

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СТРУКТУРА И ОФОРМЛЕНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ	6
1.1 Структура курсовой работы.....	6
1.2 Оформление курсовой работы.....	7
1.2.1 Требования к оформлению текстовой части курсовой работы	7
1.2.1.1 Шрифт и заголовки	7
1.2.1.2 Рисунки и таблицы	8
1.2.1.3 Изложение текста курсовой работы	9
1.2.1.4 Библиографический список	12
1.2.2 Требования к оформлению графической части курсовой работы.....	13
2 СОСТАВ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	14
3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА.....	14
3.1 Структурная схема усилителя	14
3.2 Определение основных параметров усилителя	15
3.3 Выбор схемы и параметров входного каскада.....	16
3.3.1 Расчет инвертирующего усилителя.....	17
3.3.2 Расчет неинвертирующего усилителя.....	17
3.4 Выбор схемы и параметров активного фильтра.....	19
3.4.1 Основные понятия теории фильтров.....	19
3.4.2 Фильтры нижних частот	23
3.4.2.1 Расчет одного звена схемы Саллена-Кея.....	25
3.4.2.2 Расчет схемы Рауха	26
3.4.2.3 Расчет биквадратного звена	27
3.4.3 Фильтры верхних частот	28
3.4.4 Полосовые пропускающие фильтры	28
3.4.4.1 Широкополосные полосовые пропускающие фильтры.....	29
3.4.4.2 Узкополосные полосовые пропускающие фильтры	30
3.5 Усилитель мощности.....	32
3.5.1 Комплементарный выходной каскад УМ	34
3.5.2 Способы задания напряжения смещения в комплементарном выходном каскаде УМ	38
3.5.3 Комплементарный выходной каскад УМ по схеме Дарлингтона	40
3.5.4 УМ на операционных усилителях с подключенным комплементарным эмиттерным повторителем	41
3.5.5 Расчет усилителя мощности на операционном усилителе	43
3.5.5.1 Расчет УМ с комплементарным эмиттерным повторителем	44
3.5.5.2 Расчет УМ с комплементарным эмиттерным повторителем Дарлингтона.....	45
3.5.5.3 Расчет УМ на мощном ОУ	50

3.5.6 Расчет теплового режима выходного каскада УМ	50
3.5.6.1 <i>Определение тепловой мощности, выделяемой на одном транзисторе выходного каскада или в мощном ОУ</i>	51
3.5.6.2 <i>Оценка необходимости применения радиатора (теплоотвода) для охлаждения силового элемента УМ</i>	51
3.5.6.3 <i>Выбор радиатора для охлаждения элемента и расчет рабочей температуры кристалла полупроводникового элемента</i> ...	51
4 Расчет маломощных выпрямителей	54
4.1 Проектирование выпрямительной схемы	55
4.2 Проектирование маломощного трансформатора	59
5 ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ	65
Библиографический список	69
Приложения	70
Приложение А (обязательное) Титульный лист курсовой работы	70
Приложение Б (обязательное) Образец задания на курсовую работу	71
Приложение В (обязательное) Расположение текста на странице курсовой работы	72
Приложение Г (справочное) Условные графические обозначения основных элементов электроники по ГОСТ 5.730-73	73
Приложение Д (обязательное) Оформление основной надписи и перечня элементов	78
Приложение Е (справочное) Технические данные мощных операционных усилителей	80
Приложение Ж (справочное) К выбору радиаторов для силовых полупроводниковых элементов	97
Приложение З (справочное) Технические данные некоторых маломощных ОУ	98

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие по курсовой работе по курсам: «Электротехника и электроника» и «Промышленная электроника» предназначено для бакалавров всех направлений подготовки, в рабочей программе которых предусмотрено выполнение курсовой работы по данным курсам.

Курсовая работа базируется на материале, изложенном в курсах “Физика“, “Электротехника и электротехники”, “Промышленная электроника”.

Курсовая работа является одной из форм самостоятельной работы студентов, при выполнении которой все решения принимаются самостоятельно. Роль руководителя курсовой работы при этом заключается в оценке принципиальных решений, методической помощи, контроле сроков и содержания работы.

В данной курсовой работе разрабатываются два электронных узла. Это усилитель с заданной частотной характеристикой и блок питания.

Выполнение курсовой работы имеет своей конечной целью закрепление полученных студентами теоретических знаний при изучении электроники и формирование общекультурных и профессиональных компетенций у бакалавров по их направлениям. Так для направления «Автоматизация технологических процессов и производств» формируются профессиональные компетенции (ПК):

- способность выполнять работы по наладке, настройке, регулировке, опытной проверке, регламентному техническому, эксплуатационному обслуживанию оборудования, средств и систем автоматизации, контроля, диагностики, испытаний и управления, средств программного обеспечения, сертификационным испытаниям изделий (ПК 48);
- способность выбирать методы и средства измерения эксплуатационных характеристик оборудования, средств и систем автоматизации, контроля, диагностики, испытаний и управления, настройки и обслуживания: системного, инструментального и прикладного программного обеспечения данных средств и систем (ПК 49).

1 СТРУКТУРА И ОФОРМЛЕНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

1.1 Структура курсовой работы

Курсовая работа должна включать следующие элементы:

- титульный лист (1 лист формата А4);
- задание на курсовое проектирование (1 лист формата А4);
- основная часть (15 – 20 листов формата А4);
- графическая часть (1 – 2 лист формата А3).

Титульный лист курсовой работы оформляется в соответствии с требованиями СТП. 5.5.204 (стандарт оформления вузовской документации) [1]. Образец титульного листа приведен в приложении А.

Задание на курсовое проектирование оформляется в соответствии с приложением Б.

В нем указывают:

- тему курсовой работы;
- исходные данные для работы;
- перечень основных вопросов, подлежащих разработке или исследованию;
- объем и содержание графической части;
- срок представления законченной работы на кафедру.

В задании приводится список учебной, справочной, методической и другой литературы, необходимой студенту для выполнения курсовой работы.

Основная часть является главной частью работы. В этой части студент приводит все необходимые расчеты, пояснения, структурные, функциональные или другие схемы.

Основная часть должна содержать следующие структурные элементы в приведенной последовательности:

- **содержание**, включающее перечень основных структурных элементов работы с указанием номера страницы;
- **введение**, где должна быть сформулирована цель работы, средства для ее достижения, актуальность; техническая и социальная значимость темы;
- **главная часть**, включает разделы в соответствии с заданием с четким изложением методики, содержания и результатов выполненной работы;
- **заключение** должно содержать общие выводы по работе и личные оценки автора;
- **библиографический список** должен содержать перечень источников, используемых при выполнении курсовой работы. Список составляется

по алфавиту. Библиографическое описание источников, включенных в список, необходимо приводить в соответствии с ГОСТ 7.1.2005.

- *приложение*. Здесь помещают материал вспомогательного характера: промежуточные расчеты, таблицы и иллюстрации вспомогательного характера и др.

1.2 Оформление курсовой работы

1.2.1 Требования к оформлению текстовой части курсовой работы

1.2.1.1 Шрифт и заголовки

Текстовая часть курсовой работы (пояснительная записка) выполняется в текстовом редакторе Word на одной стороне белой (писчей) бумаги формата А4 (210x297) со следующими параметрами:

- поля: верхнее, нижнее – 20 мм, левое – не менее 20 мм, правое - 10 мм;
- тип шрифта - Times New Roman, размер – 14, стиль (начертание) – обычный, цвет шрифта – черный;
- выравнивание – по ширине;
- красная (первая) строка (отступ) – 1,25 см;
- межстрочный интервал – 1;
- автоматический перенос слов.

Расположение полей и текста на листе показано в приложении В.

Страницы документа следует нумеровать арабскими цифрами, соблюдая сквозную нумерацию по всему тексту, включая приложения. Номер страницы проставляют в правом верхнем углу без точек и черточек.

Титульный лист входит в общую нумерацию страниц документа, но номер страницы на титульном листе, не проставляют.

Главную часть документа следует делить на разделы, подразделы и пункты. Пункты, при необходимости, могут делиться на подпункты. При делении текста на пункты и подпункты необходимо, чтобы каждый пункт содержал законченную информацию.

Разделы, подразделы, пункты и подпункты следует нумеровать арабскими цифрами без точки в конце и записывать с абзацного отступа.

Введение и заключение не нумеруют.

Разделы должны иметь порядковые номера в пределах всего документа. Подразделы должны иметь нумерацию в пределах каждого раздела. Номер подраздела состоит из номера раздела и подраздела, разделенных точкой. В конце номера раздела или подраздела точка не ставится.

Переносы слов в заголовках не допускаются. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой.

Заголовки первого и второго уровня печатаются шрифтом Arial.

Заголовки первого уровня печатаются 16 шрифтом, жирным.

Заголовки второго уровня печатаются 14 шрифтом, жирным курсивом.

Заголовки третьего уровня печатаются обычным шрифтом Times New Roman, 14, жирным.

Заголовки четвертого уровня, если они будут использоваться, печатаются обычным шрифтом Times New Roman, 14, жирным, курсивом.

1.2.1.2 Рисунки и таблицы

Рисунки следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые, или на следующей странице.

Все рисунки должны иметь номер и название.

Все рисунки следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией в пределах всего документа.

Допускается рисунки нумеровать в пределах раздела. В этом случае номер рисунка состоит из номера раздела и порядкового номера иллюстрации, разделенных точкой, например – Рисунок 1.1

Рисунки каждого приложения обозначают отдельной нумерацией арабскими цифрами с добавлением перед цифрой обозначения приложения. Например – Рисунок А.3

Рисунки должны иметь наименование и, если необходимо, пояснительные данные (подрисуночный текст). Слово «Рисунок» и его наименование помещают после подрисуночного текста следующим образом:

Рисунок 1 – Схема радиоприемника А.С. Попова

Точка в конце не ставится. Подрисуночная надпись выравнивается по центру листа.

Рисунки следует выделять из текста увеличением интервала на 6 – 12 пунктов перед и после рисунка (его наименования).

На все рисунки должны быть даны ссылки в документе.

При ссылках на рисунки следует писать «... в соответствии с рисунком 2» при сквозной нумерации и «... в соответствии с рисунком 1.2» при нумерации рисунка в пределах раздела.

Таблицы

Таблицы применяют для лучшей наглядности и удобства сравнения показателей и размещают по центру страницы без абзачного отступа.

Таблицу, в зависимости от ее размера, помещают под текстом, в котором впервые дана ссылка на нее, или на следующей странице, или, при необходимости, в приложении к документу.

Таблицы, за исключением таблиц приложений, следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией, точка в конце номера не ставится, например, Таблица 2

Таблицы каждого приложения обозначают отдельной нумерацией арабскими цифрами с добавлением перед цифрой обозначения приложения, например, Таблица А.2, если она приведена в приложении А.

Слово «Таблица» выравнивается по левому краю таблицы.

Название таблицы, при его наличии, должно отражать ее содержание, быть точным, кратким. Название таблицы следует помещать над таблицей слева (первая буква прописная, остальные строчные), без абзацного отступа, в одну строку с ее номером через дефис (тире).

На все таблицы должны быть ссылки в документе. При ссылке следует писать слово «таблица» с указанием ее номера, например, «...в таблице 5.1».

Таблицу с большим количеством строк допускается переносить на другой лист (страницу). При переносе части таблицы на другой лист (страницу) слово «Таблица», ее номер и название (заголовок), если оно есть, указывают один раз слева над первой частью таблицы. Над другими частями пишут слово «Продолжение» и указывают номер таблицы, например – Продолжение таблицы 1.

В каждой части повторяют головку таблицы.

1.2.1.3 Изложение текста курсовой работы

При написании текста работы следует учитывать, что полное наименование разработанного устройства на титульном листе, в основной надписи и при первом упоминании в тексте должно быть одинаковым.

Наименования, используемые в тексте и на иллюстрациях, должны быть одинаковыми.

В тексте пояснительной записки должны применяться научно-технические термины, обозначения и определения, установленные соответствующими стандартами, а при их отсутствии - общепринятые в научно-технической литературе.

В тексте пояснительной записки не допускается:

- применять обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
- применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
- применять произвольные словообразования;
- сокращать обозначения единиц физических величин, если они употребляются без цифр, за исключением единиц физических величин в

таблицах и в расшифровках буквенных обозначений, входящих в формулы и рисунки.

В тексте, за исключением формул, таблиц и рисунков, не допускается:

- применять знак минус (-) перед отрицательными значениями величин; следует писать слово «минус»;

- применять без числовых значений математические знаки, например, $>$ (больше), $<$ (меньше), $=$ (равно), $\geq$ (больше или равно), $\leq$ (меньше или равно), $\neq$ (не равно), а также знаки № (номер), % (процент).

Условные буквенные обозначения или знаки должны соответствовать принятым в действующем законодательстве и государственных стандартах.

В тексте документа перед значением параметра дают его пояснение, например, «Сопротивление нагрузки R_n ».

При применении условных обозначений, не установленных действующими стандартами, их следует пояснять в тексте или в перечне обозначений.

В пояснительной записке следует применять стандартные единицы физических единиц физических величин, их наименования и обозначения в соответствии с ГОСТ 8.417. При этом применение разных систем обозначения физических величин не допускается.

В тексте числовые значения величин с обозначением единиц физических величин и единиц счета пишутся цифрами, а числа без обозначения единиц физических величин и единиц счета от единицы до девяти - словами.

Примеры

1. В качестве нагрузочного резистора берут четыре резистора сопротивлением 200 Ом, соединенных параллельно.

2. Для испытаний отобрать 50 транзисторов.

Если в тексте проводится ряд числовых значений, выраженных в одной и той же единице физической величины, то ее указывают только после последнего числового значения, например 5,6; 6,8; 7,5 Ом. Если в тексте приводят диапазон числовых значений, выраженных в одной и той же единице физической величины, то обозначение этой единицы указывается после последнего числового значения диапазона.

Примеры

1. От 6 до 9 А.

2. От минус 40 до плюс 60°C.

Недопустимо переносить на разные строки или страницы числовое значение и единицу физической величины, кроме таковых, помещенных в таблицах.

Дробные числа в тексте приводят в виде десятичных дробей. При невозможности выражения чисел в этом виде, допускается их записывать в виде простой дроби в одну строчку через косую черту, например, 5/35.

В формулах в качестве символов следует применять обозначения, установленные государственными стандартами. Пояснения символов и числовых коэффициентов, входящих в формулу, если они не пояснены ранее в тексте, должны быть приведены непосредственно под формулой. Пояснения каждого символа следует давать с новой строки в той последовательности, в которой символы приведены в формуле. Первая строка пояснения должна начинаться с начала строки со слова «где» без двоеточия после него.

Пример

Теоретическая ВАХ электронно-дырочного перехода определяется соотношением

$$I = I_0 \left(e^{U/(m\varphi_m)} - 1 \right), \quad (1.1)$$

где I_0 - обратный ток насыщения (ток экстракции, обусловленный неосновными носителями заряда; значение его очень мало);

U - напряжение на p - n -переходе;

φ_m - температурный потенциал, $\varphi_m = 25,28$ мВ при $T = 20$ С°;

T - температура,

e - заряд электрона;

m - поправочный коэффициент.

Формулы, следующие одна за другой и не разделенные текстом, разделяют запятой.

Числовые значения символов подставляют в том же порядке, что и символы в аналитической формуле.

Переносить формулы на следующую строку допускается только на знаках выполняемых операций, причем знак в начале следующей строки повторяют. При переносе формулы на знаке умножения применяют знак “х”. Применение машинописных и рукописных символов в одной формуле не допускается. Формулы должны нумероваться сквозной нумерацией арабскими цифрами, которые записывают на уровне формулы в круглых скобках справа в конце строки. Ссылки на формулы дают также в скобках, например, ...согласно формуле (1)... . Формулы приложений нумеруются с добавлением перед цифрой обозначения приложения, разделенных точкой, например, ...формула (В.1)... . Допускается нумерация формул в пределах раздела. В этом случае номер формулы состоит из номера раздела и порядкового номера формулы, разделенных точкой, например, (5.1).

1.2.1.4 Библиографический список

Список должен содержать перечень источников, использованных при выполнении работы.

Сведения об источниках следует располагать в алфавитном порядке, по фамилиям авторов.

В начале списка помещают законодательную или нормативную литературу.

После указанных материалов приводят остальную литературу: вначале отечественную, затем иностранную.

Примеры некоторых ссылок приведены ниже.

Книги одного автора:

Лурье, М.С. Аналоговые устройства промышленной электроники / М.С. Лурье. – Красноярск: КГТА, 1996. – 179 с.

Книги двух и трех авторов:

Алексеев, А.Г. Операционные усилители и их применение / А.Г. Алексеев, Г.В. Бойшило, - М.: Радио и связь, 1995. – 389 с.

Книги четырех и более авторов:

Промышленная электроника / А.И. Котляровский [и др.]. – М.: Недра, 1985. – 256 с.

Переводные издания:

Хоровиц, П. Искусство схемотехники: в 2 т.: Пер. с англ. / П. Хоровиц, У. Хилл. - М., 1996, Т.1. – 598 с.

Материалы конференций, симпозиумов, съездов:

Лурье, М.С. Аппаратный метод снижения погрешностей вихревых расходомеров / М.С. Лурье, И.А. Иванов // Коммерческий учет энергоносителей: Сб. материалов 21-й Международной научно-практической конференции – СПб, 2005. – с. 236 – 238.

Статьи из журналов:

Лурье, М.С. Влияние шероховатости внутренней поверхности трубопровода на погрешность измерения погружных вихревых расходомеров / М.С. Лурье, Э.М. Шейнин // Измерительная техника. -2006. - №5. - С. 34 - 36.

Патенты

Патент 2234063 Российская Федерация, МПК G 01 F 1/32, Вихревой расходомер / Лурье М.С., Елизарьева М.Ю., Плотников С.М., Филиппова О.М.; заявитель и патентообладатель Сибир. госуд. технолог. ун-т. – заявка №2002119493; заявл. 17.07.2002; опубл. 10.08.2004, Бюл. №25.–7 с.

1.2.2 Требования к оформлению графической части курсовой работы

Графическая часть курсовой работы должна отражать ее основные результаты и наглядно подтверждать изложенный в тексте материал и может быть представлена в виде чертежей, схем, таблиц.

Графическая часть выполняется либо вручную карандашом на ватманских листах, либо печатается на принтере или графопостроителе.

Объем графической части не должен превышать двух листов формата А5.

При выполнении схем необходимо применять условные графические обозначения, установленные нормативными документами:

- для резисторов и конденсаторов ГОСТ 5.728-74;
- для полупроводниковых приборов ГОСТ 5.730-73;
- для элементов цифровой техники ГОСТ 5.743-91;
- для элементов аналоговой техники ГОСТ 5.759-85.

Некоторые основные условные обозначения приведены в Приложении Г.

На каждом листе графической части необходимо поместить угловой штамп в соответствии с Приложением Д.

Над угловой надписью следует расположить перечень элементов схемы, как показано в Приложении Д.

Все элементы схемы должны быть обозначены.

Например, резисторы обозначаются как R1, R2, ... и т.д., конденсаторы: C1, C2, ... и т.д., аналоговые микросхемы DA1, DA2, ... и т.д.: цифровые микросхемы: DD1, DD2, ... и т.д., диоды: VD1, VD2, ... и т.д., транзисторы: VT1, VT2, ... и т.д.

Слева или под обозначением элемента должна помещаться его величина (для резисторов и конденсаторов).

2 СОСТАВ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа заключается в разработке двух электронных узлов:

- *усилителя с заданной частотной характеристикой;*
- *блока питания для усилителя и цифрового блока.*

Результаты расчетов электронных узлов и разработанные блок-схемы должны быть приведены в пояснительной записке (основной части курсовой работы).

Принципиальные электрические схемы электронных узлов и перечень их элементов приводятся в графической части работы.

Варианты заданий на курсовую работу приведены на странице 66 в разделе «Варианты заданий» (таблица 5.1).

Исходные данные на проектирование блока питания определяются расчетным путем.

3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

3.1 Структурная схема усилителя

Исходными данными для разработки усилителя являются:

- 1) E_g - ЭДС источника сигнала, В;
- 2) R_g – внутреннее сопротивление источника сигнала, кОм;
- 3) R_n – сопротивление нагрузки усилителя, Ом;
- 4) P_n – мощность нагрузки, Вт.

Кроме того заданы требования к частотной характеристике усилителя:

- 1) тип фильтра;
- 2) тип аппроксимации частотной характеристики фильтра;
- 3) порядок фильтра;
- 4) f_c - частота среза (для ФНЧ и ФВЧ), Гц;
- 5) f_n - частота нижней границы полосы пропускания (или задерживания) для полосовых фильтров, Гц;
- 6) f_v - частота верхней границы полосы пропускания (или задерживания) для полосовых фильтров, Гц.

Общая схема усилителя показана на рисунке 3.1.

Входной каскад (ВК) предназначен для согласования источника сигнала с усилителем и предварительного усиления входного сигнала. Коэффициент усиления по напряжению данного каскада не следует делать выше 15 – 25.

Активный фильтр (АФ) формирует заданные частотные свойства усилителя и может усиливать входной сигнал, если это необходимо.



Рисунок 3.1 – Структурная схема усилителя

Коэффициент усиления активного фильтра не следует задавать слишком высоким, поскольку это иногда затрудняет выбор операционного усилителя. Его следует выбирать в диапазоне 1 – 10.

Следует учесть, что схема фильтра верхних частот (ФВЧ), рекомендованная к расчету в данной работе, выполнена на повторителе напряжения и имеет фиксированный коэффициент усиления, равный единице.

Усилитель мощности (УН) служит для создания в нагрузке требуемой мощности усиленного сигнала.

3.2 Определение основных параметров усилителя

Первым шагом выполнения курсовой работы является определение четырех основных параметров будущего усилителя:

- 1) $R_{вх}$ - входного сопротивления усилителя, кОм;
- 2) U_n - действующего значения напряжения на нагрузке, В;
- 3) I_n - действующего значения тока нагрузки усилителя, А.
- 4) K_u - коэффициента усиления по напряжению;

Входное сопротивление усилителя определяется таким образом:

$$R_{вх} = R_2 \cdot (10 \div 100). \quad (3.1)$$

Зная величину требуемого входного сопротивления $R_{вх}$ усилителя, можно правильно выбрать схему входного каскада.

Действующее напряжение на нагрузке находится по формуле:

$$U_n = \sqrt{K \cdot P_n \cdot R_n}, \quad K = 1,1. \quad (3.2)$$

Коэффициент $K = 1,1$ в выражении (3.2) принят для обеспечения некоторого запаса по напряжению в усилителе мощности.

Действующее значение тока нагрузки находится так:

$$I_n = \frac{U_n}{R_n}. \quad (3.3)$$

Коэффициент усиления по напряжению рассчитывается по выражению:

$$K_u = \frac{U_n}{E_2}. \quad (3.4)$$

После расчета основных параметров усилителя нужно распределить усиление по каскадам.

Известно, что общий коэффициент усиления многокаскадного усилителя K_u равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов. Поэтому

$$K_u = K_{вк} \cdot K_{аф} \cdot K_{ум}, \quad (3.5)$$

где $K_{вк}$ - коэффициент усиления по напряжению входного каскада;

$K_{аф}$ - коэффициент усиления по напряжению активного фильтра;

$K_{ум}$ - коэффициент усиления по напряжению усилителя мощности.

Для дальнейшего расчета следует более или менее равномерно распределить общий коэффициент усиления по каскадам, с учетом вышеуказанных замечаний.

Например, общий коэффициент усиления усилителя с фильтром нижних частот равен 108.

Распределяем этот коэффициент таким образом:

$K_{вк} = 6$; $K_{аф} = 3$; $K_{ум} = 6$. Получаем $K_u = 6 \cdot 3 \cdot 6 = 108$.

Другой пример: общий коэффициент усиления усилителя с фильтром верхних частот равен 108.

Распределяет этот коэффициент таким образом:

$K_{вк} = 10,4$; $K_{аф} = 1$; $K_{ум} = 10,4$. Получаем $K_u = 10,4 \cdot 1 \cdot 10,4 = 108$.

3.3 Выбор схемы и параметров входного каскада

Схема входного каскада в данной работе выбирается из двух вариантов:

- схема инвертирующего усилителя на операционном усилителе (ОУ) (рисунок 3.2);
- схема неинвертирующего усилителя на ОУ (рисунок 3.3).

Инвертирующий усилитель имеет значительно меньшую зависимость напряжения смещения от частоты и амплитуды входного сигнала, чем неинвертирующий. Поэтому следует стараться применять во входном каскаде схему инвертирующего усилителя, если это возможно.

Перед выбором схемы входного каскада следует определить его возможное входное сопротивление $R_{вх_ИНВ}$ в схеме инвертирующего усилителя.

$$R_{вх_ИНВ} = \frac{1000}{K_{вк}} \text{ [кОм]}. \quad (3.6)$$

Если $R_{вх_ИНВ} \leq R_{вх}$, то следует использовать схему инвертирующего усилителя (рисунок 3.2).

Если $R_{вх_ИНВ} > R_{вх}$, следует применить схему неинвертирующего усилителя (рисунок 3.3).

3.3.1 Расчет инвертирующего усилителя

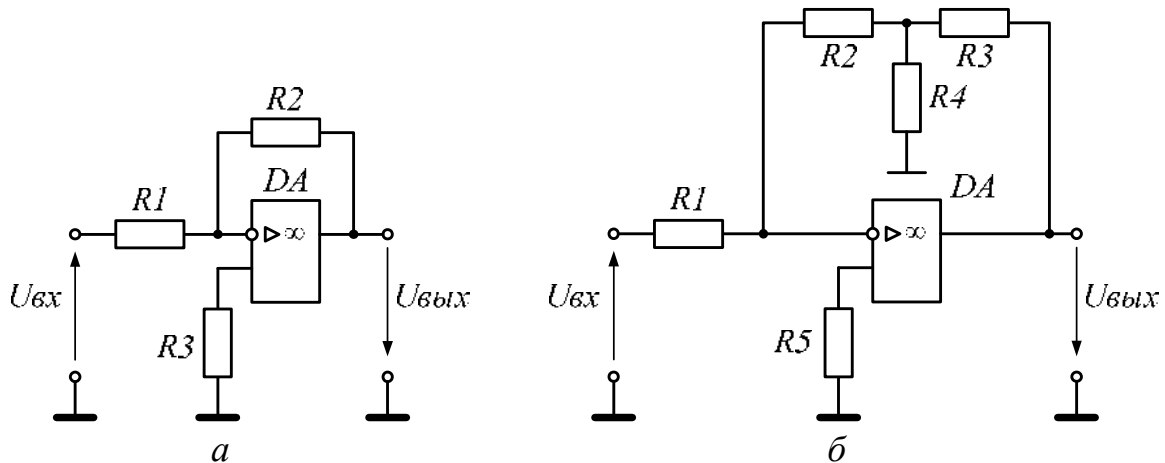


Рисунок 3.2 – Инвертирующий усилитель на ОУ:

а – простая схема усилителя; б – вариант с Т-образным мостом в цепи обратной связи

Параметры простой схемы инвертирующего усилителя:

$$R1 = R_{вх}, \quad R2 = R1 \cdot K_{вк}, \quad R3 = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2}. \quad (3.7)$$

Величину резистора $R2$ следует выбирать не более 1 МОм.

Параметры схемы инвертирующего усилителя с Т-образным мостом:

$$R1 = R_{вх}, \quad R_{\Sigma} = R1 \cdot K_{вк} = R2 + R3 + \frac{R2 \cdot R3}{R4}, \quad R5 = \frac{R1 \cdot R_{\Sigma}}{R1 + R_{\Sigma}}. \quad (3.8)$$

В частном случае, если

$$R1 = R2 = R3 = R4 = R_{вх}, \quad \text{то} \quad K_{вк} = 3, \quad R5 = \frac{3}{2} R_{вх}. \quad (3.9)$$

3.3.2 Расчет неинвертирующего усилителя

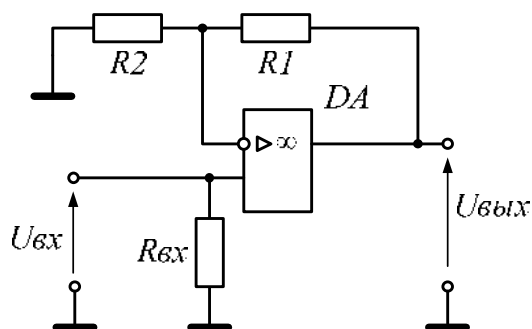


Рисунок 3.3 – Неинвертирующий усилитель на ОУ

Параметры схемы неинвертирующего усилителя:

Задаем сопротивление $R1$, при этом соблюдаем условие $10 \text{ кОм} \leq R1 \leq 1 \text{ МОм}$. Сопротивление $R2$ определяется по выражению

$$R2 = \frac{R1}{K_{вк} - 1}. \quad (3.10)$$

В данной схеме входное сопротивление неинвертирующего усилителя $R_{вх_{НУ}}$ очень велико и определяется как

$$R_{вх_{НУ}} = R_{вх_{ОУ}} \cdot \frac{K_{и_{ОУ}}}{K_{вк}} \geq 10^9 \text{ Ом}, \quad (3.11)$$

где $R_{вх_{ОУ}}$, $K_{и_{ОУ}}$ - входное сопротивление и коэффициент усиления по напряжению операционного усилителя, соответственно.

Поскольку параметры $R_{вх_{ОУ}}$ и $K_{и_{ОУ}}$ операционного усилителя изменяются от экземпляра к экземпляру, то входное сопротивление схемы оказывается не вполне определенным. Кроме того, большая величина $R_{вх_{НУ}}$ может привести к пробоя входных транзисторов ОУ.

Поэтому, для определенности величины входного сопротивления и для исключения пробоя усилителя по входу, параллельно входу усилителя включают сопротивление $R3 = R_{вх}$.

Все рассчитанные величины резисторов в схемах усилителей необходимо округлять до ближайших номинальных значений в соответствии с таблицей 3.1.

Таблица 3.1 – Ряды номинальных сопротивлений и емкостей

E24 ($\pm 5\%$)	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,7	3,0
	3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1
E12 ($\pm 10\%$)	1,0		1,2		1,5		1,8		2,2		2,7	
	3,3		3,9		4,7		5,6		6,8		8,2	

Выбирая марку ОУ, необходимо учитывать цепи коррекции, нужные для данного ОУ при заданном коэффициенте усиления, и предусматривать, если это требуется, элементы регулировки смещения нуля.

Частотная коррекция ОУ осуществляется путем подключения внешних или внутренних конденсаторов и резисторов к соответствующим цепям ОУ. Ее назначение – предотвращать возможные автоколебания при охвате ОУ отрицательной обратной связью. При фазовом сдвиге в ОУ более 180° (что возможно на высоких частотах) возникает возможность возникновения автоколебаний, так как такой фазовый сдвиг в сочетании со сдвигом сигнала в цепи отрицательной обратной связи на 180° превращает отрицательную обратную связь в положительную.

Ряд марок ОУ имеет внешние навесные элементы для частотной коррекции, которые подключаются ко входам ОУ с обозначением «FC».

Другие ОУ имеют встроенные цепи коррекции и не нуждаются в навесных элементах.

Для устранения смещения нуля современные ОУ имеют специальные входы «НС», для подключения внешних балансирующих потенциометров. При первом включении усилителя, во время настройки, с помощью этих потенциометров устраняется смещение нуля усилителя. В дальнейшем оси потенциометров фиксируются (обычно каплей краски или лака) и больше не регулируются.

В курсовой работе при изображении ОУ на схеме нужно указывать все его внешние соединения (если они предусмотрены паспортом): цепи частотной коррекции и цепи балансировки нуля.

Схемы включения различных типов ОУ приведены в Приложении Е.

3.4 Выбор схемы и параметров активного фильтра

3.4.1 Основные понятия теории фильтров

Электрический фильтр – устройство для выделения желательных компонентов спектра электрического сигнала и/или подавления нежелательных.

Активным фильтром называют такой, в котором присутствует один или несколько активных компонентов, к примеру, транзистор или операционный усилитель. В данной курсовой работе все фильтры строятся на базе ОУ.

Все фильтры характеризуются зависимостью коэффициента передачи от частоты, называемой амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) фильтра.

По виду частотной характеристики фильтры подразделяются на:

- **фильтры нижних частот (ФНЧ)**. Это фильтры, пропускающие частотный спектр сигнала ниже некоторой частоты, которая называется частотой среза f_c , и уменьшающие (подавляющие) частоты сигнала выше этой частоты. Степень подавления каждой частоты зависит от вида фильтра.

- **фильтры верхних частот (ФВЧ)**. Это фильтры, пропускающие высокие частоты входного сигнала, при этом подавляя частоты сигнала меньше, чем частота среза. Степень подавления зависит от конкретного типа фильтра;

- **полосно-пропускающие фильтры (ППФ)**. Фильтры, которые пропускают сигналы с частотой, находящейся в некоторой полосе частот $f_n < f_c < f_v$;

- **полосно-задерживающие (режекторные) фильтры (ПЗФ)**. Фильтры, которые задерживают сигналы с частотой, находящейся в некоторой полосе частот $f_n < f_c < f_v$;

- **фазовые фильтры**. Это фильтры, пропускающие все частоты сигнала с равным усилением, однако изменяющие фазу сигнала. В нашей курсовой работе такие фильтры не применяются.

Наиболее полно исследованы фильтры нижних частот. От них легко перейти к другим видам фильтров. Идеальный ФНЧ практически нереализуем. Он имеет прямоугольную форму АЧХ, которая иногда в литературе называется «кирпичной стеной» (рисунок 3.4, а). Но существует несколько аппроксимаций (настроек) идеального фильтра, исследованных различными учеными и носящих их имена.

Фильтры Баттерворта – это наиболее употребительные фильтры с максимально плоской формой АЧХ. Подобные фильтры были впервые описаны британским инженером Стефаном Баттервортом в статье «О теории фильтрующих усилителей», в журнале *Wireless Engineer* в 1930 году. Они имеют достаточную крутизну скатов и приемлемо пропускают импульсные сигналы.

АЧХ фильтра Баттерворта показана на рисунке 3.4, б.

Фильтры Чебышева I рода имеют крутизну скатов АЧХ большую, чем фильтры Баттерворта, но имеют существенные пульсации амплитудно-частотной характеристики на частотах полос пропускания, чем у фильтров других типов. Фильтр получил название в честь известного русского математика XIX века Пафнутия Львовича Чебышева, так как характеристики этого фильтра основываются на многочленах Чебышева.

АЧХ фильтров Чебышева I рода показана на рисунке 3.4, в.

Фильтры Чебышева II рода, или инверсные фильтры Чебышева. Эти фильтры имеют плоскую АЧХ в полосе пропускания, подобную фильтру Баттерворта, но существенные пульсации амплитудно-частотной характеристики на частотах полос подавления.

Фильтры Чебышева обычно используются там, где требуется с помощью фильтра небольшого порядка обеспечить требуемые характеристики АЧХ, в частности, хорошее подавление частот из полосы подавления, и при этом гладкость АЧХ на частотах полос пропускания и подавления не столь важна. АЧХ фильтров Чебышева II рода показана на рисунке 3.4, г.

Фильтры Чебышева-Кауэра, или эллиптические фильтры (иногда также называемые полными фильтрами Чебышева, двойными Чебышева, фильтрами Дарлингтона или Золотарёва) обладают колебаниями коэффициента передачи, как в полосе пропускания, так и в полосе задерживания. Здесь быстро достигается заданное затухание за пределами полосы пропускания и сохраняется его минимальное значение на нежелательных частотах. Аналогично инверсным фильтрам Чебышева на определённых частотах в полосе задерживания они имеют бесконечное затухание.

