

## **1. Общие положения**

Курсовая работа предназначена для более глубокого усвоения теоретического материала курса и приобретения практических навыков анализа и расчета аналоговых и дискретных электронных устройств. Освоение методов моделирования и расчета электронных устройств с применением программного комплекса “Electronics Workbench” (EWB) на ЭВМ. Изучение программного комплекса EWB необходимо для применения современных способов схемотехнического моделирования при расчете электронных устройств.

Курсовая работа включает в себя расчет усилителя низкой частоты, расчет ключевой транзисторной схемы, расчет активного фильтра на операционном усилителе с построением ЛАЧХ и ЛФЧХ, расчет мультивибратора на операционном усилителе, расчет устройств на дискретных элементах комбинационной и последовательной логики. При выполнении заданий кроме ручного расчета, должна использоваться ЭВМ с прикладным программным комплексом EWB.

Для выполнения первого и второго заданий необходимо повторить темы: «Усилительные каскады на базе биполярных транзисторов», «Операционные усилители». Для третьего – «Последовательные структуры», «Структуры комбинационного типа».

Плановая трудоемкость курсовой работы 32 часа, без учета времени изучения и повторения теоретического материала.

Курсовую работу следует выполнять в специальной тетради. В ней необходимо привести условия задачи для заданного варианта и подробные пояснения к ходу решения задачи. Если используются готовые формулы, необходимо указать литературу, из которой они взяты, пояснить, какие величины подставляются в формулу, в каких единицах берется величина и получается конечный результат. Все схемы должны быть выполнены в соответствии с правилами и условными обозначениями, рекомендуемыми ГОСТ и ЕСКД. На графиках необходимо указывать величину масштабов по осям координат, причем масштаб должен быть выбран таким, чтобы легко можно было найти значения промежуточных точек. Все вычисления должны производиться в системе СИ с необходимой степенью точности в каждом конкретном случае.

Использование программы EWB должно быть показано в виде листингов (распечаток из рабочего окна программы или с трансляцией рабочего окна из EWB в текстовый редактор Word в виде рисунка) расчетных задач на формате А4.

## **2. Выбор варианта**

Номера вариантов студент устанавливает по шифру зачетной книжки. Первая цифра варианта должна соответствовать четности (0) или нечетности (1) предпоследней цифры номера зачетной книжки, последняя цифра номера варианта и номера зачетной книжки должны совпадать.

В задаче № 2.1 последняя цифра зачетки соответствует номеру схемы фильтра и номеру варианта.

### 3. Задания курсовой работы

#### Контрольное задание 1

*Задача 1.1. Расчет усилителя низкой частоты на транзисторе.*

Рассчитать параметры схемы усилителя, приведенной на рис.1.

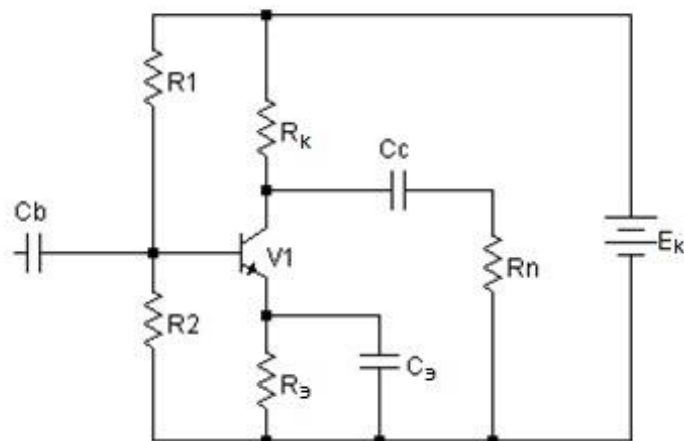


Рис. 1. Схема усилителя низкой частоты

Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.

В результате расчета должны быть определены следующие параметры:

$R_k$ ,  $R_2$ ,  $R_1$ ,  $C_3$ ,  $A^\circ$ ,  $A^c$ ,  $R_{вх}$ ,  $P_c$ ,

где  $A^\circ$  – дифференциальный коэффициент усиления по напряжению без конденсатора  $C_3$ ;

$A^c$  – то же, но с конденсатором  $C_3$ ;

$R_{вх}$  – входное сопротивление усилителя.

Таблица 1

Вариант	Тип транзистора	Проводимость	$h_{21-э}$	$U_Y$ , В	$I_k^\circ$ , мА	$R_э$ , кОм	$E_k$ , В	$f_n$ , кГц	$t^\circ C$	$P_{корп}$ , мВт
00	2Т208Б	npn	80	70	5	0.68	15	2.0	+23°	200
01	2Т301Г	npn	30	100	3.5	1.1	24	5.6	+85°	150
02	2Т312А	npn	70	100	2.5	1.6	2	0.8	+60°	225
03	2Т231А	npn	30	100	1	2.2	12	1.2	-50°	15
04	2Т208Ж	npn	30	70	3.8	1.3	30	9.8	-60°	200
05	2Т326А	npn	60	70	5	0.47	12	7.2	+23°	250
06	2Т377Б	npn	90	100	4	1.2	24	4.6	+85°	50
07	2Т378А	npn	70	100	5	1.1	30	15.2	+60°	50
08	2Т316А	npn	30	100	1.5	1.3	8	1.8	-50°	150

09	2Т372А	nnp	40	100	0.5	4.7	12	2.6	-60°	50
10	2Т382Б	nnp	180	100	1	2.0	8	6.3	+23°	100
11	КТ369А	nnp	90	100	5	1.0	30	1.1	+85°	50
12	КТ354А	nnp	110	100	0.2	9.1	8	3.8	+60°	30
13	КТ318А	nnp	40	100	1	1.8	8	1.4	-50°	15
14	КТ307Б	nnp	40	100	1	1.8	8	2.2	-60°	15
15	КТ104Б	pnp	60	70	2	1.2	12	10.2	+23°	150
16	2Т202В	pnp	0	70	3	1.6	24	9.8	+85°	25
17	2Т203В	pnp	50	70	2	1.3	12	18.2	+60°	150
18	2Т363А	pnp	30	70	1.5	1.8	12	4.1	-50°	150
19	КТ206А	nnp	45	100	3	1.1	15	4.8	-60°	15

По результатам вычисления параметров схемы с использованием программного комплекса EWB выполнить моделирование работы схемы усилителя на ЭВМ. Зафиксировать рабочее окно программы через команду «Edit\Copy as Bitmap» на страницу текстового редактора Word.

*Задача 1.2. Ключевая транзисторная схема для управления RC-цепью.*

В схеме ключа на рис. 2 транзистор находится в состоянии насыщения, конденсатор разряжен. В момент времени  $t_0$  транзистор запирается отрицательным импульсом длительностью  $t_1$ , а затем вновь входит в насыщение. Параметры схемы приведены в табл. 2.

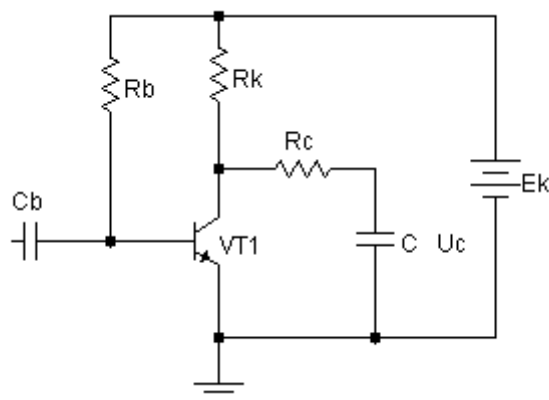


Рис. 2. Схема ключа

Таблица 2

Вариант	$E_k, В$	$R_k, кОм$	$C, мкФ$	$t_1, мс$	$U_{c2}, В$	$R_c, кОм$
00	18	36	2.7	250	1.2	2.7
01	10	75	3.6	220	1.8	12
02	12	47	0.51	15	2.5	4.2
03	24	82	3.3	160	8.35	18
04	16	47	3.6	120	2.1	3.3
05	14	110	1.2	85	3.4	9.1
06	28	68	3.6	210	4.2	11
07	15	56	4.2	215	1.3	4.2
08	30	91	2.4	170	3.1	8.2
09	20	56	3.3	130	0.8	5.1
10	18	33	5.1	210	6.7	2.7
11	10	47	4.7	320	1.8	1.3
12	25	68	10	710	4.2	1.2
13	27	51	3.6	170	8.4	3.3
14	24	82	8.2	560	2.5	4.2
15	20	110	3.6	340	1.8	33
16	30	68	3.3	160	3.5	22
17	15	56	2.4	250	2.9	11
18	28	91	5.1	420	5.2	18
19	14	47	6.8	290	0.56	25

Задание:

1. Написать формулу, в соответствии с которой изменяется напряжение на конденсаторе, когда транзистор не пропускает ток.
2. Найти напряжение на конденсаторе  $U_{c1}$  в момент времени  $t=t_1$ .
3. Написать формулу, в соответствии с которой изменяется напряжение на конденсаторе при  $t \geq t_1$ .
4. Определить время  $t_2 > t_1$ , при котором напряжение на конденсаторе снизится до значения  $U_{c2}$ .
5. Начертить график зависимости напряжения  $U_c$  для интервала времени  $0 \leq t \leq 4t_1$  с изображением входного сигнала.

По результатам вычисления параметров схемы с использованием программного комплекса EWB выполнить моделирование работы ключевой схемы на ЭВМ. Зафиксировать рабочее окно программы через команду «Edit\Copу as Bitmap» на страницу текстового редактора Word.

## Контрольное задание 2

*Задача 2.1. Активный фильтр на операционном усилителе.*

Задание на работу:

1. Для данной принципиальной схемы активного фильтра выведите передаточную функцию и приведите ее к канонической форме. Постройте ЛАЧХ и ЛФЧХ.

2. Определите коэффициент демпфирования  $\xi$ .

3. Определите сопрягающую частоту и амплитуду в децибелах, соответствующую этой частоте.

4. Определите резонансную частоту, амплитуду в децибелах, соответствующую этой частоте и частоту среза.

Если коэффициент демпфирования  $\xi > 1$ , то определите постоянные времени апериодических звеньев, сопрягающие частоты и используйте эти параметры для построения ЛАЧХ и ЛФЧХ.

Обратить внимание на вид частотных характеристик и охарактеризовать тип: фильтр нижних, верхних частот или полосовой.

По результатам вычисления параметров схемы с использованием программного комплекса EWB выполнить моделирование работы схемы фильтра на ЭВМ. Зафиксировать рабочее окно программы через команду «Edit\COPY as Bitmap» на страницу текстового редактора Word.

Варианты схем и их параметры приведены на рис. 2.0-2.9 и табл. 3.

Таблица 3

Вариант	R1, кОм	R2, кОм	R3, кОм	C1, мкФ	C2, мкФ	C3, мкФ	R, кОм	r, кОм
0	3	110	-	2.2	0.27	2.2	-	-
1	8.2	3.6	82	0.22	0.1	-	-	-
2	51	75	-	2.7	0.22	-	-	-
3	3.6	42	-	0.56	0.56	-	-	-
4	36	24	-	2.2	2.2	0.24	-	-
5	7.5	7.5	47	0.27	0.27	-	-	-
6	12	5.1	-	0.056	0.056	0.015	-	-
7	82	22	-	0.18	3.0	-	62	12
8	75	33	27	2.4	0.391	-	-	-
9	33	36	-	0.82	1.5	-	47	24

Варианты электрических схем фильтров (рис. 2.0-2.9)

