

Воронежский институт МВД России  
Кафедра радиотехники и электроники

Кудряш В.И.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

*Учебно-методическое пособие*

Воронеж  
2018

ББК 32.844.02

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры радиотехники и электроники, протокол № 10 от 23 апреля 2018 г.

Рассмотрено и одобрено на заседании методического совета института, протокол № 9 от 21 мая 2018 г.

Рецензенты:

Ушаков В.М. – заместитель начальника штаба ГУ МВД России по Воронежской области, полковник внутренней службы;

Сушков С.А. – главный специалист–метролог УОТО ГУ МВД России по Воронежской области, майор внутренней службы.

**Кудряш, Владлен Иванович.** Проектирование радиоэлектронных устройств: учебно-методическое пособие [Электронный ресурс] / В.И.

Кудряш. – Электр. дан. и прогр. – Воронеж : Воронежский институт МВД России, 2018. – 1 электр. опт. диск (CD-ROM) : 12 см. – Систем. требования: процессор Intel с частотой не менее 1,3 ГГц ; ОЗУ 512 Мб ; операц. система семейства Windows ; CD-ROM дисковод.

Учебно-методическое пособие по курсовому проектированию для курсантов радиотехнического факультета специальностей: 10.05.02 Информационная безопасность телекоммуникационных систем; 11.05.02 Специальные радиотехнические системы; 11.05.04 - Инфокоммуникационные технологии и системы специальной связи. Пособие содержит требования к структуре, содержанию и оформлению курсового проекта, варианты заданий, методические указания по их выполнению, необходимые справочные материалы и список рекомендуемой литературы.

ISBN 978-5-88591-644-8

©Воронежский институт МВД России, 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1.	Цели и задачи курсовой работы	4
1.1.	Основные термины и понятия	4
1.2.	Последовательность разработки электронной аппаратуры	6
1.3.	Стадии разработки курсового проекта	7
1.4.	Состав и правила оформления курсового проекта	9
1.5.	Правила оформления расчетно-пояснительной записки	10
2.	Исходные технические требования	12
2.1.	Варианты заданий курсового проекта	12
2.2.	Варианты формы амплитудно-частотных характеристик УНЧ	14
3.	Методические указания к выполнению курсового проекта	17
3.1.	Определение состава и синтез схемы электрической структурной УНЧ	17
3.2.	Выбор элементной базы и построение схемы электрической функциональной	18
3.3.	Электрический расчет	19
3.4.	Расчет усилителя мощности низкой частоты	20
3.5.	Расчет активных фильтров формирующих амплитудно-частотную характеристику усилителя.	31
3.6.	Расчет входного каскада на базе ОУ	47
4.	Приложения	53
	Приложение 1	53
	Приложение 2	54
	Приложение 3	56
	Приложение 4	60
	Приложение 5	62
	Приложение 6	66
	Приложение 7	69
	Приложение 8	70
	Литература	71

## 1. Цели и задачи курсового проекта

Целью курсового проекта является:

- закрепление и углубление теоретических знаний курсантов;
- получение практических навыков расчета параметров и характеристик усилительных устройств;
- получение практических навыков самостоятельного выбора элементной базы обеспечивающей получение заданных технических показателей разрабатываемого устройства;
- получение практических навыков оформления технической документации.

Курсовой проект выполняется курсантами по индивидуальным заданиям.

На основании задания необходимо провести синтез структурной схемы, выбор элементной базы усилительных и частотно-формирующих каскадов, рассчитать основные параметры и характеристики разработанного устройства.

### 1.1. Основные термины и понятия

В данном разделе даны общие термины и понятия, относящиеся к проектноконструкторской работе.

*Изделие* – любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии.

*Проектирование электронной аппаратуры (ЭА)* – процесс создания проекта – прототипа, прообраза предполагаемого или возможного объекта. Проектирование электронного устройства (ЭУ) – разработка проектной и конструкторской документации, предназначенной для создания новых видов и образцов ЭУ.

Определение термина проектирование отражает две его особенности. Во-первых, в процессе проектирования предполагаемый объект еще не материализуется, а создается лишь его прообраз на другой материальной основе (чертежи и другие документы). Во-вторых, изготовленное по проекту изделие в силу ряда причин (для ЭУ, например, из-за недостаточной точности математических моделей и др.) оказывается неадекватным предполагаемому (задуманному) и, следовательно, является лишь его прототипом.

*Конструирование* – процесс отражения в чертежах структуры, размеров, формы, материалов, обработки и связей (внутренних и внешних) будущего изделия.

Разъясним понятия проектирование и конструирование, поскольку достаточно часто возникают затруднения при их определении. Довольно часто процесс проектирования называют конструированием, и наоборот, что объясняется пересечением этих понятий в процессе разработки и схематично отображено на рис.1.1.

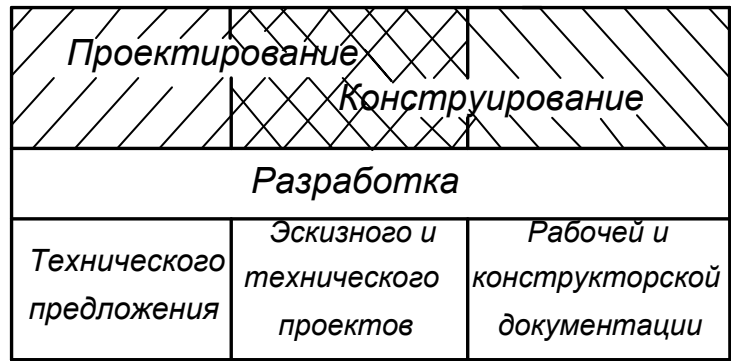


Рис.1.1. Схема взаимосвязи процессов проектирования и конструирования

Обычно, на начальной стадии проектирования изделия, работы практически отсутствуют. Появление конструкторских работ позднее в составе проектных работ может продолжаться и после окончания проектирования, на этапе разработки рабочей конструкторской документации. Таким образом, разработка структурной и принципиальной схем относится к чисто проектным процедурам, а сами схемы – к проектным документам. Например, разработка чертежа общего вида изделия – пример т.е. этап конструирования при проектировании изделия – может быть названа проектированием или конструированием, а чертеж общего вида – проектным или конструкторским документом. Но разработка чертежа – это чисто конструкторская процедура, и рабочий чертеж относится только к конструкторским документам.

Однако, хотя на одних стадиях разработки термины проектирование и конструирование – имеют один и тот же смысл, то на других стадиях проекта такая подмена недопустима.

*Пояснительная записка* – содержит описание устройства, принцип действия изделия и обоснование принятых технических и технико-экономических решений при его разработке.

*Схема* – документ, в котором в виде условных графических изображений или обозначений показаны составные части изделия и связи между ними.

## 1.2. Последовательность разработки электронной аппаратуры

Существуют следующие основные стадии промышленной разработки изделий:

техническое предложение, эскизный проект, технический проект, рабочая конструкторская документация.

*Техническое предложение* – совокупность проектных документов, содержащих обоснование целесообразности разработки изделия на основе анализа ТЗ и различных вариантов возможных решений изделия, сравнительной оценки решений с учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей разрабатываемого и существующих изделий, а также патентных исследований.

Этапы работы: подбор материалов, разработка технического предложения с присвоением документам литеры «П», утверждение технического предложения.

*Эскизный проект* – совокупность конструкторских документов, которые содержат принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы изделия, а также данные, определяющие его назначение, основные параметры и габаритные размеры. Этапы работы: разработка проекта с присвоением документам литеры «Э», изготовление и испытание макетов (при необходимости), утверждение проекта.

*Технический проект* – совокупность конструкторских документов, которые содержат окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве изделия, и исходные данные для разработки рабочей документации. Этапы работы: разработка проекта с присвоением документам литеры «Т», изготовление и испытание макетов (при необходимости), утверждение проекта. Технический проект служит основанием для разработки *рабочей конструкторской документации*, которая содержит необходимые данные для изготовления, испытания, приемки, эксплуатации, транспортирования и хранения изделия. Разработка рабочей документации сочетается с изготовлением по ней последовательно опытных образцов, опытных партий и установочной серии, по результатам испытаний которых проводится корректировка конструкторской документации.

Допускается исключать стадии эскизного или технического проектирования и вести разработку по схемам: техническое предложение – технический проект – рабочая документация, техническое предложение – эскизный проект – рабочая документация.

Указанные стадии определяют наиболее целесообразную организацию проектирования, делят его на уровни. От стадии к стадии объем и стоимость проектных работ увеличиваются, разработка становится все детальнее, все шире определяются различные стороны и свойства ЭА. Можно сказать, деление на стадии изображает проектирование «по вертикали», поскольку базой для каждой последующей стадии разработки служит предыдущая.

Процесс создания ЭУ обычно делят на три основных этапа: системотехническое проектирование, схемотехническое проектирование и конструкторское проектирование что соответствует последовательному изменению состава соответствующих этапов проекта (рис.1.2).

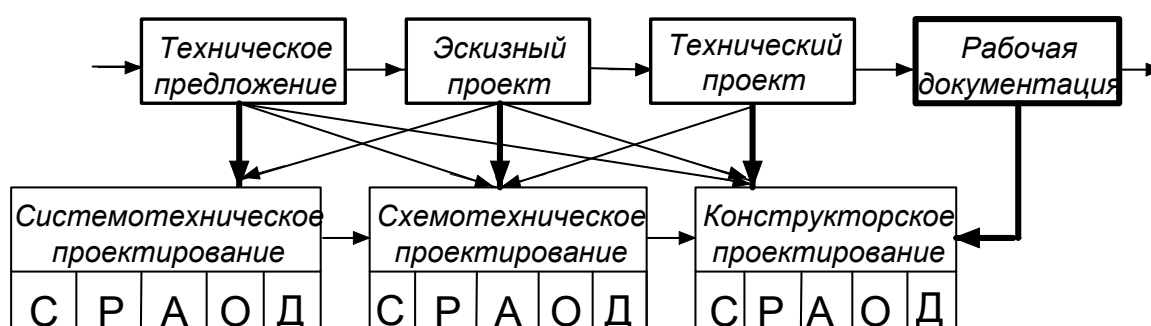


Рис.1.2 Схема последовательности разработки ЭА

Этапы, соответствующие каждой стадии, указаны жирными стрелками. Тонкими стрелками указаны обращения к процедурам других этапов. Например, на первой стадии проекта основной является разработка оптимальной структуры, однако, решение этой задача невозможно без выбора наиболее важных схем элементной базы без определения элементов конструкции. Каждый этап проекта (рис.1.2) содержит последовательное выполнение процедур синтеза - С, расчета - Р, анализа - А, оптимизации - О, выпуска технической документации - Д. Проектирование на каждом этапе возможно неоднократное возвращение к предыдущим процедурам этапа, при невыполнении технических требований. Таким образом, отдельные процедуры, например, расчеты, могут носить итерационный характер.

### 1.3. Стадии разработки курсового проекта

Стадии и этапы промышленного проектирования организационно расчлняют и закрепляют выработанной практикой наиболее логичный путь создания проекта нового изделия. Естественно, разработка курсового проекта

неизбежно ведется тем же путем и по той же схеме (рис.1.2), что и при промышленном проектировании.

Поскольку объектом курсового проектирования является электронное устройство, то курсовое проектирование завершается, как правило, на стадии эскизного проектирования, и содержит, соответственно, только стадии технического предложения и эскизного проекта.

Таким образом, основным содержанием указанных стадий является системотехническое и схемотехническое проектирование (рис. 1.2). Так как стадия технического предложения содержит «...сравнительную оценку решений с учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей...», а стадия эскизного проекта – разработку «...документов, которые содержат принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы изделия...», следовательно, курсовой проект обычно должен содержать элементы конструкторского проектирования.

Примерный перечень выполняемых при этом работ и состав оформляемых при этом документов на всех этапах проектирования приведен в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Примерный перечень работ и документов, выполняемых на каждой стадии проектирования

Стадия	Этап проектирования	Перечень работ	Документ с результатами работ
Техническое предложение	Системотехнический	1. Подбор и изучение литературы	Пояснительная записка
	«	2. Составление обзора по литературным источникам	То же
	«	3. Анализ технического задания	«
	«	4. Разработка структурной схемы	Структурная схема
	Схемотехнический	5. Выбор элементной базы	Пояснительная записка

Стадия	Этап проектирования	Перечень работ	Документ с результатами работ
--------	---------------------	----------------	-------------------------------

Эскизный проект	Схемотехнический	6. Дополнение принципиальной схемы элементами управления, контроля и защиты	Пояснительная записка
	«	7. Расчет параметров элементов схемы	То же
	«	8. Составление перечня элементов схемы	Принципиальная схема
	«	9. Другие расчеты (если указаны в ТЗ)	Пояснительная записка
	Конструкторский	10. Разработка печатной платы	Чертежи детали
	«	11. Разработка ячейки (если указана в ТЗ)	Сборочный чертеж
	«	12. Компоновка электронного устройства	Чертеж общего вида
	«	13. Разработка таблицы составных частей изделия	Пояснительная записка или чертеж общего вида

#### 1.4. Состав и правила оформления курсового проекта

Курсовой проект является учебным проектом, но для приобретения правильных навыков разработки конструкторской документации входящие в него документы следует изготавливать в строгом соответствии с требованиями ЕСКД. В курсовой проект не следует включать конструкторские документы, разработка которых не имеет творческого характера, например, такие, как ведомость документов проекта и спецификации.

В настоящее время состав и объем курсовых проектов по ЭУ в различных вузах примерно одинаков – это пояснительная записка и 2-4 листа формата А1-А3 со схемами и чертежами.

Расчетно-пояснительная записка курсового проекта обычно содержит следующие разделы:

1. обзор электронных устройств (ЭУ) данного класса по литературным источникам;
2. анализ технического задания и синтез структурной схемы ЭУ;
3. синтез функциональной схемы ЭУ;
4. разработка схемы электрической принципиальной ЭУ;

5. электрический расчет ЭУ;
6. компоновка печатного узла и всего ЭУ;
7. приложения;
8. список литературы.

Средний объем записки 25-35 страниц. ВАХ, нагрузочные прямые, спецификации, рисунки, встречающиеся в тексте, рисуются на миллиметровой бумаге или оформляются в соответствующем графическом редакторе и входят в состав раздела 1.5.

Графическая часть курсового проекта обычно включает следующие чертежи:

1. чертеж схемы электрической структурной (А3);
2. чертеж схемы электрической функциональной (А3);
3. чертеж схемы электрической принципиальной (А3);
4. чертеж печатной платы (А3);
5. чертеж печатного узла (А3).

Содержание и объем пояснительной записки и графической части курсового проекта определяется заданием на курсовой проект.

### **1.5. Правила оформления расчетно-пояснительной записки**

Расчетно-пояснительная записка (РПЗ) оформляется на листах формата А4 (279х 210 мм) по ГОСТ 2.304-81 каллиграфическим подчерком чернилами или пастой (допускается чёрный, синий и фиолетовый цвета). Текст следует писать, соблюдая размеры полей: слева – 30 мм, справа – 10 мм, сверху – 15 мм, снизу – 20 мм.

Каждый раздел РПЗ следует начинать с нового листа. Заголовки разделов должны быть краткими и оформляются прописными буквами без переноса слов симметрично тексту. Заголовки подразделов пишут с абзаца (15-17 мм) строчными буквами (кроме первой прописной). Точку в конце заголовка не ставят и не подчеркивают. Заголовки от текста выделяются интервалом 15 мм.

Страницы РПЗ нумеруются арабскими цифрами. Номер ставится в правом верхнем углу. Титульный лист включают в общую нумерацию, но номер на нем не ставят. Образец оформления титульного листа курсового проекта приведен в разделе 4 (см. приложение 1).

Разделы должны иметь порядковую нумерацию в пределах РПЗ и обозначаться арабскими цифрами с точкой в конце.

Подразделы нумеруются цифрами в пределах каждого раздела. Номер подраздела состоит из номера раздела и подраздела, разделенных точкой.

Рисунки выполняются черной тушью, черными чернилами или простым карандашом на белой бумаге или миллиметровке и размещаются в приложении после первого упоминания о них в тексте. *Рисунки должны иметь наименование, которое помещают под рисунком.*

Рисунки, размер которых больше формата А4, складывают до формата А3 и учитывают как одну страницу.

Ссылки на ранее упомянутые иллюстрации приводятся сокращенным словом «смотри», например, «см. рис. 5, приложение б».

При выполнении расчетов необходимо в формулу подставить значения символов, коэффициентов в той последовательности, в которой они приведены в формуле и привести результат вычислений.

Список используемых источников должен содержать перечень источников, используемых при выполнении проекта. Источники следует располагать в алфавитном порядке.

Приложения оформляют как продолжение пояснительной записки, располагая их в порядке появления ссылок на них в тексте.

## 2. Исходные технические требования

Номер варианта курсового проекта и исходные технические требования для его выполнения указаны в соответствующих ячейках таблицы 2.1 и определяют индивидуальное задание на курсовой проект.

### 2.1. Варианты заданий курсового проекта

Таблица 2.1

№ варианта	U <sub>вх</sub> , 10 <sup>-3</sup> В	R <sub>вх</sub> , 10 <sup>3</sup> Ом, не менее	Форма АЧХ	Частоты среза АЧХ				Кн, дБ в полосе пропускания	Rн, Ом	Pн, ВА	Uн, В	Режим работы транзисторов ОК УМ
				f1, Гц	f2, Гц	f3, кГц	f4, кГц					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	12	12	Рис.1	15	160	3,50		55	6			АВ
2	160	180	Рис.2	24	510	3,6			15		11	В
3		27	Рис.3	16	510	5,1	13	51	20	6		В
4	30	43	Рис.4	90	510	5,1		46	4			АВ
5	200	110	Рис.5	49	820	4,1	20		25		9	АВ
6		91	Рис.6	20	130	1,1	10,5	41	8	12		В
7	300	75	Рис.7	1800	5100	11		27	6			В
8	90	110	Рис.1	60	620	9,1			10		5	АВ
9		33	Рис.2	120	1800	15		53	50	0,8		АВ
10	82	47	Рис.3	27	750	6,8	17	42	16			АВ
11	150	240	Рис.4	10	50	0,62			28		9,5	АВ
12		51	Рис.5	23	710	2,9	11	47	18	7		В
13	300	160	Рис.6	10	82	610	6,2	32	16			АВ
14	70	15	Рис.7	1000	3100	7,1			6		8,5	В
15		56	Рис.1	100	1100	16		48	30	4		АВ
16	100	82	Рис.2	75	910	7,5		40	14			В
17	60	47	Рис.3	51	1200	10	27		5		8	В
18		75	Рис.4	20	220	2,2		46	20	2,5		АВ
19	140	110	Рис.5	15	600	2,5	8,5	33	50			АВ
20	80	68	Рис.6	33	240	2,1	22,5		16		10	АВ
21		16	Рис.7	3000	12000	25		26	30	3		АВ
22	25	33	Рис.1	30	330	6,2		50	6			АВ
23	25	18	Рис.2	91	1200	9,1			25		9	АВ
24		91	Рис.3	21	620	5,6	15	35	15	6		АВ
25	120	150	Рис.4	15	70	0,75		38	8			В
26	40	62	Рис.5	36	760	3,5	16,5		16		9,5	АВ
27		51	Рис.6	24	180	1,65	15,5	49	12	9		АВ
28	330	22	Рис.7	1400	4300	18,1		23	10	5		АВ
29	50	82	Рис.1	80	820	12			16		7	АВ
30		75	Рис.2	45	680	5,1		45	10	7		В

Продолжение таблицы 2.1

№ варианта	U <sub>вх</sub> , 10 <sup>-3</sup> В	R <sub>вх</sub> , 10 <sup>3</sup> Ом, не менее	Форма АЧХ	Частоты среза АЧХ				Кн, дБ в полосе пропускания	Rн, Ом	Rн, ВА	Uн, В	Режим работы транзисторов ОК УМ
				f1, Гц	f2, Гц	f3, кГц	f4, кГц					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
31		91	Рис.6	20	130	1,1	10,5	41	8	12		В
32	350	75	Рис.7	1800	5100	11		27	6			В
33	90	120	Рис.1	60	620	9,1			10		5	АВ
34		15	Рис.2	120	1800	15		53	50	0,8		АВ
35	80	51	Рис.3	27	750	6,8	17	42	16			АВ
36	150	220	Рис.4	10	50	0,62			28		9,5	АВ
37		47	Рис.5	23	710	2,9	11	47	18	7		В
38	300	160	Рис.6	10	82	610	6,2	32	16			АВ
39	70	15	Рис.7	1000	3100	7,1			6		8,5	В
40		56	Рис.1	100	1100	16		48	30	4		АВ
41	100	82	Рис.2	75	910	7,5		40	14			В
42	60	47	Рис.3	51	1200	10	27		5		8	В
43		68	Рис.4	20	220	2,2		46	20	2,5		АВ
44	200	130	Рис.5	15	600	2,5	8,5	33	50			АВ
45	80	51	Рис.6	33	240	2,1	22,5		16		10	АВ
46		16	Рис.7	3000	12000	25		26	30	3		АВ
47	25	33	Рис.1	30	330	6,2		50	6			АВ
48	25	18	Рис.2	91	1200	9,1			25		9	АВ
49		100	Рис.3	21	620	5,6	15	35	15	6		АВ
50	120	150	Рис.4	15	70	0,75		38	8			В
51	40	62	Рис.5	36	760	3,5	16,5		16		9,5	АВ
52		51	Рис.6	24	180	1,65	15,5	49	12	9		АВ
53	450	22	Рис.7	1400	4300	18,1		23	10	5		АВ
54	50	82	Рис.1	80	820	12			16		7	АВ
55		56	Рис.2	45	680	5,1		45	10	7		В
56	15	10	Рис.1	15	160	3,50		55	6			АВ
57	150	200	Рис.2	24	510	3,6			15		11	В
58		27	Рис.3	16	510	5,1	13	51	20	6		В
59	30	43	Рис.4	90	510	5,1		46	4			АВ
60	200	110	Рис.5	49	820	4,1	20		25		9	АВ

Форма амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) разрабатываемого усилителя низкой частоты (УНЧ) определяется в соответствии с номером рисунка указанного в индивидуальном задании и приведенного в п.2.2 вариантов заданий курсового проекта.

