

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Владимирский государственный университет
Кафедра приборостроения
и информационно-измерительных технологий

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА БАЗЕ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Методические указания к курсовой работе по дисциплине
«Электроника и микропроцессорная техника»

Составитель
Ю.С. КЛИМЕНКОВ

Владимир 2010

УДК 621.375
ББК 32.842-5
П79

Рецензент

Доктор технических наук, профессор кафедры
радиотехники и радиосистем
Владимирского государственного университета
А.Г. Самойлов

Печатается по решению редакционного совета
Владимирского государственного университета

Проектирование измерительных устройств на базе опера-
П79 ционных усилителей : метод. указания к курсовой работе по
дисциплине «Электроника и микропроцессорная техника» /
Владим. гос. ун-т ; сост. Ю.С. Клименков. – Владимир : Изд-во
Владим. гос. ун-та, 2010. – 80 с.

Приведены методические указания к курсовой работе по проектированию измерительных устройств на базе операционных усилителей по дисциплине «Электроника и микропроцессорная техника». Изложены основные теоретические сведения о компонентах электронных схем. Приведены примеры расчёта и построения электрических принципиальных схем, оформления конструкторской документации на печатные платы и сборочные чертежи. В методических указаниях рассматривается пример выполнения моделирования электрических схем в программной среде Electronic Workbench (Multisim).

Предназначены для студентов 4-го курса дневного отделения, обучающихся по специальностям 200101 – приборостроение и 200106 – информационная техника и технологии.

Табл. 4. Ил. 31. Библиогр.: 7 назв.

УДК 621.375
ББК 32.842-5

ВВЕДЕНИЕ

Данные методические указания посвящены проектированию измерительного устройства на базе операционных усилителей. С использованием материалов данной методички студенту предлагается самостоятельно спроектировать устройство, в состав которого войдут датчик (предлагается преподавателем в соответствии с вариантом задания), операционные усилители, включённые по дифференциальной схеме, компаратор, простейший сигнализатор (светодиод) и линейный источник питания схемы.

Методические указания состоят из шести разделов. В первом разделе студенту даются общие положения об организации курсовой работы. Во втором разделе приводятся основные теоретические сведения о входящих в измерительное устройство компонентах (операционный усилитель, компаратор и т. д.), примеры схемотехнического построения измерительных цепей и основные расчётные формулы. Третий раздел посвящается разработке электрической принципиальной схемы проектируемого устройства, даны общие требования к выполнению указанных схем, приведены примеры их расчёта и построения. В рамках данного раздела приводится пошаговый расчёт линейного источника питания, приведены все необходимые формулы, таблицы и графики, обеспечивающие расчётный процесс. В четвертом и пятом разделе представлены сведения, необходимые для разработки и графического оформления конструкторской документации на печатные платы и сборочный чертеж проектируемого измерительного устройства. И наконец, в заключительном шестом разделе описывается порядок проектирования и тестирования электрических схем с применением программного обеспечения Electronic Workbench (Multisim). Представлены скриншоты собранного дифференциального усилителя и показания виртуального осциллографа. Студенту предлагается провести сравнительный анализ результатов моделирования с результатами теоретических расчётов. Прил. А – В содержат варианты задания, примеры выполнения конструкторской документации и основные справочные данные электронных компонентов.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Курсовая работа является самостоятельной задачей, при выполнении которой студент приобретает навыки расчетно-конструкторской деятельности и закрепляет знания, полученные при изучении теоретических курсов.

1.1. Организация курсовой работы

Курсовая работа выполняется студентом на кафедре под руководством одного из преподавателей. Темы работы должны соответствовать программам изучаемых дисциплин. Сроки выдачи и защиты курсовых работ устанавливаются на основании графика учебного процесса и указываются в задании. Задание на курсовую работу и график выполнения утверждается заведующим кафедрой.

Текущий контроль над ходом курсовой работы осуществляется преподавателем периодически в течение всего срока согласно графику.

Защита курсовой работы осуществляется в конце семестра на комиссии, утвержденной заведующим кафедрой и состоящей из двух преподавателей кафедры.

1.2. Тематика курсовых работ

Тематика определяется в соответствии с программой курса и зависит от профиля специализации. Содержание и тема работы должны соответствовать современному уровню техники и отражать перспективные направления ее развития. Курсовая работа может иметь следующие направления: конструкторское, технологическое или исследовательское.

Конструкторское направление – разработка конструкции законченных изделий или сборочных единиц, проведение необходимых конструкторских расчетов (кинематических, прочностных, точностных и т. д.), разработка сборочных чертежей проектируемых изделий и рабочих чертежей деталей, входящих в состав изделия.

Технологическое направление – разработка технологических процессов изготовления оригинальных деталей, печатных плат, технологии сборки механизмов, узлов и всего изделия, разработка нового технологического оборудования и оснастки.

Исследовательское направление – проведение теоретических и экспериментальных исследований, составление и отладка программ на ЭВМ, разработка методик экспериментальных исследований.

1.3. Объем и содержание курсовой работы

Объем курсовой работы должен быть определен к моменту выдачи задания студенту и определяется исходя из имеющегося в данном семестре времени для самостоятельной работы.

Курсовая работа состоит из пояснительной записки и графического материала.

Записка содержит 20-30 страниц рукописного или печатного текста и включает:

1. титульный лист;
2. задание на курсовую работу на бланке установленного образца;
3. содержание;
4. введение;
5. основную текстовую часть пояснительной записки, включающую
 - а) расчёт измерительной цепи с ОУ и компаратором;
 - б) расчёт источника питания;
 - в) обоснование выбора элементной базы;
 - г) результаты моделирования разрабатываемого устройства в программной среде Multisim;
6. заключение;
7. список использованной литературы;
8. приложения.

Графический материал работы должен включать 3-4 листа определенного формата, где будут представлены:

– электрические принципиальные схемы разрабатываемого изделия с перечнем элементной базы, выполненные в соответствии с требованиями ГОСТ и ЕСКД;

– конструкторская документация на печатные платы в соответствии с требованиями ГОСТ 2.109-73, ГОСТ 2.417-68 и действующими нормативно-техническими документами;

– графики, диаграммы, алгоритмы и расчетные формулы, отражающие результаты экспериментальных или теоретических исследований того или иного процесса, а также скриншоты процесса моделирования в программной среде Electronic Workbench (Multisim).

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1. Общие сведения об операционных усилителях

Операционным усилителем (ОУ) называется усилитель электрических сигналов, предназначенный для выполнения различных математических операций в аналоговых вычислительных машинах над аналоговыми величинами при работе в схеме с отрицательной обратной связью (ООС). Своим названием ОУ обязан использованию его первоначально в устройствах аналоговой техники. В дальнейшем область применения ОУ значительно расширилась. С появлением интегральных ОУ они начали широко использоваться в устройствах усиления, генерирования, фильтрации, модулирования и демодулирования сигналов и многих других устройствах.

Первый ламповый ОУ К2W был разработан в 1942 году Л. Джулли (США). Он содержал два двойных электровакуумных триода. Первые ОУ представляли собой громоздкие и дорогие устройства. С заменой ламп транзисторами операционные усилители стали меньше, дешевле, надежнее, и сфера их применения расширилась. Первые операционные усилители на транзисторах появились в продаже в 1959 году. Р. Малтер (США) разработал ОУ Р2, включавший семь германиевых транзисторов и варикапный мостик. Требования к увеличению надежности, улучшению характеристик, снижению стоимости и размеров способствовали развитию интегральных микросхем, которые были изобретены в лаборатории фирмы Texas Instruments (США) в 1958 г. Первый интегральный ОУ $\mu A702$, имевший рыночный успех, был разработан Р. Уидларом (США) в 1963 году. В настоящее время номенклатура ОУ насчитывает сотни наименований. Операционные усилители выпускаются в малогабаритных корпусах и очень дешевы, что способствует их массовому распространению.

Статические и динамические свойства ОУ характеризуются совокупностью электрических параметров и характеристик. В этой совокупности можно выделить несколько сходных по смысловому содержанию групп параметров. Первая группа отражает выходное напряжение покоя и его нестабильность, приведенные к входу ОУ, и включает напряжение смещения ($U_{см}$), средний входной ток ($I_{вх}$) и разность

входных токов (ΔI_{ex}), а также коэффициенты влияния на эти параметры изменения температуры, времени и нестабильности напряжений источников питания. Вторая группа характеризует усилительные свойства ОУ для дифференциального и синфазного входных напряжений в режиме «малого сигнала» и имитансные свойства и содержит коэффициент усиления по напряжению (K_y), коэффициент ослабления синфазных входных напряжений ($K_{сф}$), входные сопротивления для дифференциального и синфазного входных напряжений (r_{ex} , $r_{сф}$), а также частотные и переходные характеристики ОУ. В третью группу можно объединить параметры, отражающие поведение ОУ в режиме «большого сигнала». К ним относятся скорость нарастания выходного напряжения (V), граничная частота (f_{gp}) и частота единичного усиления ($f_{ед}$). Четвертая группа параметров характеризует шумовые свойства ОУ и включает нормированные ЭДС и токи шума.

Большинство современных ОУ имеют встроенную защиту выхода от короткого замыкания и защиту входа от опасных синфазных и дифференциальных напряжений. Некоторые ОУ выпускают со встроенной частотной коррекцией, что не требует дополнительных элементов для обеспечения устойчивости ОУ в схемах с ООС.

Параметры ОУ. Параметры ОУ, характеризующие его качество, весьма многочисленны и основные из них приведены ниже. Параметры ОУ можно разделить на несколько групп.

Входные параметры, определяемые свойствами входного дифференциального каскада

Напряжение смещения ($U_{см}$) – напряжение, которое необходимо приложить между входами ОУ для получения нуля на выходе ОУ.

Средний входной ток (I_{ex}) – среднее арифметическое значение входных токов, измеренных при таком входном напряжении, при котором выходное напряжение ОУ равно нулю.

Разность входных токов (ΔI_{ex}) – абсолютное значение разности токов двух входов усилителя, измеренных тогда, когда напряжение на выходе ОУ равно нулю.

Температурный дрейф входного тока ($\Delta I_{ex} / \Delta T$) – коэффициент, равный отношению максимального изменения входного тока ОУ к вызвавшему его изменению окружающей температуры.

Температурный дрейф входных токов приводит к дополнительной погрешности.

Значения температурных коэффициентов входного тока и разности входных токов ОУ приводятся в справочных данных усреднёнными в определенном температурном диапазоне.

Так как входные токи ОУ являются базовыми токами входных транзисторов, то их значение и дрейф зависят также от коэффициента усиления транзистора по току β_T . Учитывая, что временной дрейф β_T транзистора сравнительно велик, то и значение временного дрейфа входных токов ОУ сравнительно велико.

Входное сопротивление ($R_{вх}$) – сопротивление одного из входов ОУ, в то время как другой вход закорочен. Это сопротивление также называют входным сопротивлением для дифференциального сигнала.

Входное сопротивление для синфазного сигнала ($R_{сф}$) – величина, равная отношению приращения синфазного входного напряжения к приращению среднего входного тока ОУ ($R_{сф}$ обычно на 1-2 порядка больше $R_{вх}$).

Максимальное входное дифференциальное ($U_{вх.д.маx}$) и синфазное ($U_{вх.сф.маx}$) напряжения.

Передаточные параметры

Коэффициент усиления ($K_{УОУ}$) – отношение приращения значения выходного напряжения к вызвавшему его изменению дифференциального входного напряжения (сигнала).

Коэффициент ослабления синфазного сигнала ($K_{ос.сф}$) – отношение коэффициента усиления дифференциального сигнала $K_{УОУ}$ к коэффициенту усиления синфазного сигнала $K_{у.сф}$ ($K_{у.сф}$ определяется как отношение изменения выходного напряжения к вызвавшему его изменению синфазного входного сигнала). $K_{ос.сф}$ обычно выражается в децибелах, $K_{ос.сф}=20\lg(K_{УОУ}/K_{у.сф})$.

Частота единичного усиления ($f_{ед}$) – частота, на которой модуль коэффициента усиления ОУ равен единице. Частота единичного усиления при 100%-ной ООС с цепями коррекции частотной характеристики ОУ называется частотой среза ($f_{ср}$).

Выходные параметры, определяемые свойствами выходного каскада ОУ

Выходное сопротивление ($R_{вых}$) – отношение приращения выходного напряжения ОУ к вызвавшей его активной составляющей выходного постоянного или переменного тока.

Максимальный выходной ток ($I_{max.вых}$) – предельная амплитуда выходного тока, который может быть дан в нагрузку.

Максимальная мощность рассеивания (P_{max}) – максимально допустимая мощность, которая может быть рассеяна ОУ при наличии входного напряжения и подключенной нагрузке.

Максимальное выходное напряжение ($U_{вых.max}$) в диапазоне линейного усиления. Для большинства типов ОУ величина $U_{вых.max}=10$ В.

Переходные параметры

Граничная частота ($f_{гр}$) – максимальная частота синусоидального сигнала, при которой сохраняется гарантированный эффективный диапазон синусоидального выходного напряжения ОУ.

Максимальная скорость нарастания выходного напряжения ($V_{U_{вых}}$) – наибольшая скорость изменения выходного напряжения ОУ при подаче на его вход импульса прямоугольной формы максимальной допустимой амплитуды.

Время восстановления выходного напряжения – время с момента снятия входного напряжения до момента, при котором $U_{вых}=0.1U_{нас}$, где $U_{нас}$ – напряжение насыщения ОУ.

Время установления выходного напряжения – время, в течение которого выходное напряжение ОУ изменяется от уровня 0.1 до уровня 0.9 от установившегося значения при апериодическом процессе и при воздействии на вход импульса напряжения прямоугольной формы.

Параметры цепи питания

Коэффициент влияния нестабильности источника питания (K_n) – отношение изменения напряжения смещения к вызвавшему его изменению одного из питающих напряжений ΔE_n .

Напряжение цепи питания ($\pm E_n$).

Потребляемый ток ($I_{ном}$).

Шумовые характеристики ОУ. Эквивалентная схема ОУ с шумовыми источниками напряжения и тока показана на рис. 2.1. Напряжение шума включает в себя три некоррелированные составляющие:

$U_{ш1}$ – составляющую, обусловленную тепловым шумом (белый шум), $U_{ш2}$ – составляющую, обусловленную диффузией неосновных носителей, $U_{ш3}$ – составляющую, вызванную поверхностными явлениями в полупроводнике (фликкер-шум или розовый шум):

$$U_{ш} = \sqrt{U_1^2 + U_{ш2}^2 + U_{ш3}^2}$$

Значение шумового тока зависит от входного тока и полосы пропускания ОУ: $i_{ш} = \sqrt{2 \cdot q \cdot i_{ex} \cdot \Delta f}$, где q – заряд электрона.

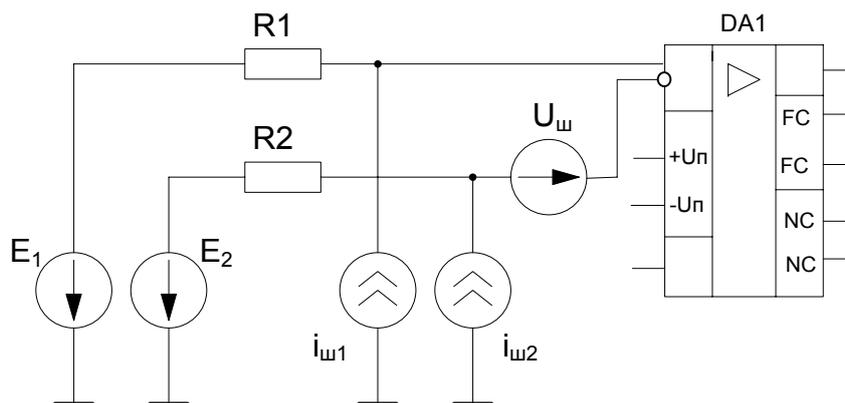


Рис. 2.1. Эквивалентная схема ОУ с шумовыми источниками

Операционные усилители, выполняемые в виде монолитных ИМС, можно классифицировать следующим образом.

1. По типу транзисторов, используемых во входных каскадах:
 - ОУ на биполярных транзисторах, имеющие малое напряжение смещения нуля, но значительные входные токи и сравнительно невысокое входное сопротивление ($\sim 10^6$ Ом);
 - ОУ с полевыми транзисторами на входе, в которых достигаются высокое входное сопротивление ($\sim 10^9 \div 10^{12}$ Ом) и малые входные токи, но возрастает напряжение смещения нуля.
2. По выходной мощности:
 - стандартные ОУ, которые отдают в нагрузку с сопротивлением $R_{н} \geq 2$ кОм номинальную выходную мощность ~ 50 мВт;
 - мощные ОУ с выходной мощностью от единиц до нескольких десятков ватт;
 - микромощные ОУ, в которых мощность, потребляемая в режиме покоя, очень мала ($\sim 10^{-6}$ Вт).

3. По области применения:

– ОУ общего применения, характеризующиеся низкой стоимостью, малыми размерами, широким диапазоном напряжения питания, защищенным входом и выходом, не очень высокой частотой;

– специальные ОУ, которые, в свою очередь, разделяются на прецизионные, измерительные, электрометрические ОУ и т. п.

Характеристики ОУ. Операционные усилители характеризуются высоким коэффициентом усиления, большим входным и малым выходным сопротивлениями, а также низким уровнем шума при хорошей температурной стабильности. ОУ способен устойчиво работать при замкнутой цепи обратной связи.

Входной каскад операционного усилителя выполняется в виде дифференциального усилителя, поэтому он имеет два входа и реагирует только на разность приложенных напряжений, т. е. на дифференциальный сигнал.

По габаритным размерам и стоимости ОУ мало отличаются от отдельно взятого транзистора. Реализация различных устройств с применением ОУ значительно проще, чем на отдельных транзисторах, одновременно получается выигрыш в габаритах и массе.

Согласно ГОСТ 2.759-82 (СТ СЭВ 3336-81) обозначения элементов аналоговой техники, к числу которых относится и ОУ, выполняют на основе прямоугольника (рис. 2.2). Он может содержать основное и одно или два дополнительных поля, расположенных по обе стороны от основного. На схемах усилитель обычно обозначается треугольником на основном поле. Справа от него указывают коэффициент усиления. Если конкретное значение коэффициента усиления несущественно, его допускается не указывать (можно также выносить знак бесконечности ∞).

Выводы ОУ делятся на входные, выходные и выводы, не несущие функциональной нагрузки, к которым подключаются цепи напряжения питания и элементы, обеспечивающие нормальную работу ОУ. Входы показывают слева, выход – справа.

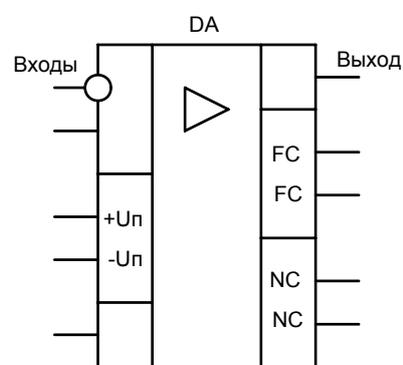


Рис. 2.2. Графическое обозначение ОУ

Большинство ОУ имеют один несимметричный выход и два входа, симметричных по отношению к общему проводу. Прямые входы и выходы обозначают линиями, присоединенными к контуру графического изображения ОУ без каких-либо знаков, а с кружками в месте присоединения – инверсные входы и выходы. Прямой вход еще называют неинвертирующим, так как фаза выходного сигнала совпадает с фазой сигнала, поданного на его вход. Другой вход называют инвертирующим, так как фаза выходного сигнала сдвинута на 180° относительно входного сигнала (на средних частотах и при чисто активной нагрузке). Поэтому входы оказывают на выходное напряжение равное в количественном отношении, но противоположное по знаку, влияние. Если к входам приложены синфазные, действующие одновременно, одинаковые по величине и фазе относительно общего провода сигналы, то их влияние будет взаимно скомпенсировано и выход будет иметь нулевой потенциал. Благодаря этому параметру, ОУ мало чувствительны к изменениям напряжения питания, температуры и других внешних факторов. Напряжение на выходе ОУ должно быть лишь в том случае, когда на его входах действуют различные по уровню и фазе сигналы. Выходное напряжение пропорционально разности уровней входных сигналов, называемой дифференциальным сигналом. Выходное напряжение ОУ измеряется относительно общего провода.

Чтобы обеспечить возможность работы ОУ как с положительными, так и отрицательными входными сигналами, требуется двухполярное питающее напряжение. При двухполярном питании постоянное напряжение на несимметричном выходе отсутствует при условии, что постоянных напряжений на входе ОУ нет.

Наличие рассмотренных выводов необходимо для функционирования ОУ. К вспомогательным относятся: выводы с метками FC – для подсоединения цепи, корректирующей АЧХ ОУ, выводы NC – для подключения элементов балансировки по постоянному току (установки нуля на выходе при $U_1 = U_2 = 0$), а также вывод металлического корпуса (\perp) для соединения с общим проводом устройства, в которое входит ОУ.

Для большей наглядности схем допускается упрощенное обозначение ОУ, в котором сохраняется лишь основное поле и сигнальные выводы (рис. 2.3). Общий провод также может быть не показан.