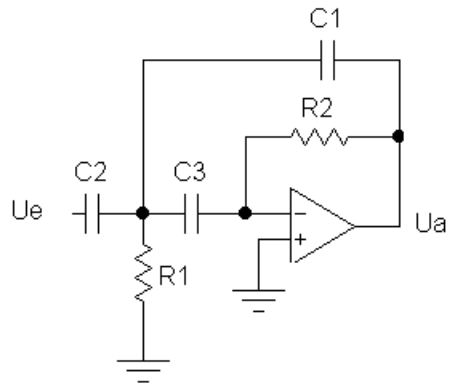


Рис. 2.0

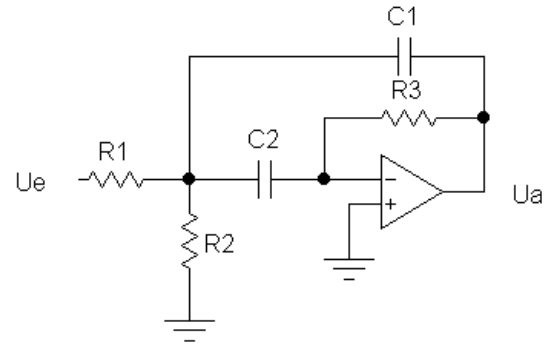


Рис. 2.1

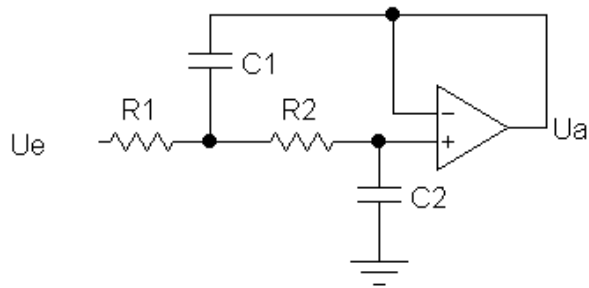


Рис. 2.2

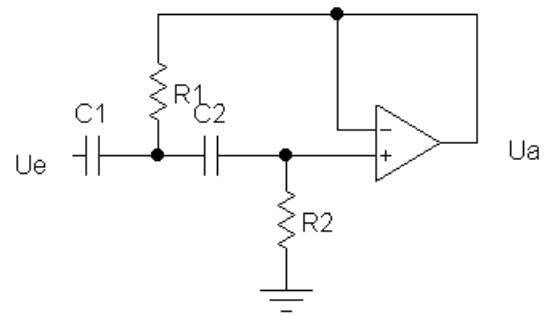


Рис. 2.3

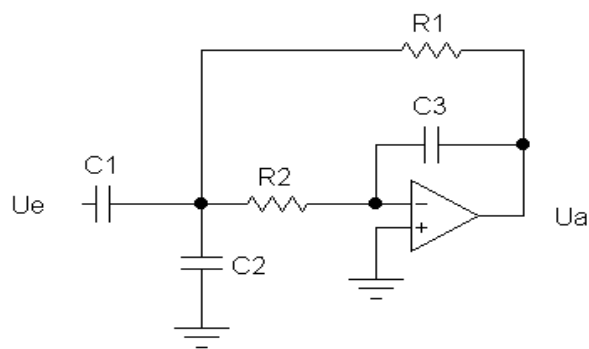


Рис. 2.4

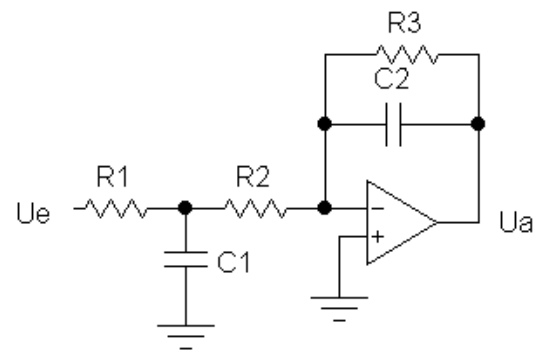
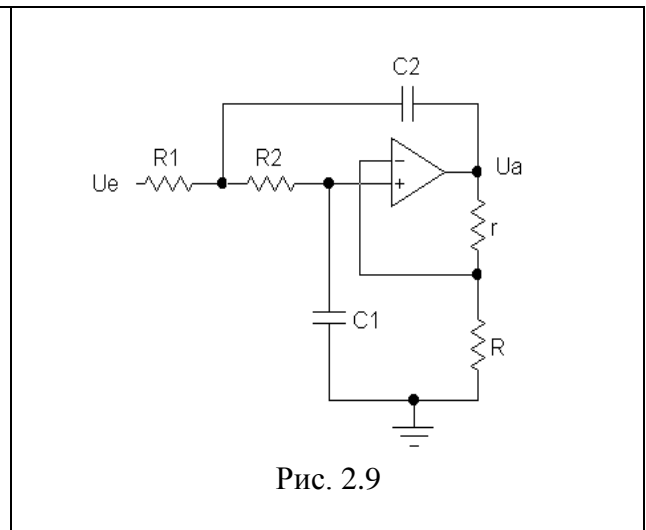
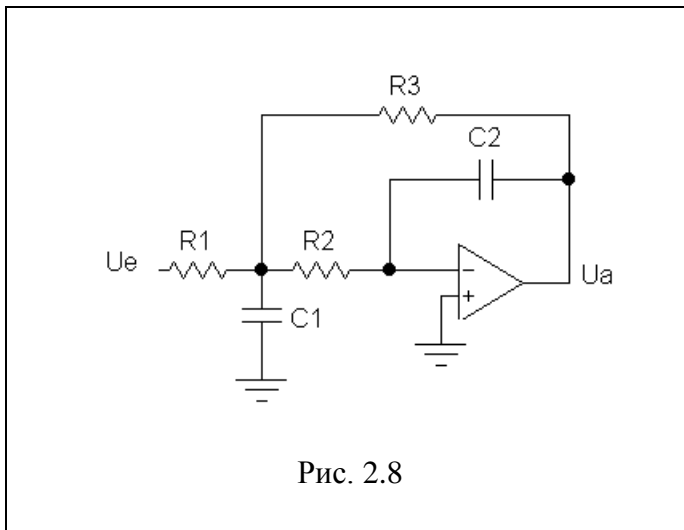
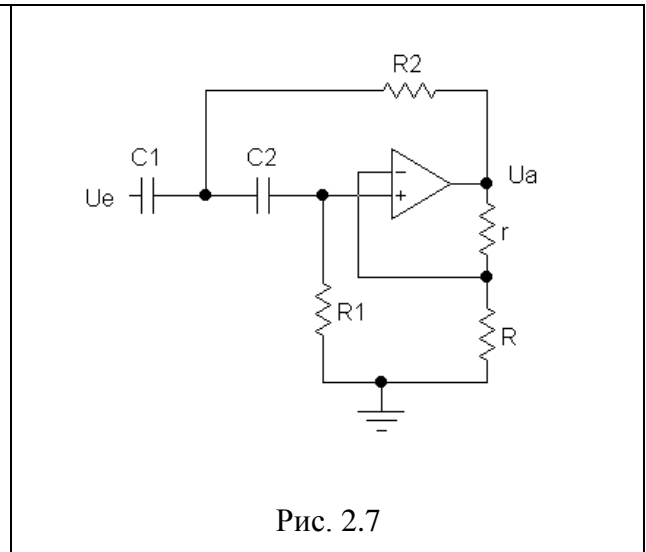
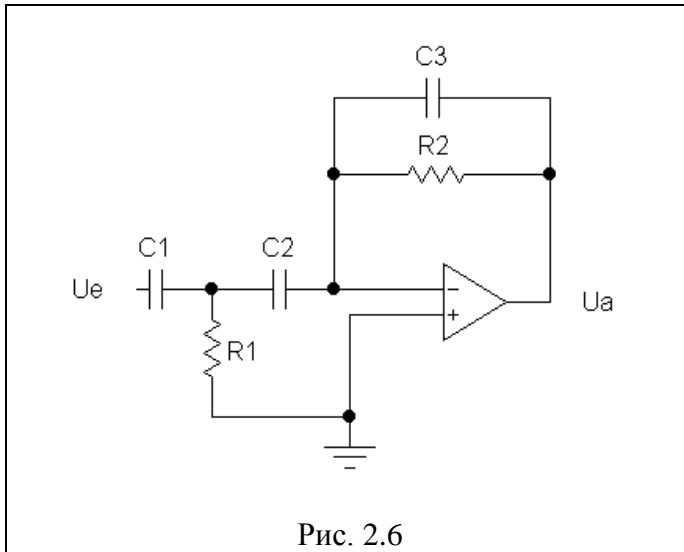


Рис. 2.5



### Задача 2.2. Мультивибратор на операционном усилителе.

Задание на работу.

Для схемы мультивибратора, выполненного на операционном усилителе (рис.3), выполнить:

1. Подберите сопротивление резистора  $R_1$  по 5% стандартному ряду так, чтобы  $U_A = 3 \cdot U_B$ .

2. Подберите емкость конденсатора  $C$  по 5% стандартному ряду так, чтобы получить заданную частоту.

3. Вычислите реально полученную частоту и сравните с заданной.

Данные для расчета различных вариантов выберите из табл. 4.

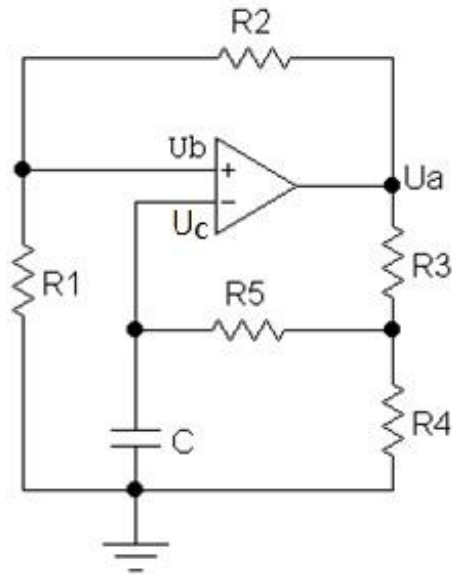


Рис. 3. Схема мультивибратора

По результатам вычисления параметров схемы с использованием программного комплекса EWB выполнить моделирование работы схемы мультивибратора на ЭВМ. Зафиксировать рабочее окно программы.

Таблица 4

Ва-ри-ант	R2, кОм	R3, кОм	R4, кОм	R5, кОм	f, кГц	Ва-ри-ант	R2, кОм	R3, кОм	R4, кОм	R5, кОм	f, кГц
00	3.6	3.6	8.2	36	1.5	10	2.7	3.3	2.4	5.1	0.8
01	24	18	27	51	20	11	3.3	2.7	5.2	9.1	1.1
02	3.9	7.5	22	51	7	12	4.7	5.6	5.1	6.2	8.4
03	7.5	6.8	5.6	12	0.4	13	12	5.1	4.7	9.1	3.5
04	5.2	6.8	18	24	3.2	14	5.6	6.8	5.1	7.5	4.2
05	4.2	3.0	3.9	6.2	1.2	15	4.7	3.9	6.2	4.7	.2
06	16	39	27	42	5.4	16	11	5.6	9.1	10.	1.8
07	5.1	15	12	22	1.4	17	4.7	6.8	7.5	8.2	1.6
08	7.5	2.2	5.1	11	1.8	18	3.9	3.6	5.1	3.9	0.5
09	12	8.2	5.2	16	2.4	19	18	12	22	30	1.0

### Контрольное задание 3

#### Задача 3.1. Дешифратор на элементах И-НЕ, ИЛИ-НЕ.

Вычислить логическую функцию и построить схему дешифратора трех аргументов двоичных переменных (А, В, С), реагирующую на заданный набор переменных (табл. 5).



Таблица 5

№ набора	А	В	С	Значения выходной функции для варианта									
				00	01	02	03	04	05	06	07	08	09
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0
2	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
3	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1
4	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
5	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1
6	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1

По результатам вычисления с использованием программного комплекса EWB выполнить моделирование работы схемы дешифратора на ЭВМ с применением расчетного блока «Logic Converter». Блок «Logic Converter» позволяет по заданному набору получить ПНДФ логической функции, выполнить ее минимизацию и синтезировать логическую схему на заданном типе элементов.

Зафиксировать рабочее окно программы через команду «Edit\Copy as Bitmap» на страницу текстового редактора Word.

*Задача 3.2. Последовательный и параллельный четырехразрядные счетчики на JK-триггерах.*

1. Выполнить расчет управляющих логических функций для параллельного счетчика на JK-триггерах со счетом до заданного числа в соответствии с вариантами (табл. 6) и построить схему счетчика.

Таблица 6

Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Заданное число	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

2. Выполнить расчет управляющих логических функций для последовательного счетчика на JK-триггерах со счетом до заданного числа в соответствии с вариантами (табл. 6) и построить схему счетчика.

3. Выполнить набор схем четырехразрядного последовательного счетчика и параллельного двоично-десятичного счетчика на программном комплексе EWB. С помощью анализатора логических функций «Logic Analyzer» убедиться в правильности набора электрической схемы. Зафиксировать рабочее окно программы через команду «Edit\Copy as Bitmap» на страницу текстового редактора Word.

#### 4. Методические указания к контрольным заданиям

##### Задача 1.1.

Расчет можно производить разными способами, в том числе используя  $h$ -параметры, представив транзистор как четырехполюсник. Сложность этого способа заключается в том, что в справочной литературе значения  $h$ -параметров, как правило, отсутствуют (за исключением  $h_{21-э}$ ) и их приходится определять экспериментально. Так как характеристики транзисторов представляют собой нелинейные функции, то  $h$ -параметры не являются постоянными величинами, что затрудняет расчет. Кроме того, за формализованным подходом при расчете теряется физическая картина процессов, происходящих в полупроводниковых приборах.

Возможно использование методов, в которых не теряется картина физических процессов. В их основе лежит уравнение Эберса-Молла, которое связывает ток коллектора транзистора ( $I_k$ ) с напряжением база-эмиттер ( $U_{бэ}$ ):

$$I_k = I_{э0} \left( e^{\frac{U_{бэ}}{U_T}} + 1 \right), \quad (1)$$

где  $I_{э0}$  – обратный (дрейфовый) ток эмиттерного перехода;

$U_T$  – термический потенциал;

$U_T = K \cdot T / q$ ;

$K = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К (постоянная Больцмана);

$T$  – абсолютная температура;

$q = 1,5 \cdot 10^{-19}$  Кл (заряд электрона).