## 2.2. Варианты формы амплитудно-частотных характеристик УНЧ

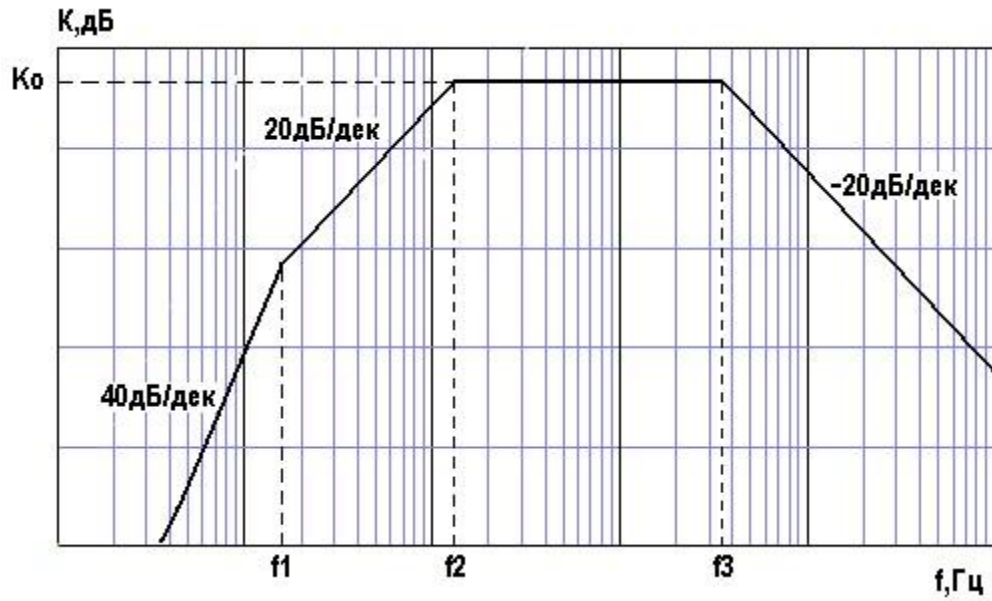


Рис. 2.1. АЧХ

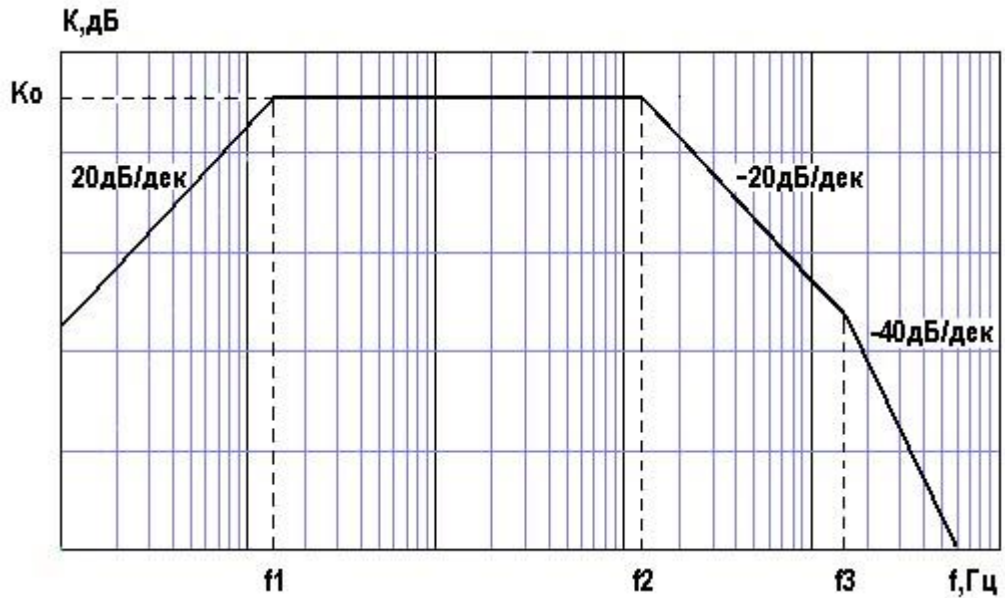


Рис.2.2. АЧХ

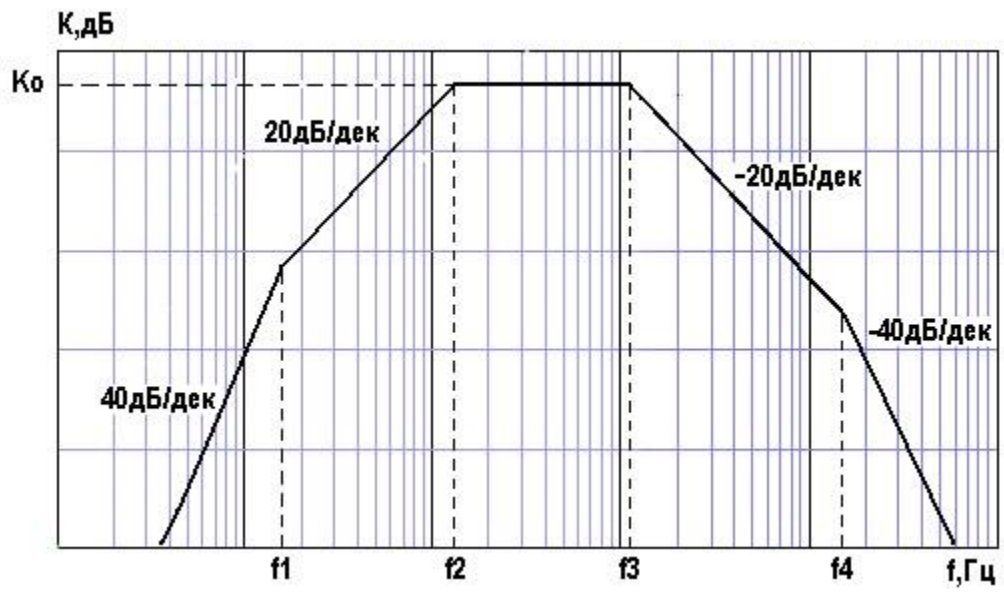


Рис.2.3. АЧХ

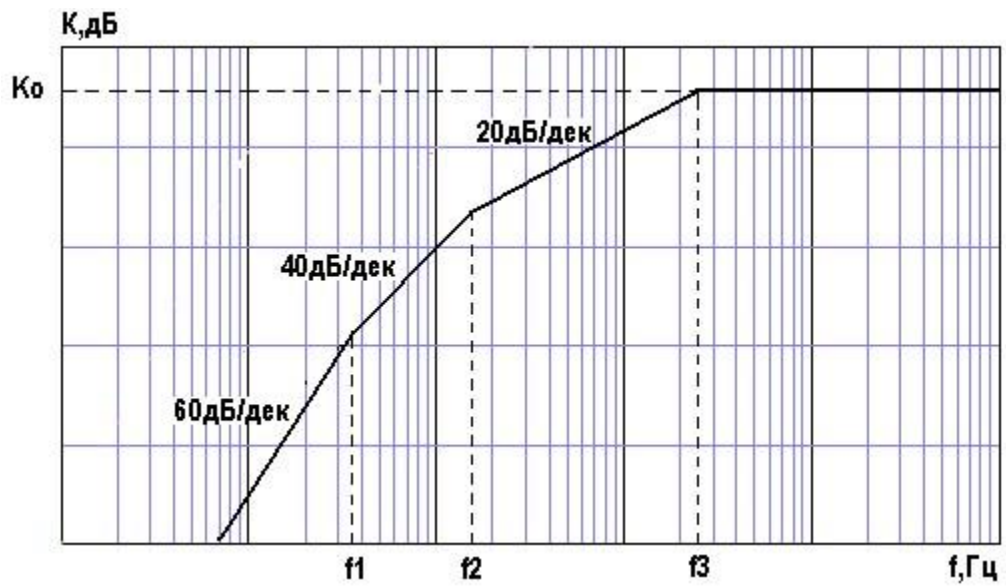


Рис.2.4. АЧХ

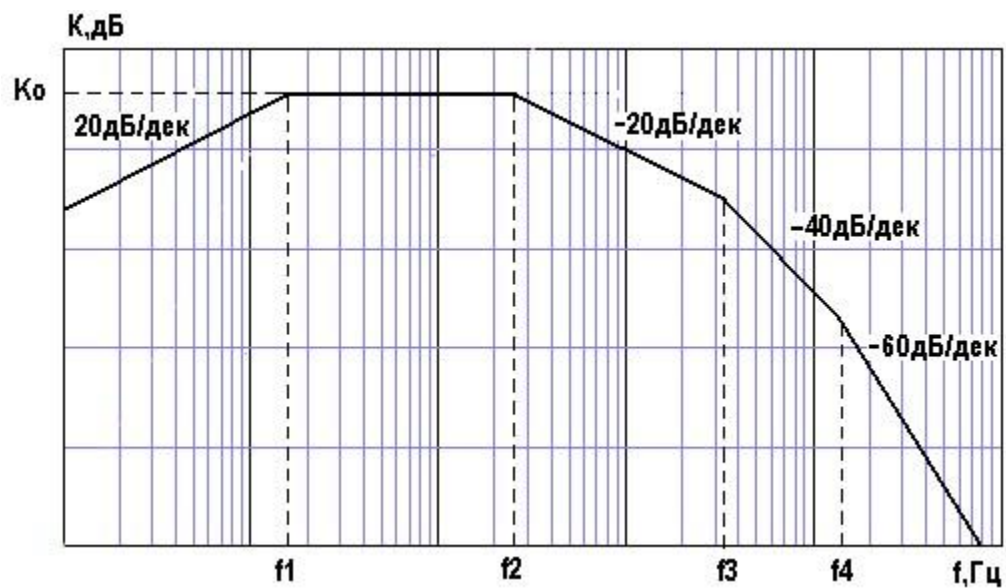


Рис.2.5.

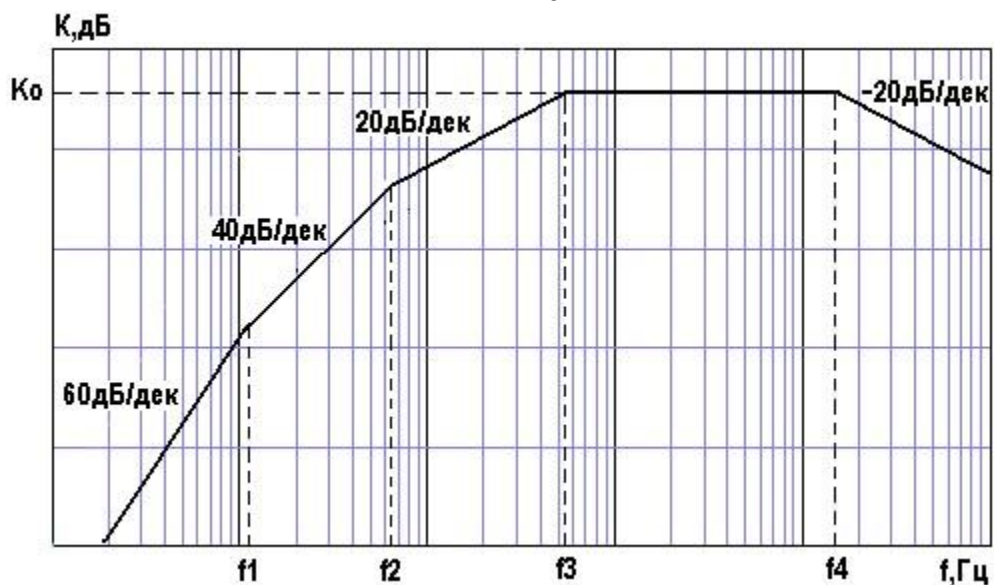


Рис.2.6. АЧХ

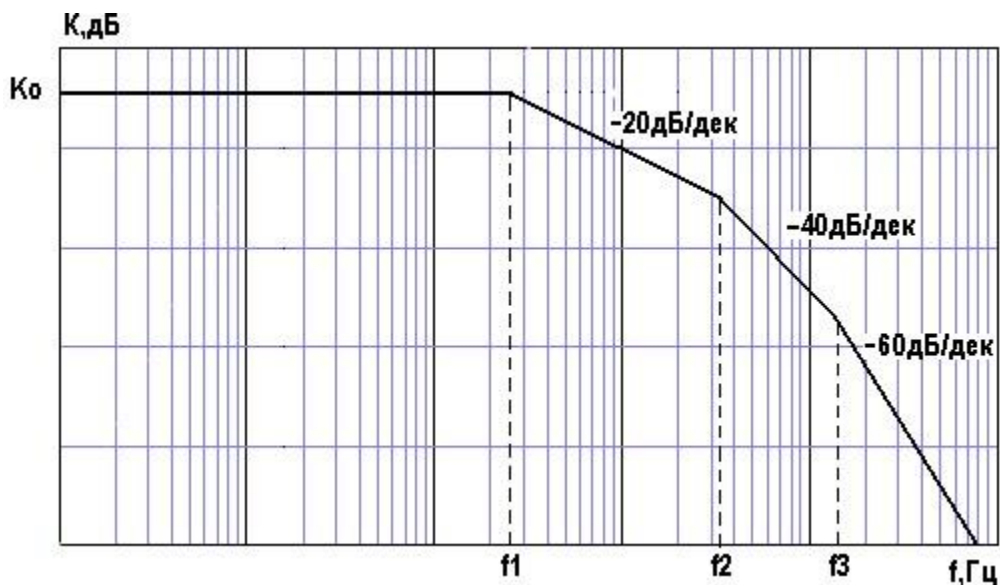


Рис.2.7. АЧХ

### 3. Методические указания к выполнению курсового проекта

#### 3.1. Определение состава и синтез схемы электрической структурной УНЧ

Для обеспечения заданных параметров и характеристик разрабатываемого устройства состав и построение схемы электрической структурной производим на основе следующих соображений:

1. Формирование амплитудно-частотной характеристики УНЧ обеспечиваем соответствующими активными RC-фильтрами первого порядка с частотами среза  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  и  $f_4$ ;

2. Требуемое значение мощности в нагрузке УНЧ обеспечиваем выходным бестрансформаторным услителем мощности (УМ);

3. Требуемое значение входного сопротивления и большая часть коэффициента усиления по напряжению УНЧ обеспечивается входным каскадом.

4. В качестве усилительных элементов во всех каскадах, кроме выходного, используем операционные усилители.

Схема электрическая структурная УНЧ, синтезированная на основе изложенных принципов, представлена на рис.3.1.1.

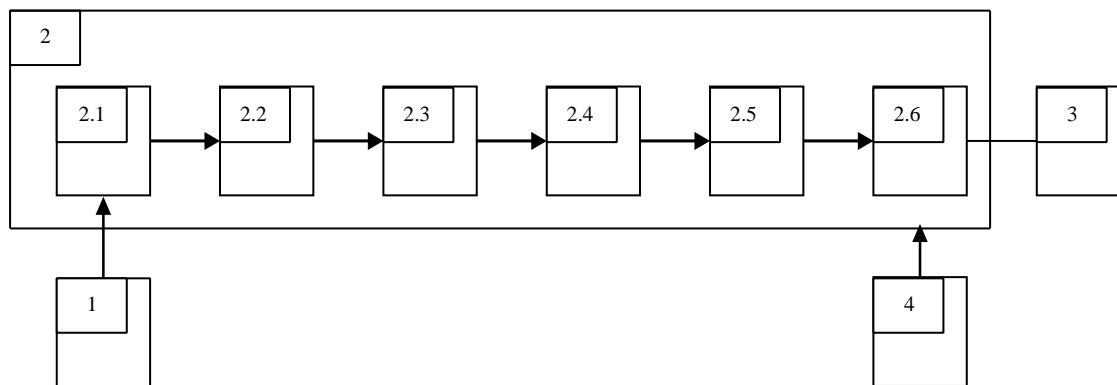


Рис. 3.1. Схема электрическая структурная УНЧ:

1 – Источник сигнала; 2 – Усилитель; 2.1 – Входной каскад; 2.2 -ФВЧ1; 2.3 -ФВЧ2; 2.4-ФНЧ; 2.5 - Предоконечный каскад усилителя мощности; 2.6 - Оконечный каскад усилителя мощности; 3 - Нагрузка; 4 - Источник питания

### 3.2. Выбор элементной базы и построение схемы электрической функциональной

Для обеспечения заданного значения мощности в нагрузке выбираем двухтактный выходной каскад на комплементарной паре транзисторов. Коэффициент усиления по напряжению такого каскада близок к 1 поэтому необходимую амплитуду напряжения обеспечивает предоконечный каскад УМ, выполненный на ОУ в инвертирующем включении. Для снижения нелинейных искажений в нагрузке используем отрицательную обратную связь, охватывающую окончательный и предоконечный каскады усилителя мощности.

