

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
(РОСАВИАЦИЯ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)

Кафедра электротехники
и авиационного электрооборудования

А.А. Савелов, С.П. Халютин

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Учебно-методическое пособие
по выполнению курсовой работы

*для студентов II курса
направления 25.03.02 и специальности 25.05.05
всех форм обучения*

Москва
ИД Академии Жуковского
2025

УДК 621.38
ББК 6Ф0.3
С12

Рецензент:

Решетов С.А. – д-р техн. наук, профессор

Савелов А.А.

С12

Основы электроники [Текст] : учебно-методическое пособие по выполнению курсовой работы / А.А. Савелов, С.П. Халютин. – М.: ИД Академии Жуковского, 2025. – 36 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Основы электроники» по учебному плану для студентов II курса направления подготовки 25.03.02 и специальности 25.05.05 всех форм обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 27.12.2024 г. и методического совета 28.01.2025 г.

УДК 621.38
ББК 6Ф0.3

В авторской редакции

Подписано в печать 22.05.2025 г.

Формат 60х84/16 Печ. л. 2,25 Усл. печ. л. 2,09

Заказ № 1070/0325-УМП08 Тираж 25 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20

Издательский дом Академии имени Н. Е. Жуковского
125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., д. 6А
Тел.: (499) 755-55-43
E-mail: zakaz@itsbook.ru

© Московский государственный технический
университет гражданской авиации, 2025

1. Общие положения

Курсовая работа предназначена для более глубокого усвоения теоретического материала дисциплины 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.

Учебно-методическое пособие состоит из пяти задач по всем разделам дисциплины. 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, синтез дешифратора семисегментного индикатора. При выполнении заданий кроме ручного расчета должна использоваться ЭВМ с прикладным программным комплексом «Electronics Workbench».

Для выполнения первого и второго заданий необходимо повторить темы: «Усилительные каскады на базе биполярных транзисторов», «Операционные усилители». Для третьего – «Цифровые логические устройства».

Плановая трудоемкость курсовой работы – 16 часов, без учета времени изучения и повторения теоретического материала.

Пояснительную записку к курсовой работе следует оформлять в специальной тетради или на сброшюрованных стандартных листах формата А4. В последнем случае текст должен быть оформлен в соответствии со стандартом¹. В ней необходимо привести условия задачи для заданного варианта и подробные пояснения к решению 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 ЕСКД². 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 Electronics Workbench (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)

¹ ГОСТ 2.105-95 ЕСКД. Общие требования к текстовым документам

² ГОСТ 2.702-2011 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Правила выполнения электрических схем

расчетных задач на формате А4. Курсовая работа сдается в печатном виде с обязательным приложением электронной копии.

2. Выбор варианта

Для задач 1.1, 1.2, 2.2 номера вариантов студент устанавливает по шифру зачетной книжки. Первая цифра варианта соответствует четности (0) или нечетности (1) предпоследней цифры номера зачетной книжки, последняя цифра номера варианта и номера зачетной книжки должны совпадать.

В задачах № 2.1, 3.1 последняя цифра зачетки соответствует номеру варианта

3. Задания курсовой работы

3.1. Контрольное задание 1

Задача 1.1. Расчет усилителя низкой частоты на транзисторе.

Задание

Рассчитать параметры схемы малосигнального усилителя, приведенной на рис.1.

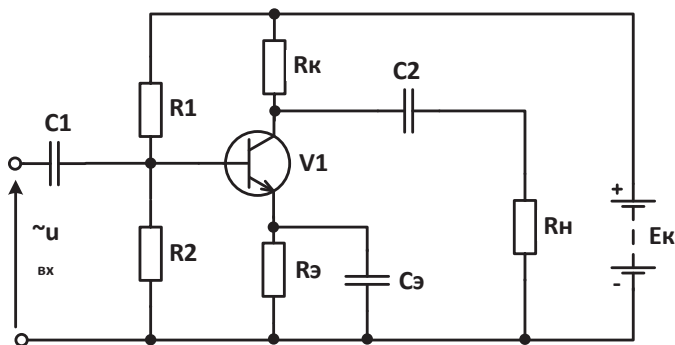


Рис. 1. Схема усилителя низкой частоты.

В результате расчета должны быть определены следующие параметры: R_k , R_2 , R_1 , C_3 , A° , A^c , $R_{вх}$, P_c , где:

A° – дифференциальный коэффициент усиления по напряжению без конденсатора C_3 ;

A^c – то же, но с конденсатором C_3 ;

$R_{вх}$ – входное сопротивление усилителя;

P_c – мощность, рассеиваемая на транзисторе.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 1.

По результатам вычисления параметров схемы с использованием программного комплекса «Electronics Workbench» выполнить моделирование работы схемы усилителя на ЭВМ. Копию рабочего окна программы представить в отчете.

Таблица 1

Параметры схемы усилителя

Вариант	Тип транзистора	Проводимость	$h_{21-э}$	U_{γ} , В	I_{k^0} , мА	$R_{э}$, кОм	E_k , В	f_n , кГц	$t^{\circ}C$	$P_{корп\ max}$, мВт
00	2Т208Б	pnp	80	70	5	0.68	8	6.3	+23°	200
01	2Т301Г	pnp	30	100	3.5	1.1	30	1.1	+85°	150
02	2Т312А	pnp	70	100	2.5	1.6	8	3.8	+60°	225
03	2Т231А	pnp	30	100	1	2.2	8	1.4	-50°	15
04	2Т208Ж	pnp	30	70	3.8	1.3	8	2.2	-60°	200
05	2Т326А	pnp	60	70	5	0.47	12	10.2	+23°	250
06	2Т377Б	pnp	90	100	4	1.2	24	9.8	+85°	50
07	2Т378А	pnp	70	100	5	1.1	12	18.2	+60°	50
08	2Т316А	pnp	30	100	1.5	1.3	12	4.1	-50°	150
09	2Т372А	pnp	40	100	0.5	4.7	15	4.8	-60°	50
10	2Т382Б	pnp	180	100	1	2.0	15	2.0	+23°	100
11	КТ369А	pnp	90	100	5	1.0	24	5.6	+85°	50
12	КТ354А	pnp	110	100	0.2	9.1	12	0.8	+60°	30
13	КТ318А	pnp	40	100	1	1.8	12	1.2	-50°	15
14	КТ307Б	pnp	40	100	1	1.8	30	9.8	-60°	15
15	КТ104Б	pnp	60	70	2	1.2	12	7.2	+23°	150
16	2Т202В	pnp	0	70	3	1.6	24	4.6	+85°	25
17	2Т203В	pnp	50	70	2	1.3	30	15.2	+60°	150
18	2Т363А	pnp	30	70	1.5	1.8	8	1.8	-50°	150
19	КТ206А	pnp	45	100	3	1.1	12	2.6	-60°	15

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 входным импульсом напряжения³ длительностью t_1 , а затем вновь входит в насыщение. Параметры схемы приведены в таблице 2.

³ Полярность импульса и полярность источника определяется типом транзистора

Задание

1. Получить математическое выражение, в соответствии с которым изменяется напряжение на конденсаторе, когда транзистор не пропускает ток.
2. Найти напряжение на конденсаторе U_{Ct1} в момент времени $t=t_1$.
3. Получить математическое выражение, в соответствии с которым изменяется напряжение на конденсаторе при $t>t_1$.
4. Определить момент времени $t_2>t_1$, 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 «Electronics Workbench» выполнить моделирование работы ключевой схемы на ЭВМ. Копию рабочего окна программы представить в отчете.