Для  $t = +23^\circ\text{C}$   $U_T = 25,5$  мВ,

т.к.  $U_{бэ} \gg U_T$  – единицей можно пренебречь, то:

$$I_k = I_{э0} e^{\frac{U_{бэ}}{U_T}}. \quad (2)$$

Следует отметить, что крутизна функции Эберса-Молла в активной зоне работы транзистора пропорциональна крутизне вольт-амперной характеристике эмиттерного перехода. В этом случае ток коллектора пропорционален току базы:

$$\frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} = h_{21} (\beta).$$

Активная зона характеризуется тем, что эмиттерный переход смещен в прямом, а коллекторный переход – в обратном направлении. В режиме отсечки и насыщения эта пропорциональность не соблюдается, коэффициент  $\beta$  резко падает.

Наклон характеристики Эберса-Молла называется крутизной ( $S$ ):

$$S = \frac{dI_k}{dU_{бэ}} = \frac{I_{э0}}{U_T} e^{\frac{U_{бэ}}{U_T}} = \frac{I_k}{U_T}, \text{ т.е.} \\ S = \frac{I_k}{U_T} \quad (3)$$

Таким образом, сделан важный вывод: крутизна пропорциональна коллекторному току и не зависит от индивидуальных свойств транзистора. Для ее определения не требуется измерений.

Расчет входного дифференциального ( $r_{бэ}$ ) и выходного дифференциального ( $r_{кэ}$ ) сопротивлений транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером без снятия статических характеристик:

$$r_{бэ} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_б} \Big|_{r_{кэ}=const} = \frac{\beta}{S}. \quad (4)$$

При рассмотрении выходной характеристики видно, что ее крутизна в активной зоне с увеличением коллекторного тока возрастает. Следовательно, уменьшается сопротивление:

$$r_{кэ} = \frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta I_к} \Big|_{I_б=const} = \frac{U_Y}{I_к}, \quad (5)$$

где  $U_Y$  – напряжение Эрли.

Это напряжение определяется следующим образом:

$$U_Y = \frac{I_к \Delta U_{кэ}}{\Delta I_к} \Big|_{I_б=const}.$$

Коэффициент  $U_Y$  находится в пределах (80÷200)В для pnp и (40÷150)В для npn транзисторов.

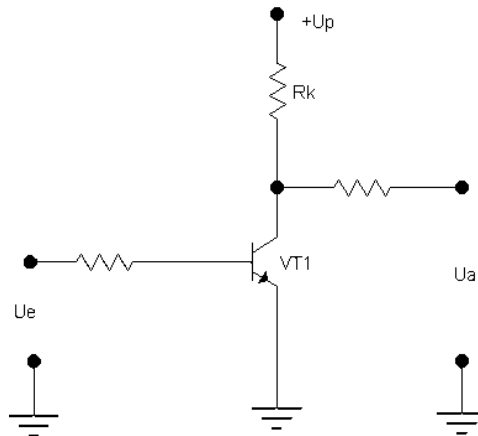


Рис.4. Схема каскада усиления на транзисторе с общим эмиттером

Коэффициент усиления каскада с общим эмиттером (рис. 4) без учета сопротивления нагрузки определяется выражением:

$$A = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_e} = -S(R_k \parallel r_{кэ}). \quad (6)$$

Выходное сопротивление:

$$R_{\text{вых}} = R_k \parallel r_{кэ} \approx R_k.$$

Для повышения температурной стабильности каскада вводится отрицательная обратная связь с помощью резистора  $R_э$  (рис. 5). При этом часть выходного сигнала подается обратно на вход и коэффициент усиления определяется в основном омическими сопротивлениями и практически не зависит от нелинейных параметров транзистора.

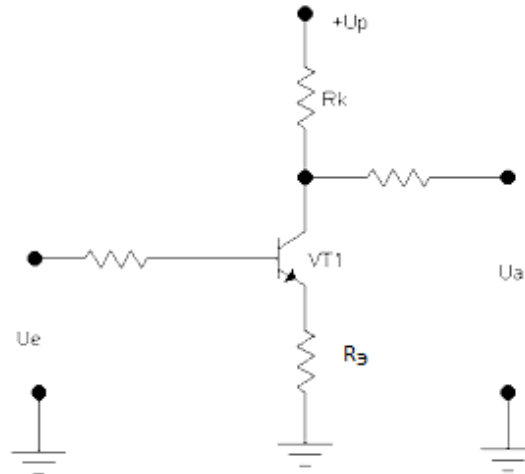


Рис. 5. Усилительный каскад с эмиттерной отрицательной обратной связью

Коэффициент усиления, входное и выходное сопротивления в этом случае определяются следующим образом:

$$A = U_a / U_e = - \frac{R_k}{R_э + 1/S + R_k / (S * r_{кэ})}; \quad (7)$$

$$R_{ex} = r_{бэ} + (\beta + 1) * R_э;$$

$$R_{вх} \approx R_k.$$

Так как  $r_{кэ} \gg R_k$ , то в выражении (7) третьим слагаемым знаменателя можно пренебречь. Значение термического коэффициента  $U_T$  при  $+85^\circ\text{C}$  составляет 30.9 мВ.

Поэтому  $1/S = U_T / I_k \approx 30.9 / I_k$ , Ом, где  $I_k$  – коллекторный ток покоя в мА.

Если  $R_э \gg 30.9 / I_k$  Ом, то коэффициент усиления транзистора по напряжению можно принять равным:

$$A = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_e} \approx \frac{R_k}{R_э}.$$

В этом случае коэффициент усиления каскада на транзисторе не зависит от свойств транзистора, а определяется только соотношением омических сопротивлений  $R_k$  и  $R_э$ .

Порядок расчета:

Находят сопротивление в цепи коллектора  $R_k$ , исходя из того, чтобы в состоянии покоя при токе коллектора  $I_k$  напряжение на коллекторе составило половину напряжения питания источника  $E_k/2$ .

1. Пренебрегая током базы, т.е. полагая, что  $I_k = I_э$ , находят напряжение на эмиттере  $U_э$ .

2. Находят требуемое напряжение на базе  $U_6$  как сумму падения напряжения на резисторе обратной связи в цепи эмиттера  $R_3$  и напряжение база-эмиттер  $U_{63}=0.65\text{В}$ . Напряжение  $U_{63}=0.65\text{В}$  соответствует примерно середине линейного режима транзистора.

3. Ток через делитель  $R_1, R_2$  принимают равным пятикратному току базы ( $5 \cdot I_6$ ) и рассчитывают номиналы резисторов вначале  $R_2$ , а затем  $R_1$ .

4. Выбирают номинал конденсатора  $C_3$  из расчета увеличения дифференциального коэффициента усиления  $A^c$  в 5 раз ( $5 \cdot A^0$ ) и вычисляют его.

5. Рассчитывают входное сопротивление усилителя  $R_{вх}$  как эквивалентное сопротивление параллельно включенных  $R_1, R_2$  и сопротивления между базой и источником  $E_K$ .

Примечание.

Номиналы резисторов и конденсатора  $C_3$  выбирают из стандартного 5% ряда (10, 11, 12, 13, 15, 16, 18, 20, 22, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 43, 47, 51, 56, 62, 68, 75, 82, 91).

6. Рассчитывают мощность  $P_c$ , выделяемую на транзисторе в состоянии покоя, как произведение тока коллектора  $I_K$  и падения напряжения  $U_{КЭ}$  и сравнивают с допустимой.

Пример рабочего окна программы со схемой расчета и измерительными приборами комплекса приведен на рис. 6.

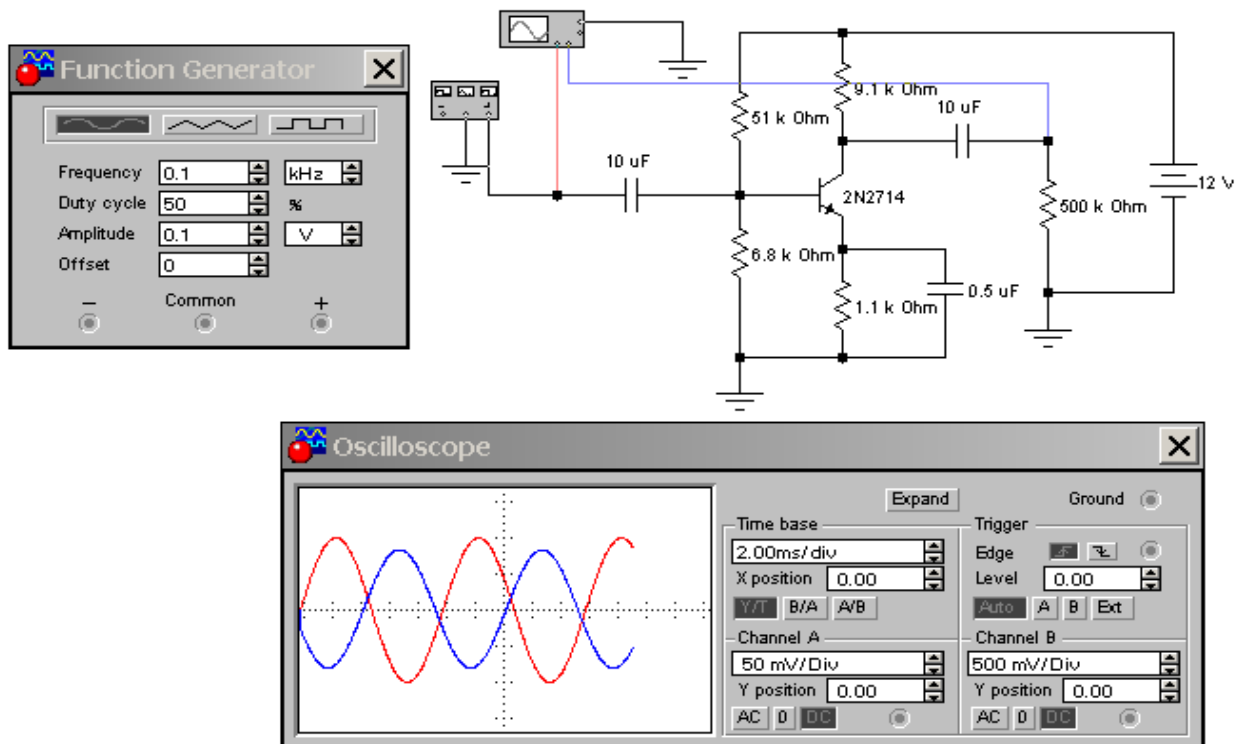


Рис. 6. Модель усилителя

## Задача 1.2.

Пример рабочего окна программы со схемой расчета и измерительными приборами комплекса приведены на рис. 7.

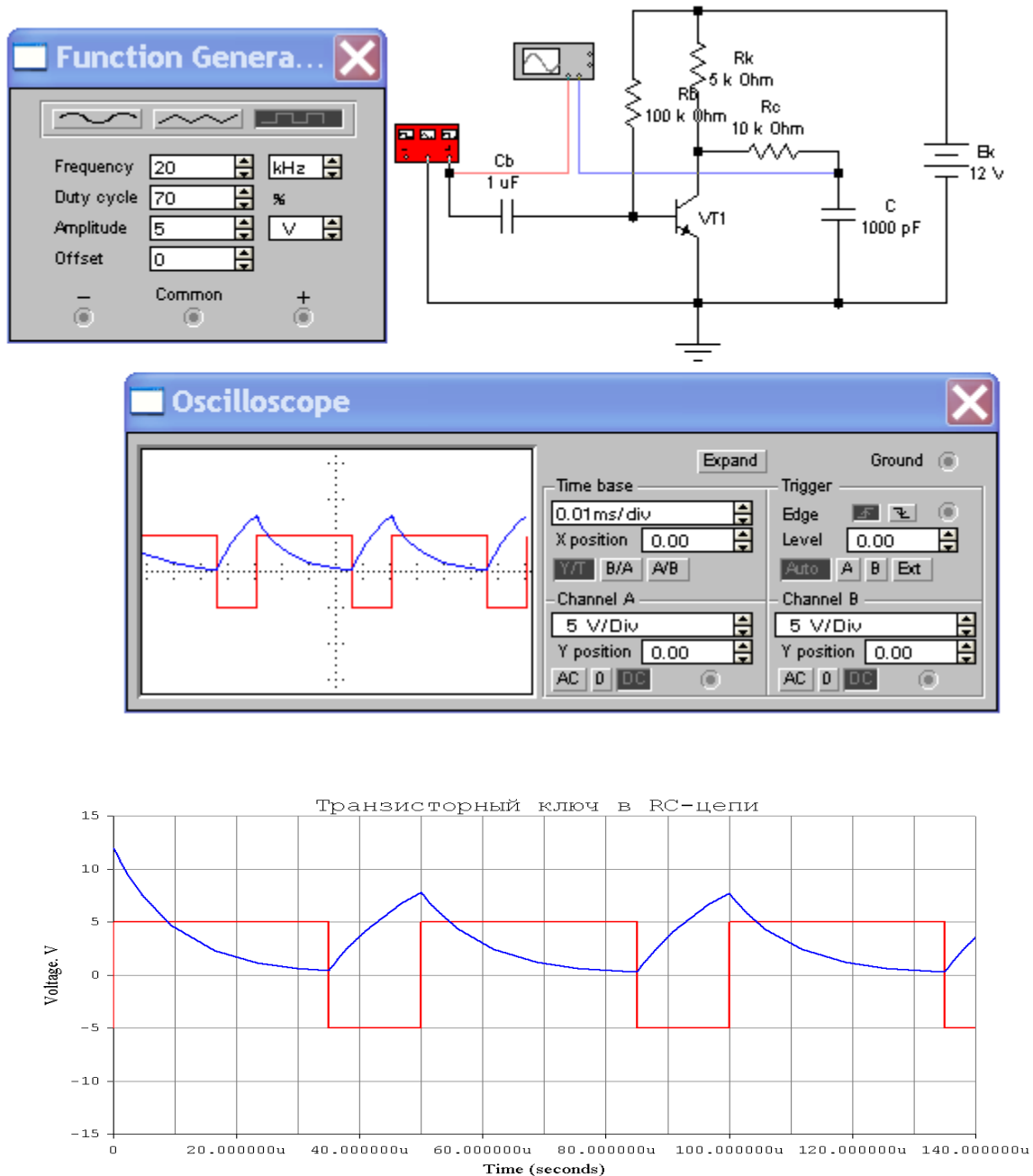


Рис. 7. Электронная схема модели и осциллограмма расчета ключевой транзисторной схемы

## Задача 2.1.

Пассивный RC фильтр дает снижение коэффициента передачи на 20дб/дек. Если необходимо получить более быстрое уменьшение коэффициента передачи, можно включить несколько таких фильтров, однако такой фильтр ослабляет сигнал вследствие наличия делителя напряжения на всех частотах.