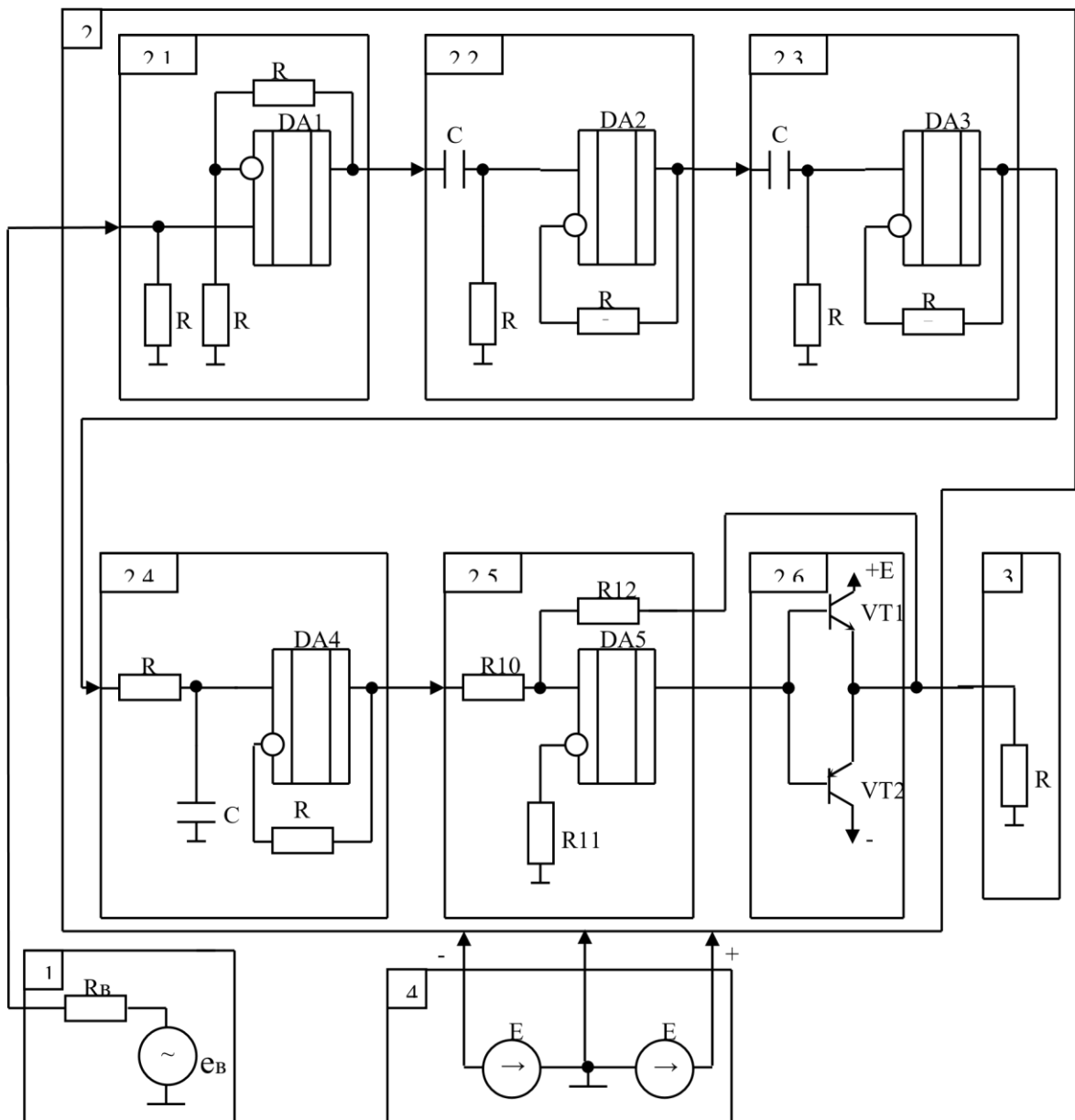


Рис. 3.2. Схема электрическая функциональная УНЧ:

1 – Источник сигнала; 2 – Усилитель; 2.1 – Входной каскад на базе неинвертирующего включения ОУ; 2.2 - Активный фильтр верхних частот первого порядка на основе ОУ; 2.3 - Активный фильтр верхних частот первого порядка на основе ОУ; 2.4 - Активный фильтр нижних частот первого порядка на основе ОУ; 2.5 - Предоконечный каскад усилителя мощности на ОУ в инвертирующем включении; 2.6 - Оконечный каскад усилителя мощности на биполярных транзисторах; 3 - Нагрузка; 4 - Источник питания

Амплитудно-частотную характеристику устройства формируем путем последовательного включения активных фильтров первого порядка на основе операционных усилителей с RC цепями. Частоты среза фильтров  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  и  $f_4$  рассчитываются в соответствии с техническим заданием. Коэффициенты передачи фильтров в полосе пропускания выбираем равными 1 для целей согласования каскадов фильтров по уровням входных и выходных напряжений.

Использование операционного усилителя в неинвертирующем включении в качестве входного каскада позволяет легко обеспечить заданное значение входного сопротивления усилителя путем соответствующего выбора сопротивления резистора подключенного к неинвертирующему входу ОУ. Заданное значение коэффициента усиления по напряжению определяем параметрами цепи отрицательной обратной связи.

Требуемое значение амплитуды напряжения на входе окончного каскада усилителя мощности обеспечим соответствующим выбором операционного усилителя согласованного по выходным параметрам с входным сопротивлением и требуемой амплитудой напряжения на входе предоконечного каскада.

Схема электрическая функциональная усилителя, сформированная на основе изложенных принципов, показана на рис. 3.2.

### 3.3. Электрический расчет

#### Исходные данные для расчета:

Входное сопротивление:  $R_{вх} = 10 \text{ кОм}$ ;

Коэффициент усиления по напряжению:  $K_{воп} = 10$ ;

Сопротивление нагрузки:  $R_{н} = 50 \text{ Ом}$ ;

Мощность в нагрузке:  $P_{н} = 350 \text{ мВт}$ ;

Нижняя граничная частота АЧХ:  $f_{н} = 300 \text{ Гц}$ ;

Верхняя граничная частота АЧХ:  $f_{в} = 3 \text{ кГц}$ ;

Режим работы окончных транзисторов: В (АВ).

### 3.4. Расчет усилителя мощности низкой частоты

Электрический расчет разрабатываемого устройства следует начинать с последнего блока схемы электрической функциональной, т.е. с расчета оконечного каскада усилителя мощности (ОК УМ).

В результате расчета ОК УМ должны быть получены данные, необходимые для расчета предыдущего каскада - предоконечного усилителя, т.е. блока 2.5 схемы электрической функциональной (см. рис. 3.2).

#### Пример расчета оконечного каскада усилителя мощности

Схемы электрические принципиальные двухтактных бестрансформаторных ОК УМ на комплементарных парах биполярных транзисторов представлены на рис.3.3.

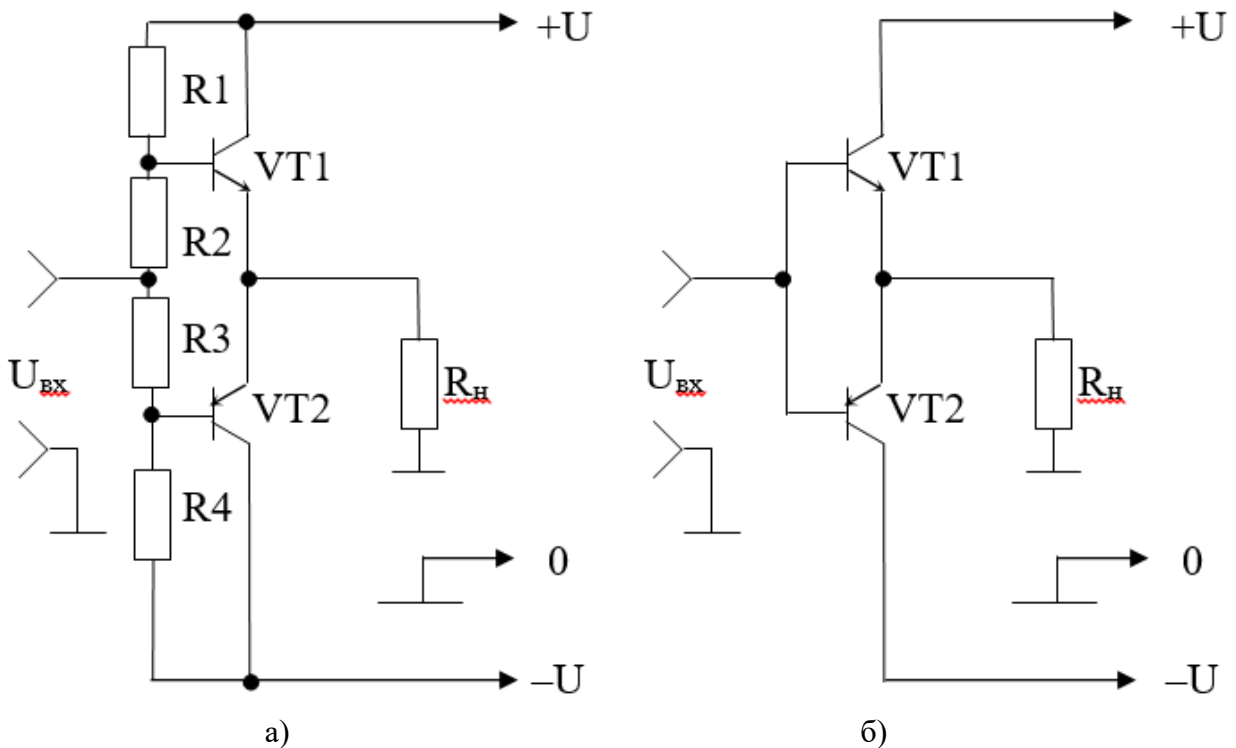


Рис. 3.3. Схемы электрические принципиальные ОК УМ для разных режимов работы транзисторов: а) - режим В; б) – режим АВ

Определяем значение амплитуды тока нагрузки для номинального заданного значения выходной мощности:

$$I_m = \sqrt{\frac{2P_H}{R_H}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,35}{50}} \cong 0,118A;$$

Вычисляем значение амплитуды напряжения на нагрузке для номинального заданного значения выходной мощности:

$$U_m = \sqrt{2P_H \cdot R_H} = \sqrt{2 \cdot 0,35 \cdot 50} \cong 5,92 \text{ В.}$$

Находим величину напряжения одного плеча источника питания с предварительным учетом падения напряжения  $U_{кэ}$  при двух полярном питании выходного каскада:

$$E' = 1,25U_m = 1,25 \cdot 5,95 = 7,4 \text{ В.}$$

Выбираем ближайшее значение из стандартного ряда напряжений:  $E = 9\text{В}$ .

Определяем максимальное значение мощности, рассеиваемой коллектором транзистора выходного каскада при его работе в режиме В:

$$P_{к \text{ макс}} = \frac{E^2}{\pi^2 |z_H| \cos \varphi} = \frac{9^2}{3,14^2 \cdot 50 \cdot \cos 0^0} = 0,165 \text{ Вт,}$$

где  $|z_H|$  – модуль сопротивления нагрузки;  $\varphi$  – угол сдвига фаз между током и напряжением в нагрузке (для чисто активной нагрузки  $\varphi = 0^0$ ).

При задании работы транзисторов выходного каскада в режимах АВ максимальное значение мощности, рассеиваемой коллектором транзистора находим из выражения:

$$P_{к \text{ макс}} = I_{к0} \cdot E + \frac{E^2}{\pi^2 |z_H| \cos \varphi},$$

где  $I_{к0} = (0,05-0,1)I_m$  выбранное значение тока покоя (тока в рабочей точке) транзисторов выходного каскада.

$$P_{к \text{ макс}} = 0,118 \cdot 0,1 \cdot 9 + 9^2 / (3,14^2 \cdot 50 \cdot \cos 0^0) = 0,272 \text{ Вт.})$$

Определяем допустимые значения тока, напряжения, рассеиваемой мощности и частотных свойств для транзисторов выходного каскада:

а) при их работе в режиме В

$$I_{к доп} \geq 1,25I_m = 1,25 \cdot 0,118 = 0,15 \text{ А};$$

$$U_{кэ доп} \geq 2,15E = 2,15 \cdot 9 = 19,35 \text{ В};$$

$$P_{к доп} \geq 1,2 P_{к макс} = 1,2 \cdot 0,165 = 0,198 \text{ Вт}$$

б) при их работе в режиме АВ

$$P_{к доп} \geq 1,2 P_{к макс} = 1,2 \cdot 0,272 = 0,326 \text{ Вт}$$

Возможность использования биполярных транзисторов по их частотным свойствам определяем из соотношения:

$$f_1/h_{21э} > f_B = 3 \cdot 10^3 \text{ Гц},$$

где  $f_1$  - частота единичного коэффициента усиления по току транзисторов оконечного каскада,  $h_{21э}$  - статический коэффициент усиления по току транзистора в схеме с общим эмиттером.

На основе анализа паспортных данных (табл. П.2.1) выбираем комплементарную пару транзисторов КТ503Б и КТ502Б: КТ503Б – тип n-p-n,  $P_{к доп} = 350 \text{ мВт}$ ,  $U_{кэ доп} = 40 \text{ В}$ ,  $I_{к доп} = 150 \text{ мА}$ ,  $h_{21э} = 80 \dots 240$ ,  $f_1 = 5 \text{ МГц}$ ; КТ502Б – тип p-n-p,  $P_{к доп} = 350 \text{ мВт}$ ,  $U_{кэ доп} = 40 \text{ В}$ ,  $I_{к доп} = 150 \text{ мА}$ ,  $h_{21э} = 80 \dots 240$ ,  $f_1 = 5 \text{ МГц}$ .

Для проверки полученных значений параметров выходного каскада производим построение нагрузочной прямой и кусочно-линейной аппроксимации выходных ВАХ транзистора КТ503Б. Используя сведения о параметрах транзисторов находим напряжение насыщения  $U_{кэ нас} = 0,2 \text{ В}$  (типовое) при  $I_{к нас} = 10 \text{ мА}$  и  $I_{б нас} = 1 \text{ мА}$ . На основании полученных значений определяем крутизну линии критического режима, величину амплитуды тока базы, соответствующую максимальному значению амплитуды тока нагрузки, значение тока коллектора для построения нагрузочной прямой:

$$S_{кр} = \frac{I_{к нас}}{U_{кэ нас}} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{0,2} = 0,05 \text{ А/В};$$

$$I_{\text{бm}} \approx \frac{I_m}{h_{21\text{э мин}}} = \frac{0,118}{80} = 1,48 \cdot 10^{-3} \text{ А};$$

$$I_{\text{кн}} = \frac{E}{R_n} = \frac{9}{50} = 0,18 \text{ А}.$$

Для построения линии критического режима полагаем  $I_{\text{к нас}}^* = 0,2 \text{ А}$ , тогда:

$$U_{\text{кэ нас}}^* = I_{\text{к нас}}^* / S_{\text{кр}} = 0,2 / 0,05 = 4 \text{ В}.$$

По найденным точкам производим построение линий критического режима и нагрузочной прямой. Результаты построения показаны на рис.3.4.

По результатам построения из рис.3.4. определяем максимальное значение тока коллектора  $I_{\text{к макс}} = 0,128 \text{ А}$  и минимальное значение напряжения  $U_{\text{кэ мин}} = 2,6 \text{ В}$ .

Определяем максимальное значение тока базы:

$$I_{\text{б макс}} = I_{\text{к макс}} / h_{21\text{э мин}} = 0,128 / 80 = 0,0016 \text{ А} = 1,6 \text{ мА}.$$

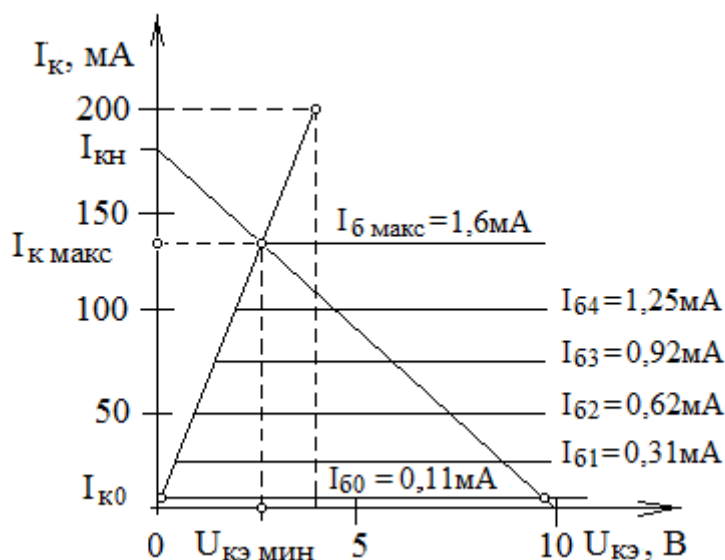


Рис. 3.4. Линейно-кусочная аппроксимация выходной ВАХ транзистора КТ503Б и линия нагрузки.

При отсутствии экспериментальных входной и проходной ВАХ выбранных транзисторов их линейно-кусочную аппроксимацию можно построить с учетом следующих соображений:

$$I_K = I_{S0} \cdot [\exp(U_{бэ}/\varphi_T - 1)],$$

где  $I_{S0}$  – обратный ток коллектора (для КТ503 -  $I_{S0} \leq 1$  мкА),  $\varphi_T$  – термический потенциал (для нормальных условий  $\varphi_T = 26$  мВ), получим, что для  $I_{K \text{ макс}} = 0,128$  А значение  $U_{бэ \text{ макс}} = 0,305$  В.

Находим значение тока  $I_{K0}$ , соответствующее точке покоя:

$$I_{K \text{ макс}}/15 \leq I_{K0} \leq 0,95(I_{K \text{ макс}} - I_m);$$

$$0,128/15 \leq I_{K0} \leq 0,95(0,128 - 0,118);$$

$$8,5 \cdot 10^{-3} \leq I_{K0} \leq 9,5 \cdot 10^{-3}$$

По выбранному значению  $I_{K0} = 9$  мА вычисляем соответствующее ему значение

$$U_{бэ0} = 0,237 \text{ В.}$$

Определяем изменение напряжения базы  $\Delta U_{бэм}$ , соответствующее максимальному значению тока базы:

$$\Delta U_{бэ \text{ макс}} = U_{бэ \text{ макс}} - U_{бэ0} = 0,305 - 0,237 = 0,068 \text{ В.}$$

Находим значение тока  $I_{б0}$ , соответствующее точке покоя:

$$I_{б0} = I_{K0} / h_{21э \text{ мин}} = 9 / 80 = 0,11 \text{ мА.}$$

Линейно-кусочная аппроксимация входной и проходной ВАХ для транзистора КТ503Б, построенная по найденным значениям характерных точек, представлена на рис.3.5.

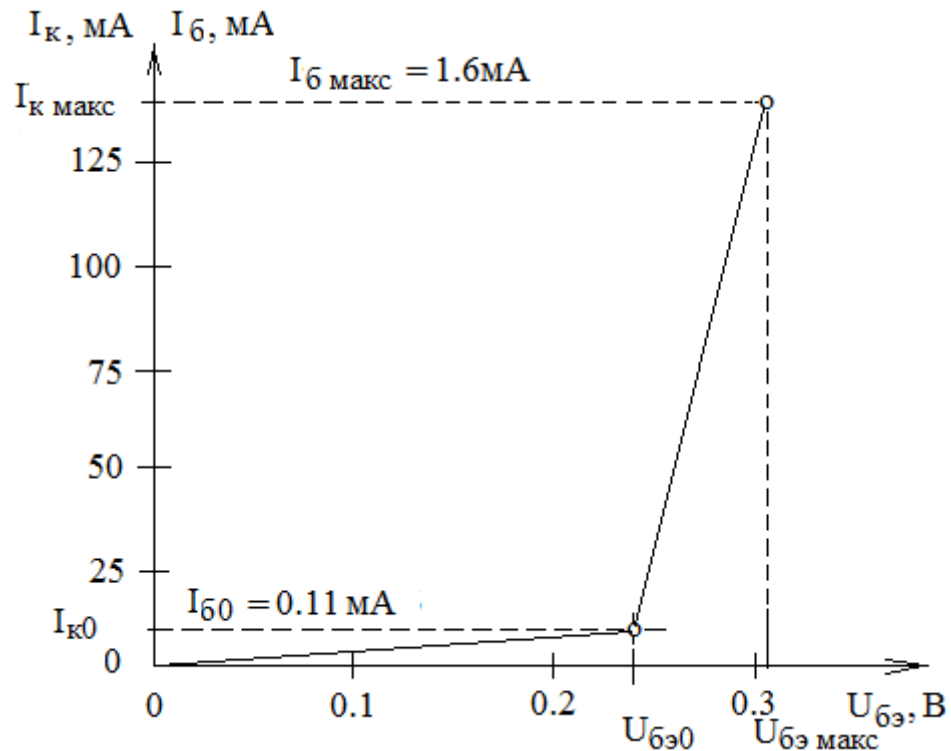


Рис. 3.5. Линейно-кусочная аппроксимация входной и проходной ВАХ транзистора КТ503Б

Определяем амплитуду входного напряжения оконечного каскада используя полученные данные:

$$U_{вх.ок} = U_m + \Delta U_{бэ макс} = 5,92 + 0,068 = 5,988 \text{ В},$$

Максимальная мощность, отдаваемая в нагрузку:

$$P_{н макс} = \frac{(E - U_{кэ мин}) I_{к макс}}{2} = \frac{(9 - 2,6) \cdot 0,128}{2} = 0,41 \text{ Вт}.$$

Повторно проверяем выполнение условий выбора транзисторов:

$$I_{к макс} < I_{к макс доп}; \quad 0,128 \text{ А} < 0,150 \text{ А};$$

$$P_n \leq P_{н макс}; \quad 0,35 \text{ Вт} \leq 0,4 \text{ Вт}.$$

Откуда следует, что максимальное значение тока коллектора транзистора не превышает допустимого значения, т.е. транзисторы и режим их работы выбраны верно и обеспечивают заданные технические параметры выходного каскада

Определяем номинальные значения сопротивлений резисторов делителя задающего напряжение смещения базы:

$$R_1 = R_4 = (E - U_{бэ0})/10I_{б0} = (9 - 0,237)/(10 \cdot 0,11 \cdot 10^{-3}) = 7,9 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$R_2 = R_3 = U_{бэ0}/9I_{б0} = 0,237/(9 \cdot 0,11 \cdot 10^{-3}) = 239 \text{ Ом}.$$

Выбираем номиналов резисторов из стандартного 5% ряда (табл. П.3.1)  
 $R_1 = R_4 = 8,2 \text{ кОм}$ ,  $R_2 = R_3 = 240 \text{ Ом}$ .