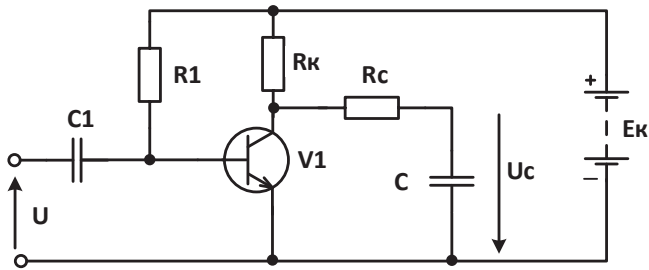


Рис.2. Электронный ключ.

Таблица 2

Параметры электрической схемы ключа

Вариант	E_k , В	R_k , кОм	C , мкФ	t_1 , мс	U_{Ct2} , В	R_c , кОм
00	24	36	2.7	250	1.2	2.7
01	16	75	3.6	220	1.8	12
02	14	47	0.51	15	2.5	4.2
03	28	82	3.3	160	8.35	18
04	15	47	3.6	120	2.1	3.3
05	30	110	1.2	85	3.4	9.1
06	20	68	3.6	210	4.2	11
07	18	56	4.2	215	1.3	4.2
08	10	91	2.4	170	3.1	8.2
09	25	56	3.3	130	0.8	5.1
10	27	33	5.1	210	6.7	2.7
11	24	47	4.7	320	1.8	1.3
12	20	68	10	710	4.2	1.2
13	30	51	3.6	170	8.4	3.3

14	15	82	8.2	560	2.5	4.2
15	28	110	3.6	340	1.8	33
16	14	68	3.3	160	3.5	22
17	18	56	2.4	250	2.9	11
18	10	91	5.1	420	5.2	18
19	12	47	6.8	290	0.56	25

3.2. Контрольное задание 2

Задача 2.1. Активный фильтр на операционном усилителе.

Задание.

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

2. Определите коэффициент демпфирования ξ .

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

Если коэффициент демпфирования $\xi > 1$, то определите постоянные времени апериодических звеньев.

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

По результатам вычисления параметров схемы с использованием программного комплекса «Electronics Workbench» выполнить моделирование работы схемы фильтра на ЭВМ. Копию рабочего окна программы необходимо представить в отчете.

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

Таблица 3

Параметры активных фильтров

Вариант схемы	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)

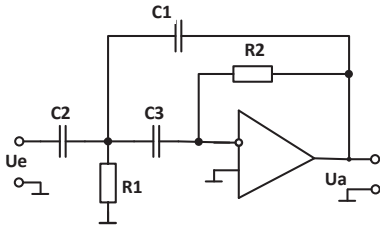


Рис.2.0

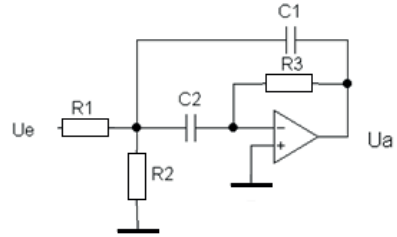


Рис.2.1

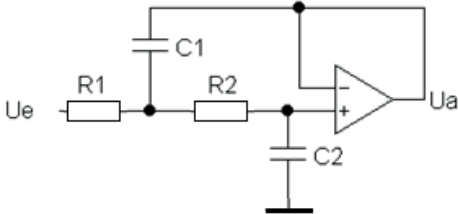


Рис.2.2

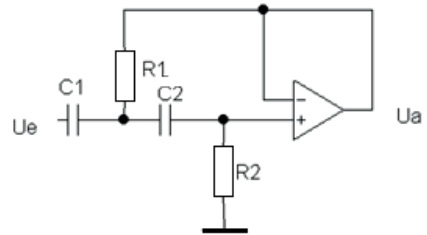


Рис.2.3

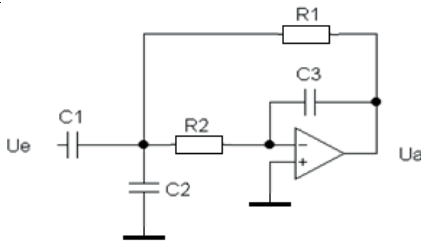


Рис.2.4

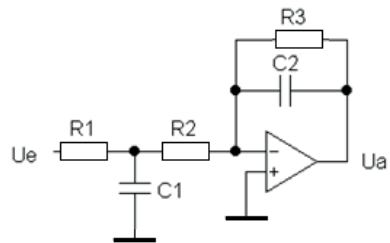


Рис.2.5

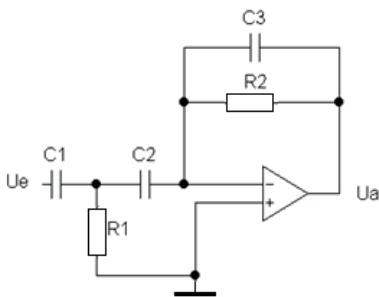


Рис.2.6

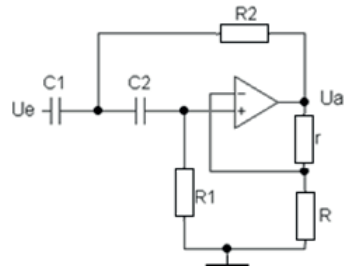


Рис.2.7

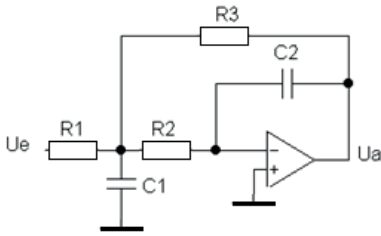


Рис.2.8

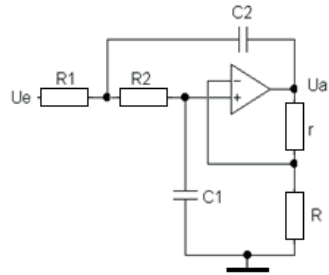


Рис.2.9

Задача 2.2. Мультивибратор на операционном усилителе

Задание

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

1. Подобрать сопротивление резистора R1 по 5% стандартному ряду так, чтобы $U_A = 3 \cdot U_B$.
2. Подобрать емкость конденсатора C по 5% стандартному ряду так, чтобы получить заданную частоту.
3. Вычислите реально полученную частоту и сравните с заданной.
4. По результатам вычисления параметров схемы с использованием программного комплекса «Electronics Workbench» выполнить моделирование работы схемы мультивибратора на ЭВМ. Копию рабочего окна программы представить в отчете.

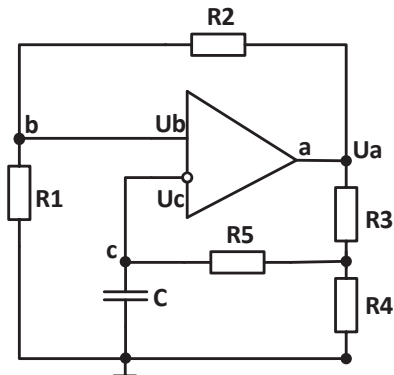


Рис. 3. Схема мультивибратора.

Данные для расчета различных вариантов выберите из таблицы 4.

Таблица 4

Параметры схемы мультивибратора

Ва- риант	R2, кОм	R3, кОм	R4, кОм	R5, кОм	f, кГц	Ва- риант	R2, кОм	R3, кОм	R4, кОм	R5, кОм	f, кГц
00	3.6	3.6	8.2	36	1	10	2.7	3.3	2.4	5.1	1
01	24	18	27	51	8	11	3.3	2.7	5.2	9.1	2
02	3.9	7.5	22	51	5	12	4.7	5.6	5.1	6.2	3
03	7.5	6.8	5.6	12	2	13	12	5.1	4.7	9.1	4
04	5.2	6.8	18	24	3	14	5.6	6.8	5.1	7.5	5
05	4.2	3.0	3.9	6.2	2	15	4.7	3.9	6.2	4.7	4
06	16	39	27	42	4	16	11	5.6	9.1	10.	3
07	5.1	15	12	22	2	17	4.7	6.8	7.5	8.2	2
08	7.5	2.2	5.1	11	3	18	3.9	3.6	5.1	3.9	1
09	12	8.2	5.2	16	2	19	18	12	22	30	3

3.3. Контрольное задание 3

Задача 3.1. Синтезировать дешифратор для управления семисегментным индикатором на элементах И-НЕ, ИЛИ-НЕ.