Наилучший результат может быть получен, если корни полинома передаточной функции комплексные – сопряженные. Для реализации такого фильтра могут быть использованы *LRC*-фильтры. Однако для низких частот нужны большие индуктивности. Этого недостатка можно избежать, используя *RC*-схемы с активными элементами, например, с операционными усилителями. Такие фильтры не критичны к нагрузке, так как операционные усилители обладают низким выходным сопротивлением.

Активные фильтры могут быть как фильтрами нижних (рис. 2.2; 2.5; 2.8; 2.9), так и фильтрами верхних частот.

Передаточные функции фильтров (рис. 2.0-2.9) представляют собой различные комбинации типовых звеньев.

1. Усилительное звено с коэффициентом усиления  $K=\alpha$ .
2. Дифференцирующее звено 1-го порядка:  $W(p)=T \cdot p$ .
3. Дифференцирующее звено 2-го порядка  $W(p)=T^2 p^2$ , где  $T = \overline{T_1 T_2}$ .
4. Колебательное звено 2-го порядка:

$$W p = \frac{1}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}$$

Следует отметить, что устойчивая работа суммарного звена будет обеспечена при двух условиях:

1. Если порядок полинома числителя передаточной функции не больше порядка полинома знаменателя.
2. Если в передаточной функции будут отсутствовать отрицательные члены.

Получив канонические уравнения этих звеньев, можно не прибегая к частотным преобразованиям строить их логарифмические амплитудно-частотные (ЛАЧХ) и фазочастотные характеристики (ЛФЧХ).

Условия существования колебательного звена определяются видом корней характеристического уравнения.

Корни имеют вид:

$$\lambda_1, \lambda_2 = -\frac{\xi}{T} \pm \frac{1}{T} \frac{1}{\xi^2 - 1}$$

Корни должны быть комплексными сопряженными (коэффициент демпфирования  $\xi < 1$ ). Сопрягающая частота  $\omega_T = 1/T$ ;  $A(\omega_T) = 1/2\xi$ .

Если  $0 < \xi < \overline{0.5}$ , то имеет место резонанс. Резонансная частота:

$$\omega_{рез} = \frac{1}{T} \frac{1}{1 - 2\xi^2}; \quad A \omega_{рез} = \frac{1}{2\xi} \frac{1}{1 - 2\xi^2}$$

Частота среза  $\omega_{ср} = \overline{2} \omega_{рез}$ .

Если корни характеристического уравнения действительные отрицательные ( $\xi > 1$ ), то звено распадается на два апериодических звена. В этом случае знаменатель передаточной функции может быть представлен так:

$$(T_1^a p + 1)(T_2^a p + 1) = (T_1^a T_2^a p^2 + T_1^a + T_2^a p + 1 = T^2 p^2 + 2\xi T p + 1;$$

$$T_1^a T_2^a = T^2;$$

$$(T_1^a = T \xi - \sqrt{\xi^2 - 1} ;$$

$$(T_2^a = T \xi + \sqrt{\xi^2 - 1} ;$$

$$T_1^a + T_2^a = 2\xi T,$$

где  $T_1^a$  и  $T_2^a$  – постоянные времени апериодических звеньев, необходимые для построения ЛАЧХ и ЛФЧХ.

Примеры рабочих окон программ со схемами расчета и измерительными приборами комплекса приведены для фильтров высоких, низких и полосовых частот на рис. 8-11.