Находим максимальные значения мощностей рассеивания резисторов делителя  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$ :

$$P_{R_1} = P_{R_4} = (E - U_{бэ0}) \cdot 10I_{б0} = (9 - 0,237) \cdot 10 \cdot 0,11 \cdot 10^{-3} = 9,6 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$P_{R_2} = U_{бэ0} \cdot 9I_{б0} = 0,237 \cdot 9 \cdot 0,11 \cdot 10^{-3} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}.$$

Выбираем типы и мощность резисторов (табл. П.3.3), входящих в состав схемы:

- $R_1$  - C2-1-0,125-8,2 кОм $\pm$ 5%;
- $R_2$  - C2-1-0,125-240 кОм $\pm$ 5%;
- $R_3$  - C2-1-0,125-240 кОм $\pm$ 5%;
- $R_4$  - C2-1-0,125-8,2 кОм $\pm$ 5%.

Вычисляем приведенное ко входу оконечного каскада сопротивление делителя  $R_1 \dots R_4$ :

$$R_d \approx R_1 \cdot R_4 / (R_1 + R_4) = 8,2 \cdot 10^3 \cdot 8,2 \cdot 10^3 / (8,2 \cdot 10^3 + 8,2 \cdot 10^3) = 4,1 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Вычисляем входное сопротивление оконечного каскада:

- в режиме В

$$R_{\text{вх ок В}} \approx R_{\text{н}}(h_{21э \text{ мин}} + 1) = 50(80 + 1) = 4050 \text{ Ом}.$$

Исходя из полученного значения  $R_{вх}$ , в предварительном усилителе можно использовать операционные усилители с допустимой величиной сопротивления нагрузки  $R_{н\ min} \leq 4,05\ \text{кОм}$ ;

- в режиме А-В следует учесть приведенное сопротивление делителя  $R_d$

$$R_{вх\ \text{ок}\ \text{АВ}} \approx R_{вх\ \text{ок}\ \text{В}} \cdot R_d / (R_{вх\ \text{ок}\ \text{В}} + R_d) =$$

$$= 4,05 \cdot 10^3 \cdot 4,1 \cdot 10^3 / (4,05 \cdot 10^3 + 4,1 \cdot 10^3) = 2,04 \cdot 10^3\ \text{Ом}.$$

Полученное значение  $R_{вх}$ , используется для выбора операционного усилителя по допустимому сопротивлению нагрузки для использования в предоконечном каскаде усилителя мощности. Таким образом, в данном случае можно использовать операционные усилители с допустимым сопротивлением нагрузки  $R_{н\ min} \leq 2,04\ \text{кОм}$ . В противном случае следует либо выбрать другой операционный усилитель, либо использовать в выходном каскаде транзисторы с большими значениями коэффициентов усиления по току, или использовать в выходном каскаде составные эмиттерные повторители.

### **Пример расчета предоконечного каскада усилителя мощности**

Производим выбор операционного усилителя параметры которого обеспечат выполнение требований технического задания и результатов расчета оконечного каскада УМ.

Определяем требования к частоте единичного усиления операционного усилителя ( $f_{1\text{ОУ}}$ ) и к максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ  $V_{\text{макс}}$ :

$$f_{1\text{ОУ}} = 50K_{\text{Уос}} \cdot f_{\text{в}} = 50 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 10^3 = 1,5 \cdot 10^6\ \text{Гц};$$

$$V_{\text{макс}} \geq 2\pi f_{\text{в}} \cdot U_{\text{м}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 10^3 \cdot 5,92 = 0,11 \cdot 10^6\ \text{В/с} = 0,11\ \text{В/мкс}.$$

С учетом полученных значений параметров на основе паспортных данных (например: табл. П.2.2) выбираем ОУ К1407УД1 со следующими параметрами:

$$U_{\text{пит}} = \pm (1,2 \dots 13,2)\text{В};$$

$$K_{\text{u}} = 10 \cdot 10^3;$$

$$I_{\text{вх}} = 10 \cdot 10^{-6}\ \text{А};$$

$$f_1 = 20 \cdot 10^6\ \text{Гц};$$

$$V_{\text{u}\ \text{вых}} = 10\ \text{В/мкс};$$

$$R_{вх} \geq 200 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$R_{н\text{ мин}} = 1 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

В соответствии с паспортными данными на выбранный ОУ для обеспечения устойчивой работы емкость конденсатора C2 цепи частотной коррекции равна 4,7 пФ.

Схема электрическая принципиальная предоконечного каскада усилителя мощности представлена на рис.3.6.

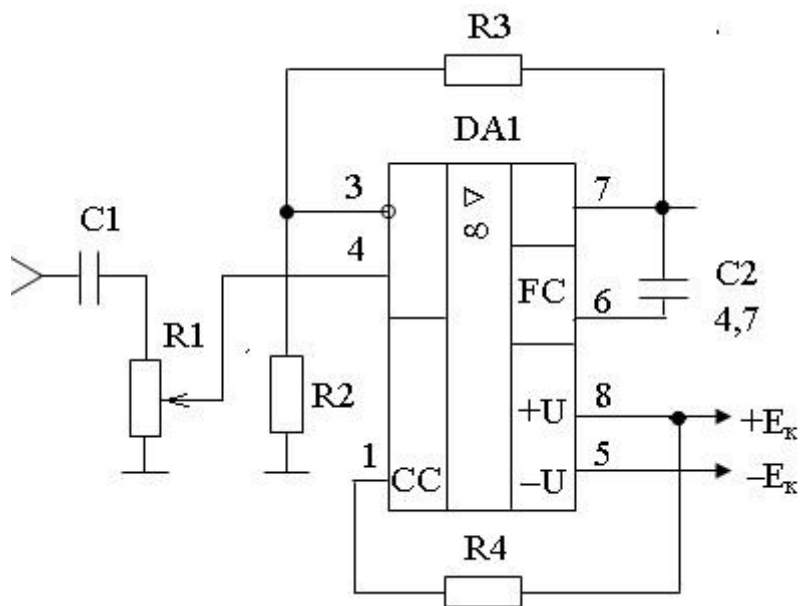


Рис.3.6. Схема электрическая принципиальная предварительного каскада усиления УМ

Определяем требуемые значения параметров элементов схемы.

В соответствии со свойствами операционного усилителя можно считать, что входное сопротивление  $R_{вх}$  определяется величиной сопротивления резистора R1, исходя из этого определяем значение сопротивления резистора R1 из соотношения:

$$R_{вх} \leq R1 \ll R_{вх\text{ ОУ}};$$

$$10^4 \text{ Ом} \leq R1 \ll 10^5 \text{ Ом}.$$

Номинальное значение сопротивления этого резистора выбираем из стандартного 10% ряда номиналов резисторов (табл. П.3.1) и типов подстроечных резисторов (табл. П.4.2) - R1-СП5-16ВА-0,5-10 кОм.

Значение емкости разделительного конденсатора  $C1$  находим из выражения полагая требование обеспечить исключение его влияния на АЧХ усилителя в области нижних частот:

$$C1 \geq 50/(2\pi f_n \cdot R1) = 50/(2 \cdot 3,14 \cdot 300 \cdot 10^4) \approx 2,65 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

Исходя из заданного значения коэффициента усиления  $K_{\text{цос}}$  определяем величины сопротивлений резисторов цепи обратной связи  $R2$  и  $R3$ :

$$R3 = R1 \cdot K_{\text{цос}} = 10 \cdot 10^3 \cdot 10 = 100 \text{ кОм};$$

$$R2 = R3/(K_{\text{цос}} - 1) = 100 \cdot 10^3/(10 - 1) = 11,1 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (табл. П.3.1) выбираем величины резисторов  $R3 = 100 \text{ кОм}$  и  $R2 = 11 \text{ кОм}$ .

Проверяем выполнение условия

- для режима В

$$(R2 + R3)R_{\text{вх ок В}}/(R2 + R3 + R_{\text{вх ок В}}) > R_{\text{н min}};$$

$$(11 + 100) \cdot 4,05/(11 + 100 + 4,05) \text{ кОм} > 2 \text{ кОм};$$

- для режима АВ

$$(R2 + R3)R_{\text{вх ок АВ}}/(R2 + R3 + R_{\text{вх ок АВ}}) > R_{\text{н min}};$$

$$(11 + 100) \cdot 2,04/(11 + 100 + 2,04) \text{ кОм} > 2 \text{ кОм.}$$

По заданной величине тока управления ОУ  $I_{\text{упр}} = 10^{-3} \text{ А}$  вычисляем требуемое сопротивление резистора  $R4$ :

$$R4 = (2U_{\text{пит}} - 0,7) / I_{\text{упр}} = (2 \cdot 9 - 0,7) / 10^{-3} = 17,3 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов ( табл. П.3.1) выбираем номинальное значение резистора  $R_4 = 18 \text{ кОм}$ .

После определения максимальных значений мощностей рассеиваемых резисторов  $R_1, R_2$  и  $R_3$ :

$$P_{R1} = E^2/(2R1) = 9^2/(2 \cdot 10 \cdot 10^3) = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$P_{R2} = E^2/(2R2) = 9^2/(2 \cdot 11 \cdot 10^3) = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$P_{R3} = E^2/(2R3) = 9^2/(2 \cdot 100 \cdot 10^3) = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}.$$

Выбираем типы резисторов и конденсаторов, входящих в состав схемы (Приложения 3...5):

- R1 - СП5-16ВА-0,5-10 кОм  $\pm 10\%$ ;
- R2 - С2-1-0,125-11 кОм  $\pm 5\%$ ;
- R3 - С2-1-0,125-100 кОм  $\pm 5\%$ ;
- R4 - С2-1-0,125-18 кОм  $\pm 5\%$ ;
- С1 – К76П-1-63В-3,3 мкФ  $\pm 10\%$ ;
- С2 - К10-17Б-М47-4,7 пФ  $\pm 5\%$ .

Общая схема электрическая принципиальная УМ представлена на рис.3.7. Усилитель охвачен общей цепью отрицательной обратной связи, что позволяет снизить уровень нелинейных искажений УМ. Для этого, резистор ООС -  $R_3$  соединен с выходом оконечного каскада УМ и инвертирующим входом ОУ.

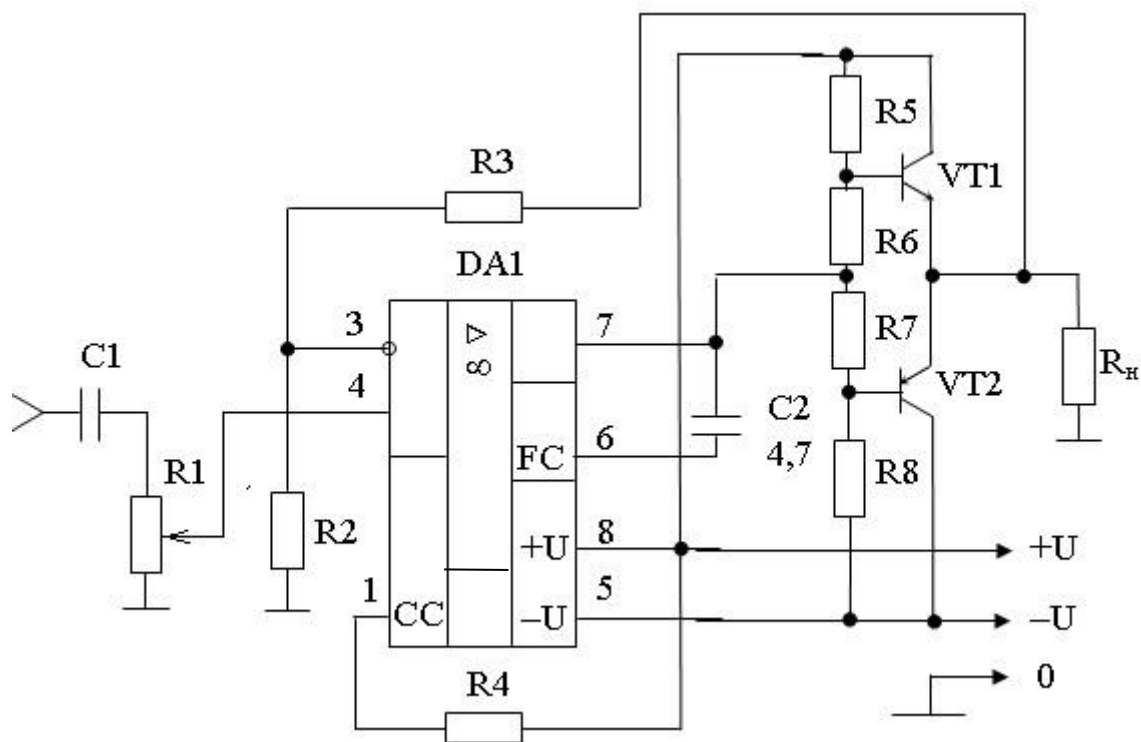


Рис.3.7. Схема электрическая принципиальная усилителя мощности

Перечень элементов общей схемы электрической принципиальной усилителя мощности:

- R1 - СП5-16ВА-0,5-10 кОм  $\pm 10\%$ ;
- R2 - С2-1-0,125-11 кОм  $\pm 5\%$ ;
- R3 - С2-1-0,125-100 кОм  $\pm 5\%$ ;
- R4 - С2-1-0,125-18 кОм  $\pm 5\%$ ;
- R5 - С2-1-0,125-8,2 кОм  $\pm 5\%$ ;
- R6 - С2-1-0,125-240 кОм  $\pm 5\%$ ;
- R7 - С2-1-0,125-240 кОм  $\pm 5\%$ ;
- R8 - С2-1-0,125-8,2 кОм  $\pm 5\%$ ;
- C1 – К76П-1-63В-3,3 мкФ  $\pm 10\%$ ;
- C2 - К10-17Б-М47-4,7пФ  $\pm 5\%$ .

### 3.5. Расчет активных фильтров формирующих амплитудно-частотную характеристику усилителя.

Активные фильтры низких частот (АФНЧ) и высоких частот (АФВЧ) первого порядка с единичными коэффициентами передачи в полосах пропускания

позволяют обеспечить формирование заданной АЧХ без влияния на заданное значение общего коэффициента усиления устройства в полосе пропускания.

### Пример расчета АФНЧ первого порядка с задающей частоту RC цепью на входе ОУ

Исходные данные:

- Верхняя частота среза разрабатываемого устройства,  $f_{\text{вАФНЧ}} = 16 \cdot 10^3$  Гц;
- Входное сопротивление,  $R_{\text{вхАФНЧ}} \geq 10$  кОм;
- Сопротивление нагрузки АФНЧ,  $R_{\text{н ФНЧ}} \geq 10$  кОм; - Максимальное значение амплитуды сигнала на выходе АФНЧ,  $U_m = 10$  В.

#### Электрический расчет

Выбираем операционный усилитель для чего определяем требования к значениям его параметров исходя из следующих соображений:

Полагаем  $K_{\text{цФНЧ}} = 1$  обеспечивая этим максимально широкую полосу частот усиливаемых ОУ.

Находим требования к частоте единичного усиления ОУ ( $f_{1\text{ОУ}}$ ):

$$f_{1\text{ОУ}} \geq 50 \cdot K_{\text{цФНЧ}} \cdot f_{\text{вФНЧ}} = 50 \cdot 1 \cdot 16 \cdot 10^3 = 800 \cdot 10^3 \text{ [Гц]}.$$

Вычисляем допустимое значение максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ :

$$V_{\text{макс}} > 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{вФНЧ}} \cdot U_m = 2 \cdot 3,14 \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 10 = 1 \text{ [В/мкс]},$$

здесь  $U_m$  – максимальная амплитуды сигнала на выходе АФНЧ.

С учетом полученных значений параметров выбираем ОУ типа К154УД1 (табл. П.2.2) для которого:

- коэффициент усиления напряжения,  $K_u \Rightarrow 50000$ ;
- максимальная амплитуда выходного напряжения,  $U_{\text{вых}}, \text{ В} < \pm 11$ ;
- потребляемый ток,  $I_{\text{пот}}, \text{ мА} \leq 3$ ;
- входное сопротивление,  $R_{\text{вх}}, \text{ МОм} > 1$ ;
- выходное сопротивление,  $R_{\text{вых}}, \text{ Ом} < 30$ ;
- частота единичного усиления,  $f_{1\text{ОУ}}, \text{ МГц} > 1$ ;
- скорость нарастания выходного напряжения,  $V_{\text{макс}}, \text{ В/мкс} > 10$

- номинальные напряжения питания,  $U_{пит}, В \pm 15$ ;
- минимальное сопротивление нагрузки,  $R_{н доп}, кОм > 2$ .

Схема электрическая принципиальная АФНЧ представлена на рис. 3.8:

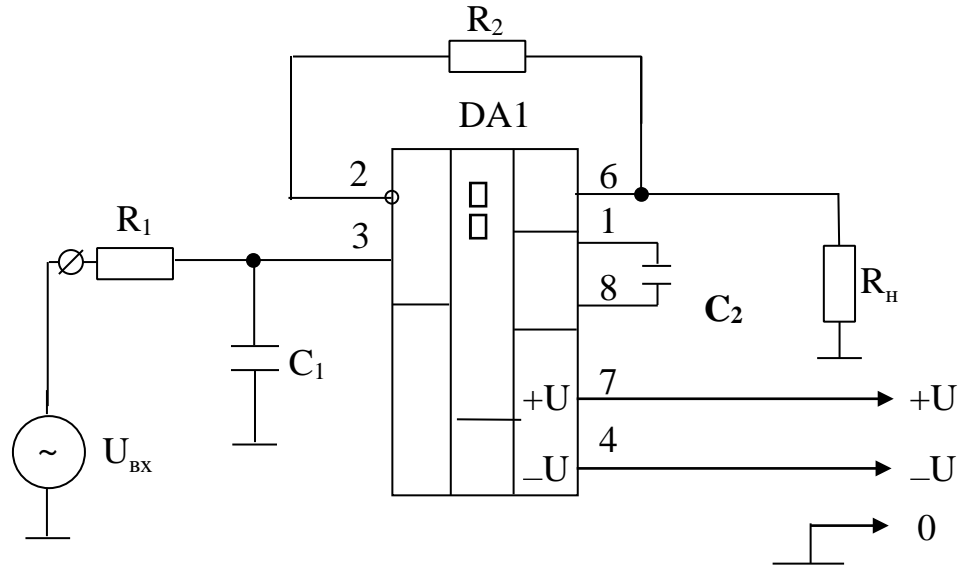


Рис.3.8. Схема электрическая принципиальная АФНЧ первого порядка

Определяем номинальные значения параметров элементов схемы.

Выбираем величину сопротивления резистора R1 из соотношения:

$$R_{вхФНЧ} \leq R1 \ll R_{вх ОУ}$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (табл. П.3.1) выбираем резистор  $R1 = 10 кОм$ .

Учитывая требуемое значение коэффициента передачи АФНЧ ( $K_{uАФНЧ}=1$ ) находим величину сопротивления R2 из выражения:

$$R2 = R1 = 10^4 = 10 \cdot 10^3 [Ом].$$

Проверяем выполнение требования по допустимому сопротивлению нагрузки выбранного ОУ:

$$R2 \cdot R_{нФНЧ} / (R2 + R_{нФНЧ}) \geq R_{н доп};$$

$$10 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^3 / (10 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^3 \geq 2 \cdot 10^3 [Ом].$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов ( табл. П.3.1) выбираем резистор  $R_2 = 10 \text{ кОм}$ .

По заданному значению частоты среза АФНЧ  $f_{\text{вАФНЧ}}$ , определяем значение емкости конденсатора  $C_1$  из соотношения:

$$C_1 = 1/(2\pi R_1 f_{\text{вАФНЧ}}) = 1/(2 \cdot 3,14 \cdot 10^4 \cdot 16 \cdot 10^3) \approx 995 \cdot 10^{-12} [\text{Ф}].$$

Из стандартного 5% ряда номиналов конденсаторов (табл. П.3.1) выбираем конденсатор  $C_1 = 1 \text{ нФ}$ .

Емкость конденсатора  $C_2$  цепи частотной коррекции, необходимую для обеспечения устойчивой работы при  $K_{\text{уст}} = 1$ , находим из соотношения:

$$C_2 = 30/K_{\text{уст}} = 30/1 = 30 [\text{пФ}].$$

Из стандартного 5% ряда номиналов конденсаторов (табл. П.3.1) выбираем конденсатор  $C_3 = 30 \text{ пФ}$ .

Определяем максимальные значения мощностей рассеяния для резисторов  $R_1$  и  $R_2$ :

$$P_{R_1} = U_m^2/(2R_1) = 10^2/(2 \cdot 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$P_{R_2} = U_m^2/(2R_2) = 10^2/(2 \cdot 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}.$$

5. Принимая во внимание расчетные значения мощности рассеивания резисторов и область применения конденсаторов выбираем окончательно типы резисторов и конденсаторов, используемых в схеме (Приложения 3...5):

- $R_1$  - С2-1-0,125-10 кОм $\pm$ 5%;
- $R_2$  - С2-1-0,125-10 кОм $\pm$ 5%;
- $C_1$  – К10-17Б-М47-1000 пФ $\pm$ 5%;
- $C_2$  – К10-17Б-М47-30 пФ $\pm$ 5%.

