созданный полосовой фильтр

Выбираем напряжение в точке, с которой будем снимать АЧХ (в данном случае, выход ПФ в точке 18), как показано на рис. 1.4.13.

На рис. 1.4.14 задаем примерную частотную область.

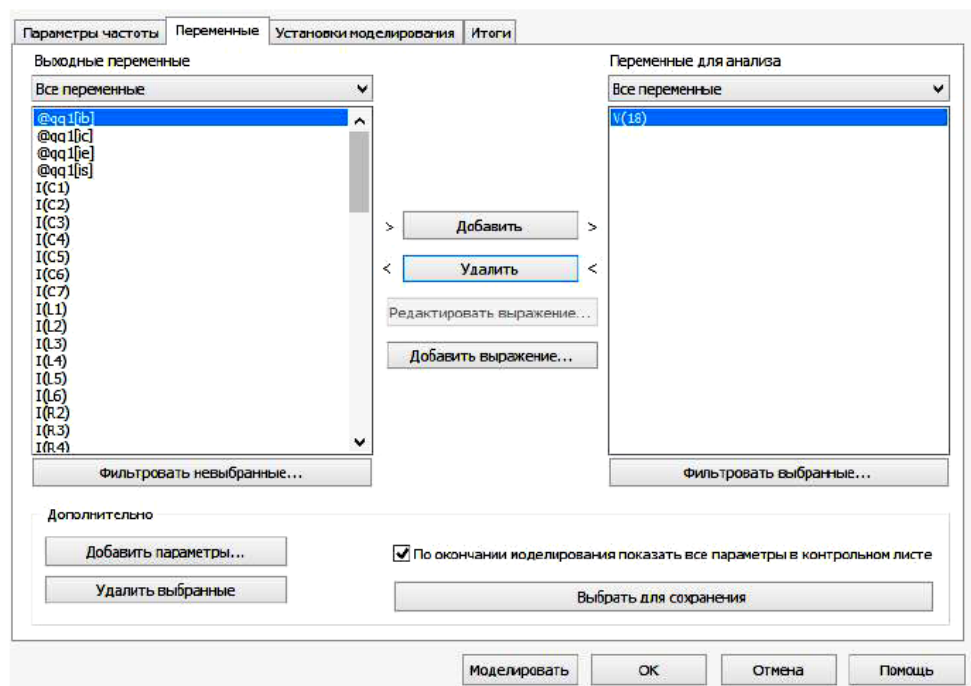


Рис.1.4.13. Переменные АС анализатора

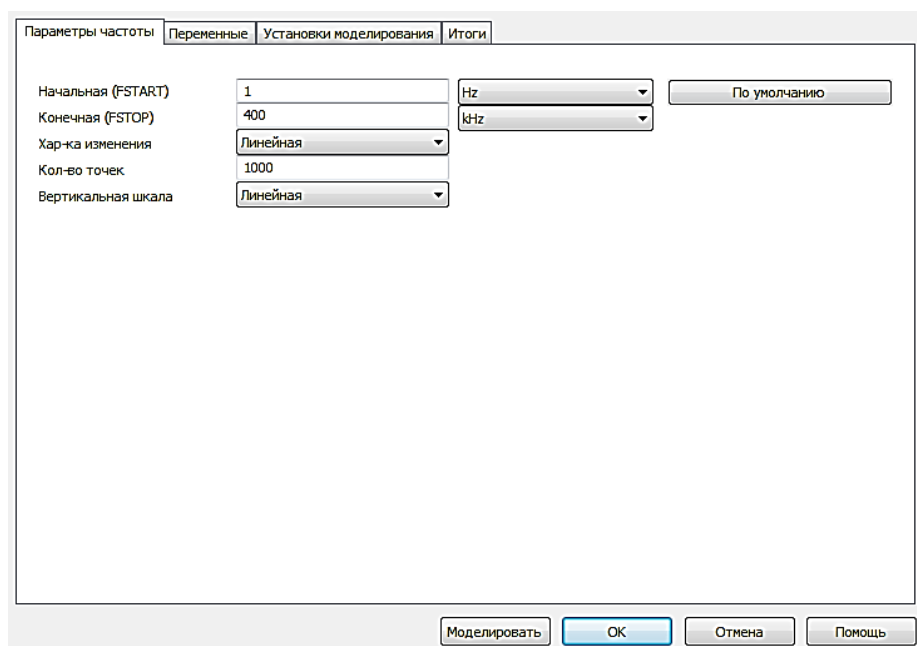


Рис. 1.4.14. Параметры частоты АС анализатора

АЧХ, приведеную на рис. 1.4.15 переносим на спектр рис. 1.4.9 и сопоставляем его со спектром амплитудной модуляции, при этом все боковые гармоники, не соответствующие амплитудно-модулированному сигналу, подавляются.

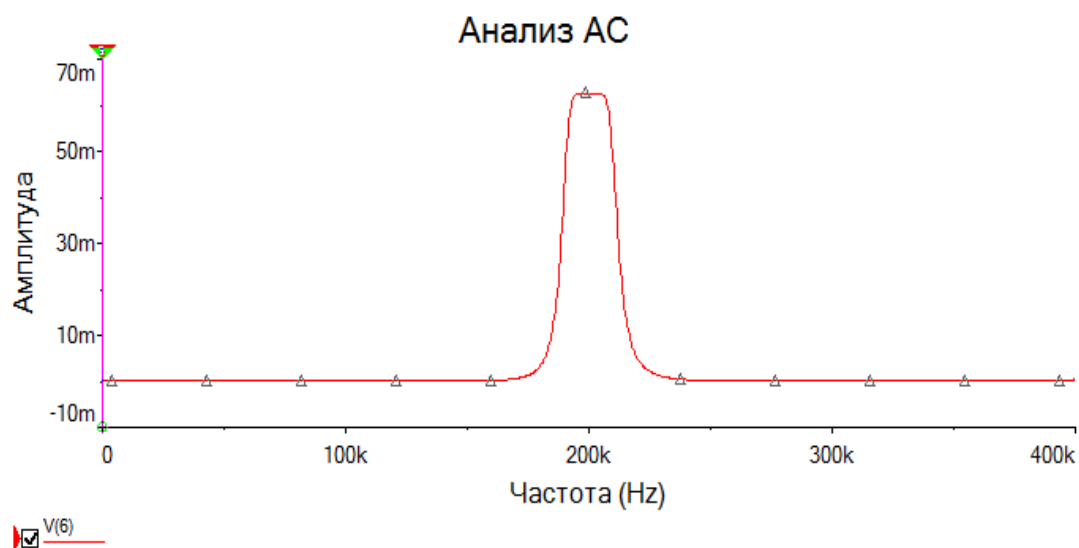


Рис. 1.4.15. АЧХ полученного полосового фильтра

Создание блока полосового фильтра

Выполняем действия, показанные на рис. 1.4.16.

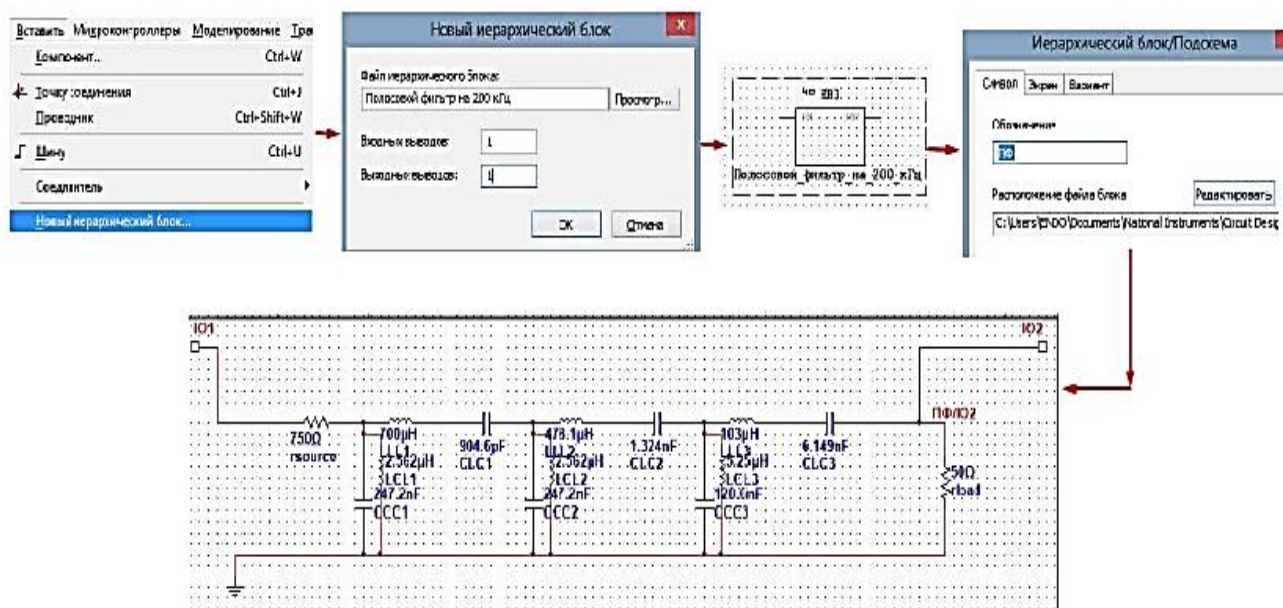


Рис.1.4.16. Процесс корпусирования полосового фильтра

Необходимо вставить в блок фильтр, и в итоге схема будет выглядеть следующим образом (рис. 1.4.17):

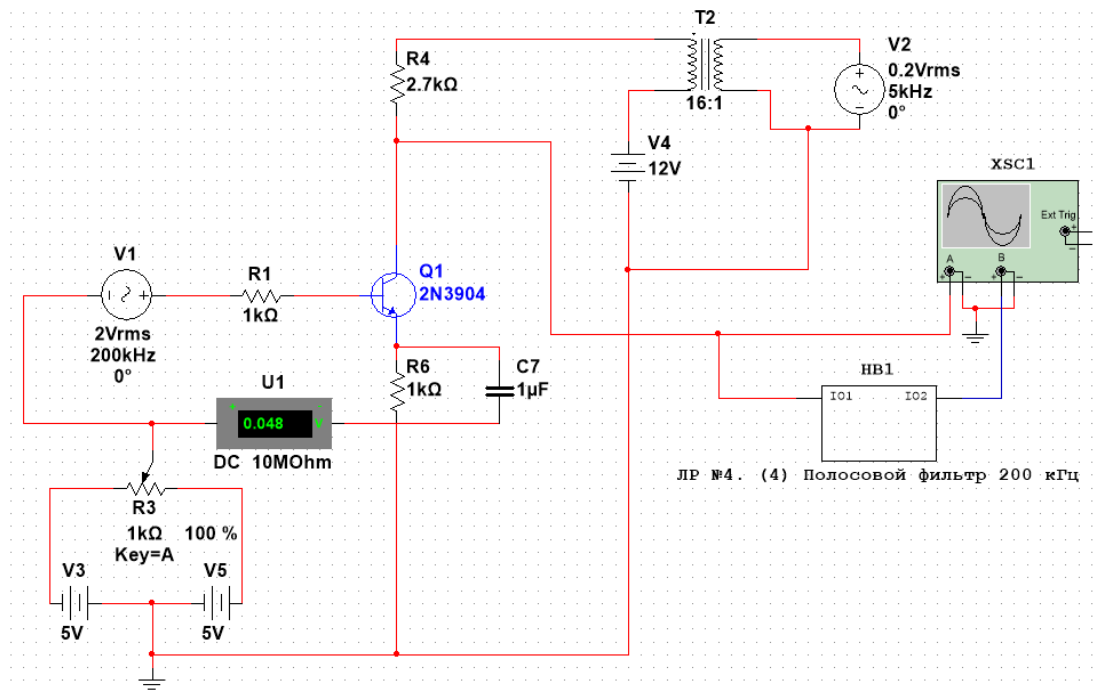


Рис. 1.4.17. Схема генератора с амплитудной коллекторной модуляцией

После запуска моделирования на осциллографе будут графики, показанные на рис. 1.4.18.

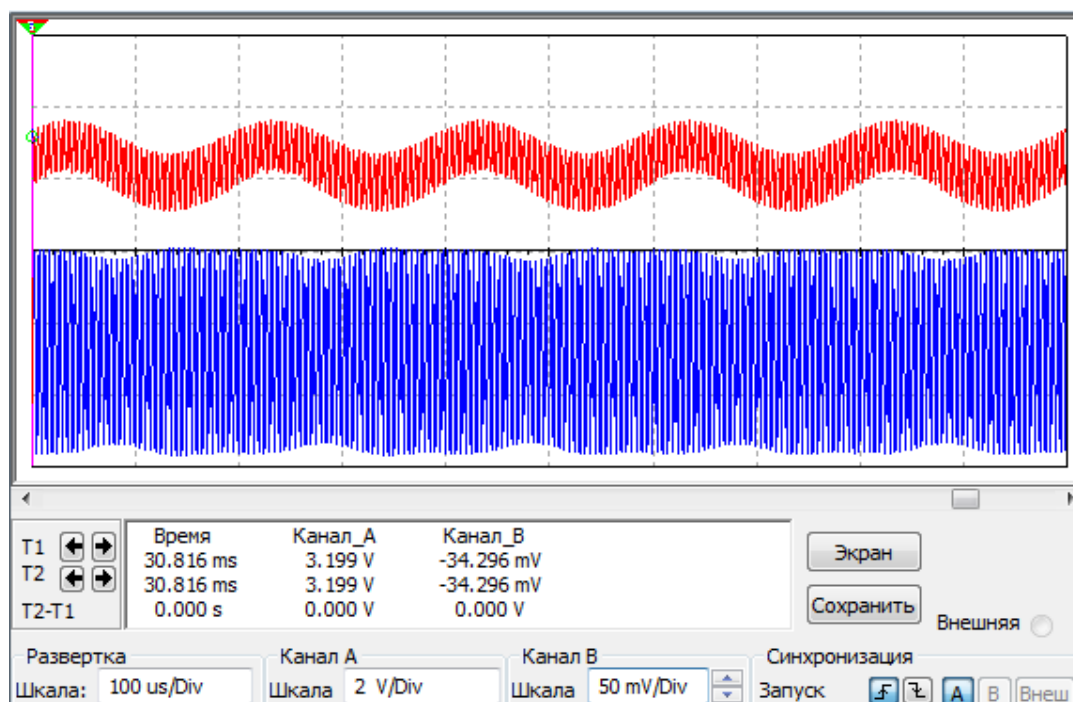


Рис. 1.4.18. Осциллограммы с выхода генератора с АКМ при резистивной и колебательной нагрузках

1. Снять входную и семейство выходных характеристик данного транзистора при помощи характериографа или BJT Analyzer.

В программе моделирование/вид анализа/Фурье построить амплитудный спектр выходного амплитудно-модулированного колебания и АЧХ спроектированного полосового фильтра.

2. Снять амплитудно-модуляционные характеристики для АКМ $M = \varphi(U_\Omega)$ и заполнить табл. 1.4.5.

Таблица 1.4.5

Зависимость АКМ от амплитуды

U_Ω, B									
$M, \%$									

Построить график зависимости. Сделать выводы.

3. Снять частотно-модуляционные характеристики $M = \varphi(\Omega)$ и заполнить таблицу 1.4.6.

Таблица 1.4.6

Зависимость АКМ от частоты

$\Omega, кГц$									
$M, \%$									

Построить график зависимости. Сделать выводы.

Чем круче фронт и спад амплитудно-частотной характеристики полосового фильтра, тем сильнее зависимость коэффициента модуляции от модулирующей частоты. На рис. 1.4.19 показаны пояснения о влиянии модулирующей частоты на изменения коэффициента модуляции.

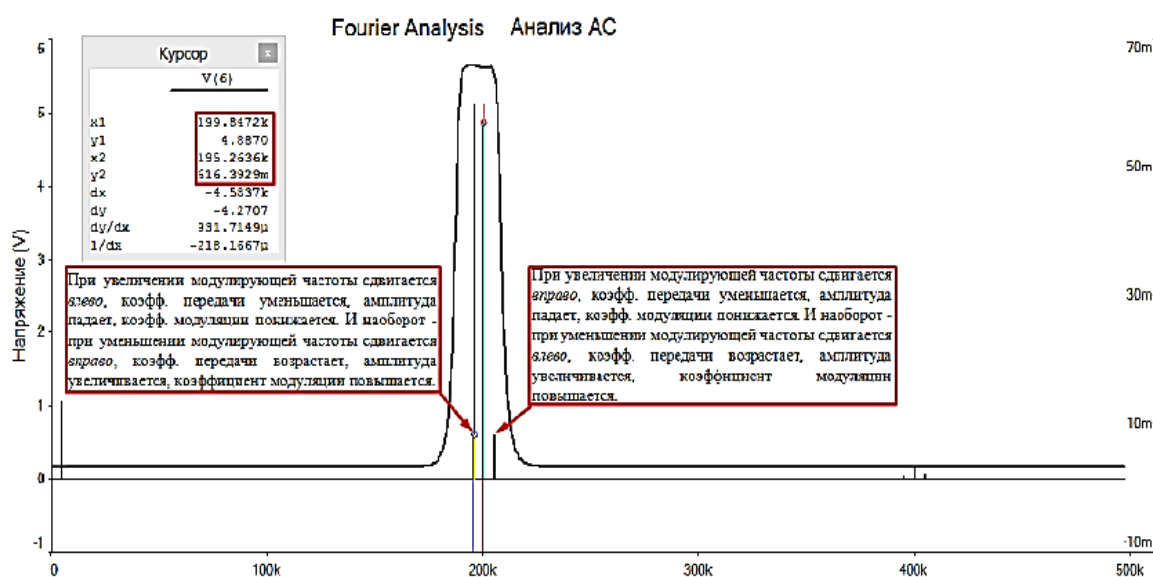


Рис.1.4.19. Влияние изменения модулирующей частоты на коэффициент модуляции

Лабораторная работа № 1.5

Исследование операционного усилителя

Цель работы: исследование схем операционных усилителей, а так же влияние внешней отрицательной обратной связи на различные характеристики операционного усилителя.

Задание 1.5.1. Исследование неинвертирующего операционного усилителя

Для исследования неинвертирующего операционного усилителя построить схему, приведенную на рис. 1.5.1.

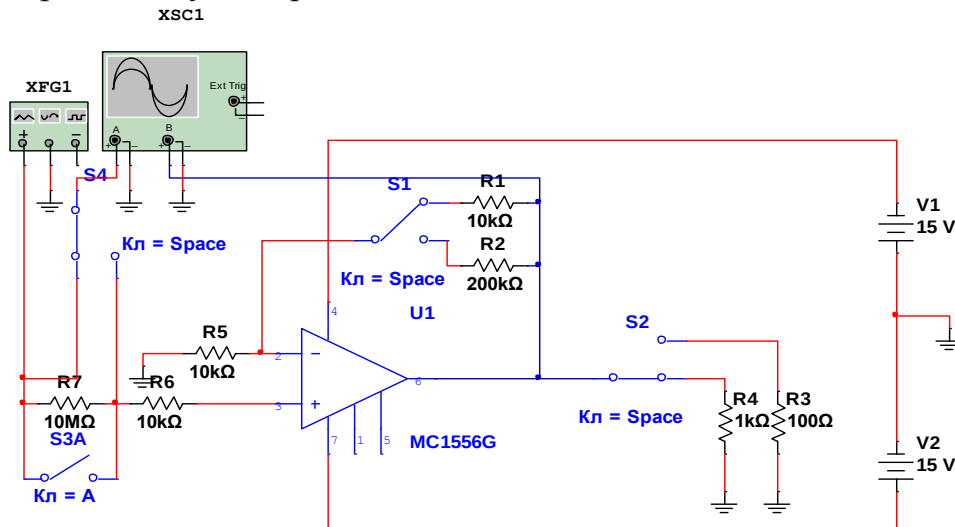


Рис.1.5.1. Принципиальная схема неинвертирующего усилителя

1. Снять и построить амплитудные характеристики неинвертирующего усилителя при различных сопротивлениях обратной связи, используя переключатель S1, на частоте $f = 1$ кГц.

Заполнить табл. 1.5.1 при сопротивлении нагрузки $R_n = 1$ кОм, по полученным данным построить графики амплитудных характеристик, сделать выводы о влиянии величины сопротивления ОС на выходные значения напряжения неинвертирующего усилителя.

Таблица 1.5.1

Зависимость $U_{\text{вых}}$ от величины $R_{\text{ос}}$

$U_{\text{вх}}, \text{ В}$									
$U_{\text{вых}}, \text{ В};$ $R_{\text{ос}} = 10 \text{ кОм}$									
$U_{\text{вых}}, \text{ В};$ $R_{\text{ос}} = 200 \text{ кОм}$									

2. Чтобы измерить входное сопротивление $R_{\text{вх}}$ неинвертирующего усилителя необходимо на генераторе задать частоту $f = 1$ кГц, изменяя значение сопротивления обратной связи переключателем S1, установить ЭДС источника

сигнала 0,5 В и разомкнуть добавочный резистор $R_{доб}$ сопротивлением 10 МОм, а для измерения выходного $R_{вых}$ сопротивления неинвертирующего усилителя резистор $R_{доб}$ должен быть замкнут.

Задание 1.5.2. Исследование инвертирующего операционного усилителя

Для исследования инвертирующего операционного усилителя построить схему, приведенную на рис. 1.5.2.

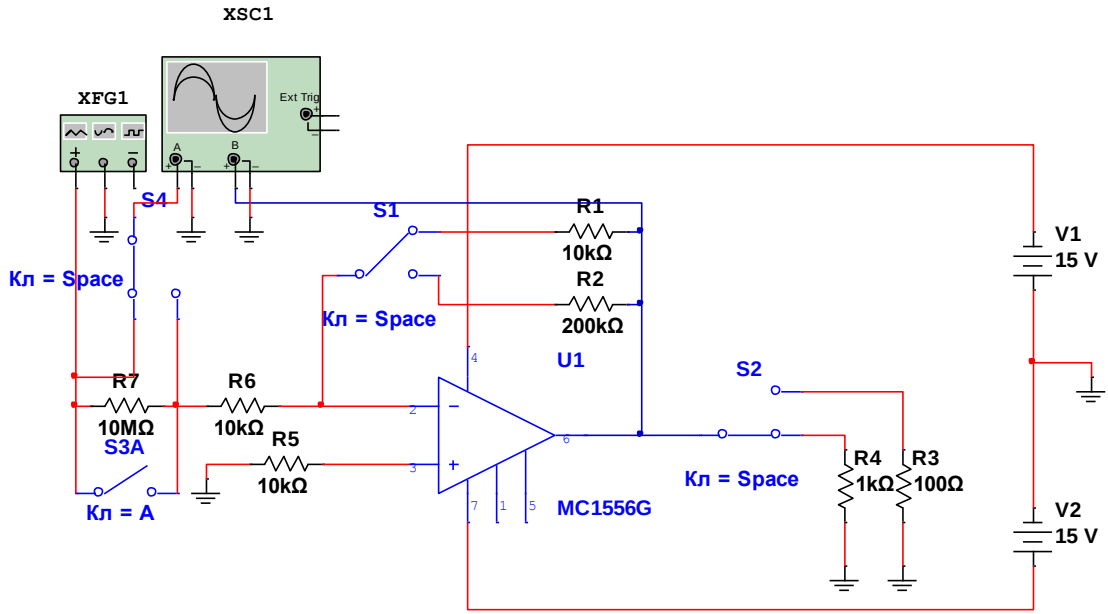


Рис. 1.5.2. Схема для моделирования инвертирующего усилителя

1. Заполнить табл. 1.5.2 для инвертирующего усилителя на частоте $f = 1$ кГц при сопротивлении нагрузки $R_n = 1$ кОм и различных значениях сопротивлений обратной связи, а также пострить графики амплитудных характеристик, сделать выводы о влиянии величины сопротивления ОС на выходные значения напряжения инвертирующего усилителя.

Таблица 1.5.2

Зависимость $U_{вых}$ от величины $R_{ос}$									
$U_{вх}, В$									
$U_{вых}, В;$ $R_{ос} = 10\text{ кОм}$									
$U_{вых}, В;$ $R_{ос} = 200\text{ кОм}$									

2. Изменяя значение сопротивления обратной связи переключателем S1 измерить входное $R_{вх}$ и выходное $R_{вых}$ сопротивления инвертирующего усилителя на частоте $f = 1$ кГц.

3. Изменяя частоту генератора, заполнить табл. 1.5.3 при сопротивлении нагрузки $R_n = 1$ кОм. Построить графики зависимостей.

Таблица 1.5.3

АЧХ инвентирующего усилителя

f, кГц											
U _{вых} , В											

Задание 1.5.3. Исследование избирательного операционного усилителя

Для исследования избирательного операционного усилителя построить схему, приведенную на рис. 1.5.3.

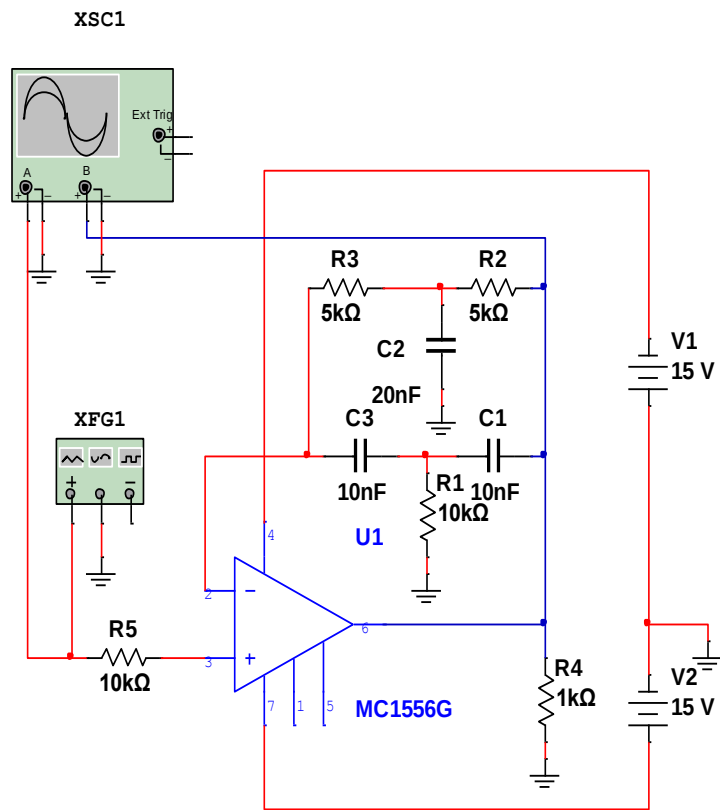


Рис. 1.5.3. Принципиальная схема избирательного усилителя

1. Снять и построить амплитудно-частотные характеристики избирательного усилителя при различных сопротивлениях обратной связи.
Заполнить табл. 1.5.4 при сопротивлении нагрузки $R_n = 1 \text{ кОм}$ и $U_{вх} = 1 \text{ В}$. Построить графики АЧХ по полученным данным, сделать выводы.

Таблица 1.5.4

АЧХ избирательного усилителя

f, кГц											
U _{вых} , В											

Лабораторная работа № 1.6

Исследование мультивибратора и сумматора на базе операционного усилителя

Цель работы: исследование различных устройств, построенных на операционных усилителях, а именно мультивибраторов и сумматоров, получение осциллограмм напряжений на конденсаторе U_c и $U_{вых}$, определение параметров сигналов, сравнение с расчётными значениями.

Задание 1.6.1. Исследование мультивибратора

Для выполнения лабораторного задания собрать схему мультивибратора, которая работает в автоколебательном режиме, показана на рис. 1.6.1, при скважности импульсного процесса $q = \frac{T_{повт.}}{t_u^{+,-}} = 2$.

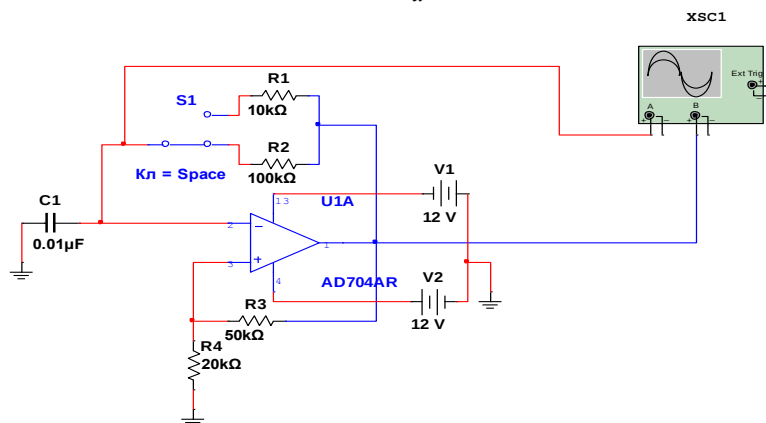


Рис. 1.6.1. Схема для моделирования мультивибратора

1. Изменяя значения конденсатора заполнить табл. 1.6.1 при $R_3 = 50 \text{ кОм}$ и $R_4 = 20 \text{ кОм}$ для различных сопротивлений цепи обратной связи $R_{OC} = 10 \text{ кОм}$ и 100 кОм .

В табл. 1.6.1 приведены следующие обозначения:

- $t_{и+,-}$ – длительности выходных импульсов;
- $T_{повт.}$ – периода повторения выходных импульсов;
- $U_{м.вых}$ – амплитуда выходных импульсов.

Таблица 1.6.1

Влияние емкости конденсатора на значения $t_{и+,-}$, $T_{повт.}$, $U_{м.вых}$.

R_{OC} , кОм	C , мкФ	0,01	0,05	0,06	0,1	0,11	0,15
10	$t_{и}$, с						
	$T_{повт.}$, с						
	$U_{м.вых.}$, В						
100	$t_{и}$, с						
	$T_{повт.}$, с						
	$U_{м.вых.}$, В						

Построить графики зависимостей $U_{M.VЫX} = f(C)$, $T_{ПОВТ} = f(C)$, $t_{и} = f(C)$ при различных сопротивлениях ОС $R_{ОС}$. На осциллограммах измерить и указать длительность выходного импульса $t_{и}$, период повторения $T_{ПОВТ}$, а также амплитуду импульсов и величины нижнего и верхнего пороговых напряжений $U_{П.ВЕРХ}$ и $U_{П.НИЖН.}$.

Рассчитать пороговое напряжение входов операционных усилителей и сопоставить с соответствующими величинами, измеренными с помощью осциллографа.

2. Рассчитать коэффициент положительной обратной связи $K_{ОС} = R_1 / (R_1 + R_2)$ в соответствии со значениями резисторов в табл. 1.6.2, снять зависимости влияния $K_{ОС}$ на амплитуду выходного значения $U_{M.VЫX}$ и период повторений выходных импульсов $T_{ПОВТ}$, заполнить табл. 1.6.2.

Таблица 1.6.2

Влияние R_1 , R_2 на амплитуду и период повторения выходных импульсов

R_1, R_2 (кОм)	$K_{ОС}$	$U_{M.VЫX}$ (В)	$T_{ПОВТ}$
50, 40			
40, 40			
20, 40			
10, 40			

Построить графики зависимостей $U_{M.VЫX} = f(K_{ОС})$, $T_{ПОВТ} = f(K_{ОС})$ при $R_{ОС} = 100$ кОм и $C = 0,05$ мкФ и сделать выводы.

Задание 1.6.2. Исследование несимметричного мультивибратора

1. Собрать схему мультивибратора, работающего в режиме автоколебаний, приведенного на рис. 1.6.2, при скважности импульсного процесса

$$q = \frac{T_{ПОВТ.}}{t_u^{+, -}} \neq 2.$$

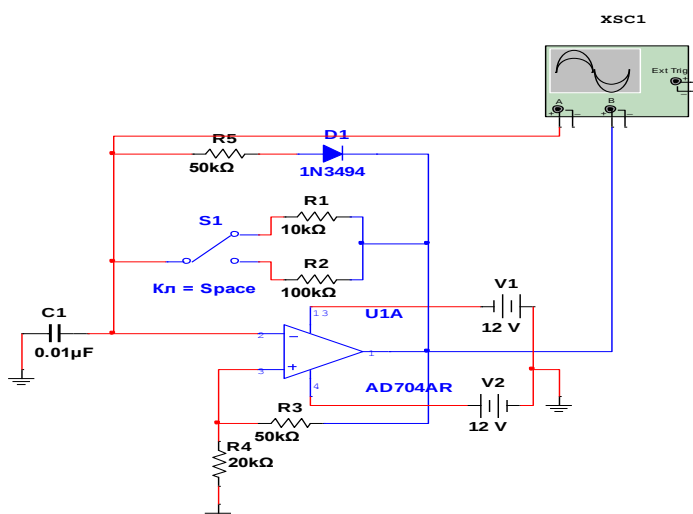


Рис. 1.6.2. Схема для моделирования несимметричного мультивибратора

2. Заполнить табл. 1.6.3 при заданных значениях сопротивлений $R=50\text{ кОм}$, $R_1=20\text{ кОм}$, $R_2=50\text{ кОм}$ и двух значениях $R_{OC}=10\text{ кОм}$ и 100 кОм .

Таблица 1.6.3

Влияние емкости конденсатора на значения $t_{и+,-}$, $T_{повт.}$, $U_{м.вых.} = f(C)$

$R_{oc}, \text{кОм}$	$C, \text{мкФ}$	0,01	0,05	0,06	0,1	0,15	0,2
10	$t_u^+, \text{с}$						
	$T_{повт.}, \text{с}$						
	$U_{м.вых.}, \text{В}$						
100	$t_u^+, \text{с}$						
	$T_{повт.}, \text{с}$						
	$U_{м.вых.}, \text{В}$						

Построить графики зависимостей $U_{м.вых.} = f(C)$, $T_{повт.} = f(C)$, $t_{и} = f(C)$ при различных сопротивлениях обратной связи R_{oc} . На осциллограммах измерить и указать $t_{и}$, $T_{повт.}$, а также амплитуду импульсов и величины нижнего и верхнего пороговых напряжений $U_{п.верх.}$ и $U_{п.нижн.}$.

Задание 1.6.3. Исследование трехвходового инвертирующего сумматора

1. Собрать схему, показанную на рис. 1.6.3. Вольтметр настроить на измерение постоянного напряжения.

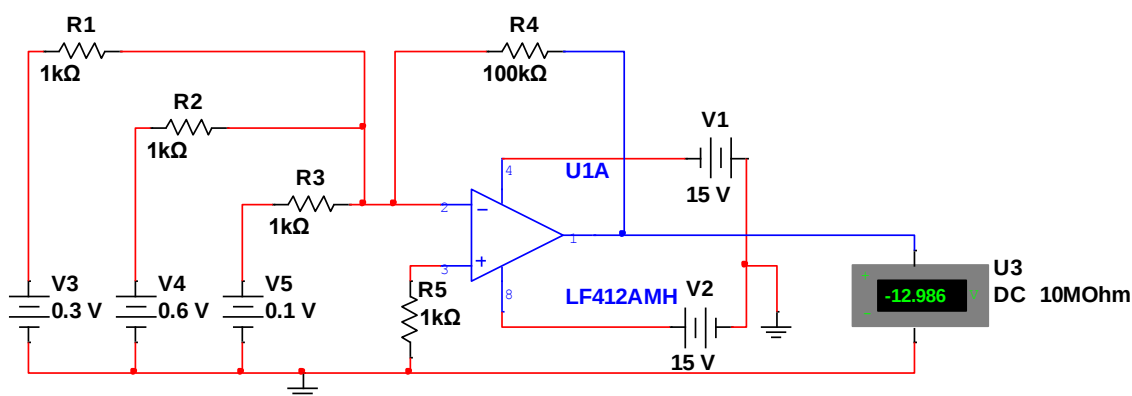


Рис. 1.6.3. Функциональная схема трехвходового инвертирующего сумматора

2. Для всех вариантов устанавливается напряжение питания операционного усилителя $E_{п} = 15\text{ В}$, сопротивление цепи обратной связи $R_{OC} = 100\text{ кОм}$, $R_{КОР} = 1\text{ кОм}$.

3. Рассчитать и установить значения сопротивлений входных цепей схемы (R_1 , R_2 , R_3) такие, чтобы выполнялось реализуемое выражение варианта,

заданное в табл. 1.6.4. Напряжение подключается своим минусом к входу, а плюсом к общей точке, если оно дано со знаком минус.

Выходное напряжение инвертирующего сумматора определяется:

$$\frac{U_{вых}}{R_{ос}} = - \left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots + \frac{U_n}{R_n} \right).$$

Это выражение показывает, что выходное напряжение равно инвертированной сумме входных напряжений, умноженных на отношения сопротивления $R_{ос}$ к сопротивлениям соответствующих входных резисторов.

Если выбрать $R_1=R_2=R_3=R$, то выходное напряжение инвертирующего сумматора выглядит следующим образом:

$$U_{вых} = - \frac{R_{ос}}{R} (U_{вх1} + U_{вх2} + U_{вх3}).$$

Выходное напряжение будет равно инверсной сумме входных напряжений, если выбрать $R_{ос}=R$.

$$U_{вых} = - (U_{вх1} + U_{вх2} + U_{вх3}).$$

4. Рассчитать предполагаемое выходное напряжение сумматора $U_{расч}$ для своего варианта, выбранного из табл. 1.6.4.

Таблица 1.6.4

Варианты для расчета сопротивлений входных цепей схемы

Вариант	Реализуемое выражение	U_1 , В	U_2 , В	U_3 , В
1	$5U_1 + 2U_2 + 4U_3$	-0,1	0,2	0,3
2	$6U_1 + 3U_2 + 5U_3$	-0,2	0,3	0,4
3	$7U_1 + 4U_2 + 6U_3$	-0,3	0,4	0,5
4	$8U_1 + 5U_2 + 7U_3$	-0,4	0,5	0,6
5	$9U_1 + 6U_2 + 8U_3$	-0,5	0,6	0,7
6	$10U_1 + 7U_2 + 9U_3$	0,6	-0,7	0,8
7	$6U_1 + 7U_2 + 6U_3$	0,7	-0,8	0,9
8	$5U_1 + 6U_2 + 5U_3$	0,8	-0,9	1,0
9	$7U_1 + 4U_2 + 5U_3$	0,9	-1,0	1,1
10	$7U_1 + 3U_2 + 6U_3$	1,0	-1,1	1,2

Лабораторная работа № 1.7

Исследование интегратора, дифференцирующего и избирательного усилителей

Цель работы: исследование и изучение принципа работы интеграторов, дифференциаторов и избирательных усилителей, построенных на библиотечных ОУ в среде Multisim. Определение их параметров и характеристик с помощью Боде-плоттера.

Краткие теоретические сведения

Логарифмические амплитудно-и фазо-частотные характеристики (ЛАЧХ) и (ЛФЧХ) являются удобным средством анализа устойчивости линейных систем и служат для расчета корректирующих цепей.

Амплитудно-частотные характеристики строятся в логарифмическом масштабе. По оси ординат откладывают коэффициент усиления, представленный в децибелах, по оси абсцисс откладывают частоту, выраженную в логарифмическом масштабе, удобном для графического представления частотных характеристик.

Децибела (дБ)- отношение амплитуд двух сигналов. $K(\text{дБ}) = 20\lg K$. Интервал частот, отличающихся в 10 раз называют декадой. $20\lg 10 = 20$ дБ наклон характеристики +20 дБ/дек.

Реальный операционный усилитель имеет: коэффициент усиления $K = 10^3 - 10^6$, частоту единичного усиления $f_{\text{ед}}$ – частота, при которой коэффициент усиления ОУ равен единице, составляет 0,5 – 10 МГц.

Частота среза определяется из частоты единичного усиления $f_{\text{ед}}$ и коэффициента усиления реального операционного усилителя по АЧХ характеристике или логарифмической АЧХ (ЛАЧХ) на рис. 1.7.1.

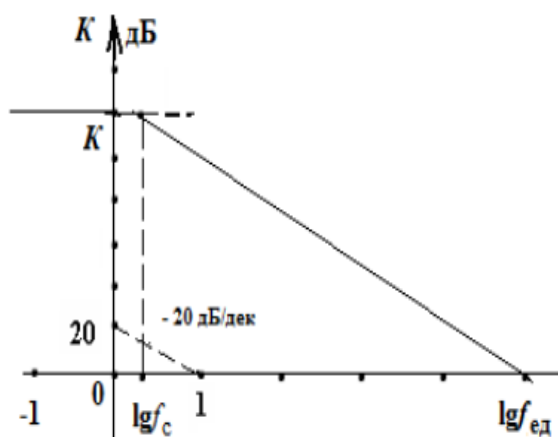


Рис. 1.7.1. ЛАЧХ ОУ

Коэффициент усиления снижается из-за инерционности на верхних частотах операционного усилителя, начиная с частоты среза f_c (точка излома логарифмической амплитудно-частотной характеристики ОУ), и скорость спада АЧХ составляет -20 дБ/дек до частоты единичного усиления, рис. 1.7.2.

Снятие ЛАЧХ и ЛФЧХ усилителя с помощью Бode-плоттера. Снять ЛАЧХ и ЛФЧХ усилителя с помощью Бode-плоттера, который представлен на рисунке 1.7.2. Для снятия ЛАЧХ выбрать в опции «Mode» режим «Magnitude». Вводить параметры горизонтальной и вертикальной шкал, как указано на рис. 1.7.2, шкала должна быть логарифмическая.

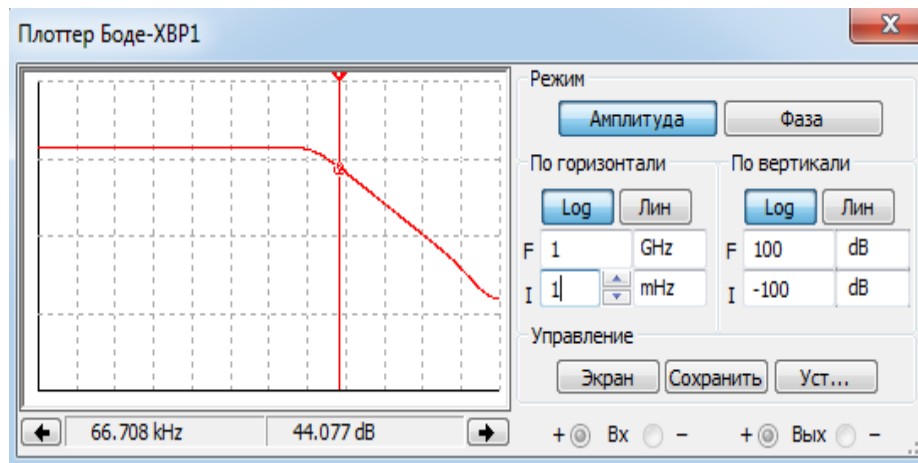


Рис. 1.7.2. ЛАЧХ активного фильтра на экране Бode-плоттера

Задание 1.7.1. Исследование интегратора

Собрать схему интегратора, приведенную на рис. 1.7.3.

Установить параметры операционного усилителя: двойным щелчком левой мышкой на ОУ открыть его окно и установить $F_U = 10 \text{ МГц}$.

Установить параметры генератора: выбрать прямоугольную форму сигнала, частоту 5 кГц, заполнение 50%, амплитуду сигнала 1 мВ, смещение 0.

Установить емкость конденсатора $C_1 = 10 \text{ пФ}$, $R_2 = 10 \text{ МОм}$, сопротивление резистора R_1 выбрать из таблицы 1.7.1 согласно варианту.

Включить схему. Определить максимальный коэффициент усиления с помощью Бode-плоттера, по уровню 3дБ определить коэффициент усиления на нижней и верхней частотах, рассчитать полосу пропускания, выходное напряжение, т. е. показание вольтметра. Результаты измерений и вид ЛАЧХ занести в табл. 1.7.2.