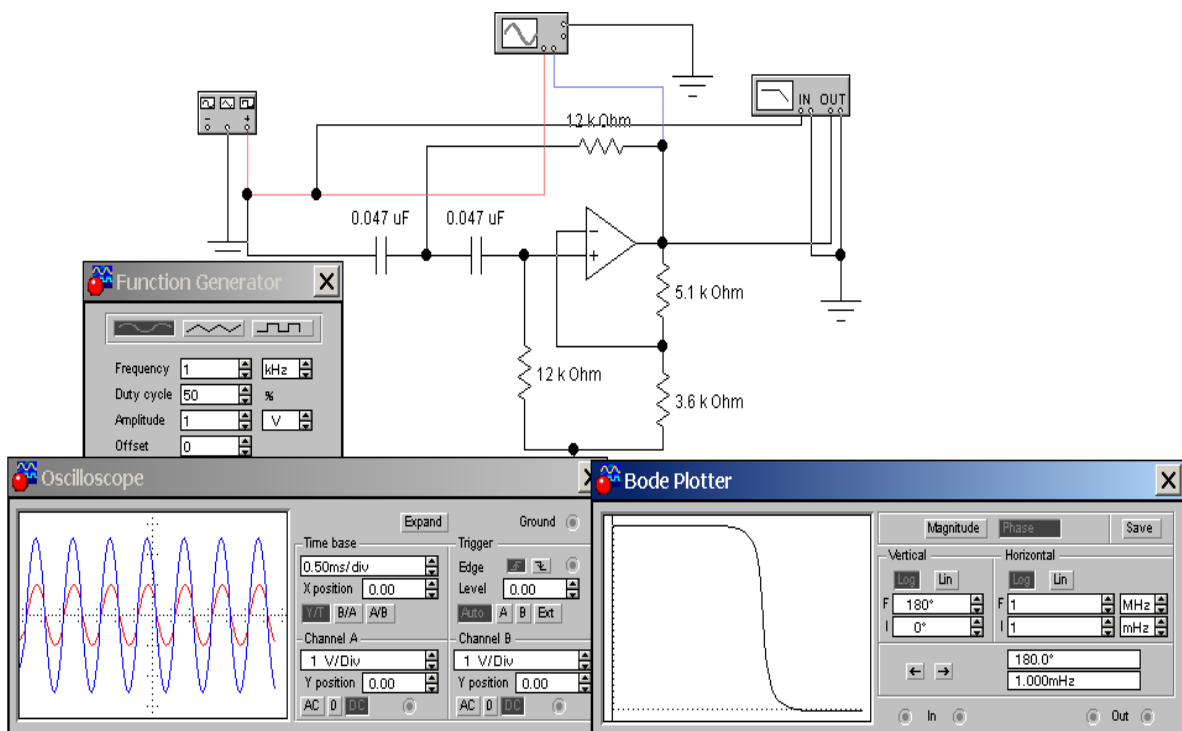


Рис. 8. Схема электронной модели активного фильтра верхних частот



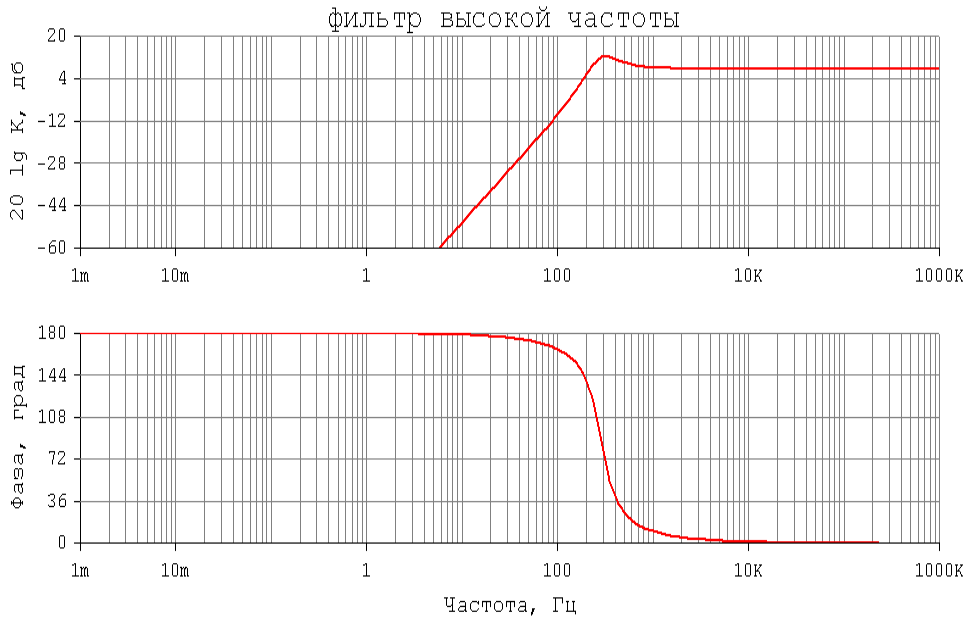


Рис. 9. АФЧХ активного фильтра высоких частот

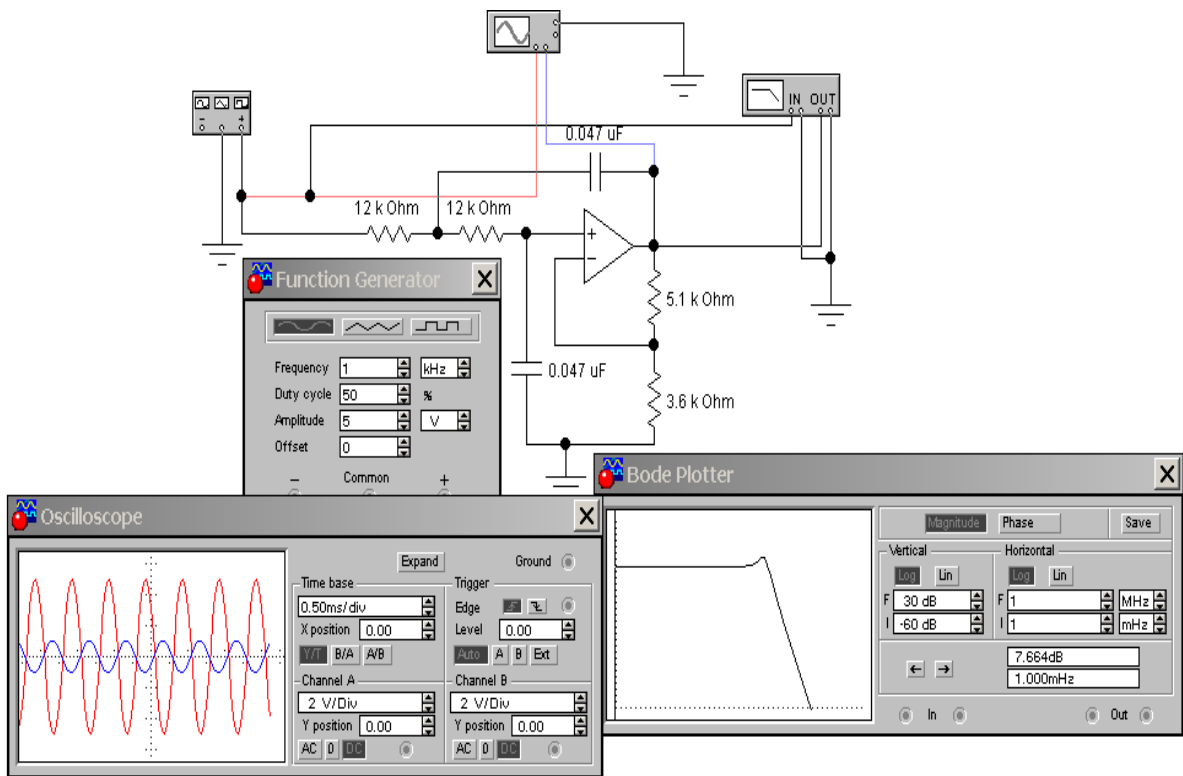


Рис. 10. Схема электронной модели активного фильтра нижних частот

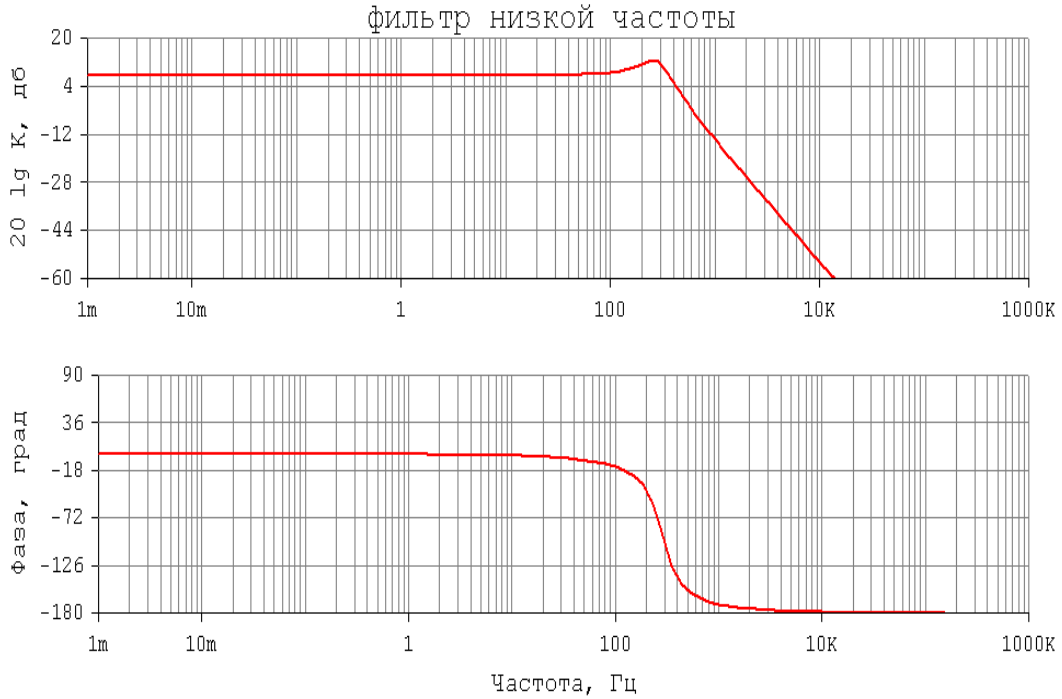


Рис. 11. АФЧХ активного фильтра нижних частот

### Задача 2.2.

Мультивибратор построен на базе операционного усилителя, работающего в режиме компаратора (см. рис. 12, а). Он состоит из инвертирующего триггера Шмитта, охваченного отрицательной обратной связью с помощью интегрирующей RC-цепочки.

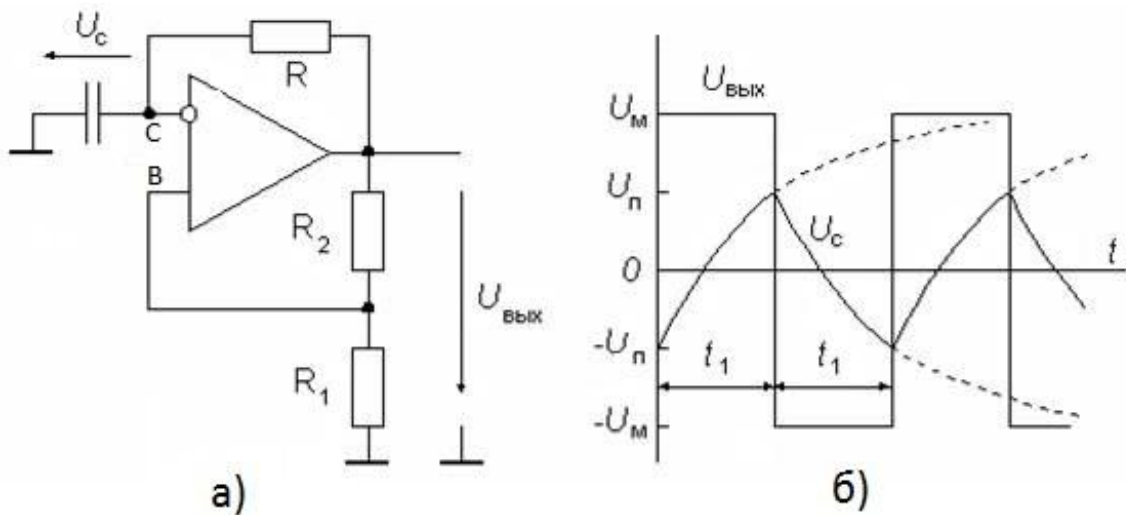


Рис. 12. Схема мультивибратора и диаграмма его работы

Опрокидывание компаратора происходит тогда, когда напряжение на конденсаторе ( $U_c$ ) достигнет уровня напряжения в точке В (напряжения переключения –  $U_{\Pi}$ ). Величина напряжения переключения  $U_{\Pi}$  задается делителем на резисторах  $R_1$ ,  $R_2$  и напряжением насыщения операционного усилителя ( $U_M$ ). В первом приближении напряжение насыщения равно напряжению питания операционного усилителя.

Когда напряжение  $U_c$  достигает величины  $U_{\Pi}$ , схема переключается и ее выходное напряжение скачком принимает противоположное значение. При этом конденсатор начинает перезаряжаться в противоположном направлении, пока его напряжение не достигнет другого порога срабатывания. Схема вновь переключается в первоначальное состояние (рис.12, б).

Анализ схемы мультивибратора позволяет записать дифференциальное уравнение:

$$\frac{dU_c}{dt} = \pm \frac{U_M - U_c}{RC}.$$

При начальных условиях:  $U_c(0) = -U_{\Pi}$  решение этого уравнения имеет вид:

$$U_c(t) = U_M - U_M + U_{\Pi} e^{-\frac{t}{RC}}.$$

Значение напряжения, равное порогу срабатывания триггера Шмитта (условие  $U_c(t) = U_{\Pi}$ ), будет достигнуто спустя время:

$$t_1 = RC \ln \left( 1 + 2 \frac{R_1}{R_2} \right).$$

Таким образом, период колебаний мультивибратора:

$$T = 2t_1 = 2RC \ln \left( 1 + 2 \frac{R_1}{R_2} \right).$$

Как видно из последней формулы, период колебаний мультивибратора не зависит от напряжения  $U_M$ .

Для схемы на рис. 13:  $R = R_{экв} = R_5 + R_3 * R_4 / (R_3 + R_4)$ .

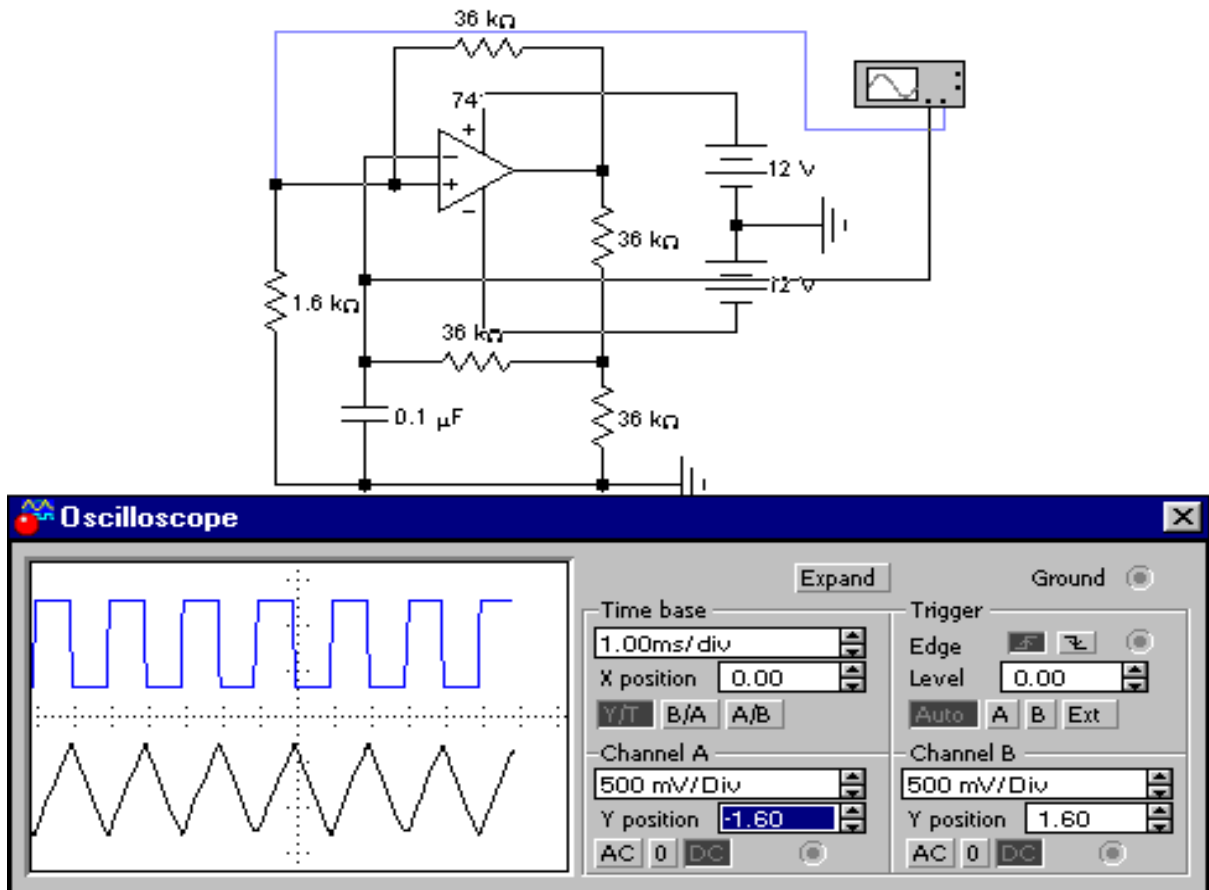


Рис. 13. Схема и осциллограммы для проведения измерений величин напряжений в заданных точках и частоты колебаний мультивибратора

### Задача 3.1.

Пример рабочего окна программы со схемой дешифратора четыре логических переменных A, B, C, D и блоком «Logic Converter» комплекса приведен ниже.

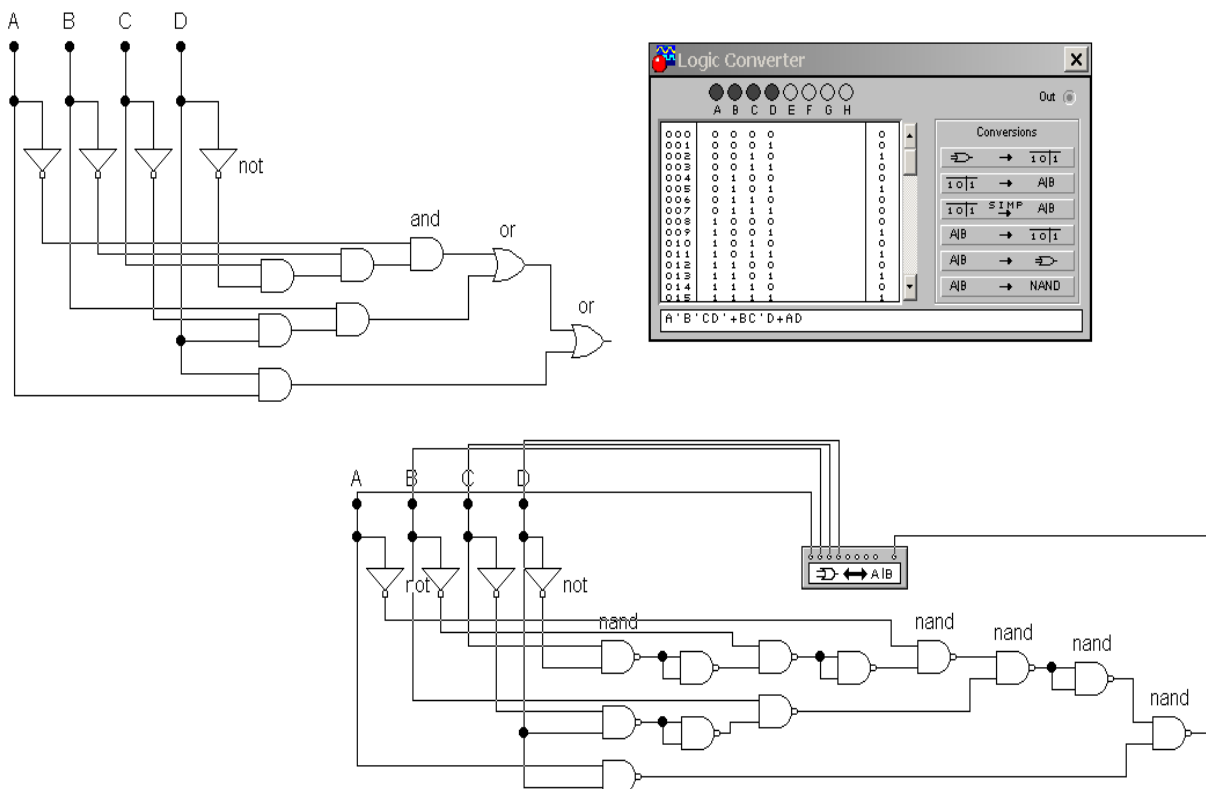


Рис. 14. Схема электронной модели расчета дешифратора

## Задача 3.2.

Пример рабочего окна программы со схемой и анализатором логических функций комплекса приведен ниже.