Задание

Синтезировать дешифратор для управления одним сегментом семисегментного индикатора, отображающего десятичные цифры 0 ÷ 9, Схема включения индикатора приведена на рис.4.

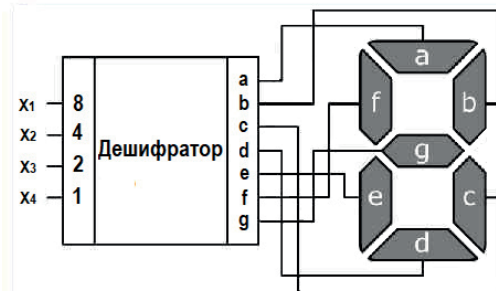


Рис. 4. Схема включения семисегментного индикатора.

На вход дешифратора подается четырехразрядный код, дешифратор зажигает соответствующие сегменты и на индикаторе высвечивается цифра. Значение «1» на сегменте означает его свечение.

Номер варианта (сегмент индикатора) определяется последним номером зачетной книжки. Таблица истинности работы сегментов для чисел 0 ÷ 9 и номера вариантов приведена в таблице 5.

Таблица 5

Таблица истинности управления семисегментным индикатором

Число	Двоичный код				Номер варианта (сегмента)							
					0	1	2	3	4, 7	5, 8	6, 9	
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	a	b	c	d	e	f	g	
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	
1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	
2	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	
3	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	
4	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	
5	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	
6	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	
7	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	
8	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	
9	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	

4. Методические указания к контрольным заданиям

Задача 1.1

Расчет можно производить любыми 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.

На практике при расчете усилителя используется схема замещения транзистора, составленная на основе уравнения Эберса-Молла. Уравнение Эберса-Молла связывает ток коллектора транзистора (I_k) с напряжением база-эмиттер ($U_{бэ}$). В упрощенной форме уравнение имеет вид:

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

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 $U_{бэ} \gg U_T$, то единицей в выражении (1) можно пренебречь, и:

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

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:

$$\frac{\Delta I_k}{\Delta I_6} = h_{21} = \beta.$$

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 β резко падает.

Наклон характеристики Эберса-Молла называется крутизной (S)

$$S = \frac{dI_k}{dU_{63}} = \frac{I_{30}}{U_T} e^{\frac{U_{63}}{U_T}} = \frac{I_k}{U_T},$$

$$S = \frac{I_k}{U_T} \quad (3)$$

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

Схема замещения транзистора при включении его с общим эмиттером показана на рис.5. Для её применения в расчетах необходимо определить r_{63} и $r_{к3}$.

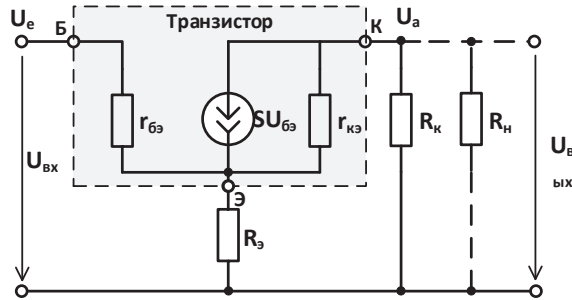


Рис.5. Схема замещения транзистора

Расчет входного дифференциального (r_{63}) и выходного дифференциального ($r_{к3}$) сопротивлений транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером без снятия статических характеристик.

$$r_{63} = \frac{\Delta U_{63}}{\Delta I_6} \Big|_{r_{к3}=const} = \frac{\beta}{S} \quad (4)$$

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

$$r_{к3} = \frac{\Delta U_{к3}}{\Delta I_k} \Big|_{I_6=const} = \frac{U_Y}{I_k}, \quad (5)$$

где U_Y -напряжение Эрли.

Это напряжение определяется следующим образом:

$$U_Y = \frac{I_k \Delta U_{kэ}}{\Delta I_k} \Big|_{I_6 = \text{const}}$$

Коэффициент U_Y находится в пределах $(80 \div 200)$ В для npr и $(40 \div 150)$ В для pnp транзисторов.

Для повышения температурной стабильности каскада вводится отрицательная обратная связь с помощью резистора R_3 (рис.1). 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

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

$$A = \frac{U_a}{U_e} = - \frac{R_k}{R_3 + 1/S + R_k/(S \cdot r_{кэ})}; \quad (6)$$

$$R_{вх} = r_{бэ} + (\beta + 1) \cdot R_3;$$

$$R_{вых} \approx R_k.$$

Так как $r_{кэ} \gg R_k$, то в выражении (6) третьим слагаемым знаменателя можно пренебречь.

Значение термического коэффициента U_T при $+85^\circ\text{C}$ составляет 30.9 мВ.

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

Если $R_3 \gg (30.9/I_k)$ Ом, то коэффициент усиления транзистора по напряжению можно принять равным:

$$A = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_e} \approx \frac{R_k}{R_3}$$

В этом случае коэффициент усиления каскада на транзисторе не зависит от свойств транзистора, а определяется только соотношением омических сопротивлений R_k и R_3 .

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

3. Ток через делитель R_1, R_2 принимают равным пятикратному току базы ($5 \cdot I_б$) 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 .

Примечание1.

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.

7. Моделируют рассчитанный каскад в EWB.

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

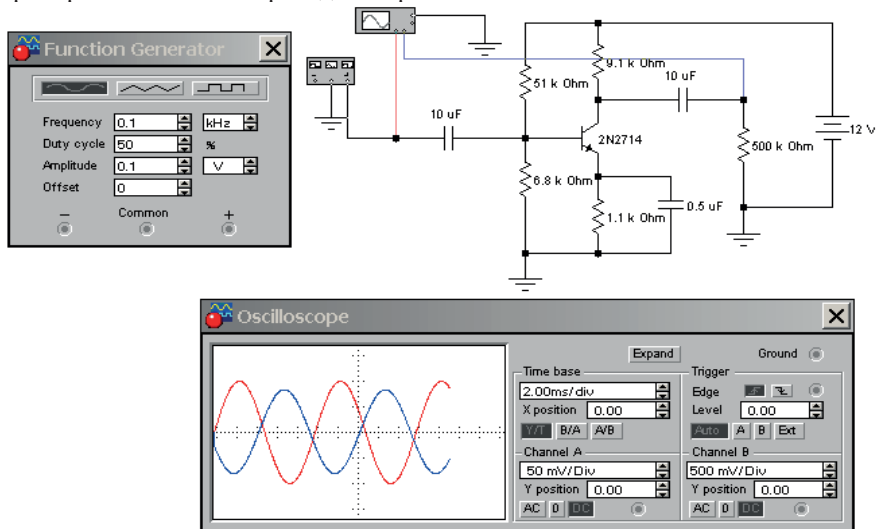


Рис.6 Моделирование усилителя

Примечание 2. В базе элементов EWB может отсутствовать транзистор с нужными параметрами, в этом случае нужно выбрать транзистор соответствующий вашему по мощности (коллекторному току) и проводимости. При этом рабочая точка выбранного транзистора может не соответствовать расчетной, что приведет к искажению выходного сигнала. Устранить этот эффект можно задав новое положение рабочей точки. С этой целью при

моделировании изменяют резистор R1 или R2, добиваясь неискаженной формы выходного сигнала. Новые значения сопротивлений R1, R2 указывают в отчете.