**Пример расчета АФНЧ первого порядка с задающими частоту RC-элементами в цепи отрицательной обратной связи ОУ**

Исходные данные:

- Верхняя частота среза разрабатываемого устройства,  $f_{\text{вАФНЧ}} = 16 \cdot 10^3 \text{ Гц}$ ;
- Входное сопротивление,  $R_{\text{вхАФНЧ}} \geq 10 \text{ кОм}$ ;

- Сопротивление нагрузки АФНЧ,  $R_{н \text{ АФНЧ}} \geq 10 \text{ кОм}$ ; - Максимальное значение амплитуды сигнала на выходе АФНЧ,  $U_m=10\text{В}$ .

### Электрический расчет

Задаем значение коэффициента усиления по напряжению ФНЧ  $K_{u\text{ФНЧ}}=1$ , что позволяет обеспечить максимально широкую полосу частот усиливаемых операционным усилителем, который используется в ФНЧ в качестве активного элемента.

Определяем требования к частоте единичного усиления ОУ ( $f_{1\text{ОУ}}$ ) из выражения:

$$f_{1\text{ОУ}} \geq 50 \cdot K_{u\text{ФНЧ}} \cdot f_{\text{вФНЧ}} = 50 \cdot 1 \cdot 16 \cdot 10^3 = 800 \cdot 10^3 \text{ [Гц]}.$$

Определяем требования к скоростным характеристикам ОУ. Для этого вычисляем требуемое значение максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ,  $V_{\text{макс}}$  из соотношения:

$$V_{\text{макс}} > 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{вФНЧ}} \cdot U_m = 2 \cdot 3,14 \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 10 = 1 \text{ [В/мкс]},$$

где  $U_m$  – максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ФНЧ.

С учетом полученных значений параметров выбираем ОУ типа К154УД1 (табл. П.2.2) для которого:

- коэффициент усиления напряжения,  $K_u \Rightarrow 50000$ ;
- максимальная амплитуда выходного напряжения,  $U_{\text{вых}}, \text{В} < \pm 11$ ;
- потребляемый ток,  $I_{\text{пот}}, \text{мА} \leq 3$ ;
- входное сопротивление,  $R_{\text{вх}}, \text{МОм} > 1$ ;
- выходное сопротивление,  $R_{\text{вых}}, \text{Ом} < 30$ ;
- частота единичного усиления,  $f_{1\text{ОУ}}, \text{МГц} > 1$ ;
- скорость нарастания выходного напряжения,  $V_{\text{макс}}, \text{В/мкс} > 10$  -
- номинальные напряжения питания,  $U_{\text{пит}}, \text{В} \pm 15$ ;
- минимальное сопротивление нагрузки,  $R_{\text{н доп}}, \text{кОм} > 2$ .

Схема электрическая принципиальная АФНЧ представлена на рис. 3.9:

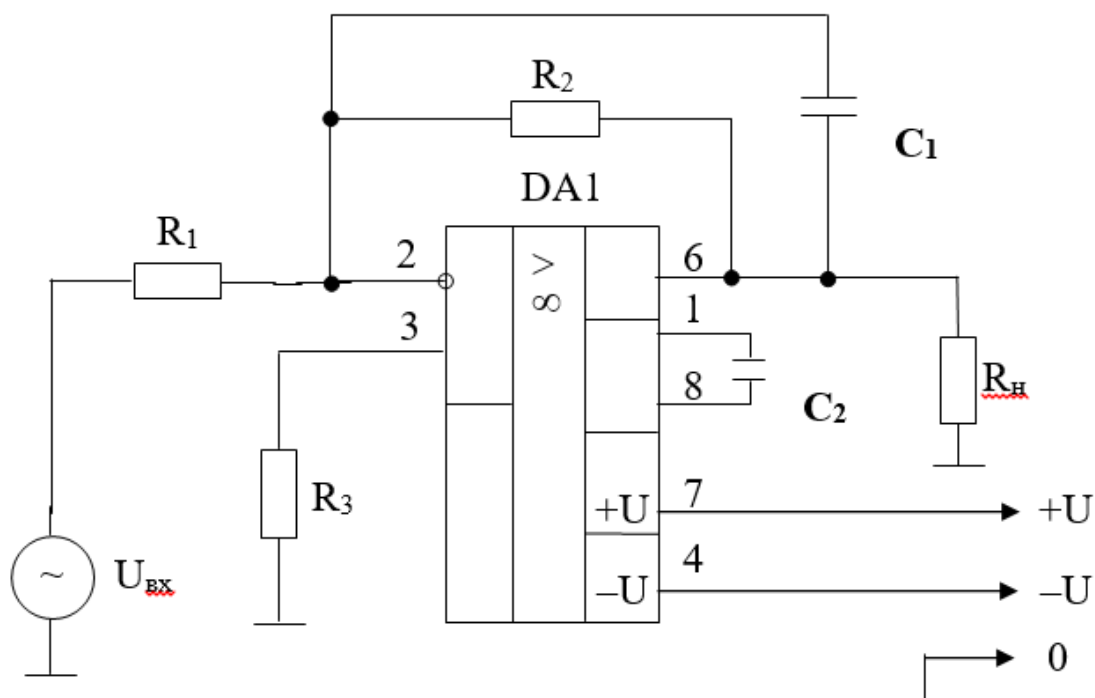


Рис. 3.9. Схема электрическая принципиальная АФНЧ первого порядка на базе ОУ с частотно-зависимой цепью отрицательной обратной связи.

Определяем номинальные значения параметров элементов схемы. Находим значение сопротивления резистора  $R_1$  с учетом соотношения:

$$R_{вхФНЧ} \leq R_1 \ll R_{вх ОУ}.$$

Выбираем номинальное значение сопротивления резистор  $R_1 = 10 \text{ кОм}$  на основе стандартного 5% ряда номиналов резисторов (табл. П.3.1).

Определяем значение сопротивления  $R_2$  используя выбранное значение коэффициента усиления напряжения ФНЧ,  $K_{uФНЧ}=1$ :

$$R_2 = R_1 \cdot K_{uФНЧ} = 10 \cdot 10^3 \cdot 1 = 10 \cdot 10^3 \text{ [Ом]}.$$

Проводим оценку допустимого сопротивления нагрузки ОУ:

$$R_2 \cdot R_{нФНЧ} / (R_2 + R_{нФНЧ}) \geq R_{н доп};$$

$$10 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^3 / (10 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^3 \geq 2 \cdot 10^3 \text{ [Ом]}.$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (табл. П.3.1) выбираем номинальное значение сопротивления резистора  $R_2 = 10 \text{ кОм}$ .

Для обеспечения температурной стабилизации рабочей точки ОУ величину сопротивления  $R_3$  находим из выражения:

$$R_3 = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2) = 10^4 \cdot 10^4 / (10^4 + 10^4) = 5 \cdot 10^3 \text{ [Ом]}.$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (табл. П.3.1) выбираем номинальное значение сопротивления резистора  $R_3 = 5,1 \text{ кОм}$ .

Определяем значение емкости конденсатора  $C_1$  с учетом заданного значения частоты среза АФНЧ  $f_{\text{вАФНЧ}}$ :

$$C_1 = 1 / (2\pi R_1 f_{\text{вАФНЧ}}) = 1 / (2 \cdot 3,14 \cdot 10^4 \cdot 16 \cdot 10^3) \approx 995 \cdot 10^{-12} \text{ [Ф]}.$$

Выбираем номинальное значение емкости конденсатора  $C_1 = 1 \text{ нФ}$  из стандартного 5% ряда номиналов конденсаторов (табл. П.3.1)

Для обеспечения устойчивой работы при выбранном значении коэффициента усиления определяем емкость конденсатора  $C_2$  цепи частотной коррекции из выражения:

$$C_2 = 30 / K_{\text{уАФНЧ}} = 30 / 1 = 30 \text{ [пФ]}.$$

Выбираем номинальное значение емкости конденсатора  $C_2 = 30 \text{ пФ}$  из стандартного 5% ряда номиналов конденсаторов (табл. П.3.1)

Находим максимальные значения мощностей рассеяния резисторов  $R_1$  и  $R_2$ :

$$P_{R_1} = U_m^2 / (2R_1) = 10^2 / (2 \cdot 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$P_{R_2} = U_m^2 / (2R_2) = 10^2 / (2 \cdot 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}.$$

Учитывая выбранные номиналы, назначение и значения мощности рассеивания резисторов выбираем типы резисторов и конденсаторов, входящих в состав схемы (Приложения 3...5):

- $R_1$  - С2-1-0,125-10 кОм $\pm$ 5%;
- $R_2$  - С2-1-0,125-10 кОм $\pm$ 5%;
- $R_3$  - С2-1-0,125-5,1 кОм $\pm$ 5%;
- $C_1$  – К10-17Б-М47-1000 пФ $\pm$ 5%; -  $C_2$  – К10-17Б-М47-33 пФ $\pm$ 5%.

## Пример расчета АФВЧ первого порядка с задающей частоту среза RC-цепью на входе ОУ

Исходные данные:

- Частота среза ФВЧ,  $f_{\text{ср ФВЧ}} = 130$  Гц;
- Верхняя частота среза разрабатываемого устройства,  $f_{\text{в}} = 16 \cdot 10^3$  Гц;
- Входное сопротивление,  $R_{\text{вхФВЧ}} \geq 10$  кОм;
- Сопротивление нагрузки ФВЧ,  $R_{\text{н ФВЧ}} \geq 10$  кОм;
- Максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ФВЧ,  $U_{\text{м}} = 10$  В.

### Электрический расчет

Для выбора ОУ определяем требования к значениям параметров ОУ:

Задаем значение коэффициента усиления по напряжению АФВЧ  $K_{\text{иАФВЧ}} = 1$ , что позволяет обеспечить максимально широкую полосу частот усиливаемых операционным усилителем, который используется в АФВЧ в качестве активного элемента.

Определяем требования к частоте единичного усиления ОУ ( $f_{1\text{ОУ}}$ ) из выражения:

$$f_{1\text{ОУ}} \geq 50 \cdot K_{\text{иФВЧ}} \cdot f_{\text{в}} = 50 \cdot 1 \cdot 16 \cdot 10^3 = 800 \cdot 10^3 \text{ [Гц]}.$$

Определяем требования к скоростным характеристикам ОУ. Для этого вычисляем требуемое значение максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ,  $V_{\text{макс}}$  из соотношения:

$$V_{\text{макс}} > 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{в}} \cdot U_{\text{м}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 10 = 1 \text{ [В/мкс]},$$

где  $U_{\text{м}}$  – максимальное значение амплитуды сигнала на выходе АФВЧ.

С учетом полученных требований к ОУ на основе паспортных данных (табл. П.2.2) выбираем ОУ типа К154УД1 со следующими значениями параметров:

- коэффициент усиления напряжения,  $K_{\text{и}} \Rightarrow 50000$ ;
- максимальная амплитуда выходного напряжения,  $U_{\text{вых}}, \text{ В} < \pm 11$ ;
- потребляемый ток,  $I_{\text{пот}}, \text{ мА} \leq 3$ ;
- входное сопротивление,  $R_{\text{вх}}, \text{ МОм} > 1$ ;
- выходное сопротивление,  $R_{\text{вых}}, \text{ Ом} < 30$ ;
- частота единичного усиления,  $f_{1\text{ОУ}}, \text{ МГц} > 1$ ;

- скорость нарастания выходного напряжения,  $V_{\text{макс}}$ , В/мкс  $> 10$  -
- номинальные напряжения питания,  $U_{\text{пит}}$ , В  $\pm 15$ ;
- минимальное сопротивление нагрузки,  $R_{\text{н доп}}$ , кОм  $> 2$ .

Схема электрическая принципиальная АФВЧ представлена на рис. 3.10:

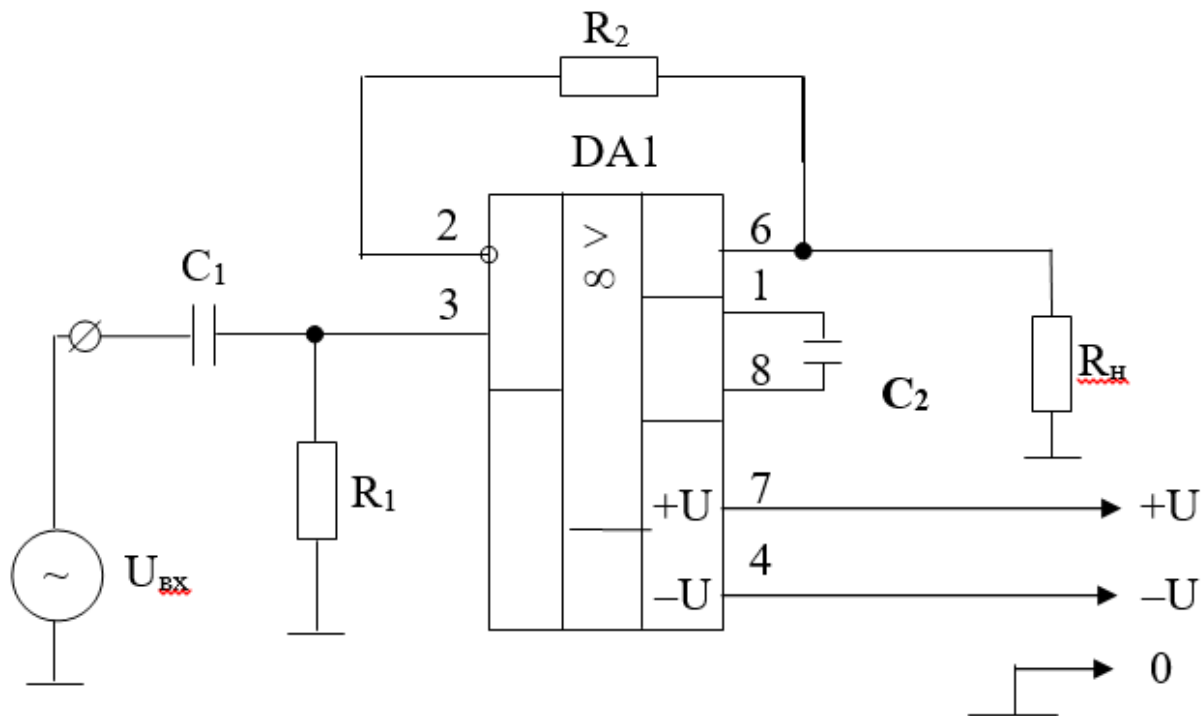


Рис. 3.10. Схема электрическая принципиальная АФВЧ первого порядка с задающей частоту среза RC-цепью на входе ОУ

Определяем номиналы элементов схемы:

Определяем величину сопротивления резистора R1 из соотношения:

$$R_{\text{вхФВЧ}} \leq R1 \ll R_{\text{вх оу}}.$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (табл. П.3.1) выбираем резистор  $R1 = 10$  кОм.

Исходя из выбранного значения коэффициента усиления по напряжению  $K_{\text{иФВЧ}}=1$  определяем значение сопротивления R2 используя соотношение:

$$R2 = R1 \cdot K_{\text{иФВЧ}} = 10 \cdot 10^3 \cdot 1 = 10 \cdot 10^3 [\text{Ом}].$$

Проверяем выполнение условия:

$$R2 \cdot R_{\text{нФВЧ}} / (R2 + R_{\text{нФВЧ}}) \geq R_{\text{н доп}};$$

$$10 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^3 / (10 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^3 \geq 2 \cdot 10^3 [\text{Ом}].$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (табл. П.3.1) выбираем резистор  $R_2 = 10 \text{ кОм}$ .

Исходя из заданного значения частоты среза  $f_{\text{срАФВЧ}}$ , определяем значение емкости конденсатора  $C_1$  из соотношения:

$$C_1 = 1/(2\pi R_1 f_n) = 1/(2 \cdot 3,14 \cdot 10^4 \cdot 130) \approx 0,122 \cdot 10^{-6} [\text{Ф}].$$

Из стандартного 5% ряда номиналов конденсаторов (табл. П.3.1) выбираем конденсатор  $C_1 = 0,12 \text{ мкФ}$ .

Емкость конденсатора  $C_2$  цепи частотной коррекции, необходимую для обеспечения устойчивой работы при  $K_{\text{уФНЧ}} = 1$ , находим из соотношения:

$$C_2 = 30/K_{\text{уОУ}} = 30/1 = 30 [\text{пФ}].$$

Из стандартного 5% ряда номиналов конденсаторов (табл. П.3.1) выбираем конденсатор  $C_3 = 30 \text{ пФ}$ .

Определяем максимальные значения мощностей рассеяния для резисторов  $R_1$  и  $R_2$ :

$$P_{R_1} = U_m^2 / (2R_1) = 10^2 / (2 \cdot 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$P_{R_2} = U_m^2 / (2R_2) = 10^2 / (2 \cdot 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}.$$

Выбираем типы резисторов и конденсаторов, входящих в состав схемы, принимая во внимание назначение элементов схемы номиналы и расчетные значения мощности рассеивания резисторов (Приложения 3...5):

- $R_1$  - С2-1-0,125-10 кОм $\pm$ 5%;
- $R_2$  - С2-1-0,125-10 кОм $\pm$ 5%;
- $C_1$  – К10-17Б-М1500-0,12 мкФ $\pm$ 10%; -  $C_2$  – К10-17Б-М47-33 пФ $\pm$ 10%.

### **Пример расчета АФВЧ первого порядка с задающими частоту RC-элементами в цепи отрицательной обратной связи ОУ**

Исходные данные:

- Частота среза ФВЧ,  $f_{\text{ср ФВЧ}} = 130 \text{ Гц}$ ;

- Верхняя частота среза разрабатываемого устройства,  $f_b = 16 \cdot 10^3$  Гц;
- Входное сопротивление,  $R_{вхФВЧ} \geq 10$  кОм;
- Сопротивление нагрузки ФВЧ,  $R_{н ФВЧ} \geq 10$  кОм; - Максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ФВЧ,  $U_m = 10$  В.

### Электрический расчет

Определяем требования к значениям параметров ОУ.

Задаем значение коэффициента усиления по напряжению ФВЧ  $K_{нФВЧ} = 1$ , что позволяет обеспечить максимально широкую полосу частот усиливаемых операционным усилителем, который используется в ФВЧ в качестве активного элемента.

Определяем требования к частоте единичного усиления ОУ ( $f_{1ОУ}$ ) из выражения:

$$f_{1ОУ} \geq 50 \cdot K_{нФВЧ} \cdot f_b = 50 \cdot 1 \cdot 16 \cdot 10^3 = 800 \cdot 10^3 \text{ [Гц]}.$$

Определяем требования к скоростным характеристикам ОУ. Для этого вычисляем требуемое значение максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ,  $V_{\text{макс}}$  из соотношения:

$$V_{\text{макс}} > 2 \cdot \pi \cdot f_b \cdot U_m = 2 \cdot 3,14 \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 10 = 1 \text{ [В/мкс]},$$

где  $U_m$  – максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ФВЧ.

На основе полученных требований к параметрам выбираем (табл. П.2.2) ОУ типа К154УД1 со следующими параметрами:

- коэффициент усиления напряжения,  $K_{н} \Rightarrow 50000$ ;
- максимальная амплитуда выходного напряжения,  $U_{\text{вых}}, \text{ В} < \pm 11$ ;
- потребляемый ток,  $I_{\text{пот}}, \text{ мА} \leq 3$ ;
- входное сопротивление,  $R_{\text{вх}}, \text{ МОм} > 1$ ;
- выходное сопротивление,  $R_{\text{вых}}, \text{ Ом} < 30$ ;
- частота единичного усиления,  $f_{1ОУ}, \text{ МГц} > 1$ ;
- скорость нарастания выходного напряжения,  $V_{\text{макс}}, \text{ В/мкс} > 10$  - номинальные напряжения питания,  $U_{\text{пит}}, \text{ В} \pm 15$ ;
- минимальное сопротивление нагрузки,  $R_{\text{н доп}}, \text{ кОм} > 2$ .