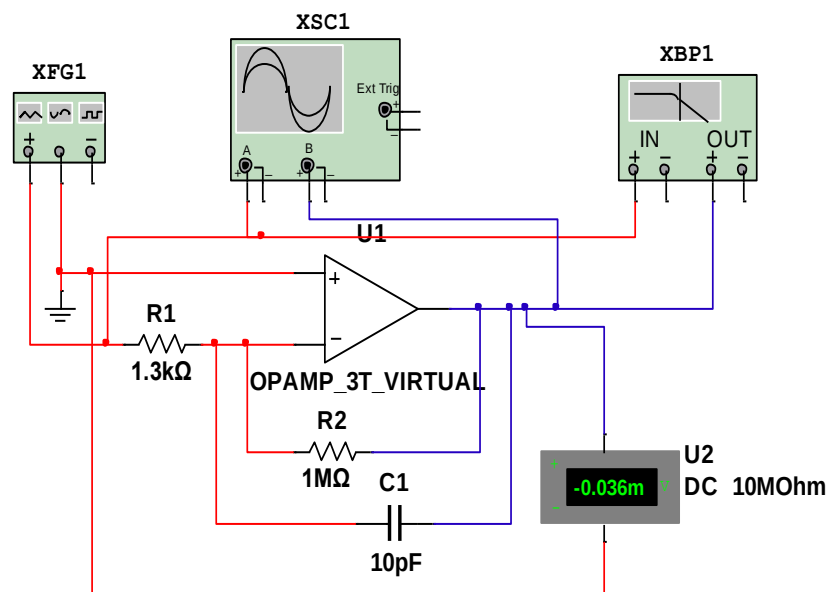


Рис. 1.7.3. Схема моделирования интегратора

Таблица 1.7.1

Варианты заданий

Вариант	Интегратор	Дифференциатор	Избирательный	
	R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_2 , кОм	$C1=C2$, нФ
1	1	1	16	33
2	1,3	1,3	18	22
3	1,7	1,7	20	40
4	2	2	33	56
5	2,3	2,3	24	68
6	2,7	2,7	27	33
7	3	3	30	22
8	3,3	3,3	40	40
9	3,7	3,7	56	27
10	4	4	33	33
11	4,3	4,3	43	47
12	4,7	4,7	47	68

Таблица 1.7.2

Результаты моделирования

Название усилителя	$K_{\text{макс}}$, Дб	$K_{\text{в}}$, Дб	$K_{\text{н}}$, Дб	Δf , Гц	$U_{\text{вых}}$, В	Вид ЛАЧХ
Интегратор						
Дифференциатор						
Избирательный						

Построить графики и сделать выводы.

Задание 1.7.2. Исследование дифференцирующего усилителя

Собрать схему дифференциатора, приведеную на рис.1.7.4, параметры ОУ установить как в предыдущем задании 1.7.1.

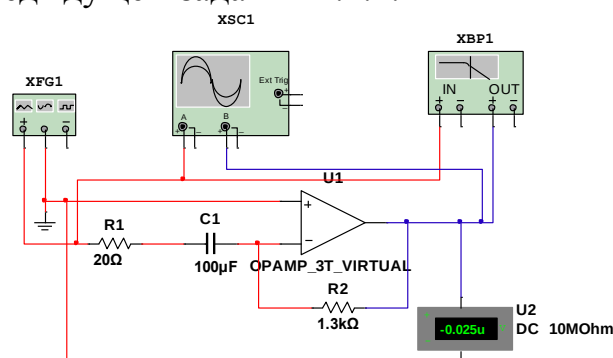


Рис. 1.7.4. Дифференциатор на ОУ

Установить параметры генератора: выбрать прямоугольную форму сигнала, частоту 1 кГц, заполнение 50%, амплитуду сигнала 1 мВ, смещение 0.

Установить емкость конденсатора $C1=100$ мкФ, сопротивление резистора $R1=20$ Ом, $R2$ согласно варианту из табл. 1.7.1.

Снять ЛАЧХ усилителя с помощью Бode-плоттера, определить максимальный коэффициент усиления, по уровню 3 Дб определить коэффициент усиления на нижней и верхней частотах, показание вольтметра, рассчитать полосу пропускания. Результаты измерений и вид ЛАЧХ занести в табл. 1.7.2. Сделать вывод. Снять и добавить в отчет осциллограмму входного и выходного напряжений.

Задание 1.7.3. Исследование избирательного усилителя с использованием Бode-плоттера

Собрать схему избирательного усилителя на рис. 1.7.5, параметры ОУ и параметры генератора установить как в задании 1.7.1.

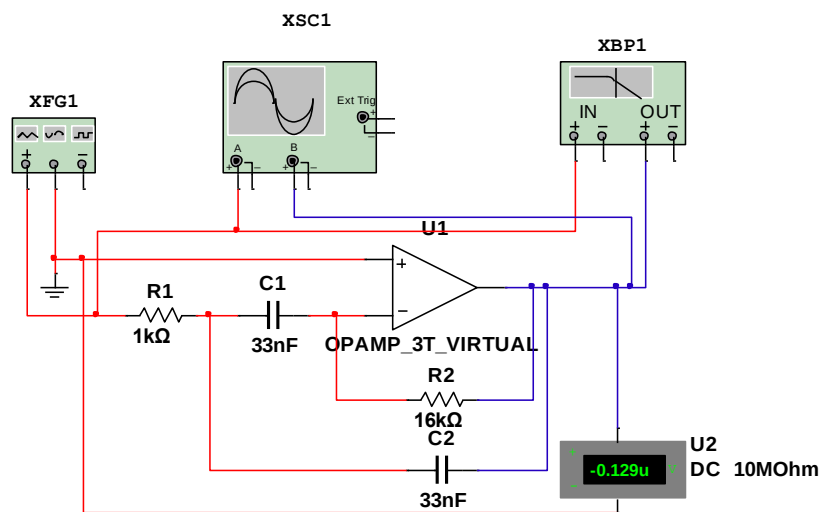


Рис. 1.7.5. Избирательный усилитель

Установить емкость конденсатора $C1 = C2$ и $R2$ согласно варианту из табл. 1.7.1, сопротивление резистора $R1 = 1 \text{ кОм}$. Включить схему.

Снять ЛАЧХ усилителя с помощью Бode-плоттера. Определить максимальный коэффициент усиления и квазирезонансную частоту, используя указатель Бode-плоттера. Снять показание вольтметра.

Результаты показаний и вид ЛАЧХ занести в табл. 1.7.2. Сделать вывод.

Снять и добавить в отчет осциллограмму выходного сигнала.

Контрольные вопросы

1. Что такое интегратор? Схема. Основные свойства.
2. Что такое дифференциатор? Схема. Основные свойства.
3. Что такое сумматор? Схема. Основные свойства.
4. Что такое избирательный усилитель? Его основные свойства.
5. Как можно задать коэффициент усиления инвертирующего усилителя?
6. Как можно с помощью частотного анализатора определить полосу пропускания инвертирующего усилителя?

Лабораторная работа № 1.8

Исследование фильтров нижних и высоких частот на базе операционного усилителя

Цель работы: научиться рассчитывать активный низкочастотный и высокочастотный фильтры, построенные на основе ОУ в среде multisim.

Задание 1.8.1. Исследование фильтра нижних частот (ФНЧ)

Схема активного фильтра нижних частот показана на рис. 1.8.1, а его передаточная функция представлена на рис. 1.8.2.

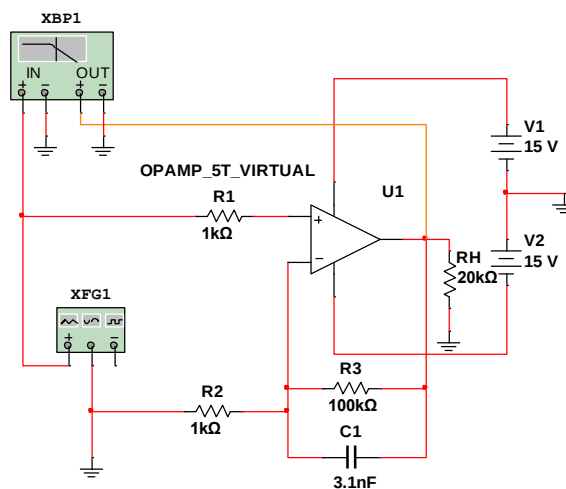


Рис. 1.8.1. Схема для моделирования активного фильтра НЧ

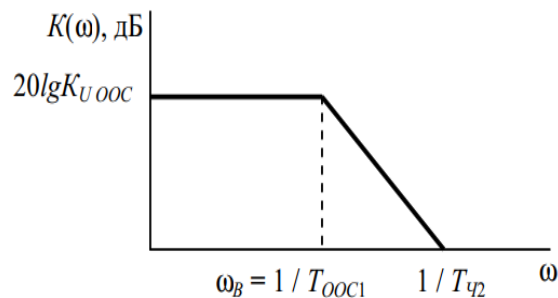


Рис. 1.8.2. Передаточная функция активного ФНЧ

Передаточная функция четырёхполюсника, включённого в цепь отрицательной обратной связи операционного усилителя имеет вид:

$$W(p) = \frac{K_u(1 + \tau_1 p)}{(1 + \tau_2 p)},$$

где $K_u = \frac{R_{KOP}}{R_{KOP} + R_{OC}}$, $\tau_1 = R_{OC}C_{OC}$, $\tau_2 = \frac{R_{KOP}R_{OC}C_{OC}}{R_{KOP} + R_{OC}}$.

Передачная функция операционного усилителя с передаточной функцией $W_{\varphi}(p)$ в цепи отрицательной обратной связи определяется из заключения, что полоса пропускания данного фильтра зависит от коэффициента усиления самого операционного усилителя и лежит в диапазоне частот $0 \leq \omega \leq \frac{1}{\tau_{оод}}$.

Есть два часто используемых способа для получения фильтра с большим наклоном логарифмической амплитудно-частотной характеристики после частоты среза (40, 60 и более дБ/дек) – это каскадное включение нескольких аналогичных фильтров, или использование более сложного четырёхполосника в цепи обратной связи.

1. Спроектировать активный фильтр нижних частот с коэффициентом передачи K_U и верхней частотой f_B . Коэффициент усиления самого операционного усилителя равен K_{U0} . Операционный усилитель имеет постоянную времени τ_{OY} .

2. С помощью программы multisim проверить результаты расчетов, установив для всех вариантов следующие параметры схемы: E_{II} (V1, V2) = ± 15 В, $u_{BX} = 50$ мВ, R_{BX} (R_1) = 200 Ом, R_H (R_H) = 20 кОм. Все параметры для моделирования и расчета взять из таблицы по вариантам.

Таблица

Параметры для расчета фильтра нижних частот на ОУ

Вариант	K_U	f_B , Гц	K_{U0}	τ , с ⁻³
1	55	200	100 000	0,2
2	60	250	150 000	0,25
3	65	300	200 000	0,3
4	70	350	250 000	0,35
5	75	400	100 000	0,2
6	80	450	150 000	0,25
7	85	500	200 000	0,3
8	90	550	250 000	0,35
9	95	600	100 000	0,2
10	100	650	150 000	0,25
11	105	700	200 000	0,3
12	110	750	250 000	0,35

Пример расчета фильтра нижних частот

Необходимо спроектировать активный фильтр нижних частот с коэффициентом передачи $K_U = 100$ и верхней частотой $f_B = 500$ Гц. Коэффициент усиления операционного усилителя выбрать равным $K_{U0} = 200000$, постоянная времени операционного усилителя будет равна $\tau = 0,03$ с.

Решение

1. Верхняя круговая частота полосы пропускания $\omega = 2\pi f_B = 2\pi \cdot 500 = \pi \cdot 10^3$.

2. Для определения коэффициента передачи цепи отрицательной обратной связи по постоянному току используем формулу

$$K_{U\ ooc} = \frac{K_{U0}}{1 + K_q K_{U0}}, K_q = \frac{K_{U0} - K_{U\ ooc}}{K_{U0} K_{U\ ooc}} = \frac{200000 - 100}{200000 \cdot 100} = 0,009995.$$

$$3. \text{ Требуемая постоянная времени } \tau_{ooc2} = \frac{1}{\omega_\epsilon} = \frac{1}{1000\pi} = 3,18 \cdot 10^{-4}.$$

4. Для рассчитываемой схемы фильтра имеем $\tau_1 > \tau_2$,

$$K_{U0} K_q = 200\,000 \cdot 0,009995 = 1999 \gg 1.$$

Тогда с достаточной точностью можно считать, что $\tau_{ooc2} \approx \tau_1 = R_{OC} C_{OC}$.

Примем $R_{KOP} = 1$ кОм. Тогда $R_{OC} = K_{U\ ooc} R_{KOP} = 100 \cdot 1000 = 100$ кОм;

$$C_{OC} = \frac{\tau_{ooc2}}{R_{OC}} = \frac{3,18 \cdot 10^{-4}}{100 \cdot 10^3} = 3,18 \text{ нФ}.$$

Проверка правильности решения:

1. Запускаем программу multisim. Собираем схему на рис. 1.8.3.

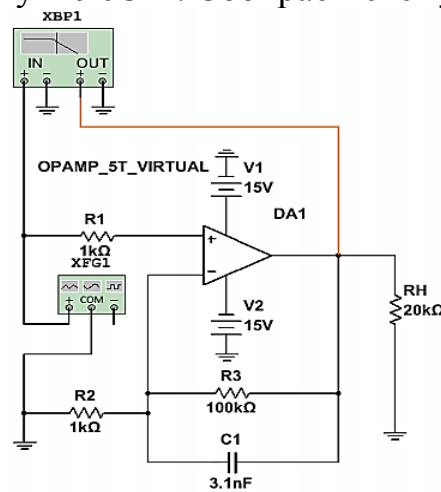


Рис. 1.8.3. Схема для моделирования разрабатываемого активного фильтра нижних частот

2. На схеме устанавливаем все рассчитанные значения.

3. На рис. 1.8.4 показана проверка коэффициента передачи фильтра на близкой к нулевой частоте, и сравниваем полученное значение с помощью программы multisim, с заданным значением $K_{U\ ooc}$.

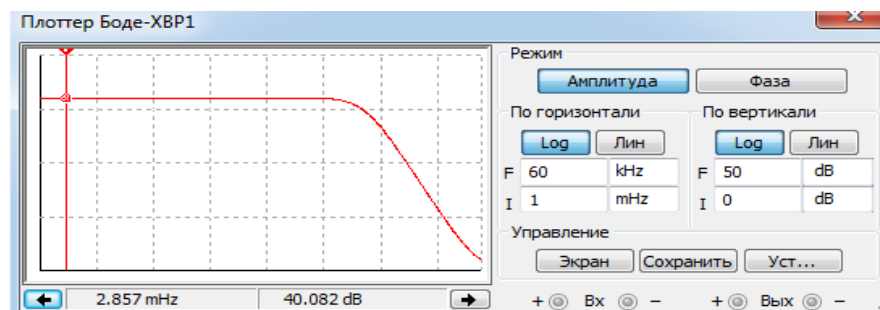


Рис. 1.8.4. АЧХ рассчитанного фильтра нижних частот.
Линия пересечения на f_n

По АЧХ рис. 1.8.4 можно сделать вывод, что рассчитанный коэффициент усиления на нижних частотах (100 раз) соответствует заданному (100 раз или 40 дБ).

4. На рис. 1.8.5 показана проверка коэффициента передачи фильтра по уровню 0,707 от значения нулевой частоты, и сравниваем с расчётным значением полученное значение с помощью программы multisim.

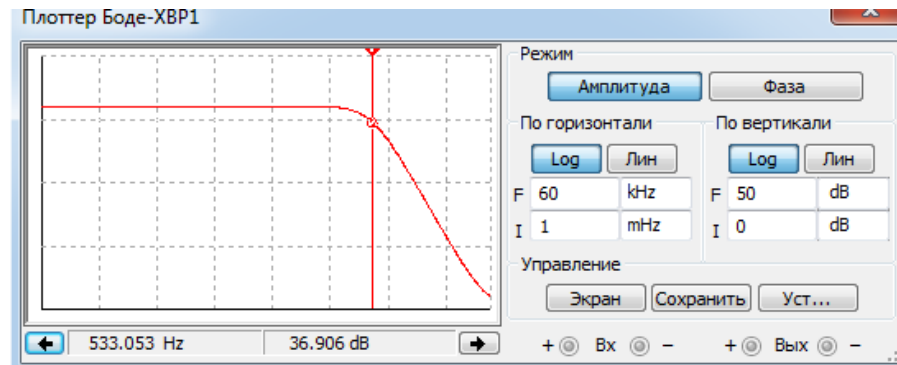


Рис. 1.8.5. АЧХ моделируемого фильтра нижних частот.
Линия пересечения на f_B

По АЧХ рис. 1.8.5 можно сделать вывод, что верхняя частота фильтра f_B по уровню 0,707 от уровня на нулевой частоте (530 Гц) приблизительно отвечает заданной частоте (500 Гц).

Все полученные результаты проверки говорят о том, что расчёт фильтра выполнен верно.

Задание 1.8.2. Исследование фильтра высоких частот

Схема активного фильтра высоких частот (ФВЧ) показана на рис. 1.8.6.

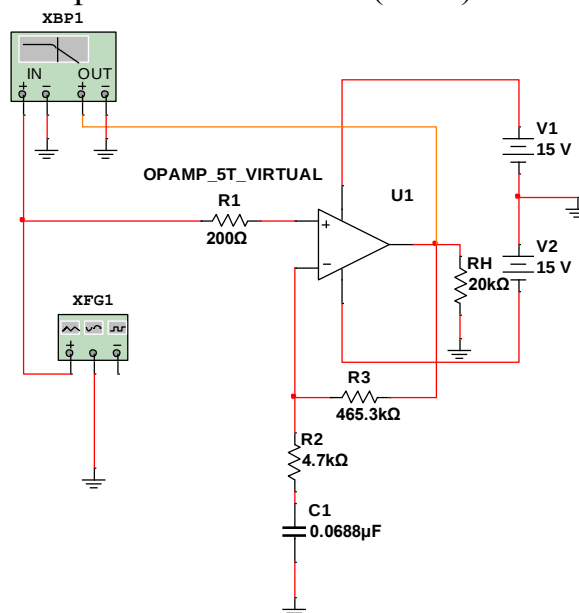


Рис. 1.8.6. Схема исследуемого активного ФВЧ

Передаточная функция активного фильтра верхних частот имеет вид, показанный на рис. 1.8.7.

Передаточная функция четырёхполюсника, включённого в цепь отрицательной обратной связи операционного усилителя, имеет вид:

$$W_{OY\ ooc}(p) = \frac{K_{U0}}{1 + W_q(p)K_{U0}} = \frac{K_{U\ ooc}(1 + \tau_2 p)}{\frac{(\tau_2 + \tau_1 K_{U0})p}{(1 + K_{U0})} + 1} = \frac{K_{U\ ooc}(1 + \tau_2 p)}{1 + \tau_{OOC} p}$$

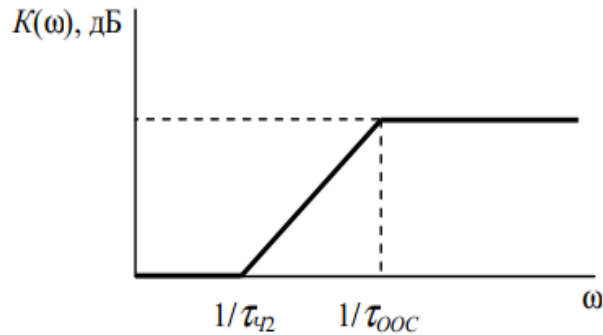


Рис. 1.8.7. Передаточная функция активного фильтра верхних частот

$$\tau_1 = R_{OC2}C_{OC}, \quad \tau_2 = (R_{OC1} + R_{OC2})C_{OC},$$

$$K_{U\ ooc} = \frac{K_{U0}}{1 + K_{U0}}, \quad \tau_{OOC} = \frac{\tau_2 + \tau_1 K_{U0}}{(1 + K_{U0})}.$$

Как видно из рис. 1.8.7 асимптота с наклоном +20 дБ/дек начинается первой на передаточной функции, так как $\tau_2 \gg \tau_{OOC}$.

Коэффициент передачи данного фильтра почти равен единице до частоты $\omega = \frac{1}{\tau_2}$, а асимптота с наклоном +20 дБ/дек начинается после этой частоты и

заканчивается на частоте $\omega = \frac{1}{\tau_{OOC}}$. Полоса пропускания определяется диапа-

$$\text{зоном } \frac{1}{\tau_{OOC}} < \omega < \frac{1 + \frac{K_{U0}R_{OC2}}{R_{OC1} + R_{OC2}}}{\tau_{OY}}.$$

Коэффициент передачи в полосе пропускания высокочастотного фильтра равен $K_{OOC} = 1 + \frac{R_{OC1}}{R_{OC2}}$.

1. Спроектировать активный фильтр высокой частоты (рис. 1.8.6.) с коэффициентом передачи K_U и нижней частотой f_H . Коэффициент усиления самого операционного усилителя K_{U0} и имеет постоянную времени τ_{OY} .

2. С помощью программы multisim проверить результаты расчетов, установив для всех вариантов следующие параметры схемы: $E_H (V1, V2) = 15 \text{ В}$, u_{BX}

= 50 мВ, $R_{BX} (R_1) = 200 \text{ Ом}$, $R_H (R_H) = 20 \text{ кОм}$. Все параметры для моделирования и расчета взять из таблицы по вариантам.

Пример расчета фильтра высоких частот

Необходимо спроектировать активный фильтр верхних частот с коэффициентом передачи $K_U = 100$ и нижней частотой $f_H = 500 \text{ Гц}$. Коэффициент усиления операционного усилителя выбрать равным $K_{U0} = 200\,000$, постоянная времени операционного усилителя составляет $\tau = 0,03 \text{ с}$.

Решение

1. Верхняя круговая частота полосы пропускания $\omega = 2\pi f_B = 2\pi \cdot 500 = \pi \cdot 10^3$.

2. Коэффициент передачи цепи отрицательной обратной связи на верхней частоте $B_{OC} = \frac{R_{OC2}}{R_{OC1} + R_{OC2}} = \frac{(K_{U0} - K_U)}{K_{U0} \cdot K_U} = \frac{200000 - 100}{200000 \cdot 100} = 9,995 \cdot 10^{-3}$.

3. Так как коэффициент усиления ОУ $K_{U0} \gg 1$, и, несмотря на то, что $\tau_1 < \tau_2$, можно считать равными $\tau_{OOC} \approx \tau_1$.

4. Примем $R_{OC2} = 4,7 \text{ кОм}$. Тогда

$$C_{OC} = \frac{1}{R_{OC2} \omega_H} = \frac{1}{4,7 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot 10^3} = 0,0688 \text{ мкФ}.$$

5. Определим сопротивление резистора R_{OC1} , используя формулу $K_{OOC} = 1 + \frac{R_{OC1}}{R_{OC2}} \rightarrow R_{OC1} = \frac{K_{OOC} - 1}{R_{OC2}} = (100 - 1) \cdot 4,7 = 465,3 \text{ кОм}$.

Проверка правильности решения:

1. Запускаем программу multisim. Собираем схему, показанную рис.1.8.8.

Для правильного моделирования установим визирную линию, как показано на рис. 1.8.9, характериографа на среднюю частоту для проверки соответствия расчётного и заданного коэффициентов усиления. Затем, как показано на рис. 1.8.10, установить визирную линию характериографа по уровню 0,707 от значения нулевой частоты для определения нижней граничной частоты (f_H), и также для определения верхней граничной частоты (f_B).

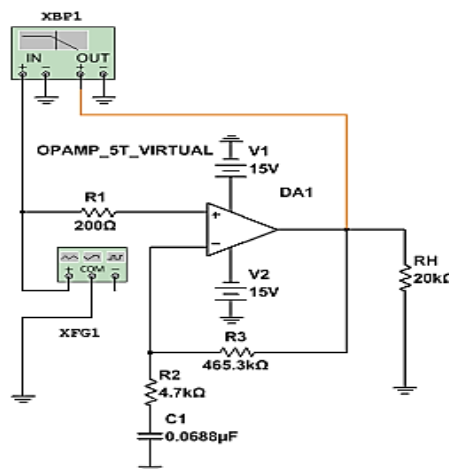


Рис. 1.8.8. Схема активного фильтра верхних частот

По амплитудно-частотной характеристике, приведенной на рис.1.8.9, можно сделать вывод, что рассчитанный коэффициент усиления (100 раз) на средней частоте соответствует заданному (100 раз или 40 дБ).

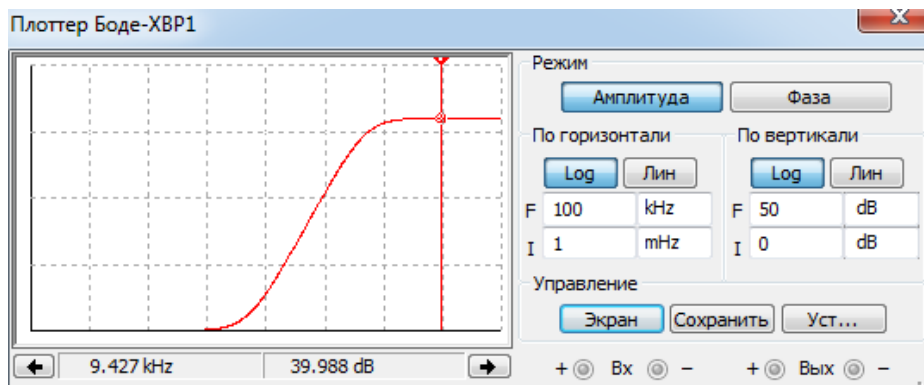


Рис. 1.8.9. АЧХ активного фильтра верхних частот.
Линия пересечения на средней частоте

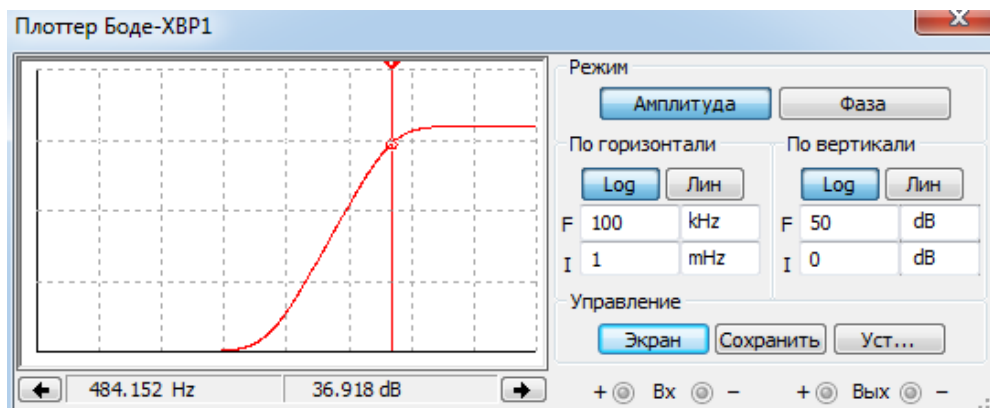


Рис. 1.8.10. АЧХ активного фильтра верхних частот.
Линия пересечения на нижней частоте

По АЧХ рис. 1.8.10 видно, что нижняя частота f_n фильтра по уровню 0,707 от уровня на нулевой частоте (484 Гц) приблизительно отвечает заданной частоте (500 Гц).

Все полученные результаты проверки говорят о том, что расчёт фильтра выполнен верно.

Лабораторная работа № 1.9

Исследование схем электронных генераторов. RC – генераторы

Цель работы: изучить принципы построения генераторов и методы их исследования с применением программного продукта Multisim.

Порядок выполнения работы:

Задание 1.9.1. Исследование генератора с мостом Вина

Собрать схему, приведенную на рис. 1.9.1.

Генератор с мостом Вина представляет собой двуступенчатый RC-усилитель со связанными усилителями, который обладает хорошей стабильностью на своей резонансной частоте, низким уровнем искажений и очень прост в настройке. В качестве цепи обратной связи выступает мост Вина – Робинсона (мост Вина), представленный на рис. 1.9.1, где R1C1 образуют фильтр верхних частот, а R2C2 – фильтр нижних частот. Сопротивления резисторов и емкости конденсаторов выбраны одинаковыми в продольной и поперечной ветвях моста, чтобы упростить выводимые соотношения. Передаточная функция моста

$$H_{oc}(j\omega) = \frac{j\omega}{-\omega^2 + j3\omega + \frac{1}{RC}}.$$

Амплитудно-частотная характеристика принимает максимальное значение, равное 1/3, на частоте $\omega_0 = 1/\sqrt{RC}$. Значение фазочастотной характеристики на этой частоте равно нулю. Если коэффициент передачи усилителя $A=3$ и $R1/R2=2$, то на частоте ω_0 выполняется условие баланса амплитуд.

Фазосдвигающая цепочка создает положительную обратную связь (ПОС), напряжение которой подается на неинвертирующий вход операционного усилителя. При замкнутой цепи коэффициент усиления усилителя обратной связи должен быть немного больше 3, так как коэффициент передачи цепи положительной обратной связи $\beta=1/4$, то есть сопротивление R_3 должно быть в четыре раза больше R_4 . Из условий $R_1 = R_2$ и $C_1 = C_2$ определяется необходимое деление сигнала положительной обратной связи. Делитель переменного напряжения образуют реактивные плечи моста.

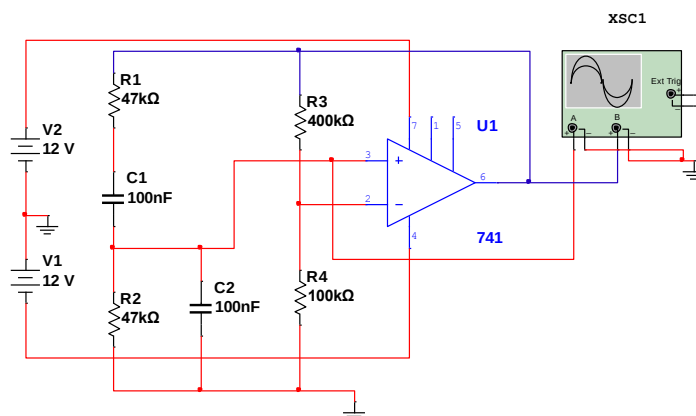


Рис. 1.9.1. RC-генератор с мостом Вина

1. Для заданных на схеме параметров элементов с помощью осциллографа определить частоту.

2. Заполнить табл. 1.9.1, анализируя влияние на частоту величин сопротивлений резисторов $R1$ и $R2$ (условие $R1 = R2$).

Таблица 1.9.1

Результаты влияния величин резисторов $R1$ и $R2$ на частоту

$R1=R2$, кОм	2.5	5	10	20	47
$C1=C2$, нФ	42	42	42	42	42
f , Гц					

Построить график зависимости частоты от изменений резисторов $R1$ и $R2$.

3. Заполнить табл. 1.9.2, анализируя влияние на частоту изменения величин емкостей $C1$ и $C2$.

Таблица 1.9.2

Результаты влияния величин емкостей $C1$ и $C2$ на частоту

$R1=R2$, кОм	20	20	20	20	20
$C1=C2$, нФ	10	20	42	82	100
f , Гц					

Построить график зависимости частоты от изменения емкостей конденсаторов $C1$ и $C2$.

Задание 1.9.2. Исследование релаксационного генератора

Зарядим конденсатор через резистор (или источник тока), а когда напряжение достигнет некоторого порогового значения, разрядим и начнем цикл сначала. Это можно сделать с помощью внешней цепи, обеспечивающей изменения полярности тока заряда при достижении некоторого порогового напряжения, будут генерироваться колебания треугольной формы, а не пилообразные. Генераторы, построенные на этом принципе, называются «релаксационными генераторами» (рис. 1.9.2).

Для исследования релаксационного генератора необходимо собрать схему, показанную на рис. 1.9.2. Параметры генератора выбрать из табл.1.9.3 по вариантам.

Таблицы 1.9.3

Варианты параметров генератора

Вариант	$R1$, кОм	$C2$, нФ	Вариант	$R1$, кОм	$C2$, нФ	Вариант	$R1$, кОм	$C2$, нФ
1	2,5	10	9	5	82	17	20	20
2	2,5	20	10	5	100	18	20	42
3	2,5	42	11	10	10	19	20	82
4	2,5	82	12	10	20	20	20	100
5	2,5	100	13	10	42	21	47	10
6	5	10	14	10	82	22	47	20
7	5	20	15	10	100	23	47	42
8	5	42	16	20	10	24	47	82

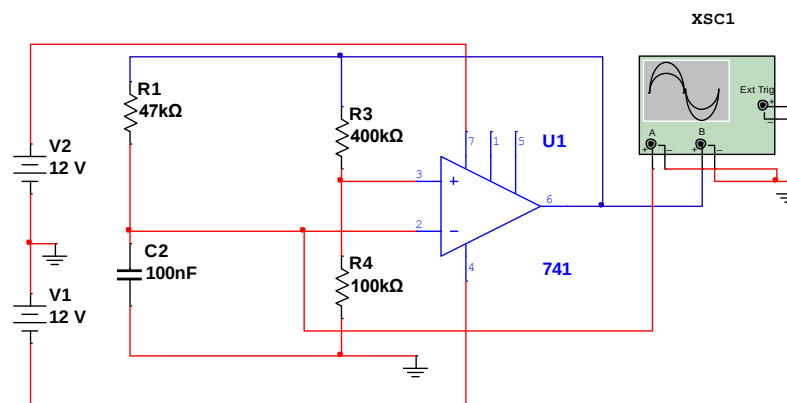


Рис. 1.9.2. Схема исследования релаксационного генератора

Выходной сигнал ОУ выходит на положительное насыщение $+U_{вых.мах}$ при первой подаче напряжения. Конденсатор начинает заряжаться до напряжения $+U_{вых.мах}$ с постоянной времени, равной $R_1 C_2$. Операционный усилитель переключается в состояние отрицательного насыщения (он включен как триггер Шмитта) при достижении напряжения конденсатора половины напряжения $+U_{вых.мах}$ (это определяется соотношением сопротивлений резисторов $R_4 / (R_3 + R_4)$). Переключение триггера на $+U_{вых.мах}$ происходит при достижении половины напряжения $-U_{вых.мах}$. Конденсатор начинает перезаряжаться до $+U_{вых.мах}$ с постоянной времени, равной $R_1 C_2$. Цикл повторяется бесконечно, с периодом $2,2 R_1 C_2$, не зависящим от напряжения питания.

1. Снять осциллограммы и оценить форму колебаний, определить частоту колебаний генератора.

2. Исследовать влияние изменения величины емкости C_2 . В меню "Simulate" выбрать команду "Analysis" и режим работы "Parameter Sweep". В качестве изменяемого параметра в окне "Sweep Parameters" (закладка "Analysis Parameters") выбрать емкость конденсатора C_2 . В окне "Points to Sweep" в строке "Sweep Variation Tips" установить "List" и внести три значения емкости конденсатора C_2 , отличающиеся от указанного в схеме модели на $\pm 20\%$. В строке «Analysis to sweep» устанавливается "Transient Analysis", кнопкой "Edit analysis" вызывается окно настройки параметров переходного процесса, где обязательно должно быть выбрано время моделирования. На закладке "Output" выделяется номер точки, в которой необходимо исследовать сигнал, и пересылается в правое окно. Произвести моделирование переходных процессов в исследуемом генераторе нажатием кнопки «Simulate». Если осциллограммы колебаний генератора имеют неудобную форму для наблюдения и исследования, то скорректировать время переходного процесса и повторить моделирование. Обработать результаты моделирования с использованием измерительного инструмента, вызываемого нажатием кнопки «Show/Hide Cursors» на панели «Grapher View». Полученные результаты измерения частоты генератора при изменении C_2 внести в табл. 1.9.4.

Таблица 1.9.4

Зависимость частоты от изменения величины конденсатора C_2

R_1 , кОм	R_1	R_1	R_1
C_2 , нФ	$0,8C_2$	C_2	$1,2C_2$
f , Гц			

На основе полученных данных таблицы 1.9.4 построить зависимости частоты от изменения величины конденсатора C_2 и сравнить полученные данные с показанием осциллографа.

3. Занести в табл. 1.9.5 результаты влияния на частоту изменения величины сопротивления резистора R_1 .

Таблица 1.9.5

Зависимость частоты от изменения величины резистора R_1

R_1 , кОм	$0,8R_1$	R_1	$1,2R_1$
C_2 , нФ	C_2	C_2	C_2
f , Гц			

На основе полученных данных табл. 1.9.5 построить график зависимости частоты от изменения величины сопротивления резистора R_1 и сравнить полученные данные с показанием осциллографа.

4. Исследовать влияние температуры на частоту генератора. Исследование провести в режиме «*Temperature Sweep*» для температуры от 0°C до 100°C с интервалом 10°C .

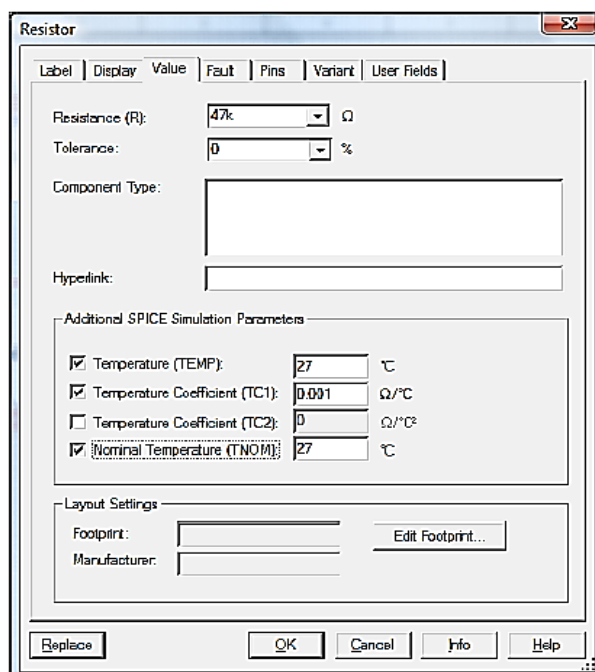


Рис. 1.9.3. Настройка параметров резистора

Для всех резисторов исследуемой схемы внести установку температурного коэффициента сопротивления, например, $TC1=0.001$ после двойного щелчка по графическому изображению резистора (рис. 1.9.3). Коэффициент $TC2$ оставить нулевого значения. Работа в режиме «*Temperature Sweep*» аналогична работе в режиме «*Parameter Sweep*». Итогом исследования будут получены два сигнала на одном графике, которые соответствуют разным температурам. Определить температурную стабильность генератора.

Задание 1.9.3. Исследование RC – генератора на логических элементах

Для исследования RC - генератора необходимо собрать схему на рис. 1.9.4.

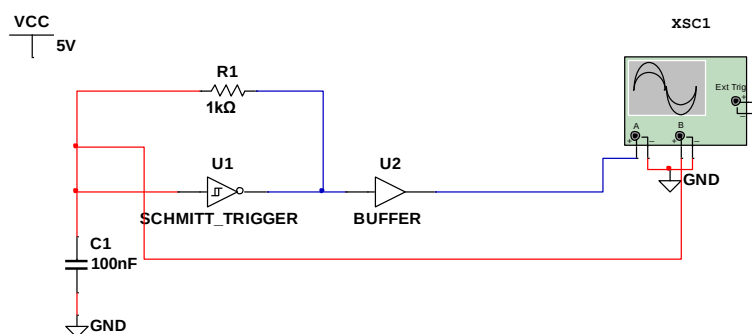


Рис. 1.9.4. Схема RC – генератора на логических элементах

Данный генератор построен с использованием триггера Шмитта и характеризуется высокой стабильностью, изначально его конденсатор $C1$ разряжен и заряжаться через резистор $R1$ и входное напряжение элемента VCC при установлении на выходе триггера напряжения высокого уровня, а затем выход триггера устанавливается в состояние напряжения низкого уровня при достижении напряжения на конденсаторе порогового уровня, и конденсатор снова начинает разряжаться до момента отпускания триггера и перехода его выхода в состояние высокого уровня. Цикл повторяется, и при изменении значений элементов $C1$ и $R1$ изменяется частота генерации.

Для моделирования схемы выбрать параметры генератора из табл. 1.9.6. в соответствии с вариантом.

Таблица 1.9.6

Параметры схемы генератора

Вариант	R1, кОм	C2, нФ	Вариант	R1, кОм	C2, нФ	Вариант	R1, кОм	C2, нФ
1	2	10	9	1,5	82	17	0,68	20
2	2	20	10	1,5	100	18	0,68	42
3	2	42	11	1,0	10	19	0,68	82
4	2	82	12	1,0	20	20	0,68	100
5	2	100	13	1,0	42	21	0,68	110
6	1,5	10	14	1,0	82	22	0,68	120
7	1,5	20	15	1,0	100	23	0,68	150
8	1,5	42	16	0,68	10	24	0,68	200

1. Для исследования влияния изменения величины емкости $C1$ на частоту, необходимо в меню «*Simulate*» выбрать команду «*Analysis*» и режим работы «*Parameter Sweep*». Результаты измерений внести в табл. 1.9.7.

Таблица 1.9.7

Влияние величины емкости $C1$ на частоту

R_1 , кОм	R_1	R_1	R_1
C_2 , нФ	$0,8C_1$	C_1	$1,2C_1$
f , Гц			

На основе полученных данных таблицы 1.9.7 построить график зависимости частоты от изменения величины конденсатора $C1$, и сравнить полученные данные с показанием осциллографа.

2. Занести в табл. 1.9.8 результаты влияния на частоту изменения величины сопротивления резистора $R1$.

Таблица 1.9.8

Влияние величины сопротивления резистора $R1$ на частоту

R_1 , кОм	$0,8R_1$	R_1	$1,2R_1$
C_2 , нФ	C_1	C_1	C_1
f , Гц			

На основе полученных данных табл. 1.9.8 построить график зависимости частоты от изменения величины конденсатора $R1$, и сравнить полученные данные с показанием осциллографа.

3. Исследовать влияние температуры на частоту генератора. Исследование провести в режиме «*Temperature Sweep*» для температуры от 0°C до 100°C с интервалом 10°C .

Для всех резисторов исследуемой схемы внести установку температурного коэффициента сопротивления, например, $T_{C1}=0,001$. Коэффициент T_{C2} оставить равным нулю. Итогом исследования будут получены сигналы на одном графике, соответствующие разным температурам. Обработать полученный экспериментальный материал известными способами и определить частоты генератора на различных температурах. Определить температурную стабильность генератора.

Лабораторная работа № 1.10

Исследование схем генераторов с обратной LC-связью.

Генератор Колпитца, генератор Клаппа

Цель работы: изучить принципы построения генераторов и методы их исследования с применением программного продукта Multisim.

Теоретические сведения

Использование генератора, стабилизированного LC-контуром, позволяет получить высокочастотные синусоидальные колебания. LC-контур настроен на определенную частоту и подключен к усилительной схеме, чтобы обеспечить необходимое усиление на его резонансной частоте. Охватывающая схему петля ПОС используется для поддержания колебаний на резонансной частоте LC-контура. Применяемые в генераторах контуры показаны на рис. 1.10.1.

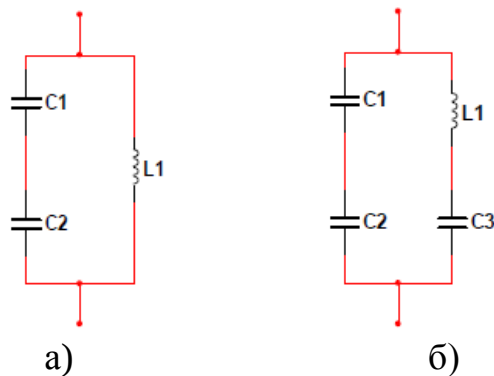


Рис. 1.10.1. Схемы контуров обратной связи
а – LC-контур Колпитца; б – LC-контур Клаппа

Задание 1.10.1. Исследование генератора Колпитца

Для выполнения лабораторного задания необходимо собрать схему на рис. 1.10.2.

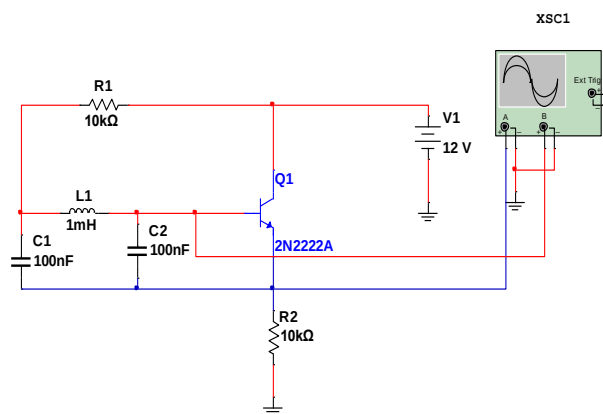


Рис.1.10.2. Схема генератора Колпитца

На схеме к каналу А осциллографа подключено выходное напряжение, а к каналу Б подключен сигнал обратной связи, формируемые с генератора Колпитца.

Параметры схемы генератора выбрать из табл. 1.10.1.