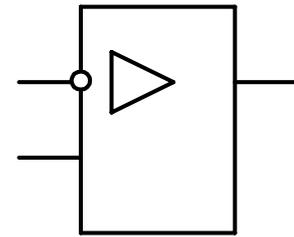


Рис. 2.3. Упрощенное обозначение ОУ

ОУ специально созданы для использования в схемах с глубокой отрицательной обратной связью (ООС) так, чтобы параметры устройств определялись преимущественно параметрами цепи ООС, а сам он был функционально незаметен. Такой ОУ по своим характеристикам должен приближаться к идеальному. С идеальным ОУ обычно связывают следующие свойства: бесконечно большой коэффициент усиления в бесконечно большой полосе пропускания, бесконечное входное и нулевое выходное сопротивление. Кроме того, усилитель не должен иметь статических ошибок, изменяющихся от температуры и времени.

Эти свойства даже теоретически полностью не могут быть достигнуты, так как большая часть из них требует бесконечной мощности выходного сигнала при малых геометрических размерах полупроводниковой структуры. Поэтому в каждом случае можно говорить лишь о доступной степени приближения к идеальным свойствам. Например, если коэффициент усиления устройства, определяемый цепью ОС, равен 10, то коэффициент усиления собственно операционного усилителя, т. е. без ОС, равен 10^5 , и с практической точки зрения достаточно близок к бесконечности. На рис. 2.4 приведена передаточная характеристика ОУ (1 — для прямого входа, 2 — для инверсного входа).

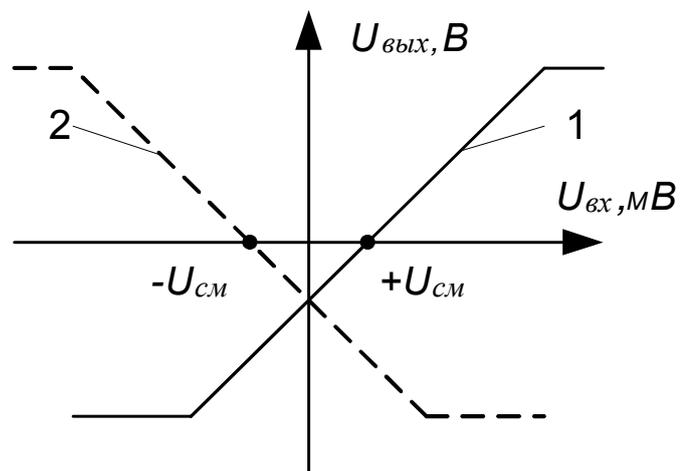


Рис. 2.4. Передаточная характеристика ОУ

Как и все электронные приборы, операционные усилители характеризуются своими параметрами — основными показателями, по которым выбирают тот или иной прибор для применения в реальной схеме.

2.2. Компенсация напряжения смещения ОУ

Практически напряжение смещения $U_{см}$ компенсируется либо балансировкой входного каскада ОУ (для этих целей в ОУ имеются специальные выводы), либо включением компенсирующего напряжения на один из входов ОУ. При изменении температуры появляется дополнительная составляющая напряжения смещения $\Delta U_{см} = \Delta T^\circ dU_{см}/dT^\circ$, где $dU_{см}/dT$ – коэффициент влияния температуры на $U_{см}$. Вследствие прогрева кристалла микросхемы или при быстром изменении температуры напряжение смещения может претерпевать значительные изменения. В зависимости от размеров кристалла переходной процесс в воздухе устанавливается в течение 1–500 мкс (при включении питания). Быстрое изменение нагрузки также приводит к неравномерному нагреву кристалла. Характер изменения $U_{см}$ во времени при включении питания (медленный прогрев) и скачкообразном изменении температуры или нагрузки показан на рис. 2.5.

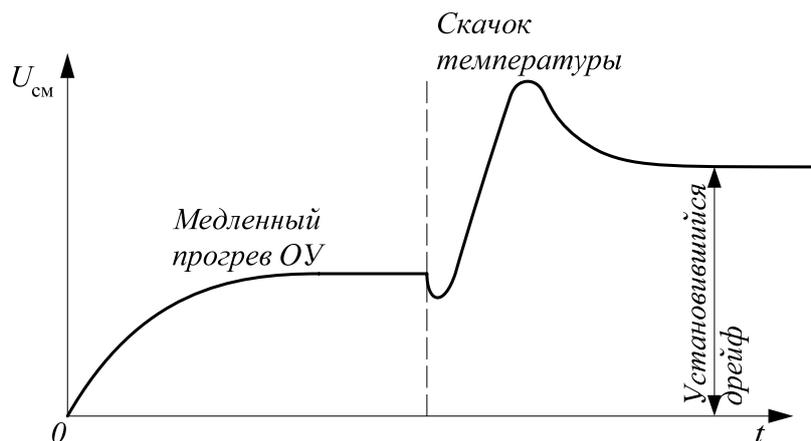


Рис. 2.5. Характер изменения $U_{см}$

Компенсация $U_{см}$ с помощью балансировки входного каскада ОУ приводит к дополнительной погрешности от температурного дрейфа. Так, если с помощью переменного резистора, подключенного к специальным выводам ОУ, сбалансирован первый (входной) каскад, то температурный дрейф напряжения смещения увеличится по сравнению с исходным температурным дрейфом примерно на величину $d(\Delta U_{см})/dT^\circ = \Delta U_{см}/300$, где $\Delta U_{см}$ – величина скомпенсированного напряжения смещения, мВ. Эта формула справедлива для дифференциальных входных каскадов ОУ, в эмиттерных цепях которых отсутст-

вуют резисторы. Если имеются такие резисторы, то этот температурный дрейф уменьшается пропорционально отношению полного сопротивления эмиттерной цепи к динамическому сопротивлению эмиттера. Для дифференциальных каскадов ОУ, построенных на полевых транзисторах, увеличение температурного дрейфа примерно такое же, как и для каскадов с биполярными транзисторами (примерно $3 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$), однако, напряжение смещения у ОУ с полевыми транзисторами обычно значительно больше.

Компенсация $U_{см}$ путем подключения на входе ОУ специальной цепи, формулирующей компенсирующее напряжение, не приводит к дополнительному росту температурного дрейфа. На рис. 2.6 а, б, в показаны типовые схемы цепей регулировки напряжения смещения нуля для инвертирующего, неинвертирующего и дифференциального усилителей соответственно. Регулировка напряжения смещения в этих схемах осуществляется введением на соответствующий вход ОУ компенсирующего напряжения.

Расчет компенсирующей цепи осуществляется, исходя из условия обеспечения на резисторе $R4$ напряжения несколько большего, чем $\pm U_{см}$, при этом $R4 > R3$. Потенциометр $R5$ ($5 - 10 \text{ кОм}$) подключается обычно к источникам питания ОУ. Сопротивления резисторов $R3$ в схемах рис. 2.6 б, в необходимо выбирать такой величины, чтобы при изменении $R5$ коэффициент передачи усилителей изменялся в пределах заданной погрешности.

Для компенсации температурного дрейфа напряжения смещения используется метод термокомпенсации, основанный на идентичности зависимостей температурного дрейфа биполярного ОУ и прямосмещённого р-п-перехода. На рис. 2.6, г показана термокомпенсирующая цепь, в которой напряжение на регулирующем потенциометре $R1$ формируется с помощью перехода база – эмиттер транзистора $V1$. Ток, протекающий через резистор $R2$, делится на ток через резистор $R3$ и ток через $V1$. Ток, протекающий через $R3$, создает напряжение управления транзистором. Если ток базы $V1$ много меньше тока через резистор $R3$, то ток коррекции смещения будет равен $U_{см}/R3$. Данная схема используется для ОУ, во входном дифференциальном каскаде

которого отсутствуют резисторы в эмиттерных цепях. Если такие резисторы имеются, то в эмиттерную цепь транзистора $V1$ необходимо включить резистор примерно такой же величины, как и в эмиттерных цепях входного каскада ОУ.

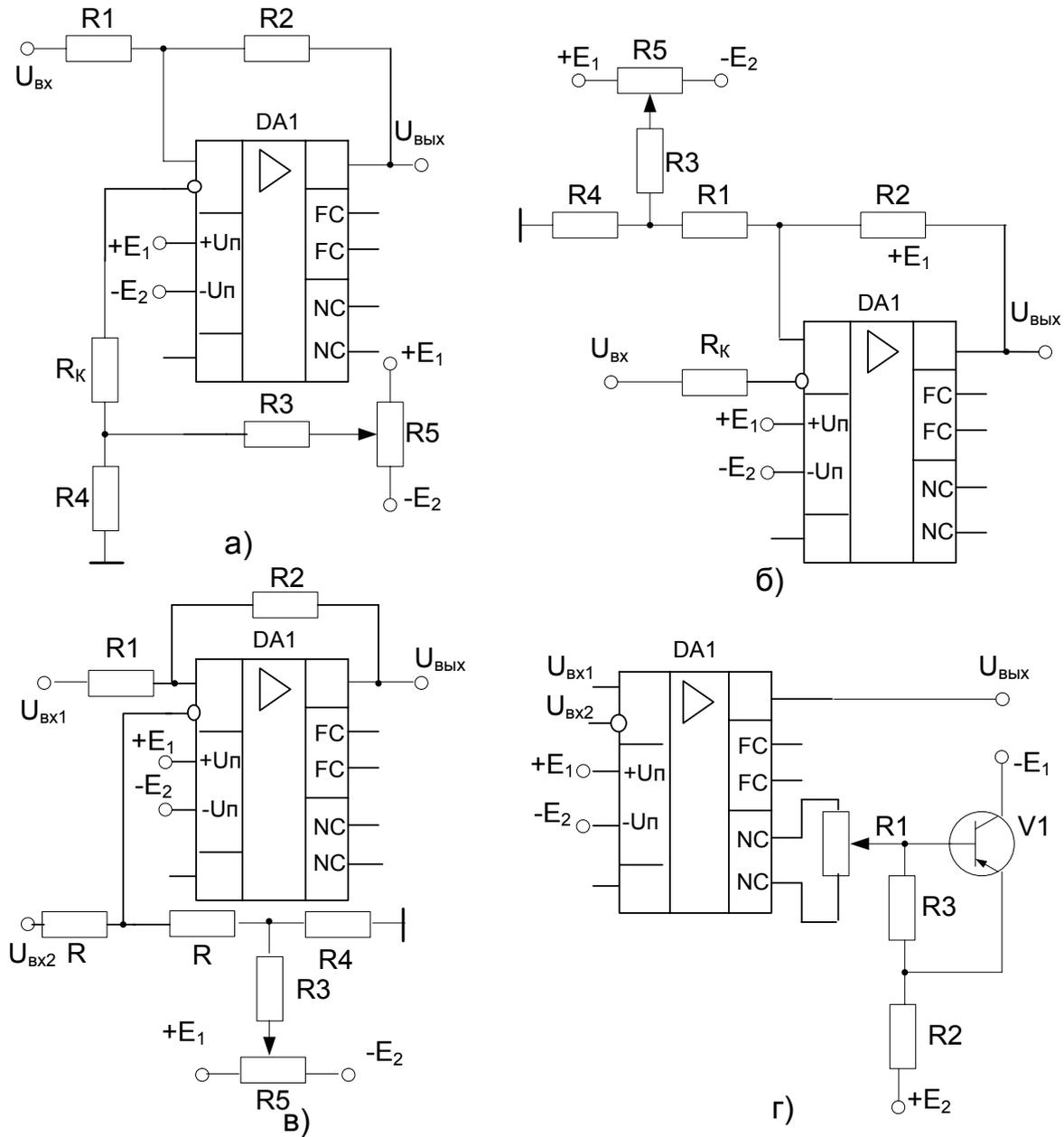


Рис. 2.6. Схемы регулировки смещения нуля инвертирующего (а), неинвертирующего (б), дифференциального (в) усилителей и ОУ, имеющего специальные выходы (г)

В высокоточных повторителях напряжения сдвиг можно осуществлять с помощью формирования напряжения в цепи ООС. Схема регулировки напряжения сдвига в повторителе напряжения показана на рис. 2.7. Напряжение компенсации в данной схеме регулируется с помощью потенциометра $R1$, питание которого осуществляется от стабилитронов $V1$, $V2$. Для повышения стабильности $V1$ и $V2$ запитаны от источников тока.

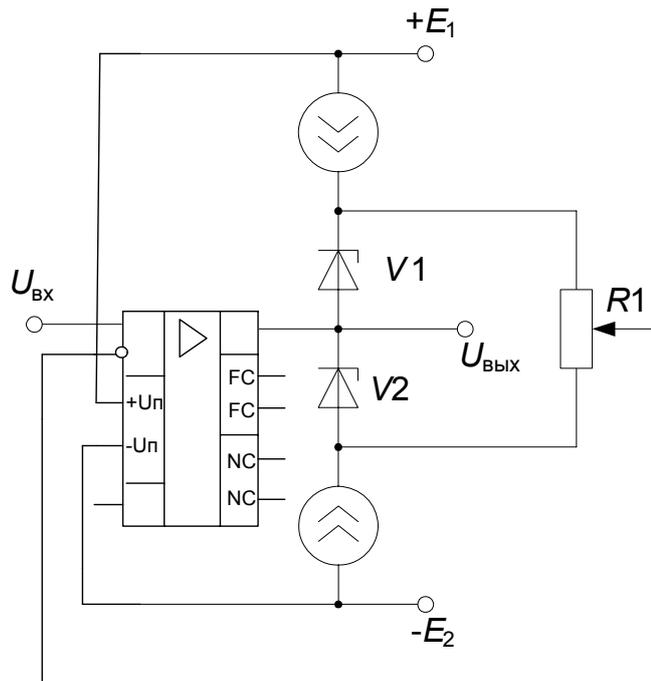


Рис.2.7. Схема регулировки напряжения сдвига нуля в повторителе напряжения

2.3. Устойчивость к самовозбуждению ОУ

Для инвертирующего усилителя (рис. 2.8, а) коэффициент передачи можно представить в следующем виде:

$$K_u(p) = \frac{1 - 1/\beta(p)}{1 + 1/K_y(p)\beta(p)},$$

где $\beta(p)$ – коэффициент передачи цепи ООС; $K_y(p)\beta(p)$ – петлевое усиление.

Коэффициент передачи неинвертирующего усилителя (рис. 2.8, б):

$$K_n(p) = \frac{1/\beta(p)}{1 + 1/K_y(p)\beta(p)}.$$

Для обеих схем усилителей условие самовозбуждения характеризуется балансом амплитуд и балансом фаз:

$$|K_y(p)| = |1/\beta(p)|, \quad \varphi_\alpha - \varphi_\beta \geq 180^\circ,$$

где φ_α – фазовый сдвиг, создаваемый ОУ; φ_β – фазовый сдвиг, создаваемый внешней цепью.

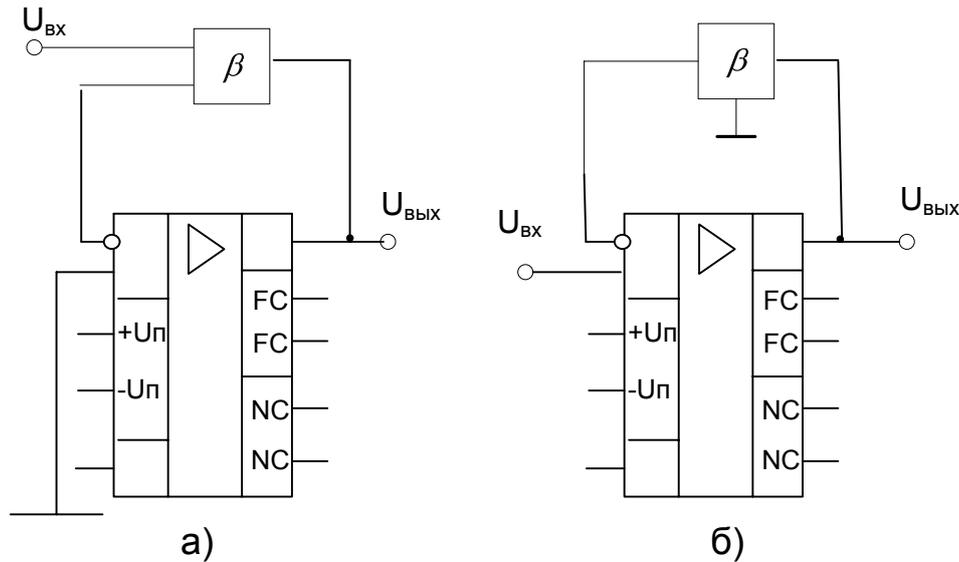


Рис. 2.8. Схемы инвертирующего (а) и неинвертирующего (б)

Рассмотрим устойчивость ОУ в замкнутой системе для случая $\varphi_{\beta} = 0$. Фазовый сдвиг φ_{α} определяется числом элементарных каскадов, входящих в усилительный тракт. Под элементарным каскадом будем понимать каскад, имеющий функцию передачи 1-го порядка

$$K_1(p) = K_{01}(1 + p/\omega_{1cp}),$$

где K_{01} – коэффициент передачи элементарного каскада на постоянном токе; ω_{1cp} – верхняя граничная частота полосы пропускания элементарного каскада (по уровню $0.7K_{01}$).

Схема ОУ, как правило, включает в себя два – три элементарных каскада. Функцию передачи такого ОУ можно представить в следующем виде:

$$K_y(p) = K_1(p)K_2(p)K_3(p) = \frac{K_{Oy}}{(1 + p/\omega_{1cp})(1 + p/\omega_{2cp})(1 + p/\omega_{3cp})},$$

где K_{Oy} – коэффициент передачи ОУ на постоянном токе.

Амплитудно-частотная (АЧХ) и фазочастотная (ФЧХ) характеристики элементарного каскада и трехкаскадного ОУ показаны на рис. 2.9. Для упрощения АЧХ и ФЧХ на данном рисунке аппроксимированы прямыми линиями, при этом погрешность аппроксимации АЧХ на частоте ω_{cp} не превышает 3 дБ, а погрешность ФЧХ на частотах $0.1\omega_{cp}$ и $10\omega_{cp}$ не превышает соответственно 5.7° и минус 5.7° .

Замкнутая система с ОУ устойчива, если наклон логарифмической АЧХ (ЛАЧХ) на частоте единичного усиления меньше – дБ/дек или – 12 дБ/окт (декада – десятикратное, октава – двукратное изменение частоты). Наклон ЛАЧХ двухкаскадного ОУ на любой частоте не превышает 40 дБ/дек, т. е. устойчивость такого ОУ обеспечивается во всем частотном диапазоне.

Максимальный наклон ЛАЧХ трехкаскадного ОУ равен 60 дБ/дек. Поэтому в данном случае необходимо сместить ЛАЧХ таким образом, чтобы участок, имеющий наклон 60 дБ/дек, оказался в области, где модуль коэффициента передачи меньше единицы. Это достигается расширением полосы пропускания двух элементарных каскадов (например, на рис. 2.9, б ω_{2cp} , ω_{3cp}) или сужением соответствующих полос пропускания.

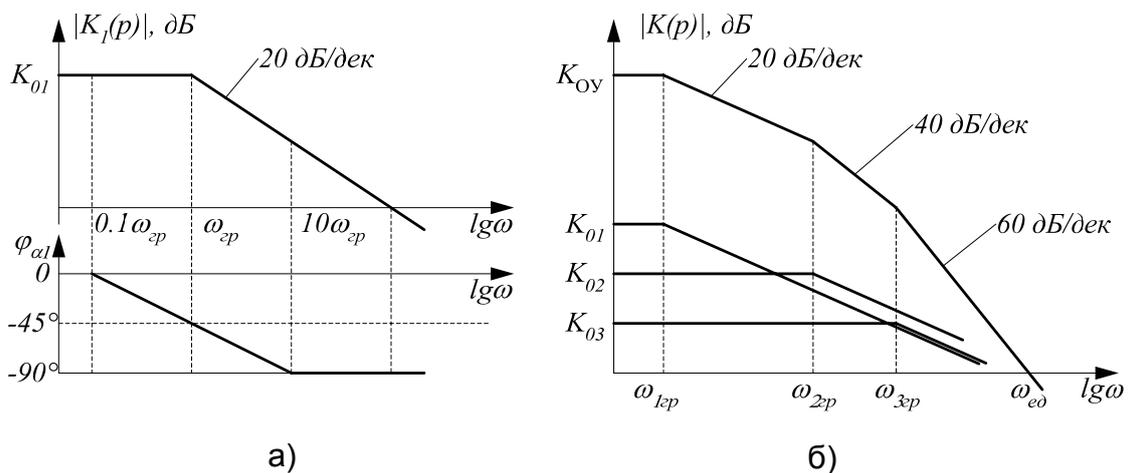


Рис. 2.9. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристика каскада 1-го порядка (а) и амплитудно-частотная характеристика трехкаскадного ОУ (б)

2.4. Общие сведения о компараторах

Компараторы занимают промежуточное положение между аналоговыми и цифровыми интегральными схемами и являются простейшими аналого-цифровыми преобразователями. Напряжение на выходе компараторов устанавливается равным напряжению логического нуля или логической единицы (лог.1) в зависимости от того превышает или нет входное напряжение опорное.

$$U_{\text{вых}} = \begin{cases} U_{\text{вых}}^1 & \text{при } U_{\text{вх}} - U_{\text{оп}} > 0 \\ U_{\text{вых}}^0 & \text{при } U_{\text{вх}} - U_{\text{оп}} < 0 \end{cases}$$

Неопределенность состояния выхода компаратора при нулевой разности входных сигналов нет необходимости уточнять, так как реальный компаратор всегда имеет либо конечный коэффициент усиления, либо петлю гистерезиса (рис. 2.10).