Схема электрическая принципиальная АФВЧ представлена на рис. 3.11:

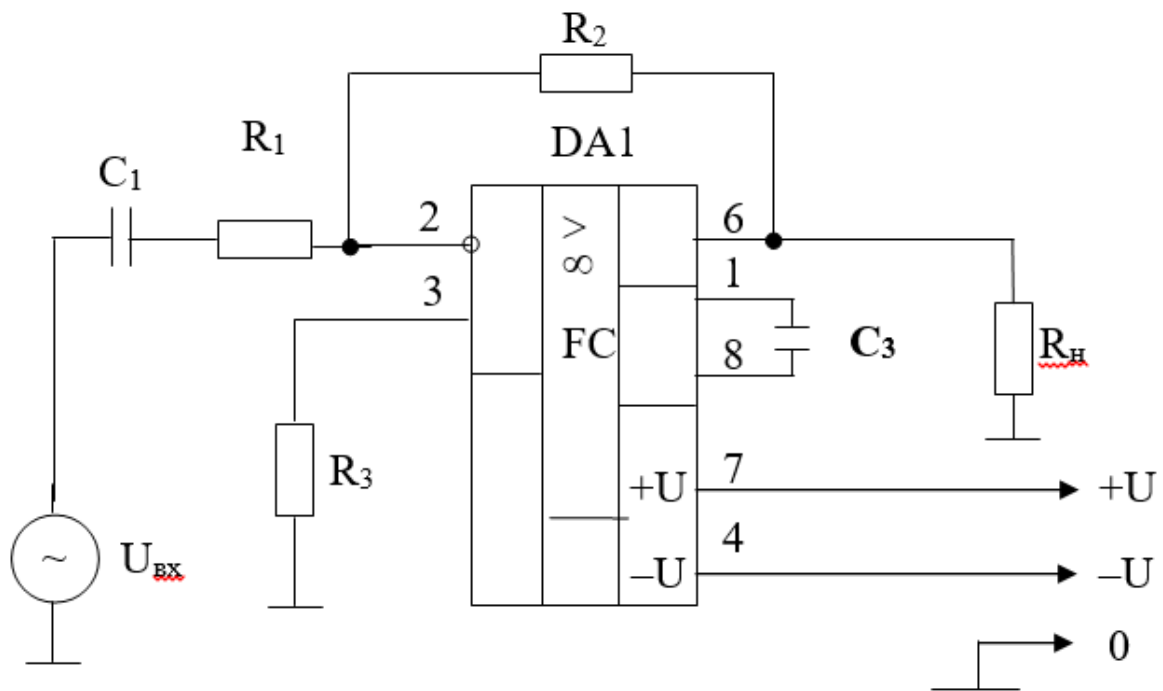


Рис. 3.11. Схема электрическая принципиальная АФВЧ первого порядка с задающими частоту RC-элементами в цепи отрицательной обратной связи ОУ

Определяем номиналы элементов схемы:

Определяем величину сопротивления резистора R1 из соотношения:

$$R_{вхФВЧ} \leq R1 \ll R_{вх оу}.$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (табл. П.3.1) выбираем резистор R1 = 10 кОм.

Исходя из выбранного значения коэффициента усиления напряжения ФВЧ,  $K_{иФВЧ}=1$  определяем значение сопротивления R2 из выражения:

$$R2 = R1 \cdot K_{иФВЧ} = 10 \cdot 10^3 \cdot 1 = 10 \cdot 10^3$$

Проверяем выполнение условия:

$$R2 \cdot R_{нФВЧ} / (R2 + R_{нФВЧ}) \geq R_{н доп};$$

$$10 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^3 / (10 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^3 \geq 2 \cdot 10^3 \text{ [Ом]}.$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (табл. П.3.1) выбираем резистор  $R_2 = 10 \text{ кОм}$ .

Для уменьшения влияния температуры на положение рабочей точки ОУ значение сопротивления  $R_3$  определяем из выражения:

$$R_3 = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2) = 10^4 \cdot 10^4 / (10^4 + 10^4) = 5 \cdot 10^3 \text{ [Ом]}.$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (табл. П.3.1) выбираем резистор  $R_3 = 5,1 \text{ кОм}$ .

Исходя из заданного значения частоты среза ФВЧ  $f_{\text{срФВЧ}}$ , определяем значение емкости конденсатора  $C_1$  из соотношения

$$C_1 = 1 / (2\pi R_1 f_{\text{н}}) = 1 / (2 \cdot 3,14 \cdot 10^4 \cdot 130) \approx 0,122 \cdot 10^{-6} \text{ [Ф]}.$$

Из стандартного 5% ряда номиналов конденсаторов (табл. П.3.1) выбираем конденсатор  $C_1 = 0,12 \text{ мкФ}$ .

Емкость конденсатора  $C_2$  цепи частотной коррекции, необходимую для обеспечения устойчивой работы при  $K_{\text{уФНЧ}} = 1$ , находим из соотношения:

$$C_2 = 30 / K_{\text{уОУ}} = 30 / 1 = 30 \text{ [пФ]}.$$

Из стандартного 5% ряда номиналов конденсаторов (табл. П.3.1) выбираем конденсатор  $C_3 = 30 \text{ пФ}$ .

Определяем максимальные значения мощностей рассеяния для резисторов  $R_1$  и  $R_2$ :

$$P_{R_1} = U_m^2 / (2R_1) = 10^2 / (2 \cdot 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$P_{R_2} = U_m^2 / (2R_2) = 10^2 / (2 \cdot 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}.$$

Учитывая назначение и расчетные значения мощности рассеивания резисторов выбираем типы резисторов и конденсаторов, входящих в состав схемы (Приложения 3...5):

- $R_1$  - С2-1-0,125-10 кОм $\pm$ 5%;
- $R_2$  - С2-1-0,125-10 кОм $\pm$ 5%;
- $R_3$  - С2-1-0,125-5,1 кОм $\pm$ 5%;
- $C_1$  – К10-17Б-М1500-0,12 мкФ $\pm$ 10%; -  $C_2$  – К10-17Б-М47-33 пФ $\pm$ 10%.

## Пример расчета активного полосового фильтра первого порядка.

Исходные данные:

- Нижняя частота среза разрабатываемого устройства,  $f_{нПФ} = 1050$  Гц;
- Верхняя частота среза разрабатываемого устройства,  $f_{вПФ} = 16 \cdot 10^3$  Гц;
- Входное сопротивление,  $R_{вхПФ} \geq 10$  кОм;
- Сопротивление нагрузки ПФ,  $R_{нПФ} \geq 10$  кОм;
- Максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ПФ,  $U_m = 10$  В.

### Электрический расчет

Определяем требования к значениям параметров ОУ.

Выбираем значение коэффициента усиления по напряжению ПФ  $K_{uАПФ} = 1$  с целью обеспечения максимально широкой полосы частот усиливаемых ОУ.

Находим параметры характеризующие частотные свойства операционного усилителя:

- частоту единичного усиления ОУ ( $f_{1ОУ}$ ),

$$f_{1ОУ} \geq 50 \cdot K_{uАПФ} \cdot f_b = 50 \cdot 1 \cdot 16 \cdot 10^3 = 800 \cdot 10^3 \text{ [Гц];}$$

- и требуемое значение максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ ( $V_{\text{макс}}$ ),

$$V_{\text{макс}} > 2 \cdot \pi \cdot f_{вАПФ} \cdot U_m = 2 \cdot 3,14 \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 10 = 1 \text{ [В/мкс];}$$

где  $U_m$  – максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ПФ.

Учитывая полученные требования к параметрам выбираем ОУ типа К154УД1 на основе паспортных данных (табл. П.2.2):

- коэффициент усиления напряжения,  $K_u \Rightarrow 50000$ ;
- максимальная амплитуда выходного напряжения,  $U_{\text{вых}}, \text{ В} < \pm 11$ ;
- потребляемый ток,  $I_{\text{пот}}, \text{ мА} \leq 3$ ;
- входное сопротивление,  $R_{\text{вх}}, \text{ МОм} > 1$ ;
- выходное сопротивление,  $R_{\text{вых}}, \text{ Ом} < 30$ ;
- частота единичного усиления,  $f_{1ОУ}, \text{ МГц} > 1$ ;

- скорость нарастания выходного напряжения,  $V_{\text{макс}}$ , В/мкс  $> 10$  - номинальные напряжения питания,  $U_{\text{пит}}$ , В  $\pm 15$ ;
- минимальное сопротивление нагрузки,  $R_{\text{н доп}}$ , кОм  $> 2$ .

Схема электрическая принципиальная АПФ представлена на рис. 3.12:

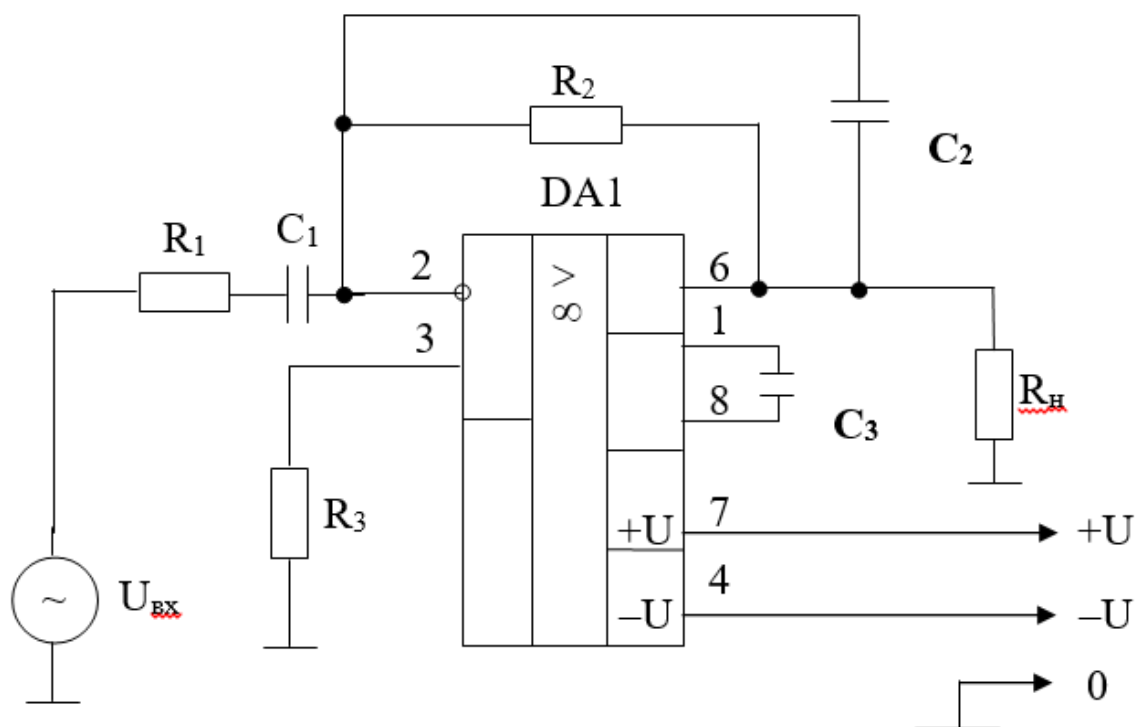


Рис. 3.12. Схема электрическая принципиальная АПФ первого порядка на основе ОУ

Определяем номиналы элементов схемы:

Оцениваем возможные значения сопротивления резистора  $R_1$  из соотношения:

$$R_{\text{вхАПФ}} \leq R_1 \ll R_{\text{вх ОУ}}.$$

Выбираем резистор  $R_1 = 10$  кОм из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (табл. П.3.1).

Определяем значение сопротивления  $R_2$  из выражения используя выбранное значение коэффициента усиления по напряжению АПФ,  $K_{\text{uАПФ}}=1$ :

$$R_2 = R_1 \cdot K_{\text{uАПФ}} = 10 \cdot 10^3 \cdot 1 = 10 \cdot 10^3.$$

Проверяем выполнение условия:

$$R_2 \cdot R_{нПФ} / (R_2 + R_{нПФ}) \geq R_{н доп};$$

$$10 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^3 / (10 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^3 \geq 2 \cdot 10^3 \text{ [Ом]}.$$

Выбираем номинальное значение сопротивления резистора  $R_2 = 10 \text{ кОм}$  из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (табл. П.3.1).

Для уменьшения влияния температуры на положение рабочей точки ОУ значение сопротивления  $R_3$  определяем из выражения:

$$R_3 = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2) = 10^4 \cdot 10^4 / (10^4 + 10^4) = 5 \cdot 10^3 \text{ [Ом]}.$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (табл. П.3.1) выбираем резистор  $R_3 = 5,1 \text{ кОм}$ .

Исходя из заданного значения частоты среза ПФ  $f_{нАПФ}$ , определяем значение емкости конденсатора  $C_1$  из соотношения:

$$C_1 = 1 / (2\pi R_1 f_{нАПФ}) = 1 / (2 \cdot 3,14 \cdot 10^4 \cdot 1050) \approx 15 \cdot 10^{-9} \text{ [Ф]}.$$

Выбираем номинальное значение емкости конденсатора  $C_1 = 15 \text{ нФ}$  из стандартного 5% ряда номиналов конденсаторов (табл. П.3.1).

Исходя из заданного значения частоты среза ПФ  $f_{вАПФ}$ , определяем величину емкости конденсатора  $C_2$  из соотношения:

$$C_2 = 1 / (2\pi R_2 f_{вПФ}) = 1 / (2 \cdot 3,14 \cdot 10^4 \cdot 16 \cdot 10^3) \approx 995 \cdot 10^{-12} \text{ [Ф]}.$$

Выбираем номинальное значение емкости конденсатора  $C_1 = 1 \text{ нФ}$  из стандартного 5% ряда номиналов конденсаторов (табл. П.3.1).

Для обеспечения устойчивой работы при  $K_{уАПФ} = 1$  емкость конденсатора  $C_3$  цепи частотной коррекции определяем из выражения:

$$C_3 = 30 / K_{уПФ} = 30 / 1 = 30 \text{ [пФ]}.$$

На основании чего выбираем номинальное значение емкости конденсатора  $C_3 = 30 \text{ пФ}$  из стандартного 5% ряда номиналов конденсаторов (табл. П.3.1).

Определяем максимальные значения мощности рассеяния для резисторов  $R_1$  и  $R_2$ :

$$P_{R1} = U_m^2 / (2R1) = 10^2 / (2 \cdot 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$P_{R2} = U_m^2 / (2R2) = 10^2 / (2 \cdot 10 \cdot 10^3) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}.$$

Выбираем типы резисторов и конденсаторов, входящих в состав схемы, принимая во внимание назначение элементов схемы, номиналы и расчетные значения мощности рассеивания резисторов (Приложения 3...5):

- R1 - C2-1-0,125-10 кОм±5%;
- R2 - C2-1-0,125-10 кОм±5%;
- R3 - C2-1-0,125-5,1 кОм±5%;
- C1 – K10-17Б-M1500-0,015 мкФ±5%; - C2 - K10-17Б-M47-1000 пФ±5%;
- C3 – K10-17Б-M47-33 пФ±5%.

### 3.6. Расчет входного каскада на базе ОУ

При расчете входного каскада с использованием операционного усилителя следует обратить внимание на тот факт, что при применении ОУ в инвертирующем и неинвертирующем включении могут возникнуть трудности с выполнением требований по величине входного сопротивления и коэффициента усиления по напряжению, что в ряде случаев может затруднить использование инвертирующего включения ОУ во входном каскаде проектируемого усилителя.

#### Пример расчета входного каскада на базе неинвертирующего включения операционного усилителя

Исходные данные:

- Входное сопротивление,  $R_{вх} \geq 25 \text{ кОм}$ ;
- Коэффициент усиления по напряжению,  $K_{уос} = 10$ ;
- Сопротивление нагрузки,  $R_n \geq 10 \text{ кОм}$ ;
- Нижняя частота полосы пропускания УНЧ,  $f_n = 10 \text{ Гц}$ ;
- Верхняя частота полосы пропускания УНЧ,  $f_v = 16 \text{ КГц}$ ;
- Максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ОУ,  $U_m = 9 \text{ В}$ .

Определяем требования к частоте единичного усиления ОУ, ( $f_{1ОУ}$ ):

$$f_{1ОУ} \geq 50 \cdot K_{уос} \cdot f_v = 50 \cdot 10 \cdot 16 \cdot 10^3 = 8 \cdot 10^6 \text{ [Гц]},$$

и к максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ ( $V_{\text{макс}}$ ):

$$V_{\text{макс}} > 2\pi \cdot f_3 \cdot U_m = 2 \cdot 3,14 \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 9 = 0,9 \text{ [В/мкс]}.$$

С учетом полученных требований к ОУ на основе паспортных данных (см.

табл. П.2.2) выбираем ОУ типа К544УД2 со следующими значениями параметров:

- коэффициент усиления напряжения,  $K_u \geq 20000$ ;
- максимальная амплитуда выходного напряжения,  $U_{\text{ВЫХ}}, \text{В} < \pm 10$ ;
- потребляемый ток,  $I_{\text{ПОТ}}, \text{мА} \leq 7$ ;
- входное сопротивление,  $R_{\text{ВХ}}, \text{МОм} > 10$ ;
- выходное сопротивление,  $R_{\text{ВЫХ}}, \text{Ом} < 30$ ;
- частота единичного усиления,  $f_1, \text{МГц} > 15$ ;
- скорость нарастания выходного напряжения,  $V_{\text{МАКС}}, \text{В/мкс} > 20$  - номинальные напряжения питания,  $U_{\text{ПИТ}}, \text{В} \pm 15$ ;
- минимальное сопротивление нагрузки,  $R_{\text{Н ДОП}}, \text{кОм} = 2$ .

Схема электрическая принципиальная разрабатываемого устройства приведена на рис. 3.13.

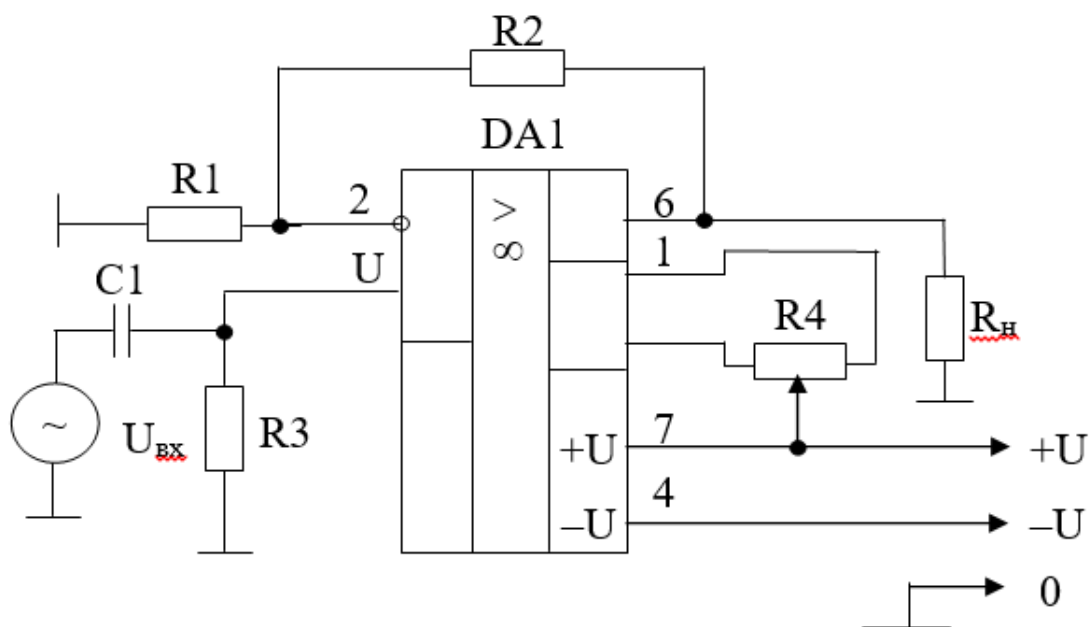


Рис. 3.13. Схема электрическая принципиальная входного каскада на базе неинвертирующего включения ОУ

Определяем номинальные значения параметров элементов схемы. Выбираем величину сопротивления резистора R3 из соотношений:

$$R_{\text{ВХ}} \leq R3 \ll R_{\text{ВХ ОУ}};$$

$$0,025 \text{ МОм} \leq R3 \ll 10 \text{ МОм}.$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (табл. П.3.1) выбираем номинальное значение сопротивления резистора  $R3=27 \text{ кОм}$ .

Значение емкости C1 разделительного конденсатора входной цепи усилителя определяем из соотношения:

$$C1 \geq 50/(2\pi \cdot f_n \cdot R3) = 50/(2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 27 \cdot 10^3) \approx 29,5 \cdot 10^{-6} [\text{Ф}].$$

Исходя из заданного значения коэффициента усиления  $K_{\text{уос}}$  вычисляем величины сопротивлений резисторов цепи обратной связи R1 и R2:

$$R2 = R3 \cdot K_{\text{уос}} = 27 \cdot 10^3 \cdot 10 = 270 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$R1 \approx R2/(K_{\text{уос}} - 1) = 270 \cdot 10^3/(10 - 1) = 30 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Используя 5% стандартный ряд номиналов резисторов (табл. П.3.1) выбираем номинальные значения сопротивлений резисторов R2=270 кОм, и R1 = 30 кОм. Проверим выполнение условия:

$$(R2 + R1) \cdot R_n / (R2 + R1 + R_n) \geq R_{n \text{ доп}};$$

$$(270 + 30) \cdot 10 / (270 + 30 + 10) = 9,6 \text{ кОм} \geq 2 \text{ кОм}.$$

Условие выполнено.