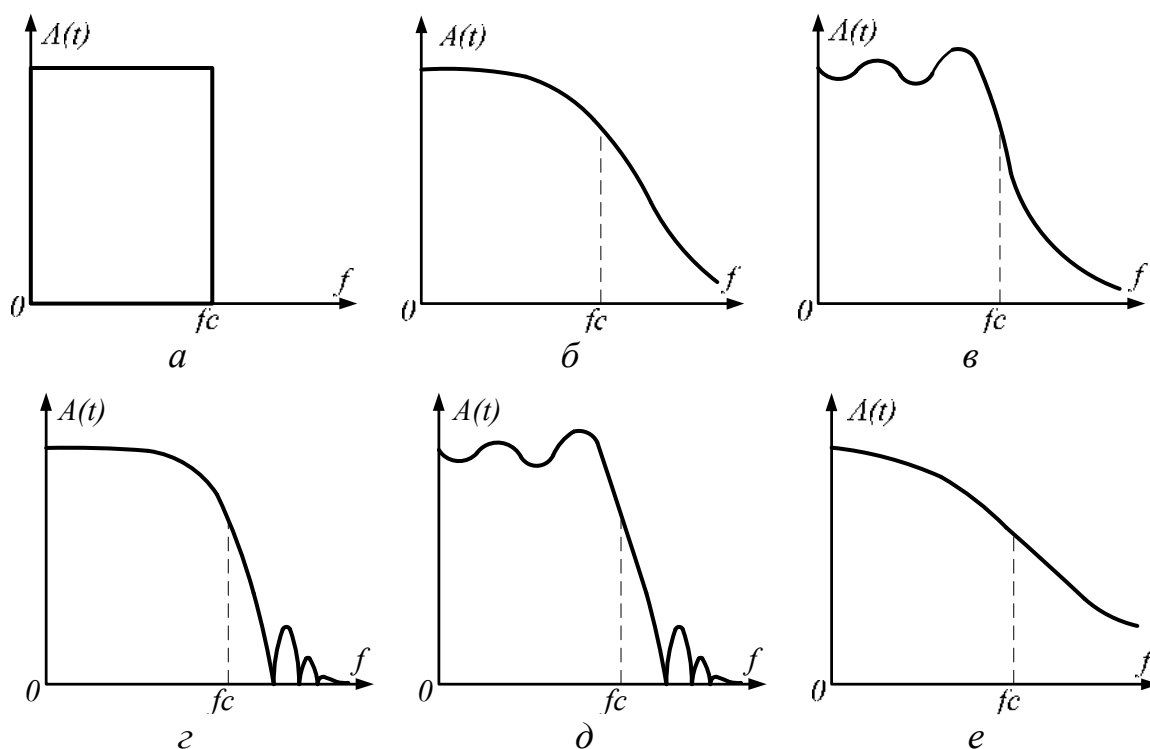


Рисунок 3.4 – АЧХ фильтров нижних частот: а – идеальный фильтр; б – фильтр Баттерворта; в – фильтр Чебышева I рода; г – фильтр Чебышева II рода; д – эллиптический фильтр; е – фильтр Бесселя

Для аппроксимации амплитудно-частотной характеристики идеального фильтра по числу элементов цепи эллиптические фильтры, по-видимому, наиболее эффективны. При заданном порядке функции имеется возможность создать наиболее экономичный фильтр либо с очень крутой переходной областью, либо с очень высоким затуханием в полосе задерживания. С другой стороны, само затухание не спадает монотонно к бесконечному значению за пределами полосы затухания, а сохраняется на заранее обусловленном уровне. Следует отметить, что фильтры Чебышева и инверсные Чебышева представляют собой частные случаи более общих фильтров Чебышева-Кауэра.

АЧХ фильтров Чебышева-Кауэра показана на рисунке 3.4, д.

Фильтры Бесселя – применяются для передачи импульсных сигналов, так как форма сигналов, которые проходят через фильтр, остается практически неизменной.

АЧХ фильтров Бесселя показана на рисунке 3.4, е.

Схемная реализация АЧХ рассмотренных фильтров, осуществляется с помощью активных фильтров, состоящих из ОУ и пассивных элементов R и C .

Для анализа фильтров используется понятие передаточной функции. Это отношение изображений по Лапласу выходного $U_{\text{вых}}(p)$ и входного $U_{\text{вх}}(p)$ напряжений:

$$W(p) = \frac{U_{вых}(p)}{U_{вх}(p)}. \quad (3.12)$$

Передаточные функции фильтров могут быть разложены на сомножители 1-го и 2-го порядка.

В случае четного порядка фильтра n , передаточные функции **полиномиальных фильтров**: Баттерворта, Чебышева I рода и Бесселя - приобретают вид

$$W(p) = \prod_{i=1}^{n/2} \frac{c_i \omega_c^2}{p^2 + pb_i \omega_c + c_i \omega_c^2}, \quad (3.13)$$

где b_i, c_i - безразмерные коэффициенты.

Для **неполиномиальных фильтров** – инверсного фильтра Чебышева и эллиптического, получаем

$$W(p) = \prod_{i=1}^{n/2} \frac{(p^2 + a_i \omega_c^2) \cdot c_i / a_i}{p^2 + pb_i \omega_c + c_i \omega_c^2}, \quad (3.14)$$

где a_i, b_i, c_i - безразмерные коэффициенты.

Задавая значения коэффициентов в выражениях (3.11) и (3.12), можно получать АЧХ фильтров различных аппроксимаций.

В таблице 3.2 приведены эти коэффициенты для некоторых фильтров 2-го, 4-го и 6-го порядка.

В таблице 3.2 приняты обозначения:

$q1$ - уровень минимумов пульсаций АЧХ в полосе пропускания (уровень максимумов принят за 0 дБ). Значение 0,5 дБ соответствует отклонению от 100% примерно на 5,5%; 1 дБ – 10,9%; 2 дБ – 20,6%;

$q2$ - уровень максимумов пульсаций АЧХ в полосе задерживания, дБ. Уровень минус 40 дБ соответствует 1%.

Для получения фильтров высоких порядков (четных) следует использовать соединенные последовательно звенья фильтров 2-го порядка.

Таблица 3.2 – Коэффициенты аппроксимации фильтров

Порядок фильтра		2		4		6	
Номер звена		1	1	2	1	2	3
Тип фильтра	Коэф.	Значения коэффициентов					
Баттерворта	b	1,4142	0,7654	1,8478	0,5176	1,4142	1,9319
	c	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
1	2	3	4	5	6	7	8
Чебышева I $q1=0,5$ дБ	b	1,4256	0,3507	0,8467	0,1553	0,4243	0,5796
	c	1,5162	1,0635	0,3564	1,0230	0,5900	0,1570
Чебышева I $q1=1$ дБ	b	1,0977	0,2791	0,6737	0,1244	0,3398	0,4641
	c	1,1025	0,9865	0,2794	0,9907	0,5577	0,1247

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4	5	6	7	8
Чебышева I $q1=2$ дБ	b	0,8038	0,2098	0,5064	0,0939	0,2567	0,3506
	c	0,8231	0,9237	0,2216	0,9660	0,5329	0,0999
Чебышева II $q2=-40$ дБ	a	100,99	4,7485	27,676	2,1487	4,0094	29,927
	b	1,4141	0,6892	2,0315	0,3791	1,3338	2,5582
	c	1,0099	1,0375	1,2667	1,0346	1,3323	1,8705
Эллиптический $q1=0,5$ дБ $q2=-40$ дБ	a	143,63	3,0091	14,910	1,3095	9,9655	1,8557
	b	1,4180	0,9071	0,2719	0,7701	0,3058	0,0650
	c	1,5214	0,4478	1,0614	0,3176	0,7965	1,0142
Бесселя	b	3,0000	5,7924	4,2076	6,0319	8,4967	7,4714
	c	3,0000	9,1401	11,488	26,514	18,801	20,853

3.4.2 Фильтры нижних частот

Чаще других применяют две схемы, изображенные на рисунке 3.5, а и 3.5, б.

Схему на рисунке 3.5, а называют фильтром с положительной обратной связью или схемой **Саллена-Кея**, (или Саллена-Ки), а схему на рисунке 3.5, б называют фильтром со сложной отрицательной обратной связью или схемой **Рауха**.

Для схемы Саллена-Кея передаточная функция имеет вид

$$W(p) = \frac{1 + R4/R3}{1 + p \cdot C2 \cdot (R1 + R2) - p \cdot C1 \cdot R1 \cdot (R4/R3) + p^2 \cdot C1 \cdot C2 \cdot R1 \cdot R2}. \quad (3.15)$$

Для схемы Рауха передаточная функция будет такова

$$W(p) = \frac{R2/R1}{1 + p \cdot C2 \cdot (R2 + R3 + R2 \cdot R3/R1) + p^2 \cdot C1 \cdot C2 \cdot R2 \cdot R3}. \quad (3.16)$$

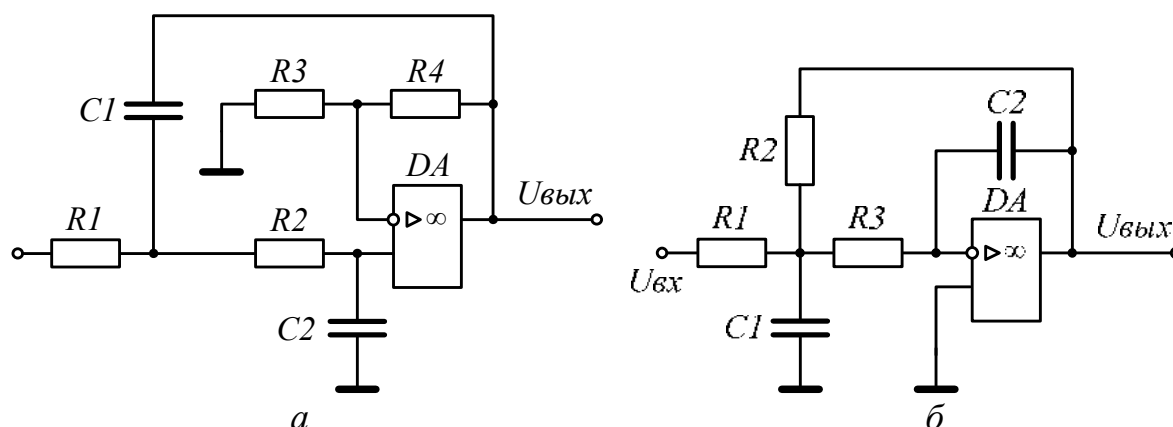


Рисунок 3.5 – Схемы ФНЧ 2-го порядка: а – Саллен-Кея; б - Рауха

Схемы Саллен-Кея и Рауха пригодны только для реализации полиномиальных фильтров: Баттерворта, Чебышева I рода и Бесселя.

Более универсальная, хотя и более сложная схема ФНЧ приведена на рисунке 3.6. Это так называемое – **биквадратное звено**. В ней при усло-

вии, что $R1 \cdot R3 = R2 \cdot R7$, клемму $U_{вых1}$ можно использовать как выходное напряжение звена эллиптического фильтра или инверсного фильтра Чебышева.

То есть, это звено позволяет реализовывать неполиномиальные фильтры 2-го порядка.

Если же $R7 = \infty$ и $R8 = \infty$, то выходная клемма $U_{вых2}$ соответствует звену 2-го порядка фильтров Баттерворта, Чебышева I рода и Бесселя. Биквадратное звено менее чувствительно к неточности элементов и проще в настройке.

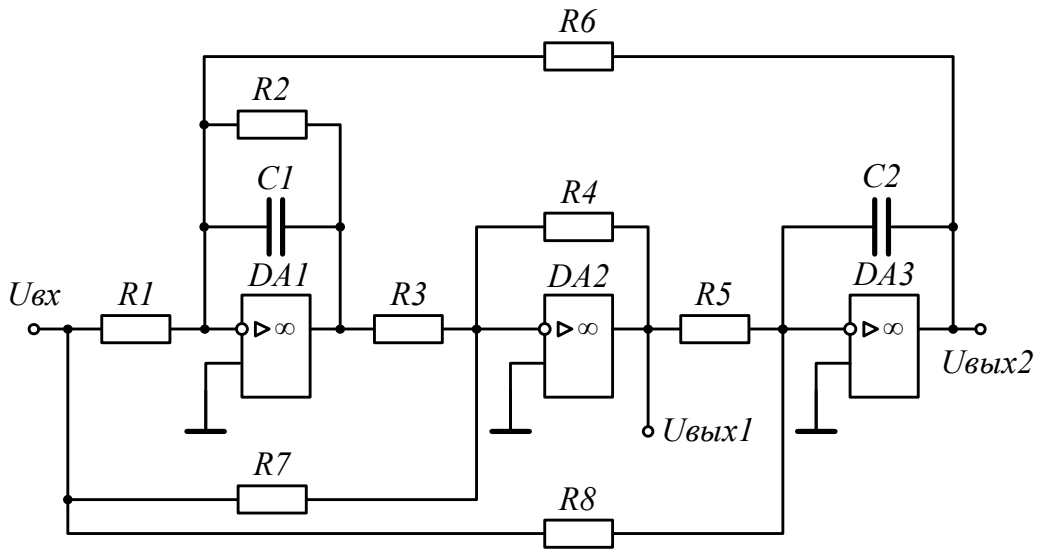


Рисунок 3.6 – Схема биквадратного звена (реализация неполиномиальных фильтров 2-го порядка по выходу $U_{вых1}$)

Для биквадратного звена передаточные функции в зависимости от выходной клеммы будут такими

$$W(p) = \frac{U_{вых1}(p)}{U_{вх}(p)} = \frac{-\frac{R5}{R8} + p \cdot C2 \frac{R5 \cdot R6}{R2} \left(\frac{R2}{R1} - \frac{R3}{R7} \right) - p^2 \cdot C1 \cdot C2 \frac{R3 \cdot R5 \cdot R6}{R7}}{1 + p \cdot C2 \cdot R3 \cdot R5 \frac{R6}{R2 \cdot R4} + p^2 C1 \cdot C2 \cdot R3 \cdot R5 \frac{R6}{R4}},$$

$$W(p) = \frac{U_{вых2}(p)}{U_{вх}(p)} = \frac{-\frac{R6}{R1} + \frac{R3}{R2} \left(\frac{R6}{R7} - \frac{R5 \cdot R6}{R4 \cdot R8} \right) (1 + p \cdot C1 \div R2)}{1 + p \cdot C2 \cdot R3 \cdot R5 \frac{R6}{R2 \cdot R4} + p^2 C1 \cdot C2 \cdot R3 \cdot R5 \frac{R6}{R4}}. \quad (3.17)$$

Общий метод расчета ФНЧ с указанными схемными реализациями следующий:

- исходными данными для расчета являются частота среза фильтра f_c и коэффициент усиления фильтра K_{ϕ} .

- выбираем базовую схему фильтра 2-го порядка. Для полиномиальных фильтров берем схему Саллена –Кея или схему Рауха. Для неполиномиальных - биквадратное звено;

- по расчетным формулам (приведенным ниже) определяем значения всех резисторов и конденсаторов. Получив значение элемента, сразу округляем его до ближайшего номинального значения по таблице 3.1. Используем ряд E25. Во всех расчетах, кроме пунктов 1 и 2, во всех формулах используется система СИ. Все величины емкостей подставляются в Фарад, все величины сопротивлений в Ом. Учитываем, что $1 \text{ Ф} = 10^6 \text{ мкФ}$ или $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$;

- если фильтр имеет 4-й или 6-й порядок, включаем последовательно второе (для 4-го) и третье (для 6-го) звенья. Коэффициенты a , b , и c для каждого звена берем из таблицы 3.2, где указаны эти коэффициенты для 1-го, 2-го и 3-го звена. Каждое звено рассчитывают по своим коэффициентам и в том порядке, в котором они указаны в таблице 3.2 друг за другом последовательно включают в схему.

3.4.2.1 Расчет одного звена схемы Саллена-Кея

1. Находим величину конденсатора $C1$. Для этого используем формулу

$$C1 = \frac{10}{fc} [\text{мкФ}], \text{ где } fc \text{ в } [\text{Гц}]. \quad (3.18)$$

2. Определяем величину емкости конденсатора $C5$.

$$C2 \leq \left[A - 1 + \frac{b^2}{4 \cdot c} \right] \cdot C1, \quad (3.19)$$

где b и c - коэффициенты для данного звена из таблицы 3.2;

A - коэффициент усиления данного звена фильтра.

При выборе значения коэффициента усиления звена A следует помнить, что фильтр второго порядка представляет собой одно звено (Саллена-Кея или Рауха), фильтр четвертого порядка – два последовательно включенных звена, и фильтр шестого порядка – три последовательно включенных звена.

При последовательном включении коэффициенты усиления отдельных звеньев перемножаются, поэтому, если разрабатывается фильтр второго порядка, то принимаем $A = K\alpha\phi$, если разрабатывается фильтр четвертого порядка, то следует принять $A = \sqrt{K\alpha\phi}$, наконец, для фильтра шестого порядка $A = \sqrt[3]{K\alpha\phi}$.

3. Определяем величину сопротивления $R1$.

$$R1 = \frac{\frac{1}{\pi \cdot fc \cdot C1}}{b + \sqrt{b^2 + 4 \cdot c \cdot (A-1) - 4 \cdot c \cdot \frac{C2}{C1}}}. \quad (3.20)$$

4. Находим $R2$.

$$R2 = \frac{1}{c \cdot C1 \cdot C2 \cdot R1 \cdot (2 \cdot \pi \cdot fc)^2}. \quad (3.21)$$

5. Находим $R3$ и $R4$.

$$R3 = \frac{A \cdot (R1 + R2)}{A-1}; \quad R4 = A \cdot (R1 + R2). \quad (3.22)$$

Если $A=1$, то $R3 = \infty$, а $R4 = 0$.

3.4.2.2 Расчет схемы Рауха

1. Находим величину конденсатора $C1$. Для этого используем формулу

$$C1 = \frac{10}{fc} \text{ [мкФ]}, \text{ где } fc \text{ в [Гц]}. \quad (3.23)$$

2. Определяем величину емкости конденсатора $C5$.

$$C2 \leq \frac{b^2 \cdot C1}{4 \cdot c \cdot (A+1)}. \quad (3.24)$$

Коэффициенты b и c берем из таблицы 3.2, а коэффициент усиления звена A определяем так же, как и для схемы Саллена-Кея.

3. Находим сопротивление $R2$.

$$R2 = \frac{\frac{A+1}{\pi \cdot fc \cdot C1}}{b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot c \cdot (A+1) \cdot \frac{C2}{C1}}}. \quad (3.25)$$

Если значение под корнем в формуле (3.25) получается отрицательным, то следует уменьшить значение емкости конденсатора $C2$.

4. Определяем $R1$ по выражению

$$R1 = \frac{R2}{A}. \quad (3.26)$$

5. Рассчитываем сопротивление $R3$.

$$R3 = \frac{1}{c \cdot C1 \cdot C2 \cdot R2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot fc)^2}. \quad (3.27)$$

3.4.2.3 Расчет биквадратного звена

А) Биквадратное звено неполиномиальных фильтров с выходным напряжением $U_{\text{вых1}}$.

1. Находим величину конденсатора $C1$. Для этого используем формулу

$$C1 = \frac{10}{f_c} \text{ [мкФ]}, \text{ где } f_c \text{ в [Гц]}. \quad (3.28)$$

2. Величину емкости конденсатора $C2$ принимают равной

$$C2 = C1. \quad (3.29)$$

3. Сопротивления схемы будут равны:

$$\begin{aligned} R1 &= \frac{a}{A \cdot b \cdot c \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot C1}; \\ R2 &= \frac{1}{b \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot C1}; \\ R3 &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot C1}; \\ R4 &= R3; \\ R5 &= \frac{C1 \cdot R6}{C2}; \\ R6 &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot C1 \cdot \sqrt{c}}; \\ R7 &= \frac{a \cdot R3}{A \cdot c}; \\ R8 &= \frac{1}{A \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot C2 \cdot \sqrt{c}}. \end{aligned} \quad (3.30)$$

Б) Биквадратное звено полиномиальных фильтров с выходным напряжением $U_{\text{вых2}}$.

1. Находим величину конденсатора $C1$. Для этого, используем формулу

$$C1 = \frac{10}{f_c} \text{ [мкФ]}, \text{ где } f_c \text{ в [Гц]}. \quad (3.31)$$

2. Величину емкости конденсатора $C2$ принимают равной

$$C2 = C1. \quad (3.32)$$

3. Сопротивления схемы будут равны:

$$\begin{aligned} R4 &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot C1}; \\ R3 &= R5 = R4; \\ R1 &= \frac{R4}{A \cdot c}; \end{aligned}$$

$$R2 = \frac{R4}{b}; \quad (3.33)$$

$$R6 = \frac{R4}{c};$$

$$R7 = R8 = \infty.$$

3.4.3 Фильтры верхних частот

Схема фильтра верхних частот на повторителе показана на рисунке 3.7.

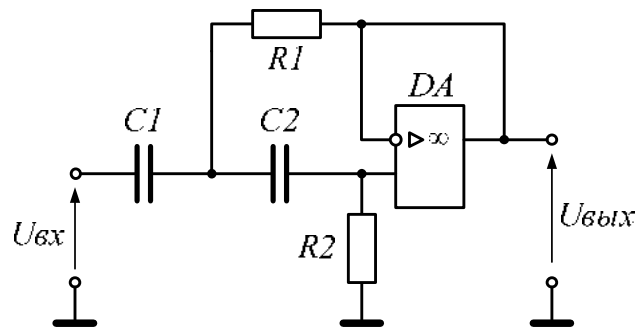


Рисунок 3.7 – Схема фильтра верхних частот 2-го порядка на ОУ

Данная схема ФВЧ является весьма устойчивой. Она имеет стабильные характеристики и часто применяется на практике. Недостатком ее является отсутствие усиления входного сигнала. Для нее $A = 1$.

Расчет данной схемы выполняется по следующей методике.

1. Находим величину конденсатора $C1$. Для этого используем формулу

$$C1 = \frac{10}{f_c} \text{ [мкФ]}, \text{ где } f_c \text{ в [Гц]}. \quad (3.34)$$

2. Величину емкости конденсатора $C2$ принимаем равной

$$C2 = C1. \quad (3.35)$$

3. Сопротивление $R1$ находим таким образом

$$R1 = \frac{1}{\pi \cdot f_c \cdot C1 \cdot b}. \quad (3.36)$$

4. Сопротивление $R2$ определяем по формуле

$$R2 = \frac{b}{4 \cdot \pi \cdot f_c \cdot C1 \cdot c}. \quad (3.37)$$

Как и ранее, коэффициенты b и c выбираем из таблицы 3.2.

Все полученные величины округляем до номинальных значений по таблице 3.1.

3.4.4 Полосовые пропускающие фильтры

Полосовые пропускающие фильтры (ППФ) можно строить двумя путями:

- последовательным соединением двух фильтров ФВЧ и ФНЧ. При этом могут быть получены фильтры с отношением $f_v/f_n \geq 5$. Это так называемые широкополосные полосовые пропускающие фильтры (ШППФ). Построение более узкополосных фильтров таким способом затруднено;
- последовательным соединением двух узкополосных пропускающих фильтров с некоторой небольшой расстройкой их частотных характеристик.

3.4.4.1 Широкополосные полосовые пропускающие фильтры

Рассмотрим первый путь. Схема соединения фильтров ФВЧ и ФНЧ показана на рисунке 5.8, там же показана и результирующая АЧХ.

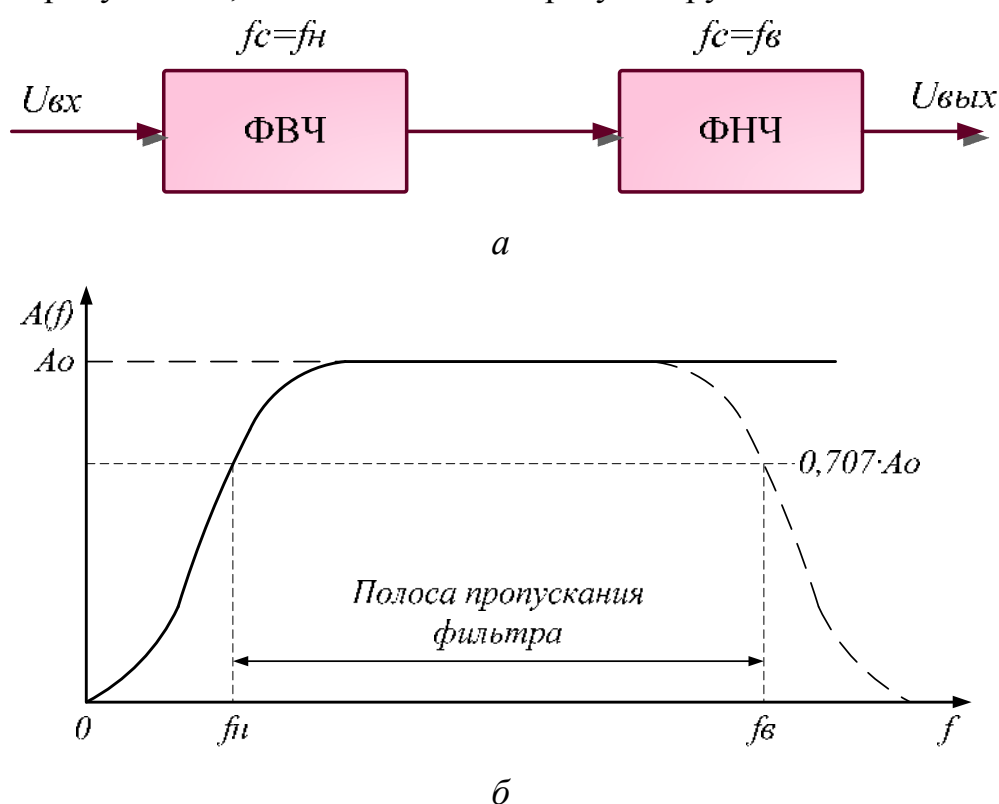


Рисунок 3.8 – Широкополосный полосовой пропускающий фильтр:
а – структурная схема; б – вид результирующей АЧХ

На рисунке A_0 - коэффициент передачи фильтра в полосе пропускания.

При последовательном соединении двух фильтров первого порядка получаем ШППФ 1-го порядка, соединяя последовательно два фильтра второго порядка, получаем ШППФ второго порядка. То есть здесь крутизна скатов АЧХ определяется порядком одного из последовательных включенных фильтров.

При этом для ФВЧ $f_c = f_n$, а для ФНЧ $f_c = f_v$.

Расчет подобных фильтров сводится к расчету соответствующих ФВЧ и ФНЧ по требуемым частотам среза f_c и заданному порядку фильтра.

Если разрабатываемый фильтр должен иметь коэффициент усиления больше единицы, то все усиление обеспечивается звеном ФНЧ.

Таким образом, последовательность проектирования данного фильтра такова:

- по заданным значениям частот нижней и верхней границ полосы пропускания определяем требуемые частоты среза для ФНЧ и ФВЧ;
- по заданному порядку фильтра определяем количество звеньев в каждом из фильтров ВНЧ и ФНЧ;
- рассчитываем ФВЧ с коэффициентом усиления $A = 1$, требуемого порядка на заданную частоту среза $f_c = f_n$;
- рассчитываем ФНЧ с коэффициентом усиления $A = K_{\alpha\phi}$, требуемого порядка на заданную частоту среза $f_c = f_v$;
- включаем последовательно рассчитанные нами фильтры в порядке, показанном на рисунке 3.8.

3.4.4.2 Узкополосные полосовые пропускающие фильтры

Узкополосными считают фильтры, у которых $f_v/f_n < 5$. Создание узкополосных полосовых пропускающих фильтров (УППФ) сложнее, чем широкополосных.

Например, такой фильтр 4-го порядка состоит из двух последовательно включенных звеньев второго порядка со взаимной расстройкой.

Исходными данными для расчета являются частоты нижней f_n и верхней f_v границ полосы пропускания. Для упрощения расчетов будем рассматривать схему фильтра, в котором общий коэффициент усиления фильтра $A = 1$, то есть для данного типа фильтра следует при распределении усиления по каскадам принять $K_{\alpha\phi} = 1$.

Следует отметить, что коэффициенты усиления отдельных звеньев, входящих в состав фильтра, могут иметь коэффициенты усиления отличные от единицы.

Методика расчета данного фильтра состоит из следующих этапов.

1. Определяем среднюю частоту диапазона пропускания

$$f_m = \frac{f_n + f_v}{2}. \quad (3.38)$$

2. Определяем относительное значение полосы пропускания

$$\Delta\Omega = \frac{f_v - f_n}{f_m}. \quad (3.39)$$

3. Составляем уравнение для определения параметров звеньев фильтра

$$a^2 + \left[\frac{a \cdot \Delta\Omega \cdot b}{c(1+a^2)} \right]^2 + \frac{1}{a^2} - 2 - \frac{\Delta\Omega^2}{c} = 0, \quad (3.40)$$

где b и c - коэффициенты из таблицы 3.2, в соответствии с видом аппроксимации разрабатываемого фильтра.

Решаем полученное уравнение относительно параметра a . Численное решение уравнения (3.40) можно выполнить любым способом.

Уравнение (3.40) имеет 8 корней. Но нас интересует только один корень со значением близким к 1. Для практических целей достаточно определить этот корень с точностью до третьего знака после запятой.

4. Находим добротность фильтра

$$Q = \frac{(1+a^2) \cdot c}{a \cdot b \cdot \Delta\Omega}. \quad (3.41)$$

5. Определяем основные параметры последовательно включенных звеньев фильтра

Таблица 3.3 – Параметры звеньев УППФ

Звено фильтра	f_{p_i}	Q_i	A_i
1	$f_{p_1} = f_m / a$	$Q_1 = Q$	$A_1 = Q_1 \cdot \Delta\Omega \cdot \sqrt{1/c}$
2	$f_{p_2} = f_m \cdot a$	$Q_2 = Q$	$A_2 = Q_2 \cdot \Delta\Omega \cdot \sqrt{1/c}$

Для реализации УППФ можно использовать несколько схем. Одна из них, широко применяемая на практике, приведена на рисунке 3.9.

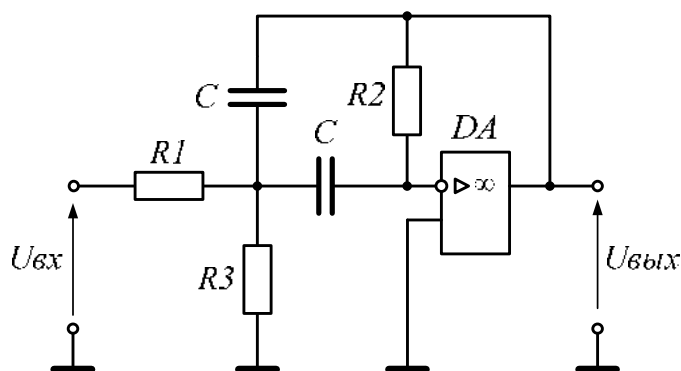


Рисунок 3.9 – Полосовой пропускающий фильтр со сложной отрицательной обратной связью

Расчет полосового пропускающего фильтра со сложной отрицательной обратной связью

1. Находим величину конденсатора C . Для этого используем формулу

$$C = \frac{10}{f_m} \text{ [мкФ]}, \text{ где } f_m \text{ в [Гц]}. \quad (3.42)$$

2. Определяем $R2$ (i – номер звена).

Для первого звена:

$$R2 = \frac{Q1}{\pi \cdot fp_1 \cdot c}. \quad (3.43)$$

Для второго звена:

$$R2 = \frac{Q1}{\pi \cdot fp_2 \cdot c}. \quad (3.44)$$

3. Определяем $R1$.

Для первого звена:

$$R1 = \frac{R2}{2 \cdot A1}. \quad (3.45)$$

Для второго звена:

$$R1 = \frac{R2}{2 \cdot A2}. \quad (5.46)$$

4. Находим $R3$.

Для первого звена:

$$R3 = \frac{A1 \cdot R1}{2 \cdot Q1^2 + A1}. \quad (3.47)$$

Для второго звена:

$$R3 = \frac{A2 \cdot R1}{2 \cdot Q2^2 + A2}. \quad (3.48)$$

При выборе ОУ для данного фильтра следует учитывать, что дифференциальный коэффициент усиления ОУ на частоте fm должен быть больше, чем $2 \cdot Q^2$.

Выбор ОУ здесь следует производить таким образом:

- определить величину $2 \cdot Q^2$;
- найти необходимую частоту единичного усиления ОУ по формуле:
 $f_1' = fm \cdot 2 \cdot Q^2$;
- выбрать усилитель с частотой единичного усиления $f_1 \geq f_1'$.

3.5 Усилитель мощности

Современные усилители мощности (УМ) строятся, в основном, с использованием ОУ по бестрансформаторной схеме. Они состоят из двух частей:

- предварительного каскада на операционном усилителе, включенном по схеме инвертирующего или неинвертирующего усилителя;
- оконечного каскада на комплементарном эмиттерном повторителе, собранного на дополнительно подключенных внешних транзисторах.

Оба каскада охватываются общей отрицательной обратной связью, как показано на рисунке 3.10.

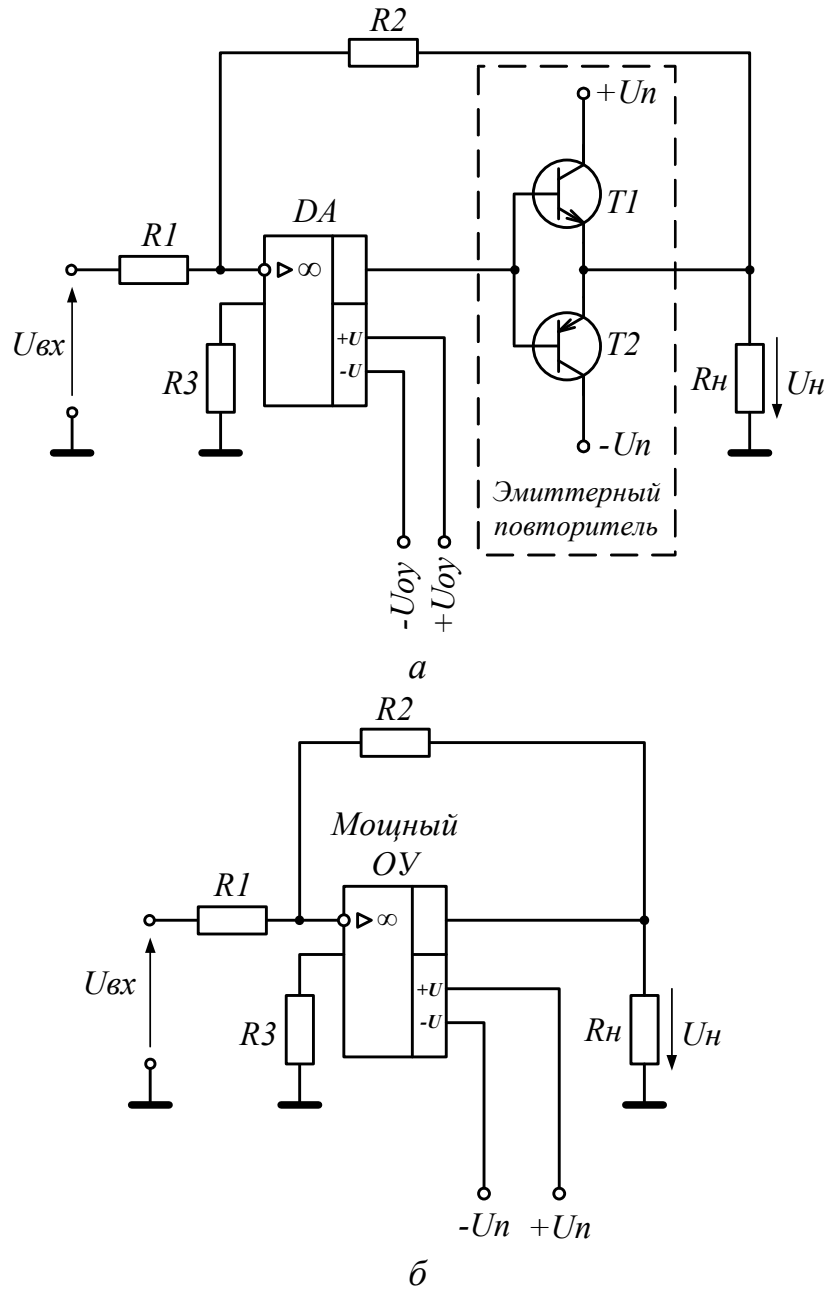


Рисунок 3.10 – Общая структура УМ на базе ОУ: а – на дополнительно подключенных внешних транзисторах; б – на мощном ОУ

Существует ряд типов ОУ, которые в своей структуре уже содержат как каскады предварительного усиления, так и выходной каскад на мощных транзисторах. Это так называемые мощные операционные усилители. Они также могут служить основой УМ.

Операционные усилители общего применения обычно допускают выходной ток от 5 до 10 мА. Существуют специальные мощные ОУ с большим выходным током. К мощным обычно относят усилители, допус-

кающие выходной ток свыше 300 - 500 мА. Мощными можно также считать ОУ, отдающие в нагрузку мощность свыше 1 Вт.