Задача 1.2

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

Примечание. Частоту генератора следует выбирать такой, чтобы конденсатор С успевал заряжаться и разряжаться не менее чем на 90% от конечных значений напряжений заряда и разряда.

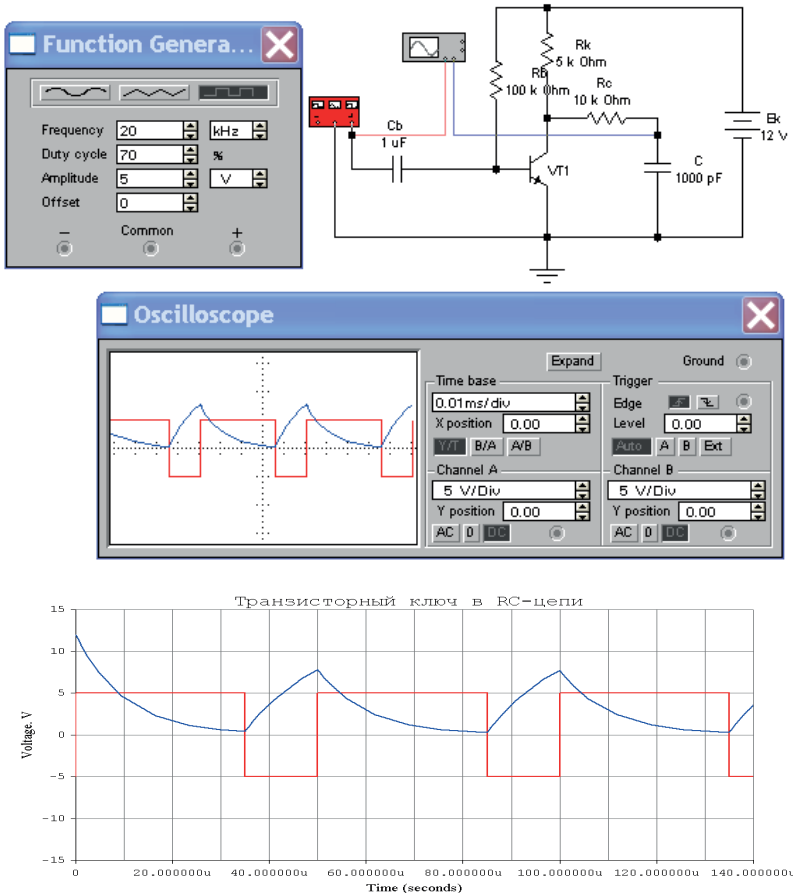


Рис.7. Электронная схема модели и осциллограмма расчета ключевой транзисторной схемы

Задача 2.1

Свойства реактивных элементов изменять свою электрическую проводимость в зависимости от частоты входного сигнала используется при создании частотных фильтров. Например, пассивный RC фильтр (с параллельным включением конденсатора) дает снижение коэффициента передачи (коэффициента усиления) при увеличении частоты сигнала. 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 фильтра комплексно-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.

Для того, чтобы получить передаточную функцию RC фильтра необходимо записать систему уравнений, связывающих выходной сигнал U_a с входным U_e . Уравнения записываются, используя любой из известных методов электротехники: узловых потенциалов, законов Кирхгофа и др. При составлении уравнений следует учитывать особенности операционного усилителя:

- сопротивления входов усилителя очень велики, а, следовательно, входными токами усилителя можно пренебречь;
- в линейном режиме работы усилителя (такой режим нужно полагать в расчетах) потенциалы инвертирующего и не инвертирующего входов практически одинаковы;
- выход усилителя можно рассматривать как источник ЭДС с величиной U_a .

Передаточная функция фильтра $W_\Phi(p)$ определяется как

$$W_\Phi(p) = \frac{U_a}{U_e}$$

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: $W(p)=T^*p$.
3. Дифференцирующее звено 2-го порядка $W(p)=T^2p^2$, где $T = \sqrt{T_1T_2}$
4. Колебательное звено 2-го порядка:

$$W(p) = \frac{1}{T^2p^2 + 2\zeta Tp + 1}$$

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 корнями характеристического уравнения, которые имеют вид:

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

Для колебательного звена корни должны быть комплексными сопряженными (коэффициент демпфирования $\xi < 1$). Если $0 < \xi < \sqrt{0.5}$, то имеет место резонанс. Резонансная частота

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

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

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.

Для построения ЛАЧХ и ЛФЧХ желательно воспользоваться специальными подпрограммами в специализированных оболочках Mathcad, Matlab или другими.

В программе Electronics Workbench есть специальный модуль Bode Plotter, который по заданной электрической схеме строит ЛАЧХ и ЛФЧХ. ЛАЧХ и ЛФЧХ, построенные на плоттере должны совпадать с ЛАЧХ и ЛФЧХ, полученными расчетным путем. В случае несовпадения характеристик следует проверить расчетную часть.