Задаем значение величины сопротивления резистора балансировки нуля ОУ R4 с учетом паспортных данных микросхемы К544УД1А:

$$R4 = 10 \text{ кОм}.$$

Определяем максимальные значения мощностей рассеяния для резисторов R1, R2 и R3:

$$P_{R1} = U_m^2 / (2R1) = 9^2 / (2 \cdot 30 \cdot 10^3) = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$P_{R2} = U_m^2 / (2R2) = 9^2 / (2 \cdot 270 \cdot 10^3) = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$P_{R3} = U_m^2 / (2R3) = 9^2 / (2 \cdot 27 \cdot 10^3) = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}.$$

Выбираем типы резисторов и конденсаторов, входящих в состав схемы, принимая во внимание назначение элементов схемы, номиналы и расчетные значения мощности рассеивания резисторов (Приложения 3...5):

- R1 - C2-1-0,125-30 кОм±5%;
- R2 - C2-1-0,125-270 кОм±5%;
- R3 - C2-1-0,125-27 кОм±5%;
- R4 - СП5-16ВА-0,5-10кОм±10%;
- C1 – К53-4-6В-33 мкФ±5%.

### Пример расчета входного каскада усилителя на базе инвертирующего включения операционного усилителя

Исходные данные:

- Входное сопротивление,  $R_{вх} \geq 25$  кОм;
- Коэффициент усиления по напряжению,  $K_{уос} = 10$ ;
- Сопротивление нагрузки,  $R_{н} \geq 10$  кОм;
- Нижняя частота полосы пропускания УНЧ,  $f_{н} = 10$  Гц;
- Верхняя частота полосы пропускания УНЧ,  $f_{в} = 16$  КГц;
- Максимальное значение амплитуды сигнала на выходе ОУ,  $U_{м} = 9$  В.

2. Определяем требования к частоте единичного усиления ОУ, ( $f_{1оу}$ ):

$$f_{1 оу} \geq 50 \cdot K_{уос} \cdot f_{в} = 50 \cdot 10 \cdot 16 \cdot 10^3 =$$

$8 \cdot 10^6$  [Гц],

и к максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ ( $V_{макс}$ ):

$$V_{макс} > 2\pi \cdot f_3 \cdot U_{м} = 2 \cdot 3,14 \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 9 = 0,9 [\text{В/мкс}].$$

Выбираем ОУ типа К544УД2 учитывая полученные требования к его параметрам (табл. П.2.2):

- коэффициент усиления напряжения,  $K_{ц} \Rightarrow 20000$ ;
- максимальная амплитуда выходного напряжения,  $U_{вых}, \text{ В} < \pm 10$ ;
- потребляемый ток,  $I_{пот}, \text{ мА} \leq 7$ ;
- входное сопротивление,  $R_{вх}, \text{ МОм} > 10$ ;
- выходное сопротивление,  $R_{вых}, \text{ Ом} < 30$ ;
- частота единичного усиления,  $f_1, \text{ МГц} > 15$ ;
- скорость нарастания выходного напряжения,  $V_{макс}, \text{ В/мкс} > 20$  - номинальные напряжения питания,  $U_{пит}, \text{ В} \pm 15$ ;
- минимальное сопротивление нагрузки,  $R_{н доп}, \text{ кОм} = 2$ .

Схема электрическая принципиальная разрабатываемого устройства приведена на рис.3.14.

Определяем номинальные значения параметров элементов схемы:

Выбираем значение сопротивления резистора R1 исходя из следующих соотношений:

$$R_{вх} \leq R1 \ll R_{вх ОУ};$$

$$0,25 \text{ МОм} \leq R1 \ll 10 \text{ МОм}.$$

Используя 5% стандартный ряда номиналов резисторов (табл. П.3.1) выбираем номинальное значение сопротивления резистора R1=27 кОм .

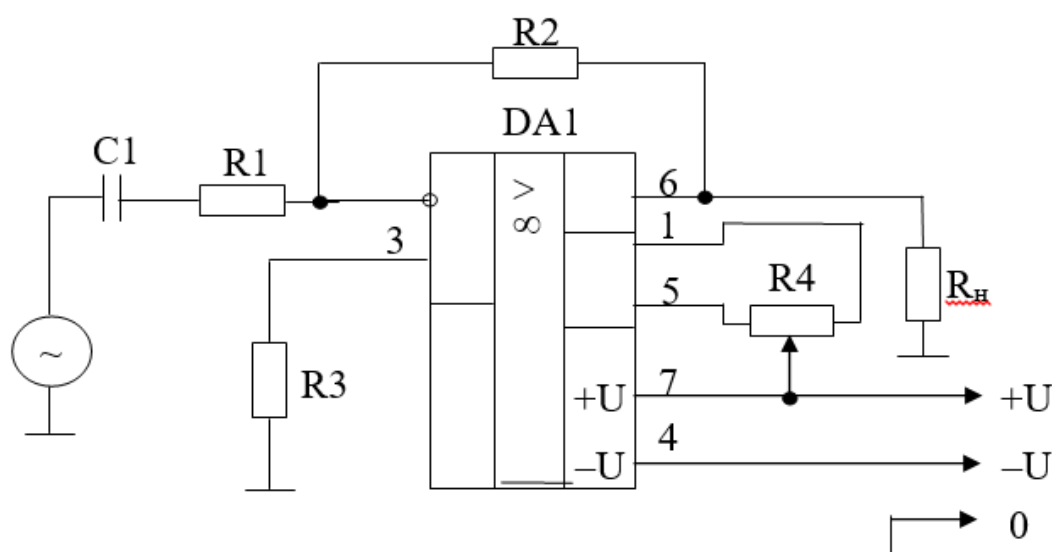


Рис. 3.14. Схема электрическая принципиальная входного каскада на базе инвертирующего включения ОУ

Определяем значение емкости C1 разделительного конденсатора входной цепи усилителя из соотношения:

$$C1 \geq 50 / (2\pi \cdot f_n \cdot R1) = 50 / (2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 27 \cdot 10^3) \approx 29,5 \cdot 10^{-6} [\text{Ф}].$$

Исходя из выбранной схемы включения ОУ и заданного значения K<sub>уос</sub>, вычисляем значение сопротивления резистора R2:

$$R2 = R1 \cdot K_{уос} = 27 \cdot 10^3 \cdot 10 = 270 \cdot 10^3 [\text{Ом}].$$

Из стандартного 5% ряда номиналов резисторов (табл. П.3.1) выбираем номинальное значение сопротивления резистора  $R_2=270$  кОм. Проверяем выполнение условий:

$$R_2 \cdot R_H / (R_2 + R_H) \geq R_{H \text{ доп}};$$

$$(270 + 30) \cdot 10 / (270 + 30 + 10) = 9,6 \text{ кОм} \geq 2 \text{ кОм};$$

$$R_2 \ll R_{\text{вх ОУ}};$$

$$2 \text{ кОм} \ll 10 \text{ кОм}.$$

Условия выполнены.

Значение сопротивления резистора  $R_3$  для уменьшения влияния температуры на напряжение смещения нуля ОУ определяем из выражения:

$$R_3 = R_2 = 270 \cdot 10^3 [\text{Ом}].$$

Выбираем номинальное значение сопротивления резистора балансировки нуля ОУ  $R_4$  из паспортных данных микросхемы К544УД1А:

$$R_4 = 10 \text{ кОм}.$$

Определяем максимальные значения мощностей рассеяния для резисторов  $R_1$  и  $R_2$ :

$$P_{R1} = U_m^2 / (2 \cdot K_{\text{уос}}^2 \cdot R_1) = 9^2 / (2 \cdot 100 \cdot 27 \cdot 10^3) = 15 \cdot 10^{-6} \text{ Вт};$$

$$P_{R2} = U_m^2 / (2 \cdot R_1) = 9^2 / (2 \cdot 27 \cdot 10^3) = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}.$$

Определяем типы резисторов и конденсаторов, входящих в состав схемы, принимая во внимание назначение элементов схемы, номиналы и расчетные значения мощности рассеивания резисторов (Приложения 3...5):

- $R_1$  - С2-1-0,125-27 кОм $\pm$ 5%;
- $R_2$  - С2-1-0,125-270 кОм $\pm$ 5%;
- $R_3$  - С2-1-0,125-270 кОм $\pm$ 5%;
- $R_4$  - СП5-16ВА-0,5-10кОм $\pm$ 10%;
- $C_1$  – К53-4-6В-33 мкФ $\pm$ 5%.

## 4. ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

Воронежский институт МВД России

Кафедра радиотехники и электроники

### КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

по дисциплине «\_\_\_\_\_»

Тема: «Разработка усилителя мощности с заданной АЧХ»

Выполнил: \_\_\_\_\_ курсант 31 группы РТФ  
\_\_\_\_\_ Петров П.В.

Руководитель: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Члены комиссии: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Защищен \_\_\_\_\_

Оценка комиссии \_\_\_\_\_

Воронеж 20\_\_

Основные данные транзисторов и операционных усилителей

Транзисторы биполярные

Таблица П.2.1

Тип прибора	Тип пров.	$R_{к доп},$ Вт	$U_{кэ доп},$ В	$I_{к доп},$ А	$I_{ки макс},$ А	$h_{21э}$	$U_{кэ нас},$ В	$I_{со},$ мкА	$f_i,$ МГц
КТ503Б	n-p-n	0,35	40	0,15	-	80...240	0,2	1	5
КТ315А	n-p-n	0,15	25	0,1	-	20...90	0,4	1	250
КТ315В	n-p-n	0,15	40	0,1	-	20...90	0,4	1	250
КТ315Г	n-p-n	0,15	35	0,1	-	50...350	0,4	1	250
КТ502Б	p-n-p	0,35	40	0,15	-	80...240	0,2	1	5
КТ361А	p-n-p	0,15	25	0,05	-	20...90	0,4	1	250
КТ361В	p-n-p	0,15	40	0,05	-	40...160	0,4	1	250
КТ361Г	p-n-p	0,15	35	0,05	-	50...350	0,4	1	250
КТ3102А	n-p-n	0,25	50	0,1	0,2	100...250	0,5	0,05	100
КТ3102Б	n-p-n	0,25	50	0,1	0,2	200...500	0,5	0,05	100
КТ3102В	n-p-n	0,25	50	0,1	0,2	200...500	0,5	0,015	100
КТ3102Г	n-p-n	0,25	50	0,1	0,2	400...1000	0,5	0,015	100
КТ3107А	p-n-p	0,3	50	0,1	0,2	70...140	0,5	0,1	200
КТ3107Б	p-n-p	0,3	45	0,1	0,2	120...220	0,5	0,1	200
КТ3107И	p-n-p	0,3	45	0,1	0,2	180...460	0,5	0,1	200
КТ3107Б	p-n-p	0,3	25	0,1	0,2	380...800	0,5	0,1	200
КТ815А	n-p-n	10	25	1,5	3	40	0,6	50	3
КТ815Б	n-p-n	10	40	1,5	3	40	0,6	50	3
КТ815В	n-p-n	10	60	1,5	3	40	0,6	50	3
КТ815Г	n-p-n	10	80	1,5	3	30	0,6	50	3
КТ814А	p-n-p	10	25	1,5	3	40	0,6	50	3
КТ814Б	p-n-p	10	40	1,5	3	40	0,6	50	3
КТ814В	p-n-p	10	60	1,5	3	40	0,6	50	3
КТ814Г	p-n-p	10	80	1,5	3	30	0,6	50	3
КТ817А	n-p-n	25	25	3	5	25	0,6	100	3
КТ817Б	n-p-n	25	45	3	5	25	0,6	100	3
КТ817В	n-p-n	25	60	3	5	25	0,6	100	3
КТ817Г	n-p-n	25	80	3	5	25	0,6	100	3
КТ816А	p-n-p	25	25	3	5	25	0,6	100	3
КТ816Б	p-n-p	25	45	3	5	25	0,6	100	3
КТ816В	p-n-p	25	60	3	5	25	0,6	100	3
КТ816Г	p-n-p	25	80	3	5	25	0,6	100	3
КТ819А	n-p-n	60	25	10	15	15	2	1000	3
КТ819Б	n-p-n	60	40	10	15	20	2	1000	3
КТ819В	n-p-n	60	60	10	15	15	2	1000	3
КТ819Г	n-p-n	60	80	10	15	12	2	1000	3
КТ818А	p-n-p	60	25	10	15	15	2	1000	3
КТ818Б	p-n-p	60	40	10	15	20	2	1000	3
КТ818В	p-n-p	60	60	10	15	15	2	1000	3
КТ818Г	p-n-p	60	80	10	15	12	2	1000	3

Таблица П.2.2

## Операционные усилители

Операционный усилитель	$U_{пит}$ , В	$I_{пот}$ , мА	$K_u$ , $10^3$	$U_{см}$ , мВ	$I_{вх}$ , нА	$f_1$ , МГц	$V_{U_{вых.макс}}$ В/мкс	$U_{вых.макс}$ , В	$R_n$ мин, кОм	$R_{вх}$ , МОм
К140УД6, К140УД608	5..20	3	30	8	50	1	2	12	1	1
К140УД7, К140УД708	5..20	2,8	30	9	400	0,8	0,3	10,5	2	0,4
К140УД7, К140УД7(А-В)	12.. 16	5	20.. 50	20.. 50	0,2	1	2	10	2	10
К140УД17, К140УД17(А-В)	3..18	5	120.. 200	0,1.. 0,25	4.. 12	0,4	0,1	12	2	30
К140УД18	6..18	4	25.. 50	10	0,2	2,5	5	11	2	$10^6$
К140УД20, К140УД20(А-В)	5..20	3	25.. 50	3..6	100	0,5	0,3	11	1	0,4
К153УД5	5..16	3,5	500.. 1000	1..2	100	0,2	0,01	10	2	1
К154УД1	4..18	3	100.. 200	5	40	1	10	11	2	1
К154УД3	5..18	7	8..10	10	200	15	80	10	2	1
К154УД4	5..17	7	8..10	6	1200	30	400	10	2	1
К157УД2	3..18	7	50	10	500	1	0,5	13	0,3	0,5
К551УД1(А-В)	5.. 16,5	5	500	1,5	120	0,8	0,1	12	2	1
К551УД2(А-В)	5.. 16,5	10	500	5	2000	1	0,25	12	2	0,5
К544УД1, КР544УД1(А-В)	3..20	3,5	50	20	0,1	1	3	10	2	10
К544УД2, КР544УД2(А-В)	8..20	7	20	50	0,5	15	20	10	2	10
К574УД2, КР574УД1(А-В)	13,5.. 16,5	10	25	50	1	2	10	10	10	$10^3$
К1401УД2А	1,5.. 16,5	3	50	5	150	1	0,35	12	2	0,2
К1407УД1	1,2.. 13,2	8	10	10	$10^4$	20	10	10	1	0,2
К1408УД1, КР1408УД1	7..40	5	70	8	40	0,5	1,5	19	5	1
К1426УД1	6..18	4	60	3	2000	5	5	16	10	0,1

**Номинальные значения сопротивлений постоянных резисторов и емкостей постоянных конденсаторов**

1. Номинальные сопротивления (омы, килоомы, мегаомы) постоянных резисторов всех типов с допускаемыми отклонениями  $\pm 20\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 5\%$  в установленном для каждого типа резисторов диапазоне значений должны соответствовать числам, приведенным в табл.П.3.1, и числам, полученным путем умножения этих чисел на  $10^n$ , где  $n$  – целое положительное или отрицательное число.

2. Ряд E6 (шесть чисел) входит в состав ряда E12 (12 - чисел); в свою очередь, ряд E12 входит в состав ряда E24 (24 - числа), что отражено в построении таблицы. Например, начало ряда E12 имеет вид: 1,0; 1,2; 1,5; 1,8 и т.д.; начало ряда E24 – 1,0; 1,2; 1,3 и т.д.

Ряд E6 применяется для определения номинальных сопротивлений постоянных резисторов при допускаемом отклонении  $\pm 20\%$ ; ряд E12 - при допускаемом отклонении  $\pm 10\%$ ; ряд E24 - при допускаемом отклонении  $\pm 5\%$ .

Таблица П.3.1

**Ряды для определения номинальных сопротивлений и емкостей при допускаемых отклонениях  $\pm 20\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 5\%$**

E6	E12	E24	E6	E12	E24
1,0		1,1	3,3		3,6
	1,2	1,3		3,9	4,3
1,5		1,6	4,7		5,1
	1,8	2,0		5,6	6,2
2,2		2,4	6,8		7,5
	2,7	3,0		8,2	9,1

3. Номинальные сопротивления постоянных резисторов всех типов с допускаемым отклонением менее  $\pm 5\%$  ( $\pm 2\%$ , 1 и др.) в установленном для каждого типа резисторов диапазоне значений должны соответствовать числам, приведенным в табл. П. 3.2, и числам, полученным путем умножения этих чисел на  $10^n$ , где  $n$  – целое положительное или отрицательное число.

Ряд E48 (48 чисел) входит в состав ряда E96 (96 чисел); в свою очередь, ряд E96 входит в состав ряда E192 (192 числа), что отражено в построении таблицы. Например, начало ряда E96 имеет вид: 100,102,105,107 и т.д., а начало ряда E192 – 100, 101, 102,104 и т.д.

4. Номинальные сопротивления переменных резисторов (единицы, десятки и сотни Ом, килом, единицы и десятки мегаом) должны соответствовать (ГОСТ 10318-80) ряду E6 (табл. П.3.1).

**Ряды для определения номинальных сопротивлений и емкостей при допусках  
отклонениях менее  $\pm 5\%$**

E48	E96	E192	E48	E96	E192	E48	E96	E192	E48	E96	E192
100		101	178		180	316		320	562		569
		104			184			328			583
105		106	187		189	332		336	590		597
		109			193			344			612
110	102	111	196	182	198	348	324	352	619	576	626
		114			203			361			642
115	107	117	205	191	208	365	340	370	649	604	657
		120			213			379			673
121	113	123	215	200	218	383	357	388	681	634	690
		126			223			397			706
127	118	129	226	210	229	402	374	407	715	665	723
		132			234			417			741
133	124	135	237	221	240	422	392	427	750	698	759
		138			246			437			777
140	130	142	249	232	252	442	412	448	785	732	796
		145			258			459			816
147	137	149	261	243	264	464	432	470	825	768	835
		152			271			481			856
154	143	156	274	255	277	487	453	493	866	806	876
		160			284			505			898
162	150	164	287	267	291	511	475	517	909	845	920
		167			298			530			942
169	158	172	301	280	305	536	499	542	953	887	965
		176			312			556			988
	165			294			523			931	
	174			309			549			976	

5. Номинальные емкости (до 91000 пФ) конденсаторов постоянной емкости с допускаемыми отклонениями  $\pm 20\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 5\%$  должны соответствовать (ГОСТ2519-67) числам, приведенным в табл. П.3.1, и числам, полученным путем умножения этих чисел на  $10^n$ , где  $n$  – целое положительное или отрицательное число.

Ряд Е6 применяется для определения номинальных емкостей конденсаторов при допуске отклонения  $\pm 20\%$ ; ряд Е12 - при допуске отклонения  $\pm 10\%$ ; ряд Е24 - при допуске отклонения  $\pm 5\%$ .

6. Номинальные емкости (от 0,1 мкФ и выше) конденсаторов с бумажным и пленочным диэлектриком в прямоугольных корпусах должны соответствовать числам ряда:

0,1; 0,25; 1; 2; 4; 6; 8; 10; 20; 40; 60; 80; 100; 200; 400; 600; 800; 1000.

7. Номинальные емкости (в мкФ) оксидных алюминиевых конденсаторов должны соответствовать числам ряда:

0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 30; 100; 200; 300; 500; 1000; 2000; 5000.

8. Для конденсаторов с допускаемыми отклонениями менее  $\pm 5\%$  предусмотрены ряды E48, E96, E192 (табл. П. 3.2).

Соответствие номинальных сопротивлений (емкостей) числовым рядам приводятся в ГОСТе или ТУ на конкретные типы резисторов (конденсаторов).

Принятая плотность рядов обеспечивает, с одной стороны, полное использование предприятиями-изготовителями произведенных резисторов и конденсаторов, так как изделие с любым сопротивлением (емкостью) в пределах выпускаемого ряда номиналов при сортировке по номиналам окажется в поле допуска хотя бы одного из номиналов.