Таблица 1.10.1

Варианты параметров для моделирования генератора Колпитца

Вариант	L1, мГн	C1=C2, нФ	Вариант	L1, мГн	C1=C2, нФ	Вариант	L1, мГн	C1=C2, нФ
1	1	10	9	2	82	17	4	20
2	1	20	10	2	100	18	4	42
3	1	42	11	3	10	19	4	82
4	1	82	12	3	20	20	4	100
5	1	100	13	3	42	21	5	10
6	2	10	14	3	82	22	5	20
7	2	20	15	3	100	23	5	42
8	2	42	16	4	10	24	5	82

Частота резонанса для генератора Колпитца определяется $2\pi fL = 1/2\pi fC$,

откуда $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, где $C = \frac{C1C2}{C1+C2}$.

1. Занести в табл. 1.10.2 результаты влияния на частоту изменения величины индуктивности L1 при C1=C2. Рассчитать частоты по формуле $f = 1/dX = 1/T$ для указанных параметров элементов по своему варианту, измерить с помощью осциллографа частоту и оценить форму колебаний.

Таблица 1.10.2

Влияние изменения величины индуктивности L1 на частоту

L1, мГн	0,8 L1	L1	1,2L1
f, Гц			

На основе полученных данных табл. 1.10.2 построить график зависимости и сравнить полученные данные с показанием осциллографа.

2. Занести в табл. 1.10.3 результаты влияния на частоту изменения величины емкостей C1 и C2.

Таблица 1.10.3

Влияние изменения величины емкостей C1 и C2 на частоту

C1=C2, нФ	0,8(C1=C2),	C1=C2	1,2(C1=C2),
f, Гц			

Задание 1.10.2. Исследование генератора Клаппа

Для выполнения лабораторного задания собрать схему генератора Клаппа на рис. 1.10.3. Генератор Клаппа является вариантом генератора Колпитца, где напряжение обратной связи снимается с емкостного делителя. Ток контура протекает через три емкости и индуктивность, эти компоненты схемы определяют резонансную частоту. Для моделирования схемы выбрать параметры генератора из табл. 1.10.4.

Таблица 1.10.4

Параметры для генератора Клаппа

Вариант	L1, мГн	L2, мГн	C1=C2, нФ	Вариант	L1, мГн	L2, мГн	C1=C2, нФ
1	20	40	10	13	10	20	82
2	20	40	20	14	10	20	100
3	20	40	42	15	5	10	10
4	20	40	82	16	5	10	20
5	20	40	100	17	5	10	42
6	15	30	10	18	5	10	82
7	15	30	20	19	5	10	100
8	15	30	42	20	2,5	5	10
9	15	30	82	21	2,5	5	20
10	15	30	100	22	2,5	5	42
11	10	20	10	23	2,5	5	82
12	10	20	20	24	2,5	5	100

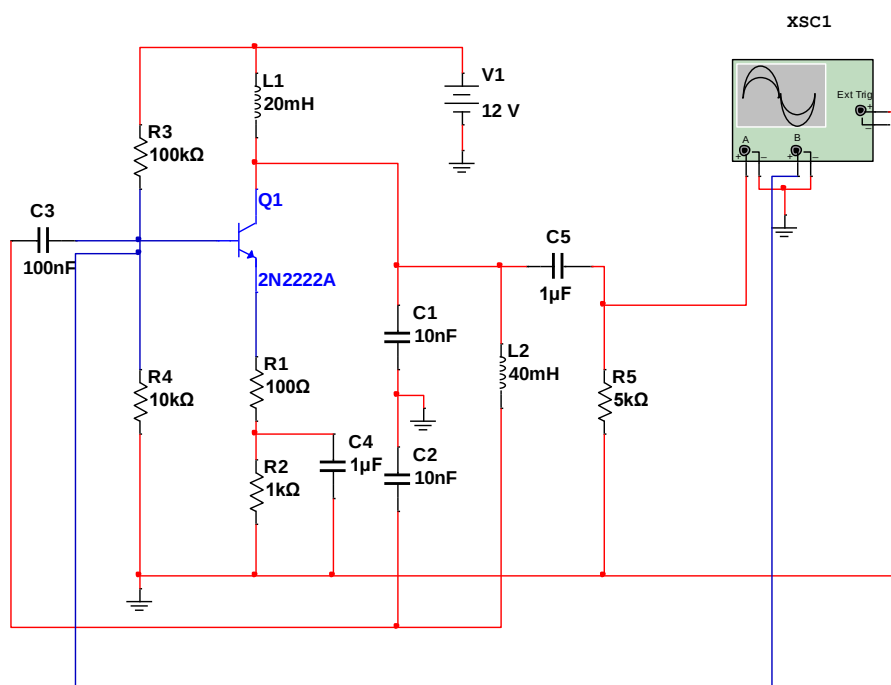


Рис. 1.10.3. Схема для моделирования генератора Клаппа

На осциллографе к каналу А подключено выходное напряжение, а к каналу Б подключен сигнал обратной связи.

1. Занести в табл.1.10.5 результаты влияния на частоту изменения индуктивностей L1, L2 при C1=C2 и измерить с помощью осциллографа частоту и оценить форму колебаний.

Таблица 1.10.5

Влияние изменения индуктивностей L1, L2 на частоту

L1, мГн	0,8 L1(L2)	L1(L2)	1,2L1(L2)
f, Гц			

На основе полученных данных табл. 1.10.5 построить график зависимости частоты от изменения величины индуктивностей $L1$, $L2$ и сравнить полученные данные с показанием осциллографа.

2. Занести в табл. 1.10.6 результаты влияния на частоту изменения величин емкостей $C1$ и $C2$.

Таблица 1.10.6

Влияние изменения емкостей $C1$ и $C2$ на частоту

$C_1=C_2$, нФ	$0,8(C_1=C_2)$,	$C_1=C_2$	$1,2(C_1=C_2)$,
f , Гц			

На основе полученных данных таблицы 1.10.6 построить график зависимости и сравнить полученные данные с показанием осциллографа.

Задание 1.10.3. Исследование LC -генератора на логических элементах

Для исследования необходимо собрать схему, приведенную на рис. 1.10.4. LC -генератор на логических элементах представляет собой инвертор, в котором напряжение OC снимается с LC -контура. Частота генератора определяется по формуле $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$, причем эквивалентная емкость C соответствует параллельному включению конденсаторов $C1$ и $C2$, то есть $C = C1 \cdot C2 / (C1 + C2)$.

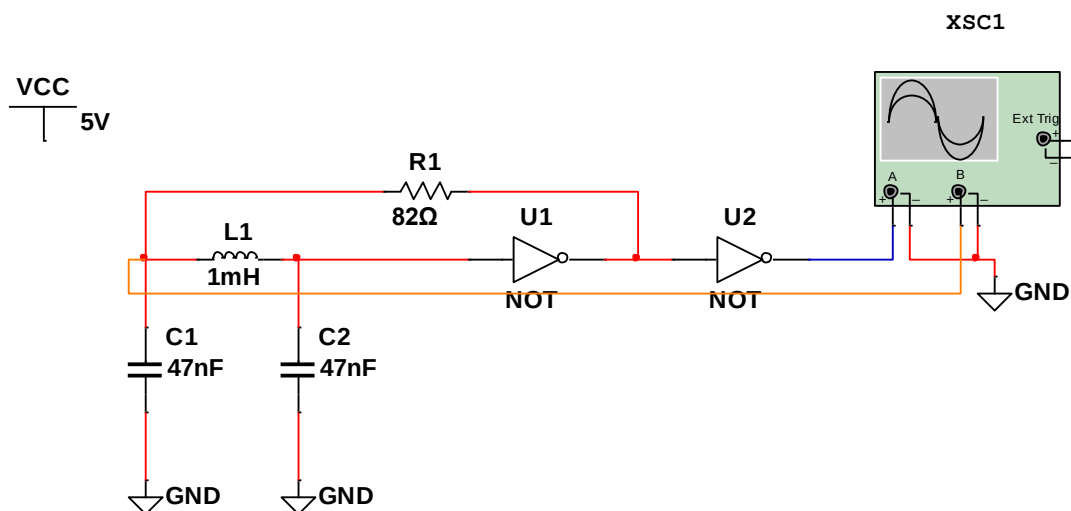


Рис. 1.10.4. Схема LC -генератора на логических элементах

Для моделирования схемы генератора на логических элементах задать параметры в соответствии с вариантом из табл. 1.10.7.

Выходного сигнала LC -генератора подключен к каналу А осциллографа, а сигнал обратной связи подключен к каналу Б.

Таблица 1.10.7

Параметры для моделирования LC -генератора на логических элементах

Вариант	L1, мГн	C1=C2, нФ	Вариант	L1, мГн	C1=C2, нФ
1	20	10	13	10	82
2	20	20	14	10	100
3	20	47	15	5	10
4	20	82	16	5	20
5	20	100	17	5	47
6	15	10	18	5	82
7	15	20	19	5	100
8	15	47	20	2,5	10
9	15	82	21	2,5	20
10	15	100	22	2,5	42
11	10	10	23	2,5	82
12	10	20	24	2,5	100

1. Для указанных параметров элементов измерить частоту и оценить форму колебаний.

Занести в табл. 1.10.8 результаты влияния на частоту изменения величин индуктивностей $L1$, $L2$ при $C1=C2$.

Таблица 1.10.8

Влияние изменения индуктивностей $L1$, $L2$ на частоту

L1, мГн	0,8 L1	L1	1,2L1
f, Гц			

На основе полученных данных таблицы 1.10.8 построить график зависимости частоты от изменения величины индуктивностей $L1$, $L2$ и сравнить полученные данные с показанием осциллографа.

2. Занести в табл. 1.10.6 результаты влияния на частоту изменения величин емкостей $C1$ и $C2$ при условии $C1=C2$.

Таблица 1.10.9

Влияние изменения емкостей $C1$ и $C2$ на частоту

C ₁ =C ₂ , нФ	0,8(C ₁ =C ₂),	C ₁ =C ₂	1,2(C ₁ =C ₂),
f, Гц			

На основе полученных данных табл. 1.10.6 построить график зависимости частоты от изменения величины емкостей $C1$ и $C2$ и сравнить полученные данные с показанием осциллографа.

3. Измерить напряжения переключения логического элемента $U1$.

Лабораторная работа № 1.11

Исследование транзисторных автогенераторов

Цель работы: изучить различные схемы автогенераторов, построенных на транзисторах, ознакомиться с методами расчета, исследовать транзисторный автогенератор.

Задание 1.11.1. Автогенератор на емкостной трехточке

Для исследования автогенератора на емкостной трехточке собрать схему, приведенную на рис. 1.11.1.

Приведенный на рис. 1.11.1 автогенератор моделируется на транзисторе 2N2218A по схеме емкостной трехточки, и колебательным контуром, задающим частоту автогенератора, выступают элементы C5C6L2, а питание схемы осуществляется от источника постоянного напряжения. Регулируемый источник напряжения V1 питает коллекторную цепь транзистора, а регулируемый источник напряжения V2 отвечает за смещение, подаваемое на базу транзистора через делитель R2R3. На коллектор подается напряжение через блокирующую индуктивность L1, которая препятствует попаданию высокочастотного напряжения в источник питания. Конденсаторы C1 и C3 – разделительные. С помощью конденсатора C4 осуществляется изменение коэффициента обратной связи, также он образует делитель напряжения с входной проводимостью транзистора. Резистор R4 служит нагрузкой автогенератора.

Конденсаторы C1 и C3 – разделительные. С помощью конденсатора C4 осуществляется изменение коэффициента обратной связи, также он образует делитель напряжения с входной проводимостью транзистора. Резистор R4 служит нагрузкой автогенератора.

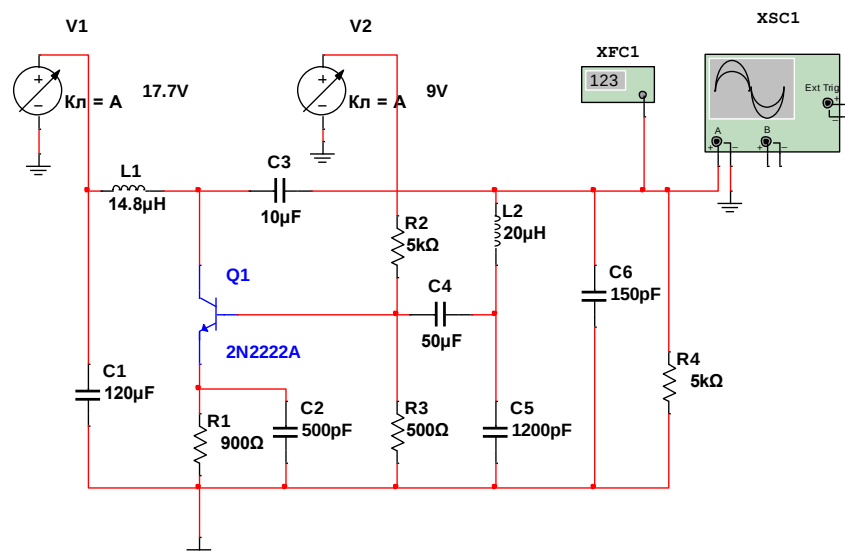


Рис. 1.11.1. Схема автогенератора на емкостной трехточке

1. Для определения зависимостей $f(E_c)$, $f(E_k)$, $f(R_n)$ необходимо значения источников равными $V_2 = 8,2$ В и $V_1 = 17,7$ В, значение частоты сигнала определяется с помощью измерительного пробника.

2. Для заполнения табл. 1.11.1 необходимо определить зависимости частоты сигнала f от напряжения смещения E_c , и изменяя значения источника напряжения V_2 в пределах от 8,2 до 9,12. Значения E_c определяется по измерительному пробнику на базе транзистора.

Таблица 1.11.1

Изменение частоты f от напряжения смещения E_c

$V_2 (E_c), В$							
$f, МГц$							

3. Для заполнения табл. 1.11.2 необходимо определить зависимости частоты сигнала f от изменения напряжения на коллекторе E_k , установив на источнике V_2 смещение $E_c = 9 В$ и изменяя напряжение на источнике V_1 от 15,7 до 18,6 В. Значения E_k определяется по измерительному пробнику.

Таблица 1.11.2

Изменение частоты f от напряжения на коллекторе E_k

$V_1 (E_k), В$					
$f, МГц$					

4. Для заполнения табл. 1.11.3 необходимо определить зависимости частоты сигнала f от изменения сопротивления нагрузки R_n , которое изменять в пределах от 3,2 до 8 кОм с шагом 0,5 кОм, установив $V_1 = 17,7 В$ и $V_2 = 9 В$.

Таблица 1.11.3

Изменение частоты f от сопротивления резистора R_4

$R_4 (R_n), кОм$					
$f, МГц$					

5. Для заполнения табл. 1.11.4 необходимо определить зависимости частоты сигнала f от изменения емкости в цепи обратной связи C_4 , изменяя его значения в пределах от 10 до 50 нФ, установив параметры для моделирования $V_1 = 17,7$ и $V_2 = 9 В$ и $R_4 = 5 кОм$.

Таблица 1.11.4

Изменение частоты f от емкости конденсатора C_4

$C_4, нФ$					
$f, МГц$					

По измеренным данным табл. 1.11.1-1.11.4 построить графики зависимостей $f(E_c)$, $f(E_k)$, $f(R_n)$, $f(C_4)$.

Задание 1.11.2. Автогенератора с кварцевым резонатором

Для исследования автогенератора с кварцевым резонатором и резонансным усилителем соберите схему, приведенную на рис. 1.11.2.

На транзисторе Q1 выполнена цепь принудительного запуска генератора и добавлена в схему. Амплитуда сигнала на выходе генератора достаточно мала порядка 7 мкА, поэтому для усиления сигнала в схему добавлен резонансный усилитель (рис. 1.11.2). На транзисторе Q3 выполнен узкополосный усилитель, а на транзисторе Q4 выполнен эмиттерный повторитель.

Чтобы схема работала правильно, нужно выполнить следующие настройки в окне моделирования: в пункте Simulate→Interactive Simulation Settings в окне параметров Maximum Time Step и Initial Time Step установить 1e-009.

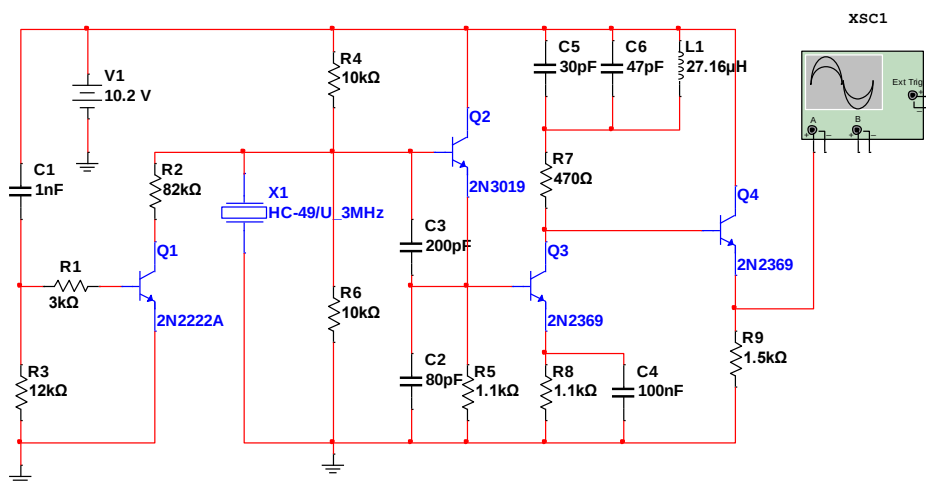


Рис. 1.11.2. Схема автогенератора с кварцевым резонатором и резонансным усилителем

1. Необходимо снять зависимости $f(E_k)$, $f(R_n)$, для этого установить значение источника $V1=10$ В.

2. Для заполнения табл. 1.11.5 необходимо определить зависимости частоты сигнала f от изменения напряжения на коллекторе E_k , изменяя напряжение на источнике $V1$ от 10 до 10,4 В с шагом 0,1 В и с помощью пробника снять зависимость $f(E_k)$. Показания снимаются только после установки колебаний, а среднее время установления колебаний 10-20 сек.

Таблица 1.11.5

Изменение частоты f от напряжения на коллекторе E_k

V1 (E_k), В					
f , МГц					

3. Для заполнения табл. 1.11.6 необходимо определить зависимости частоты сигнала f от изменения сопротивления нагрузки R_n , изменяя его значение от 1 до 5 кОм, и установив на источнике $V1$ напряжение 10 В.

Таблица 1.11.6

Изменение частоты f от сопротивления резистора $R4$

R9 (R_n), кОм					
f , МГц					

4. Для заполнения табл. 1.11.7 необходимо определить зависимости частоты сигнала f от напряжения смещения E_c , установив на источнике $V1$ напряжение 10 В, и $R9 = 1,5$ кОм, и, изменяя одновременно сопротивления $R4$ и $R6$ от 9,5 до 10 кОм с шагом 0,1 кОм.

Напряжение на базе транзистора $Q2$ лучше измерять с помощью подключения его к каналу Б осциллографа.

Таблица 1.11.7

Изменение частоты f от напряжения смещения E_c

E_c , В							
$R4$, кОм							
$R6$, кОм							
f , МГц							

Построить графики зависимостей на основе полученных результатов в табл. 1.11.5 – 1.11.7, сделать необходимые выводы.

Лабораторная работа № 1.12

Исследование импульсных стабилизаторов напряжения

Цель работы: изучить принцип действия, измерения параметров и расчета основных характеристик импульсных стабилизаторов напряжения.

Краткие теоретические сведения

Существуют три основных схемы импульсных стабилизаторов напряжения (ИСН): последовательный импульсный стабилизатор напряжения понижающего типа (рис.1.12.1а), параллельный импульсный стабилизатор напряжения повышающего типа (рис. 1.12.1б) и параллельный импульсный стабилизатор напряжения инвертирующего типа (рис.1.12.1в). Все схемы состоят из накопительного дросселя L , регулирующего элемента (блок 1), блокировочного диода VD , элементов управления (блоки 2 и 3) и конденсатора фильтра C .

ИСН преобразует напряжения за счет явления самоиндукции в индуктивности накопительного дросселя L . При этом в зависимости от схемы включения дросселя импульсные стабилизаторы понижают или повышают выходное напряжение, приведены на рис. 1.12.1а и 1.12.1б. Импульсные стабилизаторы могут изменять полярность постоянного напряжения (рис. 1.12.1в).

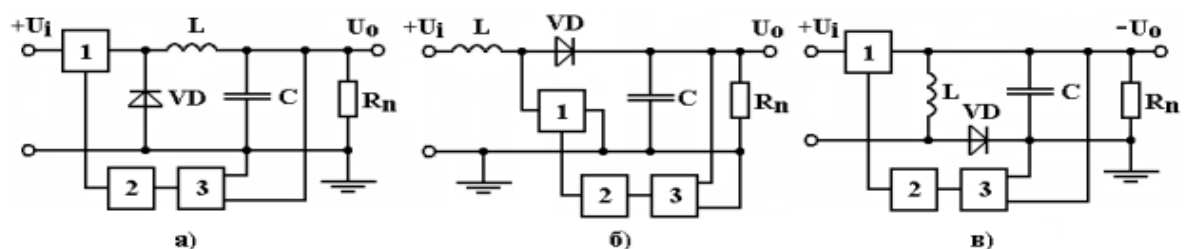


Рис. 1.12.1. Структурные схемы ИСН понижающего типа (а), параллельного ИСН повышающего (б) и инвертирующего (в) типа

Наиболее распространенным на практике является последовательный ИСН (рис. 1.12.1 а), в котором накопительный дроссель одновременно является элементом сглаживающего LC-фильтра.

Задание 1.12.1. Изучение функционального силового блока последовательного ИСН

Для выполнения задания построить схему, приведенную на рис. 1.12.2.

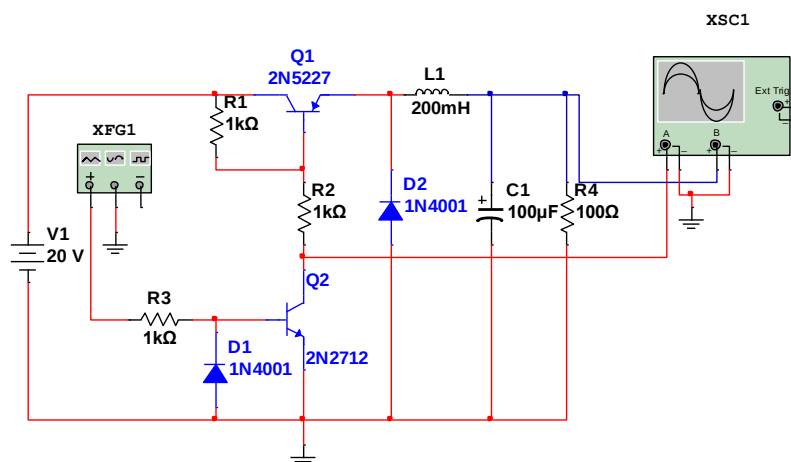


Рис. 1.12.2. Силовой блок последовательного ИСН

Описание работы схемы импульсного стабилизатора напряжения.

Блок содержит силовую часть и регулирующий элемент на транзисторе Q1, который управляется ключом на транзисторе Q2, а диод D2 служит для защиты базового перехода транзистора Q2 при большом отрицательном входном сигнале управления. Сопротивление резистора R1 выбирается из условия обеспечения закрытого состояния транзистора Q1 (100...900 Ом), а R2 – ориентировочно из условия $k\beta U_i = R_2 I_{kmax}$, где $k = 1,5 \dots 2$ – коэффициент запаса по насыщению; β , I_{kmax} – коэффициент усиления тока и максимальный импульсный коллекторный ток транзистора Q1. Аналогичным образом выбирается сопротивление транзисторезистора R3, но при этом в расчетах U_i заменяется амплитудой управляющего импульса функционального генератора. Сглаживающий фильтр в схеме образуют элементы D2, L1, C1.

1. Для снятия зависимости выходного напряжения от коэффициента заполнения $U_0 = f(K_z)$ необходимо подсоединить к выходу схемы вольтметр и установить с параметры генератора XFG1: $f = 1$ кГц, $U_y = 3$, однополярность управляющих прямоугольных импульсов обеспечивается установкой на функциональном генераторе постоянной составляющей Offset=3В, коэффициент заполнения K_z , задается выбором параметра Duty cycle.

Также указать следующие параметры элементов: $U_i = V1 = 30$ В, $R_n = R4 = 100$ Ом, $L = 100$ мГн, $C = 100$ мкФ. Измерить выходное напряжение импульсного стабилизатора напряжения, изменяя коэффициент заполнения $K_z = 5, 10, 15, 20, 25, \dots$,

95%. По полученным данным табл. 1.12.1 построить график зависимости $U_{\text{ВЫХ}}=f(K_3)$.

Таблица 1.12.1

Результаты измерений

$K_3, \%$	5	10	15	20	25	30	...	90	95
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$									

2. Для исследование переходных процессов генератора при $K_3=50\%$ не изменяйте параметров элементов схемы, также необходимо включить поочередно с дросселем резистор с сопротивлением 0,1,2...10 Ом, который эмитирует сопротивление его потерь $R_d(R_2)$. Заполните табл. 1.12.2 и по ее данным постройте график зависимости $U_{\text{ВЫХ}}=f(R_d)$. В отчет добавьте осциллограммы выходного напряжения и сделайте выводы.

Таблица 1.12.2

Результаты измерений

$R_d, \text{Ом}$	0	1	2	3	4	5	...	11	12
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$									

Задание 1.12.2. Исследование полной схемы ИСН

Для выполнения лабораторного задания построить схему на рис. 1.12.3.

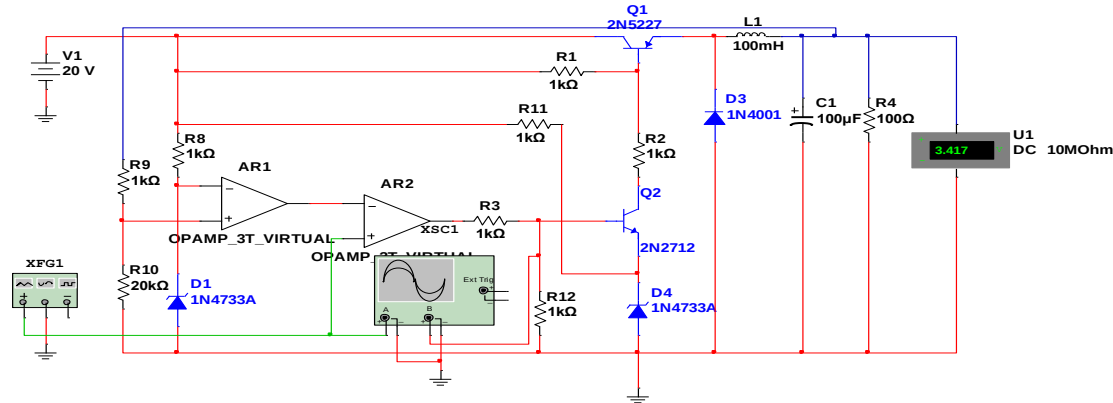


Рис. 1.12.3. Схема ИСН с элементами ШИМ

Схема содержит делитель напряжения, источник опорного напряжения (ИОН), сравнивающий элемент и усилитель рассогласования. На схеме резисторы R9, R10 – делители напряжения, резистор R8 и стабилитрон VD1 – источник опорного напряжения, элемент AR1(в multisim opamp_3t_virtual) является усилителем сигнала рассогласования и взят из библиотеки для виртуального моделирования, а усилитель AR2 является пороговым устройством. Параметрический стабилизатор (VD4, R11) включен в эмиттерную цепь для согласования уровней, т.к. оба операционных усилителя питаются от однополярного источника. Функциональный генератор XFG1 использует пилообразные импульсы.

1. Для исследования времени выхода в установившийся режим импульсного стабилизатора напряжения необходимо исследовать схему при модуляции заднего фронта, одновременно переднего и заднего, используя ранее выбранные установки схемы. Функциональный генератор выбрать в режиме пилообразных импульсов при модуляции по переднему фронту коэффициент заполнения (Duty cycle) выбирается максимальным (99%), при модуляции по заднему фронту – минимальным (0,1%) – при модуляции по обоим фронтам – 50%. Измерьте в каждом случае время выхода ИСН в установившийся режим. Полученные значения занести в табл. 1.12.3.

Таблица 1.12.3

Результаты измерения времени установления выходного напряжения ИСН

Duty cycle, %	0,1	99	50
t_y , мс			

2. Для каждого способа формирования управляющих сигналов, установить как в задании 1, получите зависимости периода формирования управляющих сигналов от сопротивления нагрузки R_n в диапазоне 10...1000 Ом, полученные значения внести в табл. 1.12.4.

Таблица 1.12.4

Зависимость времени установления выходного напряжения от R_n

R_n , Ом									
При 0.1% T, мс									
При 50% T, мс									
При 99% T, мс									

3. Для каждого способа формирования управляющих сигналов, получите зависимость времени установления выходного напряжения импульсного стабилизатора напряжения от U_i в диапазоне 15...40 В, заполните табл. 1.12.5.

Таблица 1.12.5

Зависимость времени установления выходного напряжения от U_i

U_i , В									
При 0.1% T, мс									
При 50% T, мс									
При 99% T, мс									

В отчет вставить осциллограммы и построенные графики зависимостей $T=f(R_n)$ и $T=f(U_i)$, сделать соответствующие выводы.

Лабораторная работа № 1.13

Исследование цифровых сигналов и портов

Цель работы: изучение цифровых компонентов различной «логики» (ТТЛ, КМОП), правила совместного использования.

Задание 1.13.1. На ТТЛ логике построить схему логического элемента «НЕ», для выполнения лабораторного задания собрать схему, приведенную на рис.1.13.1. В отчет вставить осциллограммы логического элемента, где к каналу А подключить входные значения, а к каналу В – выходные, а также создать символ для данного компонента в меню Edit Symbol, пример которого приведен на рис. 1.13.2. Также описать работу схемы и как влияют номиналы резисторов на выходной сигнал.

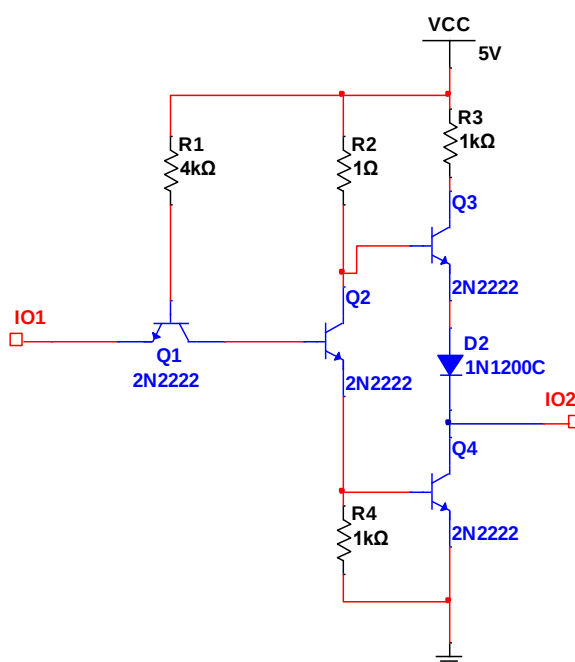


Рис. 1.13.1. Схема для моделирования инвертора на ТТЛ логике

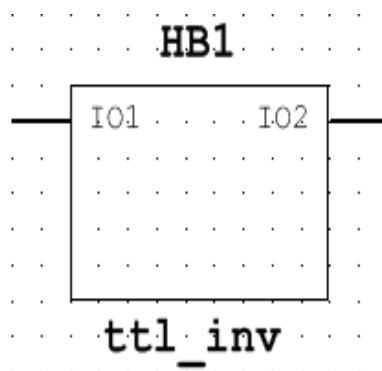


Рис. 1.13.2. Пример логического элемента «НЕ» на ТТЛ логике, созданный с помощью Edit Symbol

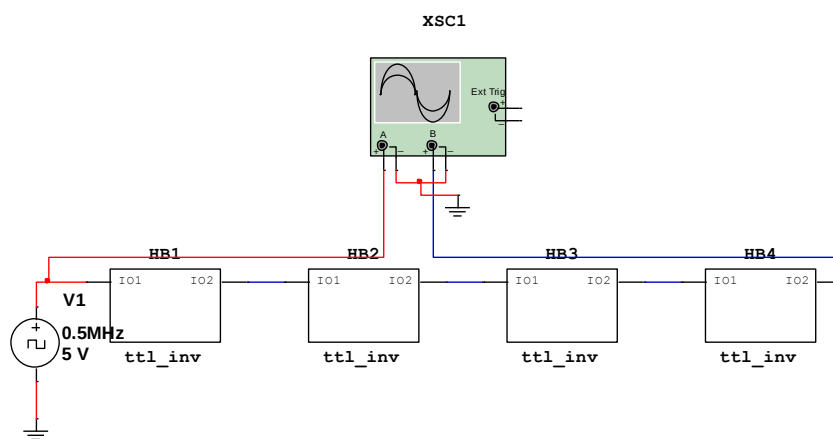


Рис. 1.13.3. Схема для измерения задержки распространения сигнала

Построить передаточную характеристику инвертора, используя DC Sweep Analysis. С помощью осциллографа, определить время задержки распространения сигнала через ТТЛ инвертор, собрав схему из 4-х таких же инверторов, приведеную на рис. 1.13.3.

Задание 1.13.2. Создать схему, приведенную на рис. 1.13.4.

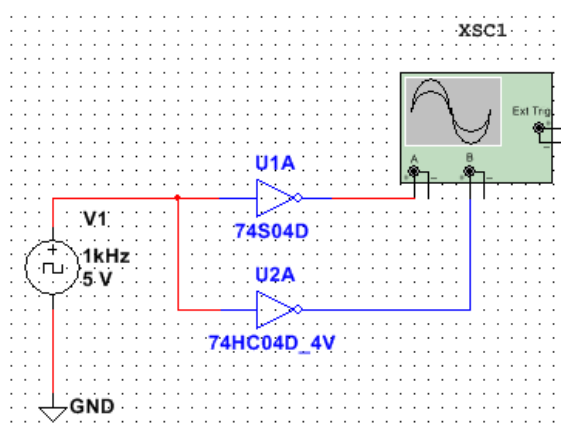


Рис. 1.13.4. Определение уровней напряжения ТТЛ и КМОП элементов

1. В этой схеме в качестве ТТЛ элементов использовать библиотечные элементы среды multisim серии 74S, а в качестве элементов КМОП использовать логические элементы серии 74НС.

В отчет вставить осциллограммы с выходов ТТЛ и КМОП, измерить высокий и низкий уровни напряжений с выходов микросхем.

2. В схему на рис. 1.13.4 к каждому выходу подключить по 5 таких же элементов (т.е. получится на схеме 12 элементов), в отчет добавить полученные осциллограммы, и оценить влияние нагрузочных элементов на время переключения. Сравнить с результатами измерений в задании 1.13.1.

3. В схему на рис. 1.13.4 добавить резистивные нагрузки используя следующие номиналы резисторов: 1 КОм, 500 Ом, 300 Ом, 100 Ом подключенные к цепи питания VCC (+5В) и к GND (0В).

Задание 1.13.3. Для проверки взаимной совместимости входов и выходов ТТЛ и КМОП собрать схему, приведенную на рис. 1.13.5.

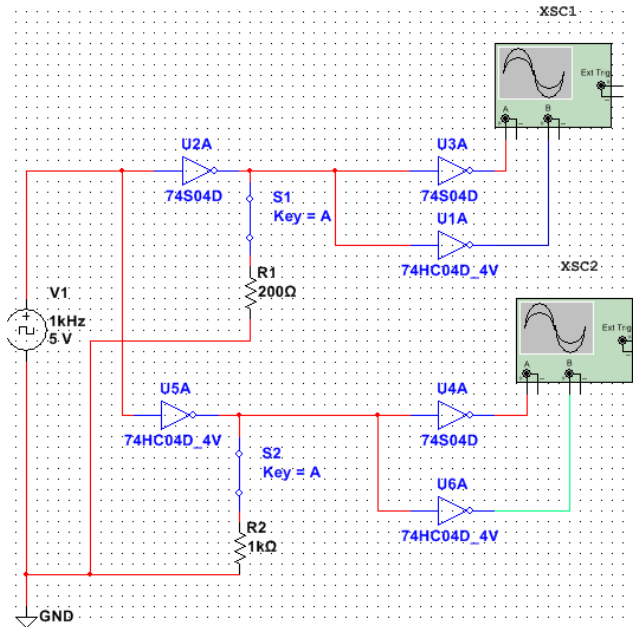


Рис. 1.13.5. Схема для анализа взаимной совместимости входов и выходов ТТЛ и КМОП

Элементы U1A, U2A, U3A позволяют проверить совместимость выходов ТТЛ со входами ТТЛ и КМОП. Элементы U4A, U5A, U6A проверяют совместимость выхода КМОП с входами ТТЛ и КМОП. Переключатели S1 и S2 обеспечивают при замыкании предельно допустимые уровни цифровых сигналов.

Задание 1.13.4. Для выполнения лабораторного задания построить схему, приведенную на рис. 1.13.6. Здесь используются три библиотечных элемента: инверторы ТТЛ и КМОП логики и триггер Шмитта, необходимо определить их пороговые значения, используя установки функционального генератора в режиме пилообразного сигнала, приведенные ниже.

В данной схеме используется функциональный генератор XFG1, в настройках которого следует указать амплитуду 2,5 В и смещение 2,5, которые дадут размах от 0 В до 5 В, частоту установить 1 кГц. Для удобства измерения используем 3 осциллографа, на вход «А» у каждого подключен исходный пилообразный сигнал, а на вход «В» - выходной сигнал логического элемента. Уровень срабатывания входа определяем по точке пересечения «наклонной линии» входного сигнала и вертикальной линии фронта (перепада) выходного

сигнала. Измерения удобно выполнять, совместив маркеры осциллографа с линиями фронтов выходного сигнала.

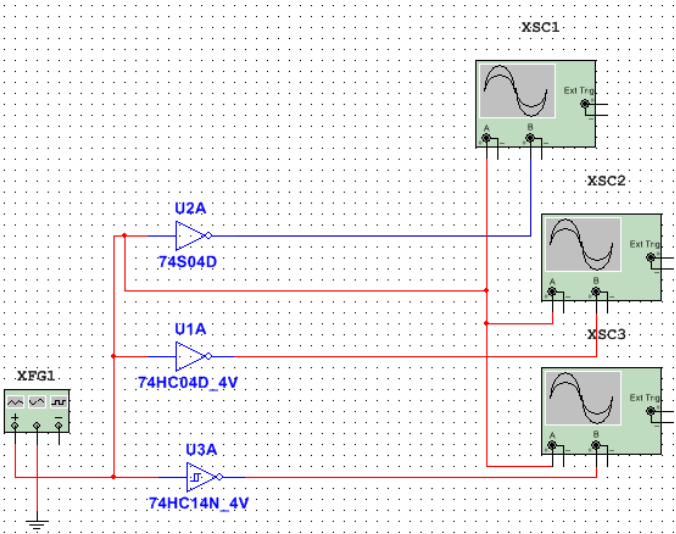


Рис. 1.13.6 Определение пороговых значений цифровых сигналов

Результаты занести в табл. 1.13.1 для каждого элемента и сравнить.

Таблица 1.13.1

Результаты измерений			
Элемент	U2A(74S04D)	U1A(74HC04D_4V)	U3A(74HC14N_4V)
U _{ВХ}			
U _{ВЫХ}			

Лабораторная работа № 1.14

Изучение логических элементов на КМОП транзисторах

Цель работы: изучение статического и динамического режимов работы и проверка таблиц истинности логических элементов КМОП.

Порядок выполнения работы

Задание 1.14.1. Логический элемент «НЕ»

1. Для исследования передаточной характеристики ЛЭ КМОП «НЕ» соберите схему, приведенную на рис. 1.14.1. Изменяя напряжение источника входного сигнала U_{in} от 0 до 5 В, снимите передаточную характеристику логического элемента – зависимость выходного напряжения от входного и постройте ее график. Необходимое число измерений установите самостоятельно, обращая особое внимание на область перехода от единичного выходного уровня к нуле-

вому. Сделайте выводы о ходе передаточной характеристики и значениях напряжений, соответствующих единичному и нулевому логическим уровням.

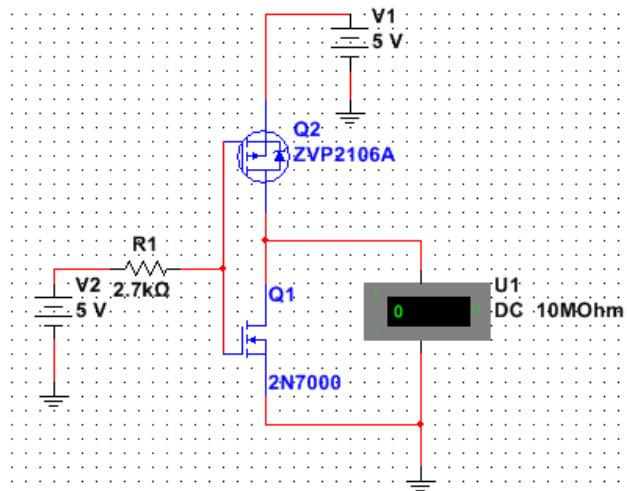


Рис. 1.14.1. Схема исследования передаточной характеристики ЛЭ КМОП «НЕ»

2. Для исследования динамической характеристики ЛЭ КМОП «НЕ» соберите схему, приведенную на рис. 1.14.2. Установите выходное напряжение генератора прямоугольных импульсов 5 В, частоту 500 Гц, коэффициент заполнения (длительность) 50, масштаб по горизонтальной оси осциллографа 500 мкс/дел, по вертикальной 2 В/дел. Активизируйте схему. Для улучшения наглядности сместите график выходного сигнала вниз. Срисуйте с экрана осциллографа временные зависимости входного и выходного сигналов.

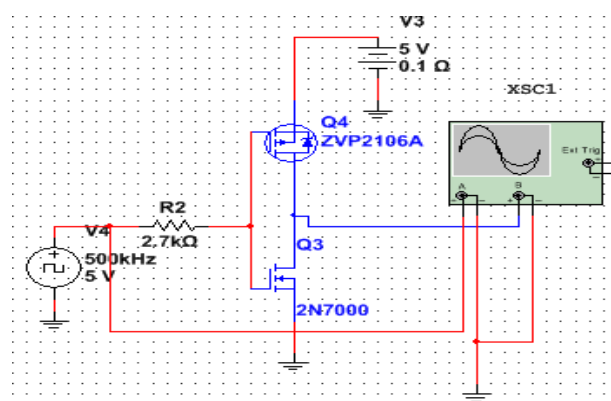


Рис. 1.14.2. Схема исследования динамической характеристики ЛЭ КМОП «НЕ»

Задание 1.14.2. Логический элемент «2И-НЕ»

Для проверки таблицы истинности ЛЭ соберите схему, приведенную на рис. 1.14.3. Логические элементы берутся из библиотеки Misc Digital\TIL. Составьте и заполните таблицу истинности ЛЭ 2И-НЕ (NAND2), подавая с помо-

щью тумблеров 1 и 2 различные комбинации входных логических переменных (5 В соответствует логической единице, 0 В – логическому нулю) и по свечению индикатора определяя значения выходной функции (свечение - 1, нет свечения - 0).

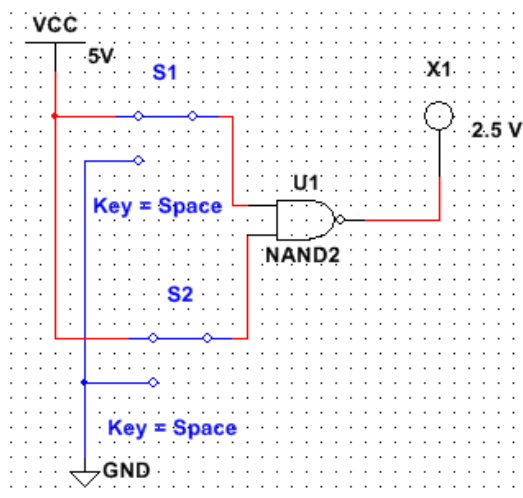


Рис. 1.14.3. Схема проверки таблицы истинности ЛЭ «2И-НЕ»

Для исследования ЛЭ «2И-НЕ» в динамическом режиме соберите схему, изображенную на рис. 1.14.4.

Установите амплитуду выходных импульсов генераторов 5 В, частоту генератора 1 кГц, частоту генератора 500 Гц, развертку логического анализатора. Для лучшей наглядности отметьте провода, идущие к логическому анализатору различными цветами, а сам экран сделайте белым (кнопка «Экран»). Активизируйте схему и зарисуйте форму напряжений на входах и выходе ЛЭ.