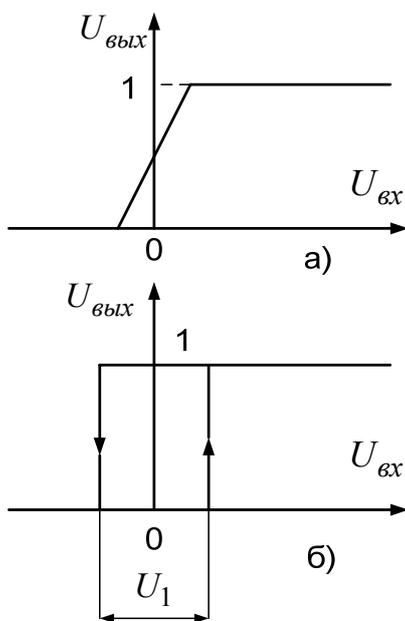


Рис. 2.10. Характеристики компараторов

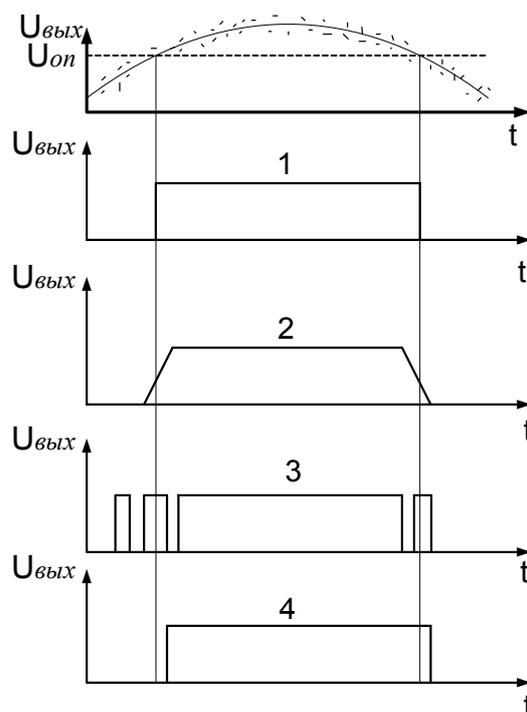


Рис. 2.11. Процессы переключения компараторов

Чтобы выходной сигнал компаратора изменился на конечную величину $|U_{\text{вых}}^1 - U_{\text{вых}}^0|$ при бесконечно малом изменении входного сигнала, компаратор должен иметь бесконечно большой коэффициент усиления (эюра 1 на рис. 2.11) при полном отсутствии шумов во входном сигнале. Такую характеристику можно имитировать двумя способами, или просто использовать усилитель с очень большим коэффициентом усиления, или ввести положительную обратную связь (регенераторные компараторы).

Рассмотрим первый путь. Как бы велико усиление не было, при $U_{\text{вх}}$ близком к нулю характеристика будет иметь вид рис. 2.10, а. Это приведет к двум неприятным последствиям. Прежде всего, при очень

медленном изменении $U_{вх}$ выходной сигнал также будет изменяться замедленно, что плохо отразится на работе последующих логических схем (эпюра 2 на рис. 2.11). Еще хуже то, что при таком медленном изменении $U_{вх}$ около нуля выход компаратора может многократно с большой частотой менять свое состояние под действием помех (так называемый "дребезг", эпюра 3). Это приведет к ложным срабатываниям в логических элементах и к огромным динамическим потерям в силовых ключах. Для устранения этого явления обычно вводят положительную обратную связь, которая обеспечивает переходной характеристике компаратора гистерезис (рис. 2.10, б). Наличие гистерезиса хотя и вызывает некоторую задержку в переключении компаратора (эпюра 4 на рис. 2.11), но существенно уменьшает или даже устраняет дребезг $U_{вых}$.

В качестве компаратора может быть использован операционный усилитель (ОУ) так, как это показано на рис. 2.12. Усилитель включен по схеме инвертирующего сумматора, однако, вместо резистора в цепи обратной связи включены параллельно стабилитрон $VD1$ и диод $VD2$.

Пусть $R1 = R2$.

Если $U_{вх} - U_{он} > 0$, то диод $VD2$ открыт и выходное напряжение схемы небольшое, отрицательное, равное падению напряжения на открытом диоде.

При $U_{вх} - U_{он} < 0$ на стабилитроне установится напряжение, равное его напряжению стабилизации $U_{ст}$. Это напряжение должно соответствовать единичному логическому уровню цифровых интегральных микросхем (ИМС), входы которых подключены к выходу компаратора. Таким образом, выход ОУ принимает два состояния, причем в обоих усилитель работает в линейном режиме. Многие типы ОУ не допускают сколько-нибудь существенное входное дифференциальное на-

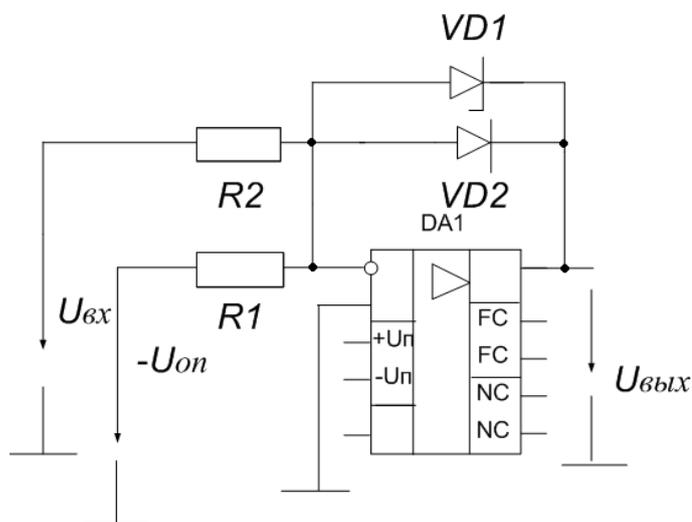


Рис. 2.12. Схема компаратора на ОУ

пряжение. Включение по схеме на рис. 2.12 обеспечивает работу ОУ в режиме компаратора практически с нулевыми дифференциальными и синфазными входными напряжениями. Недостатком данной схемы является относительно низкое быстродействие, обусловленное необходимостью частотной коррекции, так как ОУ работает в линейном режиме со 100%-ной обратной связью. Используя для построения компаратора обычные ОУ, трудно получить время переключения менее 1 мкс.

Компаратор, состояние выхода которого изменяется два раза при увеличении входного сигнала в некотором диапазоне, называют двухпороговым. Наиболее простыми и наиболее распространёнными являются мостовые двухпороговые компараторы (рис. 2.13). Диодный мост включён в цепь ОС усилителя.

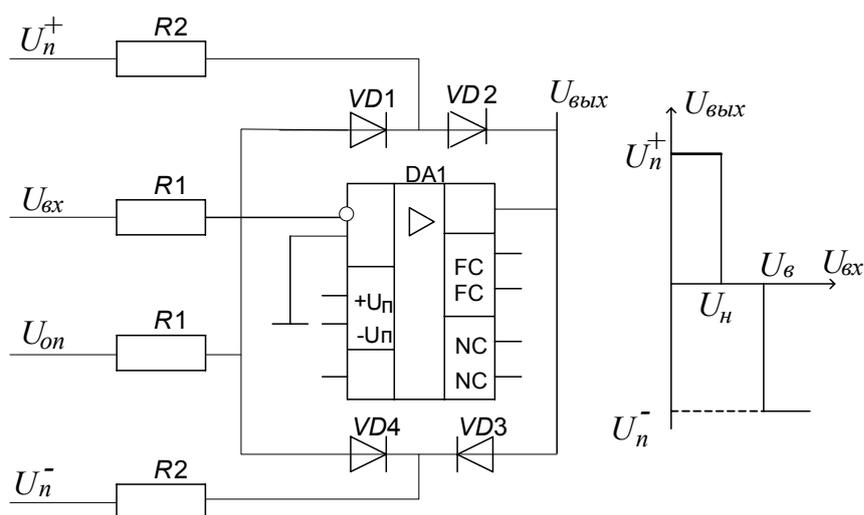


Рис. 2.13. Схема мостового двухпорогового компаратора

Формулы для напряжения верхнего $U_в$ и нижнего $U_н$ уровней имеют следующий вид:

$$U_в = \frac{R1}{R2}(U_н^+ - U_д) - U_{он}; \quad U_н = \frac{R1}{R2}(U_н^- + U_д) - U_{он}.$$

Интерес представляет схема двухпорогового компаратора на одном ОУ, представленная на рис. 2.14.

Ширина окна дискриминации может изменяться независимо от пороговых напряжений регулировкой соотношений сопротивлений резисторов.

Формулы для напряжения верхнего $U_в$ и нижнего $U_н$ уровней имеют следующий вид:

$$U_в = U_{см} + U_д \left(1 + \frac{R2}{R1} \right); U_н = U_{см} + U_д \left(1 + \frac{R1}{R2} \right),$$

где $U_д$ – напряжение диодов $VD1, VD2$; $U_{см}$ – напряжение стабилизатора $VD3$ соответственно.

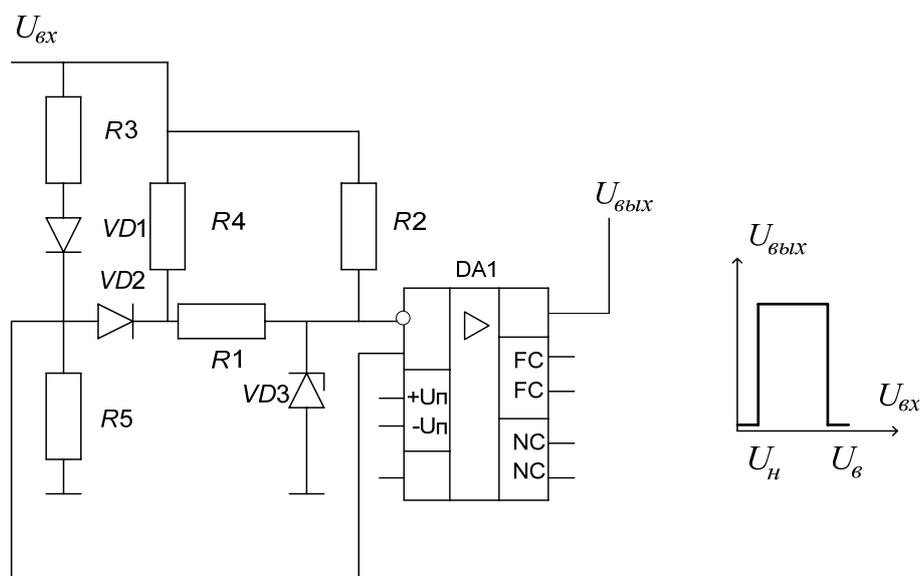


Рис. 2.14. Схема двухпорогового компаратора на одном ОУ

Параметры компараторов

Параметры, характеризующие качество компараторов, можно разделить на три группы: точностные, динамические и эксплуатационные.

Компаратор характеризуется теми же *точностными* параметрами, что и ОУ.

Основным *динамическим* параметром компаратора является время переключения $t_{п}$. Это промежуток времени от начала сравнения до момента, когда выходное напряжение компаратора достигает противоположного логического уровня. Время переключения измеряется при постоянном опорном напряжении, подаваемом на один из входов компаратора и скачке входного напряжения $U_{вх}$, подаваемого на другой вход.

2.5. Расчет схем с ОУ

При анализе схем на ОУ обычно принимают следующие упрощающие предположения (при $R_{вхОУ} = \infty$ и $K_{ОУ} = \infty$):

- 1) входы ОУ не потребляют тока;
- 2) напряжение между входами ОУ равно нулю.

Последнее предположение следует из того, что при $K_{ОУ} = \infty$ напряжение $U_{вых} = K_{ОУ}(U_1 - U_2)$ всегда конечно и по значению меньше напряжения питания $E_{П}$, что может иметь место только при $U_1 - U_2 = 0$. Здесь U_1, U_2 – напряжения на входах ОУ.

Инвертирующий усилитель. Инвертирующий усилитель (рис. 2.15) представляет собой ОУ, охваченный цепью параллельной отрицательной обратной связи по напряжению на резисторах R_{oc}, R_1 . Цепи частотной коррекции и установки нуля на рис. 2.15 не показаны.

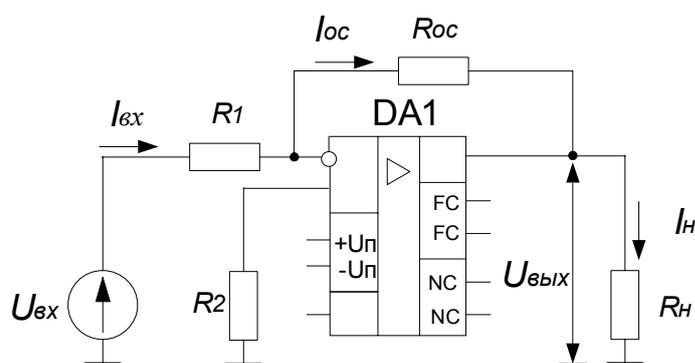


Рис. 2.15. Схема инвертирующего усилителя

Входной сигнал подан на инвертирующий вход. Неинвертирующий вход заземлен через резистор R_2 , сопротивление которого для снижения величины токового дрейфа выбирается так: $R_2 = R_{oc} \parallel R_1$.

Так как неинвертирующий вход ОУ заземлен и разность напряжений между входами равна нулю, то инвертирующий вход тоже имеет нулевой потенциал относительно земли. Поэтому $I_{вх} = U_{вх} / R_1$. Так как входы ОУ не потребляют тока, то $I_{oc} = I_{вх} = U_{вх} / R_1$. Выходное напряжение, т. е. напряжение на выходном выводе относительно общей шины, можно найти как падение напряжения от тока I_{oc} на резисторе R_{oc} , т. е. $U_{вых} = -R_{oc} I_{oc} = -U_{вх} R_{oc} / R_1$.

Отсюда коэффициент усиления инвертирующего усилителя:

$$K_{Uинв} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = -\frac{R_{oc}}{R_1}.$$

При заданной э.д.с. источника сигнала E_2 с внутренним сопротивлением $R_2 \neq 0$ формула выше принимает вид:

$$K_{U_{инв}} = \frac{U_{вых}}{E_2} = -\frac{R_{oc}}{R_2 + R_1}.$$

Ток выходной цепи ОУ, протекающий через резисторы R_H и R_{oc} , включенные параллельно для приращений тока:

$$I_{вых} = I_H + I_{oc} = \frac{U_{вых}}{R_H} + \frac{U_{вых}}{R_{oc}}.$$

Значение выходного тока большинства типов ОУ не должно превышать нескольких миллиампер.

Входное сопротивление инвертирующего усилителя при идеальном ОУ определяется сопротивлением резистора R_1 , т. е. $R_{вх.инв} = R_1$. Выходное сопротивление $R_{вых.инв} = 0$. В случае неидеального ОУ ($R_{вх.ОУ} \neq \infty, K_{УОУ} \neq \infty$) можно получить формулу:

$$K_{U_{инв}} = \frac{-R_{oc} / R_1}{1 + \frac{1}{K_{УОУ}} \left(1 + \frac{R_{oc}}{R_1} + \frac{R_{oc}}{R_{вхОУ}}\right)}.$$

Это выражение позволяет оценить погрешность величины $K_{U_{инв}}$ при установке в схему любого ОУ данного типа с учетом разброса значений $K_{УОУ}$ и $R_{вх.ОУ}$.

Погрешность определяется вторым членом в знаменателе выражения и уменьшается при увеличении $K_{УОУ}$ и $R_{вх.ОУ}$. Так как величина $K_{УОУ}$ уменьшается с ростом частоты, то погрешность $K_{U_{инв}}$ зависит от диапазона частот, в котором работает усилитель, и увеличивается в области высоких частот.

Входное сопротивление усилителя при неидеальном ОУ:

$$R_{вх.инв} = R_1 + \frac{R_{вхОУ} R_{oc}}{R_{вхОУ} (1 + K_{УОУ}) + R_{oc}}.$$

Выходное сопротивление усилителя в этом случае:

$$R_{вых.инв} = \frac{R_{выхОУ}}{F} = \frac{R_{выхОУ}}{K_{УОУ}} K_{U_{инв}},$$

где $F = K_{УОУ} / K_{U_{инв}}$ – глубина параллельной отрицательной обратной связи, охватывающей усилитель. Напряжение статической ошибки инвертирующего усилителя на ОУ определяется выражением:

$$U_{\text{вых.ош}} = U_{\text{см}} \left(1 + \frac{R_{\text{ос}}}{R_1}\right) + I_{\text{б01}} \left(1 + \frac{R_{\text{ос}}}{R_1}\right) R_2 - I_{\text{б02}} R_{\text{ос}}.$$

Если

$$R_2 (1 + R_{\text{ос}} / R_1) = R_{\text{ос}}, \text{ т. е. } R_2 = R_{\text{ос}} \parallel R_1,$$

то

$$U_{\text{вых.ош}} = U_{\text{см}} (1 + |K_{U_{\text{инв}}}|) + I_{\text{б0разн}} R_{\text{ос}}.$$

Напряжение ошибки, вызванное влиянием $U_{\text{см}}$ и входными токами ОУ, может быть скомпенсировано (приравнено к нулю) путем введения цепей компенсации ошибки (цепей установки нуля). Схемы установки нуля обычно приводятся изготовителями ОУ в справочных материалах.

Для уменьшения составляющей $U_{\text{вых.ош}}$, вызванной входными токами ОУ, следует выбирать схемы ОУ с полевыми транзисторами на входе и уменьшать номинал резистора $R_{\text{ос}}$, а следовательно, и R_1 . Обычно рекомендуют выбирать резистор R_1 из условия, чтобы падение напряжения на нем от среднего входного тока ОУ $I_{\text{б0ср}} = (I_{\text{б01}} + I_{\text{б02}}) / 2$ было на порядок меньше входного сигнала, т. е. $I_{\text{б0ср}} R_1 \leq 0,1 U_{\text{вх. min}}$.

Изменение напряжения ошибки с температурой представляет собой дрейф усилителя на ОУ. Дрейф выходного напряжения, вызванный изменением температуры на 1°C , можно найти с учетом выражения для $U_{\text{вых.ош}}$:

$$\frac{\Delta U_{\text{вых.ош}}}{\Delta T} = \frac{\Delta U_{\text{см}}}{\Delta T} (1 + |K_{U_{\text{инв}}}|) + \frac{\Delta I_{\text{б0разн}}}{\Delta T} R_{\text{ос}},$$

где $\Delta U_{\text{см}} / \Delta T$ – дрейф напряжения смещения и $\Delta I_{\text{б0разн}} / \Delta T$ – дрейф разностного входного тока. Эти величины являются параметрами ОУ и приводятся в справочниках.

Дополнительная погрешность усилителя на ОУ создается за счет изменения напряжения питания схемы. Для оценки влияния изменения величины E_n вводят коэффициент ослабления влияния напряжения питания $K_{\text{ОВНП}}$, являющийся параметром ОУ и приводимый в справочных данных (иногда вместо $K_{\text{ОВНП}}$ вводят коэффициент влияния неустойчивости источника питания на напряжение смещения,

имеющий размерность мкВ/В и показывающий, насколько изменится $U_{см}$ при заданном изменении E_n). Коэффициент $K_{ОВНП}$ представляет собою отношение изменения напряжения питания ΔE_n к вызванному им изменению $U_{см}$, выраженное в децибелах, т. е.

$$K_{ОВНП} = 20 \lg \frac{\Delta E_n}{\Delta U_{см}}.$$

Неинвертирующий усилитель. Неинвертирующий усилитель (рис. 2.16) представляет собой ОУ, охваченный последовательной отрицательной ОС по напряжению на резисторах $R_{ос}$, R_1 . Входной сигнал подан на неинвертирующий вход. Выражение для коэффициента усиления этой схемы можно получить, используя условие равенства напряжений на входах ОУ:

$$U_{вх} = U_{ос} = U_{вых} \frac{R_1}{R_{ос} + R_1}.$$

Отсюда:

$$K_{U_{неинв.}} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{R_{ос} + R_1}{R_1} = 1 + \frac{R_{ос}}{R_1} = 1 + |K_{U_{инв.}}|.$$

Поскольку входные токи ОУ равны нулю, наличие резистора R_r (внутреннего сопротивления источника сигнала) не влияет на значение коэффициента усиления схемы.

Для реальных ОУ сопротивления во входных цепях стремятся сделать равными для уменьшения токовой составляющей погрешности.