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

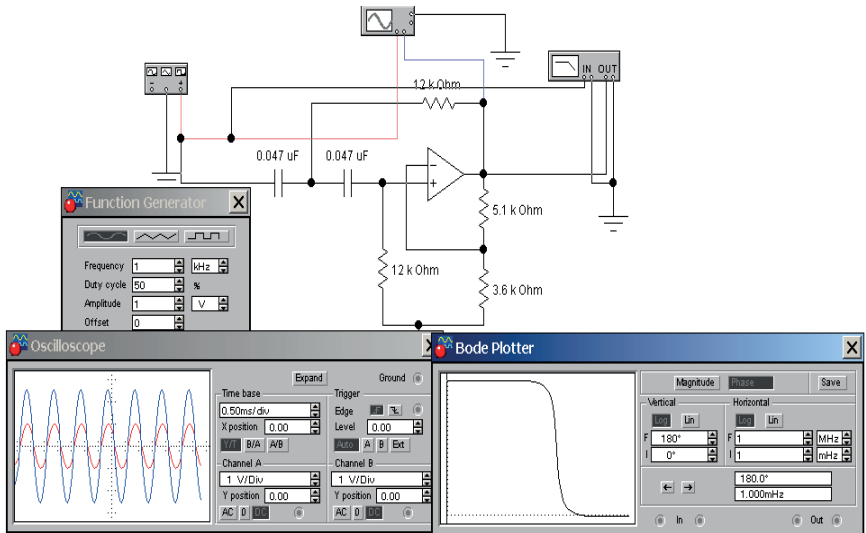


Рис.8. Схема электронной модели активного фильтра верхних частот

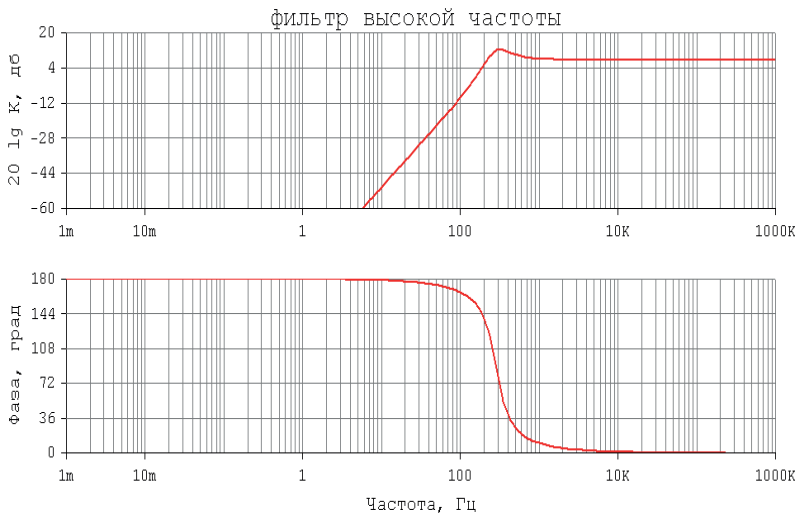


Рис. 9. АФЧХ активного фильтра высоких частот

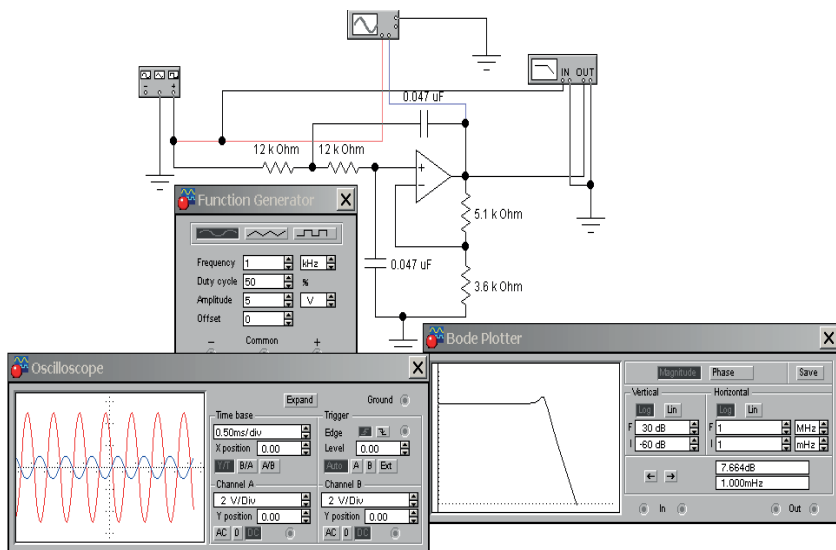


Рис. 10. Схема электронной модели активного фильтра нижних частот

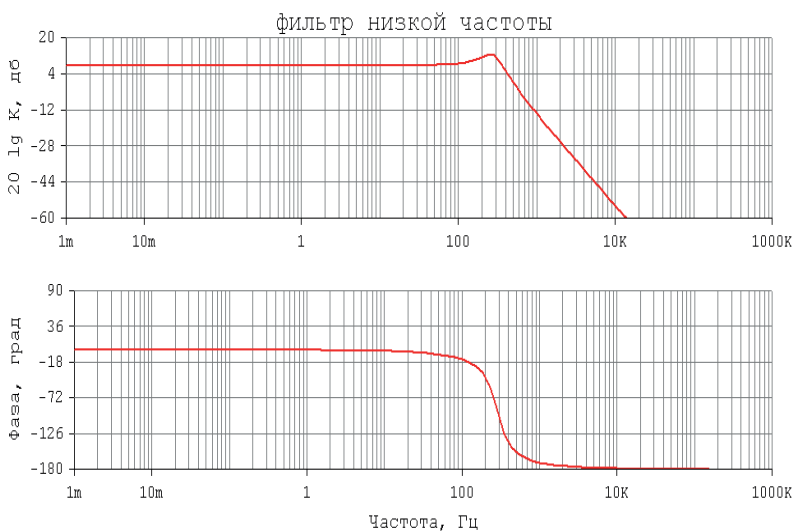


Рис.11. АФЧХ активного фильтра нижних частот

Задача 2.2

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

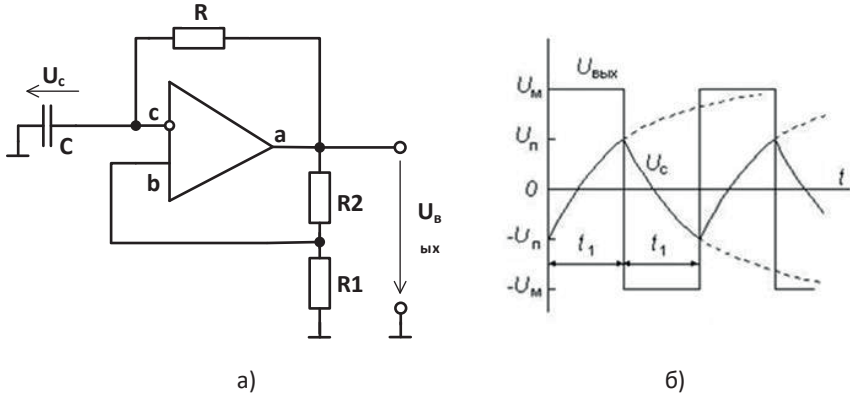


Рис. 12 Схема мультивибратора и диаграмма его работы

Опрокидывание компаратора происходит тогда, когда напряжение на конденсаторе (U_c) достигнет уровня в точке В (напряжения переключения - U_n). Величина напряжения переключения U_n 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 - E .

Когда напряжение U_c достигает величины U_n , 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: $U_c(0) = -U_n$ решение этого уравнения имеет вид

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

Значение напряжения, равное порогу срабатывания триггера Шмитта (условие $U_c(t) = U_n$), 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.3 $R = R_{\text{экв}} = R_5 + R_3 * R_4 / (R_3 + R_4)$.

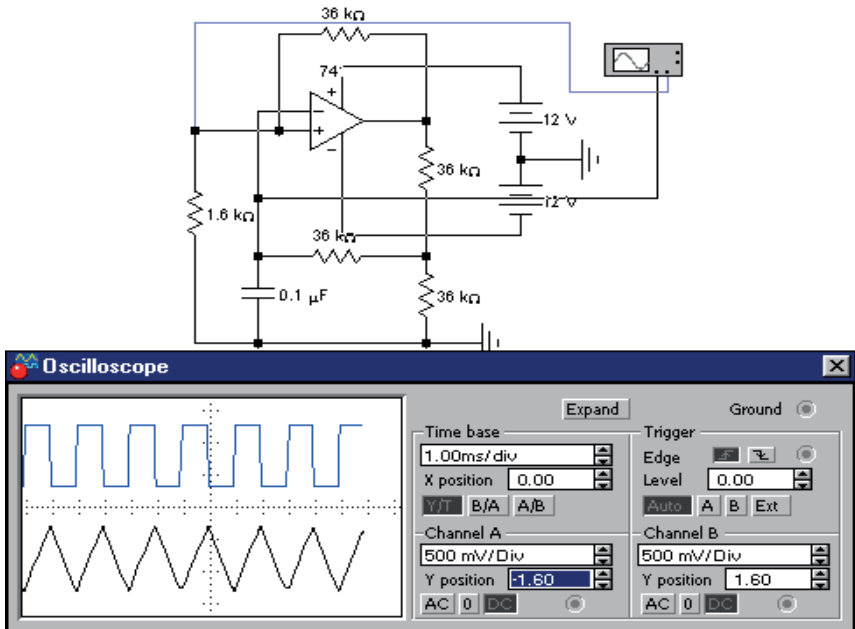


Рис.13. Схема и осциллограммы для проведения измерений величин напряжений в заданных точках и частоты колебаний мультивибратора

Задача 3.1

Синтез дешифратора состоит из следующих этапов.

Вначале следует записать логическое уравнение управления заданным сегментом. Уравнение составляется на основе таблицы истинности (таблица 5). Оно должно включать все сочетания аргументов X при которых загорается выбранный сегмент (состояние «1» сегмента) для диапазона цифр 0-9.

На втором этапе необходимо минимизировать логическое уравнение любыми методами булевой алгебры.

На третьем этапе минимизированное уравнение следует преобразовать к выбранному базису микросхем: «И-НЕ», или «ИЛИ-НЕ». Это преобразование выполняется с помощью правила де Моргана.

На четвертом этапе составляется электрическая схема и выполняется проверка её функционирования таблице истинности.

В программе Electronics Workbench есть специальный модуль «Logic Converter», который синтезирует электрическую схему дешифратора по логическому уравнению.