Примером отечественных мощных ОУ могут служить микросхемы К157УД1 с выходным током до 300 мА, К1040УД2 на выходной ток 0,5 А и сдвоенный ОУ К1460УД2Р с током до 1 А.

Мощные ОУ широко представлены среди продукции многих ведущих фирм электронных компонентов.

Примером полупроводникового интегрального мощного ОУ может служить достаточно широко распространенный усилитель LM12 фирмы National Semiconductor с выходным током до 10 А и рассеиваемой мощностью до 90 Вт. Из новых моделей этой фирмы можно отметить монолитный ОУ LM675, наследник знаменитого LM15. Его выходной ток может достигать 3 А при питании от источников $\pm(8...30)$ В. Максимальная рассеиваемая мощность – 30 Вт.

Ещё один интересный пример – операционные усилители ОРА567 и ОРА569 фирмы Texas Instruments. Они различаются лишь корпусами. Это низковольтные ОУ (напряжение питания 2,7...5,5 В), которые способны отдать в нагрузку ток до 2,4 А.

Фирма Linear Technology выпускает ОУ LT1970, обеспечивающий ток через нагрузку до $\pm 0,5$ А при напряжении питания 5...36 В.

Лидирующее положение на рынке мощных ОУ последние годы занимает фирма Apex Microtechnology. Из новых разработок Apex можно обратить внимание на гибридный ОУ типа РА52 с напряжением питания до ± 200 В и выходным током до ± 40 А (пиковое значение ± 80 А). Усилитель допускает рассеяние мощности до 400 Вт.

Гибридные усилители очень дороги, поэтому фирма Apex Microtechnology начала выпуск ОУ нового типа так называемых Open Frame. Эта конструкция представляет собой печатную плату, на которой установлены дискретные бескорпусные компоненты. Один из усилителей этого типа MP240 – при напряжении питания ± 100 В отдаёт в нагрузку ток до 25 А. Установленный на охладитель, он способен рассеять мощность до 170 Вт.

Данные отечественных и некоторых зарубежных мощных ОУ приведены в таблице Е.1 (Приложение Е). Там же приведены и рекомендуемые схемы их включения. Для зарубежных ОУ схемы приведены в соответствии с отечественными стандартами на условные изображения.

3.5.1 Комплементарный выходной каскад УМ

Схема комплементарного эмиттерного повторителя, работающего в режиме В, приведена на рисунке 3.11.

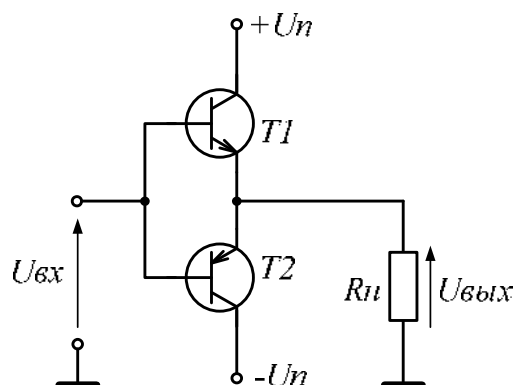


Рисунок 3.11 - Комплементарный эмиттерный повторитель

Его основные характеристики следующие:

- коэффициент усиления по напряжению $K_u \approx 1$;
- коэффициент усиления по току $K_i = \beta$ (коэффициенту усиления по току транзистора);

- максимальная синусоидальная выходная мощность

$$P_{\max} = \frac{U_n^2}{2R_n};$$

- коэффициент полезного действия при максимальной мощности 78,5%;

- максимальная мощность, рассеиваемая на одном транзисторе $P_{\text{тр}} = 0,2P_{\max}$.

При положительных входных сигналах транзистор $T1$ работает как эмиттерный повторитель, а транзистор $T2$ заперт. При отрицательных входных напряжениях - наоборот. Таким образом, транзисторы работают попеременно, каждый в течение одного полупериода входного напряжения.

Такой режим работы схемы называется двухтактным режимом В. При $U_{\text{вх}} = 0$ оба транзистора заперты; следовательно, схема имеет малый ток покоя. Ток, потребляемый как от положительного, так и от отрицательного источника напряжения, равен току в нагрузке. Поэтому схема обладает достаточно высоким коэффициентом полезного действия.

Выходное напряжение на нагрузке может практически достигать $\pm U_n$, поскольку транзисторы не ограничивают выходной ток. Разность между входным и выходным напряжениями равна напряжению база-эмиттер открытого транзистора. При изменении нагрузки оно меняется незначительно. Следовательно, $U_{\text{вх}} \approx U_n$ независимо от нагрузки.

Мощность в нагрузке обратно пропорциональна сопротивлению R_n и не имеет экстремума. Таким образом, в схеме не требуется согласования нагрузки, и максимальная мощность на выходе определяется лишь предельным током и максимальной мощностью рассеяния используемых транзисторов.

На рисунке 3.12 показана переходная характеристика $U_n = f(U_{вх})$ для двухтактного режима В, которая соответствует схеме, приведенной на рисунке 3.11, а.

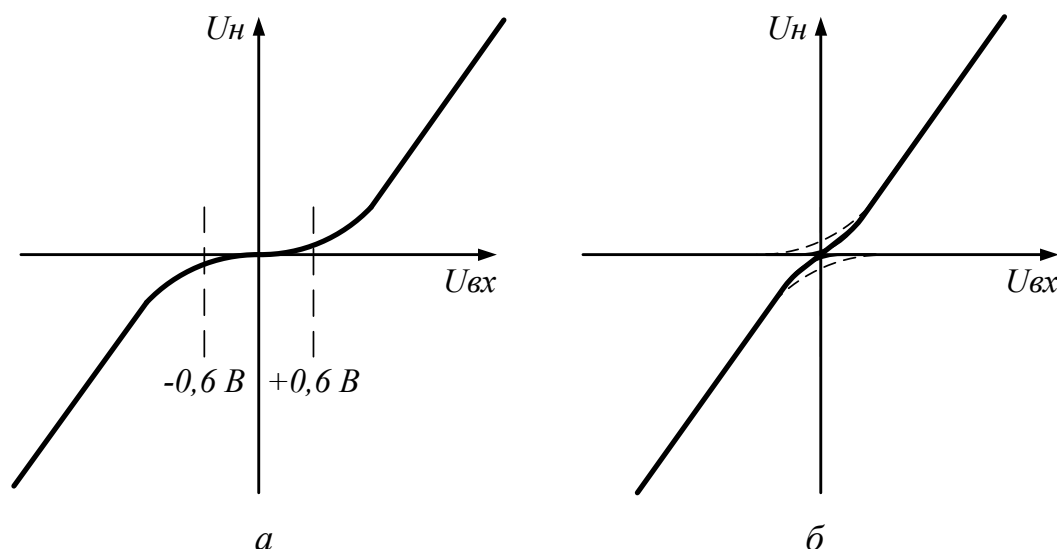


Рисунок 3.12 – Переходные искажения в двухтактном режиме:
а – искажения в режиме В; б – искажения в режиме АВ

Вблизи нуля ток в открытом транзисторе очень мал, а внутреннее сопротивление – большое. В результате прирост напряжения на нагрузке в этой области оказывается меньше, чем изменение входного сигнала. Это и является причиной появления излома характеристики вблизи нуля. Возникающие при этом искажения выходного напряжения называют переходными искажениями. Большая величина этих искажений является недостатком режима В.

При задании небольшого тока покоя транзисторов их внутреннее сопротивление уменьшается, а переходная характеристика изменяется и принимает вид, показанный на рисунке 3.12, б. Такой режим работы усилителей называется двухтактным режимом АВ.

Видно, что при этом переходные искажения существенно уменьшаются. Пунктиром показаны переходные характеристики отдельных транзисторов повторителя.

Если задать ток покоя равным максимальному току в нагрузке, то такой режим работы будет называться в данном случае двухтактным режимом А. Но данный режим крайне не экономичен, поэтому в современных усилителях мощности он не применяется.

Однако переходные искажения в достаточной степени уменьшены, даже если ток покоя составляет незначительную часть максимального тока в нагрузке, как в режиме АВ. В этом режиме переходные искажения настолько малы, что с помощью обратной связи могут быть легко снижены до пренебрежимо малой величины.

В данной схеме могут возникать также искажения, связанные с неодинаковым усилением отрицательных и положительных напряжений. Они возникают, когда транзисторы имеют различные коэффициенты передачи тока. Поэтому, если в схеме не предусмотрено глубокой отрицательной обратной связи, следует подбирать транзисторы с как можно более близкими коэффициентами передачи тока.

На рисунке 3.13, а приведена принципиальная схема двухтактного каскада, реализующего режим АВ.

Для обеспечения малого значения тока покоя следует приложить постоянное напряжение порядка 1,4 В между базовыми выводами транзисторов $T1$ и $T5$. Если напряжения $U_{см1}$ и $U_{см2}$ равны, выходной потенциал покоя равен входному потенциалу покоя. Можно также начальное смещение задавать с помощью одного источника напряжения $U_{см3} = U_{см1} + U_{см2}$, как показано на рисунке 3.13, б. В этом случае возникает разность потенциалов на входе и выходе схемы, равная примерно 0,7 В.

Основная проблема режима АВ состоит в необходимости поддержания неизменного тока покоя в широком диапазоне рабочих температур. При повышении температуры транзистора ток покоя увеличивается. Это приводит к дальнейшему росту температуры транзистора и в результате к его тепловому разрушению. Такой эффект называется термической положительной обратной связью. Для компенсации положительной связи при повышении температуры транзистора на 1° следует уменьшать напряжения $U_{см1}$ и $U_{см2}$ на 1 мВ. Для этого можно использовать диоды или термосопротивления, установленные на корпусе мощных транзисторов.

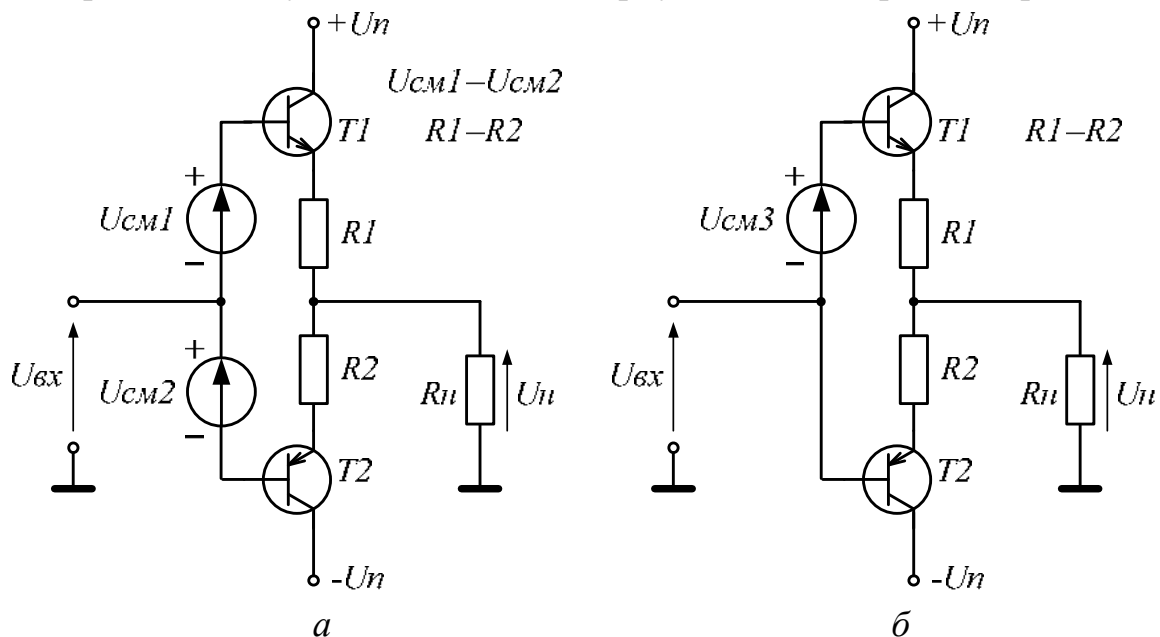


Рисунок 3.13 – Установка режима АВ; а – двумя источниками напряжения; б – одним источником напряжения

Такая температурная компенсация, конечно, оказывается неполной, поскольку существует значительное различие в температурах перехода транзистора и его корпуса. Поэтому применяются дополнительные меры по стабилизации тока покоя. Для этой цели служат резисторы $R1$ и $R2$ (рисунок 3.13), реализующие отрицательную обратную связь по току. Эффективность данной обратной связи увеличивается с возрастанием величины сопротивлений этих резисторов. Однако, поскольку резисторы $R1$ и $R2$ включены последовательно с R_H , то они снижают мощность, отдаваемую в нагрузку. По этой причине величина сопротивлений обратной связи должна выбираться малой по сравнению с сопротивлением нагрузки. Обычно резисторы $R1$ и $R2$ выбирают так, что падение напряжения на них при токе покоя не более $0,15 \div 0,25$ В.

Как будет показано далее, эта проблема может быть разрешена при использовании схемы Дарлингтона.

3.5.2 Способы задания напряжения смещения в комплементарном выходном каскаде УМ

Один из способов задания напряжения смещения иллюстрируется на рисунке 5.14, а. Падение напряжения на диодах $D1$ и $D2$ составляет примерно $U_{см1} = U_{см2} \approx 0,7$ В. При этом напряжении через транзисторы $T1$ и $T2$ течет небольшой ток покоя. Для повышения входного сопротивления схемы диоды можно заменить эмиттерными повторителями (рисунок 3.14, б).

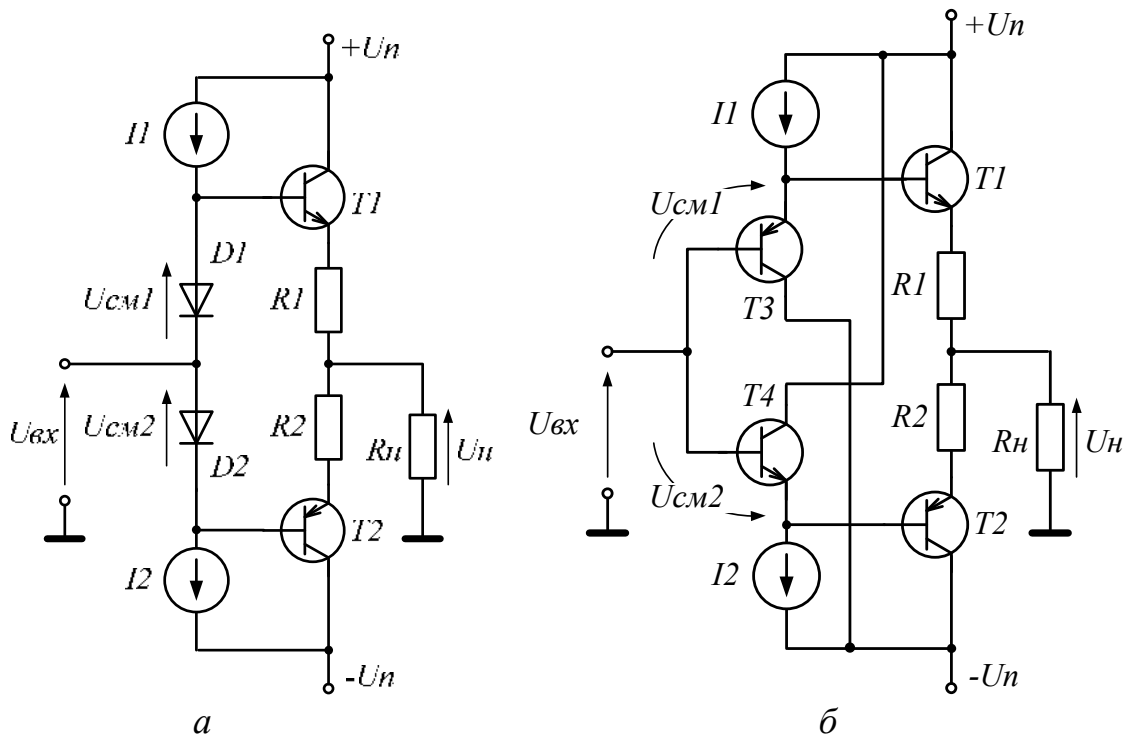


Рисунок 3.14 – Задание начального смещения: а – с помощью диодов; б – с помощью транзисторов

В рассмотренных схемах формирования напряжения смещения с диодами ток не может протекать со входа в цепи баз выходных транзисторов. Поэтому ток базы выходных транзисторов должен быть задан с помощью источника постоянного тока. Величина постоянного тока I_1 должна быть больше максимального базового тока транзисторов T_1 и T_2 , чтобы диоды D_1 и D_2 (и соответственно транзисторы T_3 и T_4 на рисунке 3.14, б) при максимальном входном сигнале не запирались. По этой причине не следует заменять источники постоянного тока резисторами, поскольку ток в этом случае будет убывать при возрастании входного сигнала.

Но иногда, с целью упрощения схемы, генераторы тока I_1 и I_2 заменяют постоянными резисторами. Тогда ток через резисторы выбирают в несколько раз больше максимального тока базы транзисторов T_1 и T_2 .

Наиболее предпочтительной является схема, в которой ток при возрастании входного сигнала увеличивается. Такая схема изображена на рисунке 3.15, а.

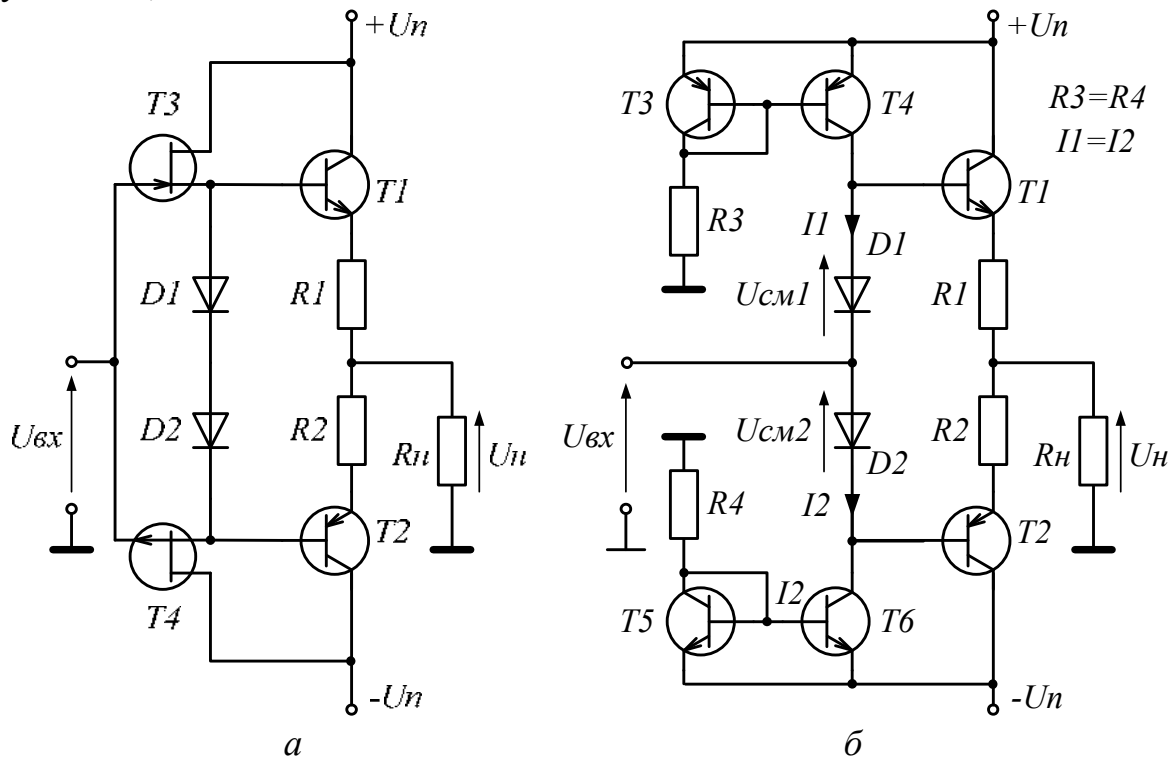


Рисунок 3.15 – Задание начального смещения: а - с помощью полевых транзисторов; б – с помощью токового зеркала

Полевые транзисторы T_3 и T_4 включены в ней по схеме истоковых повторителей. Разность истоковых напряжений полевых транзисторов благодаря отрицательной обратной связи по току устанавливается равной около 1,4 В. Для рассмотренной схемы подходят полевые транзисторы, ток стока которых при напряжении отсечки $|U_{отс}| \approx 0,7$ В составляет несколько миллиампер.

К сожалению, у данной схемы есть определенные недостатки, вытекающие из того, что полевые транзисторы имеют достаточно большой разброс параметров от экземпляру к экземпляру. Поэтому в данной схеме необходимо применять согласованные пары транзисторов. Согласованными называют транзисторы, имеющие близкие (отличающиеся не более чем на 10%) параметры. Такие элементы выпускаются обычно парами и значительно дороже одиночных транзисторов. Они могут выпускаться и в едином корпусе, тогда они называются сборками согласованных транзисторов. Согласованные транзисторы выпускаются как биполярные, так и полевые.

Использование пар согласованных биполярных транзисторов позволяет организовать ток через диоды смещения с помощью так называемого токового зеркала. Схема с генераторами тока на токовых зеркалах показана на рисунке 3.15, б. Данная схема позволяет строго задать ток через диоды с резисторами $R3$, $R4$. Их величина может быть строго рассчитана и не зависит от разброса параметров транзисторов. В данной схеме величина этих резисторов определяется по формуле

$$R3 = R4 = \frac{U_n - 0,65}{I1}, \quad I1 = I2. \quad (3.49)$$

3.5.3 Комплементарный выходной каскад УМ по схеме Дарлингтона

В рассмотренных до сих пор схемах ток в нагрузке может составлять несколько десятков миллиампер. При необходимости получения больших выходных токов следует применять транзисторы с более высокими допустимыми токами. Для этих целей можно использовать составные транзисторы по обычной или комплементарной схеме Дарлингтона.

На рисунке 3.16 приведена принципиальная схема усилителя мощности, в которой используется принцип Дарлингтона. Схема Дарлингтона состоит из двух пар транзисторов: $T1$, $T2$ и $T3$, $T4$.

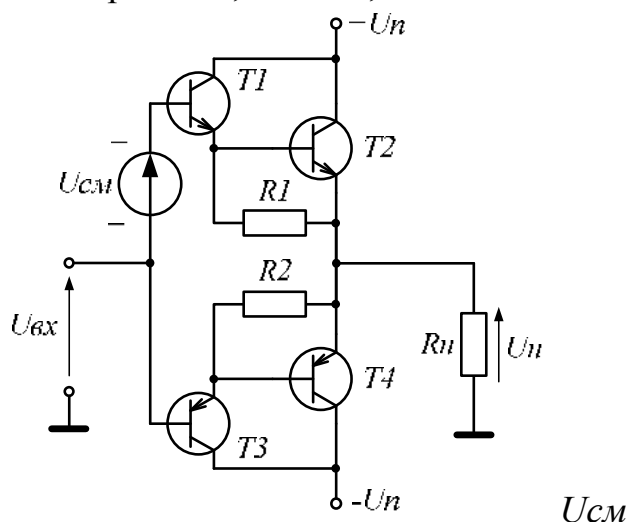


Рисунок 3.16 – Комплементарная схема Дарлингтона

При работе этой схемы в режиме АВ установка тока покоя связана с определенными затруднениями, поскольку необходимо скомпенсировать четыре зависящих от температуры напряжения база-эмиттер. Этого можно избежать, задавая ток покоя только для предоконечных транзисторов $T1$ и $T5$. При этом мощные выходные транзисторы $T2$ и $T4$ будут открываться лишь при больших выходных токах.

С этой целью величину напряжения смещения $U_{см}$ выбирают такой, чтобы падение напряжения на резисторах $R1$ и $R2$ составляло около 0,4 В, так что $U_{см} \approx 2 \cdot (0,4 + 0,7) = 2,2$ В. В этом случае выходные транзисторы даже при высокой температуре перехода оказываются запертыми.

3.5.4 УМ на операционных усилителях с подключенным комплементарным эмиттерным повторителем

Выходной ток интегральных операционных усилителей обычно составляет не более 20 мА. Существует много способов, с помощью которых можно без особых затрат увеличить этот ток приблизительно в десятки раз. Для этого можно применить, например, двухтактный эмиттерный повторитель в режиме В, рассмотренный выше, как показано на рисунке 3.17, а.

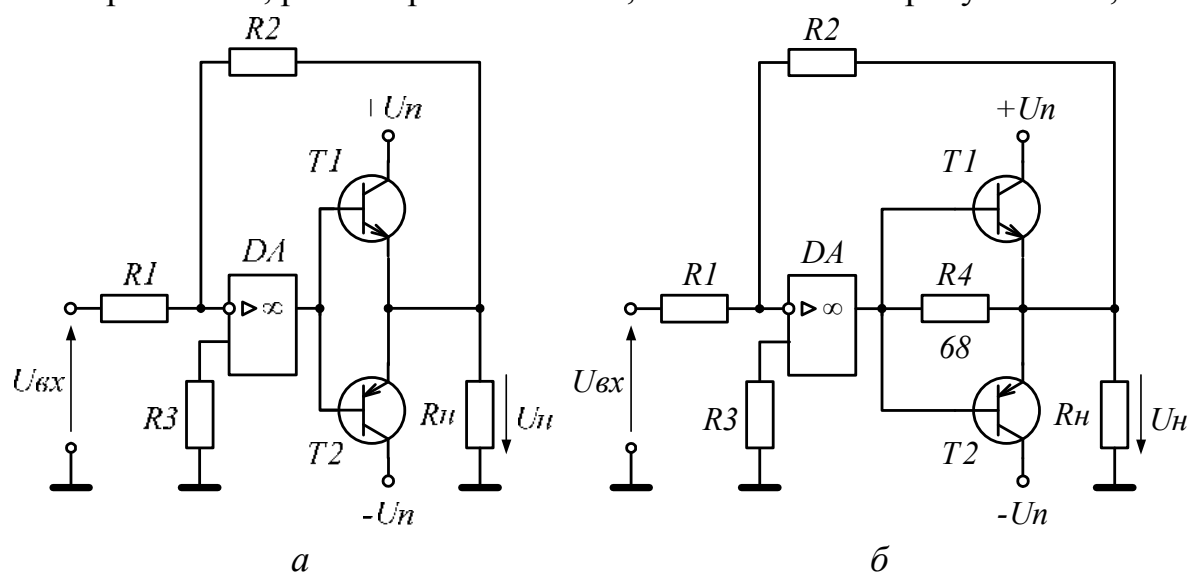


Рисунок 3.17 – Схема УМ на ОУ: а – с комплементарным эмиттерным повторителем в режиме В; б – с комплементарным эмиттерным повторителем в режиме В и дополнительным резистором

Так можно строить УМ на выходные тока до 0,3 - 0,5 А, подбирая соответствующие марки выходных транзисторов.

Резисторы $R1$ и $R2$ обеспечивают отрицательную обратную связь по напряжению и определяют коэффициент усиления всего усилителя мощности $K_{ум} = R2/R1$.

Следует учесть, что из-за прямого протекания выходного тока ОУ в нагрузку, через резистор $R4$, ток нагрузки будет несколько меньшим, чем

в схеме 3.17, а.

Однако из-за низкого быстродействия операционных усилителей даже при наличии отрицательной обратной связи возникают ощутимые переходные искажения. Их можно значительно ослабить, вводя в схему дополнительные резисторы, как показано на рисунке 3.17, б. В этом случае скорость нарастания выходного напряжения увеличивается в $(1 + R_4/R_H)$ раз.

В результате этого при сопротивлении нагрузки R_H равном 5 Ом, и при использовании стандартного операционного усилителя (например, типа К140УД7) можно получить при большом сигнале полосу частот порядка 1 кГц. Операционные усилители на полевых транзисторах отличаются, как правило, существенно большей скоростью нарастания выходного сигнала. Например, для усилителя типа К140УД11 эта скорость составляет 50 В/мкс. Такие усилители позволяют расширить диапазон эффективно усиливаемых частот в режиме большого сигнала до 80 кГц.

Именно такими характеристиками обладает схема, представленная на рисунке 3.18. Здесь в цепи питания ОУ установлены резисторы $R_1 = R_2 = R$. Раскачка на транзисторы оконечного каскада в этой схеме подается с выводов питания операционного усилителя. При этом транзисторы выходного каскада образуют комплементарные пары с выходными транзисторами операционного усилителя.

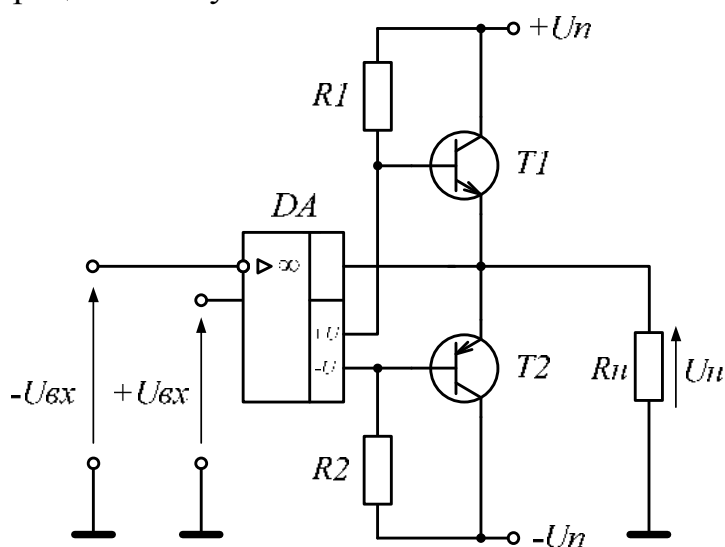


Рисунок 3.18 – Схема УМ с управлением выходными транзисторами по питанию ОУ

При малых выходных токах транзисторы T_1 и T_2 оконечного каскада заперты. В этом случае весь выходной ток протекает через операционный усилитель. При больших сигналах транзисторы T_1 и T_2 открываются и основная часть выходного тока проходит через них. При этом выходной ток операционного усилителя остается ограниченным величиной $0,65/R$.

Данная схема имеет существенное преимущество, по сравнению со схемами на рисунке 3.17. Оно в том, что благодаря наличию тока покоя ОУ на переходах база-эмиттер транзисторов выходного каскада присутствует начальное напряжение смещения. Величина напряжения смещения зависит от значения сопротивлений R , которые выбираются так, чтобы это напряжение составляло около 400 мВ.

При такой величине смещения переходные искажения предельно уменьшаются, однако ток покоя в выходном каскаде еще будет отсутствовать, в результате чего нет необходимости принимать дополнительные меры для его стабилизации.

3.5.5 Расчет усилителя мощности на операционном усилителе

Исходными данными для расчета являются:

- сопротивление нагрузки усилителя R_n , Ом;
- мощность нагрузки P_n , Вт;
- коэффициент усиления усилителя мощности, $K_{ум}$.

Сопротивление нагрузки и ее мощность приведены в задании на курсовую работу, а коэффициент усиления $K_{ум}$ определяется по выражению (3.4) в разделе 3.2.

Во-первых, следует выбрать схему усилителя мощности. Как видим из предыдущих разделов, таких схем может быть несколько. Выбор схемы УМ – важнейший этап его проектирования. При оптимальном подходе к этому этапу работы можно значительно облегчить все последующие расчеты усилителя. В любом случае следует стремиться к наиболее простым решениям.

Выбор конкретной схемы УМ будем производить по величине действующего значения тока нагрузки, который был определен ранее по выражению (3.3).

Если ток нагрузки не превышает 0,5 А, то можно использовать усилители по схемам, показанным на рисунках 3.17 или 3.18.

При больших токах данные схемы сильно нагружают ОУ из-за относительно низких значений коэффициента усиления мощных транзисторов по току $\beta = 20 - 60$.

Действительно, максимальное значение выходного тока ОУ составляет

$$I_{вых. ОУ} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_n}{\beta} = \frac{\sqrt{2} \cdot 0,5}{20 \div 60} = 0,035 \div 0,011 \text{ А} = 35 \div 11 \text{ мА}. \quad (3.50)$$

Обычные ОУ рассчитаны на выходные токи не более 10 мА.

Для выхода из положения можно использовать три пути:

- выбрать ОУ с большим выходным током. Ряд фирм выпускают ОУ с повышенными значениями выходных токов. Технические данные не-

скольких типов таких ОУ приведены в таблицах Е.3 и Е.4 Приложения Е. При выборе для УМ операционного усилителя с повышенным выходным током, простейшие схемы (рисунки 3.17 и 3.18), в случае использования оконечных транзисторов с достаточным коэффициентом усиления, могут использоваться до токов нагрузки 1,5 – 2 А;

- применить схему Дарлингтона в выходном каскаде, показанную на рисунке 3.16.

- в качестве усилителя мощности можно использовать мощный операционный усилитель, включенный по схеме инвертирующего или неинвертирующего усилителя. Основные технические данные некоторых типов таких ОУ приведены в таблицах Е.1 и Е.2 Приложения Е.

Рассмотрим порядок проектирования УМ в каждом случае.

3.5.5.1 Расчет УМ с комплементарным эмиттерным повторителем

Расчет для схемы, приведенной на рисунке 3.17, а сводится к выбору выходных транзисторов и марки ОУ.

Для выбора транзисторов определяем:

1 Напряжение питания выходного каскада U_n .

$$U_n = \sqrt{2} \cdot U_H + (2 \div 3) \text{ В.} \quad (3.51)$$

В силу симметричности схемы отрицательное напряжение будет по величине равно положительному напряжению.

2 Максимальный ток нагрузки:

$$I_m = \sqrt{2} \cdot I_H. \quad (3.52)$$

Транзисторы выходного каскада должны быть противоположной полярности и иметь одинаковые параметры, то есть быть комплементарными.

Их выбор производится так:

$$\begin{aligned} U_{кэ_{MAX}} &\geq U_n; \\ U_{кб_{MAX}} &\geq U_n; \\ I_{к_{MAX}} &\geq I_m, \end{aligned} \quad (3.53)$$

где $U_{кэ_{MAX}}$ - максимальное допустимое напряжение коллектор-эмиттер транзистора;

$U_{кб_{MAX}}$ - максимальное допустимое напряжение коллектор-база транзистора;

$I_{к_{MAX}}$ - максимальный допустимый ток коллектора транзистора.

Марка ОУ выбирается с учетом его выходного тока и частоты единичного усиления.

ОУ должен обеспечивать выходной ток не менее

$$I_{вых_{ОУ}} \geq \frac{I_m}{\beta}, \quad (3.54)$$

Частота единичного усиления f_1 должна быть такова

$$f_1 \geq fp \cdot K_{ум}, \quad (3.55)$$

где fp - рабочая частота схемы. Она зависит от частотного диапазона усиливаемого сигнала.

Величину рабочей частоты можно определить по заданному типу фильтра в тракте усилителя и его параметрам.

Так, если задана схема ФНЧ, то $fp \geq fc$, для ФВЧ принимаем $fp \geq 10 \cdot fc$. Для ППФ рабочую частоту можно принять равной $fp \geq fv$.

Здесь fc - частота среза фильтров, а fv - частота верхней границы полосы пропускания.

Расчет схемы на рисунке 3.17,б не отличается от предыдущего случая.

Резистор $R1$ выбирают в пределах 47 – 68 Ом.

3.5.5.2 Расчет УМ с комплементарным эмиттерным повторителем Дарлингтона

Если выходной ток ОУ, определенный по выражению (3.53), превышает 10 мА и выбрать ОУ с повышенным выходным током нет возможности, применяют схему, изображенную на рисунке 3.16.

Комплементарными здесь должны быть как выходные транзисторы $T2$ и $T4$, так и предварительные $T1$ и $T5$.

Напряжение питания каскада определяют по формуле (3.50).

Выходные транзисторы $T2$ и $T4$ выбирают по соотношениям (3.53). Транзисторы $T1$ и $T3$ выбирают на те же напряжения, что и выходные. Но их допустимый ток коллектора $I_{к_{МАКС}(T1,T2)}$ может быть меньше. Он определяется по выражению

$$I_{к_{МАКС}(T1,T2)} \geq \frac{I_m}{\beta_1}, \quad (3.56)$$

где $\beta_1 = \beta_2$ - коэффициенты усиления транзисторов $T1$ и $T2$ по току.