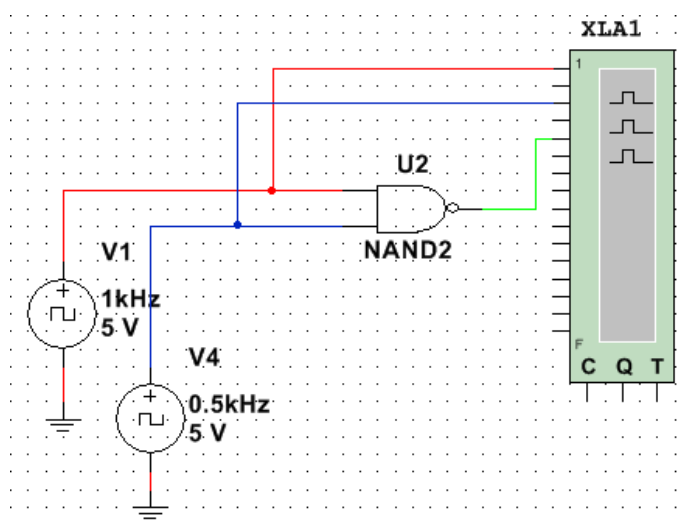


Рис. 1.14.4. Схема исследования динамической характеристики ЛЭ «2И-НЕ»

Задание 1.14.4. Логический элемент «И»

Действуя аналогично заданию 1.14.2, составьте и заполните таблицу истинности для ЛЭ И (AND2).

Задание 1.14.5. Логический элемент «ИЛИ» (OR2)

Действуя аналогично заданию 1.14.2, составьте и заполните таблицу истинности для ЛЭ «ИЛИ» (OR2).

Задание 1.14.6. Логический элемент «ИЛИ-НЕ» (NOR2)

Действуя аналогично заданию 1.14.2, составьте и заполните таблицу истинности для ЛЭ «ИЛИ-НЕ» (NOR2).

Задание 1.14.7. Логический элемент «исключающее ИЛИ» (XNOR)

Действуя аналогично заданию 1.14.2, составьте и заполните таблицу истинности для ЛЭ «исключающее ИЛИ» (XNOR).

Лабораторная работа № 1.15

Исследование преобразователей цифровых сигналов

Цель работы: исследовать различные схемы цифроаналоговых преобразователей (ЦАП), изучение принципа преобразования кода в ток и напряжение.

Задание 1.15.1. Схема преобразования двоичного кода в напряжение

Для выполнения лабораторного задания собрать схему на рис. 1.15.1, содержащую четыре ключа на два положения, управляемых сигналами логического уровня. При замыкании и размыкании ключа изменяется логический уровень соответствующего разряда регистра, т.е. загораются /гаснут лампочки (логические пробники), по которым можно считать двоичный входной код. На цифровом индикаторе отображается шестнадцатеричное значение входного кода.

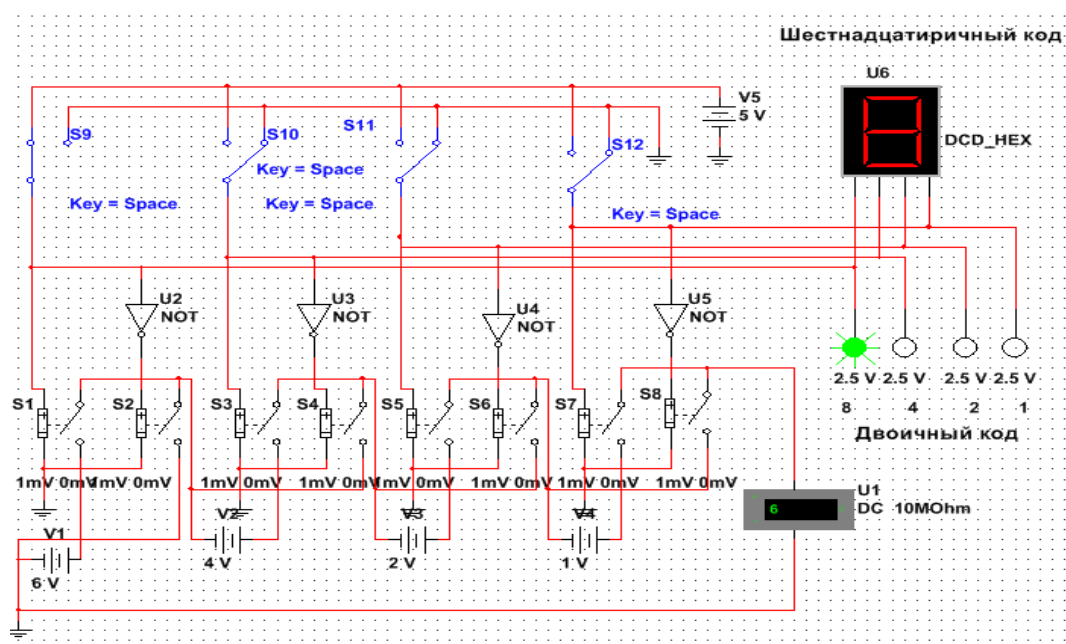


Рис. 1.15.1. Схема моделирования ЦАП

В табл. 1.15.1 занести экспериментально полученные значения выходного напряжения ЦАП, которые соответствуют различным значениям входного двоичного кода. На рис. 1.15.2 показано соответствующее напряжение при переключении ключа.

Полученные напряжения представить в виде суммы:

$$U_{\text{вых}} = U_0 [b_3 \cdot 2^3 + b_2 \cdot 2^2 + b_1 \cdot 2^1 + b_0 \cdot 2^0],$$

где $U_0=1$ В, b -значение соответствующего бита двоичного кода, равное нулю или единице.

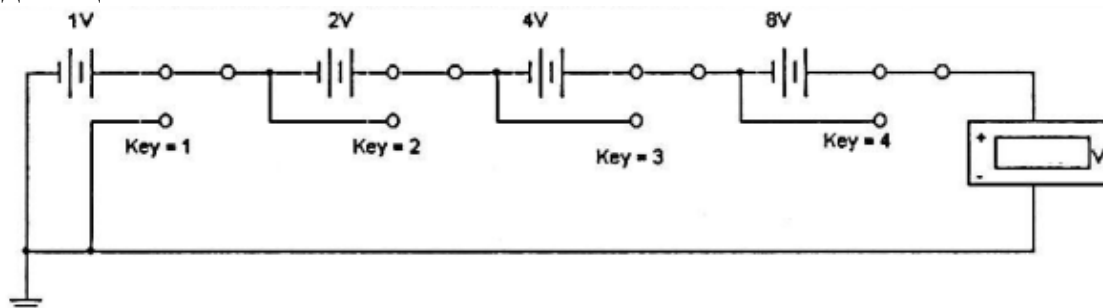


Рис. 1.15.2. Напряжение при переключении

Таблица 1.15.1

Соответствие выходного напряжения преобразователя различным значениям двоичного кода

Двоичный код	Выходное напряжение ЦАП
0000	
0001	
0010	
0011	

1111	

Задание 1.15.2. Преобразование кода в напряжение с взвешенными сопротивлениями

1. Для выполнения лабораторного задания необходимо собрать схему, показанную на рисунке 1.15.3.

Выходное напряжение рассчитывается по формуле

$U_{\text{вых}} = U(-R_f / R_c) = U(-G_c / G_f)$, где U — напряжение прецизионного источника ($U = 16$ В); R_f, G_f -сопротивление и проводимость в цепи обратной связи ($R_f = 1$ кОм); R_c, G_c -сопротивление и проводимость в цепи управления.

$$U_{\text{вых}} = -\frac{U}{G_f} (b_0 G_{c0} + b_1 G_{c1} + b_2 G_{c2} + b_3 G_{c3}),$$

где b -значение соответствующего бита двоичного кода, равное нулю или единице.

Результаты измерений и расчетов занесите в табл. 1.15.2.

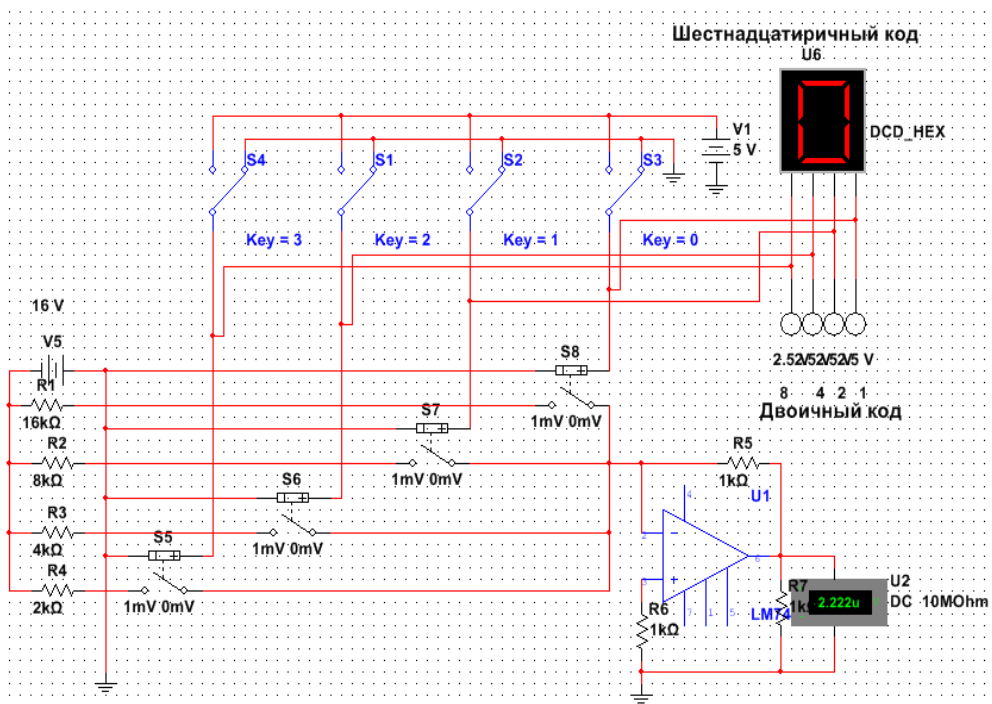


Рис. 1.15.3. Схема моделирования ПКН

Таблица 1.15.2

Зависимость выходного напряжения преобразователя от изменений значений ЭДС

Двоичный код	$U_{\text{вых.расч}}$	$U_{\text{вых}}$ при $V_1=16\text{В}$	$U_{\text{вых}}$ при $V_1=8\text{В}$	$U_{\text{вых}}$ при $V_1=32\text{В}$
0000				
0001				

1111				

2. Измерить влияние величины ЭДС (источник V1) на выходное напряжение, изменив значение с 16 В на 8 В, а затем на 32 В. Занесите в табл. 1.15.2 полученные значения выходного напряжения. По полученным результатам сделать выводы.

3. Измерить влияние величины сопротивления в цепи ОС на выходное напряжение, изменив сопротивление резистора R5 сначала на 2 кОм, а затем на 0,5 кОм. Результаты измерений занесите в табл. 1.15.3. По полученным результатам сделать выводы.

Таблица 1.15.3

Соответствие выходного напряжения преобразователя различным значениям двоичного кода при изменении значения сопротивления обратной связи

Двоичный код	$U_{\text{вых}}$ при $R_{\text{ос}}=1\text{кОм}$	$U_{\text{вых}}$ при $R_{\text{ос}}=2\text{кОм}$	$U_{\text{вых}}$ при $R_{\text{ос}}=0,5\text{кОм}$
0000			
0001			

1111			

Задание 1.15.3. Исследование ЦАП на основе матрицы R-2R

Для выполнения лабораторного задания собрать схему, приведенную на рис. 1.15.4.

Выходным напряжением схемы является потенциал нижней ступени этой «лестницы» (точка, к которой на рис. 1.15.5 подключен вольтметр). Это напряжение может быть вычислено по формуле

$$U_{вых} = \frac{E(b_1 \cdot 2^0 + b_2 \cdot 2^1 + b_3 \cdot 2^2 + b_4 \cdot 2^3)}{16},$$

где b - значение соответствующего бита двоичного кода, равное нулю или единице.

Заполнить табл. 1.15.4 и проверьте соответствие экспериментально полученных значений с расчетными значениями.

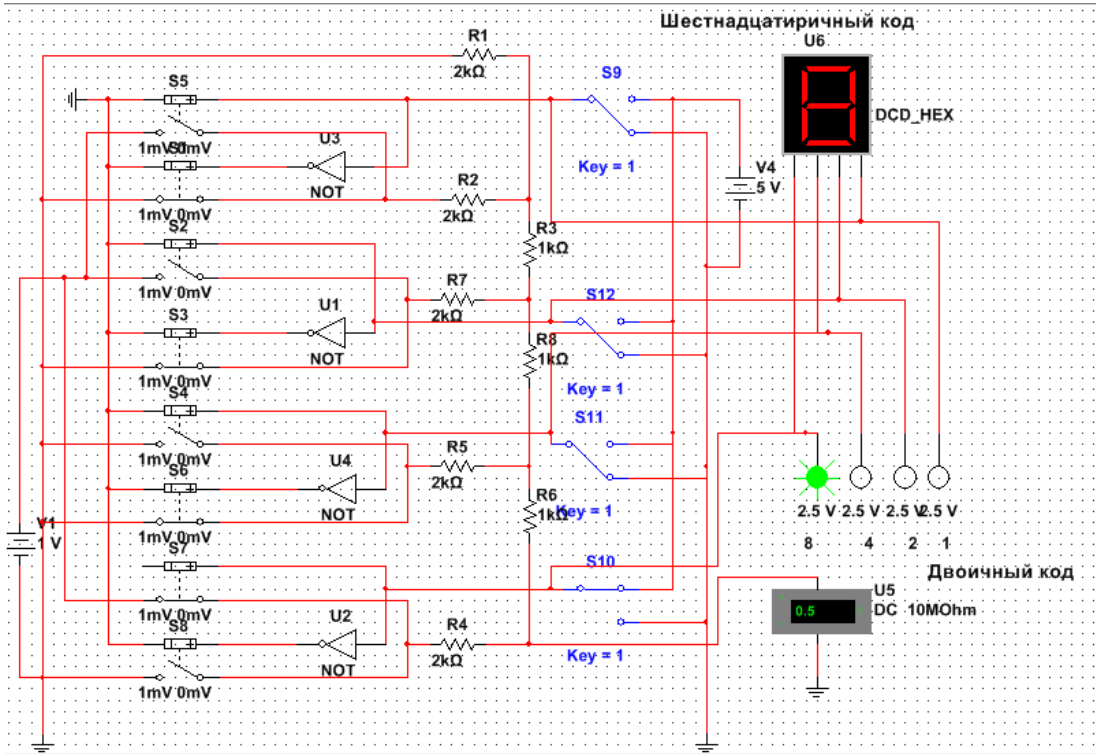


Рис. 1.15.4. Схема для моделирования

Таблица 1.15.4

Соответствие выходного напряжения преобразователя различным значениям двоичного кода

Двоичный код на входе	$U_{вых}$	$U_{расч}$
0000		0
0001		1h
----	----	---
1111		15h

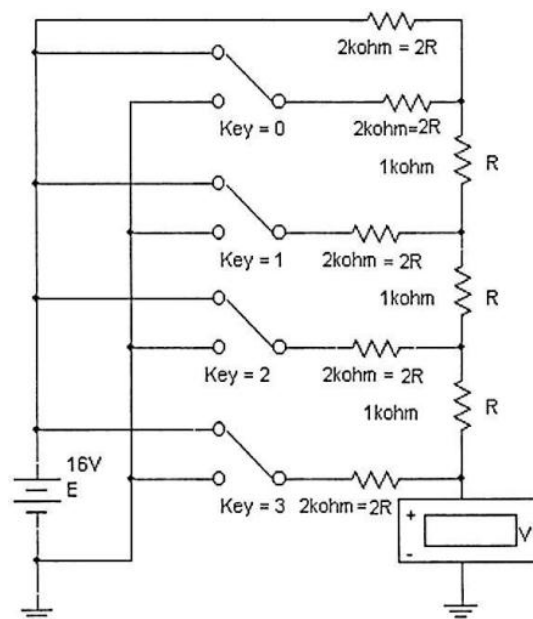


Рис. 1.15.5. Схема измерения напряжения

Задание 1.15.4. Исследование ЦАП на библиотечном элементе

Соберите схему для изучения ЦАП, приведенную на рис. 1.15.6. Переключатели используются для задания кодовых комбинаций на входе ЦАП (верхнее положение - 1, нижнее - 0), генератор V1 – источник опорного напряжения, вольтметр U1 показывает величину выходного напряжения.

1. Установите переключатели в положение, соответствующее кодовой комбинации 0000. Переберите все возможные комбинации до 1111 и занесите в табл. 1.15.5 соответствующее значение выходного напряжения $U_{\text{вых}}$.

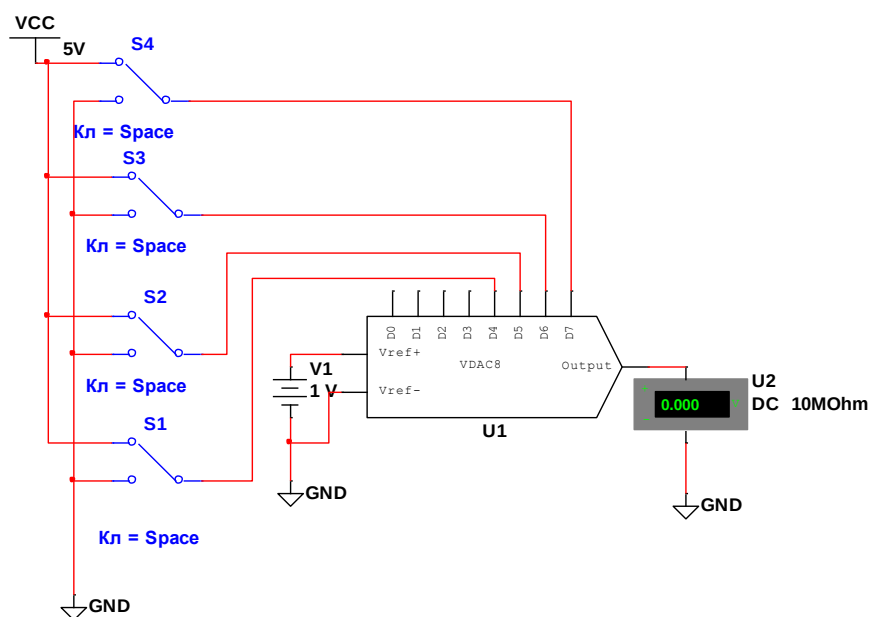


Рис. 1.15.6. Схема для моделирования ЦАП с использованием библиотечного элемента

2. Определите величину выходного напряжения, соответствующую единице младшего разряда по формуле

$$h = U_{\text{вых max}} / 15,$$

где $U_{\text{вых max}}$ - выходное напряжение, соответствующее кодовой комбинации 1111.

3. Для каждой кодовой комбинации определить абсолютную и относительную погрешности преобразования по формулам и занесите в табл. 1.15.5.

$$\Delta U = U_{\text{расч}} - U_{\text{вых}}; \quad \Delta U\% = |\Delta U| / U_{\text{расч}} * 100\%$$

Таблица 1.15.5

Соответствие выходного напряжения преобразователя различным значениям переключателей двоичного кода

Код на входе	$U_{\text{вых}}$	$U_{\text{расч}}$	ΔU	$\Delta U\%$
0000		0		
0001		1h		
----	----	---	---	---
1111		15h		

4. По данным табл. 1.15.5 постройте в виде графика характеристику преобразования ЦАП - зависимость выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ от входного кода.

Задание 1.15.5. Исследование функциональной модели преобразователя кода в напряжение

Соберите схему, приведенную на рис. 1.15.7. Необходимо задать параметры генератора слов в соответствии с рис. 1.15.7 и, с помощью клавиши Step, пройдя все позиции генератора слов, заполните табл. 1.15.6.

Генератор слов используется для отправки 32-разрядных слов или битовых комбинаций в устройство. Вывод T(trigger) используется для подключения внешнего генератора, вывод R(ready) – сигнал готовности, осуществляет запись выходного кода во внешнее устройство.

Таблица 1.15.6

Соответствие выходного напряжения преобразователя различным двоичным значениям входного кода

Двоичный код на входе с генератора	Шестнадцатиричный код	$U_{\text{вых}}$	$U_{\text{расч}}$
0000			
0001			
----	----	----	----
1111			

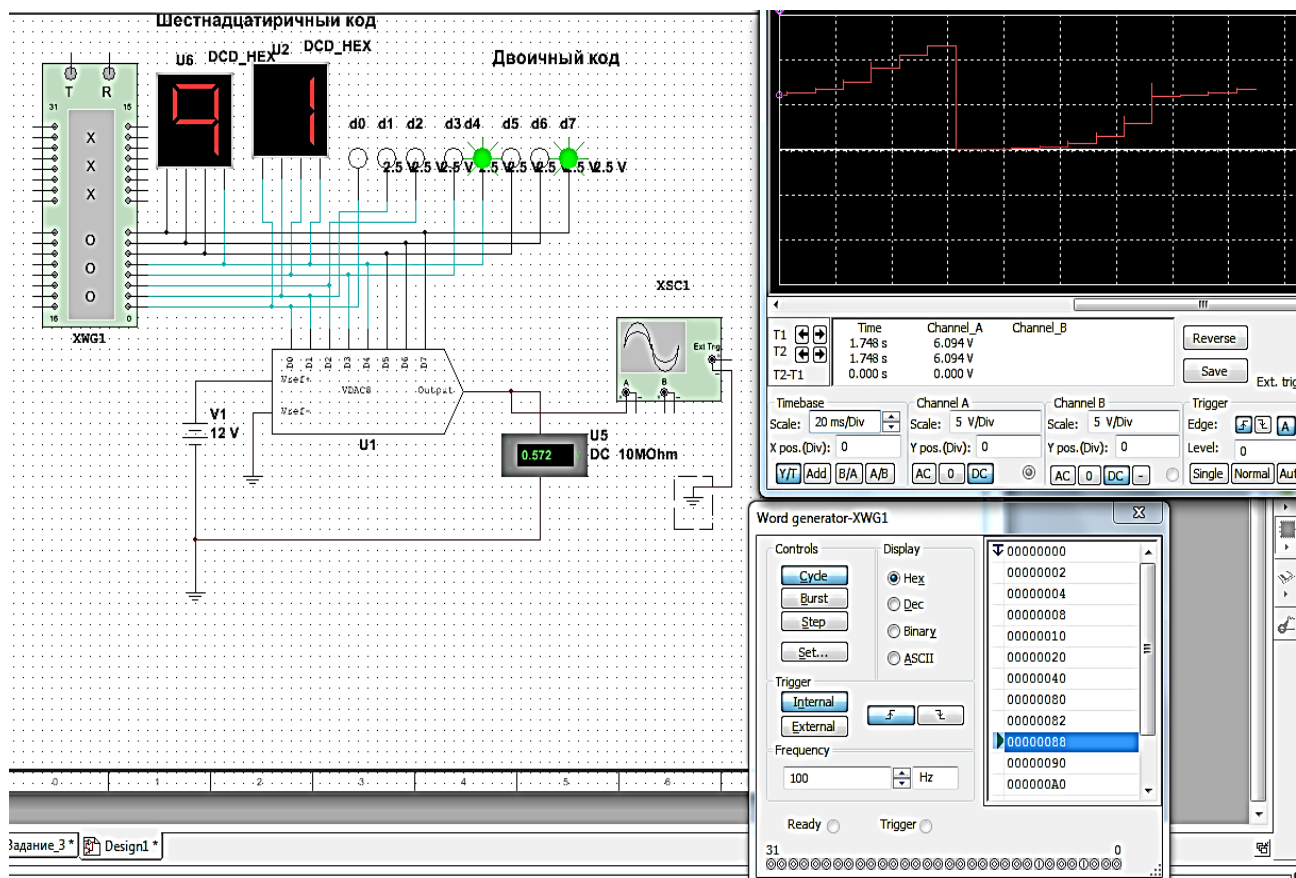


Рис. 1.15.7. Схема исследования функциональной модели ПКН

Задание 1.15.6. Простейший преобразователь кода в ток (ПКТ)

Для выполнения лабораторного задания, соберите схему, приведенную на рис. 1.15.8.

Заполните табл. 1.15.7, перебрав все возможные значения входного кода, и соответствующие им значения выходного тока ЦАП. Представьте полученные токи в виде суммы:

$$I_{\text{вых}} = I_0 (b_{n-1} \cdot 2^{n-1} + b_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + b_0 \cdot 2^0),$$

где b - значение соответствующего бита двоичного кода, равное нулю или единице.

Таблица 1.15.7

Соответствие выходного тока ПКТ различным двоичным значениям входного кода

Двоичный код переключателей	$I_{\text{вых}}$	$I_{\text{расч}}$
0000		
0001		
----	----	----
1111		

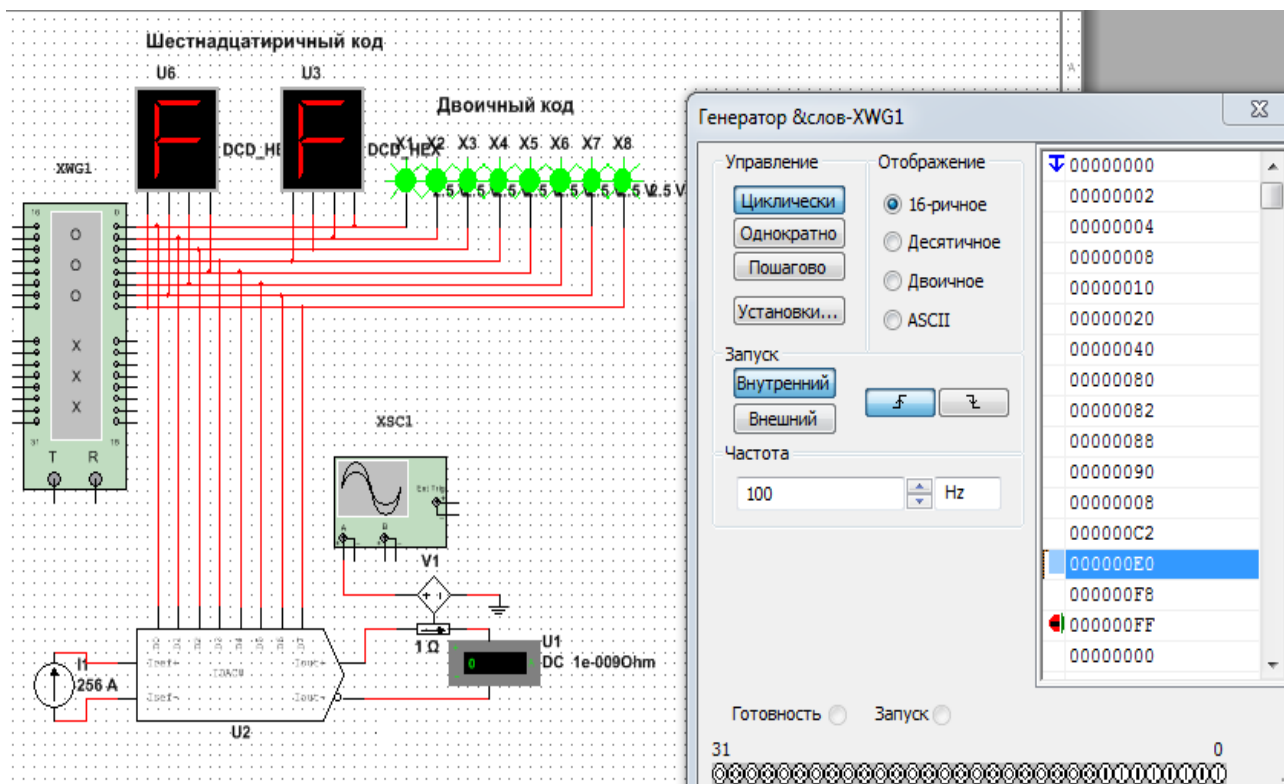


Рис. 1.15.9. Схема функциональной модели ПКТ

Задание 1.15.8. Использование знакового разряда в преобразователе кода в напряжение (ПКН)

Постройте схему, приведенную на рис. 1.15.10. В качестве знакового используется старший разряд генератора слов в левой части схемы и применяется для изменения полярности опорного напряжения. В правой части схемы сигнал этого разряда используется для включения в тракт аналогового сигнала усилителя с коэффициентом передачи -1, которым здесь служит источник напряжения, управляемый напряжением с коэффициентом передачи 1 V/V.

Заполните табл. 1.15.9, подавая на вход различные кодовые слова с помощью генератора слов, и определите последовательность соответствующих им значений выходного напряжения АЦП. Выходное напряжение измерить с помощью осциллографа.

Таблица 1.15.9

Соответствие выходного напряжения преобразователя различным двоичным значением входного кода с генератора слов

Двоичный код на входе с генератора	Шестнадцатиричный код	$U_{\text{вых}}$
0000		
0001		
----	----	----
1111		

Лабораторная работа № 1.16
Исследование аналого-цифровых преобразователей

Задание 1.16.1. Аналого-цифровой преобразователь, основанный на считывании состояния компараторов

79

Таблица 1.16.1

Измеренные потенциалы узлов делителя напряжения

Узлы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
φ, В															

2. Для моделирования задать частоту генератора напряжения треугольной формы равной 1 Гц, амплитуду напряжения выбрать 1 В и смещение задать равным 5 В, с экрана осциллографа вставьте в отчет осциллограммы, измерьте порог переключения младшего разряда. Занести в табл. 1.16.2 измерения для значений смещения -1, -2, -3, -4, -6 и -7 В.

Таблица 1.16.2

Изменение значения порога переключения в зависимости от напряжения смещения

U _{смещ.} , В	1	2	3	4	5	6	7
U _{перекл.} , В							

Задание 1.16.2. Исследование функциональной модели четырехразрядного АЦП

1. Для выполнения лабораторного задания собрать схему, приведенную на рис. 1.16.2. С помощью осциллографа измерьте напряжение функционального генератора, заполните табл. 1.16.3.

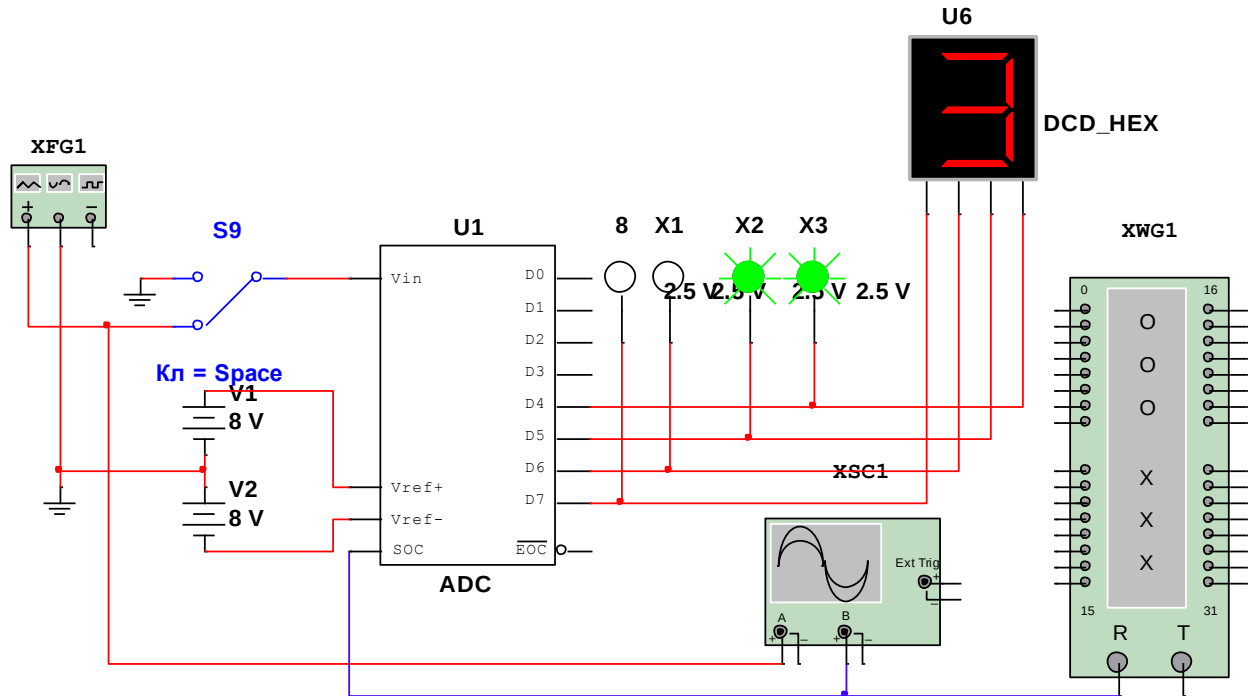


Рис. 1.16.2. Схема для получения выходной характеристики АЦП

Таблица 1.16.3

Результаты измерений четырехразрядного аналого-цифрового преобразователя

Такт переключения	Напряжение функционального генератора	Значение семисегментного индикатора	Выходной двоичный код
			0000
			0001
			0010

			1111

2. Вставьте в отчет осциллограммы входного сигнала и напряжения с младшего разряда *D4* (рис. 1.16.3). Определите пороги переключения.

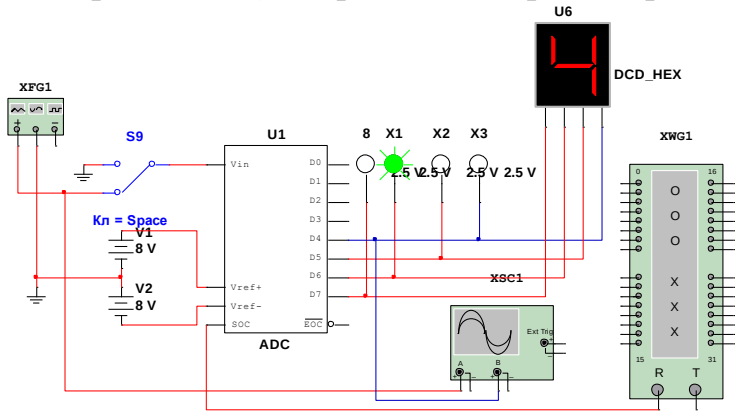


Рис. 1.16.3. Схема для получения осциллограмм входного и выходного сигналов аналого-цифрового преобразователя

Задание 1.16.3. Исследование АЦП с единичными приращениями компенсирующего сигнала

1. Соберите схему на рис. 1.16.4, переведите ключ сброса *S* в нижнее положение. В декодирующем семисегментном индикаторе наблюдайте изменение шестнадцатеричного кода и заполните табл. 1.16.4 при различных уровнях входного аналогового сигнала.

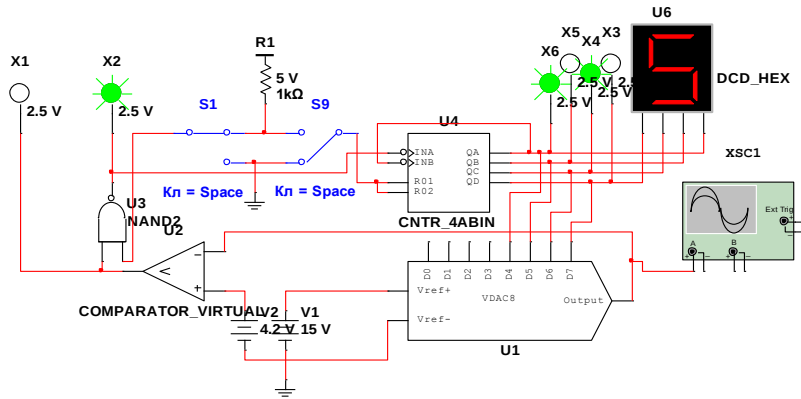


Рис. 1.16.4. Схема для моделирования процессов в АЦП при ручной подаче тактовых сигналов

Таблица 1.16.4

Результаты измерений четырехразрядного аналого-цифрового преобразователя

Такт переключения	Напряжение входного аналогового сигнала	Значение семисегментного индикатора	Выходной двоичный код
	5 В		0000
			0001
			0010

			1111
	6,5 В		0000
			0001
			0010

			1111

2. Для определения времени измерения сигнала АЦП при подаче тактовых сигналов от генератора собрать схему на рис. 1.16.5. В отчет вставить рассчитанное время измерения, которое определяется по осциллограммам. Входной и выходной каналы осциллографа подключить к выходу компаратора и на вход счетчика.

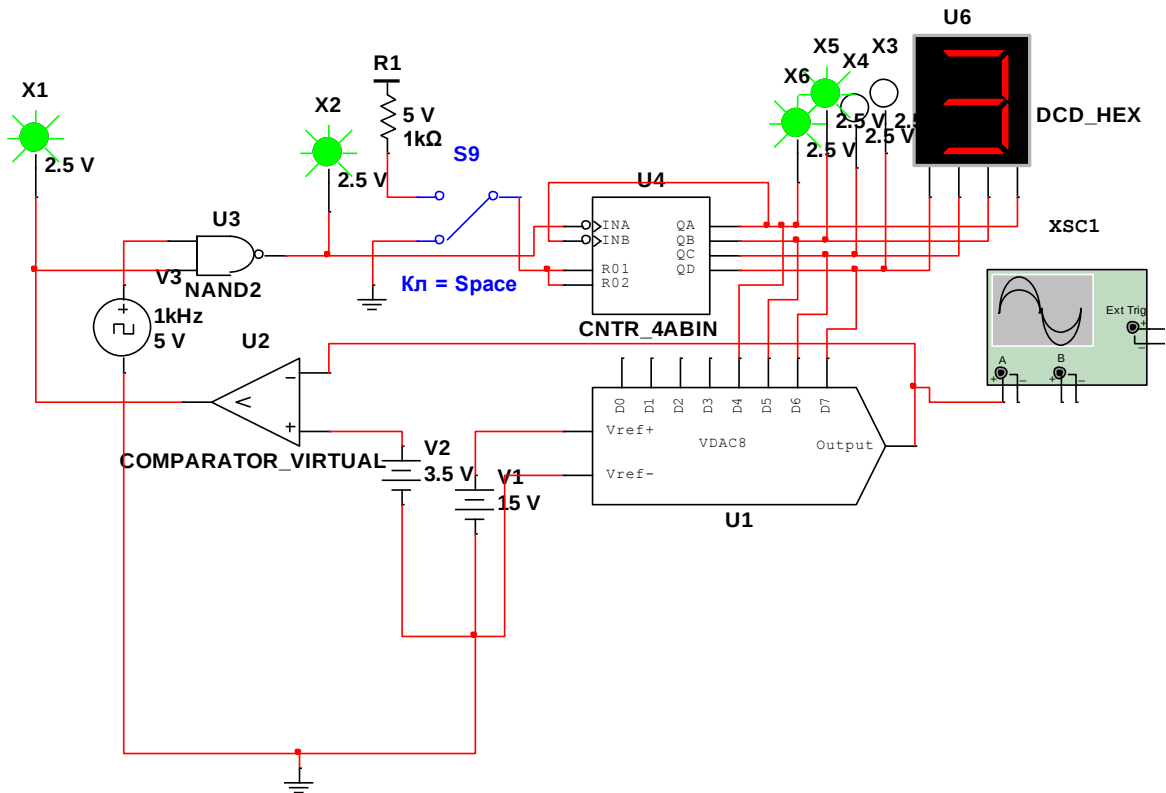


Рис. 1.16.5. Схема для определения времени измерения сигнала АЦП

2. ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

Практическая работа № 2.1

Расчет усилительного каскада на биполярном транзисторе

Цель работы: рассчитать усилительного каскада на биполярном транзисторе.

Задания для выполнения:

1. Определить способ включения транзистора и рассчитать координаты точки покоя (напряжение и ток в выходной цепи транзистора до подачи входного сигнала) и их нестабильность в диапазоне температур (20...50) °С.
2. Построить нагрузочные прямые постоянного и переменного тока.
3. Изобразить эквивалентную схему каскада усилителя нижних частот для рабочего диапазона частот (области средних частот). Оценить коэффициент усиления по напряжению, входное и выходное сопротивления.

Характеристики и параметры рассчитываемого транзистора приведены на рис. 2.1.1.

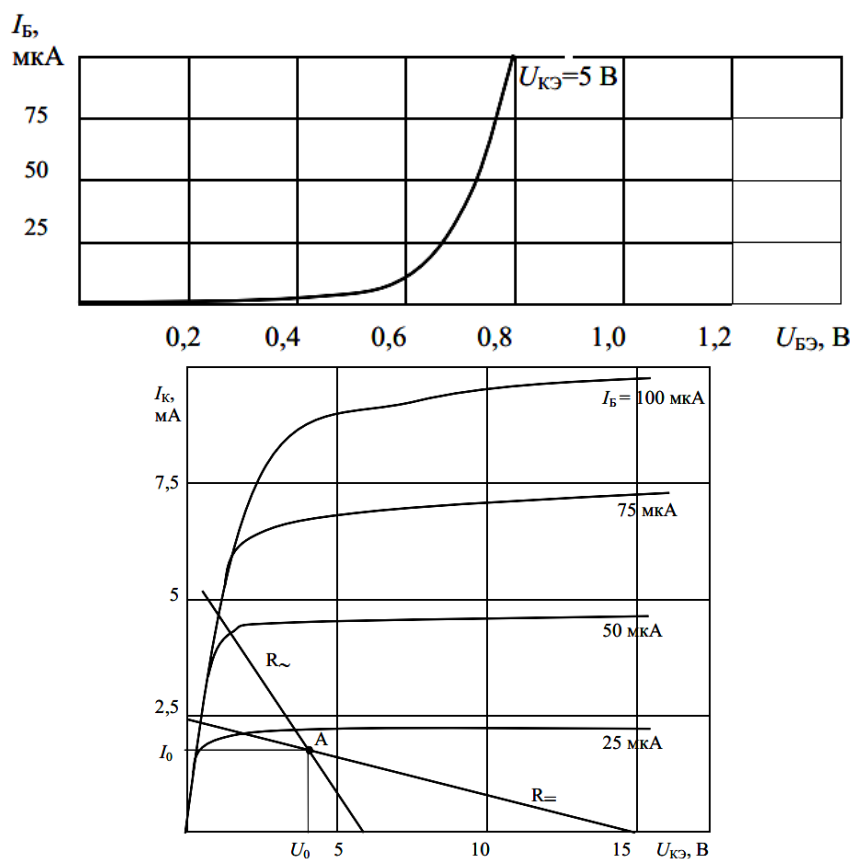
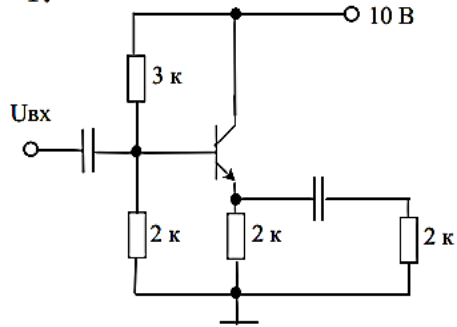


Рис. 2.1.1. Параметры биполярного транзистора

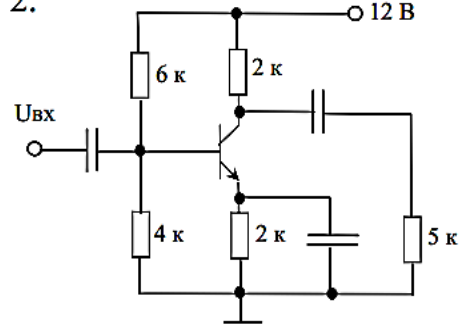
При расчете учесть, что транзистор кремниевый, и принять следующие параметры: коэффициент усиления тока базы $\beta = 100$, сопротивление области базы $r_B = 100$ Ом, сопротивление коллекторного перехода $r_K = 5$ МОм.

Варианты заданий

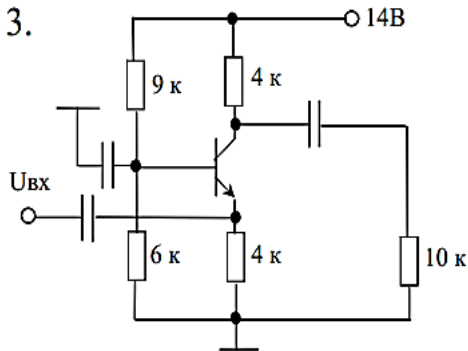
1.