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

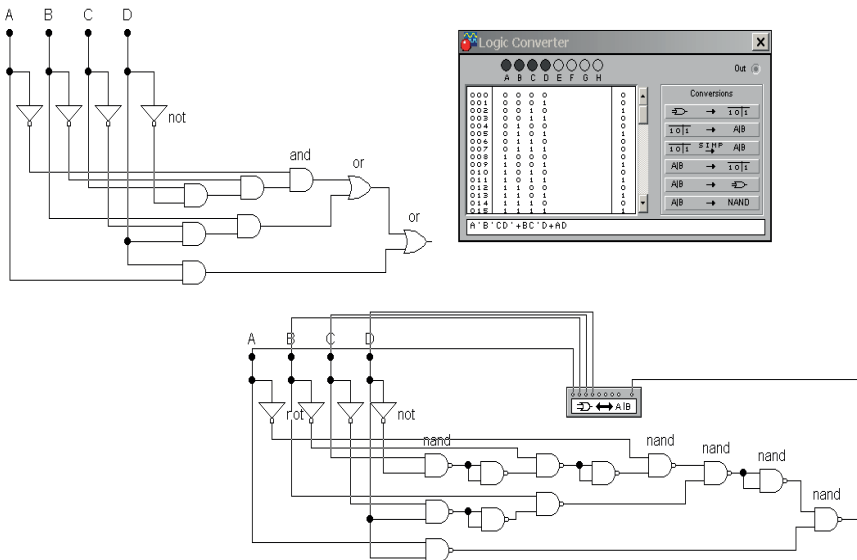


Рис.14. Схема электронной модели расчета дешифратора

5. Примеры решения задач

1. Расчёт усилителя низкой частоты на транзисторе.

Исходные данные:

Тип транзистора : 2Т382Б; Проводимость : $n-p-n$; $h_{21-э} = 180$; $U_y = 100 В$;

$I_{\kappa}^0 = 1 мА$; $R_э = 2 кОм$; $E_{\kappa} = 8 В$; $f_n = 6,3 кГц$; $t = +23^{\circ} C$; $P_{кдоп} = 100 мВт$.

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

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

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

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

$$U_{\bar{э}} = I_{\kappa}^0 \cdot R_{\bar{э}} = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^3 = 2 В.$$

1.3 Находим требуемое напряжение на базе $U_{\bar{o}}$ как сумму падения напряжения на резисторе $R_{\bar{э}}$ и напряжения $U_{\bar{o}э}$, которое принимаем равным $0,65 В$, что соответствует примерно середине линейного режима транзистора:

$$U_{\bar{o}} = U_{\bar{э}} + U_{\bar{o}э} = 2 + 0,65 = 2,65 В.$$

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

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

величины сопротивлений равны:

$$R_2 = \frac{U_{\bar{o}}}{I_{R_1, R_2}} = \frac{2,65}{0,03 \cdot 10^{-3}} = 88,33 кОм,$$

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

Номиналы резисторов подбираем из стандартного 5% ряда:

$$R_1 = 150 кОм \quad R_2 = 91 кОм$$

1.5. Определяем параметры замещения схемы $r_{\bar{o}э}$

$r_{\bar{o}э} = \frac{dU_{\bar{o}э}}{dI_{\bar{o}}} = \frac{\beta}{S} = \frac{\beta \cdot U_T}{I_{\bar{o}}}$, 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;

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

$$r_{\theta 3} = \frac{180 \cdot 25,5 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} = 4590 \text{ Ом};$$

1.6 Определение входного сопротивления схемы

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

$$U_{ex} = i_{\theta} \cdot r_{\theta 2} + i_3 \cdot R_3;$$

$$I_3 = I_{\theta} + I_k = \beta \cdot i_{\theta} + \frac{I^0_k}{1-\alpha} + \frac{U_{кз}}{r_{кз(\theta)}} + i_{\theta}, \text{ но } \frac{I^0_k}{1-\alpha} + \frac{U_{кз}}{r_{кз(\theta)}} \approx 0, \text{ где } \alpha \text{ – коэффициент передачи}$$

тока эмиттера, следовательно

$$I_3 = I_{\theta} \cdot (1 + \beta);$$

$$U_{ex} = i_{\theta} [(r_{\theta 2} + (1 + \beta) \cdot R_3)];$$

$$R'_{ex} = [(r_{\theta 2} + (1 + \beta) \cdot R_3)] = 4590 + (1 + 180) \cdot 2000 = 366,6 \text{ кОм}.$$

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_3)

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

1.7. Коэффициент усиления

$$K_U = \frac{dU_{вых}}{dU_{ex}};$$

Составим и решим исходные уравнения для схемы замещения:

$$1) \text{ ток коллектора } dI_k = S \cdot dU_{\theta 3} + \frac{dU_{кз}}{R_{кз}};$$

$$2) dU_{\theta 3} = dU_{ex} - dU_3;$$

$$3) dU_{кз} = dU_{вых} - dU_3;$$

$$4) dU_{вых} = -R_k \cdot dI_k;$$

$$5) dU_3 \approx R_3 \cdot dI_k;$$

Откуда

$$K_U = \frac{-R_k \cdot dI_k}{dI_k \left(\frac{1}{S} + R_3 + \frac{R_k}{r_{кз} S} \right)} = \frac{-R_k \cdot S}{1 + R_3 \cdot S + \frac{R_k}{r_{кз}}} \approx -\frac{R_k}{R_3}, \text{ так как } \frac{1}{S} \approx 0 \text{ и } \frac{R_k}{r_{кз} S} \approx 0.$$

а) Дифференциальный коэффициент усиления по напряжению без конденсатора равен:

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

б) Дифференциальный коэффициент усиления по напряжению с конденсатором C_s равен:

$$A_0^c = \frac{R_k}{R_s \cdot X_c} \cdot \frac{R_s + X_c}{1}.$$

По условию

$$\frac{X_c \cdot R_s}{X_c + R_s} = \frac{R_s}{5},$$

$$\text{Откуда, } X_c = \frac{R_s}{4}, \quad X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot C_s}$$

следовательно:

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

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

$$C_s = 0,051 \text{ мкФ}.$$

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

1.8. Входное сопротивление каскада с учётом сопротивления конденсатора C_s :

$$R'_s = \frac{R_s \cdot X_c}{R_s + X_c} = \frac{2000 \cdot 496}{2000 + 496} = 397 \text{ Ом}.$$

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

а) Входное сопротивление каскада без учёта входного сопротивления делителя.

$$R''_{ex} = [(r_{бэ} + (1 + \beta) \cdot R'_s)] = 4590 + (1 + 180) \cdot 397 = 76,5 \text{ кОм}.$$

б) Входное сопротивление 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:

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

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

2. Ключевая транзисторная схема для управления RC - цепью.

Исходные данные:

$$E_k = 10 \text{ В}; \quad R_k = 47 \text{ кОм}; \quad C = 4,7 \text{ мкФ}; \quad t_1 = 320 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad U_{C_{12}} = 1,8 \text{ В};$$

$$R_C = 1,3 \text{ кОм}.$$

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 $U_{C_{t_1}}$ в момент времени $t = t_1$:

$$U_{C_{t_1}} = E_K - E_K \cdot e^{-\frac{t_1}{(R_K + R_C) \cdot C}} = 10 - 10 \cdot e^{-\frac{320 \cdot 10^{-3}}{(47 \cdot 10^3 + 1,3 \cdot 10^3) \cdot 4,7 \cdot 10^{-6}}} = 7,3B$$

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 $U_{C_{t_2}}$:

$$U_{C_{t_2}} = U_{C_{t_1}} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{R_C \cdot C}};$$

$$\frac{U_{C_{t_2}}}{U_{C_{t_1}}} = e^{-\frac{\Delta t}{R_C \cdot C}};$$

$$\ln \frac{U_{C_{t_2}}}{U_{C_{t_1}}} = -\frac{\Delta t}{R_C \cdot C};$$

откуда:

$$\Delta t = -R_C \cdot C \cdot \ln \frac{U_{C_{t_2}}}{U_{C_{t_1}}} = -1,3 \cdot 10^3 \cdot 4,7 \cdot 10^{-6} \cdot \ln \frac{1,3}{7,53} = 8,745 \cdot 10^{-3} c;$$

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

2.5 Для построения графика зависимости напряжения U_C для интервала времени $0 \leq t \leq 4t_1$ с изображением входного сигнала составим таблицу 6:

Таблица 6.