Дальнейший расчет в силу симметрии схемы производим для одного (верхнего плеча) эмиттерного повторителя по следующей методике.

1 Определяем номинальный ток предварительного транзистора I_{T1}

$$I_{T1} = \frac{I_n}{\beta}, \quad (\beta - \text{для выходного транзистора } T1'). \quad (3.57)$$

2 Задаем ток покоя предварительного транзистора

$$I_{O_{T1}} = (0,1 \div 0,05) \cdot I_{T1}. \quad (3.58)$$

3 Определяем сопротивление резистора $R1$

$$R1 = \frac{0,4}{I_{O_{T1}}}. \quad (3.59)$$

4 Находим ток базы предварительного транзистора $T1$

$$I_{б.о_{T1}} = \frac{I_{о_{T1}}}{\beta_1}. \quad (3.60)$$

5 Определяем напряжение база-эмиттер предварительного транзистора $U_{бэ_0}$, требуемое для обеспечения его тока покоя.

Напряжение $U_{бэ_0}$ находим по входным характеристикам транзистора $T1$, взятым из справочника, как показано на рисунке 3.19, а.

6 Находим требуемое напряжение смещения $U_{см}$

$$U_{см} = 0,4 + U_{бэ_0}. \quad (3.61)$$

7 Выбираем диоды для смещения и находим их рабочий ток

В качестве диодов для смещения обычно выбирают маломощные кремниевые диоды, например: КД104; КД401; КД502А(В); КД503; КД512; КД521; КД523; КД528; КД906. Они при токах от 5 до 50 мА имеют достаточно большое падение напряжения U_d при прямом включении.

Выбрав марку диода по его вольтамперным характеристикам, взятым из справочников, определяем ток I_d , который нужно пропустить через него в прямом направлении для того, чтобы падение напряжения на нем составило $U_d = U_{см}$. Этот процесс показан на рисунке 3.19, б. в качестве примера, приведены вольтамперные характеристики диода

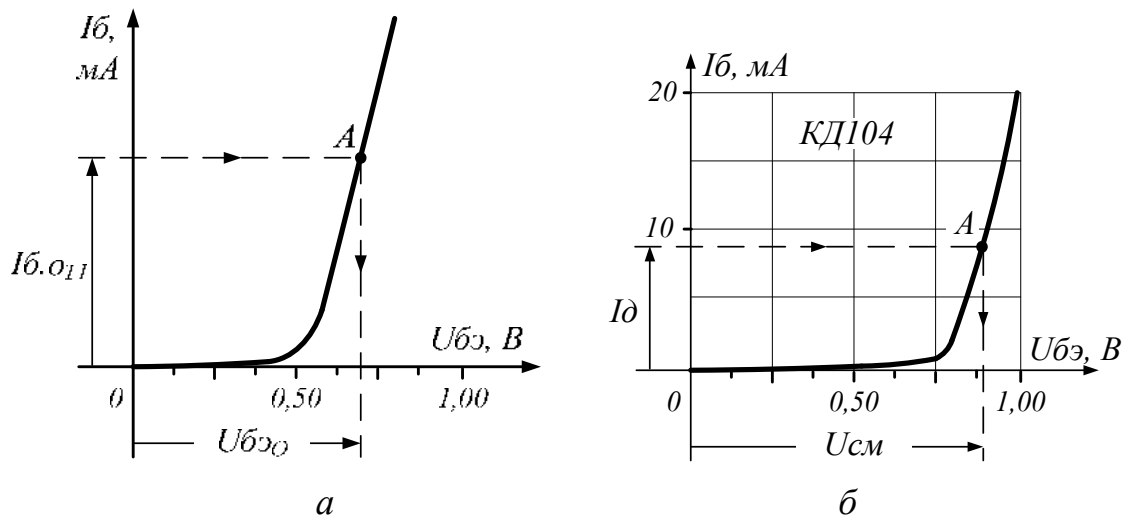


Рисунок 3.19 – К расчету эмиттерного повторителя на транзисторах Дарлингтона

Если падение напряжения на одном диоде оказывается мало при разумных значениях тока через диод, можно включить два или три диода последовательно, при этом на каждом из них должно падать напряжение

$$U_d = \frac{U_{см}}{n}, \quad (3.62)$$

где n - число последовательно включенных диодов.

Полученное значение тока диода I_D должно удовлетворять условию

$$I_D \geq (5 \div 10) \cdot I_{\beta_{T1}}. \quad (3.63)$$

8 Проектируем и рассчитываем источник напряжения смещения

Варианты схем задания тока диода приведены на рисунках 3.14 и 3.15.

Рассмотрим три простейших варианта источников тока для диодов смещения:

- на резисторах;
- на транзисторных генераторах тока и;
- на токовых зеркалах.

Их схемы показаны на рисунках 3.20, 3.21 и 3.22, соответственно.

Источник тока для цепи смещения на резисторах

Выше указывалось, что данная схема обладает некоторыми недостатками, но учитывая ее простоту, задание тока цепи смещения резисторами имеет право на существование. Она успешно может применяться для УМ на токи нагрузки до 0,5 А. Для схемы на рисунке 3.20 расчет резисторов $R3 = R4$ производится по выражению

$$R3 = R4 = \frac{U_n - U_{см}}{I_D}. \quad (3.64)$$

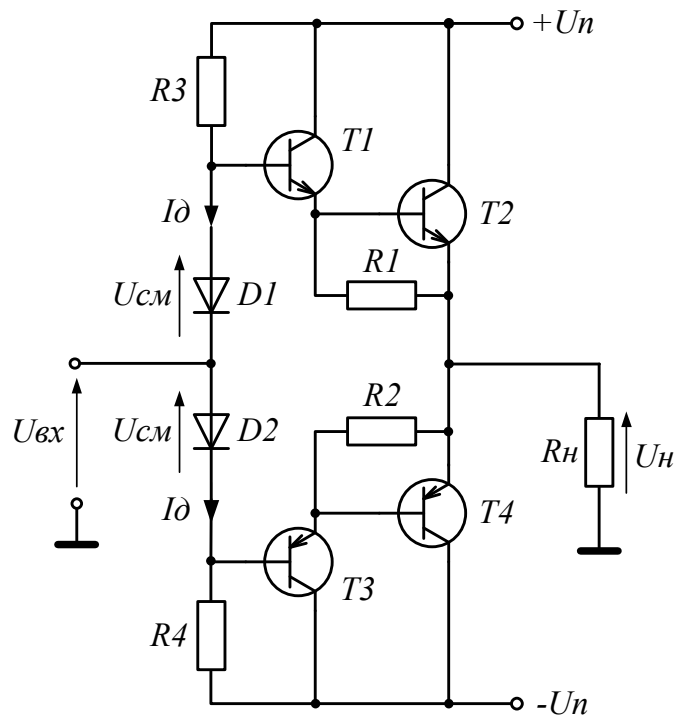


Рисунок 3.20 – Схема цепи смещения с источниками тока на резисторах

Источник тока для цепи смещения на транзисторном генераторе тока

Для схемы на рисунке 3.21 имеем

$$R5 = R6 = 1000 \cdot \frac{U_n - U_{cm}}{I_{cm}}, \quad (3.65)$$

где U_{cm} - напряжение стабилизации стабилитронов ($VC1$, $VC2$), В;
 I_{cm} - ток стабилитрона, мА.

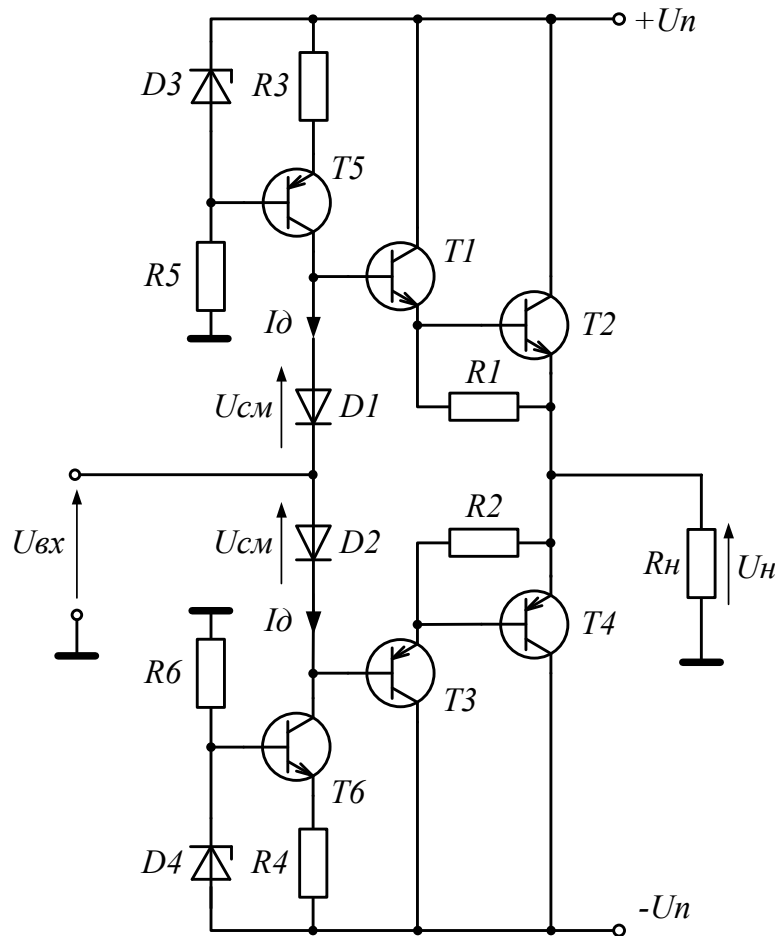


Рисунок 3.21 – Схема цепи смещения с транзисторными генераторами тока

Обычно для таких схем выбирают стабилитроны с напряжением стабилизации 3,3 – 5,6 В. Например, КС133А (3,3 В), КС147А (4,7 В), КС156А (5,6 В) и др.

Ток стабилитрона выбирается по выражению

$$I_{cm} = (2 \div 3) \cdot I_{cm_{MIN}}, \quad (3.66)$$

где $I_{cm_{MIN}}$ - минимальный ток стабилитрона.

Сопротивления эмиттерных резисторов $R3$, $R4$ находим так

$$R3 = R4 = \frac{U_{cm} - 0,65}{I_d}. \quad (3.67)$$

В качестве транзисторов $T1$ и $T2$ можно использовать любые мало-мощные кремниевые транзисторы противоположной полярности. Например, КТ315 и КТ361; КТ3102 и КТ3107.

Источник тока для цепи смещения на токовых зеркалах

С теорией работы токовых зеркал, которые широко применяются в современной схемотехнике, можно подробно ознакомиться в работе [1].

Для схемы, показанной на рисунке 3.22, необходимо подобрать сборку согласованных маломощных транзисторов. Причем нужны две сборки, одна с полярностью - *pnp*, другая – *nnp*.

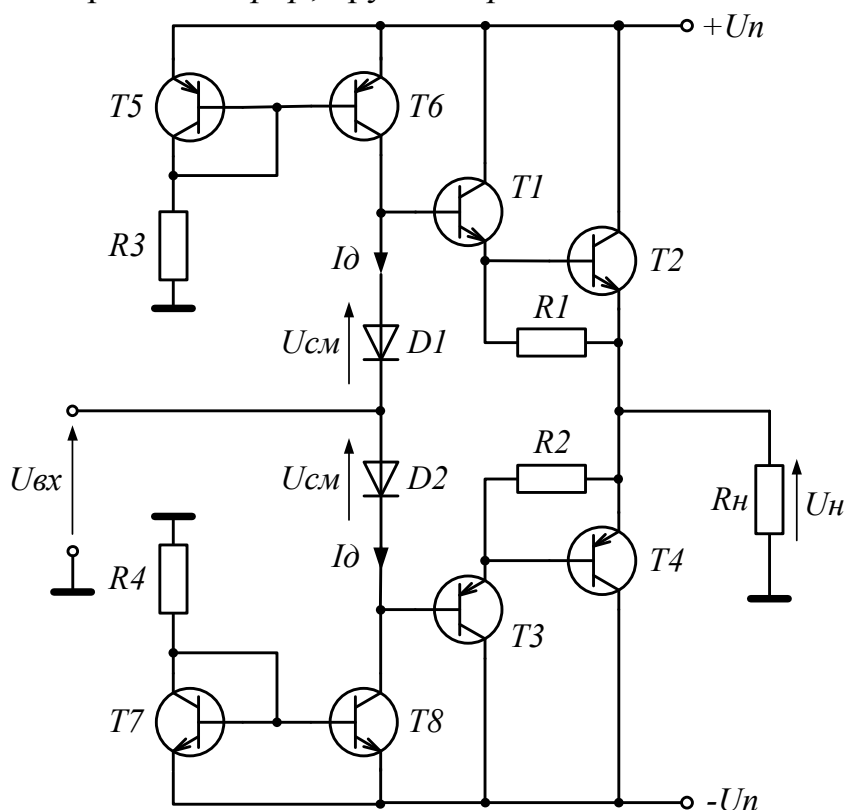


Рисунок 3.22 – Схема цепи смещения с источниками тока на токовом зеркале

Согласованными называют транзисторы с практически одинаковыми электрическими характеристиками. Обычно у согласованной пары транзисторов характеристики не расходятся более чем на 10%.

Такие пары выпускаются в виде сборок, содержащих оба транзистора в одном корпусе. Примерами отечественных сборок являются транзисторы серий 159, 198, КТС.

Большое количество марок сборок согласованных транзисторов выпускается зарубежными фирмами. Например, транзисторные сборки фирмы NXP Semiconductors: BCM61B (*nnp*) / BCM62B (*pnp*); BCV61 (*nnp*) / BCV62 (*pnp*); PMP420 (*nnp*) / PMP520 (*pnp*). Эти пары рассчитаны на

максимальное напряжение 30 - 45 В, ток 0,1 А и имеют типовое значение $\beta = 250 \div 290$.

После выбора марки согласованных транзисторов расчет схемы сводится к определению сопротивлений резисторов $R1 = R2$ по формуле

$$R3 = R4 = \frac{U_n - 0,6}{I_{\partial}}. \quad (3.68)$$

3.5.5.3 Расчет УМ на мощном ОУ

Схема УМ на мощном ОУ имеет вид, показанный на рисунках 3.2 и 3.5. Ее расчет не отличается от расчета обычного усилительного каскада на ОУ, рассмотренного в разделах 5.5.1 и 5.5.5.

Напряжение питания усилителя определяется по формуле

$$U_n = \sqrt{2} \cdot U_n + 5. \quad (3.69)$$

Выбор марки ОУ производится по току и напряжению нагрузки. Для выбора ОУ можно воспользоваться таблицей Е.1 в приложении Е.

Необходимо, чтобы соблюдались соотношения

$$\pm U_{n_{OY}} \geq U_n, \quad (3.70)$$

где $U_{n_{OY}}$ - допустимое напряжение питания ОУ.

$$I_{вых} \geq I_m, \quad (3.71)$$

где $I_{вых}$ - допустимый выходной ток мощного ОУ.

Реальные схемы включения некоторых типов мощных ОУ, приведенных в таблице Е.1, также даны в приложении Е.

3.5.6 Расчет теплового режима выходного каскада УМ

В процессе работы УМ его выходные транзисторы нагреваются вследствие потерь мощности от тока нагрузки.

Если УМ создан на базе мощного ОУ, то нагревается корпус ОУ. При нагреве кристалла транзистора или ОУ сверх допустимой температуры он выйдет из строя. Поэтому необходимо обеспечить в процессе работы УМ нормальный тепловой режим транзисторам его выходного каскада или самому ОУ.

Для выполнения этой задачи следует выполнить три действия:

- определить тепловую мощность, которая выделяется в выходном каскаде УМ;
- оценить необходимость применения радиатора (теплоотвода) для охлаждения силового элемента УМ;
- если теплоотвод необходим, то нужно выбрать радиатор для охлаждения элемента и рассчитать рабочую температуру кристалла.

Рассмотрим все эти действия по порядку.

3.5.6.1 Определение тепловой мощности, выделяемой на одном транзисторе выходного каскада или в мощном ОУ

Во всех рассмотренных схемах выходные транзисторы УМ работают в режиме В или АВ. Максимальная тепловая мощность, в данном случае, рассеиваемая на одном транзисторе в схеме комплементарного повторителя, будет равна [2, 3]

$$P_T = 0,1 \cdot P_H. \quad (3.72)$$

Если УМ построен на мощном ОУ, выходные транзисторы которого находятся на одном кристалле внутри одного корпуса, то максимальная тепловая мощность, выделяемая внутри корпуса ОУ, будет такова

$$P_{OY} = 0,2 \cdot P_H + 2 \cdot U_n \cdot I_n, \quad (3.73)$$

где U_n , I_n - напряжение питания и ток, потребляемый самим ОУ (см. таблицу Е.1).

3.5.6.2 Оценка необходимости применения радиатора (теплоотвода) для охлаждения силового элемента УМ

Радиатор можно не применять в том случае, если соблюдаются условия

$$P_T \leq P_{доп}^* \text{ или } P_{OY} \leq P_{доп}^*, \quad (3.74)$$

где $P_{доп}^*$ - допустимая рассеиваемая тепловая мощность без радиатора, Вт.

Значение $P_{доп}^*$ для силовых транзисторов обычно указывается в справочнике по транзисторам. Для большинства силовых кремниевых транзисторов эта мощность не превышает 1 ÷ 3 Вт.

Для мощных ОУ величина $P_{доп}^*$ указана в таблице Е.2.

Для других типов зарубежных мощных ОУ она может быть найдена в Интернете в технической документации, которая называется «datasheet».

При соблюдении условий (3.74) делается вывод о том, что разработанный УМ не нуждается в специальных мерах по охлаждению выходных транзисторов или корпуса ОУ.

3.5.6.3 Выбор радиатора для охлаждения элемента и расчет рабочей температуры кристалла полупроводникового элемента

Если условия (3.74) не выполняются, то требуется дополнительно охлаждать силовые элементы УМ.

Для дальнейших расчетов нужно иметь представление о процессе теплопередачи между кристаллом полупроводникового элемента и окружающей средой. Этот процесс может быть иллюстрирован рисунком 3.23.

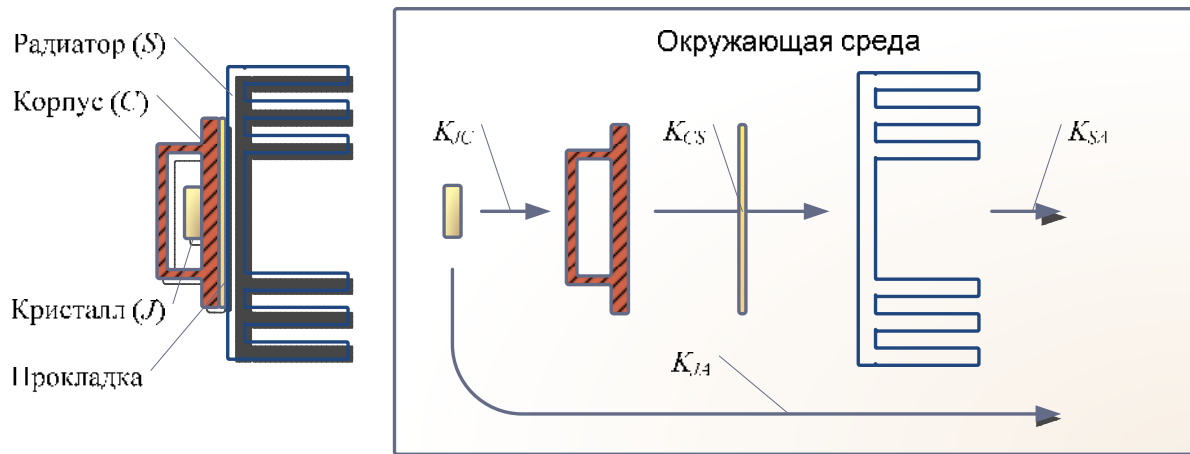


Рисунок 3.23 – Процессы теплопередачи при работе полупроводникового элемента

Величины K_{JA} , K_{JC} , K_{CS} , K_{SA} называются тепловыми сопротивлениями. Они измеряются в $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ и характеризуют процесс передачи тепла. В частности:

K_{JA} - тепловое сопротивление между кристаллом (J) и воздухом (через корпус) (A);

K_{JC} - тепловое сопротивление между кристаллом (J) и корпусом (C) полупроводникового прибора;

K_{CS} - тепловое сопротивление между корпусом прибора (C) и радиатором (S). Непосредственный контакт корпуса с радиатором имеет тепловое сопротивление около $1,0 \div 1,2$ $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, при использовании силиконовой пасты $0,3$ $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, контакт через слюдяную прокладку ($50 \div 60$ мк толщиной) с силиконовой смазкой – $0,4$ $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$;

K_{SA} - тепловое сопротивление между радиатором (S) и окружающей средой (воздухом) (A). Величины K_{SA} обычно приводятся в технических характеристиках радиаторов. Например, в Приложении Ж даны характеристики некоторых типов радиаторов, которые можно использовать в курсовой работе.

Расчет производим по изложенной ниже методике.

1 Задаем рабочие температуры

Для расчета задаем допустимую максимальную температуру кристалла $T_{j \max}$ и температуру окружающей среды $T_{\text{ос}}$.

Для большинства транзисторов максимальную температуру кристалла $T_{j \max}$ можно принять равной 150 $^{\circ}\text{C}$.

Температура окружающей среды при расчетах электронных устройств принимается от 40 до 55 $^{\circ}\text{C}$.

2 Определяем требуемое тепловое сопротивление теплоотвода K_T

$$K_T = \frac{T_J \max - T_{oc}}{P_T} \text{ или } K_T = \frac{T_J \max - T_{oc}}{P_{ov}}. \quad (3.75)$$

3 Ориентировочно находим требуемое тепловое сопротивление радиатора $K_{SA}mp$

$$K_{SA}mp = K_T - K_{JC} - K_{CS}. \quad (3.76)$$

4 Выбираем радиатор

По справочникам, каталогам, используя Интернет, выбираем радиатор с тепловым сопротивлением величиной не менее $K_{SA}mp$.

Выбрав определенную марку радиатора, уточняем его тепловое сопротивление K_{SA} для дальнейших расчетов.

5 Определяем суммарное тепловое сопротивление проектируемого теплоотвода K по уточненной формуле

$$K = \frac{K_{JA} \cdot (K_{JC} + K_{CS} + K_{SA})}{K_{JA} + K_{JC} + K_{CS} + K_{SA}}. \quad (3.77)$$

6 Определяем рабочую температуру кристалла T_{jp} при использовании выбранного радиатора

$$T_{jp} = T_{oc} + P_T \cdot K \text{ или } T_{jp} = T_{oc} + P_{ov} \cdot K. \quad (3.78)$$

Если радиатор выбран правильно, то должно выполняться условие:

$$T_{jp} \leq T_J \max. \quad (3.79)$$

На этом расчет теплоотвода для УМ может быть закончен.

Пример расчета радиатора

Исходные данные для расчета:

- мощность, выделяемая на транзисторе (ОУ) - $P_T = 32$ Вт;
- максимальная температура кристалла - $T_J \max = 140^\circ\text{C}$;
- температура окружающей среды - $T_{oc} = 55^\circ\text{C}$;
- тепловое сопротивление между кристаллом и корпусом - $K_{JC} = 1,3$ °C/Вт;
- тепловое сопротивление между корпусом прибора и радиатором при использовании силиконовой пасты $K_{CS} = 0,3$ °C/Вт;
- тепловое сопротивление между кристаллом и воздухом (через корпус) - $K_{JA} = 22$ °C/Вт.

1 Определяем требуемое тепловое сопротивление теплоотвода K_T

$$K_T = \frac{T_J \max - T_{oc}}{P_T} = \frac{140 - 55}{32} = 2,65 \text{ °C/Вт}. \quad (3.80)$$

2 Ориентировочно находим требуемое тепловое сопротивление радиатора $K_{SA}mp$

$$K_{SA}mp = K_T - K_{JC} - K_{CS} = 2,65 - 1,3 - 0,3 = 1,05 \text{ }^{\circ}\text{C/Вт.} \quad (3.81)$$

3 Выбираем радиатор

По справочникам, каталогам, используя Интернет, выбираем радиатор с тепловым сопротивлением величиной не менее $K_{SA}mp$.

Выбрав определенную марку радиатора, уточняем его тепловое сопротивление K_{SA} для дальнейших расчетов.

Принимаем радиатор, изображенный на рисунке 3.24. $K_{SA}=0,9 \text{ }^{\circ}\text{C/Вт.}$

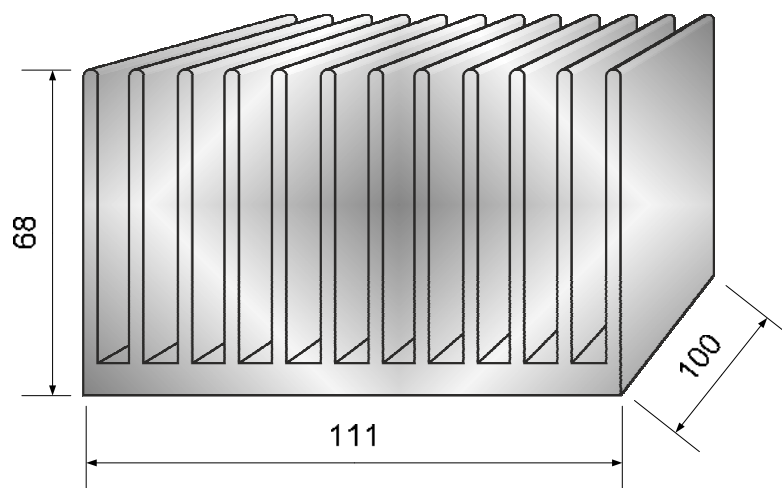


Рисунок 3.24 – Радиатор с $K_{SA}=0,9 \text{ }^{\circ}\text{C/Вт}$

4 Определяем суммарное тепловое сопротивление проектируемого теплоотвода K по уточненной формуле

$$K = \frac{K_{JA} \cdot (K_{JC} + K_{CS} + K_{SA})}{K_{JA} + K_{JC} + K_{CS} + K_{SA}} = \frac{22(2,3 + 0,3 + 0,9)}{22 + 2,3 + 0,3 + 0,9} = 3,02 \text{ }^{\circ}\text{C/Вт.} \quad (3.82)$$

5 Определяем рабочую температуру кристалла T_{JP} при использовании выбранного радиатора

$$T_{JP} = T_{OC} + P_T \cdot K = 55 + 22 \cdot 3,02 = 121,4 \text{ }^{\circ}\text{C.} \quad (3.83)$$

Радиатор выбран правильно, так как выполняется условие:

$$121,4 \text{ }^{\circ}\text{C} < 140 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

На этом расчет теплоотвода для усилителя мощности может быть закончен.

4 Расчет маломощных выпрямителей

Среди разнообразных схем электроники особое место занимают различного рода выпрямители. Они присутствуют практически во всех электронных устройствах, питающихся от сети переменного тока. Важной

практической задачей является умение проводить инженерный расчет и проектирования таких схем.

4.1 Проектирование выпрямительной схемы

В схемах питания электронной аппаратуры в основном применяются схемы выпрямителей, показанные на рисунках 4.1 - 4.5

Цель расчета выпрямителя: определить токи и напряжения обмоток трансформатора, его мощность, выбрать диоды и найти емкость конденсаторов фильтра. Надо отметить, что в большинстве случаев применяют простейшие фильтры в виде конденсатора большой емкости.

Исходными данными для расчета являются:

схема выпрямителя;

U_O – постоянное напряжение на выходе выпрямителя;

I_O – ток на выходе выпрямителя;

U_C – сетевое напряжение;

f_C – частота питающей сети;

$K_{П\%}$ – коэффициент пульсаций (относительная величина пульсаций выпрямленного напряжения в процентах от величины среднего напряжения на выходе выпрямителя).

Формулы для расчета выпрямителей с емкостным фильтром приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Формулы для расчета схем выпрямителей

№ схемы	m	I_B , А	U_{OBR} , В	I_{MAX} А	R_B , Ом	U_2 , В	I_2 , А	$I_{ВД}$, А	$P_{ГЛАВ}$, ВА
4.1	1	I_O	$2,82 \cdot B \cdot U_O$	$F \cdot I_O$	$R_i + R_m$	$B \cdot U_O$	$D \cdot I_O$	$D \cdot I_O$	$2P_O$
4.2	2	$\frac{I_O}{2}$	$2,82 \cdot B \cdot U_O$	$\frac{F \cdot I_O}{2}$	$R_i + R_m$	$2 \cdot B \cdot U_O$	$\frac{D \cdot I_O}{2}$	$\frac{D \cdot I_O}{2}$	$1,7P_O$
4.3	2	$\frac{I_O}{2}$	$1,41 \cdot B \cdot U_O$	$\frac{F \cdot I_O}{2}$	$2 \cdot R_i + R_m$	$B \cdot U_O$	$\frac{D \cdot I_O}{\sqrt{2}}$	$\frac{D \cdot I_O}{2}$	$1,5P_O$
4.4	1	I_O	$1,41 \cdot B \cdot U_O$	$F \cdot I_O$	$R_i + R_m$	$\frac{B \cdot U_O}{2}$	$D \cdot I_O \cdot \sqrt{2}$	$D \cdot I_O$	$1,5P_O$
4.5	2	$\frac{I_O}{2}$	$2,82 \cdot B \cdot U_O$	$\frac{F \cdot I_O}{2}$	$2 \cdot R_i + R_m$	$2 \cdot B \cdot U_O$	$\frac{D \cdot I_O}{\sqrt{2}}$	$\frac{D \cdot I_O}{2}$	$1,5P_O$

В таблице 4.1 приняты следующие обозначения:

I_B – среднее значение выпрямленного тока вентиля,

U_{OBR} – обратное напряжение на вентиле,

I_{MAX} – максимальный ток (амплитудное значение) вентиля,

R_B – внутреннее сопротивление выпрямителя,

U_2 – напряжение на вторичной обмотке трансформатора,
 I_2 – ток вторичной обмотки трансформатора,
 $I_{ВД}$ – действующее значение тока через вентиль,
 $P_{Г\Delta Б}$ – габаритная мощность трансформатора,
 m – число фаз выпрямления,
 I_O – ток нагрузки выпрямителя,
 U_O – напряжение на нагрузке выпрямителя (на конденсаторе фильтра),
 $P_O = U_O \cdot I_O$ – мощность нагрузки;
 B, F, D – вспомогательные расчетные коэффициенты, определяемые по графикам на рисунке 4.6.

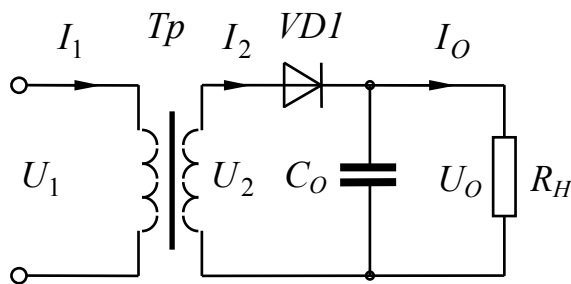


Рисунок 4.1 – Однополупериодный выпрямитель

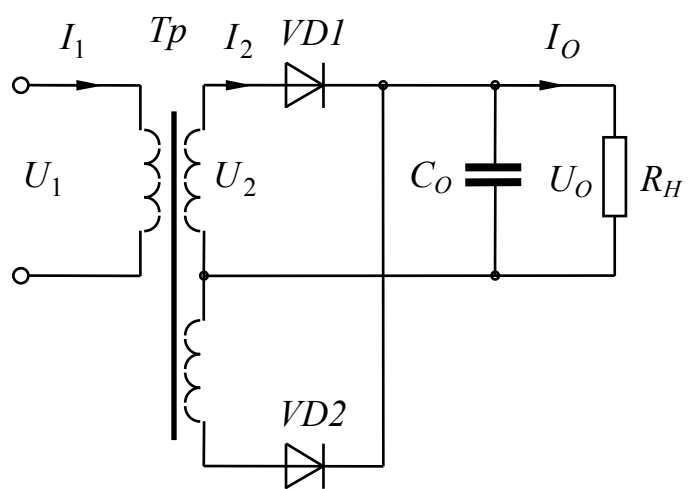


Рисунок 4.2 - Двухполупериодный выпрямитель

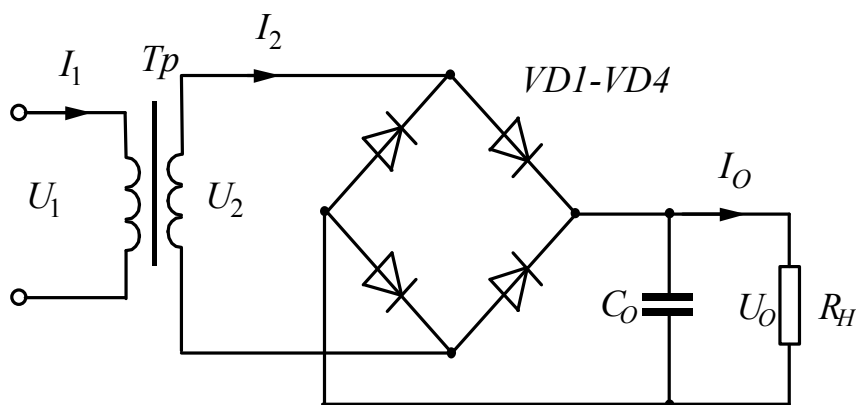


Рисунок 4.3 - Мостовой выпрямитель

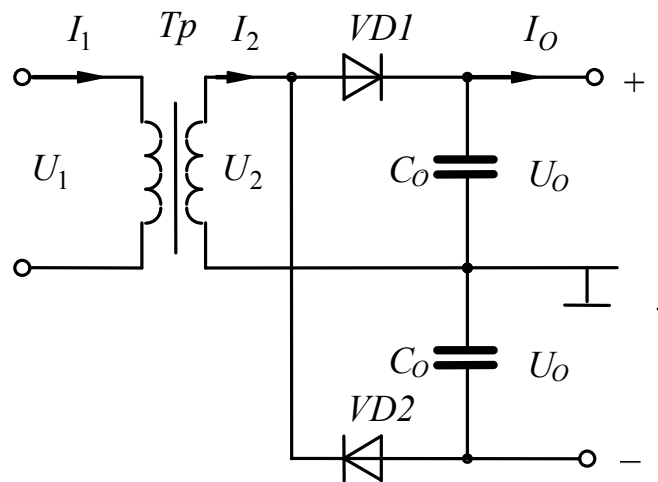


Рисунок 4.4 - Выпрямитель с удвоением напряжения

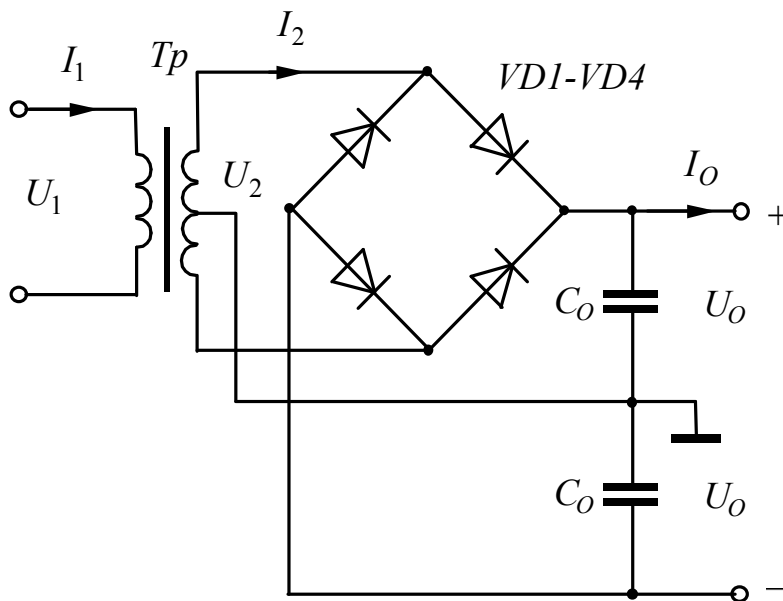


Рисунок 4.5 - Мостовой выпрямитель со средней точкой

Методика расчета выпрямителя заключается в расчете ряда основных характеристик выпрямительных диодов и трансформатора выпрямителя. По данным, полученным в процессе расчета, используя справочники, выбирают марку диодов для выпрямителя, марку и тип конденсатора фильтра. Последовательность действий при расчете приведена ниже.