Вследствие наличия в схеме неинвертирующего усилителя последовательной отрицательной ОС по напряжению его входное сопротивление возрастает в F раз. При неидеальном ОУ:

$$R_{вх.неинв.} = R_{вхОУ} F = R_{вхОУ} \frac{K_{УОУ}}{K_{U_{неинв.}}}.$$

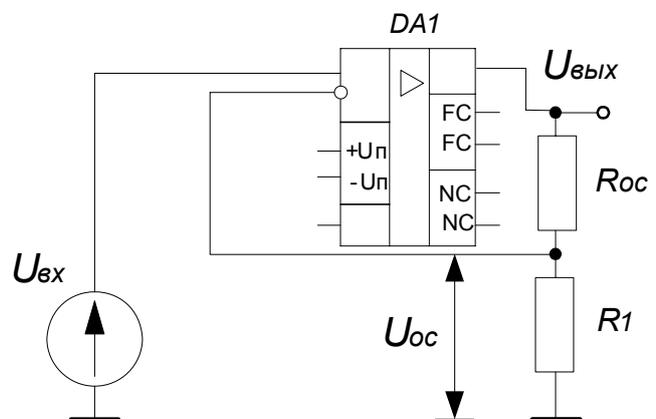


Рис. 2.16. Схема неинвертирующего усилителя

Выходное сопротивление определяется формулой:

$$R_{\text{вых.неинв.}} = \frac{R_{\text{выхОУ}}}{F} = \frac{R_{\text{выхОУ}}}{K_{\text{УОУ}}} K_{\text{Унеинв.}}$$

Если в схеме (рис. 2.16) принять $R_1 = \infty$ и $R_{oc} = 0$, то $K_{\text{Унеинв.}} = 1$ и $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}$, т. е. имеем повторитель с коэффициентом передачи, равным единице.

Напряжение статической ошибки в неинвертирующем усилителе по сравнению со схемой инвертирующего усилителя увеличивается за счет синфазной составляющей $U_{\text{вых.ош}}^{\text{сф}}$, так как в этой схеме на обоих входах всегда присутствует синфазный сигнал, равный $U_{\text{вх}}$.

Величина $U_{\text{вых.ош}}^{\text{сф}}$ определяется выражением:

$$U_{\text{вых.ош}}^{\text{сф}} = U_{\text{вх}} K_{\text{Усф}} = U_{\text{вх}} \frac{K_{\text{Унеинв.}}}{K_{\text{ос.сф}}}$$

Разностный усилитель. Разностный усилитель (рис. 2.17) усиливает разность сигналов, приложенных к входам ОУ. Зная коэффициенты усиления по инвертирующему и неинвертирующему входам, можно получить выражение для выходного напряжения разностного усилителя, используя метод суперпозиции:

$$U_{\text{вых}} = -K_{\text{Уинв.}} U_{\text{вх1}} + K_{\text{Унеинв.}} U_{\text{вх2}} \frac{R_3}{R_3 + R_2} = \frac{-R_{oc}}{R_1} U_{\text{вх1}} + \frac{R_1 + R_{oc}}{R_1} \frac{R_3}{R_3 + R_2} U_{\text{вх2}}$$

Если $R_2 = R_1$, $R_3 = R_{oc}$ и $R_3/R_2 = R_{oc}/R_1 = m$, то:

$$U_{\text{вых}} = -m U_{\text{вх1}} + \frac{(m+1)m}{m+1} U_{\text{вх2}} = m(U_{\text{вх2}} - U_{\text{вх1}})$$

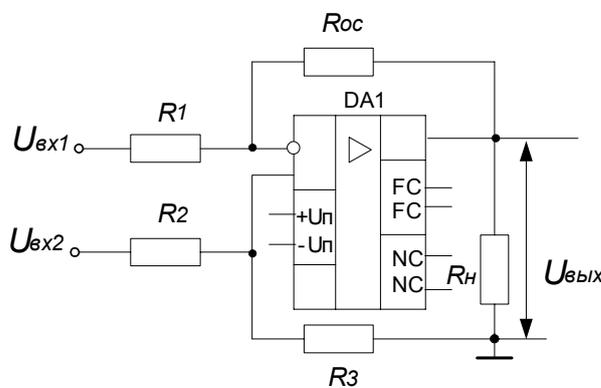


Рис. 2.17. Разностный усилитель

В разностном усилителе помехи, попадающие или возникающие на его входах, оказываются синфазными сигналами и не усиливаются, так как схема усиливает только разностный сигнал. Для хорошего подавления синфазных сигналов требуется точный подбор резисторов R_1 , R_2 , R_3 , и R_{oc} . Способность усиливать полезный сигнал на фоне сильных син-

фазных помех позволяет применять разностный усилитель в различных измерительных системах. Если коэффициенты усиления разностного усилителя по инвертирующему и неинвертирующему входам различаются вследствие разброса номиналов резисторов R_1 , R_2 , R_3 , и R_{oc} , то напряжение на выходе схемы не будет точно пропорционально разности входных сигналов, а будет определяться выражением:

$$U_{вых} = -m_{инв}U_{вх1} + \frac{(1 + m_{инв})}{(1 + m_{неинв})} m_{неинв} U_{вх2}.$$

В этом случае коэффициент ослабления синфазного сигнала определяется не свойствами самого ОУ, а неточностью установки коэффициента усиления.

Если принять, что коэффициент усиления по инвертирующему входу равен $m_{инв} = m - 0,5\Delta m$, а по неинвертирующему $m_{неинв} = m + 0,5\Delta m$, то для подсчета $K_{ос.сф}$ можно получить выражение:

$$K_{ос.сф} = (1 + m) \frac{m}{\Delta m}.$$

Недостатком разностного усилителя (рис. 2.17) является различное входное сопротивление по инвертирующему и неинвертирующему входам, а также

трудность регулирования его коэффициента усиления (требуется одновременное изменение двух точно подобранных резисторов). Для устранения различия и увеличения входных сопротивлений применяется схема

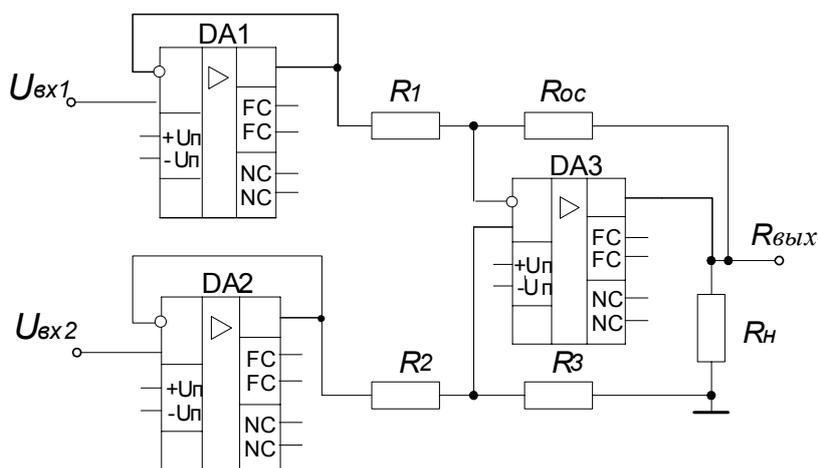


Рис. 2.18. Разностный усилитель с повторителями на входах

разностного усилителя, изображенная на рис. 2.18. Здесь на обоих входах усилителя включены повторители на ОУ, обеспечивающие равное и высокое входное сопротивление схемы.

Регулировка усиления при высоком R_{ex} разностного усилителя обеспечивается в схеме на рис. 2.18. Здесь симметричный вход создан двумя неинвертирующими усилителями с регулируемым усилением. Общий коэффициент усиления данной схемы находят по формуле:

$$K_{U \text{ разн.}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}} = \left(1 + \frac{2}{a}\right)m,$$

где $m=R_5/R_4=R_7/R_6$, причем $R_4=R_6$, $R_5=R_7$. Коэффициент ослабления синфазного сигнала измерительного усилителя по рис. 2.18 определяется выражением:

$$K_{\text{ос.сф}} = \left(1 + \frac{2}{a}\right)(1 + m) \frac{m}{\Delta m}.$$

Измерительный усилитель на трех ОУ. На рис. 2.19 приведена стандартная схема двухкаскадного измерительного усилителя на базе ОУ.

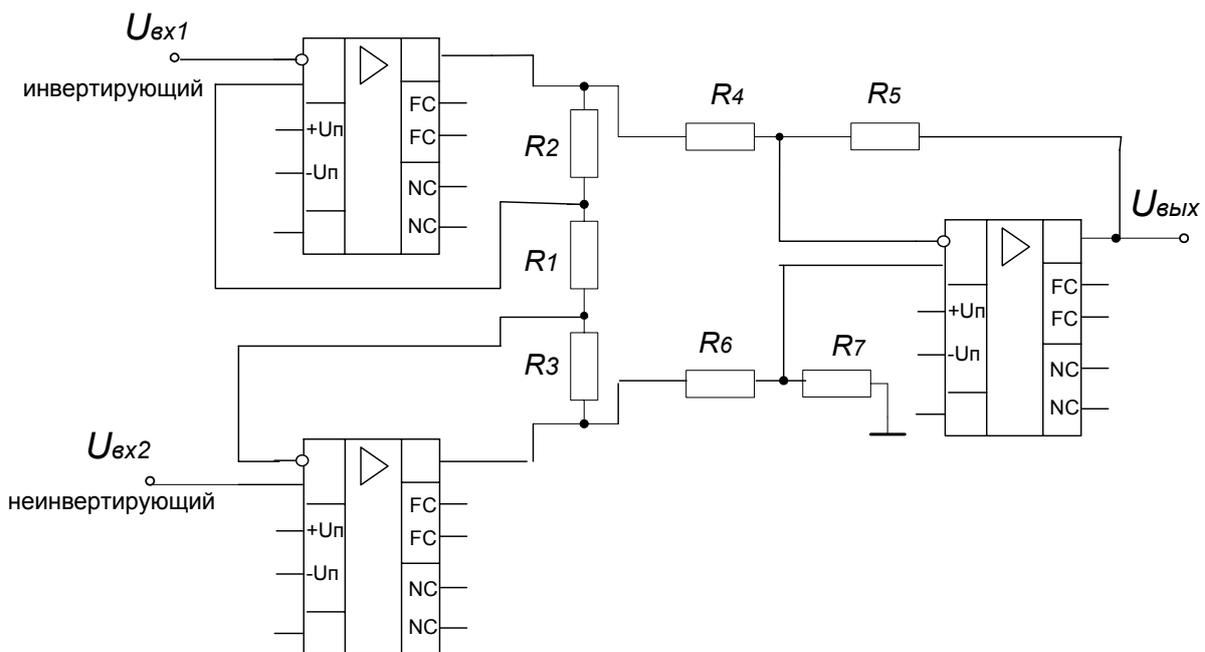


Рис. 2.19. Измерительный усилитель на базе трёх ОУ

Первый каскад, состоящий из усилителей $A1$ и $A2$, усиливает дифференциальный сигнал в $(R_1+R_2+R_3)/R_1$ раз, и коэффициент передачи для синфазного напряжения равен 1. Следовательно, дифференциальный сигнал увеличивается на выходах $A1$ и $A2$ без увеличения синфазного сигнала. Второй каскад, выполненный на ОУ $A3$, в дифференциальном включении усиливает дифференциальный сигнал в

R_5/R_4 раз. Такая схема имеет более высокий входной импеданс и обеспечивает большее усиление и лучший КОСС по сравнению со схемами на одном ОУ. Кроме того, величина КОСС менее чувствительна к точности подбора резисторов.

Дифференциальный коэффициент усиления:

$$K_U = \frac{(R_1 + R_2 + R_3) R_5}{R_1 R_4}.$$

Коэффициент усиления синфазного сигнала (из-за разбаланса резисторов):

$$K_{сф1} = (R_7 R_4 - R_5 R_6) / R_4 (R_6 + R_7).$$

Для получения максимального КОСС должно выполняться условие $R_4 R_7 = R_5 R_6$, обычно $R_2 = R_3$, $R_4 = R_6$, $R_5 = R_7$.

Коэффициент усиления синфазного сигнала (из-за конечного значения КОСС усилителя А3):

$$K_{сф2} = R_5 / R_4 \cdot КОСС_{А3}.$$

Общий КОСС измерительного усилителя в наихудшем случае (при сложении $K_{сф1}$ и $K_{сф2}$):

$$КОСС = \frac{K_U}{K_{сф1} + K_{сф2}}.$$

Выходное напряжение смещения $U_{см.вых1}$, обусловленное напряжениями смещения ОУ (наихудший случай):

$$U_{см.вых1} = \frac{(R_1 + R_2 + R_3) R_5}{R_1 R_4} (U_{см.А1} + U_{см.А2}) + (1 + \frac{R_5}{R_4}) U_{см.А3},$$

где $U_{см.А1}$ – входное напряжение смещения ОУ А1, $U_{см.А2}$ – входное напряжение смещения ОУ А2, $U_{см.А3}$ – входное напряжение смещения ОУ А3.

Выходное смещение $U_{см.вых2}$, обусловленное входными токами смещения ОУ при $R_4 = R_6$ и $R_5 = R_7$ (наихудший случай):

$$U_{см.вых2} = (R_3 I_{см.вх2}^- - R_{И2} I_{см.вх2}^+ - R_2 I_{см.вх1}^- + R_{И1} I_{см.вх1}^+) \frac{R_5}{R_4} + \Delta I_{см.вх3} R_5,$$

где $I_{см.вх1}^-$, $I_{см.вх1}^+$, $I_{см.вх2}^-$, $I_{см.вх2}^+$ – входные токи смещения А1 и А2 по инвертирующему и неинвертирующему входам соответственно,

$\Delta I_{см.вх3}$ – разность входных токов смещения ОУ АЗ, R_{u1} – выходное сопротивление источника $U_{вх1}$, R_{u2} – выходное сопротивление источника $U_{вх2}$.

Общее выходное смещение (наихудший случай):

$$U_{см.вых} = U_{см.вых1} + U_{см.вых2}.$$

Изменять коэффициент усиления схемы можно, изменяя сопротивление резистора R_1 , это не сказывается на входном импедансе и КОСС схемы; однако пропорционального управления усилением таким способом добиться нельзя. При выборе значений резисторов целесообразно сосредоточить все усиление в первом каскаде усилителя (ОУ А1 и А2), поскольку именно он обеспечивает максимальное усиление дифференциального входного сигнала по отношению к синфазному сигналу. Коэффициент передачи каскада на АЗ можно установить равным единице, выбирая $R_4=R_5=R_6=R_7$. При этом лучше использовать резисторы в одном корпусе, чтобы обеспечить точное согласование сопротивлений и их равный дрейф при изменениях внешних условий. Однако при установке слишком большого коэффициента усиления первого каскада усилителя А1 и А2 могут войти в насыщение, что ограничит диапазон синфазного входного напряжения усилителя.

3. РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРИНЦИПАЛЬНОЙ СХЕМЫ

3.1. Общие требования к выполнению схем

Схемы, в зависимости от видов элементов и связей, входящих в состав изделия, подразделяют на электрические (обозначается Э), кинематические (К), птические (Л), автоматизации (А), комбинированные (С) и др. В зависимости от основного назначения схемы делятся на типы, обозначаемые цифрами: структурная – 1, функциональная – 2, принципиальная (полная) – 3, соединение (монтажные) – 4, подключения – 5, общие – 6, расположения – 7, прочие – 8. Например, принципиальная электрическая схема имеет шифр Э3, кинематическая структурная – К1.

Структурная схема определяет основные функциональные части изделия, их назначение и взаимосвязь. Функциональная схема разъясняет процессы, протекающие в отдельных функциональных цепях или в изделии в целом. Принципиальная (полная) схема определяет полный состав элементов и связей между ними и дает детальное представление о принципах работы изделия.

Схема соединений (монтажная) показывает соединения составных частей изделия и определяет провода, жгуты, кабели или трубопроводы, которыми осуществляются эти соединения, а также места их присоединения и ввода (зажимы, разъемы и т. д.). Схема подключения показывает внешние подключения изделия.

Если в состав изделия входят элементы разных видов, то разрабатывают одну комбинированную схему, например: "Схема опико-электрическая принципиальная". На схемах должно быть наименьшее количество изломов и пересечений линий связи. Расстояние между соседними параллельными линиями связи должно быть не менее 3 мм.

При выполнении схемы применяют:

- а) условные графические обозначения, установленные стандартами ЕСКД;
- б) упрощенные внешние очертания, в том числе аксонометрические;
- в) прямоугольники.

Элементы, составляющие функциональную группу или устройство, не имеющее самостоятельной принципиальной схемы, можно выделять штрихпунктирными линиями, указывая при этом наименование функциональной группы. Элементы, составляющие устройство, не имеющее самостоятельной принципиальной схемы, выделяют на принципиальной схеме сплошной линией, равной по толщине линии связи.

На схеме разрешается изображать отдельные элементы, не входящие в прибор (установку), но необходимые для разъяснения принципов его работы. Графическое обозначение таких элементов выделяет штрих пунктирными линиями, равными по толщине линиям связи, кроме того, указывают надписями их местонахождение и другие данные. Схему на прибор (установку) допускается выполнять на нескольких листах.

3.2. Электрические схемы

Структурная схема (Э1). Графическое построение схемы должно давать наглядное представление о последовательности взаимодействия функциональных частей. На линиях связей рекомендуется стрелками обозначать направления ходов процессов, происходящих в изделии. Функциональные части изображают в виде условных графических обозначений или прямоугольников. В прямоугольник вписываются наименования, обозначения (номера) или типы (шифры) элементов. Номера и шифры поясняются на поле схемы в таблице произвольной формы, помещаемой над основной надписью. Допускаются пояснительные надписи, диаграммы или таблицы, определяющие последовательность процессов во времени, а также параметры в характерных точках (значения токов, формы и амплитуды импульсов, математические зависимости и т. д.).

Функциональная схема (Э2). На схеме в виде условных графических обозначений изображают функциональные части изделия, участвующие в процессе, и связи между этими частями. Допускается отдельные части изображать в виде прямоугольников.

На схеме должны быть указаны: для каждой функциональной группы обозначение, присвоенное ей на принципиальной схеме и (или) ее наименование; если функциональная группа изображена в виде условного графического обозначения, то ее наименование не указывают; для каждого устройства, изображенного в виде прямоугольника, позиционное обозначение и наименование.

Для каждого устройства, изображенного в виде условного графического обозначения, должны быть указаны его позиционное обозначение, присвоенное ему на принципиальной схеме, тип и (или) обозначение документа; для каждого элемента – позиционное обозначение, присвоенное ему на позиционной схеме.

Принципиальная схема (Э3). На схеме изображают электрические элементы, необходимые для осуществления и контроля в изделии заданных электрических процессов, все электрические связи между ними, а также электрические элементы (разъемы, зажимы и т. п.), которыми заканчиваются входные и выходные цепи. Схемы выполняются для изделий, находящихся в отключенном состоянии. Элементы на схеме изображают в виде условных графических обозначений, ус-

тановленных в стандартах ЕСКД. Допускается все условные графические обозначения пропорционально увеличивать (при вписывании в них поясняющих знаков) или уменьшать (расстояние между двумя соседними при этом должно быть не менее 2,0 мм). Условные графические обозначения выполняются линиями той же толщины, что и линий связи (0,2 – 1,0 мм).

Каждый элемент, входящий в изделие и изображенный на схеме, должен иметь позиционное обозначение в соответствии с требованиями ГОСТ 2.710-81. В первой части позиционного обозначения латинскими буквами должен быть указан вид элемента (устройства), например, R – резистор; L – катушка индуктивности, дроссель; M – двигатель. Во второй части должен быть указан порядковый номер элемента (устройства) в пределах данного вида, например: если элемент или устройство изображены разнесенным способом, то допускается к его порядковому номеру добавлять условный номер, изображенной части элемента, разделяя номер точкой, например, D15.2 – цифровая интегральная микросхема D15, часть 2 (второй логический элемент). При этом условный номер в перечне элементов не указывается.

Порядковые номера элементов следует присваивать, начиная с единицы, в пределах группы элементов, которым на схеме присвоено одинаковое буквенное позиционное обозначение: C1, C2 и т. д.

Порядковые номера на схеме проставляют рядом с условными графическими обозначениями элементов с правой стороны или под ними. Порядковые номера присваиваются в соответствии с последовательностью расположения элементов на схеме сверху вниз в направлении слева направо. При необходимости можно изменять их последовательность, обусловленную размещением элементов в изделии направлением прохождения сигналов или функциональной последовательностью процесса. На принципиальной схеме должны быть однозначно определены все элементы, входящие в состав изделия и изображенные на схеме.

Данные об элементах записываются в перечень элементов. При этом связь перечня с условными графическими обозначениями должна осуществляться через позиционные обозначения. Допускается в отдельных случаях все сведения об элементах помещать около условных графических обозначений.

Перечень элементов помещают на первом листе схемы или выполняют в виде самостоятельного элемента на листе формата А4. При указании на схеме номиналов резисторов и конденсаторов применяют следующий упрощенный способ обозначения единиц измерений: для резисторов от 0 до 99 Ом – без указания единиц измерения; от 1×10^2 до 999×10^3 Ом – в кило омах с обозначением единицы измерения строчной буквой "к", свыше 1×10^6 Ом – в мега омах с обозначением единицы измерения прописной буквы "М"; для конденсаторов от 0 до 9999×10^{-12} ф – в пикофарадах без указания единицы измерения; от 1×10^{-28} до 999×10^{-6} ф – в микрофарадах с обозначением единицы измерения строчными буквами "мк".