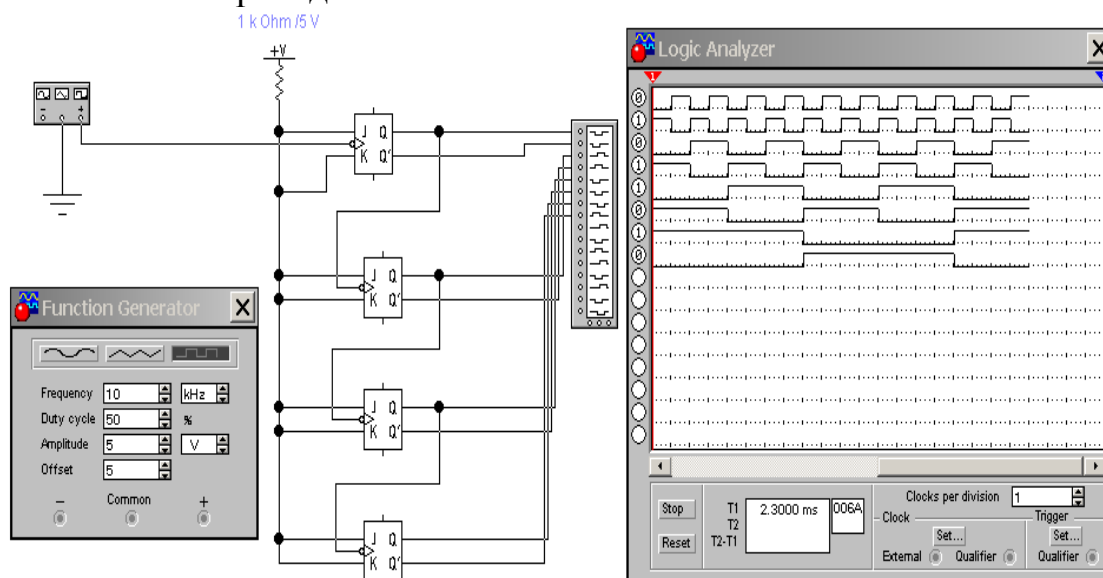


Рис. 15, а. Схема электронной модели последовательного четырехразрядного счетчика на JK-триггерах

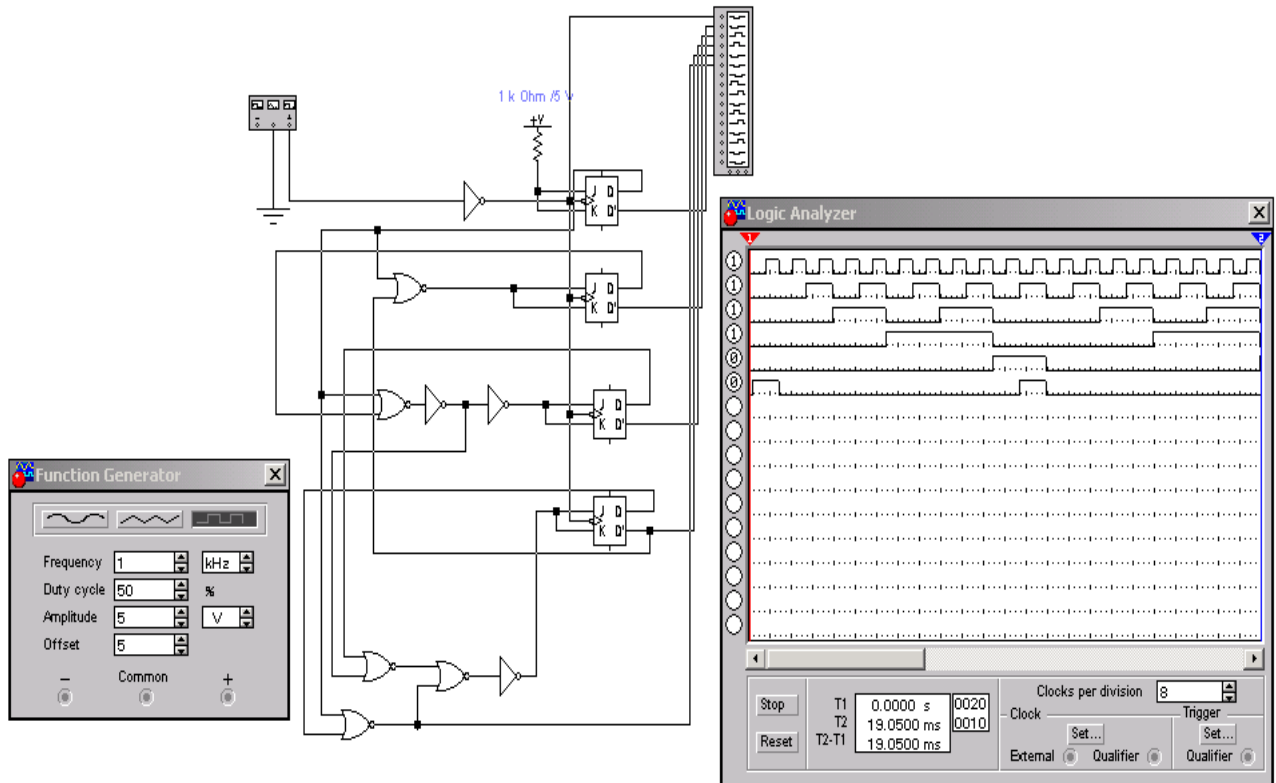


Рис. 15, б. Схема электронной модели параллельного четырехразрядного двоично-десятичного счетчика на JK-триггерах

### Примеры решения задач

1. Расчёт усилителя низкой частоты на транзисторе.

Исходные данные:

Тип транзистора : 2Т382Б; Проводимость :  $n - p - n$ ;  $h_{21-\Omega} = 180$ ;

$U_Y = 100B$ ;  $I_{\kappa}^0 = 1mA$ ;  $R_{\vartheta} = 2k\Omega$ ;  $E_{\kappa} = 8B$ ;  $f_{\text{н}} = 6,3kГц$ ;  $t = +23^{\circ}C$ ;

$P_{\text{кдоп}} = 100mВт$ .

1.1. Находим сопротивление в цепи коллектора  $R_{\kappa}$  из условия, что в состоянии покоя при токе  $I_{\kappa}^0$  напряжение на коллекторе составляет  $\frac{E_{\kappa}}{2}$ , тогда:

$$R_{\kappa} = \frac{E_{\kappa}}{2 \cdot I_{\kappa}^0} = \frac{8}{2 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 4k\Omega.$$

Номинал резистора подбираем из стандартного 5% ряда  $R_{\kappa} = 3,9k\Omega$ .

1.2. Пренебрегаем током базы  $I_{\sigma}$ , т.е.  $I_{\kappa}^0 = I_{\vartheta}$ , находим напряжение на эмиттере:

$$U_{\vartheta} = I_{\kappa}^0 \cdot R_{\vartheta} = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^3 = 2B.$$

1.3. Находим требуемое напряжение на базе  $U_{\delta}$  как сумму падения напряжения на резисторе  $R_3$  и напряжения  $U_{\delta\delta}$ , которое принимаем равным  $0,65B$ , что соответствует примерно середине линейного режима транзистора:

$$U_{\delta} = U_3 + U_{\delta\delta} = 2 + 0,65 = 2,65B .$$

1.4. Находим ток, протекающий через делитель  $R_1, R_2$ , который принимается равным:  $I_{R_1, R_2} = 5 \cdot I_{\delta}$  с учётом того, что  $I_{\delta} = \frac{I_{\kappa}}{\beta}$ , где  $\beta = h_{21-\delta}$  - коэффициент передачи тока базы:

$$I_{R_1, R_2} = \frac{5 \cdot I_{\kappa}^0}{\beta} = \frac{5 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{180} = 0,03mA ,$$

величины сопротивлений равны:

$$R_2 = \frac{U_{\delta}}{I_{R_1, R_2}} = \frac{2,65}{0,03 \cdot 10^{-3}} = 88,33k\Omega ,$$

$$R_1 = \frac{E_{\kappa} - U_{\delta}}{6 \cdot I_{\delta}} = \frac{8 - 2,65}{0,036 \cdot 10^{-3}} = 148,6k\Omega .$$

Номиналы резисторов подбираем из стандартного 5% ряда:

$$R_1 = 150k\Omega \quad R_2 = 91k\Omega$$

1.5. Определяем параметры замещения схемы  $r_{\delta\delta}$ :

$$r_{\delta\delta} = \frac{dU_{\delta\delta}}{dU_{\delta}} = \frac{\beta}{S} = \frac{\beta \cdot U_T}{I_{\kappa}^0} ,$$

где  $U_T$  – термический потенциал и он равен

$$U_T = \frac{k \cdot T}{q} ,$$

где  $K$  – постоянная Больцмана,  $K = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{Дж}{Кл}$ ;

$T$  – абсолютная температура,  $T = 273 + 23 = 296$  К;

$Q$  – заряд электрона,  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} Кл$ ;

$$U_T = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 296}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 25,5mB ;$$

$$r_{\delta\delta} = \frac{180 \cdot 25,5 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} = 4590\Omega ;$$

1.6. Определение входного сопротивления схемы:

а) без учета делителя:  $R'_{\delta x} = \frac{dU_{\delta x}}{di_{\delta x}} = \frac{dU_{\delta x}}{dI_{\delta}} ;$

$$U_{\delta x} = i_{\delta} \cdot r_{\delta\delta} + i_3 \cdot R_3 ;$$

$$I_{\vartheta} = I_{\bar{\vartheta}} + I_{\kappa} = \beta \cdot i_{\bar{\vartheta}} + \frac{I_{\kappa}^0}{1-\alpha} + \frac{U_{\kappa\vartheta}}{r_{\kappa\vartheta(\vartheta)}} + i_{\bar{\vartheta}}, \text{ но } \frac{I_{\kappa}^0}{1-\alpha} + \frac{U_{\kappa\vartheta}}{r_{\kappa\vartheta(\vartheta)}} \approx 0,$$

где  $\alpha$  – коэффициент передачи тока эмиттера, следовательно

$$I_{\vartheta} = I_{\bar{\vartheta}} \cdot (1 + \beta);$$

$$U_{\vartheta x} = i_{\bar{\vartheta}} \cdot R_{\bar{\vartheta}\vartheta} + (1 + \beta) \cdot R_{\vartheta\vartheta};$$

$$R'_{\vartheta x} = R_{\bar{\vartheta}\vartheta} + (1 + \beta) \cdot R_{\vartheta\vartheta} = 4590 + (1 + 180) \cdot 2000 = 366,6 \text{ кОм};$$

б) эквивалентное сопротивление делителя:

$$R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{150 \cdot 91}{150 + 91} = 56,6 \text{ кОм};$$

в) входное сопротивление схемы с учётом сопротивления делителя (без учета  $C_{\vartheta}$ ):

$$R_{\vartheta x} = \frac{R_{12} \cdot R'_{\vartheta x}}{R_{12} + R'_{\vartheta x}} = \frac{56,6 \cdot 366,6}{56,6 + 366,6} = 49,03 \text{ кОм}.$$

1.7. Коэффициент усиления:

$$K_U = \frac{dU_{\vartheta \text{ вых}}}{dU_{\vartheta x}}.$$

Составим и решим исходные уравнения для схемы замещения:

$$1) \text{ ток коллектора } dI_k = S \cdot dU_{\bar{\vartheta}\vartheta} + \frac{dU_{\kappa\vartheta}}{R_{\kappa\vartheta}};$$

$$2) dU_{\bar{\vartheta}\vartheta} = dU_{\vartheta x} - dU_{\vartheta};$$

$$3) dU_{\kappa\vartheta} = dU_{\vartheta \text{ вых}} - dU_{\vartheta};$$

$$4) dU_{\vartheta \text{ вых}} = -R_k \cdot dI_k;$$

$$5) dU_{\vartheta} \approx R_{\vartheta} \cdot dI_k.$$

Откуда

$$K_U = \frac{-R_k \cdot dI_k}{dI_k \left( \frac{1}{S} + R_{\vartheta} + \frac{R_k}{r_{\kappa\vartheta} S} \right)} = \frac{-R_k \cdot S}{1 + R_{\vartheta} \cdot S + \frac{R_k}{r_{\kappa\vartheta}}} \approx -\frac{R_k}{R_{\vartheta}}, \text{ так как } \frac{1}{S} \approx 0 \text{ и } \frac{R_k}{r_{\kappa\vartheta} S} \approx 0.$$

Дифференциальный коэффициент усиления по напряжению будет равен

а) без конденсатора:

$$A^0 \approx \frac{R_k}{R_{\vartheta}} = \frac{3,9 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^3} = 1,95;$$

б) с конденсатором  $C_{\vartheta}$ :

$$A_0^C = \frac{R_k}{R_{\vartheta} \cdot X_c} \cdot \frac{R_{\vartheta} + X_c}{1}.$$

По условию

$$\frac{X_c \cdot R_{\vartheta}}{X_c + R_{\vartheta}} = \frac{R_{\vartheta}}{5},$$



$$\text{откуда, } X_c = \frac{R_3}{4}, X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot C_3},$$

следовательно:

$$C_3 = \frac{2}{\pi \cdot f_n \cdot R_3} = \frac{2}{3,14 \cdot 6,3 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^3} = 0,051 \text{ мкФ}.$$

Номинал конденсатора в цепи эмиттера подбираем из стандартного 5% ряда:

$$C_3 = 0,051 \text{ мкФ};$$

$$A_0^c = \frac{4200}{496 \cdot 2000} \cdot 2496 = 10,6.$$

1.8. Входное сопротивление каскада:

а) с учётом сопротивления конденсатора  $C_3$ :

$$R'_3 = \frac{R_3 \cdot X_c}{R_3 + X_c} = \frac{2000 \cdot 496}{2000 + 496} = 397 \text{ Ом};$$

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot C_3} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 6,3 \cdot 10^3 \cdot 0,051 \cdot 10^{-6}} = 496 \text{ Ом};$$

б) без учёта входного сопротивления делителя:

$$R''_{ex} = R_{б3} + (1 + \beta) \cdot R'_3 = 4590 + (1 + 180) \cdot 397 = 76,5 \text{ кОм}.$$

в) с учётом  $R_1$  и  $R_2$ :

$$R'_{ex} = \frac{R_{12} \cdot R''_{ex}}{R_{12} + R''_{ex}} = \frac{56,6 \cdot 76,5}{56,6 + 76,5} = 30,2 \text{ кОм}.$$

1.9. Рассчитываем мощность, выделяемую на транзисторе в состоянии покоя:

$$P_k = U_{кэ} \cdot I_k^0 = (E - (R_k \cdot I_k^0 + R_3 \cdot I_k^0)) \cdot I_k^0 = 10^{-3} \cdot (8 - 10^{-3} (4200 + 2000)) = 1,8 \text{ мВт}.$$

Полученное значение мощности меньше допустимого  $P_{кдоп} = 100 \text{ мВт}$ , что удовлетворяет требованию.