1 Определяем внутреннее сопротивление вентиля

$$R_i = \frac{U_{\Pi}}{3I_B}, \quad (4.1)$$

где, U_{Π} – прямое падение напряжения на диоде (0,4 – 0,5 В для германиевых диодов, 1,0 – 1,1 В для кремниевых диодов).

2 Определяем внутреннее сопротивление обмоток трансформатора, приведенное ко вторичной обмотке

$$Rm = K \cdot \frac{U_O \cdot j}{I_O \cdot f_C \cdot B} \sqrt[4]{\frac{f_C \cdot B \cdot j}{1,6 \cdot U_O \cdot I_O}}, \quad (4.2)$$

где j – плотность тока в обмотках трансформатора ($3 \div 5$) А/мм²;
 B – индукция магнитного поля в сердечнике. Она равна $B = (1,1 \div 1,3)$ Т для пластинчатых сердечников и $B = (1,5 \div 1,6)$ Т – для ленточных сердечников трансформаторов;

K – расчетный коэффициент. $K = 2,0 \div 2,3$ для схем на рисунках 4.1 – 4.3 и рисунка 4.5, для схемы на рисунке 4.4 коэффициент $K = 0,5 \div 0,6$.

3 Определяем основной расчетный коэффициент A .

$$A = \frac{\pi \cdot I_O \cdot R_B}{m \cdot U_O}, \text{ для схем на рисунках 4.1 – 4.5.} \quad (4.3)$$

$$A = \frac{\pi \cdot I_O \cdot R_B}{2 \cdot m \cdot U_O}, \text{ для схем на рисунке 4.5.} \quad (4.4)$$

4 Определяем вспомогательные коэффициенты B, F, D .

Вспомогательные коэффициенты B, F, D , определяются по графикам, приведенным на рисунке 4.6.

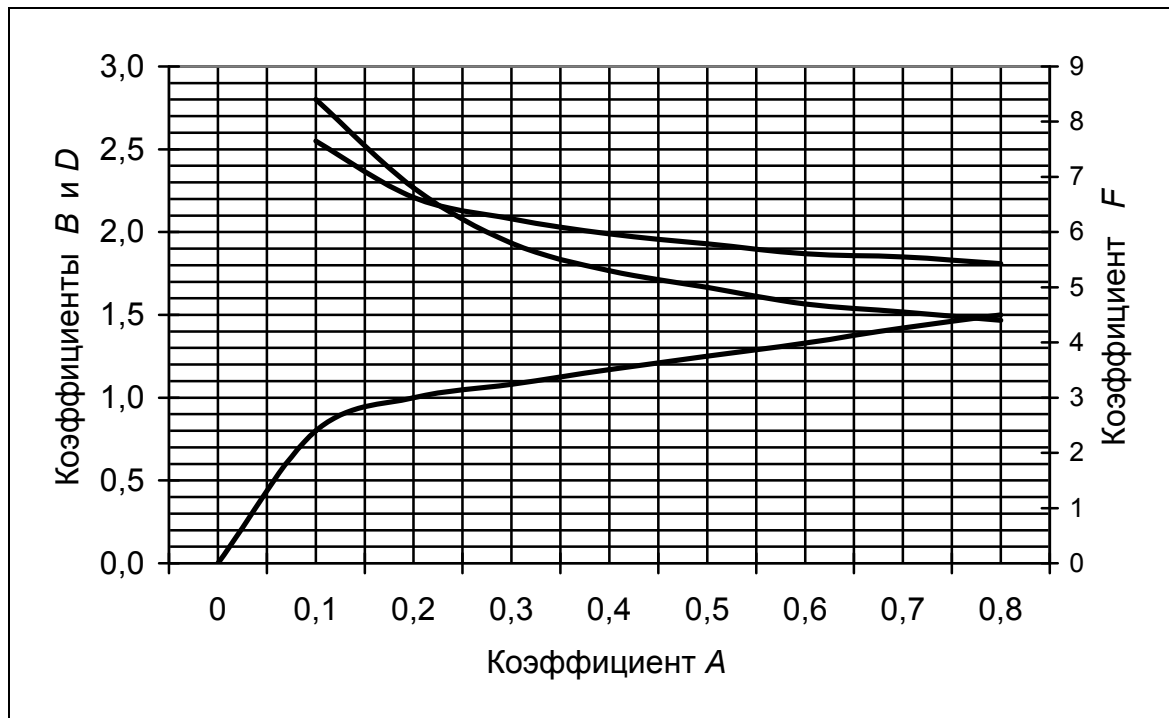


Рисунок 4.6 - Графики для определения расчетных коэффициентов

5 С помощью коэффициентов B, F, D , по формулам таблицы 4.1, проводим расчет всех указанных в таблице параметров выпрямителя.

По значениям U_{OBR} , $I_{ВД}$ находим тип выпрямительных диодов. Выбранные из справочника диоды должны по своим параметрам превосходить расчетные значения.

6 Определяем емкость конденсатора фильтра.

Емкость конденсатора фильтра находят по эмпирической формуле:

$$C_O[\text{мкФ}] \approx \frac{25 \cdot 10^6 \cdot A}{m \cdot R_B \cdot f_C \cdot K_{П\%}}. \quad (4.5)$$

В заключение расчета следует выбрать марку диода и тип конденсатора [4].

При этом нужно указать тип конденсатора, его номинальную емкость и номинальное напряжение. Номинальная емкость выбранного конденсатора должна быть не менее полученной по формуле (4.5). Номинальное напряжение конденсатора должно быть не менее чем на 20% превосходить значение напряжения на нагрузке U_0 .

4.2 Проектирование маломощного трансформатора

После расчета всех выпрямителей, обеспечивающих питание узлов усилителя, выполняем расчет силового трансформатора выпрямителя.

Существует много методик такого расчета. Мы будем пользоваться упрощенным вариантом расчетов. Тем не менее, для маломощных трансформаторов (до 100 Вт) такой подход дает достаточно точные результаты, позволяющие использовать полученные данные на практике.

1 Определяем полную мощность трансформатора

Она определяется как сумма габаритных мощностей всех выпрямителей, питающихся от данного трансформатора:

$$P_{\text{тр}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{ГЛБ}}. \quad (4.6)$$

2 Находим параметр $S_C S_{OK}$ трансформатора

Для выбора магнитопровода необходимо найти произведение площадей поперечного сечения магнитопровода (стали) S_C и окна для размещения обмотки S_{OK} .

$$S_C S_{OK} = \frac{100 \cdot P_{\text{тр}} \cdot (1 + \eta)}{4,44 \cdot f_C \cdot B \cdot j \cdot K_M \cdot K_C \cdot \eta}; \quad S_C = b \cdot a; \quad S_{OK} = c \cdot h, \quad (4.7)$$

где a, b, c, h – геометрические параметры сердечника, показанные на рисунке 4.7;

η – коэффициент полезного действия трансформатора. Для маломощного трансформатора $\eta = 0,7 \div 0,85$;

f_C – частота сети, Гц;

B – максимальное значение индукции в сердечнике, Т. Для ленточных трансформаторов, которые рекомендуется использовать на малых мощностях, следует принимать $B = 1,5 \div 1,65$ Т;

j - плотность тока в обмотке трансформатора, А/мм². Для обмоток с воздушным охлаждением трансформаторов малой мощности можно взять $j = 3 \div 5$ А/мм²;

K_M - коэффициент заполнения окна медью. Обычно $K_M = 0,22 \div 0,28$;

K_C - коэффициент заполнения поперечного сечения сердечника сталью. Для ленточных магнитопроводов $K_C = 0,93 \div 0,95$.

По величине $S_C S_{OK}$ и таблице 5.2 находим нужный типоразмер сердечника, у которого произведение $S_C S_{OK}$ будет не меньше, чем рассчитанное по формуле 4.7.

Таблица 4.2 – Параметры броневых ленточных сердечников типа ШЛ

Типоразмер	a, мм	b, мм	c, мм	h, мм	S_C , см ²	S_{OK} , см ²	$S_C S_{OK}$, см ⁴
1	2	3	4	5	6	7	8
ШЛ4х8	2	4	8	10	0,32	0,4	0,128
ШЛ6х8	3	6	8	15	0,48	0,9	0,432
ШЛ8х10	4	8	10	20	0,80	1,60	1,280
ШЛ8х16	4	8	16	20	1,28	1,60	2,048
ШЛ10х16	5	10	16	25	1,60	2,50	4,000
ШЛ12х20	6	12	20	30	2,40	3,60	8,640
ШЛ12х25	6	12	25	30	3,00	3,60	10,80
ШЛ16х16	8	16	16	40	2,56	6,40	16,38
ШЛ16х20	8	16	20	40	3,20	6,40	20,48
ШЛ16х25	8	16	25	40	4,00	6,40	25,60
ШЛ16х32	8	16	32	40	5,12	6,40	32,77
ШЛ20х20	10	20	20	50	4,00	10,00	40,00
ШЛ20х25	10	20	25	50	5,00	10,00	50,00
ШЛ20х32	10	20	32	50	6,40	10,00	64,00
ШЛ20х40	10	20	40	50	8,00	10,00	80,00
ШЛ25х25	12,5	25	25	62,5	6,25	15,63	97,66
ШЛ25х32	12,5	25	32	62,5	8,00	15,63	125,0
ШЛ25х40	12,5	25	40	62,5	10,00	15,63	156,3
ШЛ25х50	12,5	25	50	62,5	12,50	15,63	195,3
ШЛ32х32	16	32	32	80	10,24	25,60	262,1
ШЛ32х40	16	32	40	80	12,80	25,60	327,7
ШЛ32х50	16	32	50	80	16,00	25,60	409,6
ШЛ40х40	20	40	40	100	16,00	40,00	640,0
ШЛ40х50	20	40	50	100	20,00	40,00	800,0
ШЛ40х64	20	40	64	100	25,00	40,00	1024
ШЛ40х80	20	40	80	100	32,00	40,00	1280

Выбрав сердечник, нужно в пояснительной записке привести его чертеж с указанием размеров, как показано на рисунке 4.7

Проверку на размещение обмотки в выбранном окне допускается не проводить.

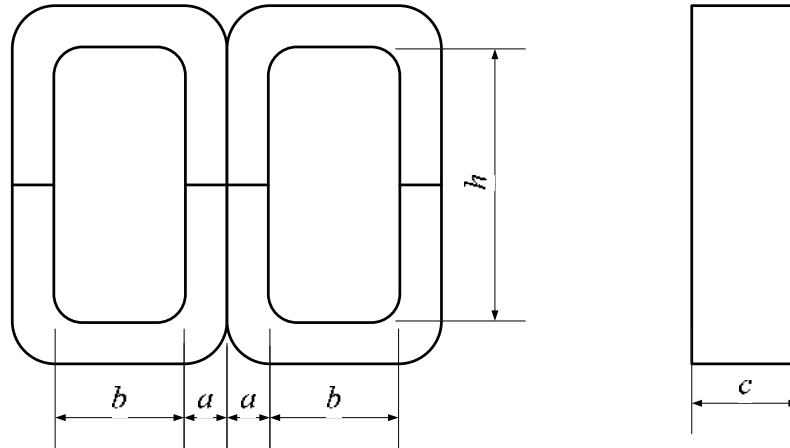


Рисунок 4.7 – Ленточные броневые магнитопроводы типа ШЛ

3 Определяем число витков в обмотках трансформатора

Число витков в первичной обмотке

$$w_1 = \frac{U_C \cdot (1 - \Delta U_C / 100) \cdot 10^4}{4,44 \cdot f_C \cdot B \cdot S_C}, \quad (4.8)$$

где U_C - напряжение сети (первичной обмотки трансформатора), В;

ΔU_C - потери напряжения в первичной обмотке, %.

Значения величин f_C , B , - те же, что использовались в выражении (4.7).

Потери в обмотках определяются по графику на рисунке 4.8.

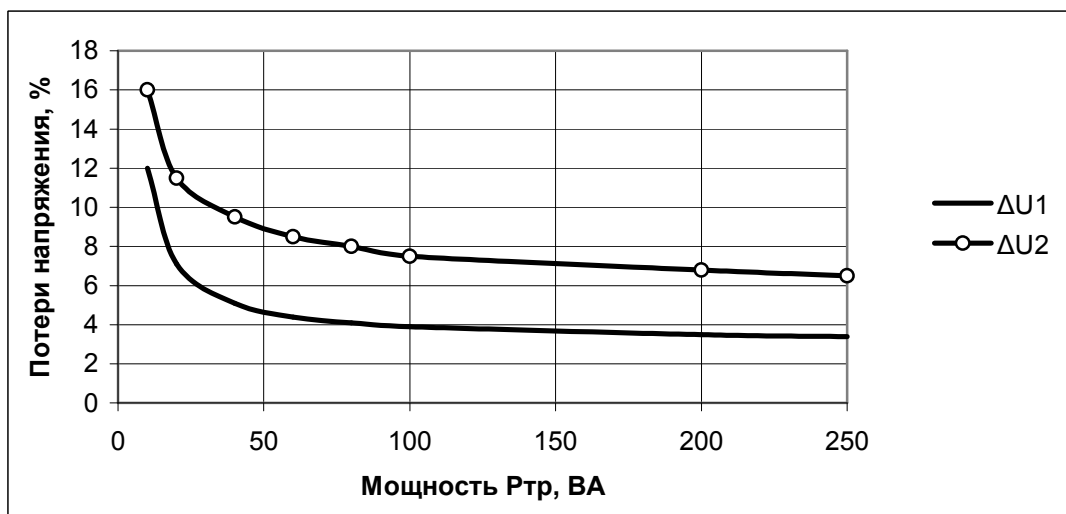


Рисунок 4.8 – Потери напряжения в обмотках трансформатора

Площадь магнитопровода S_C берется из таблицы 4.2 в см⁵.

Число витков во вторичной обмотке

$$w_2 = \frac{U_2 \cdot (1 + \Delta U_2 / 100) \cdot 10^4}{4,44 \cdot f_C \cdot B \cdot S_C}, \quad (4.9)$$

где U_2 - напряжение сети (первичной обмотки трансформатора), В;
 ΔU_2 - потери напряжения во вторичной обмотке, %.

4 Расчет диаметра и выбор проводов обмоток

Диаметр провода вторичной обмотки d_2 без учета толщины изоляции находим по действующему значению тока в обмотке I_2 , определенному ранее.

$$d_2 = 1,13 \sqrt{\frac{I_2 [A]}{j [A / \text{мм}^2]}} \text{ [мм]}, \quad (4.10)$$

где j - плотность тока в обмотке, которая принималась ранее для выражения (4.7).

Ток в первичной обмотке будет равен

$$I_1 = I_2 \frac{U_2}{U_C}. \quad (4.11)$$

Диаметр провода первичной обмотки d_1 будет

$$d_1 = 1,13 \sqrt{\frac{I_1 [A]}{j [A / \text{мм}^2]}} \text{ [мм]}. \quad (4.12)$$

Полученные диаметры проводов округляем до ближайших стандартных по таблице 4.3.

Выбираем марку обмоточных проводов (например, ПЭВ-1, ПЭВ-2) и указываем в пояснительной записке его диаметр с изоляцией.

Таблица 4.3 – Провода медные круглые

Номинальный диаметр провода по меди, мм	Сечение провода по меди, мм ²	Диаметр провода с изоляцией, мм					
		ПЭВ - 1	ПЭВ - 2	ПЭЛ	ПЭТВ	ПНЭТ	ПЭЛШО
1	2	3	4	5	6	7	8
0,02	0,00031	0,027	-	0,035	-	-	-
0,025	0,00051	0,034	-	0,04	-	-	-
0,03	0,00071	0,041	-	0,045	-	-	-
0,032	0,0008	0,043	-	0,046	-	-	-
0,04	0,0013	0,055	-	0,055	-	-	-
0,05	0,00196	0,062	0,08	0,07	-	-	0,14

Продолжение таблицы 4.3

1	2	3	4	5	6	7	8
0,06	0,00283	0,075	0,09	0,085	0,09	-	0,15
0,063	0,0031	0,078	0,09	0,085	0,09	-	0,16
0,07	0,00385	0,084	0,092	0,092	0,1	-	0,16
0,071	0,00396	0,088	0,095	0,095	0,1	-	0,16
0,08	0,00503	0,095	0,105	0,105	0,11	-	0,16
0,09	0,00636	0,105	0,12	0,115	0,12	-	0,18
0,1	0,00785	0,122	0,13	0,125	0,13	0,125	0,19
0,112	0,0099	0,134	0,14	0,125	0,14	0,135	0,2
0,12	0,0113	0,144	0,15	0,145	0,15	0,145	0,21
0,125	0,0122	0,149	0,155	0,15	0,155	0,15	0,215
0,13	0,0133	0,155	0,16	0,155	0,16	0,16	0,22
0,14	0,0154	0,165	0,17	0,165	0,17	0,165	0,23
0,15	0,01767	0,176	0,19	0,18	0,19	0,18	0,24
0,16	0,02011	0,187	0,2	0,19	0,2	0,19	0,25
0,17	0,0227	0,197	0,21	0,2	0,21	0,2	0,26
0,18	0,02545	0,21	0,22	0,21	0,22	0,21	0,27
0,19	0,02835	0,22	0,23	0,22	0,23	0,22	0,28
0,2	0,03142	0,23	0,24	0,23	0,24	0,23	0,3
0,21	0,03464	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,31
0,224	0,0394	0,256	0,27	0,26	0,27	0,26	0,32
0,236	0,0437	0,26	0,285	0,27	0,28	0,27	0,33
0,25	0,04909	0,284	0,3	0,275	0,3	0,29	0,35
0,265	0,0552	0,305	0,315	0,305	0,31	0,3	0,36
0,28	0,0615	0,315	0,33	0,315	0,33	0,31	0,39
0,3	0,0708	0,34	0,35	0,34	0,34	0,33	0,41
0,315	0,078	0,35	0,365	0,352	0,36	0,35	0,43
0,335	0,0885	0,375	0,385	0,375	0,38	0,37	0,45
0,355	0,099	0,395	0,414	0,395	0,41	0,39	0,47
0,38	0,1134	0,42	0,44	0,42	0,44	0,42	0,5
0,4	0,126	0,44	0,46	0,442	0,46	0,44	0,52
0,425	0,142	0,465	0,485	0,47	0,47	0,46	0,53
0,45	0,16	0,49	0,51	0,495	0,5	0,5	0,57
0,475	0,177	0,525	0,545	0,495	0,53	0,51	0,6
0,5	0,196	0,55	0,57	0,55	0,55	0,53	0,62
0,53	0,2206	0,58	0,6	0,578	0,6	0,58	0,66
0,56	0,247	0,61	0,63	0,61	0,62	0,6	0,68
0,6	0,283	0,65	0,67	0,65	0,66	0,64	0,72
0,63	0,313	0,68	0,7	0,68	0,69	0,67	0,75

Окончание таблицы 4.3

1	2	3	4	5	6	7	8
0,67	0,352	0,72	0,75	0,72	0,75	0,72	0,8
0,71	0,398	0,76	0,79	0,77	0,78	0,75	0,82
0,75	0,441	0,81	0,84	0,81	0,83	0,8	0,87
0,8	0,503	0,86	0,89	0,86	0,89	0,86	0,95
0,85	0,567	0,91	0,94	0,91	0,94	0,91	1,0
0,9	0,636	0,96	0,99	0,96	0,99	0,96	1,05
0,93	0,6793	0,99	1,02	0,99	1,02	0,99	1,08
0,95	0,712	1,01	1,04	1,02	1,04	1,01	1,1
1,0	0,7854	1,07	1,1	1,07	1,11	1,06	1,16
1,06	0,884	1,13	1,16	1,14	1,16	1,13	1,21
1,08	0,9161	1,16	1,19	1,16	1,19	1,16	1,24
1,12	0,9852	1,19	1,22	1,2	1,23	1,2	1,28
1,18	1,092	1,26	1,28	1,26	1,26	1,25	1,34
1,25	1,2272	1,33	1,35	1,33	1,36	1,33	1,41
1,32	1,362	1,4	1,42	1,4	1,42	1,39	1,47
1,4	1,5394	1,48	1,51	1,48	1,51	-	1,56
1,45	1,6513	1,53	1,56	1,53	1,56	-	1,61
1,5	1,7672	1,58	1,61	1,58	1,61	-	1,68
1,56	1,9113	1,63	1,67	1,64	1,67	-	1,74
1,6	2,01	1,68	1,71	1,68	1,71	-	-
1,7	2,2697	1,78	1,81	1,78	1,81	-	-
1,74	2,378	1,82	1,85	1,82	1,85	-	-
1,8	2,54468	1,89	1,92	1,89	1,92	-	-
1,9	2,8105	1,99	2,02	1,99	2,02	-	-
2,0	3,1415	2,1	2,12	2,1	2,12	-	-
2,12	3,5298	2,21	2,24	2,22	2,24	-	-
2,24	4,0112	2,34	2,46	2,34	2,46	-	-
2,36	4,3743	2,46	2,48	2,36	2,48	-	-
2,5	4,9212	2,6	2,63	2,6	2,62	-	-

5 ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Варианты заданий для курсовой работы приведены в таблице 5.1. В ней приняты обозначения в соответствии с пунктом 5.1 настоящей методики.

Таблица 5.1 – Варианты заданий для курсовой работы

№ Вар.	$E_{г},$ В	$R_{г},$ кОм	$R_{н},$ Ом	$P_{н},$ Вт	Данные фильтра			$f_{с},$ Гц	$f_{н},$ Гц	$f_{в},$ Гц
					тип	аппроксимация	порядок			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0,01	0,1	2	10	ФНЧ	Баттерворта	4	100		
2	0,02	0,3	4	8	-//-	Чебышева q1=0,5 дБ	4	250		
3	0,03	0,5	6	6	-//-	Чебышева q1=1,0 дБ	4	350		
4	0,04	1,0	8	4	-//-	Чебышева q1=2,0 дБ	4	450		
5	0,05	5.0	10	2	-//-	Инверс. Чебышева q2=-40 дБ	4	600		
6	0,06	10	15	1,3	-//-	Эллиптич. q1=0,5 дБ, q2=-40 дБ	4	800		
7	0,08	25	20	1,5	-//-	Бесселя	4	1000		
8	0,1	50	50	0,5	-//-	Баттерворта	4	750		
9	0,12	100	100	0,4	-//-	Чебышева q1=0,5 дБ	4	500		
10	0,15	250	2	8	ФВЧ	Чебышева q1=1,0 дБ	4	400		
11	0,18	500	4	6	-//-	Чебышева q1=2,0 дБ	4	300		
12	0,25	1000	6	4	-//-	Инверс. Чебышева q2=-40 дБ	4	100		
13	0.3	0,1	8	2	-//-	Эллиптич. q1=0,5 дБ, q2=-40 дБ	4	60		
14	0,4	0,3	10	1,3	-//-	Бесселя	4	100		
15	0,5	0,5	15	1,5	-//-	Баттерворта	4	250		
16	0,6	1,0	20	0,5	-//-	Чебышева q1=0,5 дБ	4	350		
17	0,7	5.0	50	0,4	-//-	Чебышева q1=1,0 дБ	4	450		
18	0.8	10	100	8	-//-	Чебышева q1=2,0 дБ	4	600		

Продолжение таблицы 5.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
19	1,0	25	2	6	-//-	Инверс. Чебышева q2=-40 дБ	4	800		
20	2,0	50	4	4	ППФ	Эллиптич. q1=0,5 дБ, q2=-40 дБ	4		1000	1100
21	3,0	100	6	2	-//-	Бесселя	4		750	800
22	4,0	250	8	1,3	-//-	Баттерворта	4		500	525
23	5,0	500	10	1,5	-//-	Чебышева q1=0,5 дБ	2		150	1000
24	0,04	1000	15	0,5	-//-	Чебышева q1=1,0 дБ	2		250	2000
25	0,05	0,1	20	0,4	-//-	Чебышева q1=2,0 дБ	2		300	3000
26	0,06	0,3	50	8	-//-	Инверс. Чебышева q2=-40 дБ	4		100	125
27	0,08	0,5	100	6	-//-	Эллиптич. q1=0,5 дБ, q2=-40 дБ	4		250	280
28	0,1	1,0	2	4	ФНЧ	Бесселя	4	350		
29	0,12	5,0	4	2	-//-	Баттерворта	4	450		
30	0,15	10	6	1,3	-//-	Чебышева q1=0,5 дБ	4	600		
31	0,18	25	8	1,5	-//-	Чебышева q1=1,0 дБ	4	800		
32	0,25	50	10	0,5	-//-	Чебышева q1=2,0 дБ	4	1000		
33	0,3	100	15	0,4	-//-	Инверс. Чебышева q2=-40 дБ	4	750		
34	0,4	250	20	8	-//-	Эллиптич. q1=0,5 дБ, q2=-40 дБ	4	500		
35	0,5	500	50	6	-//-	Бесселя	4	400		
36	0,6	1000	100	4	-//-	Баттерворта	4	300		
37	0,7	0,1	2	2	ФВЧ	Чебышева q1=0,5 дБ	4	100		
38	0,8	0,3	4	1,3	-//-	Чебышева q1=1,0 дБ	4	60		
39	1,0	0,5	6	1,5	-//-	Чебышева q1=2,0 дБ	4	100		
40	0,04	1,0	8	0,5	-//-	Инверс. Чебышева q2=-40 дБ	4	250		

Продолжение таблицы 5.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
41	0,05	5.0	10	0,4	-/-	Эллиптич. q1=0,5 дБ, q2=-40 дБ	4	350		
42	0,06	10	15	8	-/-	Бесселя	4	450		
43	0,08	25	20	6	-/-	Баттерворта	4	600		
44	0,1	50	50	4	-/-	Чебышева q1=0,5 дБ	4	800		
45	0,12	100	100	2	-/-	Чебышева q1=1,0 дБ	4	1000		
46	0,15	250	2	1,3	-/-	Чебышева q1=2,0 дБ	4	750		
47	0,18	500	4	1,5	ППФ	Инверс. Чебышева q2=-40 дБ	2		500	2700
48	0,25	1000	6	0,5	-/-	Эллиптич. q1=0,5 дБ, q2=-40 дБ	2		400	3000
49	0,3	0,1	8	0,4	-/-	Бесселя	2		300	2200
50	0,4	0,3	10	8	-/-	Баттерворта	2		100	600
51	0,5	0,5	15	6	-/-	Чебышева q1=0,5 дБ	4		60	65
52	0,6	1,0	20	4	-/-	Чебышева q1=1,0 дБ	4		100	120
53	0,7	5.0	50	10	-/-	Чебышева q1=2,0 дБ	2		250	275
54	0.8	10	100	8	-/-	Инверс. Чебышева q2=-40 дБ	2		350	380
55	1,0	25	2	6	ФНЧ	Эллиптич. q1=0,5 дБ, q2=-40 дБ	4	450		
56	0,04	50	4	4	-/-	Бесселя	4	600		
57	0,05	100	6	2	-/-	Баттерворта	4	800		
58	0,06	250	8	1,3	-/-	Чебышева q1=0,5 дБ	4	1000		
59	0,08	500	10	1,5	-/-	Чебышева q1=1,0 дБ	4	750		
60	0,1	1000	15	0,5	-/-	Чебышева q1=2,0 дБ	4	500		
61	0,12	0,1	20	0,4	-/-	Инверс. Чебышева q2=-40 дБ	4	400		
62	0,15	0,3	50	8	-/-	Эллиптич. q1=0,5 дБ, q2=-40 дБ	4	300		

Продолжение таблицы 5.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
63	0,18	0,5	100	6	-//-	Бесселя	4	100		
64	0,25	1,0	2	4	ФВЧ	Баттерворта	4	60		
65	0,3	5,0	4	2	-//-	Чебышева q1=0,5 дБ	4	100		
66	0,4	10	6	1,3	-//-	Чебышева q1=1,0 дБ	4	250		
67	0,5	25	8	1,5	-//-	Чебышева q1=2,0 дБ	4	350		
68	0,6	50	10	10	-//-	Инверс. Чебышева q2=-40 дБ	4	450		
69	0,7	100	15	8	-//-	Эллиптич. q1=0,5 дБ, q2=-40 дБ	4	600		
70	0,8	250	20	6	-//-	Бесселя	4	800		
71	1,0	500	50	4	-//-	Баттерворта	4	1000		
72	0,04	1000	100	2	-//-	Чебышева q1=0,5 дБ	4	750		
73	0,05	0,1	2	1,3	-//-	Чебышева q1=1,0 дБ	4	500		
74	0,06	0,3	4	1,5	ППФ	Чебышева q1=2,0 дБ	4		400	440
75	0,08	0,5	6	0,5	-//-	Инверс. Чебышева q2=-40 дБ	4		300	330
76	0,1	1,0	8	0,4	-//-	Эллиптич. q1=0,5 дБ, q2=-40 дБ	2		100	550
77	0,12	5,0	10	8	-//-	Бесселя	2		60	350
78	0,15	10	15	6	-//-	Баттерворта	2		100	750
79	0,18	25	20	4	-//-	Чебышева q1=0,5 дБ	2		250	1500
80	0,25	50	50	2	-//-	Чебышева q1=1,0 дБ	2		350	2000
81	0,3	100	100	1,3	-//-	Чебышева q1=2,0 дБ	2		450	2500
82	0,4	250	2	1,5	ФНЧ	Инверс. Чебышева q2=-40 дБ	4	600		
83	0,5	500	4	10	-//-	Эллиптич. q1=0,5 дБ, q2=-40 дБ	4	800		
84	0,6	1000	6	8	-//-	Бесселя	4	1000		
85	0,7	0,1	8	6	-//-	Баттерворта	4	750		
86	0,8	0,3	10	4	-//-	Чебышева q1=0,5 дБ	4	500		

Окончание таблицы 5.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
87	1,0	0,5	15	2	-//-	Чебышева q1=1,0 дБ	4	400		
88	0,04	1,0	20	1,3	-//-	Чебышева q1=2,0 дБ	4	300		
89	0,05	5,0	50	1,5	-//-	Инверс. Чебышева q2=-40 дБ	4	100		
90	0,06	10	100	0,5	-//-	Эллиптич. q1=0,5 дБ, q2=-40 дБ	4	60		
91	0,08	25	2	0,4	ФВЧ	Бесселя	4	100		
92	0,1	50	4	8	-//-	Баттерворта	4	250		
93	0,12	100	6	6	-//-	Чебышева q1=0,5 дБ	4	350		
94	0,15	250	8	4	-//-	Чебышева q1=1,0 дБ	4	450		
95	0,18	500	10	2	-//-	Чебышева q1=2,0 дБ	4	600		
96	0,25	1000	15	1,3	-//-	Инверс. Чебышева q2=-40 дБ	4	800		
97	0,3	0,1	20	1,5	-//-	Эллиптич. q1=0,5 дБ, q2=-40 дБ	4	1000		
98	0,4	0,3	50	10	-//-	Бесселя	4	750		
99	0,5	0,5	100	8	-//-	Баттерворта	4	500		
100	0,6	1,0	2	6	-//-	Чебышева q1=0,5 дБ	4	400		

Библиографический список

- 1 Хорвиц, П. Искусство схемотехники [Текст] / П. Хорвиц, У. Хилл, Т.1.5. - М.: Мир, 1985. – 598 с., 590 с.
- 2 Титце, У. Полупроводниковая схемотехника [Текст] / Ульрих Титце, Кристоф Шенк Т.1. Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 832 с. – Т.2 – 942 с.
- 3 Титце, У. Полупроводниковая схемотехника [Текст] / Ульрих Титце, Кристоф Шенк Т.5. Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 942 с.

Приложения
Приложение А
(обязательное)
Титульный лист курсовой работы

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра электротехники

КУРСОВАЯ РАБОТА
по дисциплине «Электротехника и электроника»
Тема

Выполнил студент
гр. _____/И.И. Иванов/

Руководитель
доцент _____/И.П. Петров/

Красноярск
201_

Приложение Б (обязательное) Образец задания на курсовую работу

ЗАДАНИЕ

На курсовую работу по курсу «Электротехника и электроника»
Тема работы

Вариант №...

Таблица - Исходные данные

E_{Γ} , В	R_{Γ} , кОм	R_H , Ом	P_H , Вт	Тип фильтра	Тип аппроксимации	Порядок фильтра	f_C , Гц	f_H , Гц	f_B , Гц	№ Вар. цифр. части
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Графическая часть _____ листов.

- 1 Рассчитать и разработать схему усилителя с заданными параметрами.
- 2 Спроектировать блок питания для разработанных электронных устройств.

При выполнении задания использовать литературу, перечень которой приведен в библиографическом списке пособия по курсовой работе на стр. 69.

Срок представления работы «_____» _____ 20__ г.

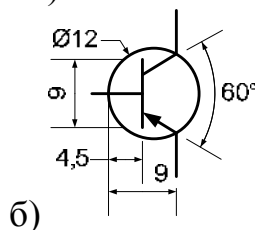
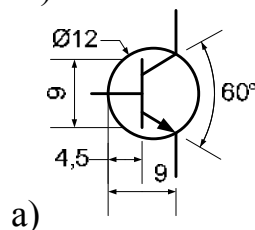
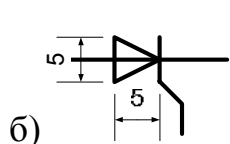
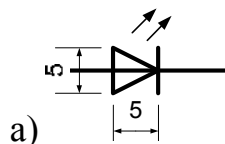
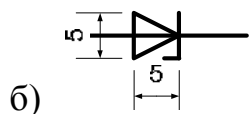
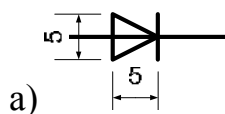
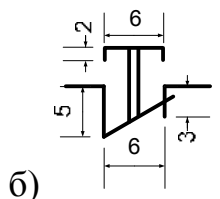
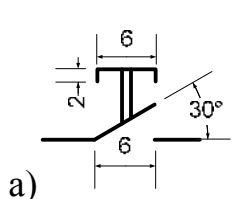
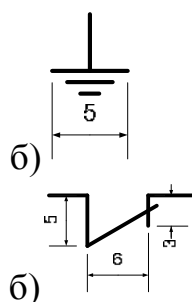
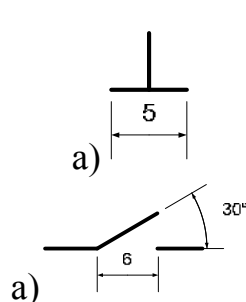
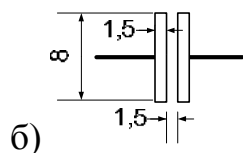
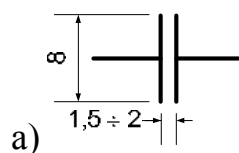
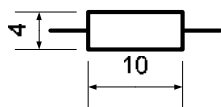
Приложение В (обязательное)

Расположение текста на странице курсовой работы



Приложение Г (справочное)

Условные графические обозначения основных элементов электроники по ГОСТ 5.730-73



Резистор. Справа или ниже помещается величина сопротивления: до 1000 Ом – без букв; килоомы – буква к; мегаомы – буква м. Например, 27 к, 1,5 м.

Катушка индуктивности, обмотка трансформатора

Конденсатор: а) обычный, б) электролитический. Справа или ниже помещается величина емкости: до 1000 пФ – без букв; нанофарады - нФ; микрофарады - мк. Например, 0,22 нФ, 100 мк.