При изображении на схеме элементов, параметры которых подбирают при регулировании, около их позиционных обозначений на схеме и в перечне проставляют звездочки, например: I^* , а на поле схемы помещают сноску: "*Подбирают при регулировании".

3.3. Пример расчета и выполнения электрической принципиальной схемы

Предполагается, что в курсовой работе расчет схем с ОУ будет производиться для различных электронных устройств, сигнализирующих об изменении параметров измеряемой величины в некотором диапазоне и имеющих в своем составе датчик, схему усиления сигнала с этого датчика, компаратор и сигнализатор, например светодиод или громкоговоритель. Общая схема такого устройства приведена на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Общая схема разрабатываемого устройства

Сигнал с датчика поступает на усилитель, где происходит его усиление, далее с помощью компаратора происходит сравнение усиленного сигнала с заданным. Если измеряемая величина превышает заданные пределы, происходит переключение компаратора в состояние лог. 1 и срабатывает сигнализатор. В данной работе непосредственно производится расчет для датчика сигнала и его усилителя. На базе ОУ строится двухпороговый компаратор и рассчитываются напряжения верхнего и нижнего порогов переключения для требуемого диапазона измеряемой величины в соответствии с вариантом задания. Подбираются сопротивления резисторов и необходимые для работы компаратора напряжения.

Ниже приводится пример расчета измерительного усилителя для усиления сигнала с терморезистора.

Задание: Рассчитать измерительный усилитель на основе ОУ для усиления разностного сигнала с диагонали моста, в одно из плеч которого включен терморезистор (рис. 3.2). При изменении температуры на $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (от $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $40\text{ }^{\circ}\text{C}$) возникает разбаланс моста $\Delta R_x = 5\text{ Ом}$. Номиналы резисторов моста $R_{x20^{\circ}\text{C}} = R_1 = 100\text{ Ом}$; $R_2 = R_3 = 5\text{ кОм}$; напряжение питания моста $E_{II} = 10\text{ В}$.

Требуемое значение коэффициента усиления должно регулироваться в пределах от 30 до 50. Входное сопротивление $R_{вх} \geq 50\text{ кОм}$.

Оценить величину синфазной помехи на выходе усилителя, учитывая разброс номиналов резисторов схемы.

Расчет схемы. Выбираем схему измерительного усилителя, приведенную на рис. 2.19, поскольку данная схема позволяет обеспечить высокие значения входного сопротивления и регулировку коэффициента усиления с помощью одного переменного резистора (aR). Используем ОУ типа 140УД8 с полевыми транзисторами на входе, что позволит уменьшить погрешность, вызванную разностным входным током.

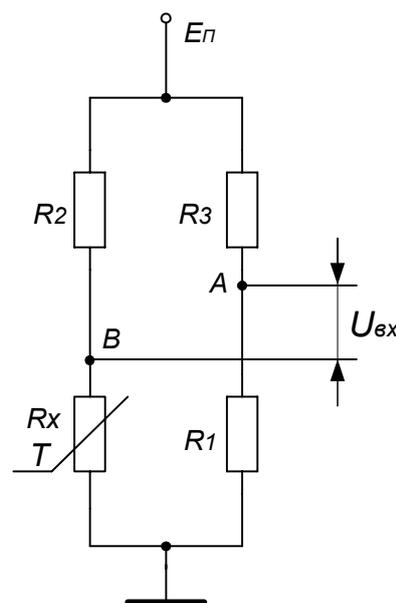


Рис. 3.2. Мост с включенным терморезистором

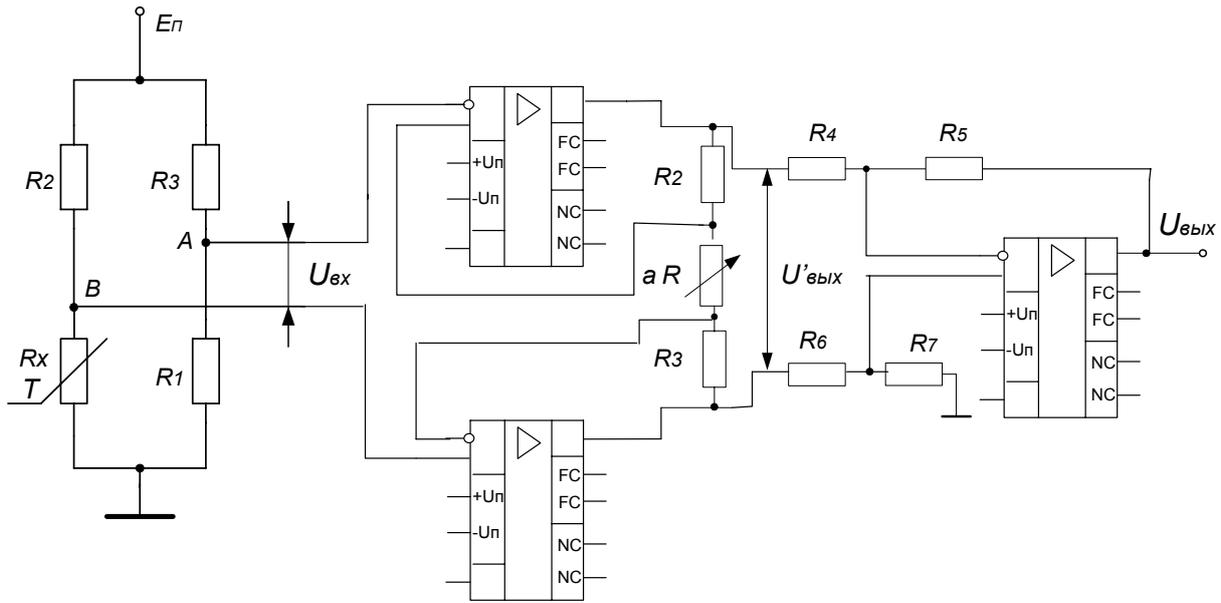


Рис. 3.3. Схема рассчитываемого измерительного усилителя

1) Определим величины дифференциального и синфазного выходных сигналов (рис. 3.3):

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{вх}} = U_{\text{вх.д}} &= \varphi_A - \varphi_B = E_n \left(\frac{R_1}{R_3 + R_1} - \frac{R_1 - \Delta R_x}{R_2 + R_1 - \Delta R_x} \right) = \\ &= 10 \left(\frac{100}{5100} - \frac{100 - 5}{5100 - 5} \right) = 0,01 \text{ В} = 10 \text{ мВ}. \\ U_{\text{вх.сф}} &= \frac{\varphi_A + \varphi_B}{2} \cong \frac{1}{2} \frac{100 + 95}{510} \cong 190 \text{ мВ}. \end{aligned}$$

2) Выберем номиналы резисторов схемы. Для уменьшения влияния входного тока ОУ₃ возьмем $R_4 = R_6 = 10 \text{ кОм}$, $R_5 = R_7 = 50 \text{ кОм}$ с погрешностью 5%. Это дает значения $m=5$ и $\Delta m/m=5\%$. Сопротивление переменного резистора aR определяется требуемой глубиной регулирования коэффициента усиления $K_{U \text{ разн.}}$. Из выражения:

$$K_{U \text{ разн.}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}} = \left(1 + \frac{2}{a} \right) m$$

найдем, что при $K_U = 50$ и $m=5$ величина $a=0,22$; при $K_U = 30$ и $m=5$ величина $a=0,4$. Если резисторы $R_4 = R_5 = 10 \text{ кОм}$, то переменный резистор aR следует выбрать с номиналом 4 кОм.

3) Для подсчета $U_{\text{вых.ом}}^{\text{сф}}$ определим $K_{\text{ос.сф}}$ усилителя из следующего выражения при $K_U = 50$:

$$K_{oc.cф} = (1 + \frac{2}{a})(1 + m) \frac{m}{\Delta m} = 10 \cdot 6 \frac{100}{5} = 1200.$$

Полученный результат показывает, что влияние неидентичности резисторов в схеме проявляется значительно сильнее, чем неодинаковость параметров плеч ДУ в ОУ, так как $K_{oc.cфОУ} = 10^4$ и $K_{oc.cфОУ} \gg K_{oc.cф}$ усилителя.

Тогда при максимальном коэффициенте усиления схемы:

$$U_{вых.ош}^{сф} = U_{вх.сф} K_{Усф} = U_{вх.сф} \frac{K_{УД}}{K_{oc.cф}} = 190 \cdot \frac{50}{1200} = 7,92 \text{ мВ},$$

что при полезном сигнале $U_{вых.д} = U_{вх.д} K_{Уд} = 10 \cdot 50 = 500 \text{ мВ}$ дает относительную ошибку измерения в $7,92 \cdot 100 / 500 = 1,58 \%$.

Выполнение электрической принципиальной схемы (прил. Б). Схема электрическая принципиальная выполняется на листах формата А3. Все входы и выходы схемы должны быть оформлены в виде разъема. На схеме также должны присутствовать линии питания элементов схемы, а также должен быть приведен краткий перечень элементов. На листе формата А4 приводится полный перечень элементов схемы (прил. Б).

Перечень элементов. Данные об элементах должны быть записаны в перечень элементов. Перечень элементов оформляют в виде таблицы по заданной форме, и помещают на первом листе схемы или выполняют в виде самостоятельного документа. Если перечень элементов помещают на первом листе схемы, то его располагают над основной надписью на расстоянии не менее 12 мм. Продолжение перечня помещают слева от основной надписи, повторяя головку таблицы.

Перечень элементов в виде самостоятельного документа выполняют на формате А4. Основную надпись и дополнительные графы к ней выполняют по ГОСТ 2.104-68 (форма 2 для первого листа, форма 2а для последующих листов). Перечню элементов, выполненному в виде самостоятельного документа, присваивают код П и в основной надписи указывают наименования изделия и конструкторского документа «Перечень элементов».

В графах перечня помещают следующие данные:

в графе «Поз. обозначение» – позиционное буквенно-цифровое обозначение элемента, устройства или функциональной группы;

в графе «Наименование» – наименование элемента или устройства, тип и обозначение документа, на основании которого этот элемент или устройство применены;

в графе «Примечание» – технические данные, не содержащиеся в обозначении типа элемента, значения параметров, подбираемые регулировкой, и др. Пример заполнения перечня элементов приведён в табл. 3.1.

Связь перечня с графическими обозначениями осуществляется через позиционные обозначения. Элементы в перечень записываются группами в алфавитном порядке буквенных позиционных обозначений. В пределах каждой группы, имеющей одинаковые буквенные позиционные обозначения, элементы располагают по возрастанию порядковых номеров. Допускается оставлять несколько незаполненных строк между группами элементов. Элементы одного типа с одинаковыми электрическими параметрами записывают в перечень в одну строку, при этом в графе «Кол.» указывают общее количество одинаковых элементов.

При записи одинаковых по наименованию элементов рекомендуется объединять их в группы, выполнять общий заголовок и записывать в графе «Наименование» только тип и документ, на основании которого этот элемент применен. Допускается обозначения документов, на основании которых применены элементы, записывать в общем наименовании (заголовке). Если продолжение перечня перенесено на следующий лист или свободное поле схемы, заголовок группы элементов повторяют.

Если в изделие входят несколько одинаковых функциональных групп или устройств, то элементы, входящие в такие группы и устройства, записываются в перечень элементов отдельно в пределах каждого устройства или функциональной группы. Запись элементов, входящих в каждое устройство (функциональную группу), начинают с наименования устройства или функциональной группы, которое записывают в графе «наименование». Ниже наименования устройства должна быть оставлена одна свободная строка, выше – не менее одной свободной строки. При этом если на схеме изделия имеются элементы, не входящие в устройства (функциональные группы), то вна-

чале записываются эти элементы без заголовка, а затем – устройства, не имеющие самостоятельных принципиальных схем и функциональные группы с элементами, входящими в них. Если в изделии имеется несколько устройств или функциональных групп, то в перечне указывают количество элементов, входящих в одно устройство. Общее количество одинаковых устройств указывают в графе «Кол.» на одной строке с заголовком.

Таблица 3.1

Пример заполнения перечня элементов

Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
A1	Дешифратор АБВГ.ХХХХХХ.033	1	
D1	Микросхема К155М2 бко.348.006.ОУ1	1	
D2	Микросхема К155ЛА3.бко.348.006ЕУ1	1	
	<u>Резисторы</u>		
R1, R2	МЛТ-0,25-430 Ом ± 10% ГОСТ ...	2	
R3	МЛТ-0,25-13 Ом ± 10% ГОСТ ...	1	
SA1	Переключатель АБВГ.ХХХХХХ.154	1	
A2	<u>1. Блок включения ФЭУ,</u> <u>АБВГ.ХХХХХХ.249</u>	1	
AB1	Блок индикации АБВГ.ХХХХХХ.249	1	
	Резисторы ГОСТ ...		
R1, R2	МЛТ-0,25-120 Ом ± 10%	2	
R3	МЛТ-0,25-220 Ом ± 10%	1	
R4...R6	МЛТ-0,25-120 Ом ± 10%	3	
PM1	<u>1.1. Измеритель</u>		
AC1	Блок сигнализации АБВГ.ХХХХХХ.021	1	
C1, C2	Конденсатор КМ-3а-Н30-0,22...ТУ	2	
R7	Резистор МЛТ-0,25-470 Ом ± 10% ГОСТ ...	1	

3.4. Выбор и расчет источника питания схемы

При выборе и разработке источника питания (ИП) необходимо учитывать ряд факторов, определяемых условиями эксплуатации, свойствами нагрузки, требованиями к безопасности и т. д.

В первую очередь, следует обратить внимание на соответствие электрических параметров ИП требованиям питаемого устройства, а именно:

- напряжение питания;
- потребляемый ток;
- требуемый уровень стабилизации напряжения питания;
- допустимый уровень пульсации напряжения питания.

Немаловажны и характеристики ИП, влияющие на его эксплуатационные качества:

- наличие систем защиты;
- массогабаритные размеры.

Существует четыре основных типа сетевых источников питания:

- бестрансформаторные с гасящим резистором или конденсатором;
- линейные, выполненные по классической схеме: понижающий трансформатор – выпрямитель – фильтр – стабилизатор;
- вторичные импульсные: понижающий трансформатор – фильтр – высокочастотный преобразователь 20 – 400 кГц;
- импульсный высоковольтный: высокочастотный фильтр – выпрямитель $\sim 220\text{В}$ – импульсный высокочастотный преобразователь 20 – 400 кГц.

В данной работе мы будем рассматривать линейные ИП. Линейные источники питания отличаются предельной простотой и надежностью, отсутствием высокочастотных помех, имеют высокую степень доступности комплектующих и простоту изготовления. Кроме того, в некоторых случаях немаловажен и чисто экономический расчет – применение линейных ИП однозначно оправдано в устройствах, потребляющих до 500 мА, которые требуют достаточно малогабаритных ИП. Структурная схема такого источника питания приведена на рис. 3.4.

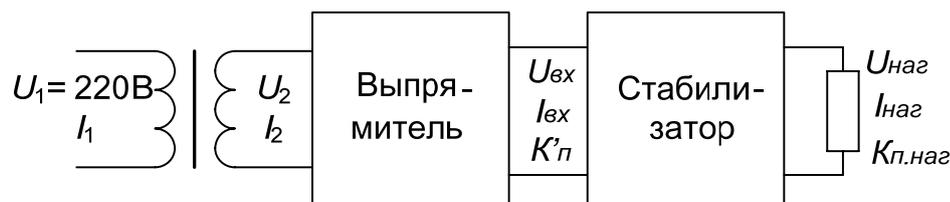


Рис. 3.4. Структурная схема источника питания

Основными величинами, характеризующими эксплуатационные свойства такого источника питания, являются:

– величина выходного напряжения $U_{наг}$ и тока $I_{наг}$ (определяются потребностями нагрузочной цепи, на которую работает источник питания).

Источник питания в данной работе будем рассчитывать для $I_{наг}$ в соответствии с вариантом задания (см. Прил. А)

– коэффициент пульсаций $K_{п.наг}$ – отношение амплитуды пульсаций выходного напряжения к среднему значению напряжения (постоянной составляющей);

– внешняя характеристика – зависимость напряжения в нагрузке от тока нагрузки $U_{наг} = f(I_{наг})$;

– коэффициент полезного действия η .

Расчет стабилизаторов напряжения. Стабилизаторами напряжения называются устройства, автоматически поддерживающие постоянство напряжения на стороне потребителя с заданной степенью точности. По принципу действия стабилизаторы подразделяются на параметрические и компенсационные.

Для стабилизации напряжения постоянного тока используются нелинейные элементы, напряжение на которых мало зависит от тока, протекающего через них. В качестве таких элементов применяются кремниевые стабилитроны. Для подбора необходимого напряжения стабилитроны можно включать последовательно. Если ток нагрузки превышает максимально допустимый ток стабилитрона, применяется усилитель тока на одном или нескольких транзисторах.

В последние годы широкое распространение получили микросхемы – интегральные стабилизаторы напряжения. Источники питания на их основе отличаются малым числом дополнительных деталей, невысокой стоимостью и хорошими техническими характеристиками. Это микросхемы серий 142, К142 и КР142. В состав серий входят стабилизаторы с регулирующим элементом, включенным в плюсовой провод и с фиксированным выходным напряжением. Параметры некоторых из них приведены в приложении. Расчетная схема стабилизатора на микросхеме представлена на рис. 3.5.

Порядок расчета стабилизатора на ИС следующий:

1. по заданному напряжению $U_{наг}$ выбирается микросхема (или несколько микросхем) с соответствующим выходным напряжением;

2. по заданному току $I_{наг}$ проверяется, какая из выбранных микросхем более предпочтительна ($I_{вых.мк} > I_{наг}$). Допустимо выбрать микросхему с наибольшим выходным током;

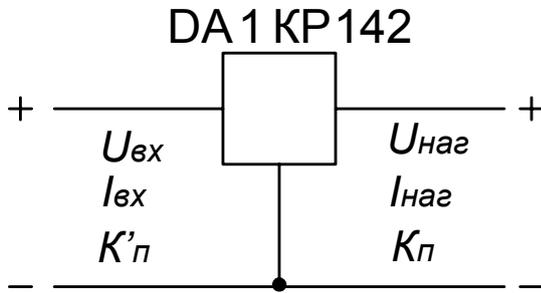


Рис. 3.5. Расчетная схема стабилизатора на ИС

3. для выбранной микросхемы из допустимых пределов входного напряжения выбирается входное напряжение стабилизатора $U_{вх}$;

4. выбирается значение входного тока стабилизатора $I_{вх} = I_{наг}$ ($I_{вых.мак}$ микросхемы). При $I_{вх} = I_{наг}$ стабилизатор будет рассчитан без запаса на перегрузку, при $I_{вх} = I_{вых.мак}$ – с запасом. Допускается выбрать любое из этих двух значений на усмотрение студента. Собственный входной ток микросхемы можно не учитывать, так как он весьма мал (около 1 мА);

5. рассчитывается коэффициент пульсаций на выходе стабилизатора с учетом коэффициента сглаживания микросхемы: $K_n = K'_n \cdot K_{сгл}$ ($K_{сгл}$ – из справочных данных соответствующего стабилизатора).

Расчет выпрямителя. Поскольку выпрямитель в современных маломощных источниках питания радиоэлектронной аппаратуры содержит емкостный фильтр для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения, рассмотрим работу выпрямителя на активно-емкостную нагрузку. Магнитные потоки рассеяния в трансформаторе оказывают значительное влияние на характер электромагнитных процессов в выпрямителях. Они учитываются индуктивным сопротивлением обмоток x_a . Другим важным параметром является активное сопротивление обмоток r_a . Особенности расчета выпрямителя зависят от соотношения между параметрами x_a и r_a .

В выпрямителях малой мощности (особенно низковольтных) индуктивное сопротивление обмоток значительно меньше активного $x_a/r_a \approx 0,3$. Поэтому при расчете таких выпрямителей потоками рассеяния пренебрегают для упрощения расчетов.

Схема однофазного мостового выпрямителя малой мощности, представлена на рис. 3.6.

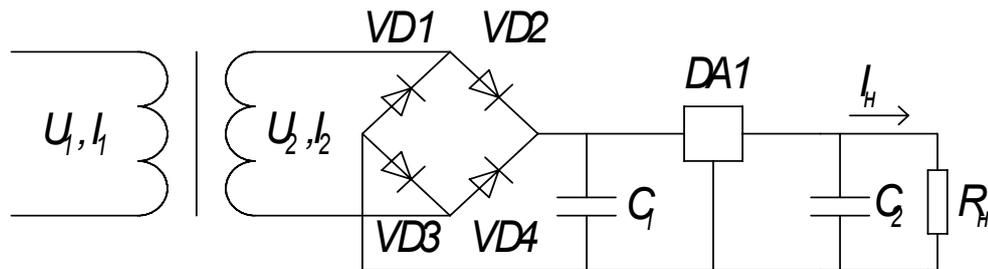


Рис. 3.6. Однофазный мостовой выпрямитель

Работа выпрямителя в установившемся режиме характеризуется двумя интервалами – интервалом заряда конденсатора, когда ЭДС вторичной обмотки трансформатора больше напряжения на конденсаторе C и через диоды проходит ток, и интервалом разряда конденсатора на сопротивление нагрузки, когда ЭДС вторичной обмотки трансформатора меньше напряжения на конденсаторе C и ток через диоды не проходит. Половину интервала, в течение которого через диоды протекает ток, принято называть углом отсечки θ .