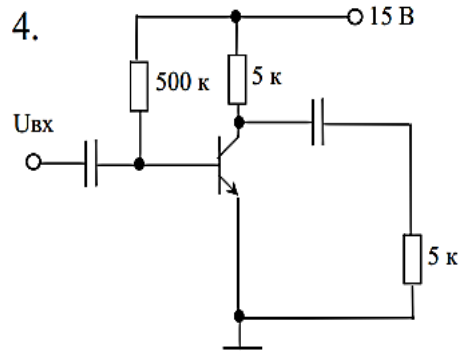
2.



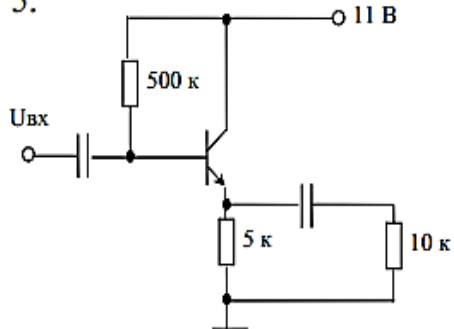
3.



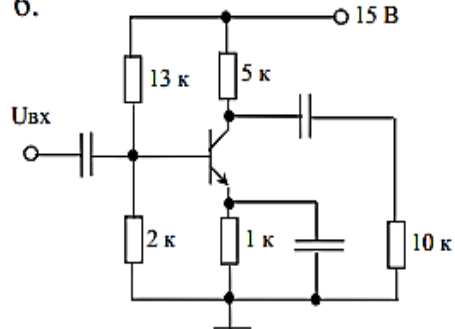
4.



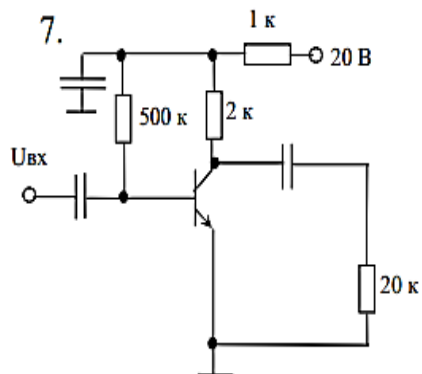
5.



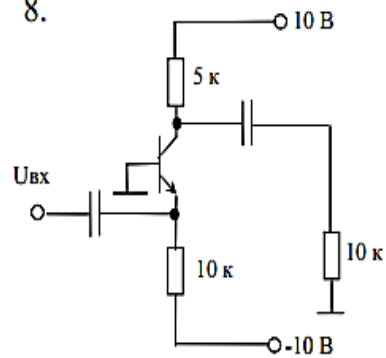
6.

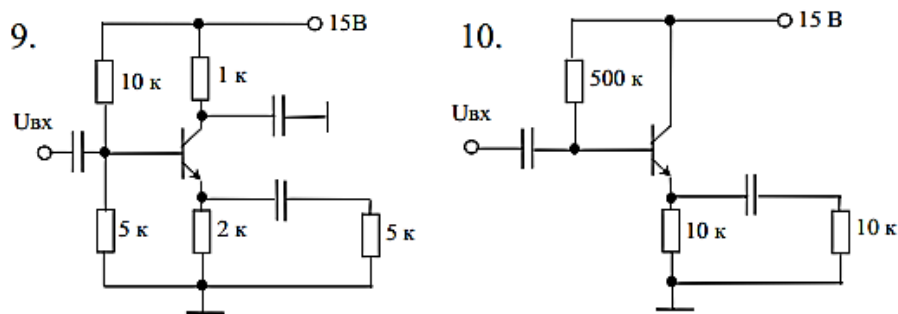


7.



8.





Пример выполнения практической работы № 2.1

На рис. 2.1.2 приведена схема анализируемого усилительного каскада. Транзистор включен по схеме с общим эмиттером.

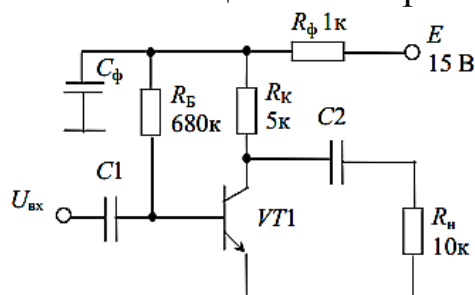


Рис. 2.1.2. Анализируемый усилительный каскад

Обозначения, принятые на рис. 2.1.2:

$R_{\phi}C_{\phi}$ – фильтр в цепи питания. За счет R_{ϕ} действует отрицательная обратная связь по постоянному току, стабилизирующая режим работы VT1.

R_K – сопротивление коллекторной цепи. Формирует переменную составляющую напряжения на коллекторе VT1.

R_H – сопротивление нагрузки.

R_B – базовое сопротивление. Задаёт режим работы транзистора по постоянному току.

C_1, C_2 – разделительные конденсаторы.

1. Для определения координаты рабочей точки транзистора при $U_0 = U_{KЭ}$ и $I_0 = I_K$ составим систему уравнений, связывающих токи и напряжения транзистора в рабочей точке:

$$\begin{cases} E = R_{\phi}(I_0 + I_B) + R_K I_0 + U_0; \\ E = R_{\phi}(I_0 + I_B) + R_{\phi} I_{\phi} + U_{\phi\phi} \\ I_0 = \beta I_B. \end{cases}$$

Определим следующие параметры в рабочей точке учитывая, что $\beta = 100$ и $U_{\phi\phi} = 0,7 \text{ V}$,

$$\text{а) ток базы } I_{\text{б}} = \frac{E - U_{\text{э}}}{R_{\text{б}} + R_{\text{ф}}(1 + \beta)} = \frac{15 - 0,7}{680 + 1 \cdot 101} = 18,3 \text{ мкА};$$

$$\text{б) ток коллектора в } I_0 = \beta I_{\text{б}} = 100 \cdot 18,3 = 1,83 \text{ мА};$$

в) напряжение между коллектором и эмиттером VT1

$$U_0 = E - R_{\text{ф}}(I_0 + I_{\text{б}}) - R_{\text{к}}I_0 = 15 - 1(1,83 + 0,02) - 5 \cdot 1,83 = 4 \text{ В}.$$

Сопротивление выходной цепи постоянному току $R_{\sim} \approx R_{\text{к}} + R_{\text{ф}} = 6 \text{ кОм}$.

Нагрузочная прямая постоянного тока проходит через точку $E = 15 \text{ В}$ на оси абсцисс и точку $I_{\text{к}} = E/R_{\sim} = 15/6 = 2,5 \text{ мА}$ на оси ординат (рис. 2.1.1). Отмечаем на характеристиках транзистора положение рабочей точки A .

Сопротивление выходной цепи переменному току

$$R_{\sim} = R_{\text{к}} \parallel R_{\text{н}} = \frac{5 \cdot 10}{5 + 10} = 3,33 \text{ кОм}.$$

Через рабочую точку A и точку $U_{\text{кэ}} = U_0 + R_{\sim}I_0 = 6,1 \text{ В}$ на оси абсцисс проводим нагрузочную прямую переменного тока.

2. Температурная нестабильность коллекторного тока

$$\Delta I_{\text{к}} = S_T \left(\Delta I_T - \frac{\alpha \Delta U_T}{R_{\text{б}} + R_{\text{ф}}} \right) = 87 \left(27,5 + \frac{0,99 \cdot 60}{681} \right) = 2400 \text{ мкА},$$

$$\text{где } S_T = \frac{1}{1 - \frac{\alpha R_{\text{б}}}{R_{\text{ф}} + R_{\text{б}}}} = \frac{1}{1 - \frac{0,99 \cdot 680}{681}} = 87 - \text{коэффициент температурной}$$

нестабильности каскада;

$\Delta I_T = I_0 \Delta \alpha = 1,83(50 - 30)5 \cdot 10^{-4} = 27,5 \text{ мкА}$ – температурное смещение выходных характеристик транзистора;

$\Delta U_T = -2 \cdot 30 = -60 \text{ мВ}$ – температурное смещение входных характеристик транзистора.

Вывод. Схема неработоспособна в заданном диапазоне температур, так как транзистор с ростом температуры заходит в режим насыщения и перестает усиливать сигналы.

3. При построении эквивалентной схемы для средних частот закорачиваем E , $C1$, $C2$, $C_{\text{ф}}$, а транзистор заменяем эквивалентной схемой (рис. 2.1.3).

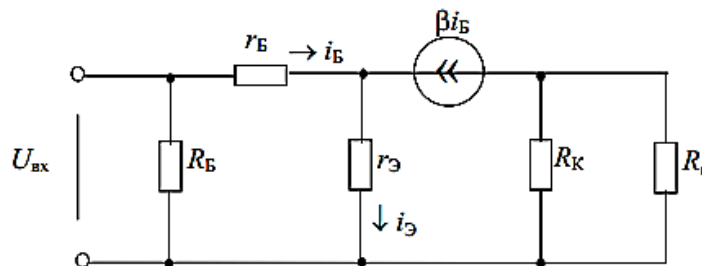


Рис. 2.1.3. Эквивалентная схема каскада УНЧ

Коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = \frac{\beta \cdot R_{\sim}}{r_B + r_{\sim}(1 + \beta)} = \frac{100 \cdot 3,3}{100 + 14(1 + 100)} = 216, \text{ где } r_{\sim} = \frac{26}{I_0} = 14 \text{ Ом}.$$

Входное сопротивление усилителя $R_{\text{вх}} = R_B \parallel [r_B + r_{\sim}(1 + \beta)] = 1,53 \text{ кОм}.$

Выходное сопротивление каскада $R_{\text{вых}} = R_K \parallel [r_{\sim} / (1 + \beta)] = 4,5 \text{ кОм}.$

Практическая работа № 2.2

Решение задач по усилительным каскадам на биполярных транзисторах

Примеры решения задач

Пример 2.1. На рис. 2.2.1 приведена схема усилительного каскада с ОЭ, где $R_{\Gamma} = 1 \text{ кОм}$, $R_K = 5,1 \text{ кОм}$, $R_3 = 510 \text{ Ом}$, $R_H = 10 \text{ кОм}$, транзистор с коэффициентами $h_{11\sim} = 800 \text{ Ом}$, $h_{12\sim} = 5 \cdot 10^{-4}$, $h_{21\sim} = 48$, $h_{22\sim} = 80 \text{ мкСм}$. Необходимо рассчитать коэффициенты усиления по напряжению K_U и по току K_I , определить входное $R_{\text{вх}}$ и выходное $R_{\text{вых}}$ сопротивления.

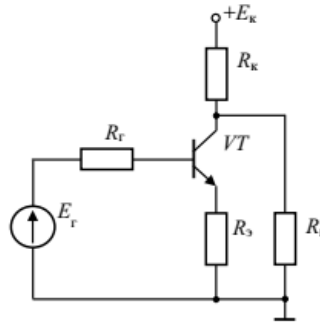


Рис. 2.2.1. Схема для расчета усилительного каскада с ОЭ

Решение: входное сопротивление транзистора для h параметров: $h_{11\sim} = r_{\sim} + r_{\sim}(1 + h_{21\sim})$.

Входное сопротивление определяется по формуле: $R_{\text{вх}} = r_{\sim} + (r_{\sim} + R_3)(1 + h_{21\sim}) = r_{\sim} + r_{\sim}(1 + h_{21\sim}) + R_3(1 + h_{21\sim}) = h_{11\sim} + R_3(1 + h_{21\sim}) = 25,8 \text{ кОм}$

Коэффициент усиления по напряжению определяем по формуле:

$$K_U = -h_{21\sim} \frac{R_K R_H / (R_K + R_H)}{R_{\Gamma} + R_{\text{вх}}} = -6,05.$$

Коэффициент усиления по току определяем по формуле:

$$K_I = h_{21\sim} \frac{R_{\Gamma}}{R_{\Gamma} + R_{\text{вх}}} \frac{R_K}{R_K + R_H} = 0,6.$$

Выходное сопротивление определяется по уравнению:

$R_{\text{вых}} = R_{\kappa} \parallel r_{\kappa} \left(1 + \beta \frac{R_3}{R_{\Gamma} + R_3} \right)$, где $r_{\kappa} = 1/h_{223}$, подставляя все рассчитанные данные в формулу расчета выходного сопротивления, получаем, что $R_{\text{вых}} \approx 4,9 \text{ кОм}$ т.е. $R_{\text{вых}} \approx R_{\kappa}$.

Пример 2.2. На рис. 2.2.2 приведена схема усилительного каскада с ОБ, где $R_{\Gamma} = 100 \text{ Ом}$, $R_{\kappa} = 1 \text{ кОм}$, $R_3 = 200 \text{ Ом}$, $R_{\text{н}} = 10 \text{ кОм}$, транзистор с коэффициентами $h_{116} = 30 \text{ Ом}$, $h_{126} = 1 \cdot 10^{-4}$, $h_{216} = 0,99$, $h_{226} = 1 \text{ мкСм}$. Необходимо рассчитать коэффициенты усиления по напряжению K_U и по току K_I , определить входное $R_{\text{вх}}$ и выходное $R_{\text{вых}}$ сопротивления.

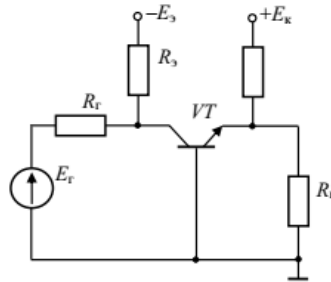


Рис. 2.2.2. Схема для расчета усилительного каскада с ОБ

Решение: входное сопротивление для усилительного каскада с ОБ определяется по формуле: $R_{\text{вх}} = \frac{h_{116} R_3}{h_{116} + R_3} \approx 26 \text{ Ом}$.

Коэффициент усиления по напряжению: $K_U = h_{216} \frac{R_{\kappa} R_{\text{н}} / (R_{\kappa} + R_{\text{н}})}{R_{\Gamma} + R_{\text{вх}}} = 7,14$.

Коэффициент усиления по току: $K_I = h_{216} \frac{R_{\Gamma}}{R_{\Gamma} + R_{\text{вх}}} \frac{R_{\kappa}}{R_{\kappa} + R_{\text{н}}} = 0,071$.

Выходное сопротивление определяется по уравнению:

$R_{\text{вых}} = R_{\kappa} \parallel r_{\kappa} \left(1 - h_{216} \frac{r_{\text{б}}}{r_{\text{б}} + r_3 + (R_{\Gamma} R_3 / (R_{\Gamma} + R_3))} \right)$, где $r_{\kappa} = 1/h_{226}$, $r_{\text{б}} \approx h_{126} / h_{226}$

подставляя все рассчитанные данные в формулу расчета выходного сопротивления, получаем, что $R_{\text{вых}} \approx 1 \text{ кОм}$, т.е. $R_{\text{вых}} \approx R_{\kappa}$.

Пример 2.3. На рис. 2.2.3 приведена схема усилительного каскада с ОК, где $R_{\Gamma} = 1 \text{ кОм}$, $R_3 = 3 \text{ кОм}$, $R_{\text{н}} = 100 \text{ Ом}$, транзистор с коэффициентами $h_{116} = 25 \text{ Ом}$, $h_{126} = 2 \cdot 10^{-4}$, $h_{216} = 0,985$, $h_{226} = 1 \text{ мкСм}$. Необходимо рассчитать коэффициенты усиления по напряжению K_U , по току K_I и по мощности K_P , определить входное $R_{\text{вх}}$ и выходное $R_{\text{вых}}$ сопротивления.

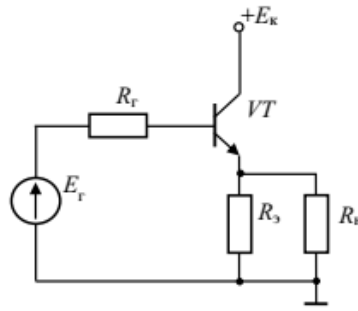


Рис. 2.2.3. Схема для расчета усилительного каскада с ОК

Решение: расчет необходимых коэффициентов для перехода от h-параметров к физическим параметрам схемы:

$$\beta = h_{21\delta} / (1 + h_{22\delta}) = 65,7; \quad r_{\kappa} = 1 / (h_{22\delta} (1 + \beta)) \approx 15 \text{ кОм};$$

$$r_{\delta} = h_{12\delta} / h_{22\delta} = 200 \text{ Ом}; \quad r_{\gamma} = h_{11\delta} - r_{\delta} (1 - h_{21\delta}) \approx 22 \text{ Ом}.$$

Входное сопротивление: $R_{\text{вх}} = r_{\delta} + \left(r_{\gamma} + \frac{R_{\text{Э}} R_{\text{Н}}}{R_{\text{Н}} + R_{\text{Э}}} \right) (1 + \beta) \approx 8,07 \text{ кОм}.$

Выходное сопротивление: $R_{\text{вых}} = R_{\text{Э}} \parallel \left(r_{\gamma} + \frac{r_{\delta} + R_{\text{Г}}}{1 + \beta} \right) \approx 40 \text{ Ом}.$

Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = (1 + \beta) \frac{R_{\text{Э}} R_{\text{Н}} / (R_{\text{Э}} + R_{\text{Н}})}{R_{\text{Г}} + R_{\text{вх}}} = 0,706.$$

Коэффициент усиления по току: $K_I = (1 + \beta) \frac{R_{\text{Г}}}{R_{\text{Г}} + R_{\text{вх}}} \frac{R_{\text{Э}}}{R_{\text{Э}} + R_{\text{Н}}} = 7,12.$

Коэффициент усиления по мощности: $K_P = K_I \cdot K_U = 5,03.$

Задачи для самостоятельного решения

2.1. Определить коэффициенты усиления по напряжению K_U и по току K_I , входное $R_{\text{вх}}$ и выходное $R_{\text{вых}}$ сопротивления усилительного каскада с ОЭ (рис. 2.2.1), значения для расчета взять из табл. 2.2.1.

2.2. Определить коэффициенты усиления по напряжению K_U и по току K_I , входное $R_{\text{вх}}$ и выходное $R_{\text{вых}}$ сопротивления усилительного каскада с ОБ (рис. 2.2.2), значения для расчета взять из табл. 2.2.1.

2.3. Определить коэффициенты усиления по напряжению K_U , по току K_I и по мощности K_P , входное $R_{\text{вх}}$ и выходное $R_{\text{вых}}$ сопротивления усилительного каскада с ОК (рис. 2.2.3), значения для расчета взять из табл. 2.2.1.

2.4. Определить коэффициент полезного действия в схеме (рис. 2.2.4), используя формулы, приведенные ниже, с параметрами $U_{\text{н}}$, $E_{\text{к}}$, заданными в табл. 2.2.2. Схема работает на активную нагрузку $R_{\text{н}}$.

Потребляемая схемой мощность, определяется формулой $P_0 = 2E_{\text{к}}I_{\text{к.ср}}$, где $I_{\text{к.ср}} = I_{\text{к}}/\pi$ –средний коллекторный ток транзистора. Выходная мощность схем

$P_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{Н}} = I_{\text{Э}} U_{\text{Э}} / 2 \approx I_{\text{Н}} U_{\text{Н}} / 2 = U_{\text{Н}}^2 / 2R_{\text{Н}}$. Мощность, рассеиваемая на коллекторе одного транзистора, $P_{\text{К}} = (P_0 - P_{\text{ВЫХ}}) / 2$. Коэффициент полезного действия схемы $\eta = P_{\text{ВЫХ}} / P_0$.

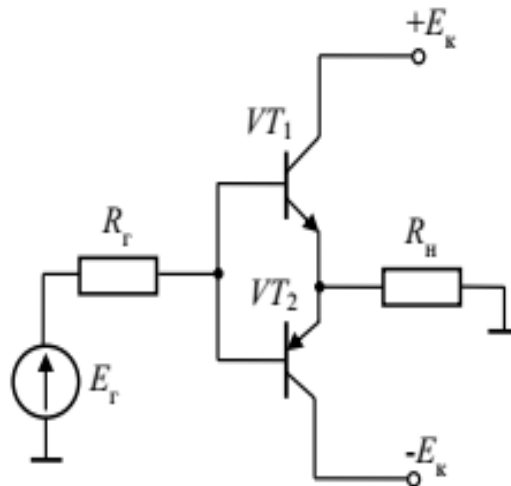


Рис. 2.2.4. Схема усилителя мощности для расчета параметров

Таблица 2.2.1

Варианты значений для решения задач 2.1-2.3

№	ОЭ								ОБ								ОК		
	Rг, кОм	Rк, кОм	Rэ, Ом	Rн, кОм	h _{11э} , Ом	h _{12э}	h _{21э}	h _{22э} , мкСм	Rг, кОм	Rк, кОм	Rэ, Ом	Rн, кОм	h _{11б} , Ом	h _{12б}	h _{21б}	h _{22б} , мкСм	Rг, кОм	Rэ, кОм	Rн, кОм
1	1	2,1	420	8	700	2*10 ⁻⁴	27	70	0,2	0,5	150	9	15	2*10 ⁻⁴	0,87	1	2	2,1	0,8
2	1,5	2,2	450	9	710	3*10 ⁻⁴	28	72	0,3	0,6	200	10	16	3*10 ⁻⁴	0,89	1,5	2,5	2,2	0,9
3	2	2,4	470	10	720	4*10 ⁻⁴	29	74	0,4	0,7	180	11	17	4*10 ⁻⁴	0,90	2	3	2,4	1
4	2,5	3,1	500	11	730	1*10 ⁻⁴	30	76	0,5	1	190	12	18	1*10 ⁻⁴	0,95	1,75	3,5	3,1	1.1
5	3	2,1	510	12	740	6*10 ⁻⁴	31	80	0,6	1,5	210	13	19	6*10 ⁻⁴	0,97	1,25	4	2,1	1.2
6	3,5	2,2	520	13	750	5*10 ⁻⁴	32	85	0,7	2	225	14	20	5*10 ⁻⁴	0,98	3	4,5	2,2	1.3
7	4	2,4	540	14	760	7*10 ⁻⁴	33	86	0,8	0,5	150	15	21	7*10 ⁻⁴	1,0	3,5	1,25	2,4	1.4
8	4,5	3,1	420	15	770	8*10 ⁻⁴	34	87	0,9	0,6	200	16	22	8*10 ⁻⁴	1,15	2,25	1,3	3,1	1.5
9	1,25	2,1	450	16	780	2*10 ⁻⁴	35	88	1	0,7	180	17	23	2*10 ⁻⁴	1,21	2,21	3,25	2,1	1.6
10	1,3	2,2	470	8	790	3*10 ⁻⁴	36	70	1,5	1	190	18	24	3*10 ⁻⁴	0,87	3,36	2,55	2,2	0,88
11	3,25	2,4	500	9	800	4*10 ⁻⁴	37	72	0,2	1,5	210	19	25	4*10 ⁻⁴	0,89	1	2	2,4	0,9
12	2,55	3,1	510	10	700	1*10 ⁻⁴	38	74	0,3	2	225	20	26	1*10 ⁻⁴	0,90	1,5	2,5	3,1	0,75
13	1	2,1	520	11	710	6*10 ⁻⁴	39	76	0,4	0,5	150	21	27	6*10 ⁻⁴	0,95	2	3	2,1	0,56
14	1,5	2,2	540	12	720	5*10 ⁻⁴	40	80	0,5	0,6	200	22	15	5*10 ⁻⁴	0,97	1,75	3,5	2,2	0,7
15	2	2,4	420	13	730	7*10 ⁻⁴	41	85	0,6	0,7	180	9	16	7*10 ⁻⁴	0,98	1,25	4	2,4	0,8
16	2,5	3,1	450	14	740	8*10 ⁻⁴	42	86	0,7	1	190	10	17	8*10 ⁻⁴	1,0	3	4,5	3,1	0,94
17	3	2,1	470	15	750	2*10 ⁻⁴	43	87	0,8	1,5	210	11	18	2*10 ⁻⁴	1,15	3,5	1,25	2,1	0,95
18	3,5	2,2	500	16	760	3*10 ⁻⁴	44	88	0,9	2	225	12	19	3*10 ⁻⁴	1,21	2,25	1,3	2,2	0,1
19	4	2,4	510	8	770	4*10 ⁻⁴	45	70	1	0,5	150	13	20	4*10 ⁻⁴	0,87	2,21	3,25	2,4	0,2
20	4,5	3,1	520	9	780	1*10 ⁻⁴	46	72	1,5	0,6	200	14	21	1*10 ⁻⁴	0,89	3,36	2,55	3,1	0,3
21	1,25	2,1	540	10	790	6*10 ⁻⁴	47	74	0,2	0,7	180	15	22	6*10 ⁻⁴	0,90	1	2	2,1	0,4
22	1,3	2,2	420	11	800	5*10 ⁻⁴	48	76	0,3	1	190	16	23	5*10 ⁻⁴	0,95	1,5	2,5	2,2	0,5
23	3,25	2,4	450	12	700	7*10 ⁻⁴	49	80	0,4	1,5	210	17	24	7*10 ⁻⁴	0,97	2	3	2,4	0,6
24	2,55	3,1	470	13	710	8*10 ⁻⁴	50	85	0,5	2	225	18	25	8*10 ⁻⁴	0,98	1,75	3,5	3,1	0,7

Таблица 2.2.2

Варианты значений для решения задачи 2.4

Вариант	I_k	U_n	E_k	R_n
1	1,5	20	10	5
2	1	21	11	8
3	2	22	12	10
4	2,5	23	13	12
5	3	24	14	14
6	1,5	25	15	16
7	1	26	16	18
8	2	27	17	20
9	2,5	28	18	22
10	3	29	19	24
11	3	30	20	26
12	1	20	10	5
13	2	21	11	8
14	2,5	22	12	10
15	3	23	13	12
16	1,5	24	14	14
17	1	25	15	16
18	2	26	16	18
19	2,5	27	17	20
20	3	28	18	22
21	1,5	29	19	24
22	1	30	20	26
23	2	20	10	5
24	2,5	21	11	8

Практическая работа № 2.3

Расчёт h- параметров биполярного транзистора

Цель работы: научиться определять h – параметры и характеристики транзистора графоаналитическим методом.

Теоретическая часть

Эквивалентная схема биполярного транзистора с использованием h-параметров приведена на рис. 2.3.1.

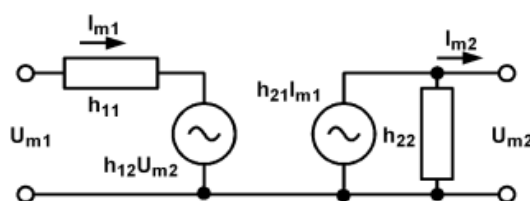


Рис. 2.3.1. Эквивалентная схема биполярного транзистора

Для этой схемы независимыми переменными являются входной ток I_{m1} и выходное напряжение U_{m2} , а зависимыми переменными входное напряжение U_{m1} и выходной ток I_{m2} можно составить систему уравнений, задействуя h-параметры:

$$U_{m1} = h_{11}I_{m1} + h_{12}U_{m2}$$

$$I_{m2} = h_{21}I_{m1} + h_{22}U_{m2},$$

где $h_{11} = U_{m1}/I_{m1}$, при $U_{m2} = 0$, входное сопротивление;

$h_{12} = U_{m1}/U_{m2}$, при $I_{m1} = 0$, коэффициент обратной связи по напряжению;

$h_{21} = I_{m2}/I_{m1}$, при $U_{m2} = 0$, коэффициент передачи тока;

$h_{22} = I_{m2}/U_{m2}$, при $I_{m1} = 0$, выходная проводимость.

При обозначении **h** – параметров, внизу, в зависимости от схемы включения, к цифровым индексам добавляется буква. Для схемы с общим эмиттером это $h_{11э}, h_{12э}, h_{21э}, h_{22э}$; для схемы с общим коллектором — $h_{11к}, h_{12к}, h_{21к}, h_{22к}$; для схемы с общей базой это $h_{11б}, h_{12б}, h_{21б}, h_{22б}$.

Для транзистора, включенного по схеме с **общим эмиттером**:

Параметры h_{11} и h_{12} определяются по входным характеристикам транзистора. Параметры h_{21} и h_{22} определяются по выходным характеристикам.

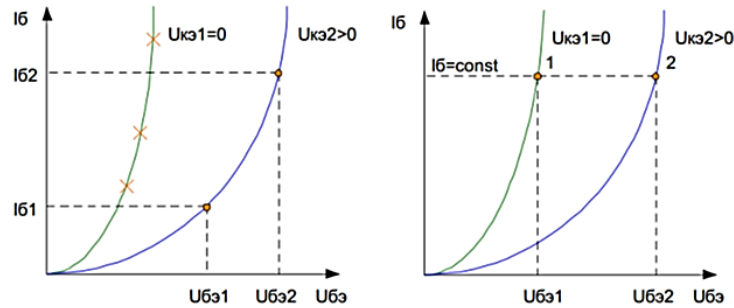


Рис. 2.3.2. Входные характеристики транзистора

$$h_{11э} = \frac{U_{бэ2} - U_{бэ1}}{I_{б2} - I_{б1}}, \quad h_{12э} = \frac{U_{бэ2} - U_{бэ1}}{U_{кэ2} - U_{кэ1}} = \frac{U_{бэ2} - U_{бэ1}}{U_{кэ2}}, \text{ м.к. } U_{кэ1} = 0$$

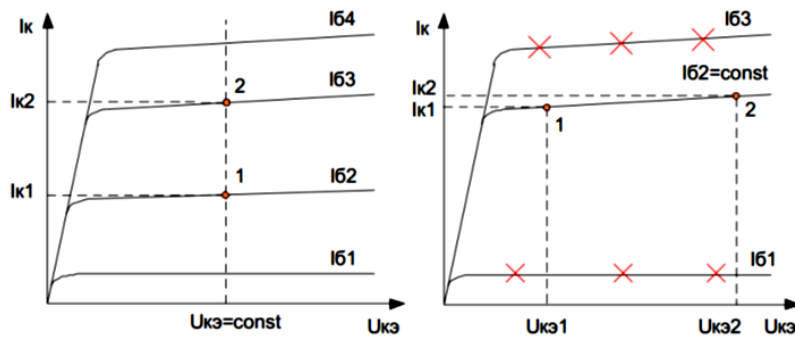


Рис. 2.3.3. Выходные характеристики транзистора

$$h_{21э} = \frac{I_{к2} - I_{к1}}{\Delta I_{б}} = \frac{I_{к2} - I_{к1}}{I_{б3} - I_{б2}}; \quad h_{22э} = \frac{I_{к2} - I_{к1}}{U_{кэ2} - U_{кэ1}}.$$

Коэффициенты $h_{21б}$ и $h_{21э}$ связаны между собой следующими соотношениями:

$$h_{21б} = \frac{h_{21э}}{1 + h_{21э}} \quad \text{или} \quad h_{21э} = \frac{h_{21б}}{1 - h_{21б}}.$$

Пример расчета

Для транзистора, включенного по схеме с ОЭ, определить коэффициент усиления $h_{21э}$ по его входной и выходным характеристикам, приведенным на рис. 2.3.4, если $U_{бэ}=0,4$ В, $U_{кэ}=25$ В. Рассчитать коэффициент передачи по току $h_{21б}$ и мощность P_k на коллекторе.

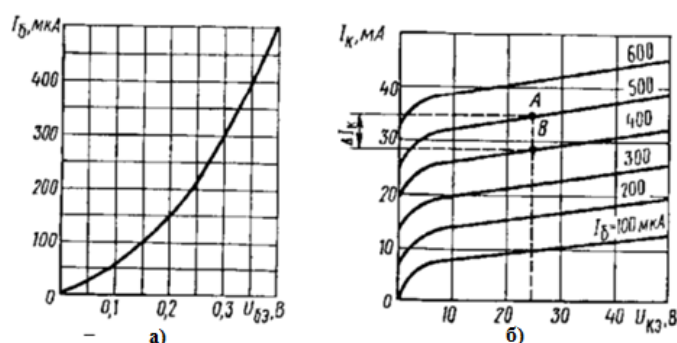


Рис. 2.3.4. Входные (а) и выходные (б) характеристики транзистора

Решение:

1. Определяем по входной характеристике при $U_{бэ}=0,4$ В ток базы $I_б=500$ мкА.
2. Находим по выходным характеристикам для $U_{кэ}=25$ В и $I_б=500$ мкА ток коллектора $I_к=36$ мА.
3. На выходных характеристиках строим отрезок АВ, из которого находим:
 $\Delta I_k = AB = I_{k1} - I_{k2} = 36 - 28 = 8$ мА,
 $\Delta I_b = AB = I_{b1} - I_{b2} = 500 - 400 = 100$ мкА = 0,1 мА
4. Коэффициент усиления: $h_{21э} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} = \frac{8}{0,1} = 80$.
5. Коэффициент передачи по току: $h_{21б} = \frac{h_{21э}}{1 + h_{21э}} = \frac{80}{1 + 80} = 0,98$.
6. Мощность на коллекторе: $P_k = U_{кэ} I_k = 25 \cdot 36 = 90 \text{ мВт} = 0,9 \text{ Вт}$.

Задачи для самостоятельного решения.

Необходимые коэффициенты для расчета выбрать из табл. в соответствии с вариантом.

Задача № 1

Для транзистора, включенного по схеме с ОЭ, заданы напряжение на базе $U_{бэ}$, напряжение на коллекторе $U_{кэ}$, и напряжение источника питания E_k . Определить, используя входную и выходные характеристики, ток коллектора I_k , коэффициент усиления $h_{21э}$, сопротивление нагрузки R_k и мощность на коллекторе P_k .

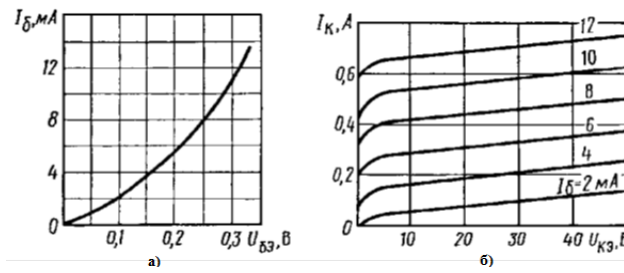


Рис. 2.3.5. Входные (а) и выходные (б) характеристики транзистора для задачи № 1

Задача № 2

Для транзистора, включенного по схеме с ОЭ, заданы напряжение на базе $U_{бэ}$, сопротивление нагрузки R_k и напряжение источника питания E_k . Используя входную и выходные характеристики, определить напряжение на коллекторе $U_{кэ}$, ток коллектора I_k , коэффициент усиления $h_{21э}$ и мощность на коллекторе P_k . Определить также коэффициент передачи тока $h_{21б}$.

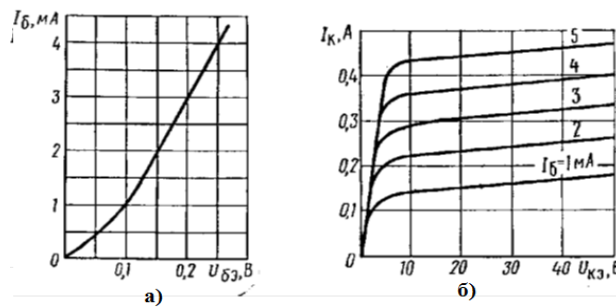


Рис. 2.3.6. Входные (а) и выходные (б) характеристики транзистора для задачи № 2

Задача № 3

Для транзистора, включенного по схеме с ОЭ, используя входную и выходные характеристики, определить коэффициент усиления $h_{21э}$, значение напряжения на коллекторе $U_{кэ1}$, и $U_{кэ2}$, мощность на коллекторе $P_{к1}$ и $P_{к2}$, если дано напряжение на базе $U_{бэ}$, значение сопротивления нагрузки $R_{кэ1}$ и $R_{кэ2}$ и напряжение источника питания E_k .

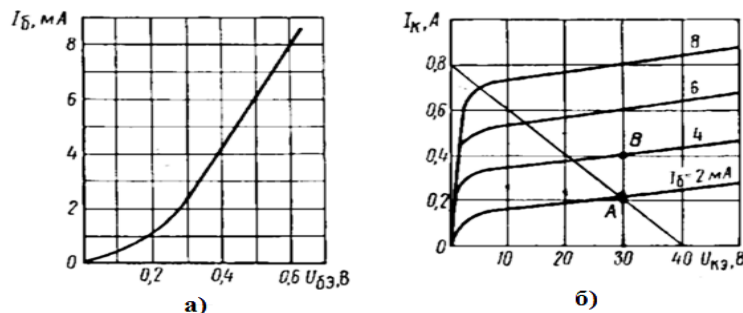


Рис. 2.3.7. Входные (а) и выходные (б) характеристики транзистора для задачи № 3

Необходимые коэффициенты для расчета

Вариант	Задача №1			Задача №2			Задача №3			
	$U_{бэ}, В$	$U_{кэ}, В$	$E_k, В$	$U_{бэ}, В$	$R_k, кОм$	$E_k, В$	$U_{бэ}, В$	$R_{кэ}, Ом$	$R_{кэ}, Ом$	$E_k, В$
1	0,10	5	10	0,08	0,1	10	0,10	0,01	0,10	10
2	0,11	6	12	0,09	0,2	12	0,12	0,02	0,15	12
3	0,12	7	14	0,10	0,3	14	0,14	0,03	0,20	14
4	0,13	8	16	0,11	0,4	16	0,15	0,04	0,25	16
5	0,14	9	18	0,12	0,5	18	0,16	0,05	0,30	18
6	0,15	10	20	0,13	0,6	20	0,17	0,06	0,35	20
7	0,16	11	22	0,14	0,7	22	0,18	0,07	0,40	22
8	0,17	12	24	0,15	0,8	24	0,19	0,08	0,45	24
9	0,18	13	26	0,16	0,9	26	0,20	0,09	0,52	26
10	0,19	14	28	0,17	1,0	28	0,21	0,10	0,54	28
11	0,20	15	30	0,18	1,1	30	0,22	0,15	0,55	30
12	0,21	16	32	0,19	1,2	32	0,23	0,20	0,58	32
13	0,22	17	34	0,20	1,3	34	0,27	0,25	0,60	34
14	0,23	18	36	0,21	1,4	36	0,28	0,30	0,61	36
15	0,24	19	38	0,22	1,5	38	0,29	0,32	0,62	38
16	0,25	20	40	0,23	1,6	40	0,30	0,35	0,63	40
17	0,26	21	42	0,24	1,7	42	0,32	0,37	0,64	42
18	0,27	22	44	0,25	1,8	44	0,34	0,40	0,65	44
19	0,28	23	46	0,26	1,9	46	0,36	0,42	0,66	46
20	0,29	24	48	0,27	2,0	48	0,38	0,44	0,70	48
21	0,30	25	50	0,28	2,1	50	0,40	0,48	0,71	50
22	0,31	26	52	0,29	2,2	52	0,42	0,50	0,72	52
23	0,32	27	54	0,30	2,3	54	0,44	0,51	0,73	54
24	0,33	28	56	0,31	2,4	56	0,46	0,52	0,74	56

Практическая работа № 2.4

Расчет оконечного усилительного каскада на биполярном транзисторе

Цель работы: рассчитать оконечный (выходной) усилительный каскад с общим эмиттером.

Задания для выполнения:

1. Рассчитать верхнюю граничную частоту f_v полосы пропускания каскада.
2. Сопротивление коллектора R_k .
3. Входное сопротивление каскада $R_{вх}$.
4. Входное сопротивление каскада $C_{вх}$ каскада.

Схема оконечного усилительного каскада приведена на рис. 2.4.1, с использованием параметров транзистора, взятых из табл. в соответствии с вариантом. Также для расчета понадобится использование эквивалентной схемы замещения транзистора, приведенной на рис. 2.4.2.

Свойства транзистора при малом сигнале в широком диапазоне частот удобно анализировать при помощи физических эквивалентных схем, которые строятся на базе длинных линий и включают в себя ряд элементов с сосредоточенными параметрами. Наиболее распространенная эквивалентная схема - схема Джаколетто, представленная на рис. 2.4.2.

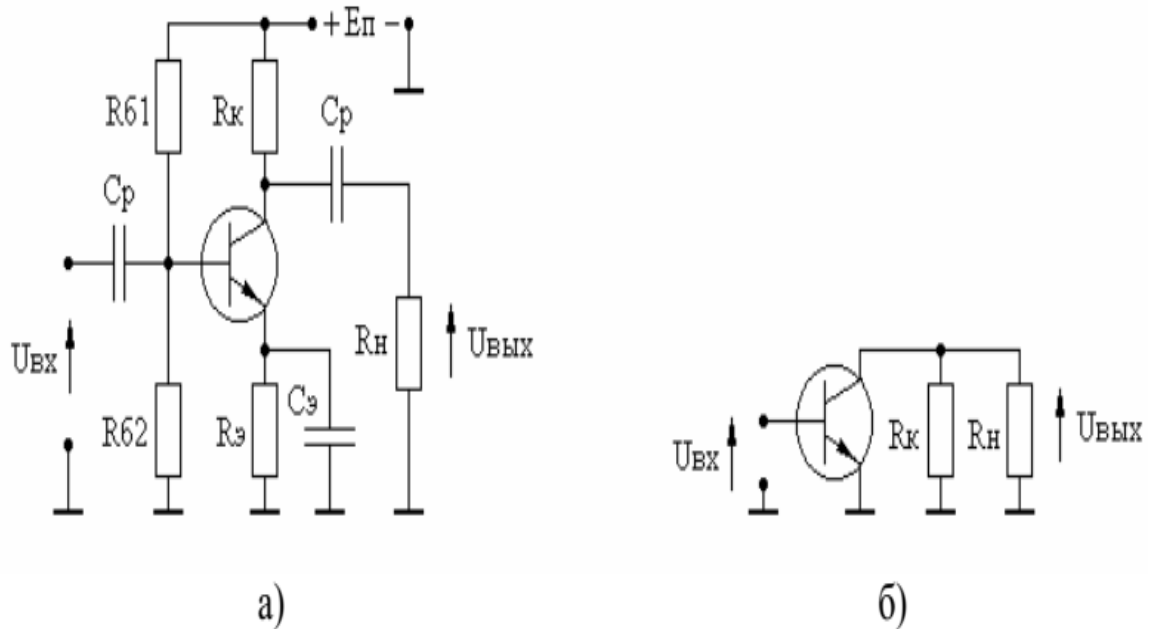


Рис. 2.4.1. Усилительный каскад с ОЭ (а) и эквивалентная схема (б)

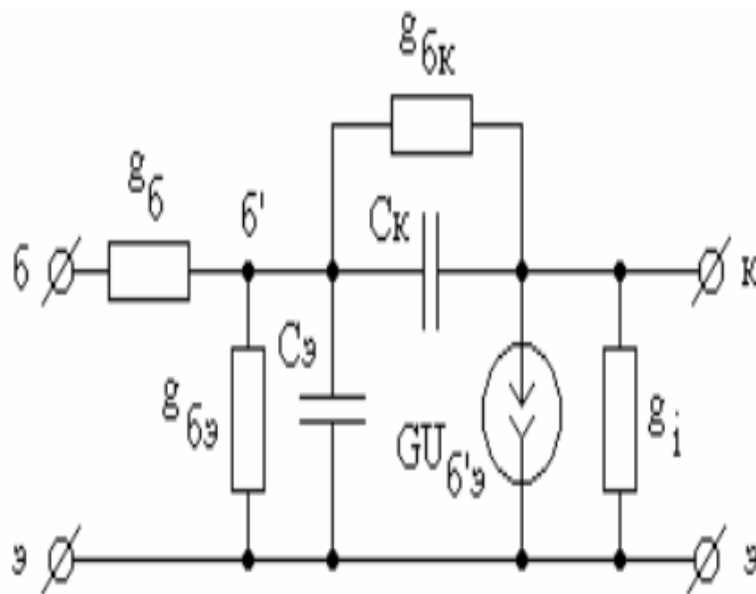


Рис. 2.4.2. Эквивалентная схема Джаколетто

Параметры транзистора для расчета

Вариант	Тип транзистора	R_n , Ом	Y_b	K_0	S_0 , А/В	r_6 , Ом	r_3 , Ом	β_0	C_k , пФ	C_3 , пФ
1	КТ371А	20	0,50	8	0,85	5	1	100	2	110
2	КТ372А	21	0,50	9	0,86	5	1	100	2	110
3	КТ372Б	22	0,55	10	0,87	5	1	100	2	110
4	КТ399А	23	0,55	11	0,88	6	2	100	2	120
5	КТ501А	24	0,60	12	0,89	6	2	110	3	120
6	КТ501Б	25	0,60	13	0,90	6	2	110	3	120
7	КТ501В	26	0,65	14	0,90	6	3	110	3	130
8	КТ501Г	27	0,65	15	0,91	7	3	110	4	130
9	КТ501Д	28	0,70	16	0,91	7	3	120	4	130
10	КТ501Е	29	0,70	17	0,92	7	4	120	4	130
11	КТ501Ж	30	0,75	18	0,92	8	4	120	5	140
12	КТ501И	31	0,75	19	0,93	8	4	120	5	140
13	КТ501К	32	0,80	20	0,93	8	4	130	5	140
14	КТ501Л	33	0,80	21	0,94	9	5	130	6	140
15	КТ501М	34	0,85	22	0,94	9	5	130	6	150
16	КТ502А	35	0,85	23	0,95	9	5	130	6	150
17	КТ502В	36	0,85	224	0,95	10	6	140	6	150
18	КТ502Е	37	0,90	25	0,96	10	6	140	7	150
19	КТ503А	38	0,90	26	0,96	10	6	140	7	160
20	КТ503В	39	0,90	27	0,97	11	6	140	7	160
21	КТ503Г	40	0,95	28	0,97	11	7	150	8	160
22	КТ503Д	41	0,95	29	0,98	11	7	150	8	160
23	КТ503Е	42	0,95	30	0,98	12	7	150	8	160
24	КТ505Б	43	0,95	31	0,98	12	7	150	8	160

Пример выполнения практической работы № 2.4

При расчете используется транзистор КТ610А (объемное сопротивление базы $r_6 = 5$ Ом, объемное сопротивление эмиттера $r_3 = 1$ Ом, $g_{63} = 0,0083$ Сим, емкость обратно смещенного коллекторного перехода $C_k = 4$ пФ, емкость обратно смещенного эмиттерного перехода $C_3 = 160$ пФ, $f_T = 1$ ГГц, $\beta_0 = 120$, $S_0 = 0,95$ А/В, $\alpha_0 = 0,99$, $I_{30} = 55$ мА) и условия $R_n = 50$ Ом; $Y_b = 0,9$; $K_0 = 10$.