а) общий проводник, корпус;

б) общий проводник, заземление

Контакты:

а) замыкающийся;

б) размыкающийся

Кнопки:

а) замыкающаяся без самовозврата;

б) размыкающаяся без самовозврата

Диоды:

а) выпрямительный;

б) стабилитрон

Диоды:

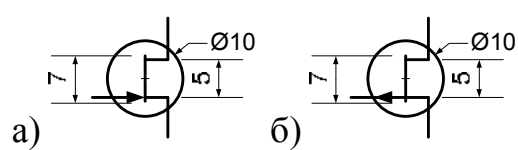
а) светодиод;

б) тиристор

Биполярный транзистор:

а) типа *pnp*;

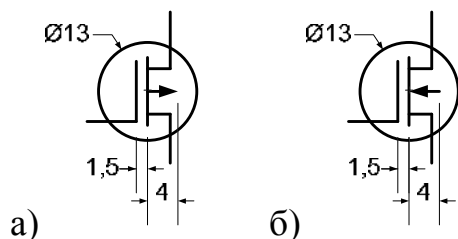
б) типа *npn*



Полевой транзистор с управляющим p - n переходом:

а) с n -каналом;

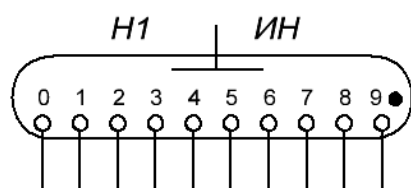
б) с p -каналом



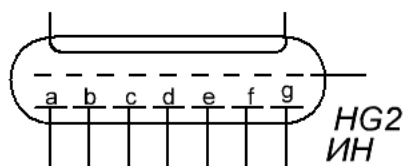
Полевой транзистор с изолированным затвором (МОП или МДП транзистор):

а) с каналом n -типа;

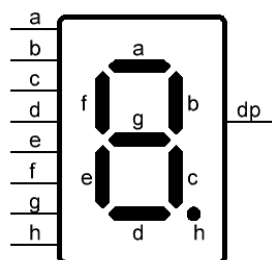
б) с каналом p -типа



Газоразрядный цифровой индикатор



7-сегментный вакуумный люминесцентный индикатор



Светодиодный 7-сегментный индикатор

Условные обозначения в схемах. Элементы аналоговой техники по ГОСТ 5.759-82

(усилители, компараторы, преобразователи, генераторы, ключи и т.д.)

Основное обозначение приведено на рисунке Г2, зарубежное – на рисунке Г1.

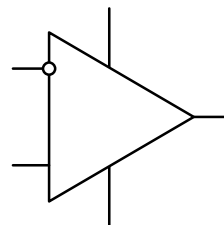
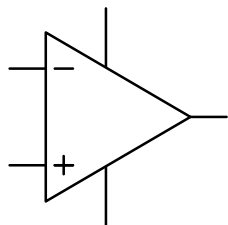


Рисунок Г.1 – Зарубежное обозначение (варианты изображения инвертирующего входа)

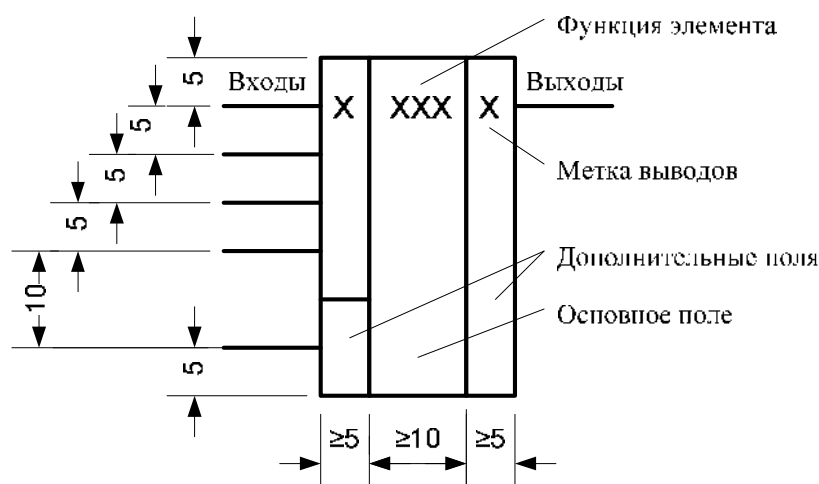


Рисунок Г.2 – Условное обозначение аналогового элемента электроники
Таблица Г.1 – Метки выводов

Метка вывода	Код	Метка вывода	Код
Установка начального значения	S	Пуск	ST
Установка в состояние 0	R	Балансировка (коррекция 0)	NC
Поддержание текущего значения сигнала	H	Частотная коррекция	FC
Строб, такт	C	Питание: - от источника напряжения; - от источника +15 В (-15 В)	+V (-V) +15 V (-15 V)
		Общий вывод	0V ($\perp$)

Метки выводов проставляются на дополнительных полях условного изображения микросхемы.

Таблица Г.2 – Функции элементов

Наименование функции	Код	Наименование функции	Код
Усиление	> или $\triangleright$	Замыкание	SWM
Детектирование	DK	Преобразование	X/Y
Деление	X:Y	Сравнение	=
Деление частоты	:FR	Суммирование	SM
Дифференцирование	D/DT	Тригонометрическая функция	TG
Интегрирование	INT	Умножение	XY
Логарифмирование	LOG	Формирование	F
Размыкание	SWB	ЦАП	#/\wedge
Переключение	SWT	АЦП	\wedge/#

Примечание. В усилителях после знака функции указывается коэффициент усиления. Например: >5 или $\triangleright 10$. Для операционных усилителей принимают коэффициент усиления равным бесконечно большой величине. Поэтому их обозначают так: $K \infty$ или $\triangleright \infty$.

Условные обозначения в схемах. Элементы цифровой техники по ГОСТ 5.743-91

Структура обозначения данных элементов та же, что и для аналоговой техники - прямоугольник с основными и дополнительными полями.

На дополнительных полях проставляют метки выводов. А на основном поле указывают функцию элемента. Метки выводов и функции элементов цифровой техники приведены в таблицах Г.4 и Г.5.

Выводы цифровых элементов бывают четырех видов: входами; выходами; двунаправленными и не несущими информацию. Входы изображают слева, выходы справа. Остальные выводы где угодно.

Таблица Г.3 - Условные обозначения выводов

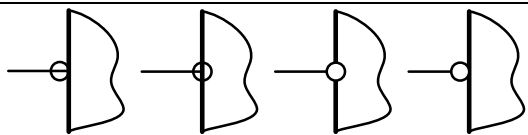
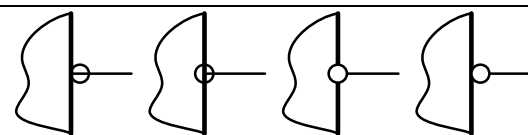
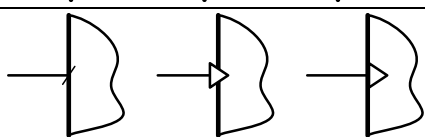
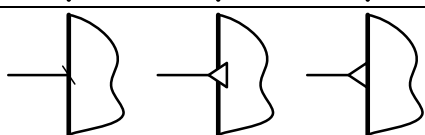
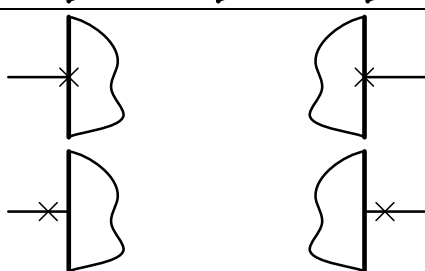
Условное обозначение	Вид вывода
	Статические вход и выход, прямые
	Инверсные статические входы
	Инверсные статические выходы
	Прямые динамические входы, $\sqcap$
	Инверсные динамические входы, $\sqsubset$
	Выводы не несущие логической информации (например, выводы питания)

Таблица Г.4 – Метки выводов
цифровых элементов

Установка в состояние N 1 0	Sn S R
Разрешение установки универсального триггера 1 0	J K
Вывод двунаправленный	↔
Блокировка (запрет)	INH
Данные	D
Запись	WR
Считывание	RD
Вход увеличения содержимого счетчика на n	+n
Вход уменьшения содержимого счетчика на n	-n
Адрес	A
Буфер	BUF
Контроль	CH
Пуск	ST
Разрешение	EN
Синхронизация	SYN
Строб, такт	CL (CLK)
Инверсия	N
Перенос	CP
Приоритет	PR
Продолжение	CN
Переполнение	OF

Таблица Г.5 – Логическая
функция цифровых элементов

Вычислитель	CP
ОЗУ с произволь- ным доступом	RAM
ОЗУ с последова- тельным доступом	SAM
ПЗУ однократного программирования	PROM
ПЗУ многократного программирования	RPRM
Логическое И	&
Логическое ИЛИ	1
Исключающее ИЛИ	=1
Повторитель	1
Регистр	RG
Сдвиг (вправо, вле- во, реверс)	← → ↔
Счетчик двоичный	CT2
Счетчик десятичный	CT10
Дешифратор	DC
Шифратор	CD
Мультиплексор	MUX
Демультимплексор	DMX
Генератор	G
Генератор последо- вательности импуль- сов	GN
Одновибратор	G1
Триггер	T
Триггер Шмидта	TH ($\square$)
Модулятор	MD
Демодулятор	DM
Микропроцессор	MPU
Устройство арифме- тически-логическое	ALU

Основная надпись (ГОСТ 5.104–68*), на принципиальной электрической схеме (рисунок Д.1)

При выполнении основной надписи на схеме заполняются следующие графы:

графа 9 – наименование организации (университета), группа, в которой учится студент. Например, СибГТУ, гр. 24-5.

«Пров.» – фамилия преподавателя принявшего работу;

графа 13 – дата подписания документа.

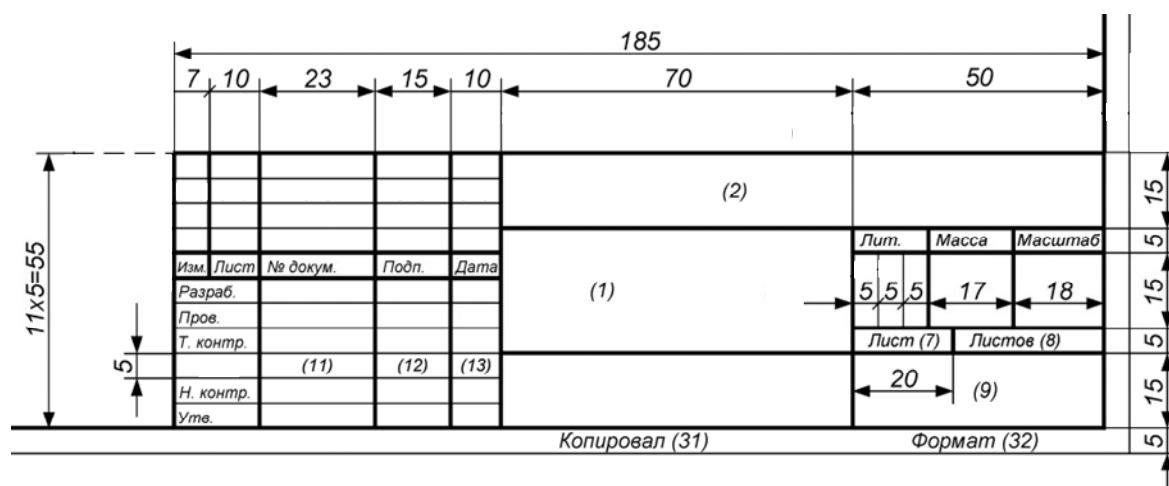


Рисунок Д.1 – Основная надпись

Перечень элементов следует расположить над основной надписью, как показано на рисунке Д.3, а.

Допускается перечень элементов выполнять на отдельном листе формата А4, как показано на рисунке Д.3, б, и размещать в приложении к курсовой работе.

В графе «Поз. обозначение» - приводятся обозначения элемента на схеме. Например, R1, C1, DA1, DD1, VD1, VT1, ... и т.д.

В графе «Наименование» приводятся марка, тип и номинальное значение элемента.

В графе «Кол.» - приводится количество элементов.

В графу «Примечания» - заносят особые отметки о соответствующих элементах.

	Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание

↓
10
↑

← 20 →
← 110 →
← 10 →
← 45 →

Рисунок Д.2 – Перечень элементов

[illegible]

Рисунок Д.3 – Расположение перечня элементов: а - на чертеже;
б - отдельным документом

В основной надписи перечня элементов, размещаемого на отдельном листе формата А4, графы: 1, 2 и 9 – заполняются так же, как и в основной надписи на принципиальной электрической схеме.

Графы «Разраб.» – фамилия студента, выполнившего работу, и «Пров.» – фамилия преподавателя, принявшего работу.

Приложение Е (справочное)

Технические данные мощных операционных усилителей

Операционные усилители обладают многими характеристиками, необходимыми для их правильного выбора и применения. Основными параметрами для мощных ОУ являются:

- **диапазон допустимых напряжений питания $\pm U_{пОУ}$, В.** Необходим для правильного выбора величины напряжения питания, с целью снижения тепловых потерь в УМ;

- **ток потребления от источника питания I_n , А.** Собственный ток потребления ОУ. В случае многоканального усилителя ток обычно указывается для одного усилителя, но иногда может быть указан для всей микросхемы в целом;

- **выходной ток $I_{вых}$, А** - максимальный выходной ток, передаваемый в нагрузку. В справочных данных на мощные ОУ часто приводятся значения максимального импульсного тока, который может выдаваться в нагрузку лишь кратковременно. В таблице Е.1 указано допустимое действующее значение выходного тока, который ОУ может отдавать в нагрузку в длительном режиме;

- **коэффициент усиления по напряжению $K_{ОУ}$** - отношение приращения выходного напряжения к вызвавшему его приращению дифференциального (между входами) входного напряжения в схеме без обратной связи. Измеряется в ненормированных единицах В/мВ, или в децибелах (дБ);

- **частота единичного усиления f_1 , МГц** - значение частоты, при котором коэффициент усиления ОУ по напряжению до единицы;

- **напряжение смещения $U_{см}$, мВ** - дифференциальное (между входами) напряжение, необходимое для того, чтобы выходное напряжение ОУ стало равно нулю. Появление напряжения смещения связано с технологическими отклонениями при изготовлении ОУ, в результате чего в схеме возникает некоторая разбалансировка. Последняя приводит к тому, что при нулевом входном сигнале ОУ и соединении между собой входов, из-за большого коэффициента усиления ОУ, схема входит в насыщение, и напряжение на выходе становится близким к напряжению питания. Для устранения данного эффекта в схемах ОУ обычно предусматривается коррекция режима по постоянному току;

- **максимальная скорость нарастания выходного напряжения v , В/мкс.** Определяется при подаче на вход ОУ прямоугольного импульса как отношение приращения выходного напряжения ко времени, за которое произошло это приращение. Наименьшая скорость нарастания выходного

напряжения получается при единичном усилении, поэтому это значение и приводят в справочных данных;

Таблица Е.1 – Основные характеристики мощных ОУ

Тип ОУ	$\pm U_{нОУ}$, В	I_n , мА	$I_{вых}$, А	$K_{ОУ}$, В/мВ	f_l , МГц	$U_{см}$, мВ	ν , В/мкс	Фирма/ страна
1	2	3	4	5	6	7	8	9
К157УД1	3 - 15	9	0,3	50	0,5	5	0,5	Россия
К1040УД2	24	12	0,5	1	0,3	7	-	Россия
К1460УД2Р	3 - 20	5	1	100	1,1	1	1,3	Россия
LM4765	20 - 84	50	2	320	7,5	2	18	NS
LM675	6 - 30	18	3	80	5,5	1	8	NS
LM3875	20 - 84	30	6	1000	8	1	11	NS
LM12	7,5 - 30	50	10	30	0,7	2	9	NS
LM3886	20 - 84	50	4	560	8	1	19	NS
ОРА544Т	10 - 35	12	2	150	1,4	1	8	TI
ОРА501	10 - 40	2,6	10	500	1	5	1,35	TI
ОРА512ВМ	10 - 50	25	10*	250	4	10	4	TI
ОРА567/569	2,7 - 5,5	9	2	1000	1,2	0,5	1,2	TI
ОРА548	4 - 30	17	3	80	1	2	10	TI
ОРА551	4 - 30	7	0,2	1000	3	1	15	TI
ОРА541АР	10 - 35	20	5	90	1,6	0,1	10	TI
LT1970	3 - 30	7	0,5	100	3,6	0,2	1,6	LT
РА16	7 - 19	27	1	100	4,5	5	20	АМ
РА162	2,5 - 20	16	1	100	0,9	1	1,4	АМ
РА74	2,5 - 20	18	3	100	1,4	1,5	1,4	АМ
РА01	10 - 28	20	5	400	1	5	2,6	АМ
РА02	7 - 19	27	5	100	4,5	5	20	АМ
РА52	15 - 115	30	40	200	3	5	50	АМ
МР240	15 - 100	16,5	20	60	1,8	1	3 - 14	АМ
L272	4 - 28	8	1	10	0,35	15	1	ST
L165V	6 - 18	40	3	80	3	2	8	ST

* - пиковый ток

В таблице приняты сокращения: NS - National Semiconductor;
TI - Texas Instruments; LT - Linear Technology; АМ - Apex Micotechnology;
ST- STMicroelectronics.

Для мощных ОУ, которые работают в напряженном тепловом режиме, важны и ряд других параметров, приведенные в таблице Е.2. К ним относятся:

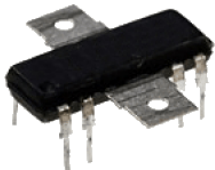
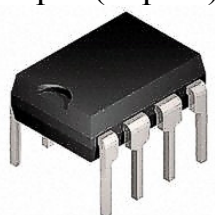
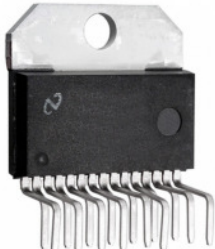
- **допустимая рассеиваемая мощность, $P_{доп}$, Вт** - долговременная мощность, которую усилитель способен рассеивать в окружающую среду без превышения предельно допустимой температуры кристалла при естественном (без теплоотвода) или искусственном (с теплоотводом) охлаждении. Обычно оговаривается допустимая температура среды;

- **коэффициент теплового сопротивления кристалл-корпус K_{JC} , °C/Вт**. Характеризует теплопередачу от кристалла микросхемы к ее корпусу. Параметр, необходимый для расчета охлаждающего радиатора;

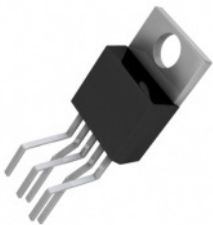
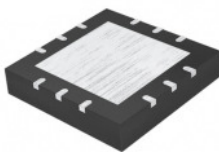
- **выходное сопротивление $R_{вых}$, Ом** - динамическое выходное сопротивление без ООС, (Ом);

- **ток при коротком замыкании выхода $I_{кз}$, А** (большинство ОУ имеют схему ограничения тока короткого замыкания).

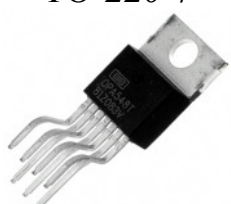
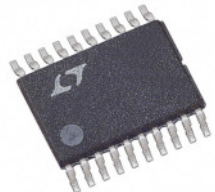
Таблица Е.2 – Специфические параметры мощных ОУ

Тип ОУ	$P_{доп}$, Вт	K_{JC} , °C/Вт	$R_{вых}$, Ом	$I_{кз}$, А	Тип корпуса. Общий вид
1	2	3	4	5	7
К157УД1	0,5* 1** (25 °C)	-	<50	1	201.9-1 
К1040УД2 (LM272)	1* (50 °C)	-	<2	1	Dip 16 (Dip 8) 
К1460УД2Р	0,5*	-	<1,5	-	Dip 8 (Dip 16) 
LM4765	2* от 25 до 40***	1	2	-	TO-220-15 

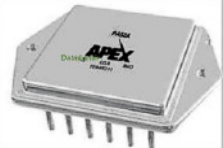
Продолжение таблицы Е.2

1	2	3	4	5	6
LM675	1,8* от 10 до 30***	54* 2	3	4	TO-220-5 
LM3875	2,3* <125***	43* 1***	<0,1	-	TO-220-11 
LM12	2* <100***	2,3	<0,5	13	TO-3 
LM3886	2,3* <125***	43* 1***	<0,1	11,5	TO-220-11
OPA544T	1,5*	3	<2,5	4	TO-220-5
OPA501	2* <79***	2,0	<0,6	от 2 до 10	TO-3
OPA512BM	2* <125***	30* 1,25***	<0,6	от 0,3 до 10	TO-3
OPA567	1*	6* 38****	<0,1	от 0,2 до 2,2	QFN-12 PowerPAD 
OPA569	4***	0,37 21,6****	<0,15	от 0,2 до 2,2	SO-20 Power PAD 

Продолжение таблицы Е.2

1	2	3	4	5	6
OPA548	1,7* 10***	65* 2,5	<1,5	от 0 до 5	TO-220-7 
OPA551	0,8*	100*	<1,5	0,38	Dip 8 
	1,2* 10*** 4****	65* 3***	<1,5	0,38	DDPAK-7 
OPA541AP	2,5* <125	40* 3	<1	5	TO-220-11 или TO-8 
LT1970	1*	100*	<1,7	от 0,1 до 0,5	20-Lead Plastic TSSOP 
	1,6**** (85 °C)	40****			
PA16	3,6* 62,5***	1,8 30*	<0,4	<3	12-pin SIP 

Окончание таблицы Е.2

1	2	3	4	5	6
PA162	4* 15*	25* 7,8	<0,6	-	20-pin PSOP 
PA74	3,3* 36***	30* 3,2	<1	3	TO-8 
PA01	3,3* 67***	30* 2,4	<1	<3	TO-8
PA02	3,3* 48***	30* 2,4	<0,5	<3	TO-8
PA52	8* 400***	12* 0,25	<0,15	нет	
MP240	5* 170***	14* 0,7	<0,2	от 1 до 25	
L272 (K1040УД2, K1460УД2Р)	1,2* 5***	50***** 15	<1	-	Dip 8 (Dip 16)
L165V	0,6* 20***	3	-	3,5	TO-220-5

* - без внешнего теплоотвода;

** - внешним теплоотводом площадью не менее 18 см²;

*** - с предусмотренным техническими условиями теплоотводом;

**** - на медном теплоотводе массой 60 г (пластине толщиной 2 мм и площадью 32 см²);

***** - на алюминиевой пластине 15x20x0,65 мм.

Все данные в таблице Е.2 (в случае двухканальных ОУ) относятся к одному каналу ОУ

Схемы включения мощных операционных усилителей

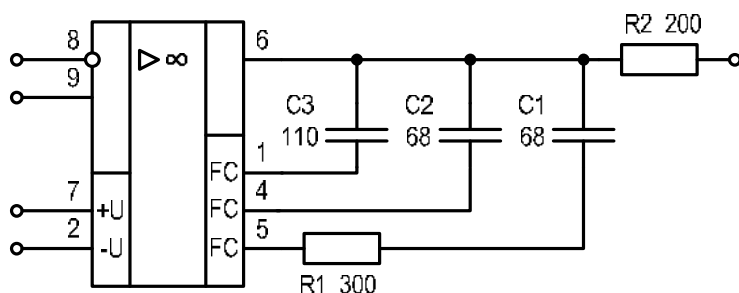


Рисунок Е.1 – Схема включения ОУ типа К157УД1

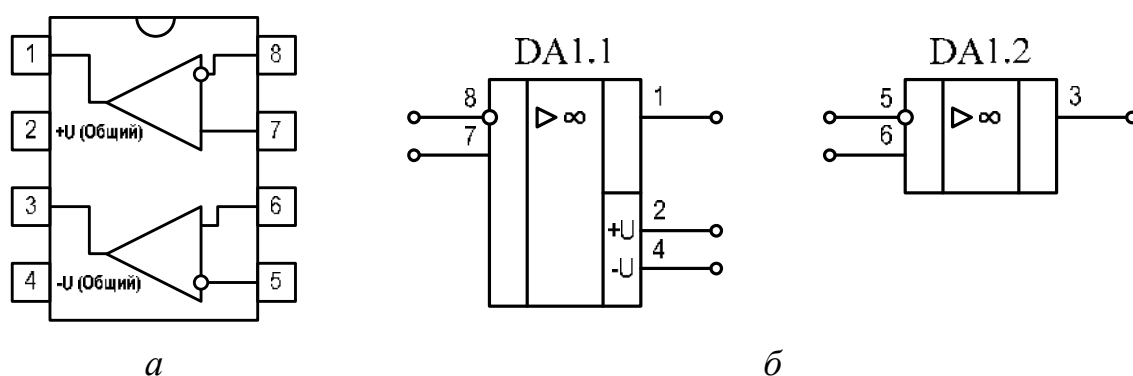


Рисунок Е.2 – ОУ типа К1040УД2, К1460УД2Р и LM272 (аналог):
а - расположение выводов; б - условное обозначение

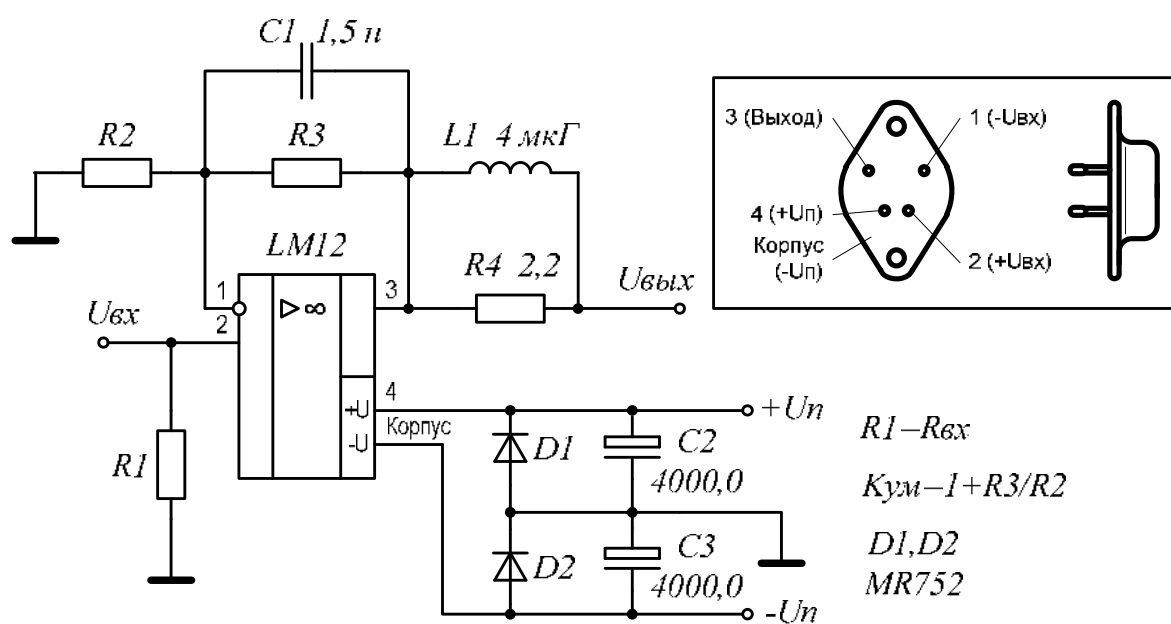


Рисунок Е.3 – Схема включения ОУ типа LM12 фирмы National Semiconductor

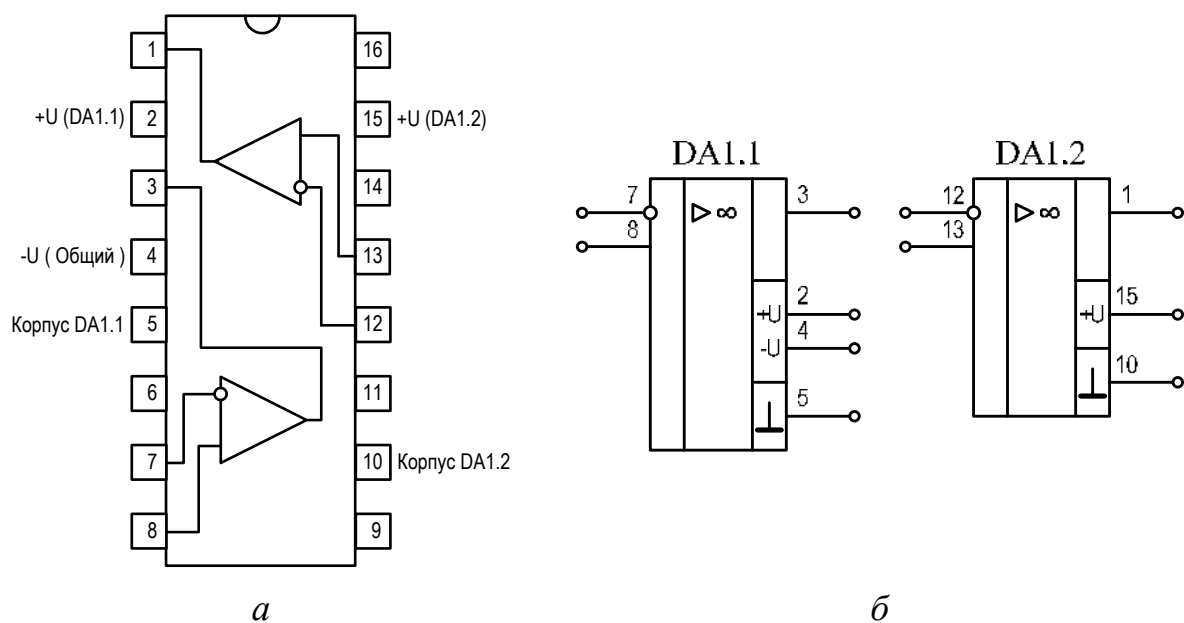


Рисунок E.4 – ОУ типа LM4765: а - расположение выводов; б - условное обозначение

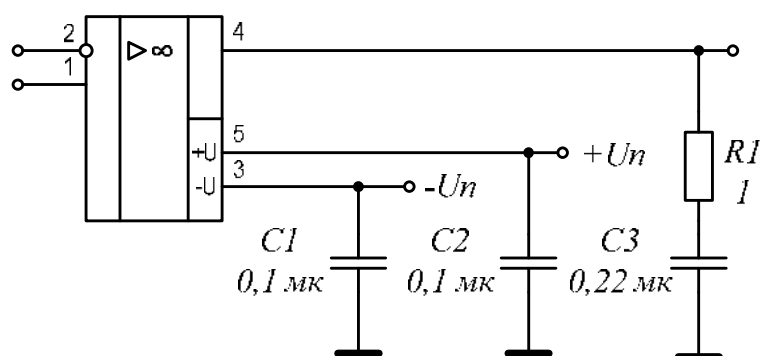


Рисунок E.5 – Схема включения и условное обозначение ОУ типа LM675 фирмы National Semiconductor

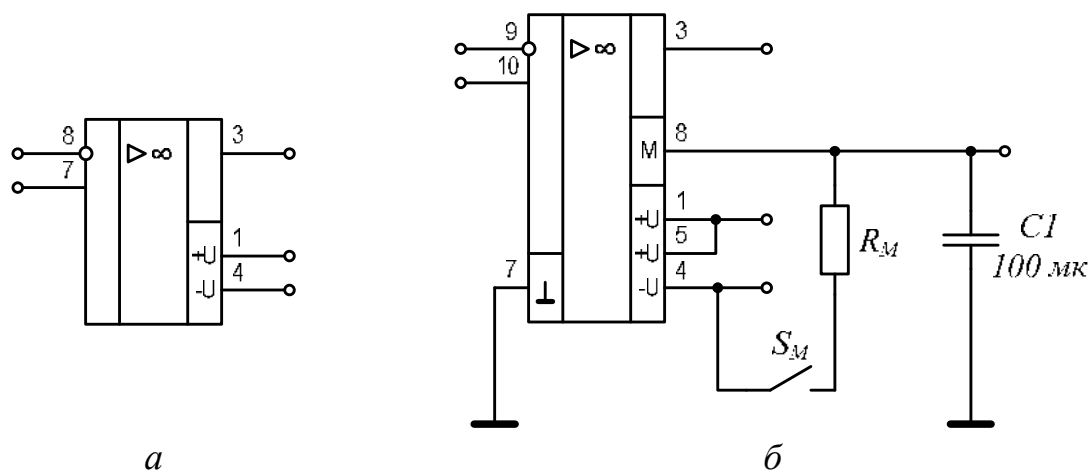


Рисунок E.6 – Условное обозначение ОУ: а - типа LM3875; б - типа LM3886

Резистор R_M в схеме ОУ типа LM3886 служит для отключения выхода усилителя после подачи через него тока 8 мА с отрицательного вывода питания ключом S_M . Его величина определяется по формуле

$$R_M = \frac{U_n - 2,6}{0,008}, [\text{Ом}]. \quad (\text{E.1})$$

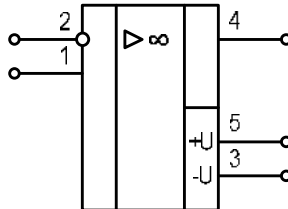


Рисунок E.7 — Условное обозначение ОУ типа OPA544T

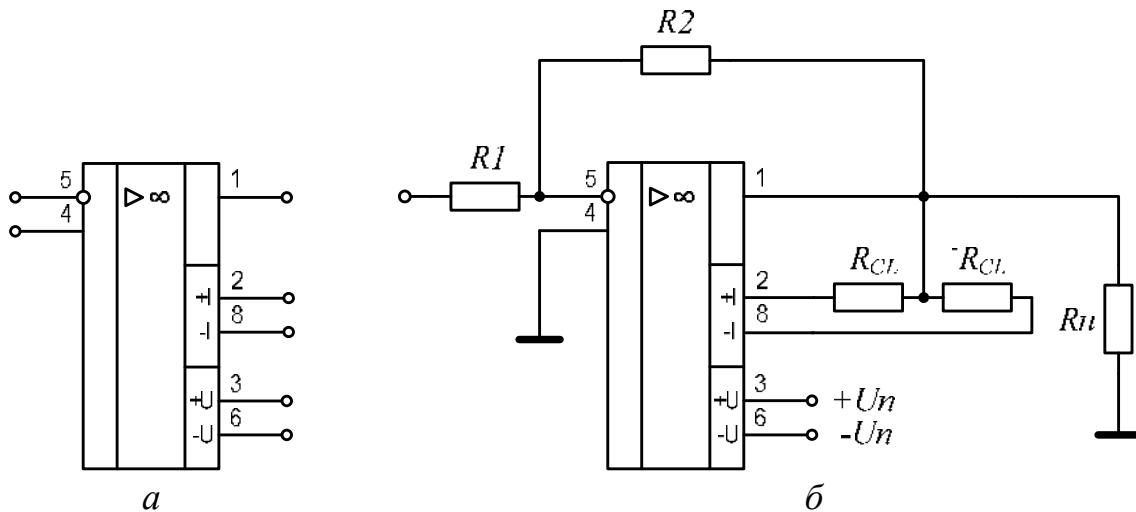


Рисунок E.8 — ОУ типа OPA501 и OPA512BM: а - условное обозначение; б - схема включения в инвертирующем усилителе

В данных ОУ (OPA501 и OPA512BM) резисторы $+R_{CL}$ и $-R_{CL}$ служат для ограничения выходного тока. Их величина определяется по формуле:

для OPA501

$$R_{CL} = \frac{0,65}{I_{LIMIT}} - 0,0437, [\text{Ом}]; \quad (\text{E.2})$$

для OPA512BM

$$R_{CL} = \frac{0,65}{I_{LIMIT}} - 0,007, [\text{Ом}], \quad (\text{E.3})$$

где I_{LIMIT} - ток ограничения, А.

Можно задавать разные значения тока ограничения по положительной или отрицательной полуволне выходного тока ОУ.