Формулы для расчёта выпрямителя представлены в табл. 3.2.

Сопротивление фазы выпрямителя R складывается из сопротивления обмотки трансформатора R_a и сопротивления диодов постоянному току R_i :

$$R = R_a + 2R_i.$$

Сопротивление обмотки трансформатора описывается формулой:

$$R_a = K_R \frac{U_{наг}}{I_{наг} f B_{max}} 4 \sqrt{\frac{S f B_{max}}{U_{наг} I_{наг}}},$$

где B_{max} – максимальная индукция в магнитопроводе трансформатора (1.5Тл); S – количество стержней трансформатора, несущих обмотки; $f=50$ Гц – частота питающей сети.

Таблица 3.2

Расчётные формулы	Схема выпрямления			
	Однополупериодная	двухполупериодная	мостовая	с удвоением
M	1	2	2	2
U_{xx}	$B_0 U_{наг}$	$B_0 U_{наг}$	$B_0 U_{наг}$	$\frac{B_0 U_{наг}}{2}$
I_{VD}	$I_{наг}$	$\frac{I_{наг}}{2}$	$\frac{I_{наг}}{2}$	$I_{наг}$
I_{mVD}	$7I_{наг}$	$3.5I_{наг}$	$3.5I_{наг}$	$\frac{7I_{наг}}{2}$
I_2	$D_0 I_{наг}$	$\frac{D_0 I_{наг}}{2}$	$\frac{D_0 I_{наг}}{\sqrt{2}}$	$\frac{D_0 I_{наг}}{\sqrt{2}}$
$U_{обр}$	$3U_{наг}$	$3U_{наг}$	$1.5U_{наг}$	$1.5U_{наг}$
K_R	2.3	4.7	3.5	0.9
K_L	$4.1 \cdot 10^{-3}$	$4.3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1.25 \cdot 10^{-3}$
$K'_П$	1.57	0.67	0.67	—

Примечание:

M – число фаз выпрямителя;

U_{xx} – напряжение вторичной обмотки трансформатора в режиме холостого хода;

I_{VD} – средний выпрямленный ток каждого диода;

I_{mVD} – амплитудное значение тока через диод;

I_2 – действующее значение тока, на которое должна быть рассчитана вторичная обмотка трансформатора;

$U_{обр}$ – амплитуда обратного напряжения на диодах;

K_R – вспомогательный коэффициент;

K_L – вспомогательный коэффициент;

B_0, D_0 – вспомогательные коэффициенты.

Внутреннее сопротивление диодов одного плеча схемы описывается формулой:

$$R_i = 2 \cdot \frac{U_{np}}{3I_{VD}},$$

где U_{np} – прямое падение напряжения на диоде.

Индуктивность рассеяния обмоток трансформатора, приведённая к вторичной обмотке, определяется по формуле:

$$L_S = K_L S \frac{U_{наг}}{I_{наг} f B_{max}} 4 \sqrt{\frac{U_{наг} I_{наг}}{f B_{max} S}}.$$

Соотношение между активным и реактивным сопротивлениями фазы выпрямителя определяется по формуле:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\pi f L_S}{R},$$

откуда угол сдвига фаз: $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{2\pi f L_S}{R}$.

Вспомогательный коэффициент A_0 рассчитывается по следующей формуле:

$$A_0 = \frac{I_{наг} R}{U_{наг} M}.$$

Исходя из значений φ и A_0 , определяем вспомогательные коэффициенты B_0 и D_0 по графикам зависимостей, представленным на рис. 3.7, 3.8.

Рассчитываем ёмкость конденсаторов фильтра до и после стабилизатора по следующим формулам:

$$C_\phi = \frac{I_{наг}}{2MK_{II} f U_{наг}},$$

$$C_\phi = \frac{I_{наг}}{2MK'_{II} f U_{наг}}.$$

По результатам расчетов выпрямителей необходимо выбрать тип применяемых диодов и стандартные конденсаторы сглаживающих фильтров. Диоды выбирают по допустимому среднему току $I_{пр.ср}$, который должен быть больше получившегося в результате расчета среднего тока вентиля, с проверкой по допустимому импульсному току и обратному напряжению. Параметры диодов приведены в приложении. Для мостовых выпрямителей рекомендуется применять блоки типа КЦ402 – КЦ412. Конденсаторы сглаживающих фильтров должны иметь емкость не менее той, которая получилась по результатам расчета. Рабочее напряжение конденсаторов выбирается в 1,5 – 2 раза больше напряжения холостого хода выпрямителей, ко-

торое определяется из расчетов нагрузочной характеристики при токе нагрузки, равном нулю. Параметры некоторых электролитических конденсаторов, применяемых в сглаживающих фильтрах, приведены в прил. В.

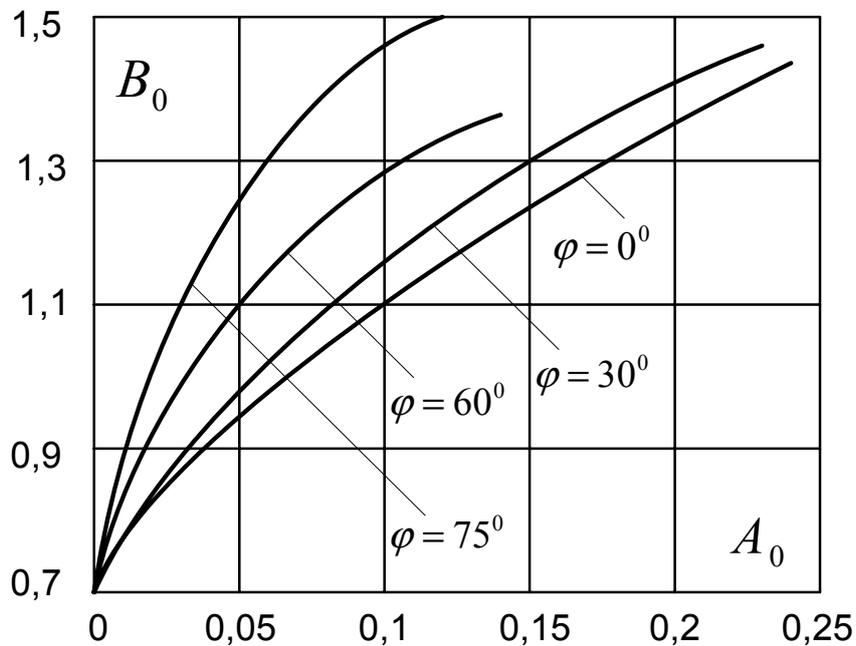


Рис. 3.7. График определения вспомогательного коэффициента B_0

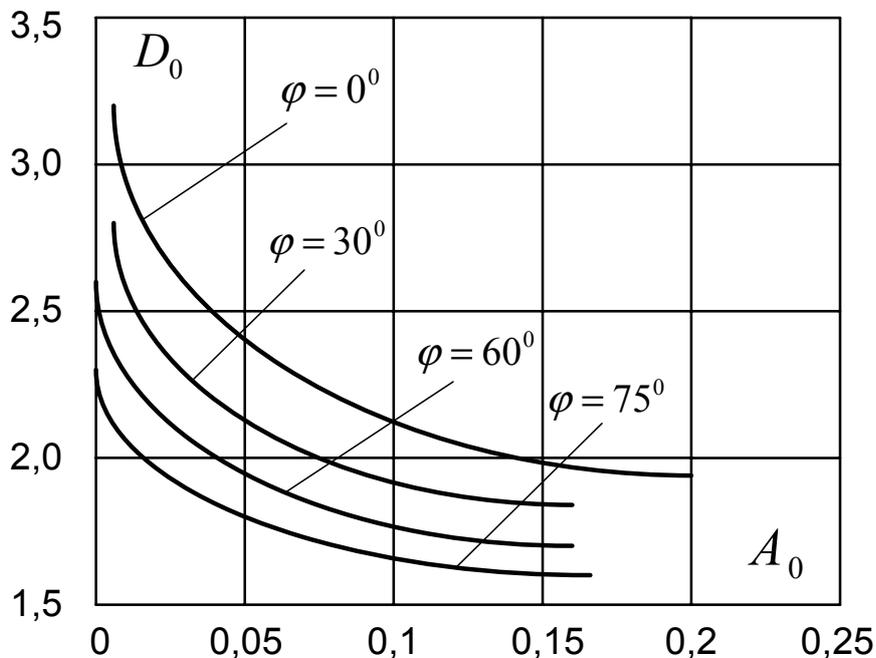


Рис. 3.8. График определения вспомогательного коэффициента D_0

Расчет параметров трансформатора и выбор стандартного трансформатора. Работа трансформатора основана на магнитном свойстве электрического тока. При подключении первичной обмотки к сети переменного тока частотой 50 Гц по этой обмотке протекает переменный ток, который создает вокруг ее витков и в сердечнике трансформатора переменное магнитное поле.

Пронизывая витки вторичной обмотки, это поле индуцирует в них ЭДС. Соотношение количества витков первичной и вторичных обмоток определяет коэффициент трансформации, следовательно, получаемое напряжение на вторичной обмотке (выходное напряжение). Если количество витков вторичной обмотки больше, чем первичной, выходное напряжение трансформатора будет выше напряжения питающей сети, и такая обмотка называется повышающей. Если же вторичная обмотка содержит меньше витков, чем первичная, выходное напряжение будет ниже напряжения сети, а обмотка называется понижающей.

Трансформатор – это пассивный преобразователь энергии. Его коэффициент полезного действия всегда меньше единицы. Это означает, что мощность, потребляемая нагрузкой, всегда меньше, чем мощность, потребляемая нагруженным трансформатором от сети. Следовательно, в повышающих обмотках сила тока меньше, а в понижающих – больше, чем в сетевой (первичной) обмотке.

Два разных трансформатора при одинаковом напряжении питающей сети могут быть рассчитаны на одинаковое напряжение вторичной обмотки. Но если нагрузка первого трансформатора потребляет большой ток, а второго – маленький, следовательно, первый трансформатор имеет большую мощность. Чем больше сила тока в обмотках трансформатора, тем больше магнитный поток в его сердечнике, и тем больше должна быть толщина сердечника. Кроме этого, чем больше сила тока в обмотке, тем более толстым проводом она должна быть намотана, а это требует увеличения площади окна сердечника. Поэтому от мощности трансформатора зависят его габариты, и наоборот. Сердечник определенного размера пригоден для изготовления трансформатора только до определенной мощности, предельной для данных размеров сердечника, которая называется габаритной мощностью трансформатора P_T .

Как и всякий преобразователь энергии, трансформатор характеризуется коэффициентом полезного действия (КПД) – отношением мощности, потребляемой нагрузкой трансформатора, к мощности, которую нагруженный трансформатор потребляет от сети.

КПД маломощных трансформаторов промышленной частоты колеблется в пределах от 0,8 до 0,95. Более высокие значения КПД имеют трансформаторы большей мощности.

В курсовой работе будем применять упрощенный способ расчета трансформатора. Номинальную мощность вторичной обмотки принимают равной $P_2=U_2I_2$. Типовая мощность трансформатора $S_T = P_2/\eta$, где η – КПД трансформатора, который определяется по номограмме рис. 3.9.

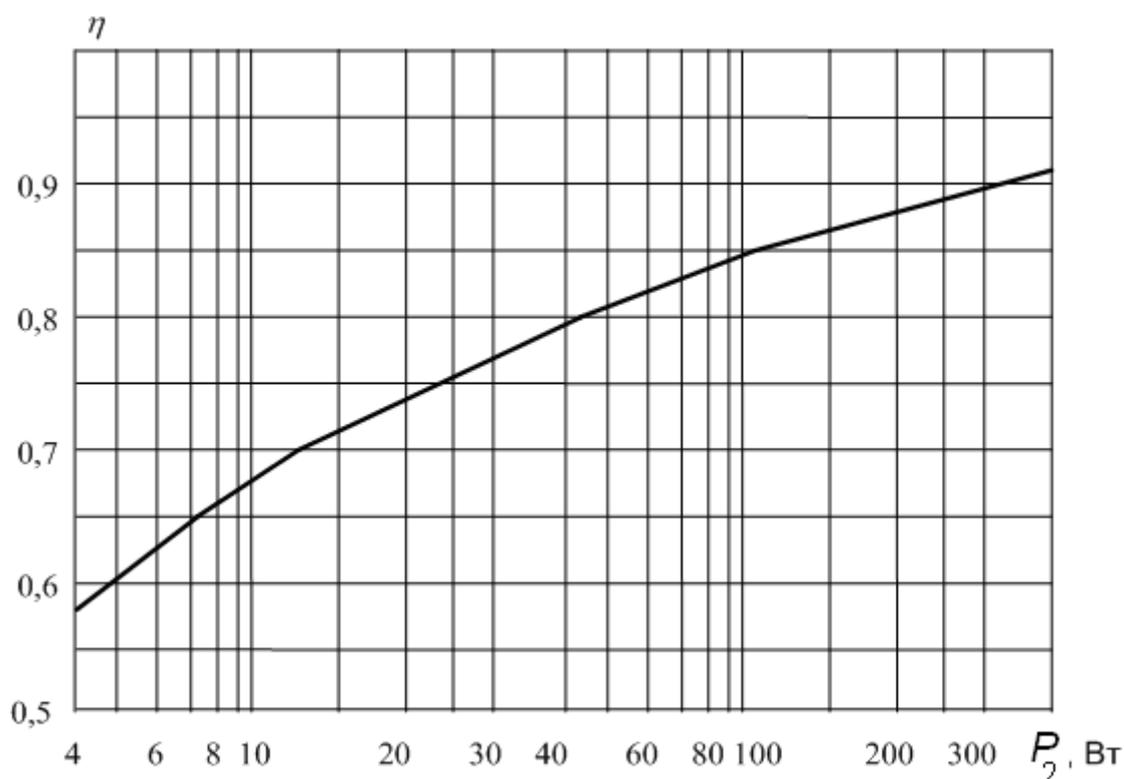


Рис. 3.9. Зависимость КПД от мощности вторичных обмоток

Следует заметить, что при определении КПД трансформатора по номограмме типовая мощность трансформатора получится завышенной, что положительно скажется на его режиме работы (температурном режиме нагруженного трансформатора), но несколько увеличит вес, так как придётся взять более мощный и тяжелый магнитопровод.

По табл. 3.3 выбирают типоразмер магнитопровода со значением S_T не менее вычисленного по формуле.

Число витков каждой вторичной обмотки трансформатора определяют по формуле:

$$w_2 = U_2 \frac{1 + \Delta U}{E^{(1)}},$$

где ΔU – относительное падение напряжения на обмотках; $E^{(1)}$ – число вольт на один виток обмотки трансформатора с магнитопроводом выбранного типоразмера.

Число витков первичной обмотки:

$$w_1 = \frac{U_{сети}}{E^{(1)}}.$$

Таблица 3.3

Параметры некоторых Ш-образных магнитопроводов

Типоразмер магнитопровода	A , мм	H , мм	c , мм	h , мм	$S_{СТ}$, см ²	S_T , В·А	$E(1)$, В	ΔU	$J_{ср}$, А/мм ²	G , кг
УШ22x22	78	67	14	39	4,4	24	0,12	0,25	2,7	0,64
УШ22x33					6,6	36	0,17	0,19	2,5	0,96
УШ22x44					8,8	55	0,22	0,15	2,3	1,3
УШ26x26	94	81	17	47	6,0	60	0,18	0,13	2,5	1,1
УШ26x39					9,0	80	0,25	0,1	2,3	1,7
УШ26x52					12,0	100	0,32	0,08	2,1	2,2
УШ30x30	106	91	19	53	8,0	100	0,22	0,09	2,2	1,6
УШ30x45					12,0	120	0,35	0,06	2,0	2,4
УШ30x60					16,0	160	0,45	0,04	1,8	3,2
УШ35x35	123	106	22	61,5	11,0	170	0,29	0,07	1,9	2,6
УШ35x52					17,0	220	0,43	0,05	1,7	3,8
УШ35x70					22,0	270	0,59	0,03	1,5	5,1
УШ40x40	144	124	26	72	14,0	280	0,36	0,05	1,6	3,8
УШ40x60					22,0	320	0,55	0,04	1,4	5,6
УШ40x80					29,0	380	0,71	0,03	1,2	7,5

Максимальное расчетное значение тока первичной обмотки:

$$I_1 = \frac{S_T}{U_{сети}}.$$

По допустимому значению средней плотности тока J_{cp} в обмотках трансформатора с магнитопроводом выбранного типоразмера и по вычисленным значениям I_1, I_2 определяют диаметры проводов обмоток d_1, d_2 :

$$d_1 = 1,13 \sqrt{\frac{I_1}{J_{cp}}}; \quad d_2 = 1,13 \sqrt{\frac{I_2}{J_{cp}}},$$

где J_{cp} – плотность тока в обмотках трансформатора.

4. РАЗРАБОТКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

4.1. Чертежи печатных плат

Сущность печатного монтажа заключается в нанесении на изоляционное основание тонких электропроводящих покрытий, выполняющих функции монтажных проводов и элементов схемы – резисторов, конденсатор, катушек индуктивности, контактных деталей и др. Ниже приведены основные термины применимо к изготовлению печатных плат.

Печатный проводник – участок токопроводящего покрытия, нанесенного на изоляционное основание, выполняющий функции обычного монтажного провода.

Печатный монтаж – система печатных проводников, обеспечивающих электрическое соединение элементов схемы.

Печатная плата – изоляционное основание с нанесенным на нем печатным монтажом.

Навесные элементы – объемные электро- и радиоэлементы, установленные и закрепленные на печатной плате способом пайки и имеющие электрический контакт с печатными проводниками.

Контактная площадка – металлизированный участок вокруг монтажного отверстия, имеющий электрический контакт с печатным проводником и обеспечивающий электрическое соединение навесных элементов схемы с печатным монтажом.

Монтажное отверстие – отверстие в печатной плате, предназначенное для закрепления выводов навесных элементов и электрического соединения с их печатными проводниками.

Координатная сетка – сетка, наносимая на изображение платы и служащая для определения положения монтажных отверстий, печатных проводников и других элементов платы.

Шаг координатной сетки – расстояние между соседними линиями координатной сетки. Шаг координатной сетки должен быть кратным 0,625 мм (0,625; 1,25; 1,875; 2,5 и т. д.).

Узел координатной сетки – точка пересечения линий координатной сетки.

Свободные места – участки печатной платы, где при размещении проводников могут быть выдержаны рекомендуемые значения ширины проводников и расстояния между проводниками и контактными площадками.

Узкие места – участки печатной платы, где при размещении проводников, ширина проводников, расстояния между ними и контактными площадками выполняются меньше рекомендуемых (вплоть до минимально допустимых).

Печатный блок – печатная плата с печатной схемой, навесными элементами и другими деталями, прошедшая все стадии изготовления.

Конструкторская документация на печатные платы и блоки оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 2.109-73, ГОСТ 2.417-68 и действующими нормативно-техническими документами. Чертеж печатной платы односторонней или двухсторонней классифицируется как чертеж детали. Чертеж печатной платы должен содержать все сведения, необходимые для ее изготовления и контроля: изображение печатной платы со стороны печатного монтажа, размеры, предельные отклонения и шероховатость поверхностей печатной платы и всех ее элементов (отверстий, проводников), а также размеры расстояний между ними, необходимые технические требования, сведения о материале.

Размеры каждой стороны печатной платы должны быть кратными 2,5 при длине до 100 мм, 5 при длине до 350 мм, 20 при длине более 350 мм. Максимальный размер любой из сторон печатной платы не должен превышать 470 мм. Соотношение линейных размеров сторон печатной платы должно быть не более 3 : 1 и выбирается из ряда 1 : 1; 1 : 2; 2 : 3; 2 : 5. Толщину печатных плат определяют исходя из

механических требований, предъявляемых к конструкции печатного блока, с учетом метода изготовления. Рекомендуются платы толщиной 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 мм. Чертежи печатных плат выполняют в натуральную величину или с увеличением 2 : 1; 4 : 1; 5 : 1; 10 : 1.

Разработку чертежа печатной платы начинают с нанесения координатной сетки. За основной шаг прямоугольной координатной сетки по ГОСТ 10317-79 принимается 2,5 мм. Для малогабаритной аппаратуры и в технически обоснованных случаях допускается применять шаги 1,25 и 0,5 мм.

Центры всех отверстий на печатной плате должны располагаться в узлах координатной сетки. Если из-за конструктивных особенностей навесного элемента этого сделать нельзя, то центры отверстий располагают согласно указаниям чертежа на этот элемент. Такое расположение центров отверстий используют для ламповых панелей, малогабаритных реле, разъемов и других элементов. При этом должны соблюдаться следующие требования: центр одного из отверстий, принятого за основное, должен быть расположен в узле координатной сетки; центры остальных отверстий нужно по возможности располагать на вертикальных или горизонтальных линиях координатной сетки.