На принципиальной схеме усилительного каскада, приведенной на рис. 2.4.1а) приведены следующие элементы: C_p – разделительный конденсатор, R_{61} , R_{62} – резисторы базового делителя, R_3 – резистор термостабилизации, C_3 – блокировочный конденсатор, R_k – сопротивление в цепи коллектора, R_n – сопротивление нагрузки. Коэффициент усиления каскада в области верхних частот запишем:

$$K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{K_0}{1 + p\tau_B}, \text{ где } p = iw, w - \text{текущая круговая частота,}$$

$K_0 = S_0 R_{\text{экв}}$, отсюда получаем эквивалентное сопротивление

$$R_{\text{экв}} = \frac{K_0}{S_0} = \frac{10}{0,95} = 10,5 \text{ Ом}.$$

$R_{\text{ЭКВ}}$ рассчитывается по формуле: $R_{\text{ЭКВ}} = \frac{R_{\kappa} R_{\text{H}}}{R_{\kappa} + R_{\text{H}}}$, отсюда получаем сопро-

тивление коллектора R_{κ} : $R_{\kappa} = \frac{R_{\text{ЭКВ}} R_{\text{H}}}{R_{\text{H}} - R_{\text{ЭКВ}}} = \frac{10,5 \cdot 50}{50 - 10,5} = 13,3 \text{ Ом}$.

При заданном уровне частотных искажений $Y_{\text{в}} = |K_{\text{u}}/K_0|$, верхняя граничная частота $f_{\text{в}}$ полосы пропускания каскада равна: $f_{\text{в}} = \frac{\sqrt{1 - Y_{\text{в}}^2}}{2\pi Y_{\text{в}} \tau_{\text{в}}}$,

где $\tau_{\text{в}} = \tau + C_{\kappa} R_{\text{ЭКВ}} (1 + S_0 r_{\text{б}})$, а постоянная времени τ рассчитывается по формуле $\tau = (C_{\kappa} + C_{\text{э}})/(g_{\text{б}} + g_{\text{бэ}})$.

Значения элементов схемы Джиаклетто рассчитываются по паспортным данным транзистора по следующим формулам: $g_{\text{б}} = 1/r_{\text{б}}$, $g_{\text{бэ}} = 1/r_{\text{э}}(1 + \beta_0)$.

Соответственно, подставляя все рассчитанные данные коэффициентов Джиаклетто получаем постоянную времени

$$\tau = (C_{\kappa} + C_{\text{э}})/(g_{\text{б}} + g_{\text{бэ}}) = 0,78 \cdot 10^{-9} \text{ с}, \text{ вычисляем } \tau_{\text{в}} = 1,03 \cdot 10^{-9} \text{ с}.$$

Теперь можем рассчитать верхнюю граничную частоту $f_{\text{в}}$ полосы пропускания каскада, подставив все известные значения $Y_{\text{в}}$ и $\tau_{\text{в}}$ в формулу, приведенную выше, получим $f_{\text{в}} = 74,9 \text{ МГц}$. Входную емкость и входное сопротивление

каскада получаем из соотношений: $C_{\text{вх}} = \frac{\pi g_{\text{б}} + K_0 C_{\kappa} g_{\text{б}}}{g_{\text{б}} + g_{\text{бэ}}}$, $R_{\text{вх}} = \frac{1}{g_{\text{вх}}} = \frac{g_{\text{б}} + g_{\text{бэ}}}{g_{\text{б}} \cdot g_{\text{бэ}}}$.

Получаем $C_{\text{вх}} = 196 \text{ пФ}$, $R_{\text{вх}} = 126 \text{ Ом}$.

Практическая работа № 2.5

Расчет усилителя низкой частоты на транзисторе

Цель работы: рассчитать параметры усилительного каскада низкой частоты на биполярном транзисторе.

Порядок расчета

Схема для расчета усилителя низкой частоты приведена на рисунке.

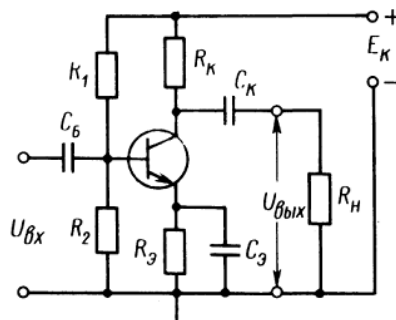


Рис. Схема для расчета усилителя низкой частоты

Рассеиваемая на коллекторе мощность $P_K = U_{KЭ} I_K$ не должна превышать значения максимально допустимой мощности P_{Kmax} , которая приводится в таблице. Производится проверка этого положения, и при превышении мощности необходимо изменить режим работы транзистора, уменьшив ток коллектора в два раза, по сравнению со значением, заданным в таблице, если этого недостаточно, то ещё - в два раза и до тех пор, пока рассеиваемая мощность не будет превышать допустимое значение.

Таблица

Параметры для расчета усилителя низкой частоты

Вариант	Транзистор		$h_{11Э}$, Ом	$h_{21Э}$	$h_{22Э}$, Ом ⁻¹	R_K , кОм	I_K , мА	$U_{ЭВ}$	f_H , Гц	P_{Kmax} , Вт
	наименование	тип								
1	МП39	р-п-р	850	28	$55 \cdot 10^{-6}$	2,4	10	2,5	50	0,15
2	КТ315А	п-р-п	700	55	$70 \cdot 10^{-6}$	1,7	30	1,5	45	0,15
3	МП40	р-п-р	900	30	$60 \cdot 10^{-6}$	3,1	15	2,2	30	0,15
4	КТ325А	п-р-п	1200	65	$80 \cdot 10^{-6}$	2,7	10	1,8	75	0,225
5	МП41	р-п-р	950	45	$50 \cdot 10^{-6}$	3,6	12	2,8	25	0,15
6	КТ336А	п-р-п	700	55	$70 \cdot 10^{-6}$	1,9	6	1,5	45	0,05
7	ГТ108А	р-п-р	540	35	$120 \cdot 10^{-6}$	1,8	8	1,1	65	0,075
8	КТ366А	п-р-п	700	55	$70 \cdot 10^{-6}$	1,7	4	1,5	45	0,03
9	МП14	р-п-р	930	30	$100 \cdot 10^{-6}$	4,8	6	2,3	15	0,15
10	КТ368А	п-р-п	900	55	$90 \cdot 10^{-6}$	2,1	14	1,5	55	0,225
11	МП15	р-п-р	1300	45	$150 \cdot 10^{-6}$	1,5	8	0,8	70	0,15
12	КТ399А	п-р-п	650	65	$120 \cdot 10^{-6}$	1,4	15	1,2	35	0,15
13	МП39Б	р-п-р	1100	40	$45 \cdot 10^{-6}$	3,3	14	1,8	40	0,15
14	КТ313А	р-п-р	500	85	$65 \cdot 10^{-6}$	1,3	20	1,5	45	0,3
15	МП41А	р-п-р	750	75	$75 \cdot 10^{-6}$	4,5	12	3,1	10	0,15
16	КТ361А	р-п-р	950	35	$75 \cdot 10^{-6}$	2,3	30	1,9	25	0,15
17	ГТ309Б	р-п-р	4500	120	$250 \cdot 10^{-6}$	1,8	4	1,3	20	0,05
18	КТ325А	п-р-п	1200	45	$80 \cdot 10^{-6}$	2,2	12	1,6	35	0,225
19	ГТ322Б	р-п-р	2500	85	$85 \cdot 10^{-6}$	3,2	3	2,0	35	0,2
20	КТ366А	п-р-п	950	75	$170 \cdot 10^{-6}$	3,7	4	0,5	35	0,03
21	МП14	р-п-р	930	30	$100 \cdot 10^{-6}$	4,8	4	1,6	90	0,15
22	КТ315А	п-р-п	850	65	$95 \cdot 10^{-6}$	2,7	20	1,0	45	0,15
23	МП40А	р-п-р	1100	30	$56 \cdot 10^{-6}$	5,1	6	2,0	85	0,15
24	КТ399Б	п-р-п	850	55	$140 \cdot 10^{-6}$	3,4	25	1,2	35	0,15

Падение напряжения на коллекторном резисторе в состоянии покоя: $U_K = I_K R_K$.

Ток базы транзистора в состоянии покоя: $I_{Б0} = I_K / h_{21Э}$.

Ток делителя, протекающий по резисторам R_1 , R_2 , берут в 5 раз больше тока базы: $I_d = I_2 = 5I_{Б0}$.

Напряжение питания схемы как сумму трех напряжений: $E_K = U_{KЭ} + U_K + U_{Э}$.

Падение напряжения на резисторе R_2 делителя как сумму двух напряжений: $U_2 = U_{Э} + U_{БЭ}$. Значение $U_{Э}$ задано в таблице, напряжение $U_{БЭ}$ считают равным 0,3 В для германиевых транзисторов и 0,6В для кремниевых.

Падение напряжение на резисторе R_1 как разность напряжений питания E_K и падения напряжения на резисторе R_2 : $U_1 = E_K - U_2$.

Сопротивление резистора R_2 по закону Ома: $R_2 = U_2 / I_2$.

При расчете сопротивления резистора R_1 нужно учитывать, что через него протекает сумма токов: $R_1 = U_1 / (I_D + I_{B0})$.

Входное сопротивление усилителя $R_{ВХ}$ эквивалентно сопротивлению трех включенных параллельно сопротивлений: $R_1, R_2, h_{11Э}$.

Сопротивление нагрузки усилителя берут такого же значения: $R_H = R_{ВХ}$

Сопротивление резистора R_3 по закону Ома: $R_3 = U_3 / (I_K + I_{B0})$.

Емкость шунтирующего конденсатора C_3 в эмиттерной цепи определяется по приближенной формуле: $C_3 = 1 / (2\pi f_H R_3)$.

Емкость разделительного конденсатора на входе схемы: $C_B = 1 / (2\pi f_H R_{ВХ})$.

Емкость разделительного конденсатора на выходе схемы: $C_K = C_B$.

Коэффициент усиления по напряжению в области средних частот:

$$K_0 = h_{21Э} R_{KH} / R_{ВХ},$$

где R_{KH} – сопротивление, эквивалентное параллельно включенным резисторам $R_K, R_H, R_{ВЫХ}$; $R_{ВЫХ} = 1 / h_{22Э}$ – выходное сопротивление транзистора.

В отчет добавить краткое описание работы схемы усилителя и назначение отдельных элементов схемы.

Практическая работа № 2.6

Расчет усилителей с частотным разделением каналов

При разработке усилителей с рабочими частотами от 0-1 Гц до 1 ГГц возникает проблема совмещения схемных решений построения низкочастотных и сверхвысокочастотных усилителей, эту проблему можно решить, используя усилители с частотно-разделительными цепями (ЧРЦ), предназначенных для усиления как периодических, так и импульсных сигналов. Схема усилителя с ЧРЦ приведена на рисунке, где УВЧ – усилитель верхних частот, УНЧ – усилитель нижних частот.

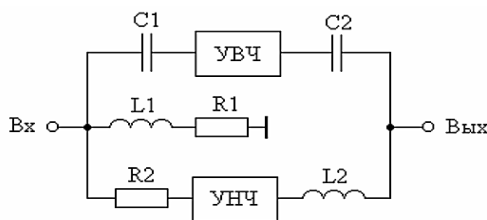


Рис. Схема усилителя с частотно-разделительной цепью

Принцип работы схемы заключается в том, что первый каналный усилитель УВЧ является высокочастотным и строится с использованием схемных решений построения усилителей сверхвысоких частот, а второй каналный усилитель УНЧ является низкочастотным и строится с использованием достоинств схемных решений построения усилителей постоянного тока либо усилителей низкой частоты. При условии согласованных входов и выходов канал-

ных усилителей, выборе значения резистора $R_1 = R_r$, а $R_2 \gg R_r$, усилитель с ЧРЦ оказывается согласованным по входу и выходу. Каждый из канальных усилителей усиливает соответствующую часть спектра входного сигнала. Выходная ЧРЦ осуществляет суммирование усиленных спектров в нагрузке.

Если обозначить нижнюю и верхнюю граничные частоты УВЧ как $f_{нУВЧ}$ и $f_{вУВЧ}$, а нижнюю и верхнюю граничные частоты УНЧ как $f_{нУНЧ}$ и $f_{вУНЧ}$, то дополнительным необходимым условием построения усилителя с ЧРЦ является требование: $f_{вУНЧ} \geq 10 f_{нУНЧ}$.

В этом случае полоса пропускания разрабатываемого усилителя с ЧРЦ будет охватывать область частот от $f_{нУНЧ}$ до $f_{вУВЧ}$. С учетом вышесказанного расчет значений элементов ЧРЦ усилителя сводится к следующему.

Значения резисторов R_1 и R_2 выбираются из условий:

$$\begin{cases} R_1 = R_r \\ R_2 \geq 10R_r \end{cases}.$$

По заданному коэффициенту усиления УВЧ $K_{УВЧ}$ определяется необходимый коэффициент усиления УНЧ $K_{УНЧ}$ из соотношения:

$$\begin{cases} C_1 = 10 / 2\pi f_{сУНЧ} R_H \\ L_1 = 10 R_H / 2\pi f_{сУНЧ} \\ C_2 = C_1 / 10 \\ L_2 = L_1 / 10 \end{cases}.$$

Задание: рассчитать значения элементов R_1 , R_2 , C_1 , C_2 , L_1 , L_2 , коэффициент усиления УНЧ и его $f_{вУНЧ}$ для усилителя с ЧРЦ, при данных, взятых из таблицы.

Таблица

Данные для расчета элементов усилителя с ЧРЦ

Вариант	$K_{УВЧ}$	$f_{нУНЧ}$, МГц	$R_{вхУНЧ} = R_r = R_{н2}$, Ом
1	5	0,5	20
2	6	0,6	30
3	7	0,7	40
4	8	0,8	50
5	9	0,9	60
6	10	1,0	70
7	11	0,5	20
8	12	0,6	30
9	13	0,7	40
10	14	0,8	50
11	15	0,9	60
12	16	1,0	70
13	17	0,5	20
14	18	0,6	30
15	19	0,7	40
16	20	0,8	50
17	21	0,9	60
18	22	1,0	70
19	23	0,5	20
20	24	0,6	30
21	25	0,7	40
22	26	0,8	50
23	27	0,9	60
24	28	1,0	70

Практическая работа № 2.7

Расчет усилительного каскада на полевом транзисторе

Цель работы: рассчитать усилительного каскада на полевом транзисторе.

Задания для выполнения:

1. Определить коэффициенты усиления по напряжению K_U , по току K_I , по мощности K_P .

2. Определить входное $R_{вх}$ и выходное $R_{вых}$ сопротивления.

3. Определить входную емкость.

Тип и параметры транзистора для расчета выбрать из таблицы.

Таблица

Варианты заданий для расчета параметров транзистора

Вариант	Тип транзистора	Крутизна характеристики, S , мА/В	Сопротивление нагрузки, R_n , кОм	Емкость затвор-исток, $C_{зи}$, пФ	Емкость затвор-сток, $C_{зс}$, пФ	Дифференциальное сопротивление проводящего канала, r_c , кОм	Структура, тип транзистора
1	2П103А	0,7 – 2,1	24	17	8	2,5	р-н,р
2	2П103Б	0,8 – 2,6	12	17	8	1,3	р-н,р
3	2П303А	1,0 – 4,0	22	6	2	0,75	р-н,п
4	2П303Б	1,5 – 4,5	20	6	2	6	р-н,п
5	КП307А	4,0 – 9,0	18	5	1,6	3,7	р-н,п
6	КП307Б	5,0 – 10,0	16	5	1,5	2,9	р-н,п
7	КП308А	1,0 – 4,0	15	6	2	5,5	р-н,п
8	КП307Б	1,0 – 4,0	13	6	2	3,1	р-н,п
9	КП903А	85	33	18	15	1,7	р-н,п
10	КП903Б	50	30	18	15	2,8	р-н,п
11	КП103Е	0,4 – 2,4	27	13	3	4,5	р-н,р
12	КП103Ж	0,5 – 2,8	25	13	5	2,9	р-н,р
13	КП103И	0,8 – 2,6	15	13	10	10	р-н,р
14	КП103К	1,0 – 3,0	10	13	10	2,2	р-н,р
15	КП103Л	1,8 – 3,8	14	13	16	2,08	р-н,р
16	КП103М	1,3 – 4,4	35	13	16	1,11	р-н,р
17	КП301Б	1 – 2,6	30	9	5	1,33	р-н,р
18	КП302А	5 – 12	36	9	5	1	р-н,п
19	КП302Б	7 – 14	36	9	2,5	0,8	р-н,п
20	КП302В	5 – 12	17	9	7	2	р-н,п
21	КП304А	≥ 4	23	14	3,8	0,83	р-н,р
22	КП305Ж	5,2 – 10,5	24	18	4	1	р-н,п
23	КП312А	4 – 5,8	19	8	6	3	р-н,п
24	КП312Б	2 – 5	20	8	6	5	р-н,п

Пример выполнения практической работы № 2.7

На рис. 2.7.1 приведены схемы усилителей на полевом транзисторе. Расчет произведем последовательно для первой схемы включения транзистора с общим истоком (ОИ) (рис. 2.7.1а) и второй схемы включения транзистора с общим стоком (ОС) (рис. 2.7.1 б).

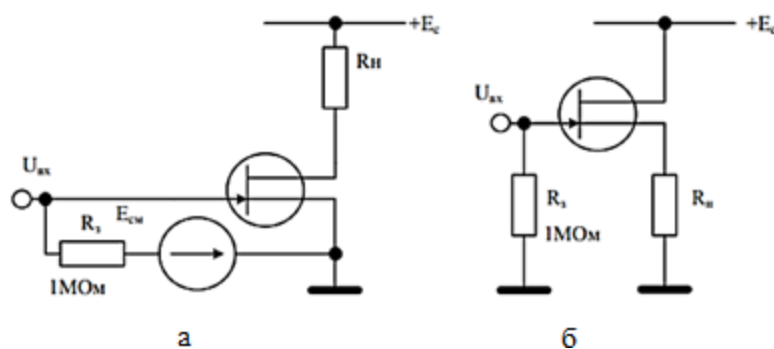


Рис. 2.7.1. Схемы усилителей на полевом транзисторе

Для этих двух схем усилительных каскадов коэффициенты усиления по току K_I и по мощности K_P определяются по формулам:

$$K_I = K_U \frac{R_{\text{вх}}}{R_H}, \quad K_P = K_U \cdot K_I, \text{ а коэффициенты усиления по напряжению } K_U,$$

входное $R_{\text{вх}}$ и выходное $R_{\text{вых}}$ сопротивления и входная емкость рассчитываются по алгоритму, приведенному ниже.

1. Схема на (рис. 2.7.1а) представляет собой усилитель, собранный на полевом транзисторе с р-п-переходом. Анализ схемы следует производить по эквивалентной схеме для переменного тока, приведенной на рис. 2.7.2.

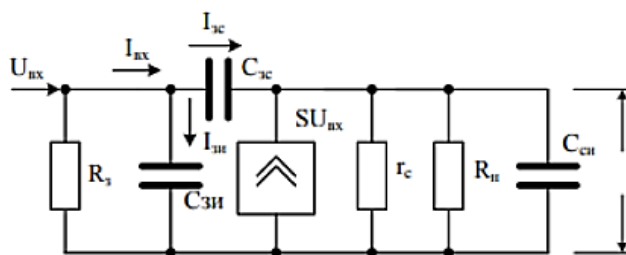


Рис. 2.7.2. Эквивалентная схема усилителя на полевом транзисторе по типу включения с ОИ

Источник смещения $E_{\text{см}}$ в схеме не учитывается, поскольку он имеет низкое внутренне сопротивление и не оказывает влияние на прохождение переменной составляющей входного сигнала. Коэффициент усиления по напряжению для данной схемы может быть определен следующим образом:

$$K_U = -\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = -\frac{SU_{\text{вх}}(R_H \parallel r_c)}{U_{\text{вх}}} = -S(R_H \parallel r_c).$$

Знак минус в формуле указывает на то, что входное и выходное напряжения в схеме находятся в противофазе.

Входное сопротивление на низких частотах создает только R_3 , что видно из эквивалентной схемы. Следовательно, $R_{\text{вх}} = R_3 = 1 \text{ МОм}$ для всех вариантов.

Выходное сопротивление схемы определяется параллельным соединением R_H и r_c , т.е. $R_{вых} = R_H || r_c$.

Входная емкость устройства определяется по формуле

$$C_{вх} = C_{зИ} + (1 - K_U) C_{зс}.$$

2. Анализ схемы на (рис. 2.7.1б) проводят по эквивалентной схеме полевого транзистора, когда выходная цепь моделируется не источником тока, а эквивалентным ему источником напряжения, ЭДС которого определяется по формуле $E = \frac{\mu}{1 + \mu} U_{вх}$, где $\mu = S r_c$ – статический коэффициент усиления полевого транзистора. Схема замещения для данного способа включения приведена на рис. 2.7.3.

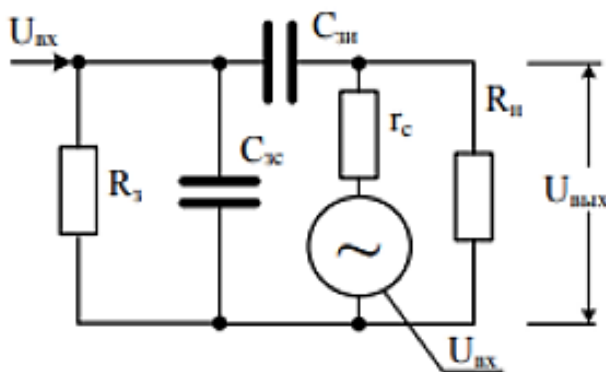


Рис. 2.7.3. Эквивалентная схема усилителя с ОС

Анализ схемы позволяет рассчитать требуемые параметры истокового повторителя по следующим уравнениям:

$$K_U = \frac{U_{вх}}{U_{вх}} \approx \frac{S R_H}{1 + S R_H},$$

$$R_{вх} = \frac{(R_c || r_c)}{1 + S(R_H || r_c)} = \frac{R_H}{1 + S R_H} \approx \frac{1}{S},$$

$$C_{вх} = C_{зс} + (1 - K_U) C_{зИ}.$$

Практическая работа № 2.8

Расчет усилителя с последовательной ООС по току

Цель работы: рассчитать параметры усилительного каскада с последовательной отрицательной обратной связью по току.

Порядок расчета

Схема для расчета усилителя с последовательной ООС приведена на рисунке.

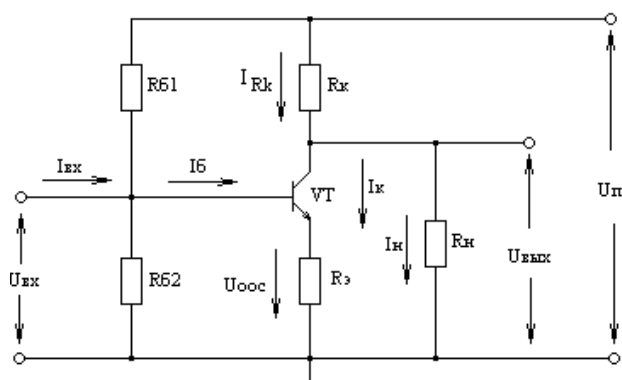


Рис. Транзисторный каскад с цепью последовательной ООС по току нагрузки

На основе заданного транзистора, параметры которого взять из таблицы в соответствии с вариантом, рассчитать каскад с последовательной ООС по току нагрузки из условия получения максимальной неискаженной амплитуды выходного напряжения при заданных $K_{УК}$, $U_{п}$, $R_{Н}$ и диапазоне температур.

Таблица

Параметры для расчета усилителя низкой частоты

Вари- ри-	Транзистор		S , мА/В	$h_{21Э}$	$U_{КЭнас}$, В	$I_{Кмаксдоп}$, мА	$U_{Э,В}$	$R_{Н}$, кОм	$K_{УК}$	$U_{п}$, В
	наименование	тип								
1	МП39	р-п-р	0,7 – 2,1	28	20	10	2,5	24	10	18
2	КТ315А	п-р-п	0,8 – 2,6	55	21	30	1,5	12	15	15
3	МП40	р-п-р	1,0 – 4,0	30	20	15	2,2	22	20	20
4	КТ325А	п-р-п	1,5 – 4,5	65	25	10	1,8	20	25	25
5	МП41	р-п-р	4,0 – 9,0	45	30	12	2,8	18	23	29
6	КТ336А	п-р-п	5,0 – 10,0	55	31	6	1,5	16	26	30
7	ГТ108А	р-п-р	1,0 – 4,0	35	34	8	1,1	15	24	31
8	КТ366А	п-р-п	1,0 – 4,0	55	36	4	1,5	13	27	25
9	МП14	р-п-р	85	30	38	6	2,3	33	28	17
10	КТ368А	п-р-п	50	55	39	14	1,5	30	29	29
11	МП15	р-п-р	0,4 – 2,4	45	35	8	0,8	27	13	33
12	КТ399А	п-р-п	0,5 – 2,8	65	40	15	1,2	25	15	36
13	МП39Б	р-п-р	0,8 – 2,6	40	41	14	1,8	15	14	18
14	КТ313А	р-п-р	1,0 – 3,0	85	21	20	1,5	10	16	15
15	МП41А	р-п-р	1,8 – 3,8	75	15	12	3,1	14	18	20
16	КТ361А	р-п-р	1,3 – 4,4	35	24	30	1,9	35	19	25
17	ГТ309Б	р-п-р	1 – 2,6	120	26	4	1,3	30	20	29
18	КТ325А	п-р-п	5 – 12	45	37	12	1,6	36	15	30
19	ГТ322Б	р-п-р	7 – 14	85	20	3	2,0	36	14	31
20	КТ366А	п-р-п	5 – 12	75	21	4	0,5	17	16	25
21	МП14	р-п-р	≥ 4	30	20	4	1,6	23	18	17
22	КТ315А	п-р-п	5,2 – 10,5	65	25	20	1,0	24	19	29
23	МП40А	р-п-р	4 – 5,8	30	30	6	2,0	19	20	33
24	КТ399Б	п-р-п	2 – 5	55	20	25	1,2	20	15	36

1. По первому закону Кирхгофа запишем уравнение

$$(U_{\Pi} - u_{\text{блх}}) / R_K = i_K + u_{\text{блх}} / R_H.$$

2. Зададим максимально допустимый ток коллектора из условия

$$I_{K \max} = K_{\text{зан}} I_{K \max \text{ доп}},$$

где $K_{\text{зан}} = 0,7 \dots 0,8$ коэффициент запаса по коллекторному току;

$I_{K \max \text{ доп}}$ - максимальный коллекторный ток транзистора.

4. Определим соотношение R_9 и R_K . Для этого запишем выражение для коэффициента усиления всего каскада

$$K_{UK} = h_{219} R_K / (R_{BX} + R_9 h_{219} + R_B).$$

Так как $R_6 = R_9(S_i - 1)$ и полагая $h_{219} \gg 1$ и $R_9(h_{219} + S_i - 1) \gg R_{6x}$ находим

$$K_{UK} \approx R_K / R_9 \text{ или } R_9 \approx 0,1 R_K.$$

5. Определим R_K из выражения

$$I_{K \max} = (U_{\Pi} - U_{KЭнас}) / (R_K + R_9),$$

где $U_{KЭнас}$ - напряжение между выводами коллектора и эмиттера транзистора VT на границе насыщения.

Имея $U_{KЭнас}$, с учетом найденного соотношения между R_K и R_9 получим R_K , тогда R_9 получим из равенства $R_9 \approx 0,1 R_K$.

6. Задаемся коэффициентом неустойчивости S_i и находим $R_6 = R_9(S_i - 1)$.

Уточним значение коэффициента усиления каскада и если оно меньше заданного, то увеличим R_K .

7. Минимальное значение коллекторного тока находим из выражения

$$I_{K \min} = U_{\Pi} \cdot 0,1 / (R_K + R_9).$$

8. Определим минимальное и максимальное выходное напряжения.

$$U_{BЛX \min} = I_{K \max} R_9 + U_{KЭнас} = [U_{\Pi} / (R_K + R_9)] R_9 + U_{KЭнас};$$

$$U_{BЛX \max} = (U_{\Pi} / R_K - I_{K \max}) [R_K R_H / (R_K + R_H)]$$

9. Найдем параметры режима покоя

$$U_{BЛX \Pi} = (U_{BЛX \max} + U_{BЛX \min}) / 2,$$

$$I_{K \Pi} = (U_{\Pi} - U_{BЛX \Pi}) / R_K - U_{BЛX \Pi} / R_H,$$

$$I_{Б \Pi} = I_{K \Pi} / h_{219}.$$

10. Определим параметры входного делителя.

$$R_6 = \frac{R_{61} R_{62}}{(R_{61} + R_{62})}, U_B = R_9 (I_{K \Pi} + I_{Б \Pi}) + U_{БЭ0} + R_{6x} I_{Б \Pi},$$

$$U_9 = U_B + R_6 I_{Б \Pi} = U_{\Pi} R_{62} / (R_{61} + R_{62}),$$

$$R_{62} = \frac{R_6 U_9 \left(1 - \frac{U_{\Pi} - U_9}{U_9} \right)}{U_{\Pi} - U_9};$$

$$R_{61} = R_6 [(U_{\Pi} - U_9) / U_9].$$

Практическая работа № 2.9

Расчет генератора постоянного тока

Цель работы: решение задач по нахождению параметров генератора постоянного тока (ГПТ).

Определить значения параметров генератора постоянного тока, которые не указаны в таблице для заданного варианта.

Обозначения, принятые в таблице для генератора постоянного тока: номинальная мощность P_2 , номинальное напряжение U , частота вращения n , номинальный ток генератора I , ток в цепи возбуждения I_B , ток в цепи якоря I_A , сопротивление обмоток цепи обмотки возбуждения R_B , сопротивление в цепи якоря R_A , приведенное к рабочей температуре, ЭДС якоря E , электромагнитный момент при номинальной нагрузке $M_{эм}$, электромагнитная мощность $P_{эм}$, мощность приводного двигателя P_1 , КПД в номинальном режиме η .

Таблица

Данные для расчета параметров генератора

№	P_2 кВт	U , В	n об/мин	I , А	I_B , А	I_A , А	R_B , Ом	R_A , Ом	E , В	$M_{эм}$, Н·м	$P_{эм}$, кВт	P_1 , кВт	η %	Способ возбуждения
1	24	230	1450	—	—	—	150	0,3	—	171	—	—	90	параллельное
2	—	110	3000	—	—	17	Нет	0,55	—	—	—	—	89	последовательное
3	—	220	1000	15,6	Нет	—	Нет	1	—	—	—	—	87	независимое
4	—	230	—	87	—	—	100	0,15	—	280	—	23	—	параллельное
5	—	110	2000	25	—	—	Нет	—	—	15	—	—	82	последовательное
6	—	220	630	80	Нет	—	Нет	0,144	—	—	18,52	—	87	независимое
7	—	460	—	—	4	—	—	—	480	525	55	—	88	параллельное
8	—	110	3000	95	—	—	Нет	—	—	37,5	—	—	85	последовательное
9	—	220	630	—	Нет	80	Нет	0,144	—	—	—	—	86	независимое
10	18	230	1500	—	—	80	—	—	240	—	—	21	—	параллельное
11	—	110	3000	—	—	21,5	Нет	—	—	7,8	—	—	89	последовательное
12	—	220	460	—	Нет	405	5,5	0,008	—	—	—	—	85	независимое
13	45	—	1000	97,8	—	—	92	—	477	—	—	—	88	параллельное
14	—	110	4000	260	—	—	Нет	—	—	72	—	—	88	последовательное
15	—	220	1000	—	Нет	16	0,8	0,9	—	—	—	—	85	независимое
16	—	110	3600	—	1,8	34	—	—	—	10,5	—	—	85	параллельное
17	—	110	4000	—	—	15	Нет	—	—	4,5	—	—	80	последовательное
18	—	220	1000	15,6	Нет	—	Нет	1	—	—	—	—	88	независимое
19	—	230	—	90	—	—	90	0,2	—	280	—	25	—	параллельное
20	—	110	3000	—	—	170	Нет	—	—	62	—	—	90	последовательное
21	—	220	630	—	Нет	175	4,6	—	—	—	42,52	—	82	независимое
22	20	230	1450	—	—	92,5	—	—	235	—	—	23	—	параллельное
23	—	110	3000	95	—	—	Нет	—	—	35	—	—	89	последовательное
24	—	220	460	405	Нет	—	Нет	0,009	—	—	—	—	80	независимое

Примеры решения задач

Пример 1. ГПТ параллельного возбуждения имеет номинальную мощность $P_2 = 10$ кВт, номинальное напряжение $U = 230$ В, частоту вращения $n = 1450$ об/мин, сопротивление обмоток цепи обмотки возбуждения $R_B = 150$ Ом, сопротивление обмоток якоря $R_{\text{я}} = 0,3$ Ом, КПД в номинальном режиме $\eta = 86,5$ %. Падением напряжения в щеточном контакте пренебречь. Найти ток генератора I , ток в цепи возбуждения I_B , ток в цепи якоря $I_{\text{я}}$, ЭДС якоря E , электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$, электромагнитную мощность $P_{\text{эм}}$, мощность приводного двигателя P_1 . Генератор работает при номинальной нагрузке.

Решение: ток генератора $I = \frac{P_2}{U} = \frac{10000}{230} = 43,5 \text{ А}$.

Ток в обмотке возбуждения: $I_B = \frac{U}{R_B} = \frac{230}{150} = 1,5 \text{ А}$.

Ток в цепи якоря: $I_{\text{я}} = I + I_B = 43,5 + 1,5 = 45 \text{ А}$.

ЭДС якоря: $E = U + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} = 230 + 45 \cdot 0,3 = 243,5 \text{ В}$.

Электромагнитная мощность: $P_{\text{эм}} = E \cdot I_{\text{я}} = 243,5 \cdot 45 = 10957 \text{ Вт}$.

Электромагнитный момент: $M_{\text{эм}} = 9,55 \frac{P_{\text{эм}}}{n} = 9,55 \frac{10957}{1450} = 72 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Мощность приводного двигателя: $P_1 = \frac{P_2}{\eta/100} = \frac{10000}{0,865} = 11561 \text{ Вт}$.

Пример 2. в ГПТ независимого возбуждения с номинальным напряжением $U = 440$ В установился ток $I = 64$ А при частоте якоря $n = 2800$ об/мин. В новом режиме работы нагрузка и магнитный поток не изменились, но частота якоря стала $n' = 740$ об/мин. Найти напряжение U' и ток I' в генераторе в новом режиме.

Решение: в генераторе независимого возбуждения ток генератора равен току якоря, т.е. $I = I_{\text{я}}$.

В номинальном режиме:

Напряжение на нагрузке $U = I \cdot R_{\text{н}}$.

ЭДС якоря $E = U + I \cdot R_{\text{я}} = I \cdot R_{\text{н}} + I \cdot R_{\text{я}}$, с другой стороны $E = C_E \cdot n \cdot \Phi$.

Получили: $I \cdot R_{\text{н}} + I \cdot R_{\text{я}} = C_E \cdot n \cdot \Phi$.

В новом режиме, соответственно:

$E' = U' + I' \cdot R_{\text{я}} = I' \cdot R_{\text{н}} + I' \cdot R_{\text{я}} = C_E \cdot n' \cdot \Phi$.

Возьмем отношение, полученных уравнений и получим:

$$I' = \frac{n'}{n} I = \frac{740}{2800} 64 = 16,9 \text{ А} \text{ и } U' = \frac{U}{I} I' = \frac{440}{64} 16,9 = 116,3 \text{ В}$$

Пример 3. В электродвигателе постоянного тока с параллельным возбуждением, который имеет мощность на валу $P_2 = 130$ кВт, напряжение $U = 220$ В, ток, потребляемый из сети $I = 640$ А, частоту вращения $n = 600$ об/мин, сопротивление цепи обмотки возбуждения $R_B = 43$ Ом, сопротивление обмотки якоря

$R_{\text{я}} = 0,007 \text{ Ом}$, необходимо найти номинальные суммарные и электрические потери в обмотках.

Решение: ток в обмотке возбуждения: $I_B = \frac{U}{R_B} = \frac{230}{43} = 5,116 \text{ Ом}$.

Ток в цепи якоря: $I_{\text{я}} = I - I_B = 640 - 5,116 = 634,884 \text{ А}$.

Электрические потери мощности

в цепи якоря: $\Delta P_{\text{эл я}} = I_{\text{я}}^2 \cdot R_{\text{я}} = 634,884^2 \cdot 0,007 = 2821,544 \text{ Вт}$;

в обмотке возбуждения: $\Delta P_{\text{эл В}} = I_{\text{В}}^2 \cdot R_{\text{В}} = U \cdot I_{\text{В}} = 220 \cdot 5,116 = 1125,52 \text{ Вт}$.

Суммарные потери мощности:

$\Sigma \Delta P = \Delta P_{\text{эл В}} + \Delta P_{\text{эл я}} = 1125,52 + 2821,544 = 3947,064 \text{ Вт}$.

Пример 4. Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения включен в сеть с напряжением $U = 220 \text{ В}$ при номинальном вращающем моменте $M = 101,7 \text{ Н·м}$ развивает частоту вращения якоря $n = 750 \text{ об/мин}$. КПД двигателя $\eta = 75 \%$; сопротивление цепи обмотки возбуждения $R_{\text{В}} = 0,197 \text{ Ом}$; сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}} = 0,443 \text{ Ом}$. Пуск двигателя осуществляется при пусковом реостате $R_{\text{пуск}} = 1,17 \text{ Ом}$. Пусковой ток приводит к увеличению магнитного потока в 1,2 раза. Найти номинальные мощность на валу, электромагнитную и потребляемую мощности, суммарные потери в двигателе; пусковой ток и пусковой момент.

Решение: мощность на валу: $P_2 = M \frac{\pi n}{30} = 101,7 \cdot \frac{3,14 \cdot 750}{30} = 7983,45 \text{ Вт}$

Потребляемая мощность: $P_1 = \frac{P_2}{\eta / 100} = \frac{7983,45}{0,75} = 10644,4 \text{ Вт}$

Суммарные потери: $\Sigma \Delta P = P_1 - P_2 = 10644,4 - 7983,45 = 2660,95 \text{ Вт}$.

Т.к. двигатель с последовательным возбуждением, тогда ток якоря нахо-

дим $I_{\text{я}} = I_{\text{В}} = I = \frac{P_1}{U} = \frac{10644,4}{220} = 48,38 \text{ А}$.

ЭДС якоря: $E = U - I \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{В}}) = 220 - (0,443 + 0,197) \cdot 48,38 = 189,04 \text{ В}$.

Электромагнитная мощность: $P_{\text{эм}} = E \cdot I = 189,04 \cdot 48,38 = 9145,6 \text{ Вт}$.

Пусковой ток: $I_{\text{пуск}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{пуск}} + R_{\text{В}}} = \frac{220}{1,443 + 0,197 + 1,17} = 121,547 \text{ А}$.

Номинальный момент: $M = C_{\text{М}} \cdot \Phi \cdot I = 101,7$,

пусковой момент: $M_{\text{пуск}} = C_{\text{М}} \cdot \Phi_{\text{пуск}} \cdot I_{\text{пуск}} = C_{\text{М}} \cdot 1,2 \cdot \Phi \cdot I_{\text{пуск}}$.

Возьмем отношение, полученных уравнений и получим:

$M_{\text{пуск}} = \frac{1,2 I_{\text{пуск}} M}{I} = \frac{1,2 \cdot 121,547 \cdot 101,7}{48,38} = 305,1 \text{ Н·м}$.

Кратность пускового тока: $\frac{I_{\text{пуск}}}{I} = \frac{121,547}{48,38} = 2,5$, пускового момента:

$\frac{M_{\text{пуск}}}{M} = \frac{305,1}{101,7} = 3$.

Практическая работа № 2.10

Анализ усилительного каскада на операционном усилителе

Цель работы: рассчитать усилительный каскад на ОУ.

Задания для выполнения:

1. Определить коэффициент усиления по напряжению на средних частотах.
2. Определить входное $R_{вх}$ и выходное $R_{вых}$ сопротивления.
3. Оценить полосу пропускания на уровне 3 дБ.
4. Оценить возможную ошибку смещения нуля и дрейф нулевого уровня на выходе операционного усилителя в диапазоне температур (20...50) °С.

Характеристики и параметры операционного усилителя приведены на рис. 2.10.1.

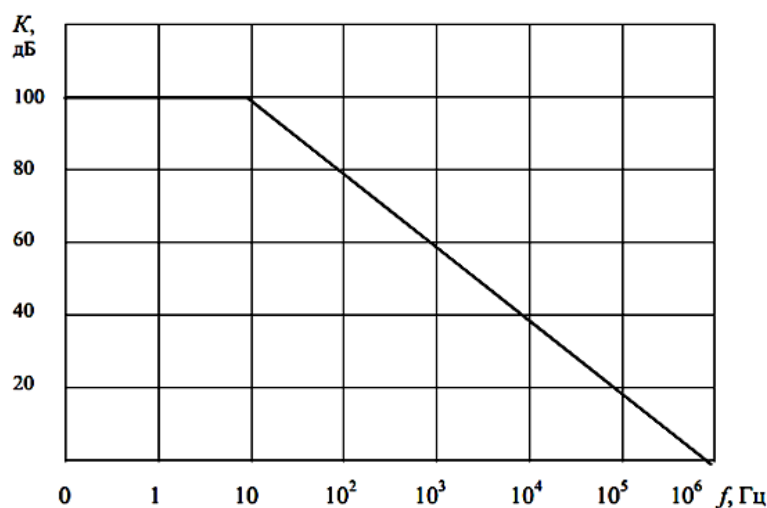
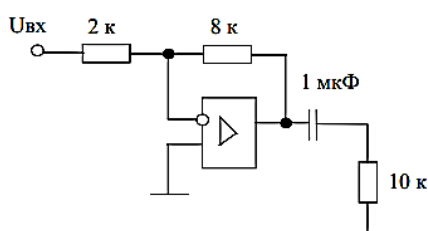


Рис. 2.10.1. Характеристики ОУ

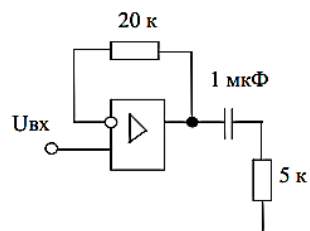
- $r_{вх}=100\text{кОм}$ – входное сопротивление;
- $r_{вых}=100\text{ Ом}$ - выходное сопротивление;
- $U_{см}\leq 5\text{мВ}$ – напряжение смещения;
- $\delta U_{см}\leq 50\text{ мкВ/К}$ – дрейф напряжения смещения;
- $I_{вх}\leq 5\text{мкА}$ – входной ток;
- $\Delta I_{вх}\leq 1\text{мкА}$ – разность входных токов;
- $\delta I_{вх}\leq 50\text{ нА/К}$ – дрейф входного тока;
- $\delta I_{вх}\leq 10\text{ нА/К}$ – дрейф разности входных токов;
- $r_{сф}=100\text{ МОм}$ – входное сопротивление для синфазного сигнала.