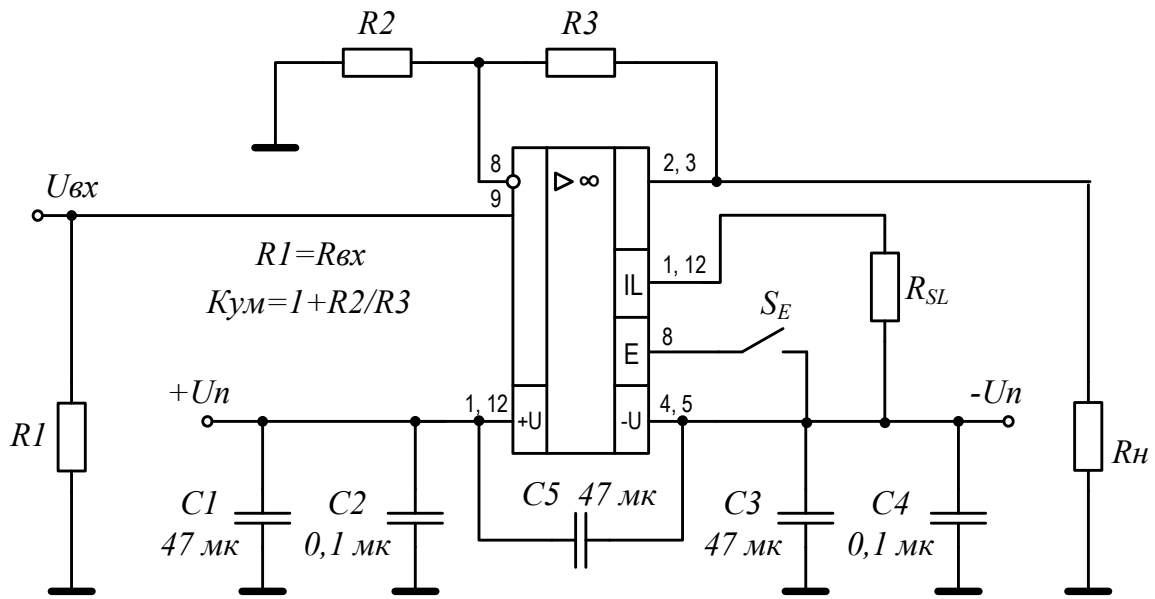


Рисунок E.9 – Условное обозначение и схема включения ОУ типа OPA567

Ключ S_E позволяет отключить выход усилителя от нагрузки при замыкании его на отрицательное напряжение питания. Резистор R_{SL} служит для задания ограничения выходного тока

$$R_{SL} = \frac{11564}{I_{LIMIT} [A]}, [Ом]. \quad (E.4)$$

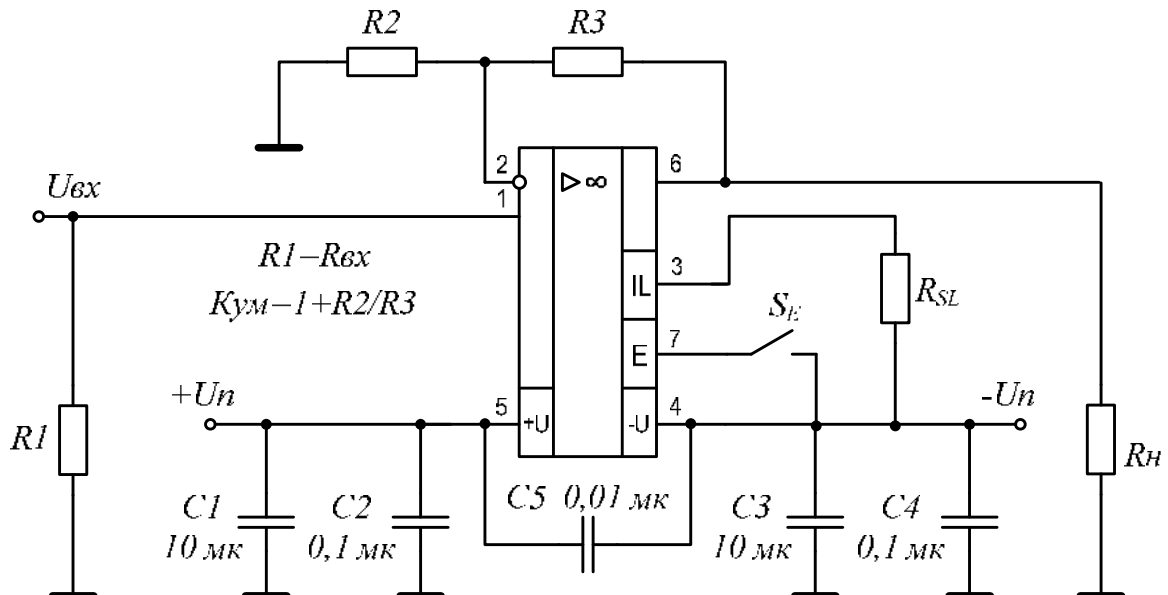


Рисунок E.10 – Условное обозначение и схема включения ОУ типа OPA548

Назначение ключа S_E здесь такое же, как и в схеме ОРА567, он позволяет отключить выход усилителя от нагрузки при замыкании его на отрицательное напряжение питания. Резистор R_{SL} то же служит для задания ограничения выходного тока

$$R_{SL} = \frac{71250}{I_{LIMIT} [A]} - 13750, [Ом]. \quad (E.5)$$

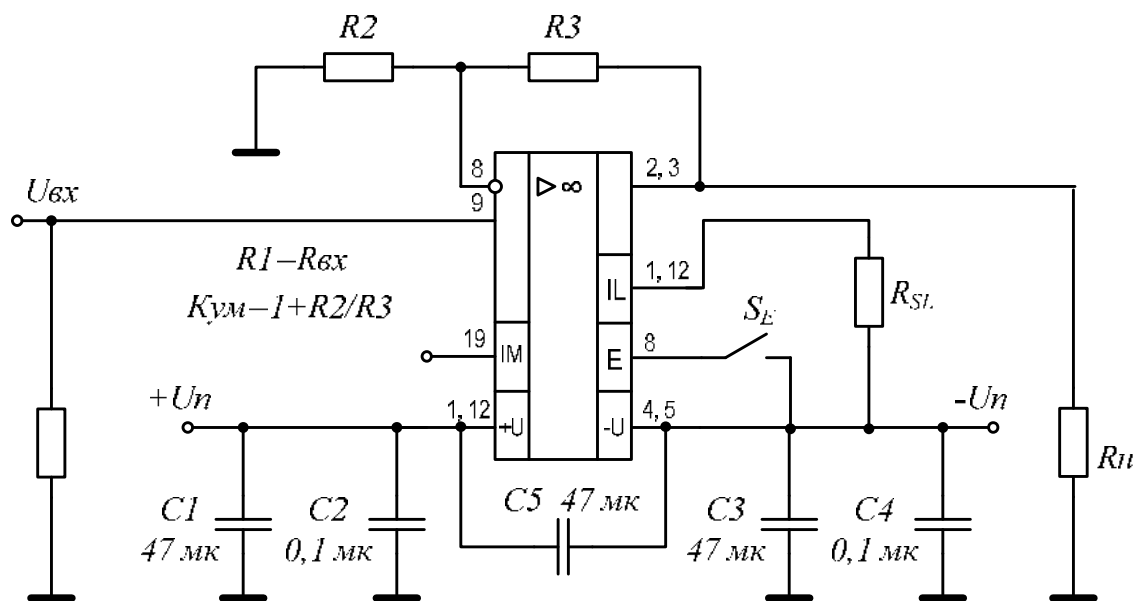
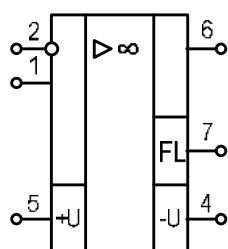


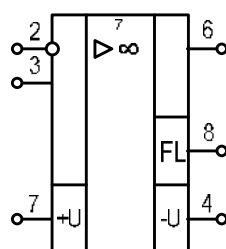
Рисунок E.10 – Условное обозначение и схема включения ОУ типа ОРА569

Схема включения ОУ типа ОРА569 полностью идентична схеме включения усилителя ОРА567, но имеет вывод IM (19). Это вывод позволяет осуществлять мониторинг выходного тока ОУ. Ток, вытекающий из вывода IM, в 475 раз меньше, чем выходной ток. Пропустив этот ток через резистор величиной 475 Ом, получим напряжение на резисторе, численно равное величине выходного тока.

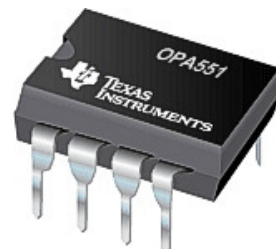
Например, току 1 А будет соответствовать напряжение 1 В. Благодаря наличию такого датчика тока этот мощный ОУ может применяться в точных системах стабилизации тока.



а



б



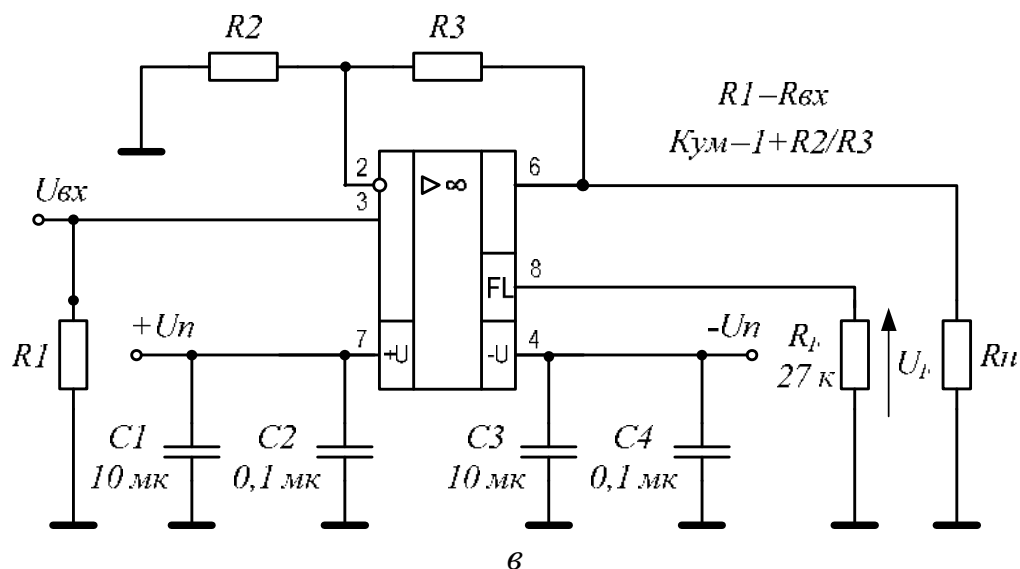


Рисунок E.11 – Условное обозначение ОУ типа OPA551: а – в корпусе DDPАК-7; б – в корпусе DIP-8; в – схема включения в варианте неинвертирующего усилителя

Усилитель OPA551 отличается наличием выхода FLAG (FL), который служит выходом датчика температуры кристалла. При нормальной температуре ток вывода FL составляет 50 мкА и падение напряжения U_F на резисторе R_F будет около 1,35 В. При превышении температуры кристалла допустимого значения ток, вытекающий с выхода FL, возрастает до 160 мкА. Напряжение U_F возрастает до 4,32 В. Это позволяет с помощью логического элемента отслеживать температурные режимы усилителя и автоматически отключать его от питания.

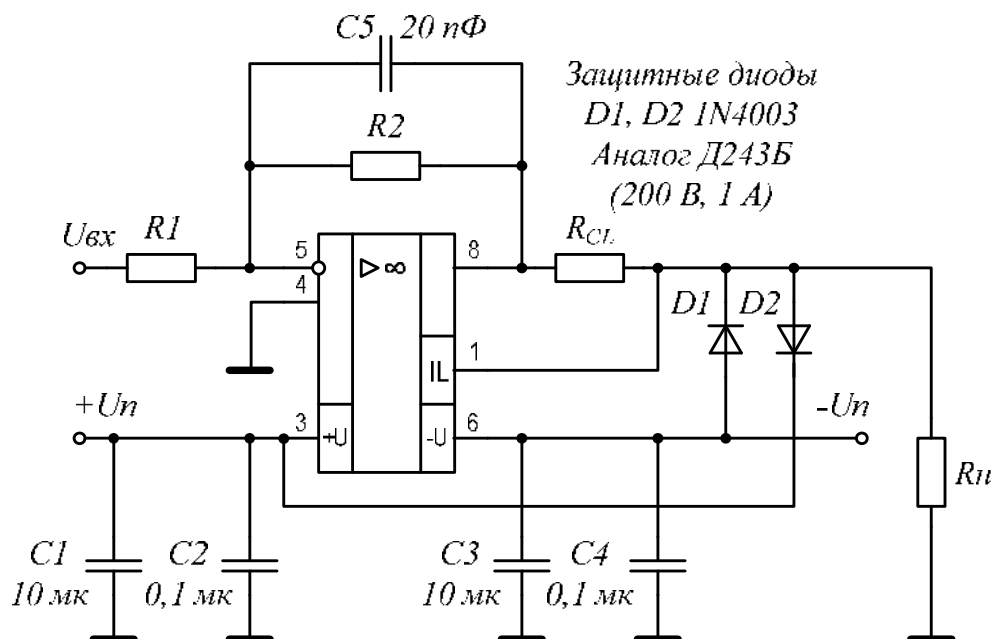


Рисунок E.12 – Схема включения УМ на ОУ типа OPA541AP

Резистор R_{CL} в схеме на рисунке Е.12 играет роль датчика тока нагрузки и позволяет ограничивать выходной ток ОУ заданным значением. Для данного ОУ в металлических корпусах ТО-8 этот резистор определяется так

$$R_{CL} = \frac{0,809}{I_{LIMIT} [A]} - 0,057, [\text{Ом}]. \quad (\text{Е.6})$$

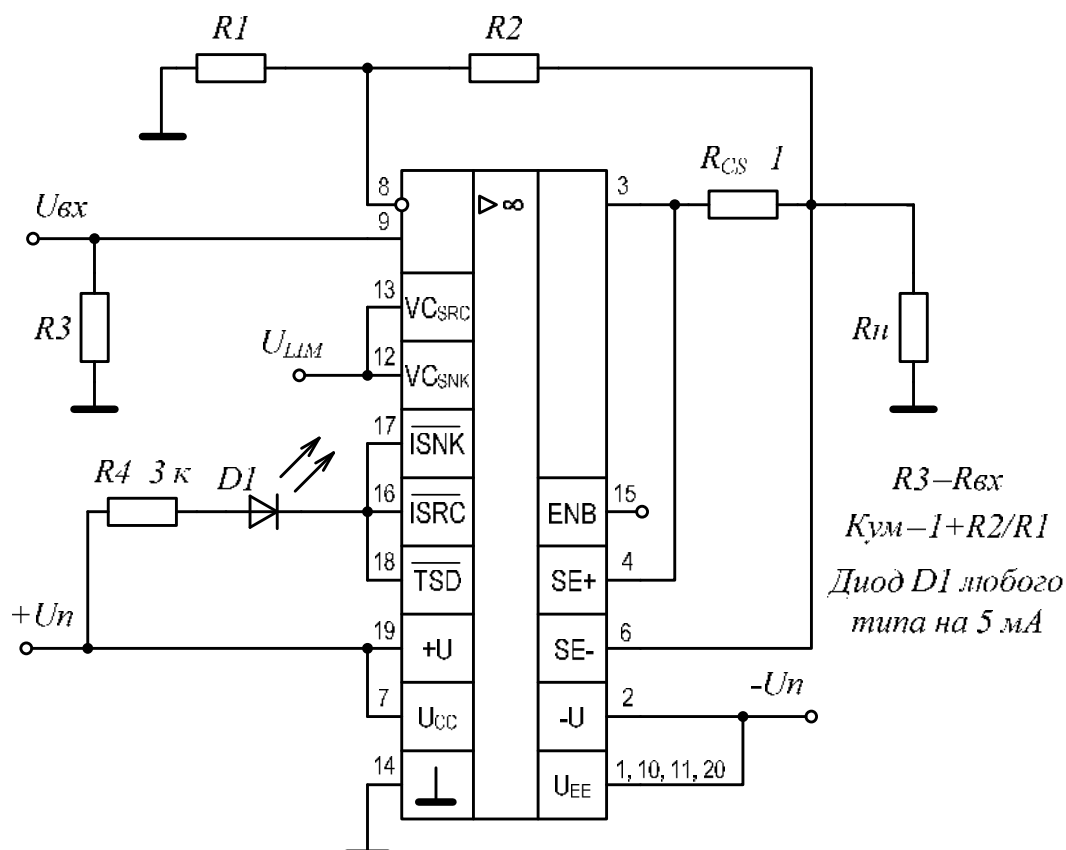


Рисунок Е.13 – Схема неинвертирующего усилителя на ОУ типа LT1970 фирмы Linear Technology

В данной схеме (рисунок Е.13) резистор R_{CS} является датчиком тока для системы ограничения выходного тока ОУ. Предельное значение выходного тока микросхемы задается напряжением U_{LIM} на специальном входе ОУ. Это напряжение определяется по выражению

$$U_{LIM} = 10 \cdot R_{CS} \cdot I_{LIMIT}. \quad (\text{Е.7})$$

На рисунке Е.14 приведена схема инвертирующего усилителя на ОУ типа PA16 фирмы Apex Micotechnology. В схему типового включения ОУ входят два навесных резистора $+R_{CL}$ и $-R_{CL}$, которые служат для ограничения выходного тока ОУ. Значение этих резисторов (они могут быть разными для тока отрицательной и положительной волны) определяется так

$$R_{CL} = \frac{0,65}{I_{LIMIT} [A]} - 0,01, [Ом]. \quad (E.8)$$

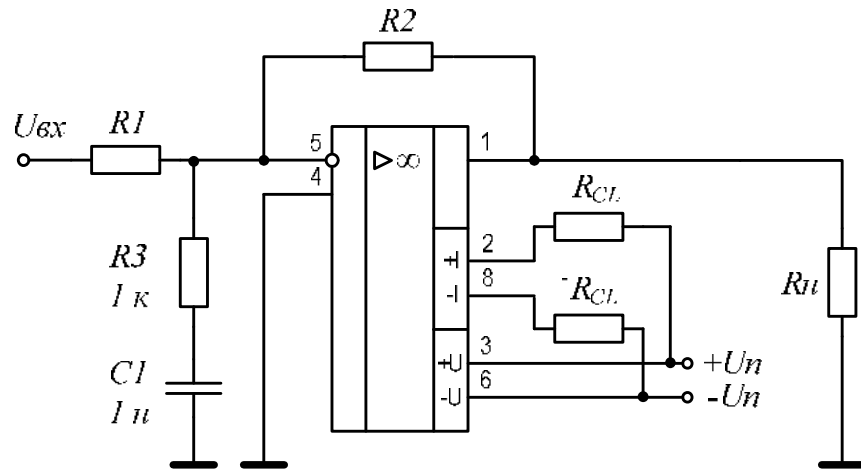
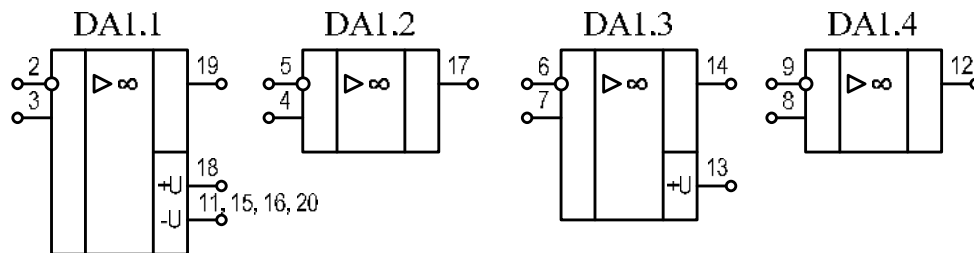


Рисунок E.14 – Схема инвертирующего усилителя на ОУ типа PA16

Корректирующая цепочка $R3C1$ нужна для обеспечения устойчивости усилителя.



Вывод питания 18 для DA1.1 и DA1.2,
вывод питания 13 для DA1.3 и DA1.4

Рисунок E.15 – Условное обозначение счетверенного ОУ типа PA162

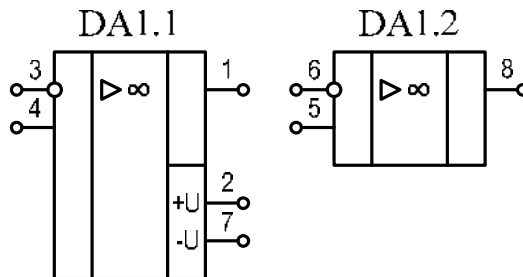


Рисунок E.16 – Условное обозначение сдвоенного ОУ типа PA74

На рисунках E.17 и E.18 показаны схемы инвертирующего усилителя на ОУ типа PA01 и PA05. В них также применяются навесные резисторы для введения ограничения выходного тока. Их значения можно найти по выражению (E.8). Величина резисторов $^+R_{CL}$ и $^-R_{CL}$ должна быть не меньше 0,12 Ом.

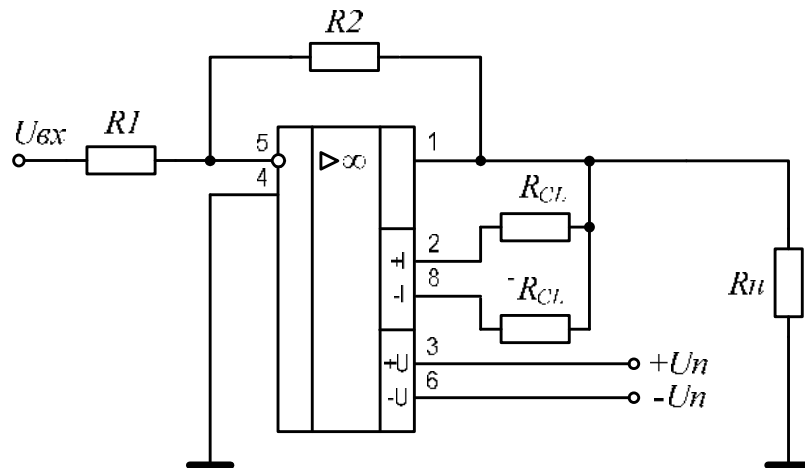


Рисунок E.17 – Схема инвертирующего усилителя на ОУ типа PA01

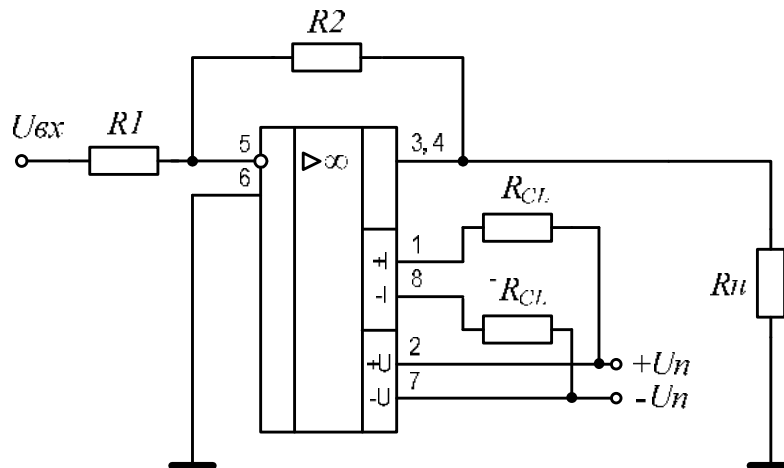


Рисунок E.18 – Схема инвертирующего усилителя на ОУ типа PA02

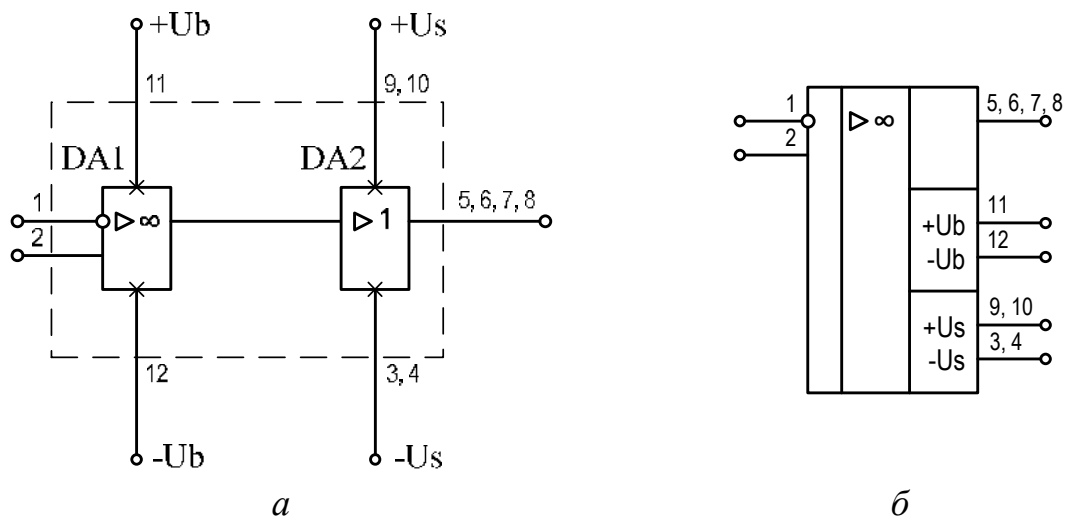


Рисунок E.19 – ОУ типа PA52: а - внутренняя структура; б – условное обозначение

Усилитель PA52, как показано на рисунке E.19, а, структурно состоит из двух последовательно включенных каскадов.

Первый каскад DA1 является операционным усилителем с большим коэффициентом усиления. Второй каскад DA2 – это усилитель мощности на полевых транзисторах. Он собран по схеме истокового повторителя и имеет коэффициент усиления по напряжению около единицы.

Применение данного ОУ не имеет каких либо особенностей, кроме того, что каскады имеют отдельные выводы питания. Это сделано для упрощения конструкции источника питания ОУ. Первый каскад, потребляющий небольшой ток, может питаться через стабилизатор напряжения небольшой мощности. Второй каскад, потребляющий основной ток, может получать нестабилизированное питание с относительно большими пульсациями напряжения.

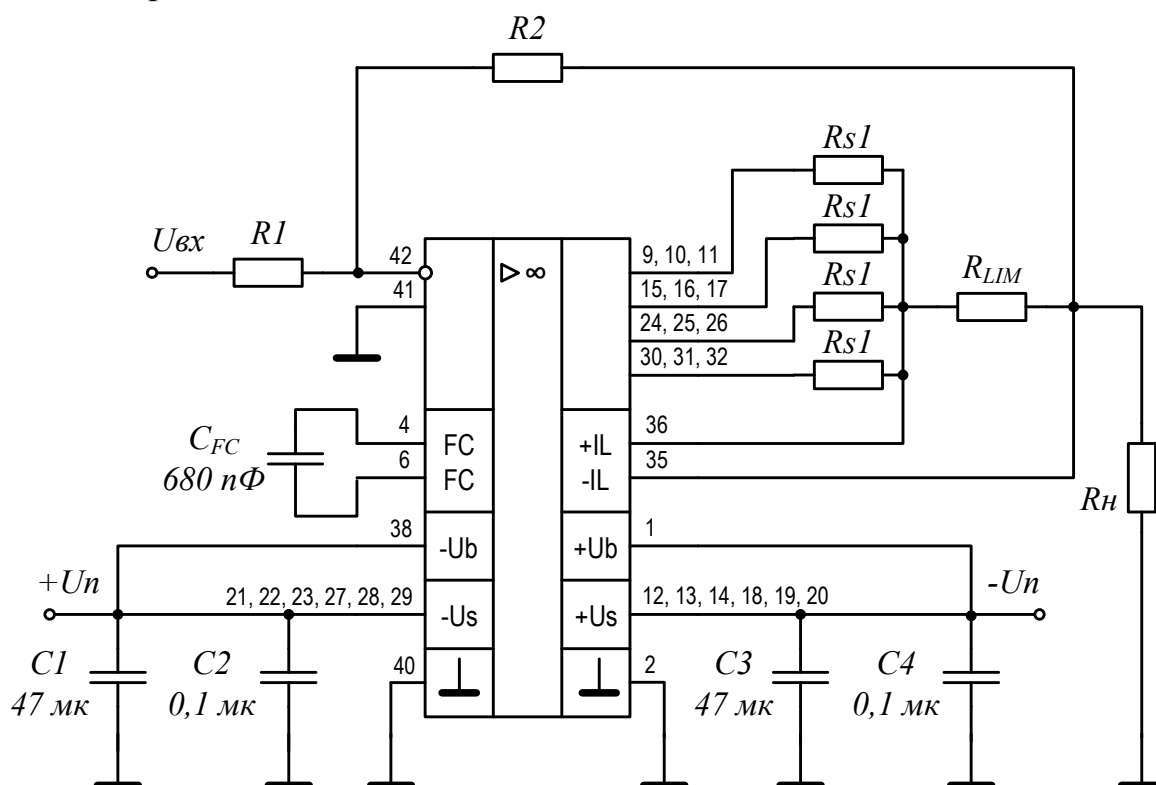


Рисунок Е.20 – Схема включения и общий вид ОУ типа MP240

Усилитель MP240 (рисунок Е.20) имеет выходной каскад, собранный на нескольких параллельно включенных полевых транзисторах, поэтому для выравнивания токов в них последовательно с транзисторами включаются уравнивательные резисторы $R_{s1} - R_{s4}$. Их величина может быть определена по выражению

$$R_{s1} = R_{s2} = R_{s3} = R_{s4} = \frac{4,5}{I_{\max}^2}, [\text{Ом}], \quad (\text{Е.9})$$

где $I_{\max}$ - максимальное значение тока в нагрузке усилителя, А.

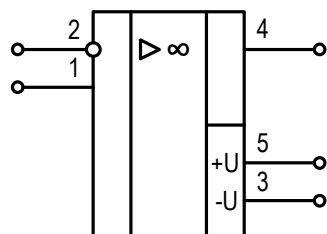
Последовательно с нагрузкой включается резистор R_{LIM} , который является датчиком тока в системе ограничения тока ОУ. Его величина находится по формуле

$$R_{LIM} = \frac{0,65}{I_{LIMIT} [A]}, [\text{Ом}]. \quad (\text{Е.10})$$

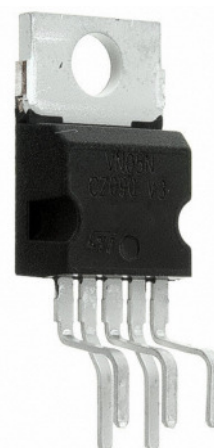
Конденсатор C_{FC} - конденсатор фазовой коррекции. Его величина может быть выбрана из таблицы Е.3.

Таблица Е.3 – Емкость корректирующего конденсатора для ОУ МР240

Емкость конденсатора C_{FC} , пФ	Коэффициент усиления ОУ охваченного отрицательной обратной связью, Кум	Скорость нарастания выходного напряжения v , В/мкс
680	1	3
330	1 ÷ 3	6
100	3 ÷ 10	14



а



б

Рисунок Е.21 – ОУ L165V: а – условное обозначение; б – общий вид

Выбрать другие типы ОУ и познакомиться с новинками разработок в области мощных ОУ можно на сайтах:

http://www.national.com/en/all_products/index.html

<http://www.ti.com/ww/ru>

<http://www.pec.ru/manufacturers/linear/> или <http://www.linear.com>

<http://www.st.com/internet/com/home/home.jsp>

http://www.apexmicrotech.ru/products/linear_overview.html

Приложение Ж (справочное)

К выбору радиаторов для силовых полупроводниковых элементов

Простейший радиатор представляет собой плоскую пластину площадью S [см²]. Зависимость его теплового сопротивления (радиатор - воздух) K_{SA} от площади S для корпуса типа ТО-220-(5,7) дана на рисунке Ж.1.

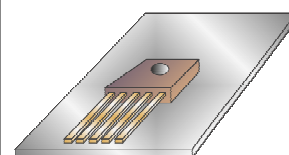
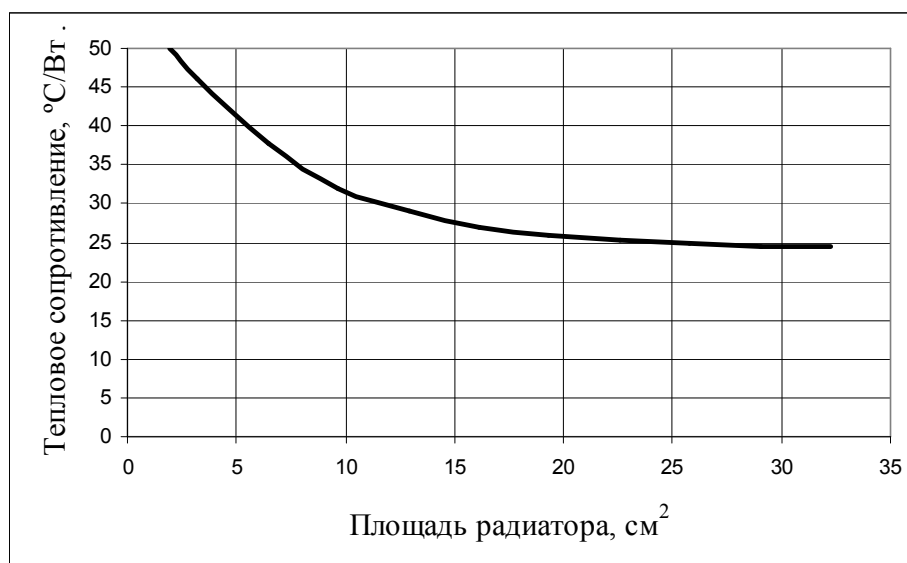
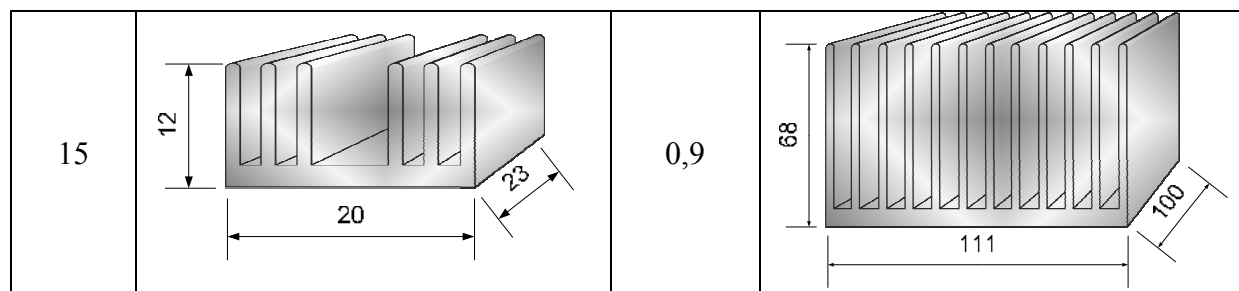


Рисунок Ж.1 – Зависимость $K_{SA} = f(S)$ для корпуса ТО-220

Тепловое сопротивление радиаторов более сложной формы определяется опытным путем предприятиями изготовителями и для некоторых типов радиаторов приведено ниже в таблице Ж.1.

Таблица Ж.1 – Технические данные радиаторов

$K_{SA},$ °C/Bm	Общий вид радиатора	$K_{SA},$ °C/Bm	Общий вид радиатора
23		4,2	



Приложение 3 (справочное)

Технические данные некоторых маломощных ОУ

В настоящее время в мире выпускается сотни типов ОУ различного назначения. Для настоящей курсовой работы достаточно иметь относительно скромную номенклатуру ОУ. Ниже в таблице 3.1 приведены основные технические данные некоторых отечественных и зарубежных ОУ.