2. Ключевая транзисторная схема для управления RC - цепью.

Исходные данные:

$$E_k = 10 \text{ В}; \quad R_k = 47 \text{ кОм}; \quad C = 4,7 \text{ мкФ}; \quad t_1 = 320 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad U_{C_2} = 1,8 \text{ В};$$

$$R_C = 1,3 \text{ кОм}.$$

2.1. Формула, в соответствии с которой изменяется напряжение на конденсаторе, когда транзистор не пропускает ток (конденсатор заряжается):

$$U_C = E_k - E_k \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где  $\tau = (R_k + R_C) \cdot C$  – постоянная времени;

$t$  – текущее время.

2.2. Напряжение на конденсаторе  $U_{C_1}$  в момент времени  $t = t_1$ :

$$U_{C_1} = E_{\kappa} - E_{\kappa} \cdot e^{-\frac{t_1}{(R_{\kappa} + R_C) \cdot C}} = 10 - 10 \cdot e^{-\frac{320 \cdot 10^{-3}}{(47 \cdot 10^3 + 1,3 \cdot 10^3) \cdot 4,7 \cdot 10^{-6}}} = 7,3B.$$

2.3. Формула, в соответствии с которой изменяется напряжение на конденсаторе при  $t \geq t_1$  (конденсатор разряжается):

$$U_C = U_{C_1} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где  $\tau = R_C \cdot C$  – постоянная времени;

$t$  – текущее время.

2.4. Время  $t_2 > t_1$ , при котором напряжение на конденсаторе снизится до значения  $U_{C_2}$ :

$$U_{C_2} = U_{C_1} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{R_C \cdot C}};$$

$$\frac{U_{C_2}}{U_{C_1}} = e^{-\frac{\Delta t}{R_C \cdot C}};$$

$$\ln \frac{U_{C_2}}{U_{C_1}} = -\frac{\Delta t}{R_C \cdot C};$$

откуда:

$$\Delta t = -R_C \cdot C \cdot \ln \frac{U_{C_2}}{U_{C_1}} = -1,3 \cdot 10^3 \cdot 4,7 \cdot 10^{-6} \cdot \ln \frac{1,3}{7,53} = 8,745 \cdot 10^{-3} c;$$

$$t_2 = t_1 + \Delta t = 320 \cdot 10^{-3} + 8,745 \cdot 10^{-3} = 328,7 \text{ мс}.$$

2.5. Для построения графика зависимости напряжения  $U_C$  для интервала времени  $0 \leq t \leq 4t_1$  с изображением входного сигнала составим табл. 7:

Таблица 7

Интервал времени	Состояние транзистора	Значение напряжения
$t < 0$	Открыт	$U_C = 0B$
$0 \leq t \leq t_1$	Закрит	$U_C = E_{\kappa} - E_{\kappa} \cdot e^{-\frac{t}{(R_{\kappa} + R_C) \cdot C}}$
$t_1 \leq t \leq 4t_1$	Открыт	$U_C = U_{C_1} \cdot e^{-\frac{t}{R_C \cdot C}}$

Значение напряжения  $U_C$  в момент времени  $t = 4t_1$ :

$$U_C = U_{C_1} \cdot e^{-\frac{4t_1}{R_C \cdot C}} = 7,53 \cdot e^{-\frac{4 \cdot 320 \cdot 10^{-3}}{1,3 \cdot 10^3 \cdot 4,7 \cdot 10^{-6}}} = 7,87 \cdot 10^{-91} B \approx 0.$$

График изменения напряжения на конденсаторе приведен на рис. 16.

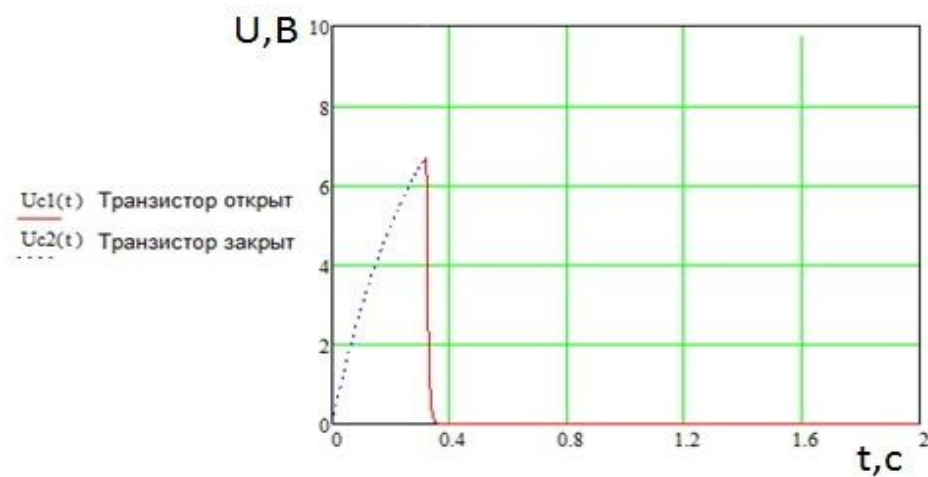


Рис.16. Напряжение на конденсаторе

3.Активный фильтр на операционном усилителе.

Исходные данные:  $R_1 = 8.2 \text{ кОм}$ ;  $R_2 = 3.6 \text{ кОм}$ ;  $R_3 = 82 \text{ кОм}$ ;  $C_1 = 0.22 \text{ мкФ}$ ;  $C_2 = 0.1 \text{ мкФ}$ . Схема приведена на рис. 17.

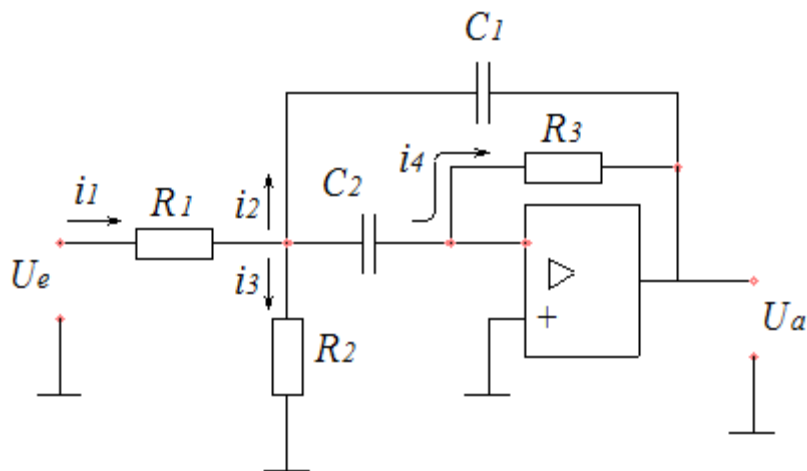


Рис. 17. Схема активного фильтра верхних частот

3.1. Выведем передаточную функцию для данной схемы активного фильтра и приведем ее к канонической форме. Для этого составим систему уравнений

по законам Кирхгофа:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1 = i_2 + i_3 + i_4 \\ Ua = -i_4 \cdot R_3 \\ Ue = i_1 \cdot R_1 + i_4 \cdot \frac{1}{C_2 \cdot p} \\ i_4 \cdot \frac{1}{C_2 \cdot p} = i_3 \cdot R_2 \\ Ua = i_3 \cdot R_2 - i_2 \cdot \frac{1}{C_1 \cdot p} \end{array} \right.$$

Отсюда:

$$\begin{aligned} i_4 &= -\frac{Ua}{R_3}; \\ i_1 &= \frac{Ue - i_4 \cdot \frac{1}{C_2 \cdot p}}{R_1} = \frac{Ue}{R_1} + \frac{Ua}{R_1 \cdot R_3 \cdot C_2 \cdot p}; \\ i_3 &= i_4 \cdot \frac{1}{R_2 \cdot C_2 \cdot p} = -\frac{Ua}{R_2 \cdot R_3 \cdot C_2 \cdot p}; \\ i_2 &= i_3 \cdot R_2 - Ua \cdot C_1 \cdot p = -Ua \cdot \left( \frac{C_1}{R_3 \cdot C_2} + C_1 \cdot p \right). \end{aligned}$$

Из 1-го закона Кирхгофа получаем:

$$\frac{Ue}{R_1} + \frac{Ua}{R_1 \cdot R_3 \cdot C_2 \cdot p} = -Ua \cdot \left( \frac{C_1}{R_3 \cdot C_2} + C_1 \cdot p \right) - \frac{Ua}{R_2 \cdot R_3 \cdot C_2 \cdot p} - \frac{Ua}{R_3};$$

$$\frac{Ua}{Ue} = \frac{R_2 \cdot R_3 \cdot C_2 \cdot p}{-R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot p^2 - R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot p - R_1 \cdot R_2 \cdot C_2 \cdot p - R_1 - R_2}.$$

Передаточная функция в канонической форме:

$$W(p) = \frac{Ua}{Ue} = -\frac{\frac{R_2 \cdot R_3 \cdot C_2 \cdot p}{R_1 + R_2}}{\frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot p^2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot (C_1 + C_2 \cdot p) + 1}{R_1 + R_2}}.$$

3.2. Определим коэффициент демпфирования  $\xi$  и постоянную времени  $T$ :

$$\frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_1 \cdot C_2}{R_1 + R_2} = T^2; \quad T = \sqrt{\frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot C_1 \cdot C_2}{R_1 + R_2}};$$

$$T = \sqrt{\frac{8.2 \cdot 10^3 \cdot 3.6 \cdot 10^3 \cdot 82 \cdot 10^3 \cdot 0.22 \cdot 10^{-6} \cdot 0.1 \cdot 10^{-6}}{8.2 \cdot 10^3 + 3.6 \cdot 10^3}} = 0.002 \text{ c};$$

$$2 \cdot \xi \cdot T = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot (C_1 + C_2); \quad \xi = \frac{R_1 \cdot R_2}{2 \cdot T \cdot (R_1 + R_2)} \cdot (C_1 + C_2);$$

$$\xi = \frac{8.2 \cdot 10^3 \cdot 3.6 \cdot 10^3}{2 \cdot 2.124 \cdot 10^{-3} \cdot (8.2 \cdot 10^3 + 3.6 \cdot 10^3)} \cdot (0.22 \cdot 10^{-6} + 0.1 \cdot 10^{-6}) = 0.188.$$

3.3. Определим сопрягающую частоту и амплитуду в децибелах, соответствующую этой частоте. Т.к.  $\xi < 1$ , то сопрягающая частота  $\omega_T = 1/T$ , амплитуда  $A(\omega_T) = 1/2\xi$ :

$$\omega_T = \frac{1}{2.124 \cdot 10^{-3}} = 470.81 \text{ c}^{-1};$$

$$A(\omega_T) = \frac{1}{2 \cdot 0.188} = 2.66 \text{ дБ}.$$

3.4. Т.к. в нашем случае  $0 < \xi < \sqrt{0.5}$ , то имеет место резонанс. Определим резонансную частоту, амплитуду в децибелах, соответствующую этой частоте, и частоту среза:

$$\omega_{PE3} = \frac{1}{T \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \xi^2}} = \frac{1}{2.124 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot 0.188^2}} = 488.39 \text{ c}^{-1};$$

$$A(\omega_{PE3}) = \frac{1}{2 \cdot \xi \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \xi^2}} = \frac{1}{2 \cdot 0.188 \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot 0.188^2}} = 2.76 \text{ дБ};$$

$$\omega_{CP} = \sqrt{2} \cdot \omega_{PE3} = \sqrt{2} \cdot 488.39 = 690.69 \text{ c}^{-1}.$$