Интервал времени	Состояние транзистора	Значение напряжения
$t < 0$	Открыт	$U_C = 0B$
$0 \leq t \leq t_1$	Закрыт	$U_C = E_K - E_K \cdot e^{-\frac{t}{(R_K + R_C) \cdot C}}$
$t_1 \leq t \leq 4t_1$	Открыт	$U_C = U_{C_{t_1}} \cdot e^{-\frac{t}{R_C \cdot C}}$

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

$$U_C = U_{C_{t1}} \cdot e^{-\frac{4t_1}{R_C \cdot C}} = 7.53 \cdot e^{-\frac{4 \cdot 320 \cdot 10^{-3}}{1.3 \cdot 10^3 \cdot 4.7 \cdot 10^{-6}}} = 7.87 \cdot 10^{-91} \text{ В} \approx 0$$

График изменения напряжения на конденсаторе приведен на рис. 15

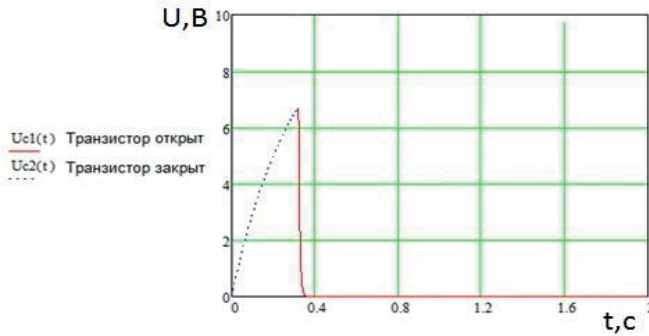


Рис.15. Напряжение на конденсаторе.

3. Активный фильтр на операционном усилителе.

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

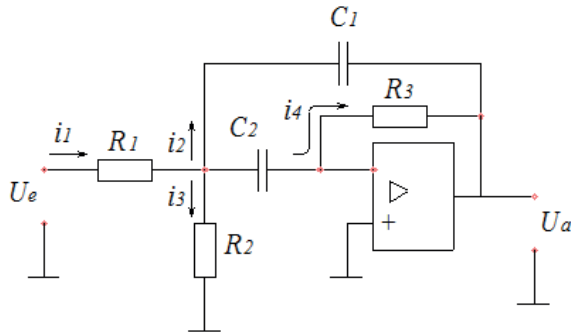


Рис. 16. Схема активного фильтра верхних частот.

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:

$$i_4 = -\frac{Ua}{R_3};$$

$$i_1 = \frac{Ue - i_4 \cdot \frac{1}{C_2 \cdot p}}{R_1} = \frac{Ue}{R_1} + \frac{Ua}{R_1 \cdot R_3 \cdot C_2 \cdot p};$$

$$i_3 = i_4 \cdot \frac{1}{R_2 \cdot C_2 \cdot p} = -\frac{Ua}{R_2 \cdot R_3 \cdot C_2 \cdot p};$$

$$i_2 = (i_3 \cdot R_2 - Ua) \cdot C_1 \cdot p = -Ua \cdot \left(\frac{C_1}{R_3 \cdot C_2} + C_1 \cdot p \right).$$

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:

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

3.2. Определим коэффициент демпфирования ξ 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. 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:

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

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

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

3.4. Расчет ЛАЧХ и ЛФЧХ по полученной передаточной функции выполнен в среде Matlab и представлен на рис.17,18.