Таблица 3.1 – Основные технические данные ОУ

Тип ОУ	Кол-во кан.	$\pm U_n$, В	I_n , мА	K_{Oy} , тыс	U_{cm} , мВ	f_1 , МГц	ν , В/мкс	R_n , кОм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Отечественные ОУ								
К140УД6	1	5 – 18	3	60	5	1	2,5	1
К140УД7	1	5 – 18	3	45	4,5	0,8	0,3	2
К140УД8	1	5 – 18	5	50	20	1	10	2
К140УД9	1	9 – 18	8	35	5	1	0,5	1
К140УД10	1	5 – 18	10	50	4	15	30	2
К140УД11	1	5 – 18	8	30	5	15	30	2
К140УД14	1	5 – 20	1	50	2	0,5	0,2	1
К140УД17	1	3 – 18	5	200	0,08	4	0,4	2
К140УД20	2	5 – 18	3	50	3	0,5	0,3	1
К140УД21	1	12 – 20	5	1000	0,05	3	2,5	2
К140УД22	1	14 – 16	10	50	10	5	7,5	2
К140УД24	1	4,5 – 5,5	4	1000	0,005	0,8	2	3
К140УД25	1	14 – 16	5	1000	0,03	3	1,7	1
К140УД26	1	5 – 16	5	1000	0,03	20	11	2
К153УД1	1	9 – 18	6	15	7,5	1	0,2	2
К153УД2	1	5 – 18	3	25	7,5	1	0,5	2
К153УД3	1	9 – 18	4	25	2	1	0,2	2
К153УД4	1	3 – 18	0,8	5	5	0,7	0,1	5
К153УД5	1	5 – 16	3,5	500	2	0,2	0,01	2

K153УД6	1	5 - 18	3	50	2	0,7	0,5	2
K154УД1	1	4 - 18	0,15	150	5	1	10	2
K154УД2	1	5 - 18	6	100	2	15	100	2
K154УД3	1	5 - 18	7	8	10	15	80	2
K154УД4	1	5 - 17	7	8	6	30	400	2
K544УД1	1	8 - 16	3,5	30	15	1	5	2
K544УД2	1	5 - 17	7	20	10	15	20	2

Окончание таблицы П.3.1

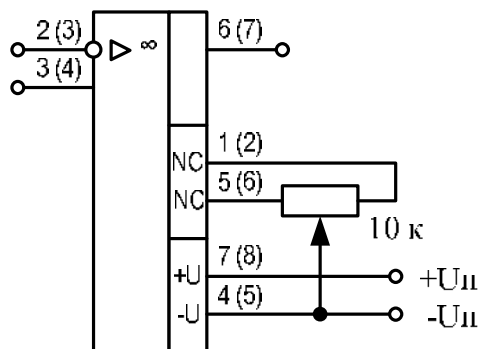
1	2	3	4	5	6	7	8	9
K574УД1	1	15	8	50	50	10	50	2
K574УД2	1	15	10	25	50	2	10	10
K574УД3	1	3 – 17	7	20	5	15	30	10
K1401УД1	2	2 – 17	8,5	2	5	2,5	0,5	1
K1401УД2	2	1,5 – 17	3	25	5	1	0,5	2
K1407УД1	2	3 - 12	8	10	10	20	10	1
K1407УД2	2	1,2 – 13	0,1	50	0,5	3	0,5	2
K1407УД3	2	2 – 12	2	10	5	5	5	2
K1407УД4	2	1,5 - 6	2	3	5	1	1	0,25
K1408УД1	2	7 - 40	5	70	8	2	18	2
<i>Зарубежные ОУ</i>								
LF147	4	5 - 22	7,2	100	1	20	13	1
LF155	1	5 - 22	2	200	3	8	5	1
LF441	1	5 - 18	0,25	25	5	4	15	4
ICL7650	1	5 - 18	2	5000	0,002	2	2,5	10
LM124	4	1,5 – 15	1,5	100	2	1	-	2
LM146	4	1,5 – 22	1,5	1000	0,5	0,8	0,4	2
LM392	2	1,5 – 16	0,6	100	2	1	-	2
LM358	2	1,5 – 15	0,5	100	2	1	0,5	2
LMC6001	1	2,25 – 7,75	0,75	400	0,35	1	1	0,2
MAX400	1	3 - 18	4	500	0,01	0,6	0,3	5
MAX437	1	8 - 18	2,7	16000	0.005	60	-	1
OPA177	1	5 -18	2	125	0,01	0,6	0,3	1
OPA641	1	4,5 – 5,5	15	58	2	1600	650	0,1
AD513	1	5 - 18	7	50	20	10	20	2
AD8055	1	5	5	3	5	300	1400	0,1
TL083	2	5 - 18	1,4	200	3	3	13	2

В таблице 3.1 операционные усилители приведены без разделения на типы: общего применения, прецизионные, микроощные и т.д.

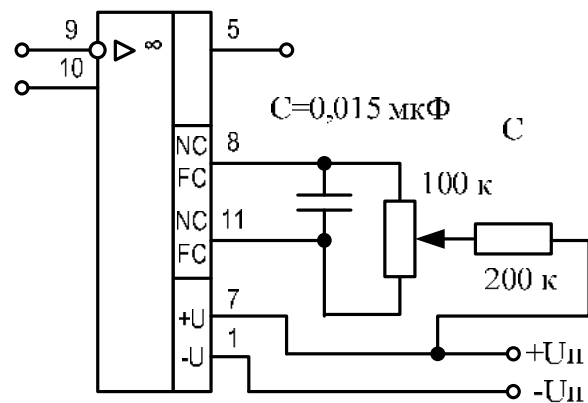
Схемы включения ОУ приведенных выше марок показаны далее.

Все схемы даны в соответствии с действующим в Российской Федерации ГОСТ.

K140УД6, K140УД7,
KP140УД708, (K140УД8А/Б)

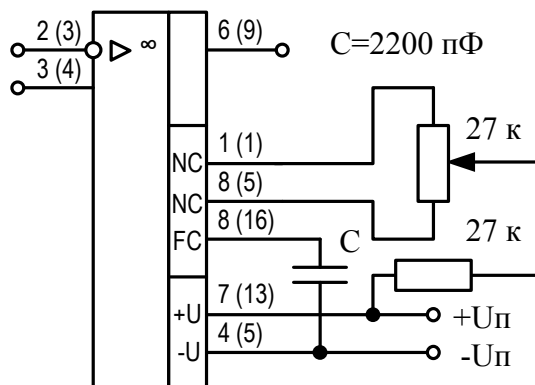


K140УД9



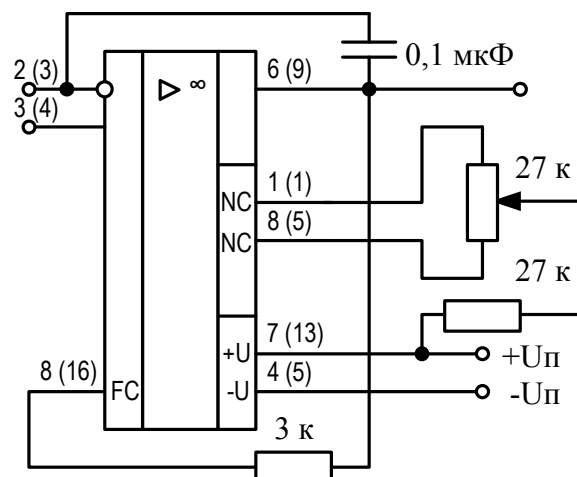
K140УД10, K140УД11,
(KP140УД1101)

Вариант 1

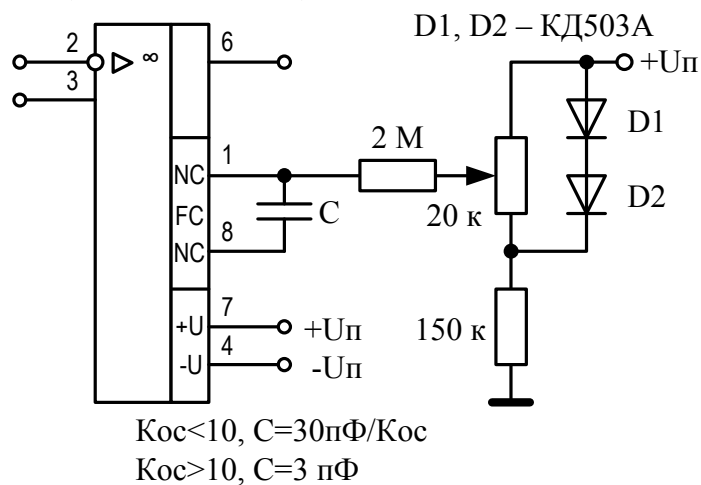


K140УД10, K140УД11,
(KP140УД1101)

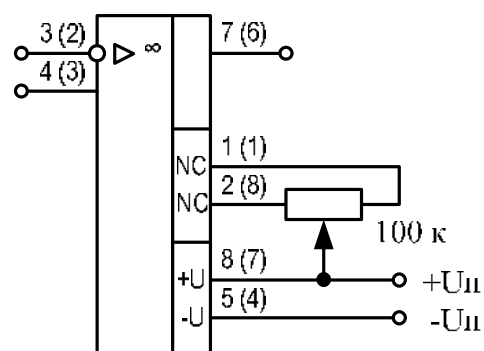
Вариант 2



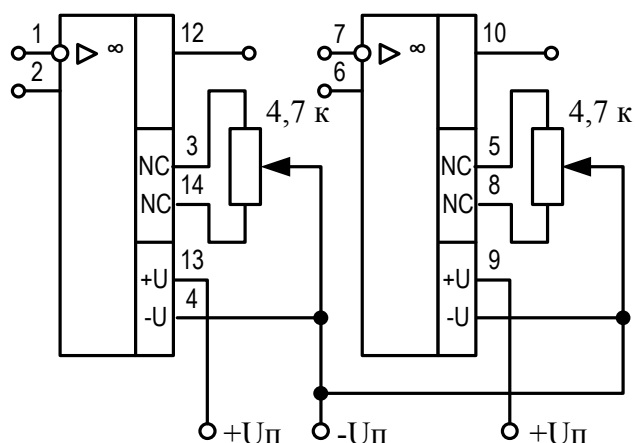
К140УД14, К140УД1401,
(КР140УД1408)



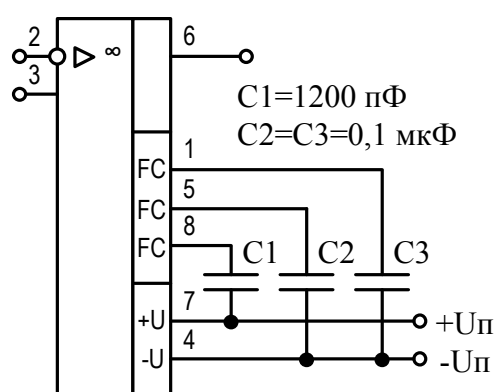
К140УД17 (А/Б),
К140УД1701 (А/Б),
КР140УД17 (А/Б)



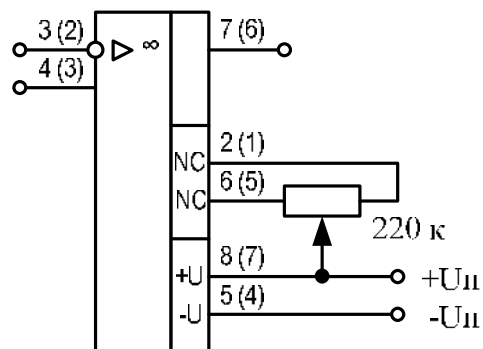
К140УД20 (А/Б), КМ140УД20 (А/Б),
КР140УД20 (А/Б)
2 ОУ типа К140УД7



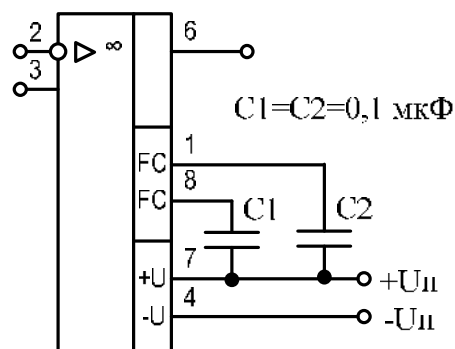
К140УД21



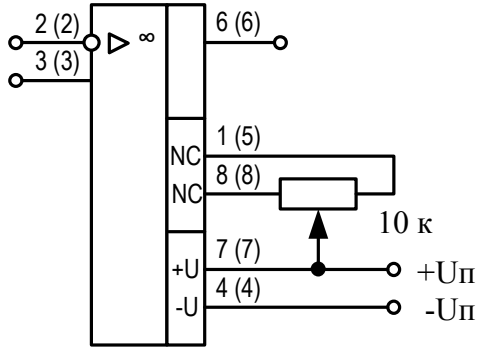
К140УД22,
К140УД2201,
(КР140УД22)



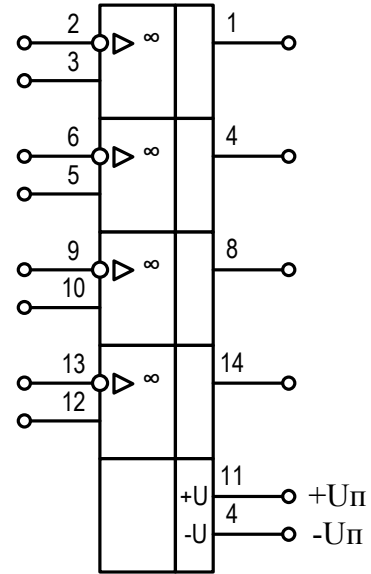
К140УД24



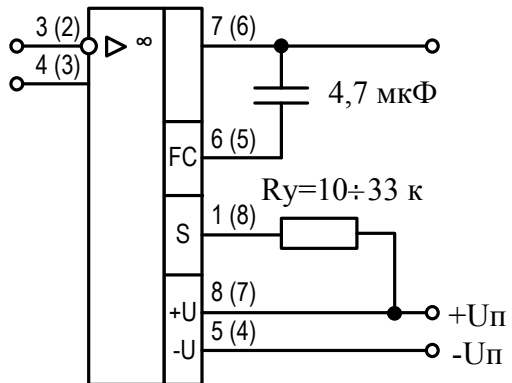
К140УД25 (А/Б/В), (КР140УД25 (А/Б/В)),
К140УД26 (А/Б/В), (КР140УД26 (А/Б/В))



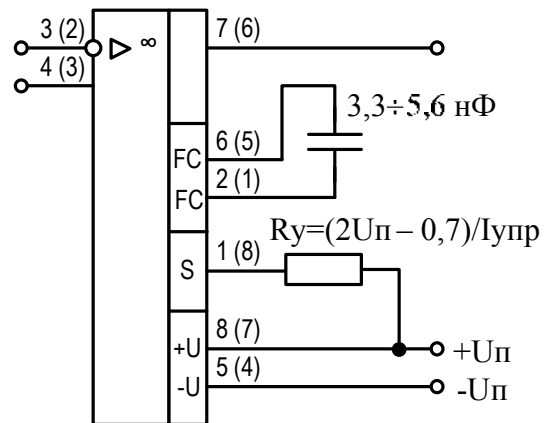
К1401УД1, К1401УД2

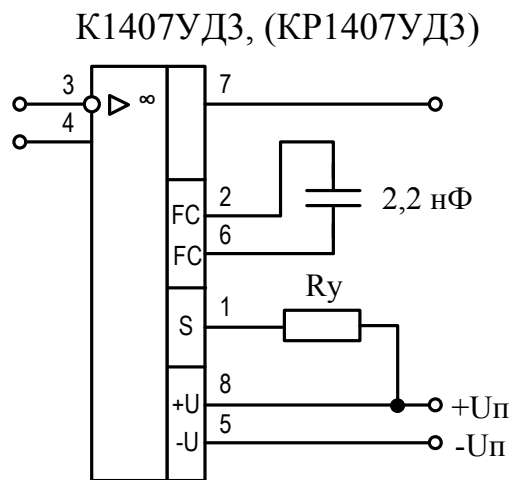


К1407УД1, (КР1407УД1)



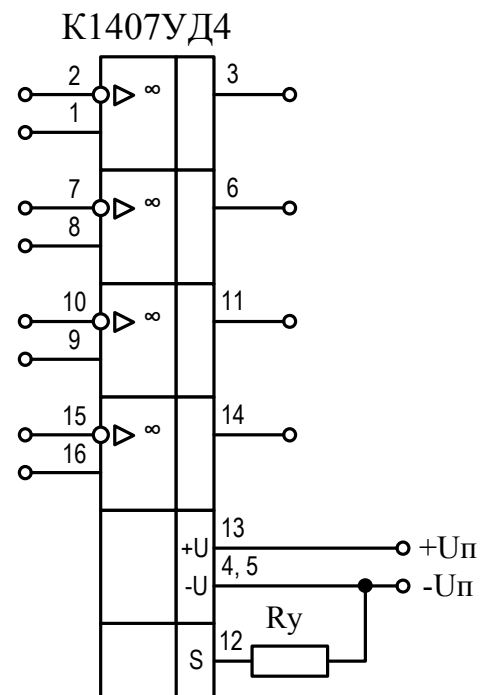
К1407УД2, (КР1407УД2)



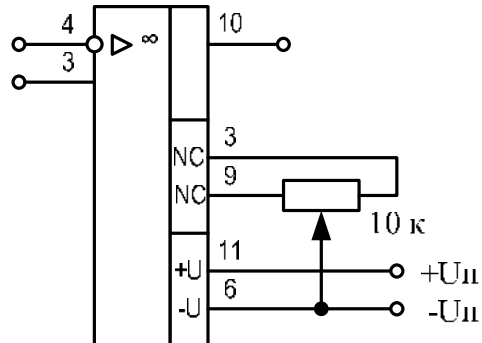


$$R_y = (2U_{\Pi} - 0,7) / I_{Y_{\Pi}}$$

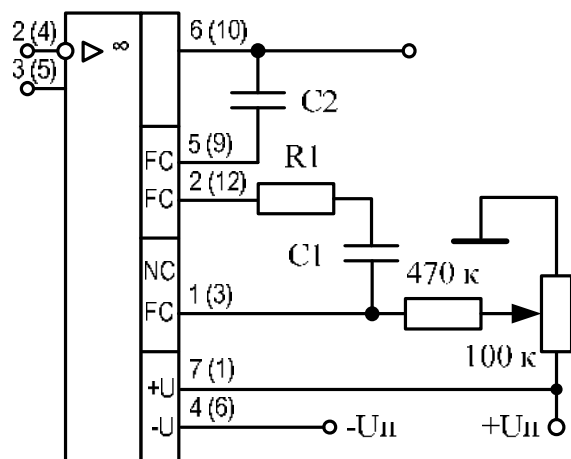
(для К1407УД3 и К1407УД4)



К1408УД1
(КР1408УД2 см. КР140УД20)

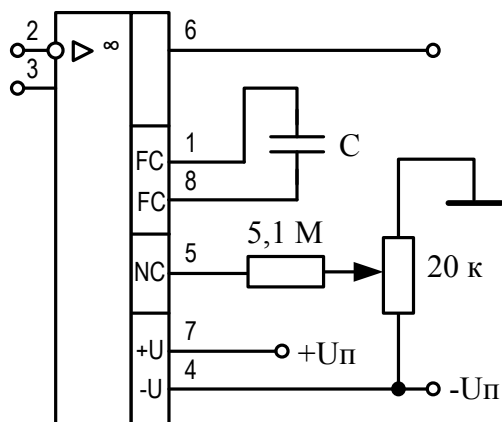


K153УД1, K153УД3



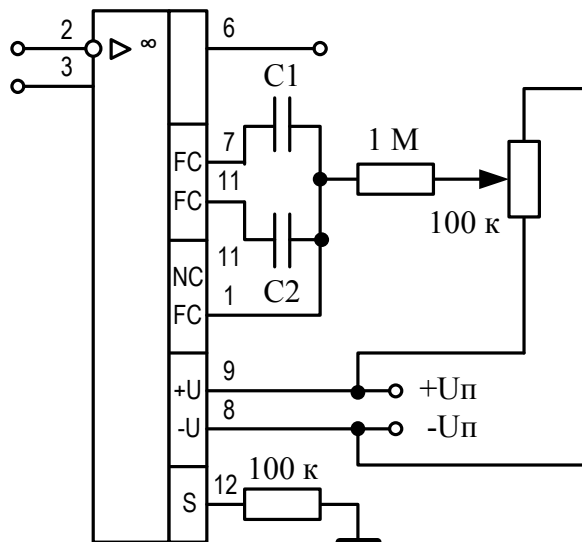
Кос	R1, кОм	C1, нФ	C2, пФ
1	1,5	5,1	200
10	1,5	0,51	20
100	1,5	0,11	3
1000	0	0,11	3

K153УД2, K153УД6



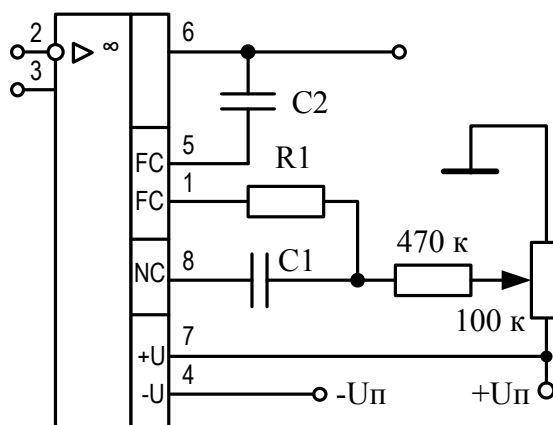
Кос	C, пФ
1	30
10	5
100	3

K153УД4



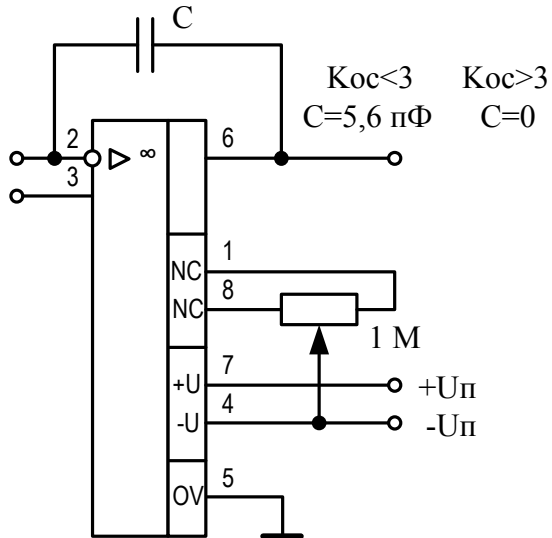
$1 < K_{oc} < 10$	$K_{oc} > 10$
$C1 = 150 / K_{oc} \text{ пФ}$	$C1 = 15 \text{ пФ}$
$C2 = C1 / 3 \text{ пФ}$	$C2 = 5,1 \text{ пФ}$

K153УД5

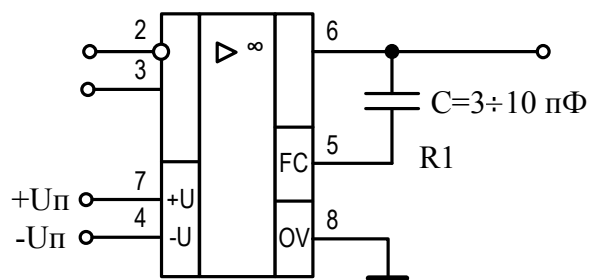


Кос	R1, кОм	C1, пФ	C2, пФ
1	1,5	5100	200
10	1,5	510	20
100	0	10	3

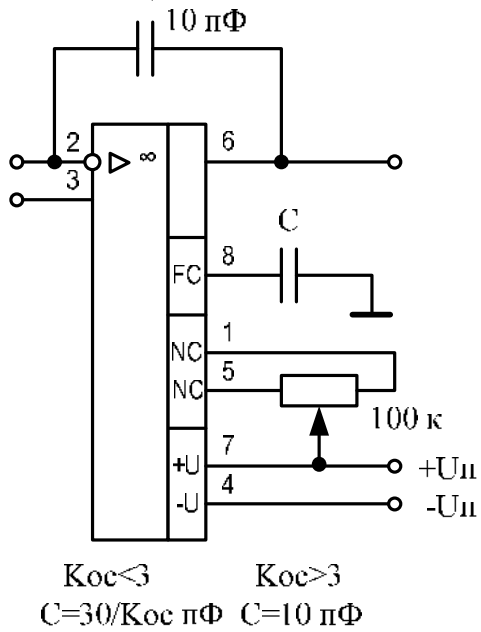
K154YД1



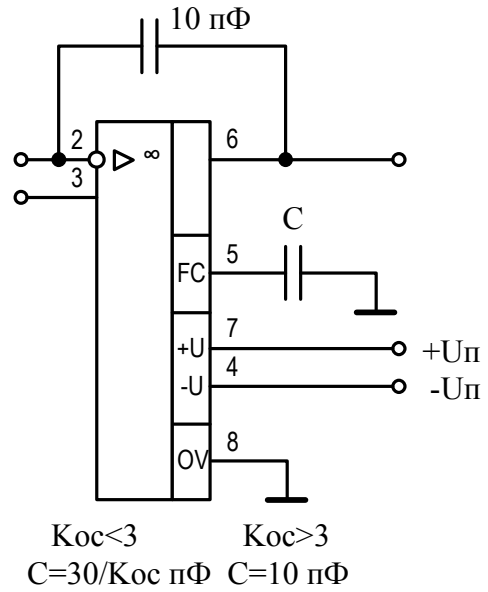
K154YД2



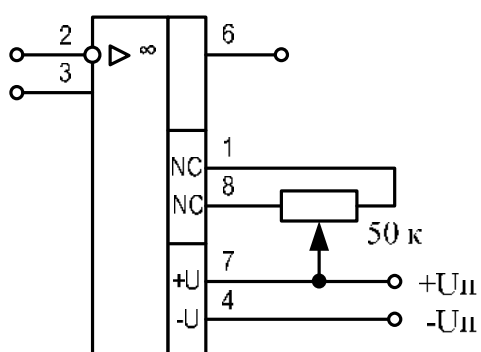
K154YД3



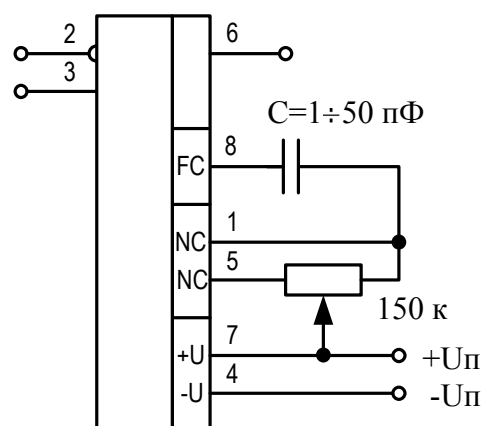
K154YД4



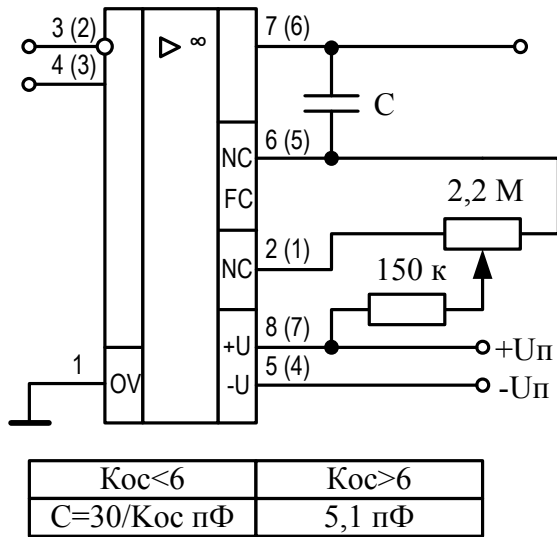
K544YД1



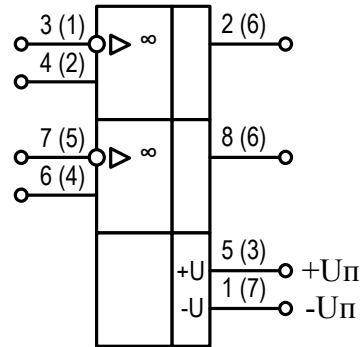
K544YД2



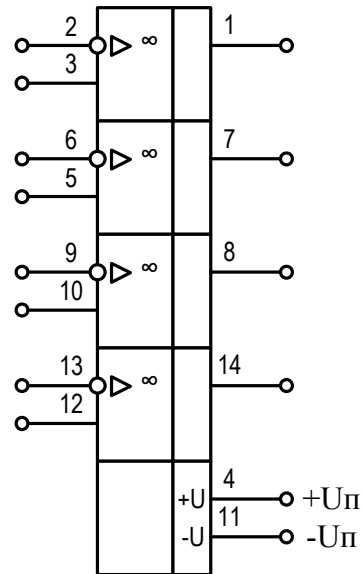
K574УД1, (KP574УД1)



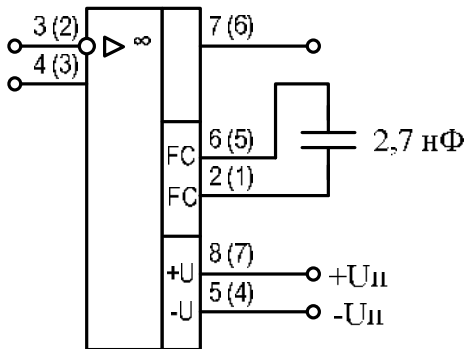
K574УД2, (KP574УД2)



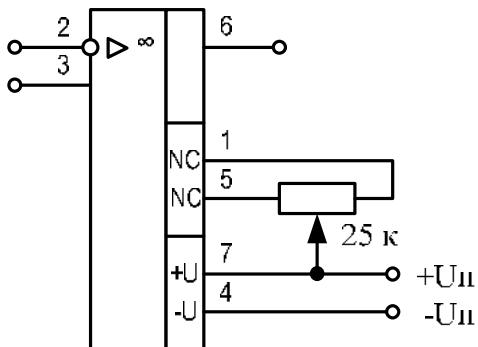
LF147, LM124



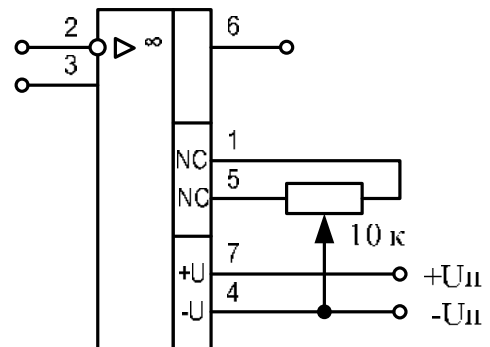
K574УД3, (KP574УД3)

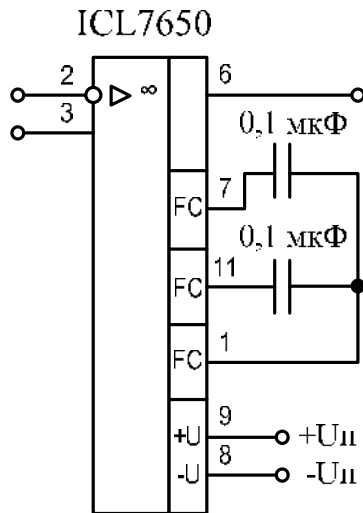


LF155



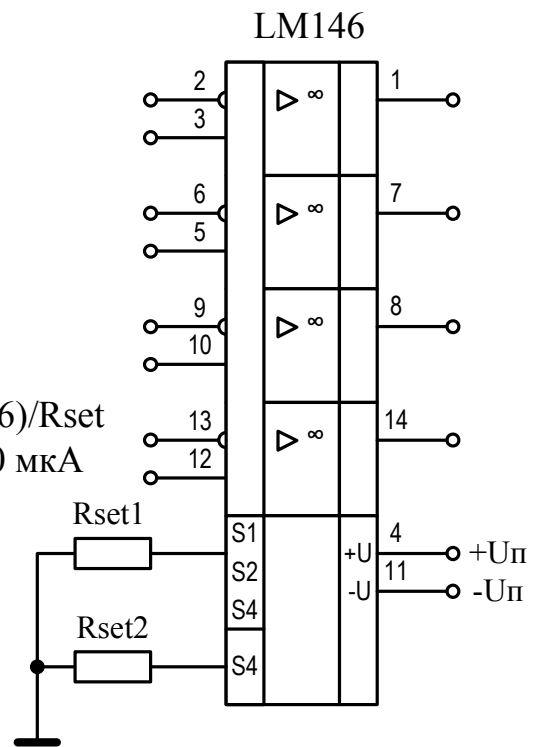
LF441



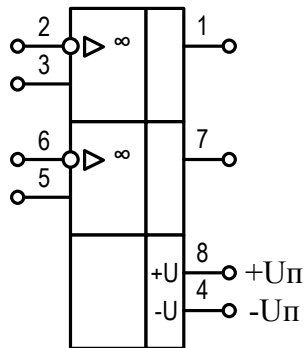
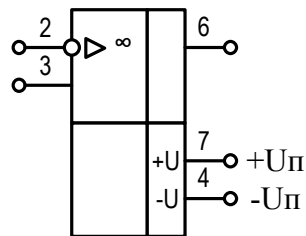
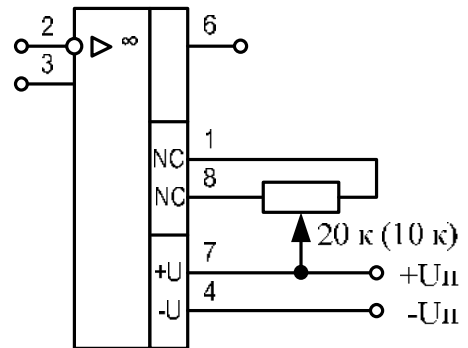


$$I_{set} = (2U_{П} - 0,6) / R_{set}$$

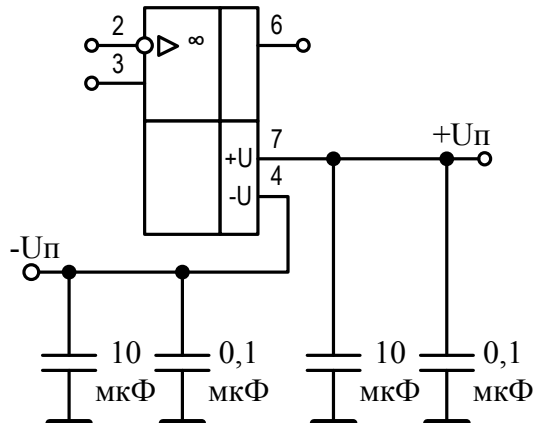
$$I_{set} = 0,1 \div 40 \text{ мкА}$$



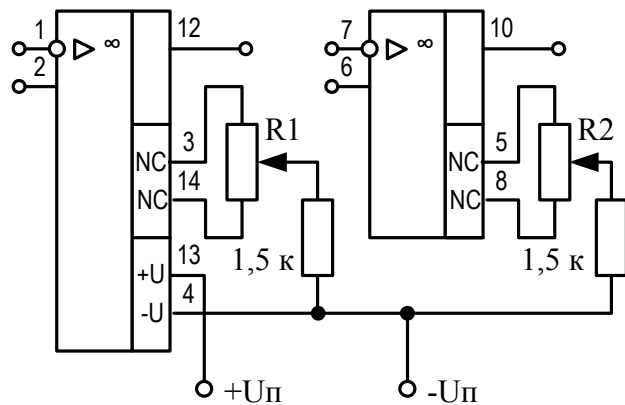
LM358, LM392

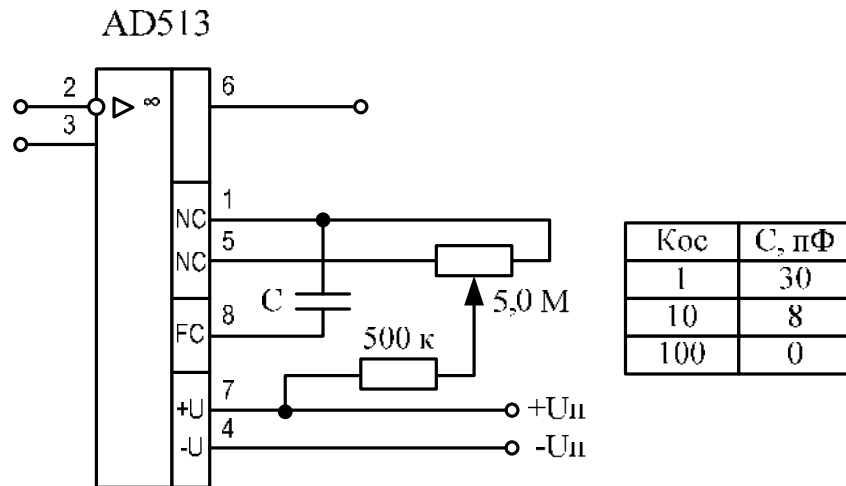
LMC6001,
OPA641MAX400, OPA177,
(MAX437)

AD8055



TL083





Номенклатура отечественных и зарубежных ОУ, которые могут использоваться в курсовой работе, не ограничивается типами, приведенными выше. Можно использовать любые подходящие по техническим характеристикам ОУ найденные в справочной литературе или в Интернете.

В случае применения типов ОУ, отличных от приведенных в таблице 4.1, следует приводить в пояснительной записке их основные технические характеристики и паспортную схему включения.

Учебное издание

Лурье Михаил Семенович,

Лурье Ольга Михайловна

Фролов Александр Сергеевич

Электротехника и электроника
Промышленная электроника.
Учебное пособие

Отв. редактор проф. М.С. Лурье
Редактор РИЦ Т.А. Полуэктова
Подписано в печать

Формат 60х84 1/16.
Тираж 300 экз.

Изд. № 2/11
Уч. изд. л. 26,0

Заказ №
Редакционно-издательский центр СибГТУ
660049, Красноярск, пр. Мира, 85.
Телефон (391) 227-69-90
Факс (391) 211-97-25

- 1 Хорвиц, П. Искусство схемотехники [Текст] / П. Хорвиц, У. Хилл, Т.1.5. - М.: Мир, 1985. – 598 с., 590 с.
- 2 Титце, У. Полупроводниковая схемотехника [Текст] / Ульрих Титце, Кристоф Шенк Т.1. Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 832 с. – Т.2 – 942 с.
- 3 Титце, У. Полупроводниковая схемотехника [Текст] / Ульрих Титце, Кристоф Шенк Т.5. Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 942 с.