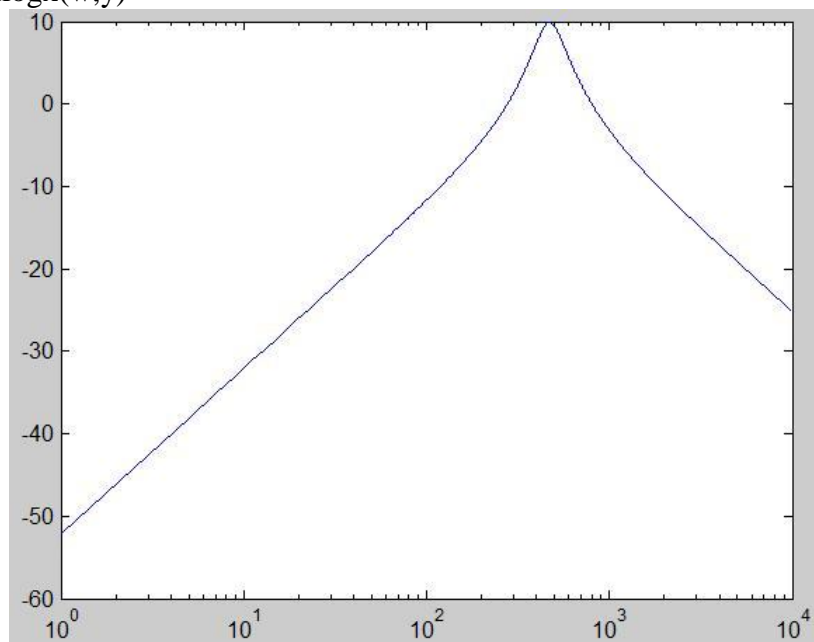
Расчет ЛАЧХ и ЛФЧХ по полученной передаточной функции выполнен в среде Matlab и представлен на рис. 18, 19.

Расчет ЛАЧХ (матлаб):

```
w=1:2:10000;
```

```
y=20*log10((w.*0.002502)./sqrt((1-(w.^2).*4.513*10.^-6).^2+(w.*0.8005*10.^-3).^2));
```

```
semilogx(w,y)
```



$\omega$  (рад/с)

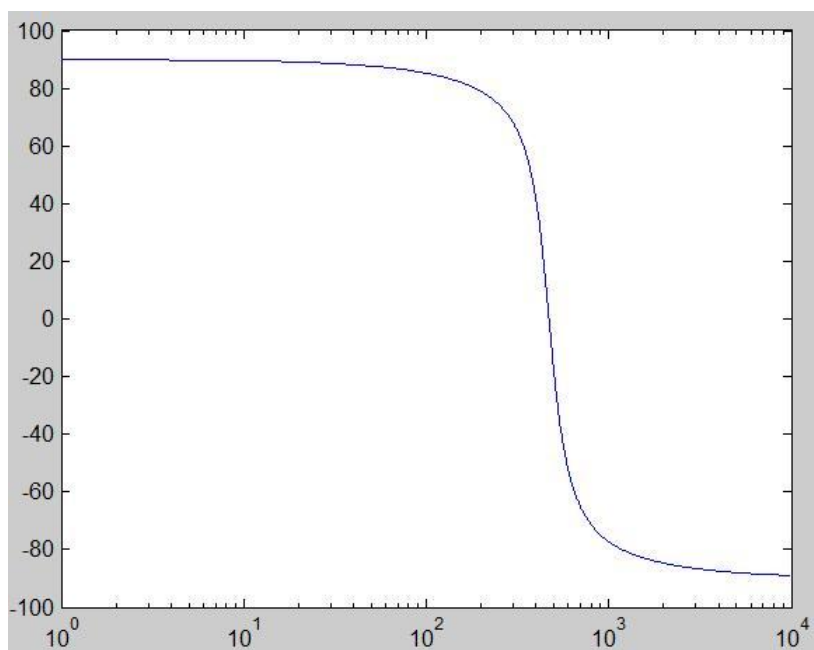
Рис. 18. ЛАЧХ фильтра

Расчет ЛФЧХ (матлаб):

```
w=1:2:10000;
```

```
y=atan((1-w.^2.*4.513.*10.^-6)./(w.*0.8005.*10.^-3));
```

```
semilogx(w,y)
```



$\omega$  (рад/с)

Рис. 19. ЛФЧХ фильтра

#### 4. Мультивибратор на операционном усилителе.

Исходные данные:

$$R_2 = 3.3 \text{ кОм}; R_3 = 2.7 \text{ кОм}; R_4 = 5.2 \text{ кОм}; R_5 = 9.1 \text{ кОм}; f_{зад} = 1.1 \text{ кГц}.$$

4.1. Сопротивление резистора  $R_1$  определяем из соотношения  $U_A = 3 \cdot U_B$ , а

т.к.:

$$U_a = 3 \cdot U_a \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \Rightarrow R_1 = \frac{1}{2} \cdot R_2 = 0.5 \cdot 3.3 = 1.65 \text{ кОм}.$$

Номинал сопротивления резистора  $R_1$  подбираем из стандартного 5% ряда:

$$R_1 = 1.6 \text{ кОм}.$$

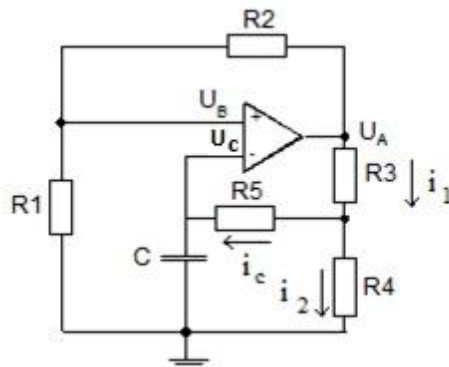


Рис. 20. Схема мультивибратора

4.2. Зададимся направлением токов (рис. 20) и составим исходные уравнения.

Получим расчетное выражение для напряжения на конденсаторе:

$$\begin{aligned} E &= U_a; \\ E &= i_1 \cdot R_3 + i_2 \cdot R_4; \\ i_2 &= i_1 - i_c; \\ E &= i_1 \cdot R_3 + i_c \cdot R_5 + U_c. \end{aligned}$$

Откуда получаем:

$$\begin{aligned} \frac{E \cdot R_4}{R_3 + R_4} &= \left[ \frac{R_4 \cdot R_3}{R_3 + R_4} + R_5 \right] C \frac{dU_c}{dt} + U_c, a \\ \frac{R_4 \cdot R_3}{R_3 + R_4} + R_5 &= R_{экв}. \end{aligned}$$

Решение дифференциального уравнения в общем виде:

$$U_c = U_{cy} + U_{c_{ce}}$$

$$\text{при } t \rightarrow \infty, \frac{dU_c}{dt} = 0.$$

$$U_{cy} = \frac{E \cdot R_4}{R_3 + R_4};$$

$$R_{\text{экв}} \cdot C \cdot \frac{dU_{c_{св}}}{dt} + U_{c_{св}} = 0;$$

$$U_{c_{св}} = A \cdot e^{pt}$$

$$A \cdot e^{pt} \cdot \left( \frac{1}{R_{\text{экв}} \cdot C} + p \right) = 0;$$

$$p = -\frac{1}{R_{\text{экв}} \cdot C}; R_{\text{экв}} \cdot C = \tau;$$

$$U_{c_{св}} = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}};$$

$$U_c = \frac{E \cdot R_4}{R_3 + R_4} + A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Постоянную интегрирования  $A$  находим из начальных условий:

$$U_c(-0) = U_c(+0) = -U_b = -\frac{E \cdot R_1}{R_1 + R_2};$$

$$U_c(0) = \frac{E \cdot R_4}{R_3 + R_4} + A \cdot e^{-\frac{0}{\tau}} = -\frac{E \cdot R_1}{R_1 + R_2};$$

$$A = -E \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right);$$

$$U_c = \frac{E \cdot R_4}{R_3 + R_4} - E \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Определяем время переключения (продолжительность перезаряда):

$$t > 0, U_b = \frac{E \cdot R_1}{R_1 + R_2};$$

$$E \frac{R_4}{R_3 + R_4} - E \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot e^{-\frac{t_{nep}}{\tau}} = E \frac{R_1}{R_1 + R_2};$$

$$\left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot e^{-\frac{t_{nep}}{\tau}} = \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right);$$

$$t_{nep} = \tau \cdot \ln \left[ \frac{\frac{R_1}{R_1 + R_2} + \frac{R_4}{R_3 + R_4}}{\frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2}} \right].$$



Ёмкость найдём из уравнения частоты:

$$f = \frac{1}{2t_{пер}} = \frac{1}{2 \cdot R_{экс} \cdot C \cdot \ln \frac{R_4(R_1 + R_2) + R_1(R_3 + R_4)}{R_4(R_1 + R_2) - R_1(R_3 + R_4)}}, \text{ откуда}$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot R_{экс} \cdot f \cdot \ln \frac{R_4(R_1 + R_2) + R_1(R_3 + R_4)}{R_4(R_1 + R_2) - R_1(R_3 + R_4)}}, \text{ где } f = 0,8 \text{ кГц};$$

$$\frac{R_4(R_1 + R_2) + R_1(R_3 + R_4)}{R_4(R_1 + R_2) - R_1(R_3 + R_4)} = \frac{5,2 \cdot 10^3 \cdot (1,6 \cdot 10^3 + 3,3 \cdot 10^3) + 1,6 \cdot 10^3 \cdot (2,7 \cdot 10^3 + 5,2 \cdot 10^3)}{5,2 \cdot 10^3 \cdot (1,6 \cdot 10^3 + 3,3 \cdot 10^3) - 1,6 \cdot 10^3 \cdot (2,7 \cdot 10^3 + 5,2 \cdot 10^3)} = 2,97.$$

$$R_{экс} = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} + R_5 = 9,1 \cdot 10^3 + \frac{2,7 \cdot 10^3 \cdot 5,2 \cdot 10^3}{2,7 \cdot 10^3 + 5,2 \cdot 10^3} = 10,8 \text{ кОм};$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot f \cdot R_{экс} \cdot \ln \alpha} = \frac{1}{2 \cdot 1,1 \cdot 10^3 \cdot 10,8 \cdot 10^3 \cdot \ln 2,97} = 38,66 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}.$$

Номинал ёмкости конденсатора подбираем из стандартного 5% ряда:

$$C = 39 \text{ нФ}.$$

Реально полученная частота:

$$f = \frac{1}{2 \cdot R_{экс} \cdot C \cdot \ln \frac{R_4(R_1 + R_2) + R_1(R_3 + R_4)}{R_4(R_1 + R_2) - R_1(R_3 + R_4)}} = \frac{1}{2 \cdot 10,8 \cdot 10^3 \cdot 39 \cdot 10^{-9} \cdot \ln 2,97} = 1,09 \text{ кГц}.$$

После проделанных расчётов получили, что реальная частота удовлетворяет предъявленным требованиям:  $f_{реал} \approx f_{зад}$ .

### Основные контрольные вопросы, предлагаемые при защите курсовой работы

1. В чем заключается существо уравнения Эберса Молла? Изобразите, на каком участке характеристики оно справедливо.
2. Что такое параметр  $h_{21-\beta}$ ?
3. Что такое крутизна и чем она характеризуется?
4. Что такое дифференциальное входное сопротивление транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером?
5. Что такое дифференциальное выходное сопротивление транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером? Что такое напряжение Эрли?
6. Чему равны коэффициенты усиления по напряжению транзисторных каскадов с общим эмиттером и с эмиттерной отрицательной обратной связью? В чем принципиальное различие этих коэффициентов?
7. Объясните назначение разделительных конденсаторов в транзисторной схеме усиления.

8. Объясните назначение конденсатора, установленного параллельно эмиттерному резистору в транзисторном каскаде усиления.
9. Что такое стандартный ряд номиналов?
10. Что такое ключевой режим транзистора?
11. По какому закону происходит заряд и разряд конденсатора с последовательно установленным резистором?
12. Что такое активный фильтр? Почему он так называется?
13. Что такое активный фильтр нижних и активный фильтр верхних частот?
14. Что такое дифференцирующее звено первого и второго порядка и их ЛАЧХ и ЛАФХ?
15. Что такое апериодическое звено и его ЛАЧХ и ЛАФХ?
16. Что такое колебательное звено второго порядка и его ЛАЧХ и ЛАФХ?
17. Условие существования колебательного звена второго порядка.
18. Условие существования резонанса колебательного звена второго порядка.
19. Как определить резонансную частоту и амплитуду резонанса
20. Что такое сопрягающая, резонансная частота и частота среза? Как они соотносятся друг с другом?
21. Что такое сопрягающая частота? Чему равна амплитуда на этой частоте?
22. Как определить постоянные времени апериодических звеньев, если корни характеристического уравнения передаточной функции второго порядка действительные?
23. Что такое операционный усилитель, работающий в режиме компаратора?