### Резисторы постоянные непроволочные.

**Резисторы типов С1-4, С2-1 и С2-23 предназначены для работы в цепях постоянного, переменного и импульсного тока.**

Таблица П.3.3

**Размеры резисторов типов С1-4, С2-1 и С2-23**

Тип резистора	Номинальная рассеиваемая мощность, Вт	Размеры, мм				
		L	D	l	d	A
С1-4, С2-1, С2-23	0,125	6.0	2,2	20	0,6	10
	0,25	7.0	3,0	20	0,6	12,5
	0,5	10.8	4,2	25	0,8	15
	1,0	13	6,6	25	0,8	17,5
	2,0	18.5	8,6	25	1,0	22,5

## Основные данные резисторов МЛТ

Номинальная рассеиваемая мощность, Вт	Номинальное сопротивление, Ом	Допускаемое отклонение, %	Предельное напряжение, В	
			постоянное, переменное	импульсное
0,125	8,2 - 22 24 - 3,0x10 <sup>6</sup>	±5; ±10 ±2; ±5; ±10	200	350
0,25	8,2 - 22 2,4 - 5,1x10 <sup>6</sup>	±5; ±10 ±2; ±5; ±10	250	450
0,5	1,0 - 22 24 - 5,1x10 <sup>6</sup>	±5; ±10 ±2; ±5; ±10	350	750
1,0	1,0 - 22 24 - 10x10 <sup>6</sup>	±5; ±10 ±2; ±5; ±10	500	1000
2,0	1,0 - 22 24 - 10x10 <sup>6</sup>	±5; ±10 ±2; ±5; ±10	750	1200

Примечание. Номинальное сопротивление резисторов с допускаемыми отклонениями ±5% и ±10% соответствуют ряду E24, номинальные сопротивления резисторов с допускаемыми отклонениями ±2% - ряду E96.

**Резисторы переменные подстроечные**

Приводятся сведения о некоторых типах подстроечных переменных резисторах, рекомендуемых для применения в курсовом проекте.

**Таблица П.4.1**

Тип резистора	Резистивный элемент	Назначение	Работа в цепях вида	Вид резистора
СПЗ-16	Композиционный пленочный	Подстройка	1, 2, 3	
СПЗ-13а	То же	То же	1, 2, 3	

**Таблица П.4.2**

Тип резистора	Резистивный элемент	Назначение	Работа в цепях вида	Вид резистора
СПЗ-19а	Композиционный пленочный	Подстройка	1, 2, 3	
СПЗ-19б	То же	То же	1, 2, 3	
СП5-16ВА	Проволочный	Подстройка	1, 2, 3	

Таблица П.4.3

Тип резистора	Резистивный элемент	Назначение	Работа в цепях вида	Вид резистора
СП5-16ВВ	Проволочный	Подстройка	1, 2, 3	
СП5-16ВГ	То же	То же	1, 2, 3	

Примечание. Цифрой 1 обозначена цепь постоянного, цифрой 2 – цепь переменного, цифрой 3 – цепь импульсного тока. Функциональная характеристика резисторов – линейная. Сопротивление подстроечного резистора изменяют отверткой.

Таблица П.4.4

Основные электрические данные подстроечных резисторов

Тип резистора	Номинальное сопротивление, Ом	Допускаемое отклонение, %	Номинальная мощность, Вт	Предельное напряжение, В
СП3-16	470 - $1,0 \times 10^6$	$\pm 20$	0,25	250
СП3-13а	$1 \times 10^3$ - $1,0 \times 10^6$	$\pm 20$ ; $\pm 30$	0,12	150
СП3-19а	10 - $1,0 \times 10^6$	$\pm 10$ ; $\pm 20$	0,5	150
СП3-19б	10 - $1,0 \times 10^6$	$\pm 10$ ; $\pm 20$	0,5	150
СП5-16ВА	3,3 - $33 \times 10^3$	$\pm 5$ ; $\pm 10$	0,5	130
СП5-16ВВ	100 - 6800	$\pm 5$ ; $\pm 10$	0,12	29
СП5-16ВГ	47 - 4700	$\pm 5$ ; $\pm 10$	0,05	15

Примечание. Промежуточные значения номинальных сопротивлений соответствуют ряду Е6 (см.П.3).

Оксидные, пленочные и керамические конденсаторы постоянной емкости, рекомендуемые для использования в курсовом проекте

Таблица П5.1

Конденсаторы типа К50-35

Номинальная емкость, мкФ	Номинальное напряжение, В	Размеры, мм				
		D	H	d	l	
20	6,3	5,0	14,0	0,6	2,5	
30		7,0			5,0	
50		8,5			14,0	7,5
100						
200						
500						
10	10	5,0	14,0	0,6	2,5	
20		7,0			5,0	
30						
50		11,5			14,0	7,5
100						
200						
500						
2000		19,0	27,0	0,9	10,0	
5	16	5,0	14,0	0,6	2,5	
10		7,0			5,0	
20						
30		8,5			14,0	7,5
50						
100						
200						
500		15,0	19,0	10,0		
1000		17,0	27,0			
2000		19,0	46,0			
2	25	5,0	14,0	0,6	2,5	
5		7,0			5,0	
10						
20		8,5			14,0	7,5
30						
50						
100						
200		13,0	17,0	10,5		
500		17,0	19,0			
1000		19,0	27,0			
		46,0				

Примечания: 1. Предназначены для работы в цепях постоянного пульсирующего тока, а также в импульсном режиме. 2. Конденсаторы неполярные.

Таблица П5.2

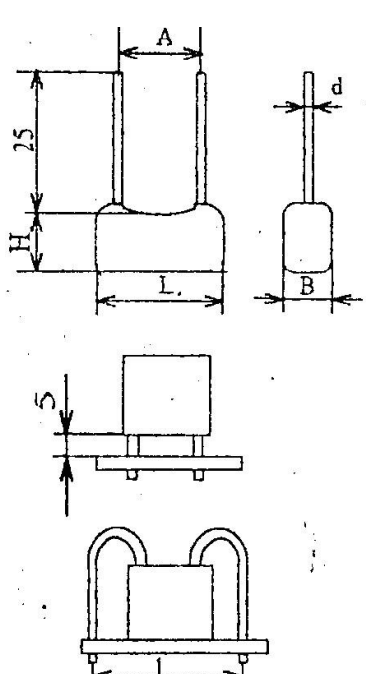
## Конденсаторы оксидные К53-7

Номинальная емкость, мкФ	Номинальное напряжение, В	Размеры, мм						
		D	L	d	l			
1,0	15	3,7	25,5	0,7	30,0			
1,5			4,5			27,5	32,5	
2,2		32,5			37,5			
3,3						27,5		32,5
4,7								
6,8		7,5			27,5	0,9		32,5
10,0			34,5	40,0				
15,0					37,5		42,5	
22,0								47,5
33,0		30	3,7	18,5	0,7	22,5		
47,0				4,5			25,5	30,0
0,1	27,5		32,5					
0,47						32,5	37,5	
1,0								
1,5	7,5		27,5			0,9	32,5	
2,2			34,5	40,0				
3,3					37,5		42,5	
4,7								47,5
6,8	8,3		27,5	0,9	32,5			
10,0			34,5		40,0			
15,0		37,5				42,5		
22,0							47,5	

Примечание. Предназначены для работы в цепях постоянного, пульсирующего, импульсного знакопеременного и переменного токов.

Таблица П5.3

## Конденсаторы керамические

Номи- нальная емкость, мкФ	Размеры, мм						
	L	B	H	A	d	l	
0,22	12	6	10	10	0,6	17,5	
0,33		6,3	13				
0,47		8	15				
0,68	18	6,3	13	15	0,8	25	
1		8	15				
1,5		8,5	19				
2,2		8,5	19	20	1,0	30	
3,3		10,2					
4,7		12	25				

Примечание. 1. Допускаемые отклонения емкости  $\pm 5$ ;  $\pm 10$ ;  $\pm 20\%$ . 2. Предназначены для работы в цепях постоянного, переменного и пульсирующего тока. 3. Номинальное напряжение 63 В.

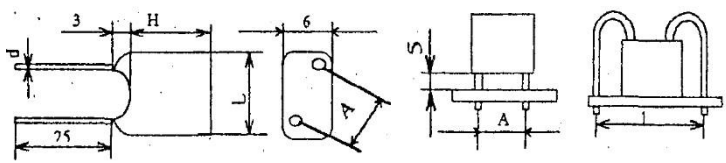
Таблица П5.4

## Конденсаторы керамические КМ-4

Типовой размер	Размеры, мм					
	L	H	A	d	l	
1	6	6	2,5	0,5	10	
2	8,5	8,5	5	0,5	12,5	
3	11	11	7,5	0,5	15	
4	13	13	7,5	0,6	15	
5	15	15	10	0,6	17,5	

## Конденсаторы керамические КЛС-1

Типо-размер	Размеры, мм		
	B	L	l
1	4,5	5,5	12,5
2	5,5	6,5	12,5
3	6,5	6,5	15
4	6,5	9,5	15
5	6,5	11,5	15



The technical drawings show three views of the capacitor: a side view with dimensions 3, H, 6, 75, L, and A; a top view with dimensions 3, H, 6, and A; and a perspective view showing the capacitor's profile and mounting tabs.

## Номинальная емкость, допустимая реактивная мощность для конденсаторов КЛС-1

Типо-размер	Номинальная емкость, пФ (до 6800), мкФ (от 0,01) для групп ТКЕ						Реактивная мощность, вар, не более
	M47, M75	M750, M1500	N30	N50	N70	N90	
1	30-56	330-510	1500; 2200	1500	4700	4700; 6800; 0,01; 0,015; 0,022	75
2	62-75	560-820	3300	2200	6800	0,033	100
3	82-130	910-1200	4700	3300	0,01	0,47	125
4	150-240	1300-1800	6800	4700; 6800	0,015	0,068	150
5	270-300	2000-3000	0,01	0,01	0,022; 0,033	0,1	175

Примечания: 1. Промежуточные значения номинальных емкостей соответствуют ряду E24. 2. Номинальное напряжение конденсаторов групп N70, N90 равно 35 В, группы N30 – 50 В, остальные группы – 80 В. 3. Допускаемые отклонения емкости от номинальной для групп M47, M75, M750, M1500 равны  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$ ; для группы N50 –  $\pm 20\%$ ; для групп N30, N70, N90 –  $+80\%$ ,  $-20\%$ .

Условные графические обозначения элементов, используемых при выполнении схем электрических принципиальных курсового проекта

Таблица П. 6.1.

Резисторы, конденсаторы

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	
Резистор постоянный		Конденсатор постоянной емкости		
Номинальная рассеиваемая мощность резистора, Вт  0,05 0,12 0,25 0,5 1,2 5		Конденсатор поляризованный		
			Конденсатор оксидный: а) полярный б) неполярный	
		Конденсатор подстроечный		
			Конденсатор подстроечный	
Резистор переменный		Конденсатор подстроечный		
Резистор подстроечный			Вариконд	
Резистор переменный в реостатном включении: а) общее обозначение б) подстроечный в) с нелинейным регулированием		Терморезистор		

## Приборы полупроводниковые

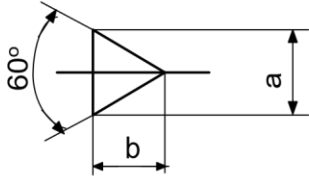
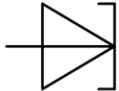
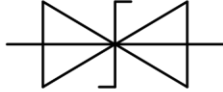
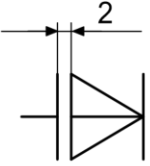
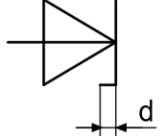
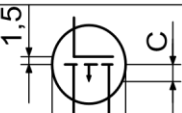
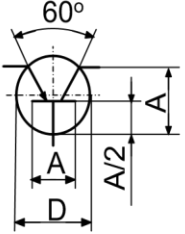
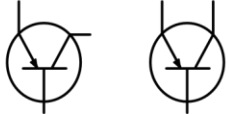



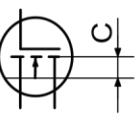

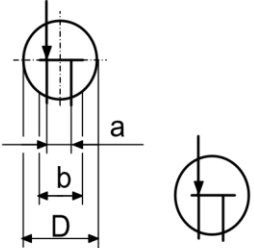
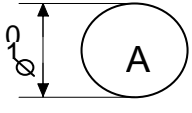
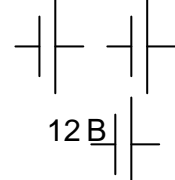
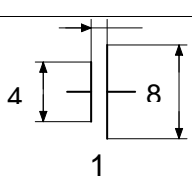
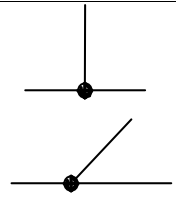
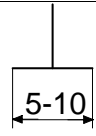
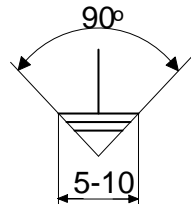
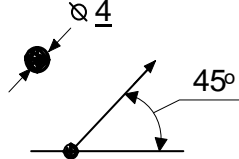

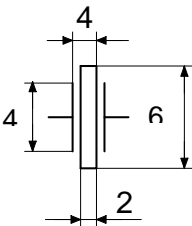
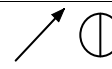
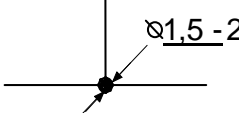
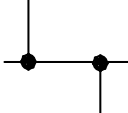
Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Диод. Размеры, мм a 5 6 b 4 5 d 1.5 2		Туннельный диод	
Стабилитрон: а) двусторонний б) односторонний		Варикап	
			
Полевой МОП-транзистор: размеры, мм а) обогащенного типа с р-каналом D 12 14 C 4 5 б) обогащенного типа с n-каналом в) с выводом от подложки г) внутренним соединением подложки и истока д) обедненного типа с р-каналом е) обедненного типа с n-каналом		Транзистор биполярный: а) типа р-п-р размеры, мм D 12 14 A 9 11 A=3/4D; б) типа п-п-п Примечание. Допускается обозначать транзисторы: а) без окружности б) с выводами Э, К, параллельными выводу Б	 
			
			
			
			
			
		Полевой транзистор: (размеры в мм) а) n-каналом D 10 12 14 a 5 6 7 b 7 8 9 б) с р-каналом	

Таблица П6.3

## Прочие элементы электронных схем

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Прибор измерительный показывающий (амперметр)		Гальваническая или аккумуляторная батарея	
Элемент гальванический или аккумуляторный*		Разветвление линий механической связи переключателей и др.;	
Корпус электронного прибора, устройства			
Заземление		Регулирование ручкой, выведенной наружу	
		Регулирование инструментом снаружи	
Пьезоэлемент		Регулирование инструментом внутри устройства	
		Линия электрической связи с ответвлениями	
		или	

**Рекомендуемые номинальные значения напряжения и тока на выходе устройств электропитания**

В соответствии с действующими стандартами, по выходной мощности источники напряжения подразделяются на микромощные (до 1 Вт), малой мощности (1...10 Вт), средней мощности (10...100 Вт), Повышенной мощности (100...1000 Вт) и большой (свыше 1000 Вт). Выходное напряжение до 100 В называют низким, 100...1000 В – средним и свыше 1000 В – высоким. Рекомендуемые номинальные значения напряжения и тока на выходе электропитающих устройств даны в табл. П.7.1 и П.7.2.

**Номинальные значения напряжения**

**Таблица П.7.1**

Диапазон напряжений, В	Напряжение, В					
	0,1...0,9	-	-	-	-	-
1,0...1,9	-	1,20	-	-	-	2,4
10,0...90	10	12,00	12,6	15	20	24
100...900	100	-	125,0	150	200	250
1000...9000	1000	-	1250,0	1500	2000	2500
0,1...0,9	-	-	0,4	-	0,6	-
1,0...1,9	-	3,0	4,0	5,0	6,0	9,0
10,0...90	27,0	30,0	40,0	48,0	60,0	80,0
100...900	-	300	400	500	600	800
1000...9000	-	3000	4000	5000	6000	8000

**Номинальные значения тока**

**Таблица П.7.2**

Диапазон токов, А	Величина тока, А									
	0,0001...0,0009	0,0001	0,0002	0,0003	0,0004	0,0005	0,0006	-	-	-
0,001...0,0099	0,001	0,002	0,003	0,005	0,008	-	-	-	-	-
0,01...0,09	0,01	0,012	0,015	0,02	0,025	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08
0,1...0,9	0,1	0,12	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,60	0,80
1...9	1,0	1,2	1,5	2,0	2,50	3,0	4,0	5,0	6,00	8,00
10...90	10	12	15	20	25	30	40	50	60	80

### Перечень государственных стандартов, используемых при выполнении курсового проекта

ГОСТ 2.702-75	Правила выполнения электрических схем
ГОСТ 2.710-81	Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах
ГОСТ 24375-80	Радиосвязь. Термины и определения
ГОСТ 2.304-81	Форматы
ГОСТ 7.1-76	Библиографическое описание произведений печати
ГОСТ 7.32-2001 и правила оформления	Отчет о научно-исследовательской работе. Общие требования
ГОСТ 2.105-95	Общие требования к текстовым документам
ГОСТ 8.417-81	Единицы физических величин
ГОСТ 7.12-93 в текстовом описании	Сокращения русских слов и словосочетаний в библиографическом описании

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каплан Д. Практические основы аналоговых и цифровых схем / Д. Каплан, К. Уайт; пер. с англ. А. А. Кузьмичевой ; под ред. А. А. Лапина. – Москва : Техносфера, 2006. – 174 с. \*
2. Мишин Г. Т. Современная аналоговая микроэлектроника. Теория и практика / Г. Т. Мишин. – Москва : Радиотехника, 2007. – 208 с. \*
3. Кучумов А. И. Электроника и схемотехника : учебное пособие : доп. УМО по информац. безопасности / А. И. Кучумов. – Москва : Гелиос АРВ, 2002. – 302 с. □\*
4. Глинкин Е.И., Глинкин М.Е. Схемотехника микропроцессорных средств: учебное пособие / Е.И. Глинкин. – Тамбов : ТГТУ: Изд. ФТБОУ ВПО «ТГТУ», В-Спектр, 2013. – 180 с. [Электронный ресурс] – URL : <http://www.biblioclub.ru/> – ЭБС «Университетская библиотека онлайн» (дата обращения 01.03.2018).
5. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. 2-е изд. испр. / Г. И. Волович. - Москва : Издательский дом «ДодекаXXI», 2007. - 528 с.
6. Прянишников В. А. Электроника: полный курс лекций / В. А. Прянишников. - 6-е изд.- Санкт-Петербург : КОРОНА-Век, 2009. - 416 с.
7. Павлов В. Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств / В. Н. Павлов, В. Н. Ногин. - Москва : Горячая линия - Телеком. - 2003. - 319 с.
8. Браммер Ю. А. Импульсная техника: учебник / Ю. А. Браммер, И. Н. Пашук.: доп. М-вом образования РФ для студентов образоват. учреждений сред. проф. образования. - Москва : Форум : Инфра-М, 2005. - 207 с.
9. Кудряш В. И. Электроника и схемотехника: лабораторный практикум. Часть 1 / В. И. Кудряш, А. С. Черткова.- Воронеж : Воронежский институт МВД России, 2014. – 186 с.
10. Кудряш В. И. Электроника и схемотехника: лабораторный практикум. Часть 2 / В. И. Кудряш, А. С. Черткова. – Воронеж : Воронежский институт МВД России, 2015. – 136 с.
11. Кудряш В. И. Электроника и схемотехника: задачник.– Воронеж : Воронежский институт МВД России, 2017. – 84 с.
12. Удалов В. П. Синтез и анализ математических моделей надежности интегрированных систем безопасности: монография [Электронный ресурс] / В. П. Удалов, С. С. Никулин, М. М. Жуков. – Электр. дан. и прогр. – Воронеж : Воронежский институт МВД России, 2017.

\* Срок использования данного издания продлён до 23.12.2020 решением Учёного совета ФГКОУ ВПО «Воронежский институт МВД России» протокол № 7 от 23.12.2015.

\*\* Срок использования данного издания продлён до 28.01.2020 решением Учёного совета ФГКОУ ВПО «Воронежский институт МВД России» протокол № 6 от 28.01.2015.

**Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети  
«Интернет», используемых для выполнения работы**

1. URL:// [www. biblioclub.ru/](http://www.biblioclub.ru/) – ЭБС Университетская библиотека онлайн.
2. URL: <http://radio-technica.ru/> – Радиотехника и электроника.
3. URL: <http://radioaktiv.ru/> – Сайт по радиотехнике и электроники.