Варианты для выполнения практических заданий

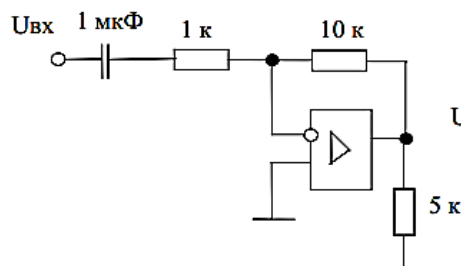
1.



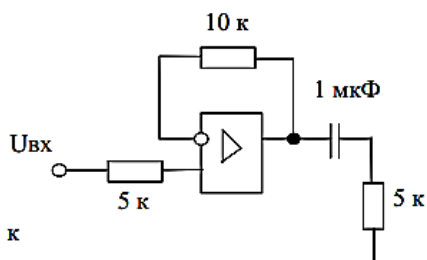
2.



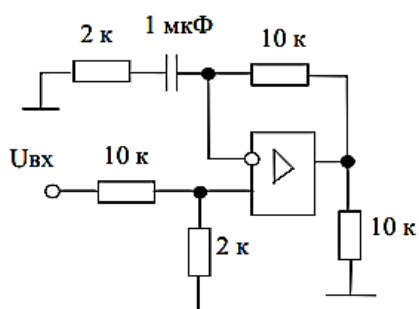
3.



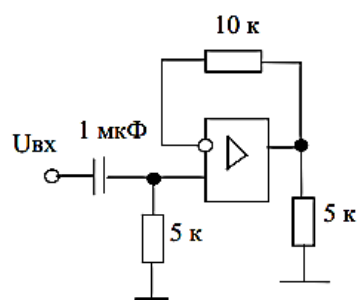
4.



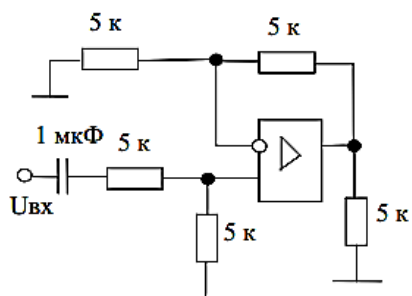
5.



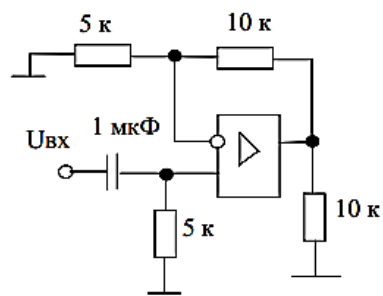
6.



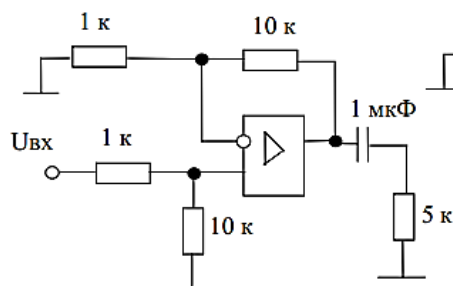
7.



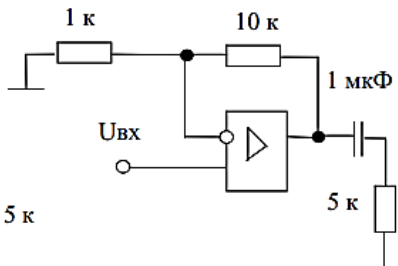
8.



9.



10.



Пример выполнения практической работы № 2.10

Вариант анализируемой схемы усилителя приведен на рис. 2.10.2, здесь входной сигнал подается на неинвертирующий вход операционного усилителя. Конденсатор $C1$ влияет на передачу в схеме на выход постоянной и переменной составляющих $U_{вх}$ с разными коэффициентами усиления.

Усилитель содержит последовательную отрицательную обратную связь по напряжению, создаваемую на резисторе R_2 и поданную на инвертирующий вход.

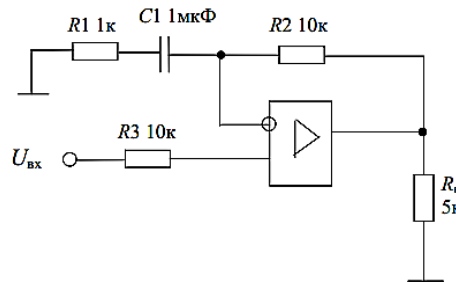


Рис. 2.10.2. Схема анализируемого усилителя

1. Схема является повторителем напряжения на постоянном токе, а переменная составляющая $U_{вх}$ для неинвертирующего операционного усилителя усиливается в $K_{OC} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 11 \text{ раз}$.

2. Входное сопротивление каскада определяется по формуле $R_{вх} = R_3 + r_{вх} \cdot A$, где $A = 1 + \beta K_0 \approx K_0 / K_{OC} = 9090$ - глубина отрицательной обратной связи;

β - коэффициент передачи по цепи обратной связи;

Коэффициент усиления без ОС (K_0) - коэффициент усиления разностного сигнала ОУ в отсутствии ООС и соответствует максимальному значению на АЧХ.

Находится из соотношения $K_0, \text{ дБ} = 20 \lg K_0$

K_0	1	10	100	1000	10000	100000
$K_0, \text{ дБ}$	0	20	40	60	80	100

$$R_{вх} = R_3 + r_{вх} \cdot A = 10000 + 100000 \cdot 9090 = 909 \text{ МОм}. R_{вых} = r_{вых} / A = 100 / 9090 = 0,010 \text{ Ом}.$$

3. Нижняя рабочая частота при $M_n = 3 \text{ дБ}$:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}} = 159,2 \text{ Гц}$$

Верхняя рабочая частота при $M_v = 3 \text{ дБ}$

$$f_v = \frac{f_1}{K_{OC}} = \frac{1000}{11} = 90,9 \text{ кГц}, \text{ где } f_1 = 1 \text{ МГц} - \text{частота единичного усиления.}$$

4. Ошибка смещения нуля $U_{вых.сдв} \leq U_{см} + |I_+ R_3 - I_- R_2|$.

Выражение можно упростить, т.к. $R_3 = R_2$

$$U_{вых.сдв} \leq U_{см} + \Delta I_{вх} R_2 = 5 + 1 \cdot 10 = 15 \text{ мВ}$$

Дрейф выходного напряжения

$$U_{вых.др} \leq \delta U_{см} \cdot \Delta T + \delta \Delta I_{вх} \cdot \Delta T \cdot R_2 = 50 \cdot 30 + 5 \cdot 30 \cdot 10 = 3000 \text{ мкВ}$$

Практическая работа № 2.11

Решение задач по усилителям

Примеры решения задач

1. Определите коэффициент усиления усилителя, охваченного отрицательной обратной связью, а также новые значения нижней $f'_н$ и верхней $f'_в$ граничных частот и полосу пропускания усилителя, при условии, что коэффициент усиления РС – усилителя на средних частотах $K_{ср} = 100$, а нижняя граничная частота полосы пропускания равна $f_н=200$ Гц, верхняя $f_в = 30$ кГц. К усилителю подключена цепочка отрицательной обратной связи с $\beta=0,1$.

Решение

1. Нижняя частота усилителя с отрицательной обратной связью определяется по формуле:

$$f'_н = f_н / (1 + K_u \beta) ;$$
$$f'_н = 200 / (1 + 100 \cdot 0.1) = 18 \text{ Гц};$$

2. Верхняя частота усилителя с отрицательной обратной связью определяется по формуле:

$$f'_в = f_в / (1 + K_u \beta)$$
$$f'_в = 30000 / (1 + 100 \cdot 0.1) = 330 \text{ кГц};$$

3. Полоса пропускания усилителя определяется по формуле:

$$\Delta F = f'_в - f'_н;$$
$$\Delta F = 330000 - 18 = 332982 \text{ Гц};$$

4. Коэффициент усиления усилителя с отрицательной обратной связью определяется по формуле

$$K_{оос} = K_u / (1 + K_u \beta)$$
$$K_{оос} = 100 / (1 + 100 \cdot 0.1) = 9.$$

Ответ: Коэффициент усилителя с отрицательной обратной связью $K_{оос} = 9$, полоса пропускания усилителя отрицательной обратной связи $\Delta F = 332982$ Гц, $f''_в = 330$ кГц, $f''_н = 18$ Гц.

2. Во сколько раз уменьшается коэффициент усиления усилителя $K_u=200$, если охватить усилитель последовательной ООС по напряжению в виде четырехполосника $R_1= 1$ кОм и $R_2=19$ кОм, приведенного на рисунке.

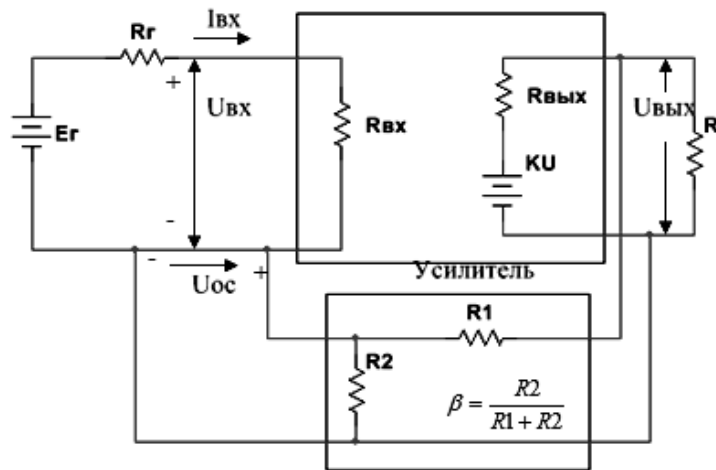


Рис. Усилитель с последовательной ООС по напряжению

Решение

1. Коэффициент передачи четырехполюсника определяется по формуле

$$\beta = R_2 / (R_1 + R_2);$$

$$\beta = 1000 / (1000 + 19000) = 0.05;$$

2. Коэффициент усиления усилителя с последовательной ООС по напряжению определяется по формуле

$$K_{оос} = K_u / (1 + K_u \beta);$$

$$K_{оос} = 200 / (1 + 200 \cdot 0.5) = 18.$$

3. Используя формулу, приведенную ниже, определить, во сколько раз уменьшается коэффициент усиления усилителя с обратной связью

$$p = K_u / K_{оос};$$

$$p = 200 / 18 = 11.$$

Ответ: Коэффициент усиления усилителя с отрицательной обратной связью уменьшается в 11 раз

3. Определить коэффициент передачи цепи отрицательной обратной связи на рисунке, чтобы нелинейные искажения составляли 1%, если изначально нелинейные искажения на выходе усилителя напряжения $K_u = 500$ составляет $K_r = 11\%$? Какова будет верхняя граничная частота полосы пропускания, если без ООС она была равна 8 кГц ?

Решение

1. Коэффициент передачи усилителя с отрицательной обратной связью определяется по формуле:

$$K'_Г = K_Г / (1 + K_u \beta)$$

$$\beta = \left(K_Г - K'_Г \right) / \left(K_u - K'_Г \right);$$

$$\beta = (11 - 1) / (500 - 0,01) = 0,02.$$

2 Верхняя граничная частота усилителя с отрицательной обратной связью

$$f'_г = f_г / (1 + K_u \beta)$$

$$f'_г = 8000 / (1 + 500 \cdot 0,2) = 88 \text{ кГц}.$$

Ответ: Коэффициент передачи усилителя с отрицательной обратной связью равен 0,02, верхняя граничная частота усилителя равна 88 кГц.

Задачи для самостоятельного решения.

1. Определить входное напряжение $U_{вх}$ для получения выходного напряжения $U_{вых} = 25 \text{ В}$ в схеме усилителя на рисунке, если коэффициент усиления усилителя без ОС $K=200$, а сопротивления резисторов в цепи обратной связи $R_1=10 \text{ кОм}$, $R_2=0,5 \text{ кОм}$?

2. На вход усилителя одновременно с входным сигналом $U_{вх}=0,2 \text{ В}$ поступает напряжение обратной связи в противофазе с входным $U_{ос}=0,1 \text{ В}$, а коэффициент усиления усилителя без обратной связи $K_u=10$, определить выходное напряжение и коэффициент усиления усилителя с ПОС на рисунке.

3. На входе усилителя, охваченного ООС с $\beta=0,05$, определить величину подаваемого сигнала, чтобы получить на выходе усилителя сигнал $U_{вых}=2 \text{ В}$, если $K_u=10$?

4. Чему равно напряжение обратной связи $U_{ос}$, если при подключении последовательной отрицательной обратной связи с коэффициентом передачи $\beta=0,2$ на рисунке выходное напряжение усилителя стало равным 2 В ?

5. Определить напряжение обратной связи $U_{ос}$, если при подключении цепи отрицательной последовательной обратной связи коэффициент усиления усилителя ($K_u = 10$) уменьшился в два раза, а выходное напряжение стало равным 3 В .

6. Определить входной ток $I_{вх}$, входное напряжение $U_{вх}$ и коэффициент усиления $K_{ос}$ усилителя, работающего от генератора напряжения $E_r=0,6 \text{ В}$ с внутренним сопротивлением $R_r=0,5 \text{ кОм}$. Коэффициент усиления и входное сопротивление усилителя без обратной связи $K_u=100$, $R_{вх}=0,5 \text{ кОм}$. Выходное напряжение $U_{вых} = 10 \text{ В}$.

7. Для каскада усилителя, охваченного ООС, определить значения:

а) U , $U_{ос}$ и $K_{ос}$ если $U_{вх}=0,16 \text{ В}$, $K_u=30$, $U_{вых} = 1,2 \text{ В}$;

б) $U_{вх}$, $U_{ос}$ и $K_{ос}$, если $K_u=40$, $\beta=0,02$, $U_{вых}=5 \text{ В}$;

в) $U_{\text{вых}}, U, U_{\text{ос}}$ и $K_{\text{ос}}$, если $U_{\text{вх}}=5\text{В}$, $K_u=20$, $\beta=1$.

Вывести расчетные формулы.

8. Чему равны $U_{\text{вх}}, U, U_{\text{ос}}$ и $K_{\text{ос}}$, если $K_u=60$, $\beta=0,07$, если на вход каскада усилителя, охваченного отрицательной обратной связью, на рисунке, поступает сигнал $U_{\text{вх}}=1\text{В}$?

9. Абсолютное изменение коэффициента усиления усилителя с $K_u=100$ составляет $\pm 10\%$. Определить, с каким коэффициентом передачи необходимо подключить цепь отрицательной обратной связи, чтобы изменения коэффициента усиления $K_{\text{ос}}$ не превышало 1% ; рассчитать также значение $K_{\text{ос}}$ после подключения цепи отрицательной обратной связи.

Примечание: нужно воспользоваться формулой

$$\Delta K_{\text{ос}} / K_{\text{ос}} = \left(1 / (1 + \beta K_u) \right) \Delta K_u / K_u.$$

10. Определить входное и выходное сопротивления трехкаскадного усилителя, охваченного цепью последовательной ООС по напряжению с коэффициентом передачи $\beta = 0,01$. Коэффициент усиления каскадов $K_{u1} = 12$, $K_{u2} = 8$, $K_{u3} = 5$. Входное и выходное сопротивления усилителя без обратной связи $R_{\text{вх}} = 500\text{Ом}$, $R_{\text{вых}} = 58\text{Ом}$.

Примечание: следует воспользоваться формулами

$$R_{\text{вх.ос}} = R_{\text{вх}} \left(1 + \beta K_{u1} K_{u2} K_{u3} \right), \quad R_{\text{вых.ос}} = R_{\text{вых}} / \left(1 + \beta K_{u1} K_{u2} K_{u3} \right).$$

Практическая работа № 2.12

Решение задач

Задача 12.1. В усилительном каскаде с общей базой (рис. 2.12.1) заданы следующие параметры: h_{216} ; h_{126} ; h_{226} ; h_{116} ; $R_э$; R_k ; R_n ; R_g (табл. 2.12.1). Найти коэффициенты усиления по напряжению и по току (K_U и K_I), входное и выходное сопротивления ($R_{\text{вх}}$ и $R_{\text{вых}}$).

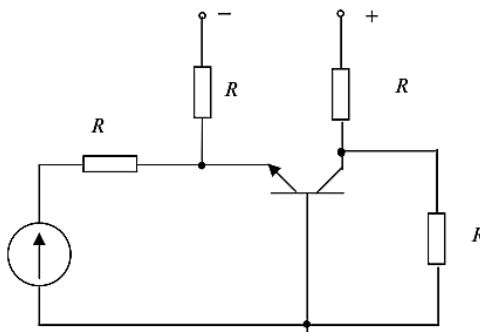


Рис. 2.12.1. Усилительный каскад с общей базой

Для расчета использовать формулы, приведенные ниже:

$$R_{ex} = r_{\delta} + r_{\delta} \left(1 + h_{21\delta}\right) + R_{\Gamma} \left(1 + h_{21\delta}\right), \text{ где } r_{\delta} + r_{\delta} \left(1 + h_{21\delta}\right) \approx h_{11\delta};$$

$$K_U = \beta R_{KH} / \left(R_{\Gamma} + R_{ex}\right) - \text{коэффициент усиления по напряжению, где}$$

$$\beta \approx h_{21\delta} - \text{коэффициент передачи тока базы,}$$

$$R_{KH} = R_K R_H / (R_K + R_H) - \text{эквивалентное сопротивление в коллекторной цепи;}$$

$$K_I = \beta \frac{R_{\Gamma}}{R_{\Gamma} + R_{ex}} \frac{R_K}{R_K + R_H} - \text{коэффициент усиления по току;}$$

$$R_{вых} = \frac{R_K \cdot r_K^* \left(1 + \beta \gamma_{\delta}\right)}{R_K + r_K^* \left(1 + \beta \gamma_{\delta}\right)}, \text{ где}$$

$$\gamma_{\delta} = R_{\delta} / \left(R_{\delta} + R_{\Gamma}\right) - \text{коэффициент распределения в базе, } r_K^* = \frac{1}{h_{22\delta}} - \text{диффе-}$$

ренциальное сопротивление коллекторного перехода.

Таблица 2.12.1

Исходные данные к задаче 12.1

№ Варианта	$h_{21\delta}$	$h_{12\delta} \times 10^{-4}$	$h_{22\delta}$, мкСм	$h_{11\delta}$, Ом	R_{δ} , Ом	R_K , Ом	R_H , КОм	R_{Γ} , Ом
1	0,99	8	4	27	180	1,5	15	130
2	0,98	9	2	24	150	1,2	18	150
3	0,99	10	1	30	200	1	10	100
4	0,96	7	4	22	180	1,5	20	180
5	0,97	10	3	24	220	1,2	22	200
6	0,99	8	2	39	200	1	13	130
7	0,98	9	1	27	180	1,5	15	100
8	0,96	7	4	30	150	1,2	18	150
9	0,97	8	2	22	200	1	10	180
10	0,98	10	3	39	220	1,2	20	130
11	0,99	9	1	27	200	1,5	22	100
13	0,97	8	3	30	180	1,2	15	200
14	0,96	10	1	22	150	1,5	18	180
15	0,99	9	2	39	180	1	20	100
16	0,98	8	3	27	200	1,5	13	100
17	0,96	10	1	39	180	1	15	130
18	0,97	9	4	30	220	1,2	18	150
19	0,99	7	2	27	180	1,5	10	100
20	0,96	10	3	24	150	1	20	180
21	0,98	7	1	22	220	1,2	22	200
22	0,97	8	4	29	150	1,5	13	130
23	0,98	8	2	25	180	1,5	15	100
24	0,96	7	3	32	150	1,2	18	150

Задача 12.2. Рассчитать усилитель мощности на рис. 2.12.2, со следующими параметрами: R_r – выходное сопротивление источника сигнала, $P_{\text{вых}}$; R_H ; f_{min} ; f_{max} , Гц, значения которых приведены в табл. 2.12.2.

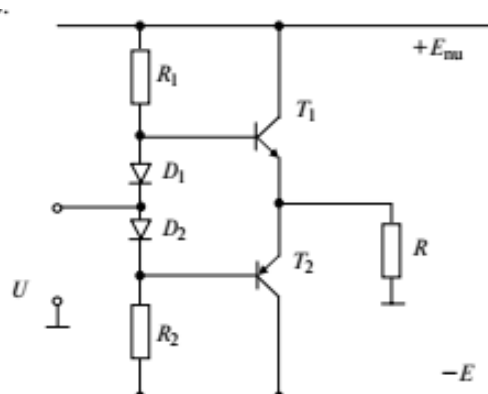


Рис. 2.12.2. Усилитель мощности

Таблица 2.12.2

Исходные данные к задаче 12.2

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$P_{\text{вых}}, \text{Вт}$	13	12	11	7	8	9	10	9	8	7	11
$R_H, \text{Ом}$	10	13	15	8	10	13	8	15	13	10	15
$f_{\text{min}}, \text{Гц}$	46	52	50	48	54	46	50	48	54	46	50
$f_{\text{max}}, \text{кГц}$	12	15	13	14	16	13	12	14	12	15	11
$R_r, \text{Ом}$	100	90	80	110	120	100	90	80	110	120	80
№ варианта	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$P_{\text{вых}}, \text{Вт}$	9	8	13	12	11	7	8	9	10	13	12
$R_H, \text{Ом}$	10	13	15	8	10	13	15	8	10	13	15
$f_{\text{min}}, \text{Гц}$	50	52	46	54	48	50	54	52	46	48	50
$f_{\text{max}}, \text{кГц}$	10	13	12	11	15	14	12	13	10	15	14
$R_r, \text{Ом}$	100	90	80	110	120	100	90	80	110	120	80

Для решения данной задачи воспользоваться формулами, приведенными ниже: $U_H = \sqrt{2R_H P_{\text{вых}}}$, $I_H = U_H / R_H$ амплитуды напряжения и тока в нагрузке.

Полагая, что начальное напряжение равно 3В, рассчитывается напряжение питания $|E_{\text{пит}}| \geq U_H + U_{\text{нач}}$.

Для расчета сопротивлений R_1 и R_2 выбираем кремниевый диод Д206, который устанавливается для начального смещения, и из его ВАХ следует, что для обеспечения на этом диоде напряжения 0,6 В через него должен течь ток 5мА, стоит отметить, что $R_1, R_2 \geq R_{\text{вх}}$

$$R_1 = R_2 = \left(E_{\text{пит}} - U_D \right) / I_D.$$

$K_U \approx (1 + \beta)R_H / [R_I + (1 + \beta)R_H]$ - коэффициент передачи усилителя по напряжению, где $\beta \geq 40$.

$f_c \approx \beta f_{\max}$ - граничная частота;

$U_{\text{вх}} = U_H / K_U$ - амплитуда входного напряжения;

$I_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / R_{\text{вх}}$ - амплитуда входного тока.

Задача 12.3. В схеме мультивибратора на рис. 2.12.3, известны значения $R_1, R_2, R, C, E_1 = |E_2| = 15 \text{ В}$ (табл. 2.12.3). Определить, чему равно время восстановления и период колебаний.

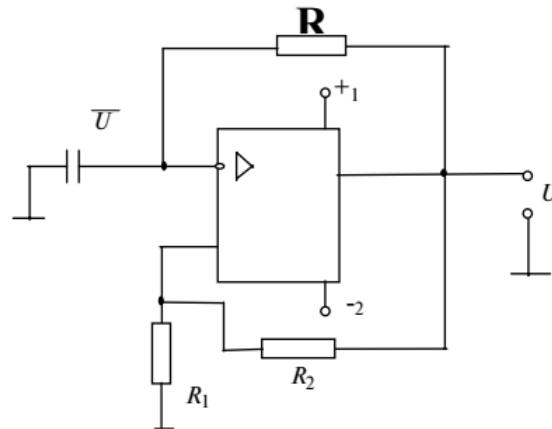


Рис. 2.12.3. Схема мультивибратора

Таблица 2.12.3

Исходные данные к задаче 12.3

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$R_1, \text{кОм}$	30	39	24	27	30	39	22	24	27	30	39	24
$R_2, \text{кОм}$	56	75	51	62	51	56	62	68	75	62	68	52
$R, \text{кОм}$	100	180	150	180	100	150	180	150	100	180	150	180
$C, \text{нФ}$	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
№ варианта	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$R_1, \text{кОм}$	22	30	39	27	30	22	39	24	22	30	25	20
$R_2, \text{кОм}$	56	68	62	75	68	62	56	51	62	51	48	62
$R, \text{кОм}$	100	150	100	180	150	100	180	150	100	180	130	110
$C, \text{нФ}$	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	60

Для решения данной задачи воспользоваться формулами, приведенными ниже: $T = 2 \cdot t_u$ - период одного полного колебания мультивибратора,

где $t_u = t_2 - t_1 = RC \ln \left[\frac{R_1 + R_2}{R_2} \right]$ - длительность выходного импульса.

$$t_{восст} = RC \ln \left(1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) - \text{время восстановления.}$$

Задача 12.4. Спроектировать активный фильтр высокой частоты (рис. 2.12.4), используя операционный усилитель К140УД20 с коэффициентом передачи $K_{и}$, $R_{ос}$, $T_{оу} = 1,59 \cdot 10^{-3}$ с, нижней частотой полосы пропускания $f_{н}$ (табл. 2.12.4).

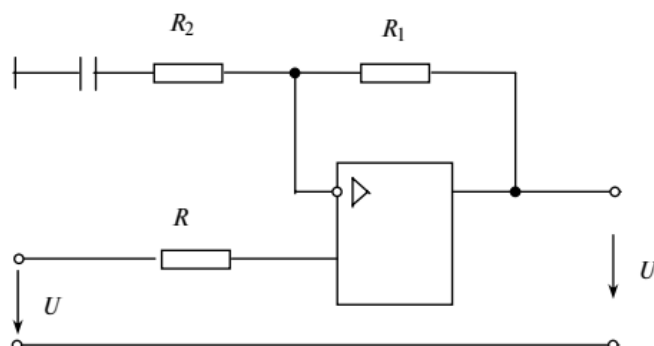


Рис. 2.12.4. Активный фильтр высоких частот

Для решения данной задачи воспользоваться примером расчета фильтра, приведенного в лабораторной работе № 1.8

Таблица 2.12.4

Исходные данные к задаче 12.4

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$K_{и}$	65	70	50	60	80	65	55	70	80	65	70
$K_{и0}$	$100 \cdot 10^3$	$90 \cdot 10^3$	$150 \cdot 10^3$	$80 \cdot 10^3$	$200 \cdot 10^3$	$120 \cdot 10^3$	$140 \cdot 10^3$	$70 \cdot 10^3$	$130 \cdot 10^3$	$180 \cdot 10^3$	$190 \cdot 10^3$
$R_{ос}, \text{кОм}$	2,7	2,4	3,0	3,9	4,3	4,7	2,2	2,7	2,4	3,0	3,9
$f_{н}, \text{Гц}$	550	480	600	500	450	480	550	600	450	500	480
№ варианта	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
$K_{и}$	70	65	80	70	55	65	80	60	50	70	65
$K_{и0}$	$100 \cdot 10^3$	$90 \cdot 10^3$	$150 \cdot 10^3$	$80 \cdot 10^3$	$200 \cdot 10^3$	$120 \cdot 10^3$	$140 \cdot 10^3$	$70 \cdot 10^3$	$130 \cdot 10^3$	$180 \cdot 10^3$	$190 \cdot 10^3$
$R_{ос}, \text{кОм}$	3,9	3,0	2,4	2,7	2,2	4,7	4,3	3,9	3,0	2,4	2,7
$f_{н}, \text{Гц}$	480	500	450	600	550	480	450	500	600	480	550

Практическая работа № 2.13

Расчет автогенератора

Цель работы: выполнение задачи по расчету автогенератора на биполярном транзисторе

Практическое задание. Выполнить расчет автогенератора по примеру, приведенному ниже. Для расчета использовать параметры, приведенные в табл. 2.13.1 по варианту. Параметры транзистора выбирать из табл. 2.13.2. Использовать принципиальную электрическую схему, представленную на рисунке.

Таблица 2.13.1

Параметры для расчета

Номер варианта	Нижняя модулирующая частота, Гц	Верхняя модулирующая частота, кГц	Рабочая частота автогенератора, МГц	Круговая частота автогенератора, МГц	Относительная нестабильность частоты, Гц	Тип транзистора
1	100	7	8,34	45,6	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315А1
2	90	6,5	6,880	43,2	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315Б1
3	110	5	5,50	39,7	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315В1
4	70	7,5	9,00	48,7	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315Г1
5	80	5,4	5,64	41,4	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315Р1
6	120	4,3	4,36	33,6	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315Б1
7	75	6,9	8,30	45,4	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315В1
8	95	7,8	9,545	50,1	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315Д1
9	115	3,2	4,20	28,7	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315Е1
10	135	4,6	5,4	35,7	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315Ж1
11	85	5,8	5,930	42,3	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315И1
12	65	4	4,735	41,7	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315Н1
13	125	4,8	5,34	43,8	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315Р1
14	117	6,3	6,73	43,8	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315В1
15	105	6,1	6,65	42,9	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315Г1
16	97	6	6,546	42,8	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315Д1
17	69	7,2	8,115	47,6	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315Е1
18	74	5,5	5,10	42,4	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315Ж1
19	87	5,4	5,021	42,2	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315И1
20	92	8,1	9,746	50,1	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315А1
21	90	7,8	9,545	48,4	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315Д1
22	101	5,2	7,20	38,7	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315Е1
23	140	3,6	6,4	30,7	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315Ж1
24	90	4,8	6,930	22,3	$1,2 \cdot 10^6$	КТ315И1

Таблица 2.13.2

Параметры транзисторов

Тип	$U_{КБ\text{ МАХ}}$ [В]	$U_{КЭ\text{ МАХ}}$ [В]	$h_{21э}$	$U_{КЭ\text{ НАС}}$ [В]	$U_{БЭ\text{ НАС}}$ [В]	$I_{КБ0}$ [мкА]	$I_{ЭБ0}$ [мкА]	t_k [пс]
КТ315А1	25	25	30...120	0,4	1,0	0,5	30	300
КТ315Б1	20	20	50...350	0,4	1,0	0,5	30	500
КТ315В1	40	40	30...120	0,4	1,0	0,5	30	500
КТ315Г1	35	35	50...350	0,4	1,0	0,5	30	500
КТ315Д1	-	40	20...90	0,6	1,1	0,6	30	1000
КТ315Е1	-	35	50...350	0,6	1,1	0,6	30	1000
КТ315Ж1	-	20	30...250	0,5	0,9	0,6	30	800
КТ315И1	-	60	30	0,9	1,35	0,6	50	950
КТ315Н1	20	20	50...350	0,4	1,0	0,5	30	500
КТ315Р1	35	35	150...350	0,4	1,0	0,5	30	500

Пример расчета автогенератора

Автогенератор является первичным источником колебаний. Амплитуда и частота таких колебаний определяются параметрами самой схемы, и не должны зависеть от внешних условий.

Исходные данные:

$\Omega_{\min} = 100 \text{ Гц}$ - нижняя модулирующая частота,

$\Omega_{\max} = 6300 \text{ Гц}$ - верхняя модулирующая частота,

$f_a = 6,875 \text{ МГц}$ - рабочая частота автогенератора,

$\omega_a = 43,2 \text{ МГц}$ - круговая частота автогенератора,

$\delta = 50 / 41,25 \cdot 10^6 = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ Гц}$ - относительная нестабильность частоты.

Рассчитаем транзисторный автогенератор, собранный по схеме ёмкостной трёхточки с кварцевой стабилизацией частоты. Принципиальная электрическая схема представлена на рисунке.

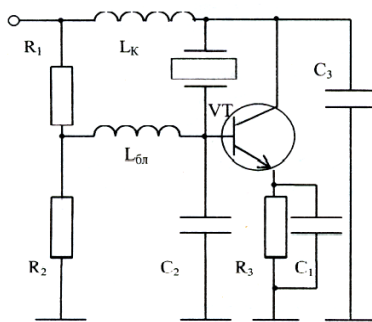


Рис. Принципиальная схема емкостной трехточки

В качестве активного элемента выберем транзистор **КТ315А**

Параметры транзистора:

$$\beta_0 = \sqrt{h_{21э\min} \cdot h_{21э\max}} = \sqrt{20 \cdot 90} = 42,43$$

$I_{\text{кдоп}} = 100 \text{ мА}$ - статический коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером,

$f_T = 100 \text{ МГц}$ - граничная частота в схеме с общим эмиттером,

$\tau_k = 300 \text{ нс}$ - постоянная времени цепи обратной связи транзистора,

$P_{\text{Кдоп}} = 150 \text{ мВт}$ - допустимая мощность, рассеиваемая на коллекторе,

$C_k = 7 \text{ пФ}$ - емкость коллекторного перехода транзистора,

$U_{\text{кэдоп}} = 25 \text{ В}$ - допустимое напряжение на коллекторе в схеме с общим эмиттером.

Энергетический расчет

Пусть $\eta_э = 0,25$ - электронный коэффициент полезного действия,

$\eta_k = 0,25$ - коэффициент полезного действия колебательной системы.

$$P_{\sim} = \frac{P_n}{\eta_k} = \frac{0,01}{0,25} = 0,04 \text{ Вт}, \quad P_{\text{вв}} = \frac{P_n}{\eta_э \cdot \eta_k} = \frac{0,01}{0,25 \cdot 0,25} = 0,16 \text{ Вт}.$$

Рассчитанное значение не превышает предельно допустимых параметров.

Зададим параметры работы транзистора **КТ315А**: $E_{кэ}=6В$, $E_э=3 В$

Вычислим напряжение источника питания: $E_к=E_{кэ}+E_э=6+3=9 В$.

$$I_{K0} = (10...15) \frac{P_H}{E_к} = 10 \cdot \frac{0,01}{9} = 11,1 мА$$

$$I_{B0} = \frac{I_{K0}}{\beta_0} = \frac{11,1 \cdot 10^{-3}}{42,43} = 0,26 мА.$$

Определим ток базы: $I_{B0} = \frac{I_{K0}}{\beta_0} = \frac{11,1 \cdot 10^{-3}}{42,43} = 0,26 мА.$

Вычислим ток эмиттера по формуле

$$I_{э0} = I_{K0} \cdot \frac{1 + \beta_0}{\beta_0} = 11,1 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1 + 42,43}{42,43} = 11,36 мА.$$

Определим сопротивление эмиттерного автосмещения

$$R_э = \frac{E_э}{I_{э0}} = \frac{3}{11,1 \cdot 10^{-3}} = 270,3 Ом.$$

Из ряда сопротивлений выбираем $R_э=270 Ом$

Вычисляем ток делителя: $I_{дел} = 10 \cdot I_{B0} = 10 \cdot 0,26 \cdot 10^{-3} = 2,6 мА.$

Вычислим напряжение на базе транзистора: $E_б=E_э+0,7=3+0,7=3,7 В$.

Вычисляем результирующее сопротивление делителя напряжения:

$$R_{дел} = \frac{E_к}{I_{дел}}, \quad R_{дел} = \frac{E_к}{I_{дел}} = \frac{9}{2,6 \cdot 10^{-3}} = 3,46 кОм.$$

Вычисляем сопротивление делителя: $R_2 = \frac{E_б}{I_{дел}} = \frac{3,7}{2,6 \cdot 10^{-3}} = 1,42 кОм$

$$R_1 = R_{дел} - R_2 = 3,46 - 1,42 = 2,04 кОм.$$

Из ряда номиналов выбираем $R_1=2500 Ом$

Задаем коэффициент регенерации автогенератора: $G_p = (3...7) = 5.$

Вычислим управляющее сопротивление: $R_{уп} = \frac{G_p}{S},$

где $S = \frac{\beta_0}{r_б + \beta_0 r_э}$ - крутизна статической характеристики транзистора:

$r_б$ - сопротивление базы транзистора,

$r_э$ - сопротивление эмиттера.

$$r_б = \frac{\tau_к}{C_к} = \frac{300 \cdot 10^{-12}}{7 \cdot 10^{-12}} = 42,86 Ом, \quad r_э = \frac{1}{40 \cdot I_{э0}} = \frac{1}{40 \cdot 11,36 \cdot 10^{-3}} = 2,2 Ом$$

$$S = \frac{42,43}{42,86 + 42,43 \cdot 2,2} = 0,312 А/В, \quad R_{уп} = \frac{5}{0,312} = 16,03 Ом.$$

Зададимся коэффициентом обратной связи: $K_{oc} = \frac{C_3}{C_2} \leq 1$, $K_{oc} = 0,5$.

Вычислим реактивное сопротивление емкости C_3 :

$$X_3 = \sqrt{\frac{R_{\text{кв}} \cdot r_{\text{кв}}}{K_{oc}}} = \sqrt{\frac{16,03 \cdot 30}{0,5}} = 31,01 \text{ Ом},$$

где $r_{\text{кв}}$ - сопротивление кварца (для данного кварца равно 30 Ом).

Вычислим величины конденсаторов C_2 и C_3 :

$$C_3 = \frac{1}{\omega_{\text{кв}} \cdot X_3} = \frac{1}{2\pi f_{\text{кв}} X_3} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 31,01} = 1,03 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}.$$

Из ряда номиналов выбираем $C_3 = 1 \text{ нФ}$.

$$C_2 = \frac{C_3}{K_{oc}} = \frac{1,03 \cdot 10^{-9}}{0,5} = 2,06 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}.$$

Из ряда номиналов выбираем $C_2 = 2,2 \text{ нФ}$.

Емкость блокировочного конденсатора определяется:

$$C_1 = \frac{(10 \dots 20)}{\omega_{\text{кв}} R_{\text{э}}} = \frac{10}{2\pi \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 270,3} = 1,18 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}.$$

Из ряда номиналов выбираем $C_1 = 1,2 \text{ нФ}$.

Вычислим индуктивность блокировочного дросселя L_1 :

$$L_1 = \frac{(20 \dots 30) X_3}{\omega_{\text{кв}}} = \frac{20 \cdot 31,01}{2\pi \cdot 5 \cdot 10^6} = 1,98 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}.$$

Вычислим индуктивность блокировочного дросселя L_2 :

$$L_2 = \frac{(20 \dots 30) X_2}{\omega_{\text{кв}}}, \text{ где } X_2 - \text{реактивное сопротивление емкости } C_2.$$

$$X_2 = \frac{1}{2\pi f_{\text{кв}} C_2} = \frac{1}{2\pi \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 2,06 \cdot 10^{-9}} = 15,45 \text{ Ом},$$

$$L_2 = \frac{20 \cdot 15,45}{2\pi \cdot 5 \cdot 10^6} = 9,84 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}.$$

Из ряда номиналов выбираем $L_2 = 10 \text{ мкГн}$.

Проверяем неравенство:

$$(20 \dots 30) X_2 \leq \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow 30 \cdot 15,45 \leq \frac{2,04 \cdot 1,42 \cdot 10^6}{(2,04 + 1,42) 10^3} \Rightarrow 463,5 \leq 837,23.$$

Неравенство выполняется. Следовательно, нет необходимости в дросселе L_2 .

Определим коэффициент Берга для стационарного режима:

$$\gamma(\theta_k) = \beta_1 = \frac{1}{G_p} = \frac{1}{5} = 0,2.$$

Угол осечки коллекторного тока: $\theta_K = 60^\circ$.

Определим коэффициенты Берга для данного угла осечки: $\alpha_0(\theta_K)=0,218$, $\alpha_1(\theta_K)=0,391$.

Размах импульса коллекторного тока определяется по формуле:

$$I_{mk} = \frac{I_{k0}}{\alpha_0(\theta_K)} = \frac{11,1 \cdot 10^{-3}}{0,218} = 0,051 A.$$

Проверяем выполнение условия: $I_{mk} \leq I_{mk\text{дон}}$,

где $I_{mk} = 0,1 A$ - допустимое значение размаха импульса коллекторного тока.

$0,051 \leq 0,1$ – данное условие выполняется.

Вычислим амплитуду первой гармоники коллекторного тока:

$$I_{k1} = I_{mk} \cdot \alpha_1(\theta_K) = 0,051 \cdot 0,391 = 19,94 \text{ мА}.$$

Амплитуду переменного напряжения на базе:

$$U_{mб} = I_{k1} \cdot R_{упр} = 19,94 \cdot 10^{-3} \cdot 16,03 = 0,32 B.$$

Модуль коэффициента обратной связи:

$$|K_{oc}| = \frac{X_2}{\sqrt{X_3^2 + r_{кв}^2}} = \frac{15,45}{\sqrt{31,01^2 + 30^2}} = 0,36.$$

$$\text{Амплитуду напряжения на коллекторе: } U_{mk} = \frac{U_{mб}}{|K_{oc}|} = \frac{0,32}{0,36} = 0,89 B.$$

Проверяем условие работы транзисторного каскада в недонапряженном режиме: $U_{mk} < E_K$, $0,89 < 9$ – данное условие выполняется.

Вычисляем мощность, потребляемую от источника питания коллекторной цепью: $P_0 = E_{кэ} \cdot I_{k0} = 6 \cdot 11,1 \cdot 10^{-3} = 0,067 \text{ Вт}.$

Рассеиваемая кварцевым резонатором мощность:

$$P_{кв} = 0,5 r_{кв} \left(\frac{U_{mб}}{X_2} \right)^2 = 0,5 \cdot 30 \left(\frac{0,32}{15,45} \right)^2 = 6,43 \text{ мВт}.$$

Рассеиваемую транзистором мощность рассчитывает по формуле:

$$P_K = P_0 - P_{кв} = 0,067 - 6,43 \cdot 10^{-3} \approx 0,061 \text{ Вт} = 61 \text{ мВт}.$$

Проверяем выполнение условия: $P_K < P_{K.\text{дон}}$, где $P_{K.\text{дон}} = 150 \text{ мВт}$ - допустимая мощность, рассеиваемая транзистором, тогда $61 < 150$ - данное условие выполняется.

Допустимое сопротивление нагрузки

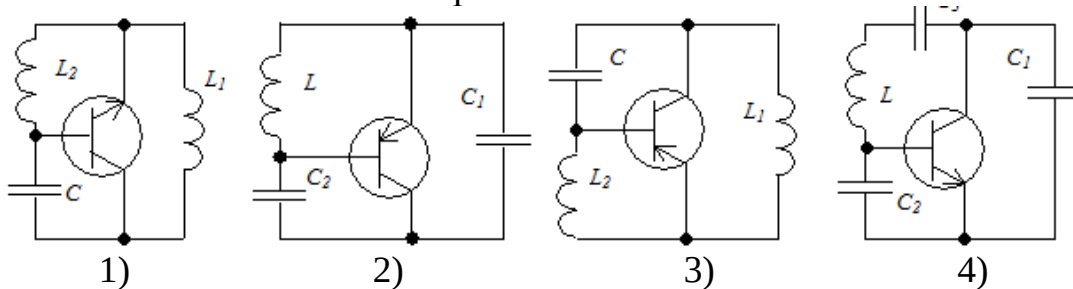
$$R_{н.\text{дон}} = \frac{5 \cdot U_{mk}^2}{P_{кв}} = \frac{5 \cdot 0,89^2}{6,43 \cdot 10^{-3}} = 692,1 \text{ Ом}.$$

Потребляемая нагрузкой мощность: $P_H = 0,1 \cdot P_{кв} = 0,1 \cdot 6,43 \cdot 10^{-3} = 0,643 \text{ мВт}.$

Практическая работа № 2.14

Решение задач по автогенераторам

1. Какая эквивалентная схема неверна?



2. Идеальный усилитель обладает следующими характеристиками:

А) $K_U \rightarrow \infty$, $R_{BX} \rightarrow \infty$, $R_{ВЫХ} \rightarrow \infty$

Б) $K_U \rightarrow \infty$, $R_{BX} \rightarrow 0$, $R_{ВЫХ} \rightarrow \infty$

В) $K_U \rightarrow \infty$, $R_{BX} \rightarrow \infty$, $R_{ВЫХ} \rightarrow 0$

Г) $K_U \rightarrow 0$, $R_{BX} \rightarrow 0$, $R_{ВЫХ} \rightarrow 0$,

где K_U – коэффициент усиления по напряжению, R_{BX} и $R_{ВЫХ}$ – входное и выходное сопротивление.