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)
```

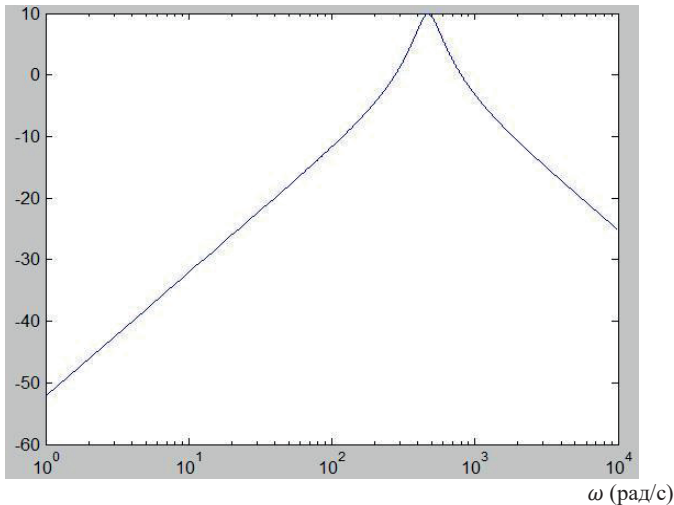


Рис.17. ЛАЧХ фильтра

Расчет ЛФЧХ (матлаб)

$w=1:2:10000;$

$y=\text{atand}((1-w.^2.*4.513.*10.^{-6})./(w.*0.8005.*10.^{-3}));$

$\text{semilogx}(w,y)$

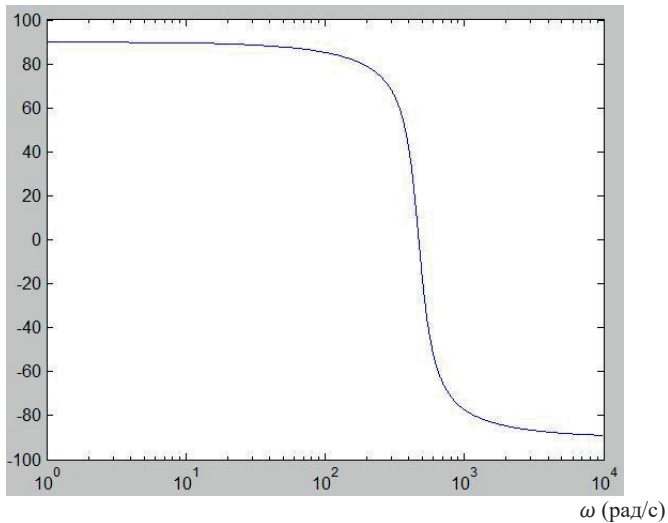


Рис.18. ЛФЧХ фильтра

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:

$R_1 = 1,6\text{кОм}$.

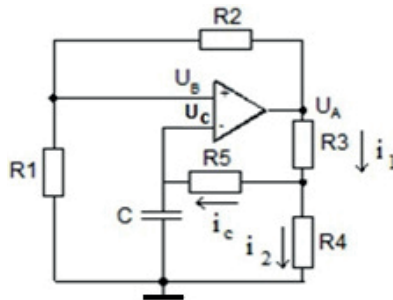


Рис.19. Мультивибратор на операционном усилителе

4.2. Зададимся направлением токов и составим исходные уравнения. Получим расчетное выражение для напряжения на конденсаторе:

$$E = U_a$$

$$E = i_1 \cdot R_3 + i_2 \cdot R_4$$

$$i_2 = i_1 - i_c$$

$$E = i_1 \cdot R_3 + i_c \cdot R_5 + U_c$$

Откуда получаем:

$$\frac{E \cdot R_4}{R_3 + R_4} = \left[\frac{R_4 \cdot R_3}{R_3 + R_4} + R_5 \right] C \frac{dU_c}{dt} + U_c, a$$

$$\frac{R_4 \cdot R_3}{R_3 + R_4} + R_5 = R_{\text{экв}}$$

Решение дифференциального уравнения в общем виде:

$$U_c = U_{\text{cy}} + U_{\text{cсв}}$$

при

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

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

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

$$U_{\text{cсв}} = A \cdot e^{pt}$$

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

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

$$U_{\text{cсв}} = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

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

Постоянную интегрирования А 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):

$$\begin{aligned}
 t)0, U_b &= \frac{E \cdot R_1}{R_1 + R_2} \\
 E \frac{R_4}{R_3 + R_4} - E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot e^{-\frac{t_{пер}}{\tau}} &= E \frac{R_1}{R_1 + R_2} \\
 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot e^{-\frac{t_{пер}}{\tau}} &= \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \\
 t_{пер} = \tau \cdot \ln \left[\frac{\frac{R_1}{R_1 + R_2} + \frac{R_4}{R_3 + R_4}}{\frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2}} \right]
 \end{aligned}$$

Ёмкость найдём из уравнения частоты:

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{1}{2t_{пер}} = \frac{1}{2 \cdot R_{экв} \cdot C \cdot \ln \frac{R_4(R_1 + R_2) + R_1(R_3 + R_4)}{R_4(R_1 + R_2) - R_1(R_3 + R_4)}}, \text{ откуда} \\
 C &= \frac{1}{2 \cdot R_{экв} \cdot f \cdot \ln \frac{R_4(R_1 + R_2) + R_1(R_3 + R_4)}{R_4(R_1 + R_2) - R_1(R_3 + R_4)}}, \text{ где } f = 0,8 \text{ кГц}; \\
 \frac{R_4(R_1 + R_2) + R_1(R_3 + R_4)}{R_4(R_1 + R_2) - R_1(R_3 + R_4)} &= \frac{5,2 \cdot 10^3 \cdot (1,6 \cdot 10^3 + 3,3 \cdot 10^3) + 1,6 \cdot 10^3 \cdot (2,7 \cdot 10^3 + 5,2 \cdot 10^3)}{5,2 \cdot 10^3 \cdot (1,6 \cdot 10^3 + 3,3 \cdot 10^3) - 1,6 \cdot 10^3 \cdot (2,7 \cdot 10^3 + 5,2 \cdot 10^3)} = 2,97
 \end{aligned}$$

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

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

Номинал ёмкости конденсатора подбираем из стандартного 5% ряда:

$$C = 39 \text{ нФ}.$$

2) Реально полученная частота:

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

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

5. Синтез дешифратора

Дано

Рассчитать дешифратор сегмента «а» индикатора (рис.4). Дешифраторы остальных сегментов синтезируются аналогично.

Согласно таблицы №5 сегмент «а» включается при индикации цифр: 0, 2,3,5,6,7,8,9. Логическое уравнение для этих условий имеет вид:

$$a = \bar{x}_1\bar{x}_2\bar{x}_3\bar{x}_4 \cup \bar{x}_1\bar{x}_2x_3\bar{x}_4 \cup \bar{x}_1\bar{x}_2x_3x_4 \cup \bar{x}_1x_2\bar{x}_3x_4 \cup \bar{x}_1x_2x_3\bar{x}_4 \cup \bar{x}_1x_2x_3x_4 \cup x_1\bar{x}_2\bar{x}_3\bar{x}_4 \cup x_1\bar{x}_2\bar{x}_3x_4. \quad (7)$$

Минимизируем уравнение управления сегментом «а», удалив повторяющиеся состояния. Минимизацию уравнения можно выполнить, используя правила булевой алгебры, диаграммы Вейча, карты Карно. Для функции четырех аргументов удобно воспользоваться картами Карно. Карта Карно для таблицы №5 показана в таблице. 7.

Таблица 7

Карта Карно

		X_3X_4			
		00	01	11	10
X_1X_2	00	1		1	1
	01		1	1	1
	11				
	10	1	1		

Произведя склеивание рядом стоящих единиц по правилам Карно, получим минимизированную функцию управления

$$a = \bar{x}_2\bar{x}_3\bar{x}_4 \cup \bar{x}_1x_3 \cup \bar{x}_1x_2x_4 \cup x_1\bar{x}_2\bar{x}_3. \quad (8)$$

Дешифратор можно построить на базисных логических элементах «И-НЕ» или «ИЛИ-НЕ». Для использования элементов «И-НЕ» уравнение (8) нужно перевести в конъюнктивную форму, а для элементов «ИЛИ-НЕ» - в дизъюнктивную.

Преобразование уравнения (8) в соответствующую форму выполняется с помощью правила де Моргана.

Для элементов «И»: $X + Y = \overline{\bar{X} \cdot \bar{Y}}$.

Для элементов «ИЛИ»: $X \cdot Y = \overline{\bar{X} + \bar{Y}}$.

Преобразуем уравнение (8) для элементов «И-НЕ».

$$\begin{aligned} a &= \bar{x}_2\bar{x}_3\bar{x}_4 \cup \bar{x}_1x_3 \cup \bar{x}_1x_2x_4 \cup x_1\bar{x}_2\bar{x}_3 = \overline{\overline{\bar{x}_2\bar{x}_3\bar{x}_4} \cdot \overline{\bar{x}_1x_3}} \cup \overline{\overline{\bar{x}_1x_2x_4} \cdot \overline{x_1\bar{x}_2\bar{x}_3}} = \\ &= \overline{\overline{\bar{x}_2\bar{x}_3\bar{x}_4} \cdot \overline{\bar{x}_1x_3} \cdot \overline{\bar{x}_1x_2x_4} \cdot \overline{x_1\bar{x}_2\bar{x}_3}} = \overline{\bar{x}_2\bar{x}_3\bar{x}_4 \cdot \bar{x}_1x_3 \cdot \bar{x}_1x_2x_4 \cdot x_1\bar{x}_2\bar{x}_3}. \end{aligned} \quad (9)$$

Схема дешифратора по уравнению (9) показана на рис.20.

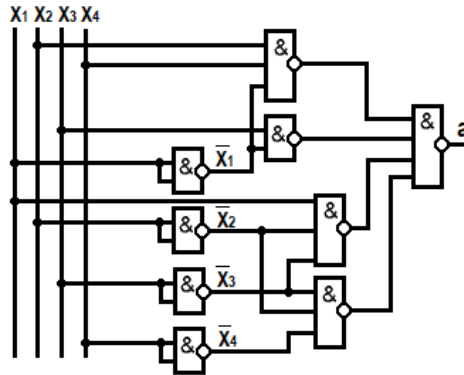


Рис.1. Схема дешифратора сегмента «а» на элементах «И-НЕ»

Для реализации приведенной схемы могут быть использованы микросхемы серии к564: двухвходовая ЛА7; трехвходовая ЛА9 и четырехвходовая ЛА8.

В случае использования логических элементов «ИЛИ-НЕ» уравнение (8) следует преобразовать к виду

$$a = \overline{x_2 \cup x_3 \cup x_4 \cup x_1 \cup \bar{x}_3 \cup x_1 \cup \bar{x}_2 \cup \bar{x}_4 \cup \bar{x}_1 \cup x_2 \cup x_3}.$$

5. 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 $h_{21-э}$?
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 разделительные 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?

Содержание

1. Общие положения.....	3
2. Выбор варианта.....	4
3. Задания курсовой работы.....	4
3.1. Контрольное задание 1.....	4
3.2. Контрольное задание 2.....	7
3.3. Контрольное задание 3.....	10
4. Методические указания к контрольным заданиям.....	11
5. Примеры решения задач.....	23
6. Контрольные вопросы, предлагаемые при защите курсовой работы..	34