Диаметры монтажных и переходных металлизированных и неметаллизированных отверстий выбирают из ряда (0,2); 0,4; (0,5); 0,6; (0,7); 0,8; (0,9); 1,0; (1,2); 1,3; 1,5; 1,8; 2,0; 2,2; (2,4); (2,6); (2,8); (3,0). Диаметры, не взятые в скобки, являются предпочтительными. Не рекомендуется на одной печатной плате иметь более трех различных диаметров отверстий. Диаметры металлизированных отверстий выбирают в зависимости от диаметров выводов навесных элементов и толщины платы, а диаметры неметаллизированных отверстий – в зависимости от диаметров выводов навесных элементов, устанавливаемых в эти отверстия (табл. 4.1). Необходимость зенковки монтажных и переходных отверстий диктуется конкретными конструкторскими требованиями и методом изготовления платы.

При применении других диаметров металлизированных отверстий по ГОСТ 10317-79 разница между диаметром металлизированного отверстия и диаметром вывода должна быть не более 0,4 мм для выводов диаметром от 0,4 до 0,8 мм и 0,6 мм для выводов диаметром свыше 0,8 мм.

Таблица 4.1

Значения диаметров отверстий

Номинальный диаметр монтажного неметаллизированного отверстия, мм	Номинальный диаметр монтажного и переходного металлизированного отверстия, мм	Максимальный диаметр вывода навесного элемента, мм
0,5	0,4	–
0,7	0,6	до 0,4
0,9	0,8	от 0,4 до 0,6 включительно
1,1	1,0	>>0,6 >> 0,8 >>
1,6	1,5	>> 0,8 >> 1,3 >>
2,1	2,0	>> 1,3 >> 1,7 >>

Все монтажные отверстия должны иметь контактные площадки. Форма контактной площадки может быть произвольной, круглой, прямоугольной или близкой к ним. Центр контактной площадки симметричной формы должен совпадать с центром монтажного отверстия. Для контактных площадок прямоугольной и овальной форм центр монтажного отверстия может быть смещен. Размер диаметра контактных площадок следует указывать в технических требованиях чертежа. Рекомендуется делать плавный переход контактной площадки в проводник. При этом ось симметрии печатного проводника должна быть перпендикулярна касательной к контуру контактной площадки или самому контуру контактной площадки. Расстояние между краем проводника контактной площадки неметаллизированного отверстия и краем платы должно быть не менее толщины платы. Печатные проводники следует изображать в виде отрезков линий, совпадающих с линиями координатной сетки, или под углом, кратным 15 градусам. Допускается выполнение проводников произвольной конфигурации и скругления перегибов проводников.

Печатные проводники следует выполнять одинаковой ширины на всем протяжении. В узких местах сужают проводники до минимально допустимых значений на возможно меньшей длине. Взаимное расположение проводников не регламентируется. При необходимости прокладки проводников шириной 0,3 – 0,4 мм на всем протяжении рекомендуется через 25 – 30 мм предусматривать расширение проводника типа контактной площадки.

При прокладке печатных проводников следует по возможности избегать ответвлений проводников; концы печатных проводников, предназначенные для подключения печатной схемы, рекомендуется располагать с учетом удобства применения переходных элементов. Границы участков печатной платы, которые не допускается занимать проводниками, ограничивают штрихпунктирной утолщенной линией.

4.2. Классификация печатных плат

Односторонняя печатная плата (ОПП) представляет собой диэлектрическое основание с отверстиями на одной стороне которого выполнен проводящий рисунок, а на другой, при сборке узла размещаются ИС и электро-радио элементы ЭРЭ. В связи с ограниченной площадью для трассировки рисунка схемы такие платы применяются для простых электронных устройств бытового или вспомогательного назначения.

Наиболее просты по конструкции и дешевы в изготовлении ОПП без металлических отверстий. Более сложны, но не более надежны в эксплуатации ОПП с металлическими отверстиями. В ОПП металлические отверстия служат для установки навесных ЭРЭ и ИС.

К металлическим отверстиям предъявляют жесткие требования по качеству исходной поверхности.

Двухсторонние печатные платы (ДПП) имеют проводящий рисунок на обеих сторонах основания. Необходимые соединения слоев выполняются с помощью металлических отверстий и контактных площадок. Они позволяют реализовать более сложные схемы. Металлические отверстия в ДПП выполняют функцию как монтажных для установки элементов, так и переходящих отверстий.

Иногда используют ДПП на металлическом основании с нанесенным на него изоляционным покрытием, что обеспечивает лучший теплоотвод при большей мощности рассеяния навесных элементов.

Многослойные печатные платы (МПП) состоят из чередующихся слоев изоляционного материала и проводимого рисунка. Между проводимыми слоями с помощью металлических отверстий осуществляется коммутация. Число слоев может достигать 10–15 и более. В них предъявляются жесткие требования по геометрической точности выполнения рисунка слоев и совмещения слоев.

В прил. Б приведен рисунок печатной платы для схемы измерительного усилителя, который рассматривался в разделе 3.

5. РАЗРАБОТКА СБОРОЧНОГО ЧЕРТЕЖА

Сборочный чертеж по ГОСТ 2.109-73 (СТ СЭВ 858-78, СТ СЭВ 1182-78) должен давать представление о расположении и взаимной связи соединяемых составных частей изделия и обеспечивать возможность осуществления сборки и контроля сборочной единицы. В соответствии с ГОСТ 2.108-68 к сборочному чертежу составляется спецификация, выполняемая на отдельных листах формата А4.

При выполнении сборочного чертежа следует применять упрощения и условности, допускаемые стандартами ЕСКД.

Различные мелкие элементы (фаски, скругления, проточки, углубления, выступы, накатки, насечки и т. п.), а также зазоры между стержнем и отверстием на чертеже не показываются.

Номера позиций наносятся в соответствии с требованиями ГОСТ 2.109-73 (СТ СЭВ 858-78, СТ СЭВ 1182-7).

На сборочном чертеже все составные части сборочной единицы нумеруют в соответствии с номерами позиций, указанными в спецификации (на чертеже общего вида – в соответствии с номерами позиций, указанными в таблице перечня составных частей изделия). Линия-выноска и полка проводятся сплошной тонкой линией. Номера сборочных единиц, деталей и тому подобных элементов наносятся над полками линий-выносок в соответствии с номерами позиций, указанными в спецификации. Линии-выноски не должны быть параллельными линиям штриховки, не должны пересекаться между собой и с размерными линиями.

Правила выполнения сборочных чертежей ГОСТ 2.109–73 предписывают на сборочном чертеже приводить размеры и другие параметры, проверяемые при сборке. Кроме того, должны быть указаны габаритные, установочные и присоединительные размеры, необходимые справочные размеры, а также координаты центра тяжести, если эти данные не указаны в другом конструкторском документе на эти изделия, например, на габаритном чертеже.

При указании установочных присоединительных размеров должны быть нанесены координаты расположения и размеры с предельными отклонениями элементов, служащих для соединения с сопрягаемыми изделиями, например: профиль и размеры шлицов гибкого валика генератора, их количество, покрытия шлицов.

На сборочном чертеже допускается изображать перемещающиеся части изделия в крайнем или промежуточном положении с указа-

нием соответствующих размеров, например, положение шестерни зацепления стартер-генератора.

Допускается на сборочном чертеже изделия помещать изображение пограничных изделий "обстановку" с размерами, определяющими их взаимное расположение. Составные части изделия, расположенные за "обстановку", изображают как видимые, а при необходимости – как невидимые. Предметы "обстановки" выполняют упрощенно. При необходимости на чертеже указывают наименования или обозначение предметов "обстановки" на изображении или линии – выноске. В разрезах и сечениях "обстановку" допускается не штриховать.

Сборочные чертежи необходимо выполнять, как правило, с упрощениями, соответствующими требованиям стандартов ЕСКД и настоящего стандарта.

На сборочном чертеже вычерчивают только внешние очертания типовых и покупных изделий, входящих в состав сборочной единицы, выполняя его упрощенно, без мелких деталей. Внутри такого изображения допускается проводить линии видимого контура (например, изображение подшипников качения).

В прил. Б приведен пример выполнения сборочного чертежа для измерительного усилителя, который обсуждался ранее.

6. МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ ELECTRONIC WORKBENCH (MULTISIM)

6.1. Общие сведения

При проектировании современных радиоэлектронных устройств невозможно обойтись без компьютерных методов разработки, ввиду сложности и объемности выполняемых работ. Создание радиоэлектронных устройств требует высокой точности и глубокого анализа, в связи с чем возникает необходимость применения на стадии проектирования современных программных средств.

Electronic Workbench (Multisim) используется в мире программного обеспечения для проектирования электрических схем, их тестирования и отладки. В комплект продуктов Electronic Workbench входят средства для описания электрических схем, их эмуляции (SPICE, VHDL и patented cosimulation), а также для разработки и автоматической трассировки печатных плат.

Возможности Multisim достаточно широки. Multisim позволяет подключать к схеме виртуальные приборы (осциллографы, генераторы сигналов, сетевые анализаторы и т. д.). Достоинство виртуальных приборов – это возможность увидеть результат с помощью имитации реальных событий.

Multisim оперирует с двумя категориями компонентов: реальными (real) и виртуальными (virtual). У реальных компонентов в отличие от виртуальных есть определённое, неизменяемое значение и своё соответствие на печатной плате. Виртуальные компоненты нужны только для эмуляции, им можно назначать произвольные параметры. В Multisim существуют также компоненты под названием интерактивные элементы, которые можно изменять во время эмуляции (переключатели, потенциометры и т. д.). При необходимости более сложного анализа в Multisim существует 15 различных функций. Некоторые примеры включают использование переменного тока, монте-карло, анализ наиболее неблагоприятных условий и Фурье. В Multisim входит Grapher – мощное средство просмотра и анализа данных эмуляции.

Multisim обладает широкой базой данных компонентов с заданными параметрами. Интерфейс программной среды Multisim представлен на рис. 6.1.

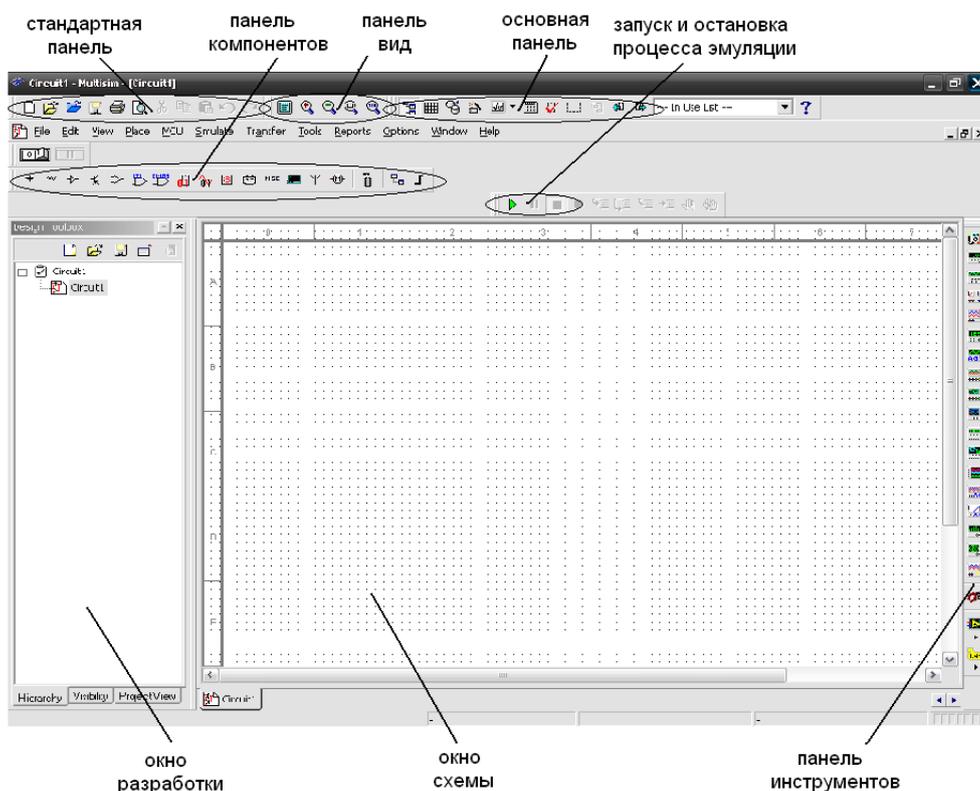


Рис. 6.1. Интерфейс программной среды Multisim

6.2. Пример выполнения моделирования

На рис. 6.2 приведена схема дифференциального усилителя, который рассматривался в разделе 3, а на рис. 6.3 представлены показания виртуального осциллографа.

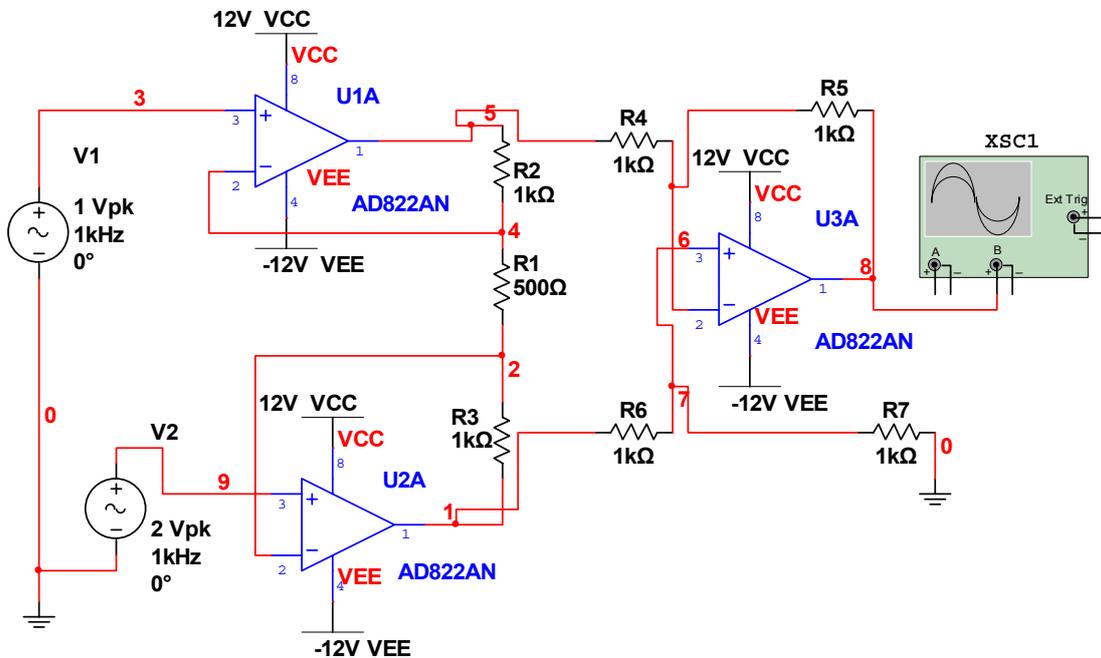


Рис. 6.2. Схема дифференциального усилителя в Multisim

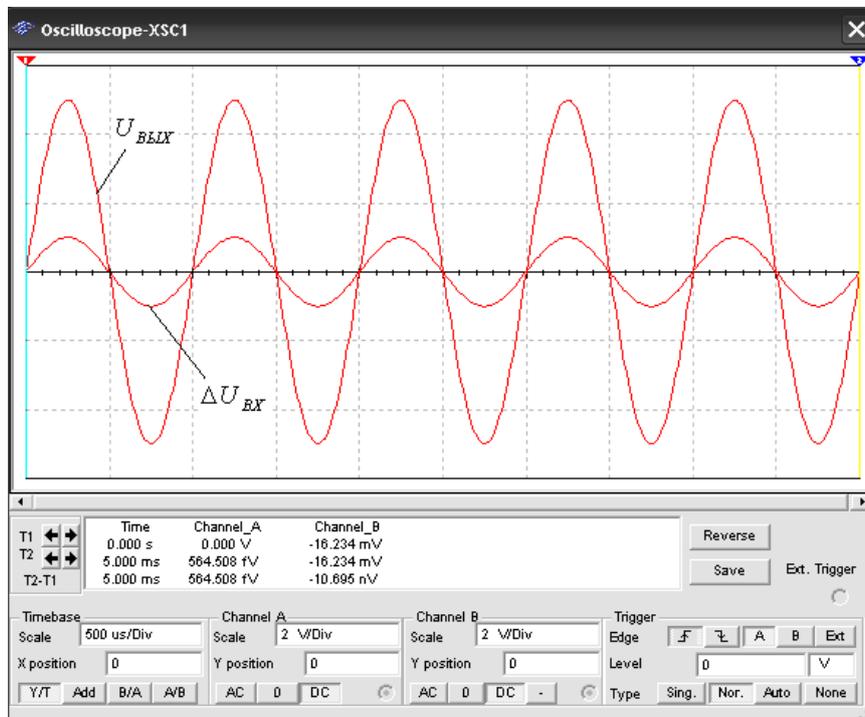


Рис. 6.3. Показания виртуального осциллографа XSC1

Напряжение на выходе дифференциального усилителя можно определить по следующей формуле:

$$U_{\text{вых}} = (U_2 - U_1) \frac{R_5}{R_4} \left(\frac{R_2 + R_3}{R_1} + 1 \right) = (2B - 1B) \frac{1\text{кОм}}{1\text{кОм}} \left(\frac{1\text{кОм} + 1\text{кОм}}{0,5\text{кОм}} + 1 \right) = 5B.$$

Вывод: Результаты теоретического расчёта полностью совпадают с результатами моделирования в среде Multisim (рис. 6.3).

Порядок выполнения моделирования студентом

1. Собрать и отладить разработанную схему измерительного устройства в программной среде Multisim.
2. С помощью виртуальных измерительных приборов (панель инструментов рис. 6.1) определить значения токов, напряжений и сопротивлений в расчётных точках схемы. Для контроля уровней токов и напряжений можно воспользоваться инструментом «пробник» (Measurement Probe). Входные и выходные сопротивления операционных усилителей можно определить с помощью виртуального мультиметра (Agilent multimeter).
3. Сравнить результаты теоретических расчётов, проведённых в предыдущих разделах, с результатами, полученными путём моделирования в среде Multisim, и сделать соответствующие выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое операционный усилитель? Назовите его разновидности, основные параметры и области применения.
2. Постройте схемы инвертирующего, неинвертирующего и дифференциального усилителей. Выведите формулы расчёта входных и выходных значений напряжений, токов, сопротивлений, коэффициента усиления для различных схем включения.
3. Что такое напряжение смещения ОУ и температурный дрейф? Назовите известные вам способы компенсации напряжения смещения ОУ и в чём сущность каждого способа?
4. В чём заключается частотная коррекция ОУ?
5. Что такое компараторы напряжения? Их классификация. Основные параметры. Что такое регенераторный компаратор?
6. Назовите недостатки построения компараторов на базе ОУ.
7. Назовите способы включения датчиков в измерительную цепь. Преимущества и недостатки каждого способа.
8. Классификация схем, их обозначения и основные требования к выполнению?
9. Назовите критерии выбора источника питания. Их типы и основные характеристики.
10. Из каких соображений выбираются стабилизаторы напряжения?
11. Что такое коэффициент пульсаций?
12. Поясните, почему применение однополупериодной схемы выпрямления невыгодно?
13. Какое обратное напряжение должны выдерживать диоды?
14. Из каких соображений выбираются конденсаторы сглаживающих фильтров?
15. Что такое трансформатор и на чём основана его работа?
16. Чем определяется мощность трансформатора. Что такое КПД трансформатора?
17. Назовите основные требования к выполнению печатного монтажа (диаметры монтажных и переходных отверстий, толщина печатных проводников и т. д.). Классификация печатных плат.
18. Поясните назначение основных панелей программной среды Electronic Workbench (Multisim).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Варианты заданий на курсовую работу

Номер задания	Тип ОУ*	Датчик**	Диапазон срабатывания, $\Delta T - ^\circ C$; $\Delta P - кПа$	Потребности нагрузочной цепи, $I_{наг}$ (А)
1	1	1	$\Delta T(-20 \div +150)$	0,5
2	2	2	$\Delta T(0 \div +95)$	1
3	3	3	$\Delta T(40 \div +325)$	1,5
4	4	4	$\Delta T(-20 \div +80)$	2
5	5	5	$\Delta T(-200 \div 0)$	0,5
6	6	6	$\Delta T(-150 \div -25)$	1
7	7	7	$\Delta T(-25 \div +25)$	1,5
8	8	8	$\Delta T(-20 \div +150)$	2
9	9	9	$\Delta T(0 \div +115)$	0,5
10	10	10	$\Delta T(0 \div +65)$	1
11	11	11	$\Delta P(1 \div 3,5)$	1,5
12	12	12	$\Delta P(2,5 \div 6,9)$	2
13	13	13	$\Delta P(10 \div 34)$	0,5
14	14	14	$\Delta P(67 \div 103)$	1
15	15	15	$\Delta P(138 \div 207)$	1,5
16	16	16	$\Delta P(344 \div 690)$	2
17	17	17	$\Delta P(1571 \div 1720)$	0,5

* соответствует номерам из табл. В9.