3. Частота собственных колебаний LC-контура определяется по формуле:

$\omega_0 = \sqrt{RC}$

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

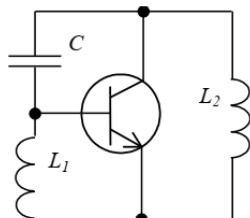
$\omega_0 = \sqrt{LC}$

1)

2)

3)

4. Коэффициент обратной связи равен:



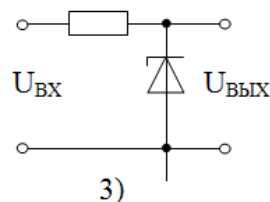
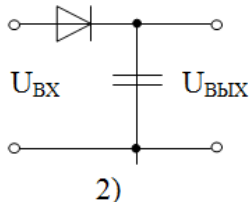
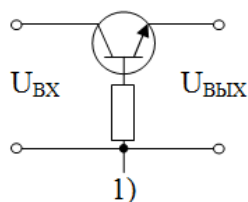
1) $k_{oc} = C / L_1$

2) $k_{oc} = L_2 / C$

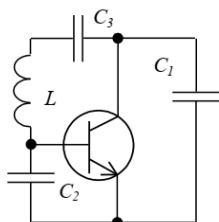
3) $k_{oc} = L_2 / L_1$

4) $k_{oc} = L_1 / L_2$

5. Схемой стабилизатора выходного напряжения не является:



6. Коэффициент обратной связи равен:



1) $k_{oc} = C_2 / C_1$

2) $k_{oc} = C_3 / C_2$

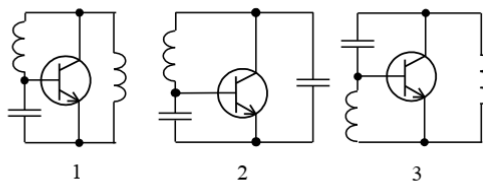
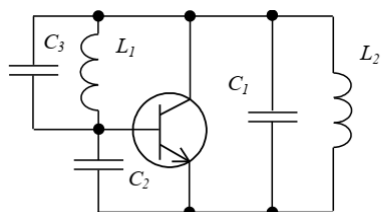
3) $k_{oc} = L / C_3$

4) $k_{oc} = C_1 / C_2$

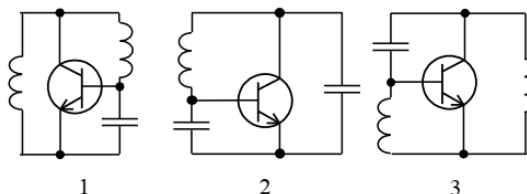
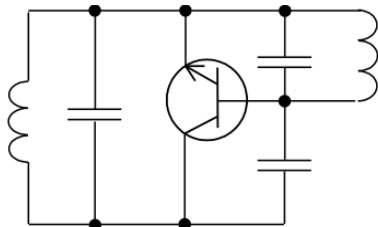
5) $k_{oc} = C_1 / C_3$

6) $k_{oc} = C_2 / L$

7. К какой эквивалентной схеме сводится двухконтурный автогенератор?



8. К какой эквивалентной схеме сводится двухконтурный автогенератор?



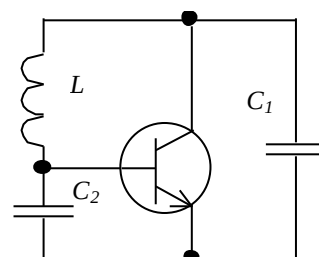
9. Эквивалентное сопротивление нагрузки в коллекторной цепи равно:

1) $R_{\kappa} = Q\rho \frac{C_2}{C_1}$ 2) $R_{\kappa} = Q\rho \frac{C_1^2}{(C_1 + C_2)^2}$

3) $R_{\kappa} = Q\rho \frac{C_2^2}{(C_1 + C_2)^2}$ 4) $R_{\kappa} = Q\rho \frac{C_2^2}{C_1^2}$

5) Все формулы неверны

(Q – добротность, ρ – характеристическое сопротивление контура)



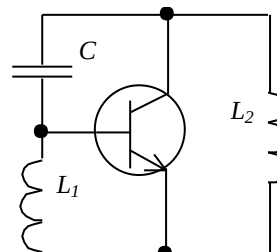
10. Эквивалентное сопротивление нагрузки в коллекторной цепи транзистора равно:

1) $R_{\kappa} = Q\rho \frac{L_2}{L_1}$ 2) $R_{\kappa} = Q\rho \frac{L_1^2}{(L_1 + L_2)^2}$

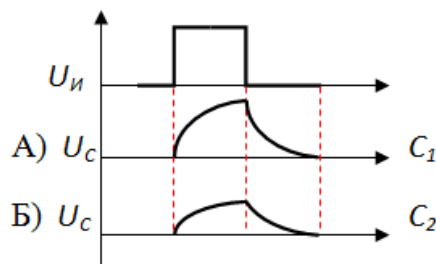
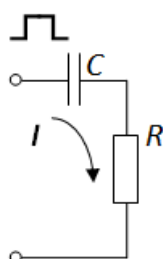
3) $R_{\kappa} = Q\rho \frac{L_2^2}{(L_1 + L_2)^2}$ 4) $R_{\kappa} = Q\rho \frac{L_2^2}{L_1^2}$

5) Все формулы неверны

(Q – добротность, ρ – характеристическое сопротивление контура)



11. Прямоугольный импульс при прохождении через емкостную нагрузку (RC), претерпевает искажения. При $C=C_2$ искажение привело также и к уменьшению амплитуды импульса. Выберите правильный вариант ответа:



A) $C_1 < C_2$ Б) $C_1 > C_2$

12. Какая эквивалентная схема кварцевого автогенератора, приведённого на рис. 2.14.1, верна при $f_{ген} = f_{кв}$?

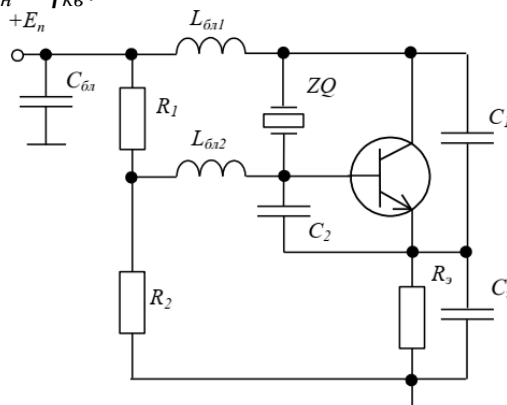
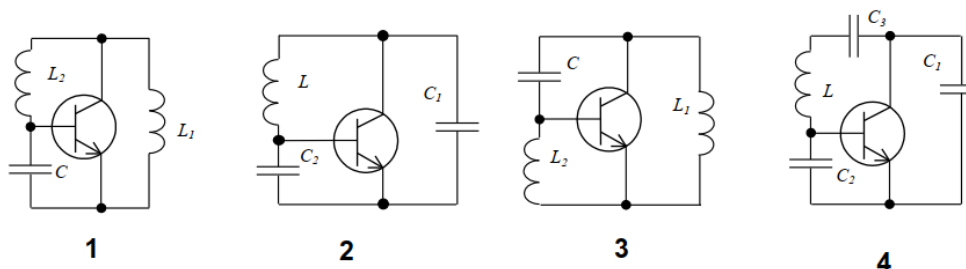
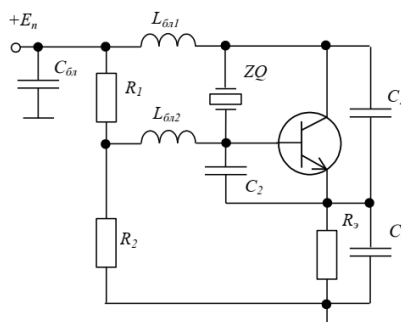


Рис. 2.14.1. Осцилляторная схема кварцевого автогенератора (ёмкостная трехточка)



13. Кварцевый автогенератор возбуждается на частоте $3f_{кв}$ при одном из следующих условий:



Осцилляторная схема кварцевого автогенератора (ёмкостная трехточка)

1) $\frac{1}{4\pi^2(3f_{кв})^2 C_2} \leq L_{бл1} \leq \frac{1}{4\pi^2 f_{кв}^2 C_1}$; 2) $L_{бл1} \approx \frac{1}{16\pi^2 f_{кв}^2 C_1}$; 3) $L_{бл2} \geq \frac{1}{4\pi^2 f_{кв}^2 C_1}$;

4) все формулы неверны.

14. Данное условное графическое изображение обозначает:

- 1) полевой транзистор МДП-типа
- 2) биполярный транзистор $p-n-p$ типа
- 3) биполярный транзистор $n-p-n$ типа
- 4) полевой транзистор с каналом p -типа



Задача 14.1

Определить коэффициент передачи цепи обратной связи $H_{ос}$, приведенного на рис. 2.14.2, а также частоту генерации $f_{Г}$, параметры элементов контура L ,

C , R и среднюю крутизну ВАХ транзистора S_{cp} выбрать из табл. 2.14.1 по вариантам.

Таблица 2.14.1

Варианты заданных параметров автогенератора

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
L , мкГн	100	90	110	130	100	99	110	130	112	90	110	130
C , мкФ	0,1	0,2	0,5	0,7	0,15	0,32	0,5	0,7	0,2	0,2	0,5	0,7
R , кОм	20	15	30	45	24	15	30	45	37	15	29	45
S_{cp} , мА/В	4	3	6	8	4	7	6	8	4	3	6	8
№ варианта	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
L , мкГн	70	90	110	100	90	86	100	90	105	75	90	110
C , мкФ	0,05	0,2	0,6	0,1	0,2	0,21	0,1	0,2	0,5	0,1	0,2	0,4
R , кОм	10	15	35	20	15	22	43	15	30	20	15	30
S_{cp} , мА/В	2	3	6	4	3	7	4	3	6	4	3	6

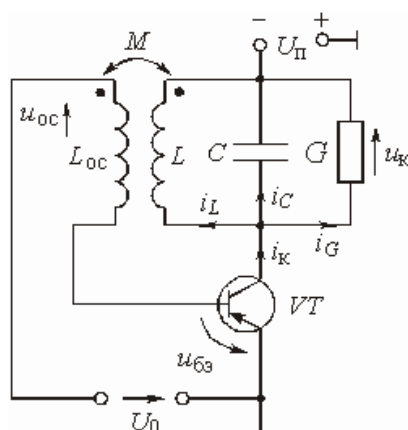


Рис. 2.14.2. Схема автогенератора

Для расчета использовать следующие формулы:

$$H_{oc}(\omega_r) > \frac{1}{H_{yc}(\omega_r)} - \text{условие наступления самовозбуждения автогенератора;}$$

тора;

$$H_{yc}(\omega_r) = S_{cp} \cdot R - \text{коэффициент передачи усилителя;}$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} - \text{частота генерации колебаний.}$$

Задача 14.2

Определить крутизну характеристики транзистора, при которой наступит самовозбуждение автогенератора, приведенного на рис. 2.14.2. В табл. 2.14.2 заданы емкость C и сопротивление контура R , добротность контура Q и взаимная индуктивность M .

Таблица 2.14.2

Варианты заданных параметров автогенератора

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
C, нФ	10	15	17	16	10	15	17	16	10	15	17	16
R, кОм	5	5,5	7	6	5	5,5	7	6	5	5,5	7	6
Q	10	11	20	17	13	14	15	17	10	11	20	17
M, мкГн	100	110	103	115	100	110	103	115	100	110	103	115
№ варианта	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
C, нФ	13	15	17	14	10	15	17	16	10	15	17	16
R, кОм	5	4	7	6	5	8	7	6	5	6	7	6
Q	11	9	15	13	10	12	20	17	10	13	22	17
M, мкГн	101	109	100	97	103	110	103	115	100	110	120	115

Для расчета использовать следующие формулы:

$$L = \frac{R^2 C}{Q^2} \text{ – индуктивность колебательного контура;}$$

$$S_{cp} > \frac{L}{R \cdot M} \text{ – крутизна характеристики транзистора для выполнения}$$

условия самовозбуждения.

Задача 14.3

Определить критический коэффициент взаимной индукции автогенератора $M_{кр}$, параметры элементов контура взять из табл. 2.14.3 по вариантам.

Таблица 2.14.3

Варианты заданных параметров автогенератора

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
L, мкГн	100	90	110	130	100	99	110	130	112	90	110	130
R, кОм	10	15	30	45	24	15	30	45	37	15	19	45
$H_{yc}(\omega_r)$	10	11	20	17	13	14	15	17	10	11	20	17
№ варианта	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
L, мкГн	13	15	17	14	10	15	17	16	10	15	17	16
R, кОм	5	4	7	6	5	8	7	6	5	6	7	6
$H_{yc}(\omega_r)$	11	9	15	13	10	12	20	17	10	13	22	17

Для расчета использовать следующие формулы:

$$S_{cp} = H_{yc}(\omega_r) / R \text{ – крутизна ВАХ транзистора;}$$

$$M_{кр} = \frac{L}{R \cdot S_{cp}} \text{ – критический коэффициент взаимной индукции.}$$

Задача 14.4

Определить минимальное значение коэффициента передачи $H_{yc}(\omega_r)$ усилителя, при котором происходит самовозбуждение автогенератора, и рассчитать частоту генерации f_r . Параметры элементов контура приведены в табл. 2.14.4 по вариантам.

Таблица 2.14.4

Варианты заданных параметров автогенератора

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
L1, мкГн	15	16	17	18	19	20	14	13	15	18	20	17
L2, мкГн	6	7	8	9	10	11	5	4	8	4	9	6
C, мкФ	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
№ варианта	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
L1, мкГн	15	16	17	18	19	20	14	13	15	18	20	17
L2, мкГн	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
C, мкФ	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7

Для расчета использовать следующие формулы:

$H_{OC}(\omega_r) = L_2 / L_1$ – коэффициент передачи цепи обратной связи;

$H_{YC}(\omega_r) > \frac{1}{H_{OC}(\omega_r)}$ – условие самовозбуждения автогенератора.

Практическая работа № 2.15

Исследование ключа на биполярном транзисторе

Цель работы: ознакомиться с принципом работы и процессами, протекающими в электронном ключе, построенном на биполярном транзисторе.

Теоретические сведения

Одним из основных элементов импульсной и цифровой техники является *ключевое устройство*. Ключевые устройства (ключи) служат для коммутации (переключения) цепей нагрузки под воздействием внешних управляющих сигналов. Ключ может находиться в замкнутом или в разомкнутом состоянии (рис. 2.15.1). В замкнутом состоянии (ключ включен) сопротивление ключа мало, через него течет большой ток и все напряжение источника выделяется на резисторе R . Напряжение на выходе $u_{\text{вых}}$ равно нулю. В разомкнутом состоянии (ключ выключен) сопротивление ключа бесконечно большое, поэтому ток через него практически не протекает. Напряжение на выходе $u_{\text{вых}}$ равно E . Следовательно, при коммутации ключа на выходе создаются перепады напряжения с амплитудой $U_m = E$.

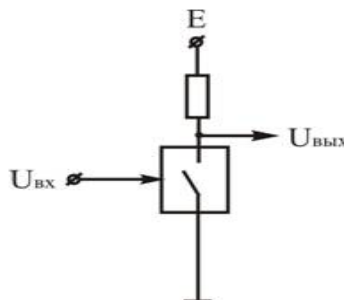


Рис. 2.15.1. Функциональная схема ключа

Функциональная схема электронного ключа приведена на рис. 2.15.1.

Ключ удерживается в одном из состояний, пока на входе сохраняется соответствующий уровень сигнала (рис. 2.15.2). Резистор $R_{бэ}$ ограничивает ток базы, R_k – коллекторная нагрузка, E_k — источник коллекторного напряжения.

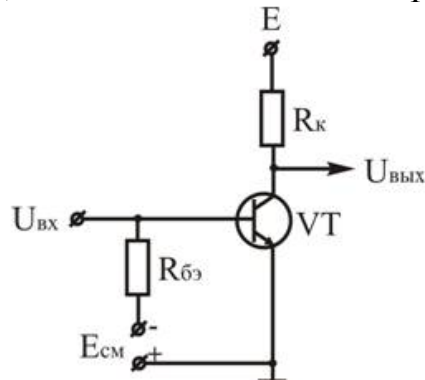


Рис. 2.15.2. Схема транзисторного ключа

Когда транзистор работает в ключевом режиме он может находиться в двух состояниях:

- режим отсечки, когда транзистор полностью закрыт, а напряжение между коллектором и эмиттером равно напряжению источника питания.
- это режим насыщения, когда транзистор полностью открыт, а напряжение между коллектором и эмиттером равно падению напряжения на р – n – переходах.

Как показано на рис. 2.15.3, повышение быстродействия можно добиться введением диода в базо-коллекторную для уменьшения времени рассасывания, т.е. когда транзистор насыщается, диод открывается, и часть тока ответвляется в коллекторную цепь. Транзистору не удастся зайти в режим глубокого насыщения, оставаясь в граничной области, и высокая концентрация носителей зарядов не создается в районе базы. На рис. 2.15.4. приведены входное и базовое напряжений электронного ключа.

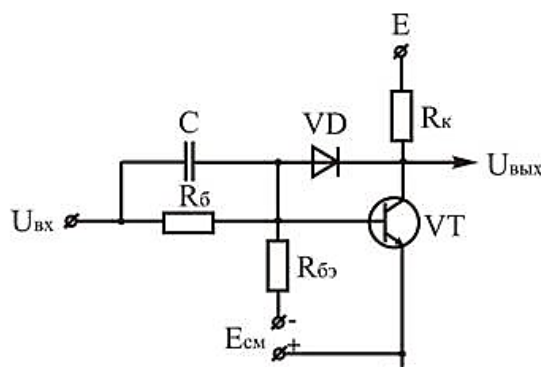


Рис. 2.15.3. Схема транзисторного ключа для повышения быстродействия

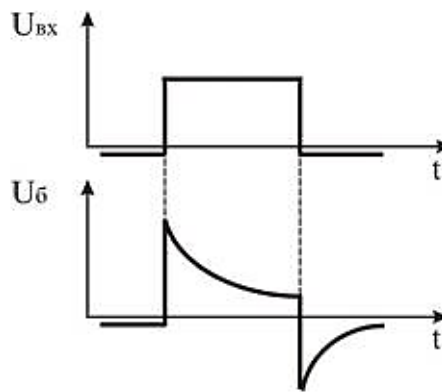


Рис. 2.15.4. Входное и базовое напряжения электронного ключа

Между базой и эмиттером также можно добавить диод, это защитит базу транзистора от обратной полярности, такая электронная схема показана на рис. 2.15.5.

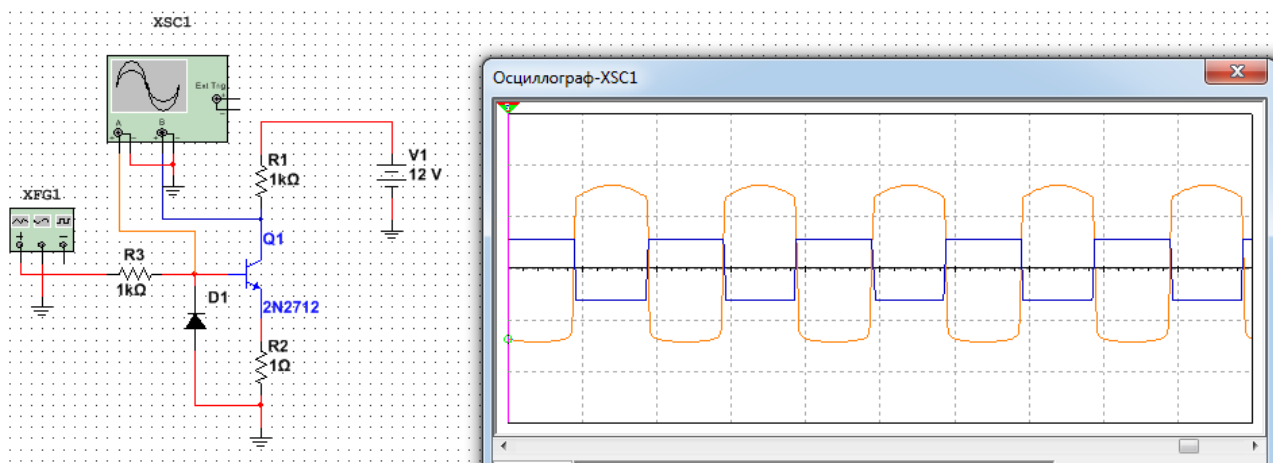


Рис. 2.15.5. Диод в цепи между базой и эмиттером

Как видно из рис. 2.15.5 база транзистора подключена к каналу А осциллографа, а эмиттер – к каналу Б.

На рис. 2.15.6 представлена простейшая схема для моделирования, которая затем и будет использоваться для выполнения практического задания, для нее ниже приведена система уравнений с использованием 2-ого закона Кирхгофа.

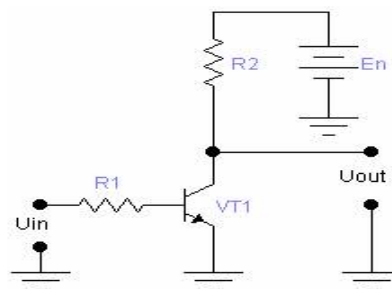


Рис. 2.15.6. Простейшая схема транзисторного ключа

$$\begin{cases} U_{ex} = I_{\delta} R_1 + U_{\delta\delta} \\ E_n = I_{\kappa} R_2 + U_{\kappa\delta} \end{cases}$$

Практическое задание

1. Схема исследуемого электронного ключа на биполярном п-р-п транзисторе изображена на рис. 2.15.7.

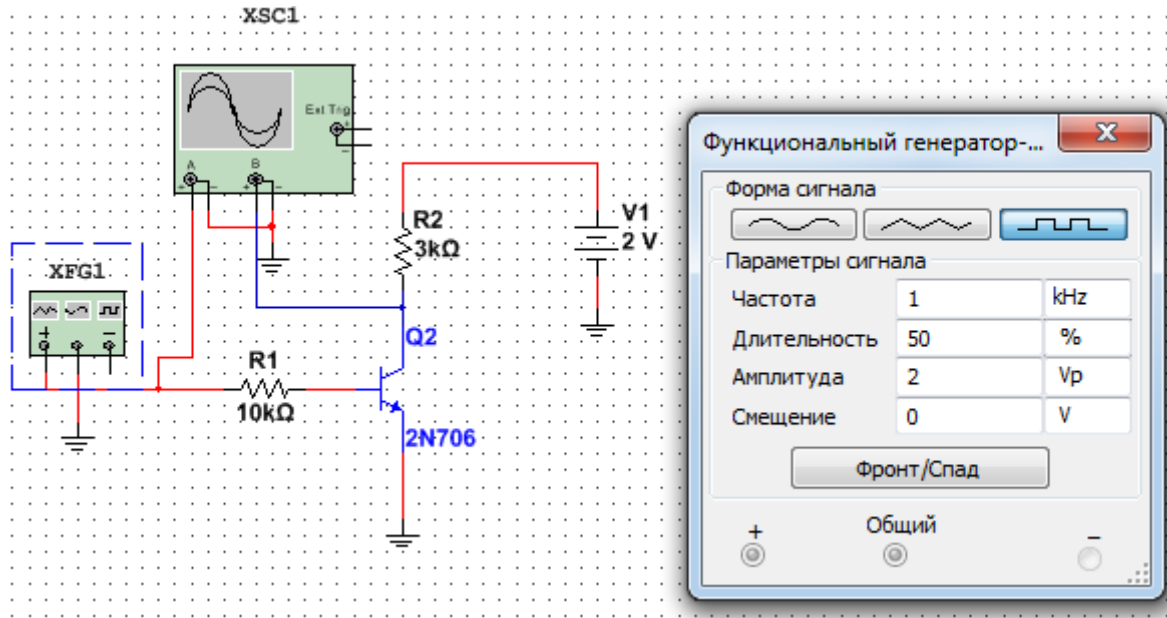


Рис. 2.15.7. Схема ключа для моделирования, и настройка функционального генератора

В настройках функционального генератора выбрать прямоугольную форму импульсов с частотой 1 кГц и амплитудой 2 В. Напряжение питания задать в соответствии с номером своего варианта $V1=(N+1)$ В, I_n (ток через резистор R2) = 0.4N мА, где N - номер варианта.

Необходимо рассчитать параметры и элементы электронного ключа, вставить в отчет осциллограммы входного и выходного напряжений, падение напряжения на переходе коллектор-эмиттер в режиме насыщения $U_{кэнас}$. При расчете принять $U_{бэн}=1,1$ В, $U_{кэн}=0,8$ В, $\beta=100$, коэффициент насыщения $K_n=I_{\delta}/I_{\delta n}=3$.

$$R_{\kappa} = \frac{E_{\kappa} - U_{кэн}}{I_n} \text{ - сопротивление резистора в цепи эмиттера ключа;}$$

$$I_{\kappa n} = \frac{E_{\kappa} - U_{кэ}}{R_{\kappa}} \text{ - ток коллектора;}$$

$$I_{\delta n} = K_n \frac{I_n}{\beta} \text{ - ток базы;}$$

$$R_{\bar{b}} = \frac{U_{вх} - U_{\bar{b}э}}{I_{\bar{b}н}} - \text{необходимое сопротивление резистора базы в цепи для}$$

обеспечения коэффициента насыщения $K_n=3$.

Также необходимо рассчитать задержку фронта, общее время включения транзисторного ключа, длительность выключения.

Практическая работа № 2.16

Построение схем комбинационных цифровых устройств (КЦУ) в заданном базисе

Цель работы: научиться записывать логические функции разными способами, составлять таблицы истинности, строить схемы комбинационных цифровых устройств в заданном базисе.

Теоретические сведения

В цифровых устройствах передача информации по каналам связи или между блоками цифрового устройства осуществляется в цифровом виде, т.е. представляется в виде двоичных символов 0 и 1, которые называются кодовыми словами.

После прохождения сигнала через цифровые устройства, в которых выполняются различные операции с входными переменными, получается выходная функция (логическая). Различают цифровые устройства, в зависимости от ввода и вывода кодовых слов, последовательного, параллельного и смешанного типов. Комбинационными цифровыми устройствами называют такие цифровые устройства, где выходной сигнал зависит только от входных сигналов.

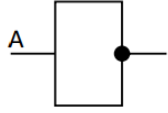
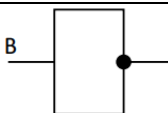
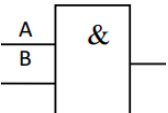
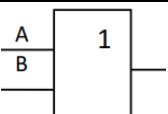
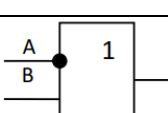
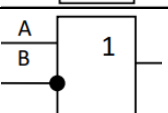
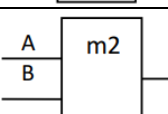
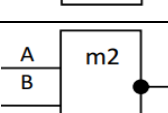
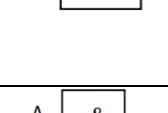
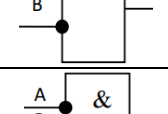
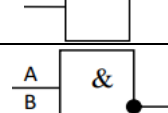
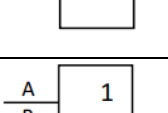
Формализация и преобразование связей между логическими переменными осуществляется на основании правил и законов алгебры логики (булевой алгебры).

В табл. 2.16.1 приведены различные, используемые при записи логического выражения, логические операции и функции, их условное обозначение, таблицы истинности, условно-графическое обозначение элементов.

Таблица 2.16.1

Функции алгебры логики одного и двух аргументов

№	Обозначение функции		Таблица истинности					Название функции	Обозначение логического элемента
	Основное	Дополнительные	A	0	0	1	1		
			B	0	1	0	1		
ФАЛ	1	A		0	0	1	1	Переменная A	
	2	B		0	1	0	1	Переменная B	
	3	0		0	0	0	0	Константа 0	

	4	1		1	1	1	1	Константа 1		
	5	$\overline{A}$		1	1	0	0	Логическое отрицание «НЕ»	Инверсия А	
	6	$\overline{B}$		1	0	1	0	Логическое отрицание «НЕ»	Инверсия В	
ФАЛ двух аргументов	1	$A \cdot B$	$AB, A \wedge B$ $A \& B$	0	0	0	1	Конъюнкция; Логическое произведение; «И»		
	2	$A \vee B$	$A + B$	0	1	1	1	Дизъюнкция; логическая сумма; «ИЛИ»		
	3	$A \rightarrow B$	$A \supset B, \overline{A} \vee B$	1	1	0	1	Импликация		
	4	$B \rightarrow A$	$B \supset A, A \vee \overline{B}$	1	0	1	1	Импликация		
	5	$A \oplus B$	$A \neq B, A\overline{B} \vee \overline{A}B$ $(A \vee B) \cdot (\overline{A} \vee \overline{B})$	0	1	1	0	Сумма по модулю два; неравнозначность; «исключающее ИЛИ»		
	6	$A \Leftrightarrow B$	$A \equiv B, A \leftrightarrow B,$ $\overline{A \oplus B}, A\overline{B} \vee \overline{A}B$ $(\overline{A} \vee B) \cdot (A \vee \overline{B})$	1	0	0	1	Эквивалентность; равнозначность		
	7	$A \Delta B$	$A \cdot \overline{B}$ $A \nrightarrow B$	0	0	1	0	Запрет по В		
ФАЛ двух аргументов	8	$B \Delta A$	$\overline{A} \cdot B$ $B \nrightarrow A$	0	1	0	0	Запрет по А		
	9	$A B$	$\overline{A \cdot B}$	1	1	1	0	Отрицание конъюнкции; элемент (штрих) Шеффера; «И-НЕ»		
	10	$A \downarrow B$	$\overline{A \vee B}$	1	0	0	0	Отрицание дизъюнкции; стрелка Пирса; функция Вебба; «ИЛИ-НЕ»		

При построении схемы логического устройства по заданному выражению необходимо учитывать последовательность выполнения логических преобразований и операций: инверсия; выражения в скобках; конъюнкция («И»); дизъюнкция («ИЛИ»).

Функционально полной системой или *базисом* называется набор логических элементов, используя который можно реализовать любую сложную логическую функцию.

Базис {И, ИЛИ, НЕ} является полным, но не минимальным. Минимальным считают базисы {И-НЕ}, {ИЛИ-НЕ}.

Практическое задание

1. По заданному выражению функции f (табл. 2.16.2 графа 2) построить логическую схему в полном базисе {И, ИЛИ, НЕ}, изображенную на рис. 2.16.1.

2. Записать заданную ФАЛ (табл. 2.16.2 графа 2) через операцию «И-НЕ», применив закон двойного отрицания $\overline{\overline{A}} = A$ и теорему де Моргана: $\overline{A \wedge B} = \overline{A} \vee \overline{B}$; $\overline{A \vee B} = \overline{A} \wedge \overline{B}$.

3. По полученному выражению построить логическую схему в базисе {И-НЕ}, изображенную на рис. 2.16.2.

4. Указать на схемах п.1 и п.3 значения логических сигналов на выходе каждого логического элемента для заданной комбинации входных сигналов (табл. 2.16.2, графа 3). Значение f ФАЛ п.1 должно быть равно f ФАЛ п.3

Таблица 2.16.2

Исходные данные для выполнения практического задания

№ варианта	Выражение (ФАЛ)	Входной сигнал		
		A	B	C
Пример	$f = A \cdot C \vee \overline{A} \cdot B \cdot \overline{C}$	1	0	1
1	$f = A \vee (\overline{A \cdot C}) \vee (\overline{B \cdot C})$	1	1	1
2	$f = \overline{C} \vee (\overline{B \cdot A}) \vee (\overline{A \cdot C})$	1	0	1
3	$f = A \cdot \overline{C} \vee A \cdot B \cdot \overline{C}$	0	1	1
4	$f = \overline{B} \vee A \cdot C \vee \overline{A \cdot B}$	0	1	0
5	$f = C \vee \overline{B \cdot C} \vee \overline{A \cdot B}$	1	0	0
6	$f = A \vee (\overline{A \cdot C}) \vee B \cdot C$	1	1	0
7	$f = \overline{B} \vee (\overline{A \cdot C} \vee \overline{A \cdot B}) \cdot A$	0	1	0
8	$f = C \vee (\overline{B \cdot C} \vee \overline{A \cdot B}) \cdot A$	1	0	0
9	$f = A \cdot \overline{B} \vee (\overline{B \cdot C} \vee \overline{A \cdot B})$	0	1	1
10	$f = \overline{B \cdot C} \vee \overline{A \cdot C} \vee \overline{A \cdot B \cdot C}$	0	0	0

11	$f = \overline{B}AC \vee \overline{B}C \vee \overline{A}C$	0	1	1
12	$f = \overline{B}AC \vee (C \vee B)\overline{A}$	1	0	0
13	$f = \overline{B}AC \vee (C \vee B)\overline{A}$	0	0	1
14	$f = \overline{B}A \vee (C \vee B)\overline{A}$	1	1	1
15	$f = \overline{B}A \vee CA \vee B$	0	1	1
16	$f = C \vee A\overline{B}C \vee \overline{A}C$	0	1	0
17	$f = (\overline{B} \vee A)C \vee \overline{A}B$	0	1	1
18	$f = \overline{C} \vee AB \vee (A \vee B)$	1	1	1
19	$f = AB \vee (A \vee C) \vee \overline{A}$	0	0	0
20	$f = A \vee \overline{B}C \vee AB$	1	1	0
21	$f = (\overline{B} \vee C)A \vee \overline{A}B$	0	1	0
22	$f = \overline{C} \vee \overline{C}B \vee (A \vee B)$	1	1	0

Пример выполнения практического задания

По заданному выражению $f = A \cdot C \vee \overline{A} \cdot B \cdot \overline{C}$ построить логическую схему в заданном базисе

1. Для выражения $f = A \cdot C \vee \overline{A} \cdot B \cdot \overline{C}$ построим схему в полном базисе, используя элементы «НЕ», «И», «ИЛИ». Учитывая последовательность выполнения логических преобразований и операций, разобьем заданное выражение f на подфункции $f_1 = \overline{A}$, $f_2 = \overline{C}$, $f_3 = AC$, $f_4 = f_1 f_2 B$, $f = f_3 + f_4$

Построим схему, используя элементы из табл. 2.16.1.

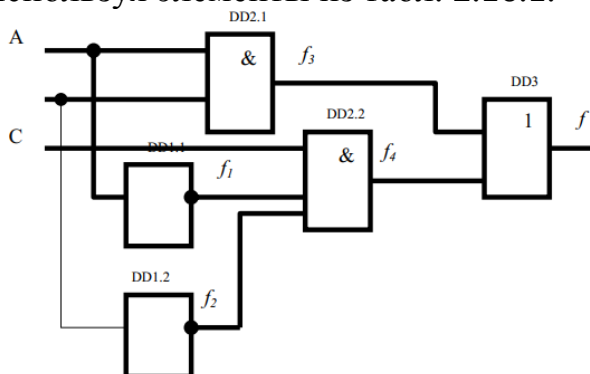


Рис. 2.16.1. Логическая схема в полном базисе {И, ИЛИ, НЕ}

2. Запишем заданную f через операцию «И-НЕ», применив закон двойного отрицания и теорему де Моргана: $f = A \cdot C \vee \overline{A} \cdot B \cdot \overline{C} = \overline{\overline{A \cdot C} \cdot \overline{\overline{A} \cdot B \cdot \overline{C}}}$.

3. По полученному выражению п. 2 построим логическую схему в базисе {И-НЕ}. Разобьем выражение $f = \overline{A \cdot C \cdot \overline{A} \cdot B \cdot \overline{C}}$ на подфункции $f_1 = \overline{A}$, $f_2 = \overline{C}$, $f_3 = \overline{AC}$, $f_4 = \overline{f_1 f_2 B}$, $f = \overline{f_3 f_4}$.

Построим схему, используя элементы «И-НЕ»:

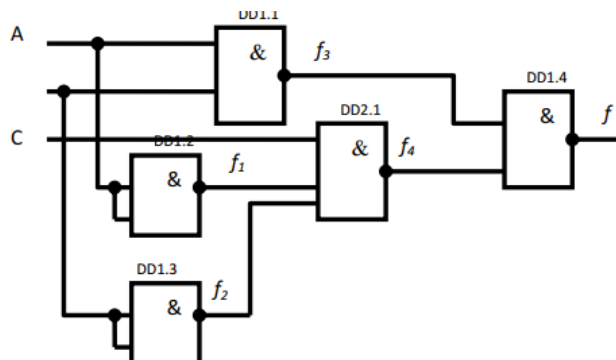


Рис. 2.16.2. Логическая схема в базисе {И-НЕ}

4. Подать на построенные схемы заданный сигнал (табл. 2.16.2, графа 3) $ABC=101$, в результате выходной сигнал двух схем равен сигналу высокого уровня («1»).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данный практикум содержит основные сведения о принципах действия большого числа электронных узлов, выдающих измерительный сигнал различной формы.

Материал собран из различных источников и дан в виде набора лабораторных и практических работ. В каждой работе имеется как теоретические сведения, так и практическое задание, включающее в себя схему подключения для проверки работоспособности электронных блоков. Студентам также предоставляется возможность проявить самостоятельность и творчество, заключающееся в модифицировании предложенной схемы для расширения ее функциональных возможностей.

Практикум необходим студентам направлений 11.03.03 «Конструирование и технология ЭС» и может быть использовано в самостоятельной работе, при подготовке к лабораторным и практическим занятиям. Кроме того, оно подводит студента к более глубокому изучению материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Денисов, Н. П. Электроника и схемотехника: учебное пособие в 2-х частях. / Н. П. Денисов, А.В. Шарапов – Томск, ТМЦ ДО, 2002. – Ч.2. –220 с.
2. Шарапов, А. В. Аналоговая схемотехника: учебное методическое пособие/ А .В. Шарапов, Ю. Н. Тановицкий – Томск: ТМЦДО, 2003. – 60 с.
3. Хоровиц П. Искусство схемотехники: пер. с англ./ П. Хоровиц, У. Хилл – М.: Мир, 1986. – 598 с.
4. Полупроводниковые приборы: Транзисторы. Справочник / под ред. Н. Н. Горюнова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 902 с.
5. ОС ТАСУР 6.1-97. Работы студенческие учебные и выпускные квалификационные. Общие требования и правила оформления.
6. Усатенко, С. Т. Выполнение электрических схем по ЕСКД: справочник. / С. Т. Усатенко, Т. К. Каченюк, М. В. Терехова – М.: Издательство стандартов, 1989. – 325 с.
7. Опадчий, Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника: учебник для вузов. / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкин, А. И. Гуров, под ред. О. П. Глудкина – М.: Радио и связь, 1999. – 768 с.
8. Павлов, В. Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств / В. Н. Павлов, В. Н. Ногин – М. : Горячая линия – Телеком, 2001. – 320 с.
9. Игумнов, Д. В. Полупроводниковые усилительные устройства / Д. В. Игумнов, Г. П. Костюнина – М. : Радио и связь, 1997.
10. Остапенко, Г. С. Усилительные устройства / Г. С. Остапенко. – М. : Радио и связь, 1989.
11. Миловзоров, В. П. Элементы информационных систем / В. П. Миловзоров – М.: Высш. шк., 1983.
12. Ткаченко, Ф. А. Электронные приборы и устройства : учебник для студ. вузов / Ф. А. Ткаченко. – Минск ; М. : Новое знание : ИНФРА-М, 2011. – 682 с.
13. Хандогин, М. С. Электронные приборы: учебное пособие для студ. вузов / М. С. Хандогин, В. Б. Рожанский, С. В. Дробот. – Минск: БГУИР, 2011. – 310 с.
14. Валенко, В. С. Электроника и микросхемотехника / В. С. Валенко, М. С. Хандогин. – Минск: Беларусь, 2000. – 325 с.
15. Гусев, В. Г. Электроника / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев – М.: Высш. шк., 1991. – 622 с.
16. Электронные приборы: лабораторный практикум: учеб.-метод. пособие: в 2 ч. Ч. 1: Активные компоненты полупроводниковой электроники / А. Я. Бельский [и др.]. – Минск : БГУИР, 2011. – 75 с.
17. Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы: справочник / под ред. С. В. Якубовского. – М. : Радио и связь, 1990. – 496 с.
18. Мулявка, Я. Схемы на операционных усилителях с переключаемыми конденсаторами / Я. Мулявка. – М.: Мир, 1992.–205с.: ил.

19. Основы теории цепей: учебник для вузов/ Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – М.: Энергия, 1975. – 752 с.: ил.
20. Основы промышленной электроники: учебник для вузов/ В. Г. Герасимов, О. М. Князьков, А. Е. Краснопольский, В. В. Сухоруков; под ред. В. Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., 1978. – 336 с.: ил.
21. Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы: справочник / А. В. Баюков, А. Б. Гитцевич, А. А. Зайцев и др.; под общ. ред. Н. Н. Горюнова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 744 с.: ил.
22. Марченко, А. Л. Основы электроники: учебное пособие для вузов/ А. Л. Марченко. – М.: ДМК Пресс, 2008.
23. Лачин, В. И. Электроника. / В. И. Лачин, Н. С. Савелов – Ростов на Дону: «Феникс», 2009.
24. Волович, Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств / Г. И. Волович – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2009. – 528 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ.....	4
Лабораторная работа № 1.1. Исследование резисторного каскад предварительного усиления.....	4
Лабораторная работа № 1.2. Исследование усилителей с обратной связью.....	8
Лабораторная работа № 1.3. Исследование усилителя с двухтактным выходным каскадом.....	13
Лабораторная работа № 1.4. Исследование генераторов с базовой, эмиттерной и коллекторной амплитудной модуляциями.....	15
Лабораторная работа № 1.5. Исследование операционного усилителя.....	28
Лабораторная работа № 1.6. Исследование мультивибратора и сумматора на базе операционного усилителя.....	31
Лабораторная работа № 1.7. Исследование интегратора, дифференцирующего и избирательного усилителей.....	34
Лабораторная работа № 1.8. Исследование фильтров нижних и высоких частот на базе операционного усилителя.....	39
Лабораторная работа № 1.9. Исследование схем электронных генераторов. RC – генераторы.....	45
Лабораторная работа № 1.10. Исследование схем генераторов с обратной LC-связью. Генератор Колпитца, генератор Клаппа....	51
Лабораторная работа № 1.11. Исследование транзисторных автогенераторов.....	57
Лабораторная работа № 1.12. Исследование импульсных стабилизаторов напряжения.....	60
Лабораторная работа № 1.13. Исследование цифровых сигналов и портов.....	64
Лабораторная работа № 1.14. Изучение логических элементов на КМОП транзисторах.....	67
Лабораторная работа № 1.15. Исследование преобразователей цифровых сигналов.....	70
Лабораторная работа № 1.16. Исследование аналого-цифровых преобразователей.....	79
2. ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ	84
Практическая работа № 2.1. Расчет усилительного каскада на биполярном транзисторе.....	84
Практическая работа № 2.2. Решение задач по усилительным каскадам на биполярных транзисторах.....	88
Практическая работа № 2.3. Расчёт h- параметров биполярного транзистора.....	92

Практическая работа № 2.4. Расчет оконечного усилительного каскада на биполярном транзисторе.....	96
Практическая работа № 2.5. Расчет усилителя низкой частоты на транзисторе.....	99
Практическая работа № 2.6. Расчет усилителей с частотным разделением каналов.....	101
Практическая работа № 2.7. Расчет усилительного каскада на полевом транзисторе.....	103
Практическая работа № 2.8. Расчет усилителя с последовательной ООС по току.....	105
Практическая работа № 2.9. Расчет генератора постоянного тока....	108
Практическая работа № 2.10 .Анализ усилительного каскада на операционном усилителе.....	111
Практическая работа № 2.11. Решение задач по усилителям.....	114
Практическая работа № 2.12. Решение задач.....	117
Практическая работа № 2.13. Расчет автогенератора.....	121
Практическая работа № 2.14. Решение задач по автогенераторам....	127
Практическая работа № 2.15. Исследование ключа на биполярном транзисторе.....	132
Практическая работа № 2.16. Построение схем комбинационных цифровых устройств (КЦУ) в заданном базисе.....	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	141
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	142

Учебное издание

**Башкиров Алексей Викторович
Турецкий Андрей Владимирович
Хорошайлова Марина Владимировна**

ОСНОВЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЭС

Практикум

В авторской редакции

Подписано к изданию 08.04.2021.

Объем данных 5,0 МБ

**ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»**

394026 Воронеж, Московский просп., 14