** соответствует номерам из табл. В1 и В2.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Примеры выполнения схем Схема электрическая принципиальная

ВлГУ.ХХХХХХ.ХХХ ЭЗ

Конт.	Цель
1	+U _н
2	Общий
3	Выход
4	+U _н
5	-U _н

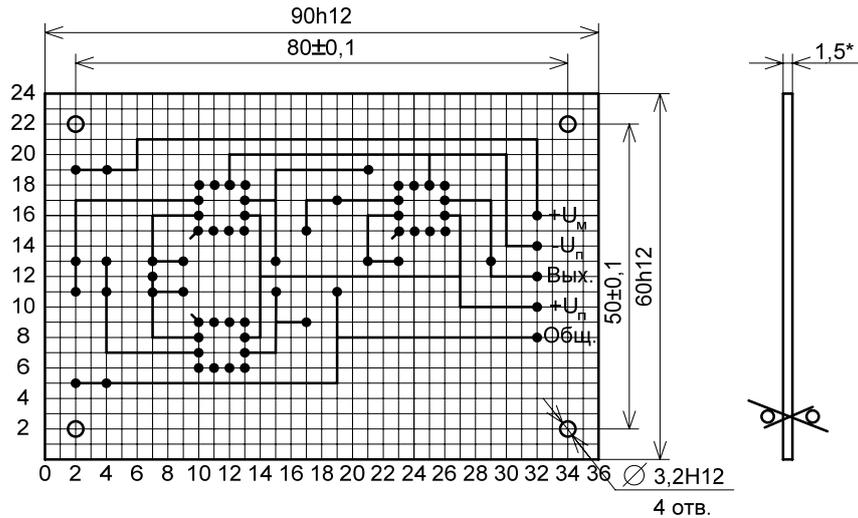
Поз. обозн.	Наименование	Кол.	Примечание
	Резисторы		
R1	МЛТ - 0,125 - 100 Ом	1	
R2, R3	МЛТ - 0,125 - 5,1 кОм	2	
R4	МЛТ - 0,125 - 10 кОм	1	
R5, R7	МЛТ - 0,125 - 51 кОм	2	
R6	МЛТ - 0,125 - 10 кОм	1	
aR	СПЗ-30а - 6,8 кОм	1	
Rx	ММТ-8 - 100 Ом	1	
	Полупроводниковые элементы		
DA1,2,3	К153УД4	3	

ВлГУ.ХХХХХХ.ХХХ ЭЗ				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.				
Пров.				
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				

Измерительный усилитель Схема электрическая принципиальная			Лит.	Масса	Масш.
			Лист	Листов	

Печатная плата измерительного усилителя

ВлГУ ХХХХХХ.001

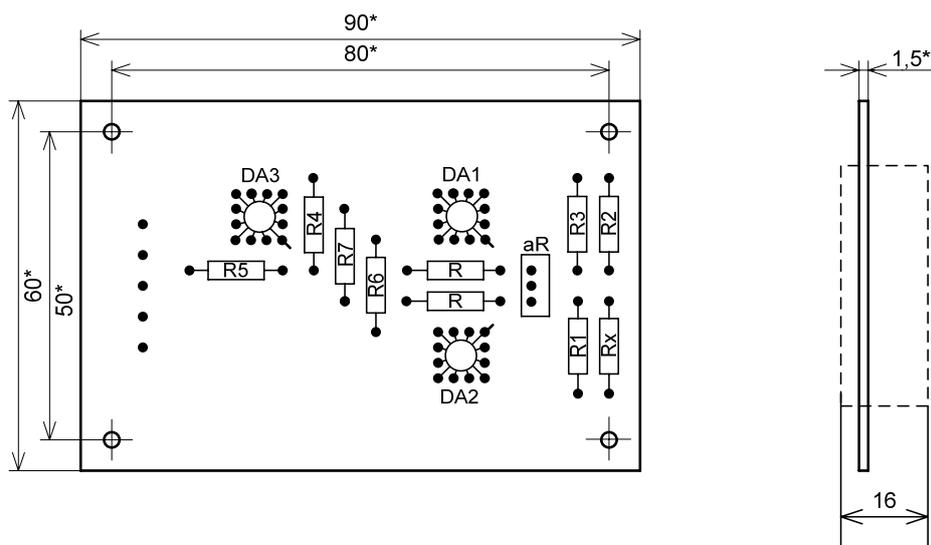


- 1.* Размеры для справок.
2. Плата должна соответствовать ГОСТ 23751-86, класс точности 1.
3. Группа жесткости 1 по ГОСТ 23752-79.
4. Шаг координатной сетки 2,5 мм.
5. Диаметр монтажных отверстий 0,8 мм.
6. Ширина проводников 1 мм.
7. Диаметр контактных площадок 1,2 мм.
8. Проводники и контактные площадки покрыть слоем припоя олово-свинец ПОС-61 ГОСТ 21931-76.
9. Маркировку производить шрифтом размером 2,5 мм.
10. Остальные технические требования по ОСТ4.ГО.070.014.

				ВлГУ ХХХХХХ.001			
				Плата печатная			
Изм.	Лист.	№ докум.	Подп.	Дата.	Лит.	Масса.	Масш.
Разрб.							1:1
Пров.					Лист		Листов 1
Т. контр.					П-XXX		
Н. контр.					Стеклотекстолит		
Утв.					СФ-1-35г-1,5 ГОСТ10316-78		

Сборочной чертёж измерительного усилителя

ВлГУ ХХХХХХ.001 СБ



- 1.* Размеры для справок.
2. Установку элементов производить по ОСТ 4.010.030-81, шаг координатной сетки 2,5.
3. Позиционные обозначения элементов показаны условно.
4. Паять припоем ПОС-61 ГОСТ 21931-76.
5. Обозначения элементов соответствуют схеме ВлГУ ХХХХХХ.ХХХ ЭЗ.
6. Плату после сборки покрыть лаком Лак НЦ-134, кроме монтажных выводов.
7. Остальные технические требования по ОСТ4.ГО.070.015.

					ВлГУ ХХХХХХ.001 СБ		
					Измерительный усилитель сборочный чертёж		
Изм.	Лист.	№ докум.	Подп.	Дата.			
	Разрб.						1:1
	Пров.				Лист	Листов 1	
	Т. контр.				П-ХХХ		
	Н. контр.						
	Утв.						

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Некоторые справочные данные

Таблица В1

Основные параметры терморезистивных датчиков

№ п/п	Тип датчика	Диапазон измерения, °C	Чувствительность, Ом/°C	Сопротивление при $T = +20$ °C, Ом
1	ИС-321	-50...+1000	0,063	16
2	ИС-321А	-50...+500	0,106	27
3	ИС-321В	-50...+750	0,072	18,35
4	ИС-321Г	-50...+350	0,144	36,70
5	ИС-533	-254...+20	2,310	539,6
6	ИС-543В	±200	0,428	100
7	ИС-544Б	±200	0,053	12,35
8	ИС-545В	-200...+300	0,194	49,62
9	ИС-567	-196...+200	0,278	65
10	ИС-568А	-215...+300	0,418	107,87

Таблица В2

Основные параметры датчиков давления

№ п/п	Тип датчика	Максимальное рабочее давление, кПа	Чувствительность, мВ/кПа	Напряжение питания, В
11	24РСЕ	3,5	10	10
12	24РСА/26РСА	6,9	6,5	10
13	24РСВ/26РСВ	34	3,3	10
14	24РСС/26РСС	103	2,2	10
15	24РСД/26РСД	207	1,6	10
16	24РСФ/26РСФ	690	0,33	10
17	24РСГ	1720	0,12	10

Таблица В3

Основные электрические параметры микросхем –
стабилизаторов серии 142

Микросхема	$U_{вх}$, В (min...max)	$U_{вых}$, В	$I_{вых\max}$, А	$K_{сгп}$
КР142ЕН5А	7,5...15	5	3	100
КР142ЕН5Б	8,5...15	6	3	100
КР142ЕН5В	7,5...15	5	2	100
КР142ЕН5Г	8,5...15	6	2	100
КР142ЕН8А	11,5...35	9	1,5	32
КР142ЕН8Б	14,5...35	12	1,5	32
КР142ЕН8В	17,5...35	15	1,5	32
КР142ЕН8Г	11,5...35	9	1	32
КР142ЕН8Д	14,5...35	12	1	32
КР142ЕН8Е	17,5...35	15	1	32
К142ЕН9А	23...45	20	1,5	32
К142ЕН9Б	27...45	24	1,5	32
К142ЕН9В	30...45	27	1,5	32

Таблица В4

Параметры полупроводниковых стабилитронов

Тип	$U_{ст}$ (В)	$I_{ст\min}$ (мА)	$I_{ст\max}$ (мА)	$r_{ст}$ (Ом)
Д814А	8	3	40	6
Д814Б	9	3	36	10
Д814В	10	3	32	12
Д814Г	11	3	29	15
Д814Д	13	3	24	18
Д815А	5,6	50	1400	0,6
Д815Б	6,8	50	1150	0,8
Д815В	8,2	50	950	1,0
Д815Г	10	25	800	1,8
Д815Д	12	25	650	2,0
Д815Е	15	25	550	2,5
Д815Ж	18	25	450	3,0
Д816А	22	10	230	7,0
Д816Б	27	10	180	8,0
Д816В	33	10	150	10
Д816Г	39	10	130	12
Д816Д	47	10	110	15
Д817А	56	5	90	35
Д817Б	68	5	75	40
Д817В	82	5	60	45

Окончание табл. В4

Тип	U_{cm} (В)	$I_{cm.мин}$ (мА)	$I_{cm.макс}$ (мА)	r_{cm} (Ом)
Д817Г	100	5	50	50
КС133А	3,3	3	81	65
КС139А	3,9	3	70	60
КС147А	4,7	3	58	56
КС156А	5,6	3	55	46
КС168А	6,8	3	45	28
КС175Ж	7,5	0,5	17	40
КС182Ж	8,2	0,5	15	40
КС191Ж	9,1	0,5	14	40
КС210Ж	10	0,5	13	40
КС211Ж	11	0,5	12	40
КС212Ж	12	0,5	11	40
КС213Ж	13	0,5	10	40
КС215Ж	15	0,5	8,3	70
КС216Ж	16	0,5	7,3	70
КС218Ж	18	0,5	6,9	70
КС220Ж	20	0,5	6,2	70
КС222Ж	22	0,5	5,7	70
КС224Ж	24	0,5	5,2	70
КС482А	8,2	1	96	25
КС510А	10	1	79	25
КС512А	12	1	67	25
КС515А	15	1	53	25
КС518А	18	1	45	25
КС522А	22	1	37	25
2С524А	24	1	33	30
КС527А	27	1	30	40
2С530А	30	1	27	45
КС533А	33	3	17	40
2С536А	36	1	23	50
КС551А	51	1	14,6	200
КС591А	91	1	8,8	400
КС600А	100	1	8,1	450
КС620А	120	5	42	150
КС630А	130	5	38	180
КС650А	150	2,5	33	255
КС680А	180	2,5	28	330

Параметры транзисторов

Тип	$I_{к.макс}, А$	$U_{кэ.макс}, В$	$h_{21Э}$	$U_{кэ.нас}, В$
n-p-n				
КТ815А	1,5	40	40...70	0,6
КТ815Б	1,5	50	40...70	0,6
КТ815В	1,5	70	40...70	0,6
КТ815Г	1,5	100	30...70	0,6
КТ704А	2,5	500	10...100	5
КТ704Б	2,5	400	10...100	5
КТ704В	2,5	400	10...100	5
КТ817А	3	40	30	0,6
КТ817Б	3	45	30	0,6
КТ817В	3	60	30	0,6
КТ817Г	3	100	30	0,6
КТ805А	5	160	15	2,5
КТ805Б	5	135	15	5
p-n-p				
КТ814А	1,5	40	40	0,6
КТ814Б	1,5	50	40	0,6
КТ814В	1,5	70	40	0,6
КТ814Г	1,5	100	30	0,6
КТ816А	3	40	25	0,6
КТ816Б	3	45	25	0,6
КТ816В	3	60	25	0,6
КТ816Г	3	100	25	0,6
КТ837А	7,5	70	10...40	2,5
КТ837Б	7,5	70	20...80	2,5
КТ837В	7,5	70	50...150	2,5
КТ837Г	7,5	55	10...40	0,5
КТ837Д	7,5	55	20...80	0,5
КТ837Е	7,5	55	50...150	0,5
КТ837Ж	7,5	40	10...40	2,5

Таблица В6

Параметры полупроводниковых диодов

Тип	$I_{np.cр}$ (А)	$I_{np.u}$ (А)	$U_{обр.}$ (В)	U_{np} (В)
МД217	0,1	8	800	1,0
МД218	0,1	8	1000	1,0
МД218А	0,1	8	1200	1,1
МД226	0,3	2,5	300	1,0
МД226А	0,3	2,5	200	1,0
МД226Е	0,3	2,5	150	1,0
Д237А	0,3	5	200	1,0
Д237Б	0,3	5	400	1,0
Д237В	0,1	5	600	1,0
Д237Е	0,4	5	200	1,0
Д237Ж	0,4	5	400	1,0
Д242	10	30	100	1,25
Д242А	10	30	100	1,0
Д242Б	5	15	100	1,5
Д243	10	30	200	1,25
Д243А	10	30	200	1,0
Д243Б	5	15	200	1,5
Д245	10	30	300	1,25
Д245А	10	30	300	1,0
Д245Б	5	15	300	1,5
Д246	10	30	400	1,25
Д246А	10	30	400	1,0
Д246Б	5	15	400	1,5
Д247	10	30	500	1,25
Д247Б	10	30	500	1,5
Д248Б	5	15	600	1,5
КД102А	0,1	2	250	1
КД102Б	0,1	2	300	1
КД105Б	0,3	15	400	1
КД105В	0,3	15	600	1
КД105Г	0,3	15	800	1
КД202А	5	9	50	0,9
КД202В	5	9	100	0,9
КД202Д	5	9	200	0,9
КД202Ж	5	9	300	0,9
КД202К	5	9	400	0,9
КД202М	5	9	500	0,9
КД202Р	5	9	600	0,9

Параметры полупроводниковых диодных блоков
(мостовой выпрямитель)

Тип	$I_{np.cр}$ (А)	$I_{np.u}$ (А)	$U_{обр.}$ (В)	U_{np} (В)
КЦ402А	1,0	5	600	1,2
КЦ402Б	1,0	5	500	1,2
КЦ402В	1,0	5	400	1,2
КЦ402Г	1,0	5	300	1,2
КЦ402Д	1,0	5	200	1,2
КЦ402Е	1,0	5	100	1,2
КЦ402Ж	0,6	5	600	1,2
КЦ402И	0,6	5	500	1,2
КЦ403А	1,0	5	600	1,2
КЦ403Б	1,0	5	500	1,2
КЦ403В	1,0	5	400	1,2
КЦ403Г	1,0	5	300	1,2
КЦ403Д	1,0	5	200	1,2
КЦ403Е	1,0	5	100	1,2
КЦ403Ж	0,6	5	600	1,2
КЦ403И	0,6	5	500	1,2
КЦ404А	1,0	5	600	1,2
КЦ404Б	1,0	5	500	1,2
КЦ404В	1,0	5	400	1,2
КЦ404Г	1,0	5	300	1,2
КЦ404Д	1,0	5	200	1,2
КЦ404Е	1,0	5	100	1,2
КЦ404Ж	0,6	5	600	1,2
КЦ404И	0,6	5	500	1,2
КЦ405А	1,0	5	600	1,2
КЦ405Б	1,0	5	500	1,2
КЦ405В	1,0	5	400	1,2
КЦ405Г	1,0	5	300	1,2
КЦ405Д	1,0	5	200	1,2
КЦ405Е	1,0	5	100	1,2
КЦ405Ж	0,6	5	600	1,2
КЦ405И	0,6	5	500	1,2
КЦ407А	0,5	3	500	2,5
КЦ410А	3	45	50	1,2
КЦ410Б	3	45	100	1,2
КЦ410В	3	45	200	1,2
КЦ412А	1	15	50	1,2
КЦ412Б	1	15	100	1,2

Таблица В8

Конденсаторы с оксидным диэлектриком

Тип	Номинальное напряжение, В	Номинальная емкость, мкФ	Допустимая амплитуда напряжения переменной составляющей, %
К50 – 6	6,3	5; 10; 20; 50; 100; 200; 500	20...25
	10	5; 10; 20; 50; 100; 200; 500; 1000; 2000; 4000	5...25
	16	1; 5; 10; 20; 50; 100; 200; 500; 1000; 2000; 4000	5...25
	25	1; 5; 10; 20; 50; 100; 200; 500; 1000; 2000; 4000	5...25
	50	1; 5; 10; 20; 50; 100; 200; 500; 1000; 2000; 4000	5...20
	100	1; 5; 10; 20	10...15
	160	1; 5; 10; 20	10
К50 – 7	160	20; 30; 50; 100; 200; 500	5...15
	250	10; 20; 30; 50; 100; 200	5...15
	300	5; 10; 20; 30; 50; 100; 200	3...10
	350	5; 10; 20; 30; 50; 100	3...10
	450	5; 10; 20; 30; 50; 100	3...10
К50 – 18	6,3	100000; 220000;	13...15
	10	100000	11...15
	16	22000; 68000; 100000	6...9
	25	15000; 33000; 100000	6...8
	50	4700; 10000; 15000; 22000	5...6
	80	4700; 10000; 15000	4...5
	100	2200; 4700; 10000	4...6
К50 – 20	6,3	10; 20; 50; 100; 200; 500; 1000; 2000; 5000	10...16
	16	2; 5; 10; 20; 50; 100; 200; 500; 1000; 2000	10...16
	25	2; 5; 10; 20; 50; 100; 200; 500; 1000; 2000	10...16
	50	1; 2; 5; 10; 20; 50; 100; 200; 500; 1000; 2000	3...16
	100	1; 2; 5; 10; 20; 50; 100; 200	10
	160	2; 5; 10; 20; 50; 100; 200	10
	250	20; 50	10
	300	2; 5; 10; 20; 50	10
	350	2; 5; 10; 20	10
	450	2; 5; 10; 20	10

Таблица В9

Справочные параметры операционных усилителей

Параметр	Тип операционного усилителя							
	К140УД1А КР140УД1А К140УД1Б	КР140УД1Б К140УД1В	КР140УД1В	К140УД2А	К140УД2Б	К140УД5А	К140УД5Б К140УД6А КР140УД6А	КР140УД608А К140УД6Б КР140УД6Б
	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{пит.ном}, В$	2×6,3	2×12,6	2×12,6	2×12,6	2×6,3	2×12	2×12	2×15
$I_{ном}, мА$	6	12	10	16	10	12	12	3
$K_U, \times 10^3$	0,5..4	1...12	8	35	3	0,5	1	70
$U_{см}, мВ$	7	7	9	5	5	10	7	5
$TKU_{см},$ мкВ/°С	20	20	60	35	35	35	10	20
$I_{вх}, нА$	5000	8000	10000	700	700	5000	10000	30
$\Delta I_{вх}, нА$	1500	1500	2800	150	150	1000	5000	10
$K_{ос.сф}, дБ$	60	60	60	70	70	50	60	80
$f_1, МГц$	3	8	5	1	1	5	10	1
$V_U, В/мкс$	0,2	0,5	3,5	0,2	0,2	6	6	2,5
$U_{вых.мах}, В$	2,5	5,7	5,7	10	3	6,5	6,5	12
$R_{вх}, МОм$	0,004	0,004	0,004	0,3	0,3	0,005	0,003	2
$U_{дф.мах}, В$	1,5	1,5	1,2	4	2	3	3	30
$U_{сф.мах}, В$	3	6	6	6	3	6	6	11
$R_{наг.min}, кОм$	5	5	5	1	1	5	5	2

Продолжение табл. В9

Параметр	Тип операционного усилителя							
	КР140УД608Б	К140УД7	КР140УД708 К140УД8А	КР140УД8А К140УД8Б	КР140УД8Б К140УД8В	КР140УД8В	КР140УД9	К140УД10 К140УД11 КР140УД11
	9	10	11	12	13	14	15	16
$U_{пит.ном}, В$	2×15	2×15	2×15	2×15	2×15	2×15	2×12,6	2×15
$I_{ном}, мА$	3	2,8	2,8	5	5	5	8	10
$K_U, \times 10^3$	50	50	50	50	50	9	35	50
$U_{см}, мВ$	8	9	9	20	100	150	5	5
$TKU_{см},$ мкВ/°С	135	10	300	50	100	150	20	50
$I_{ex}, нА$	50	200	400	0,2	0,2	0,2	350	250
$\Delta I_{ex}, нА$	15	50	200	0,1	0,1	0,1	100	70
$K_{ос.сф}, дБ$	70	70	70	70	70	70	80	70
$f_1, МГц$	1	0,8	0,8	1	1	1	1	15
$V_U, В/мкс$	12	0,3	0,3	2	10	2	0,2	30
$U_{вых.мах}, В$	12	10,5	10,5	10	10	10	10	12
$R_{ex}, МОм$	1	0,4	0,4	10	10	10	0,3	0,4
$U_{дф.мах}, В$	30	20	7	6	6	6	4	4
$U_{сф.мах}, В$	11	12	12	10	10	10	7	6
$R_{наг.min}, кОм$	2	2	2	2	2	2	1	2

Продолжение табл. В9

Параметр	Тип операционного усилителя							
	КР140УД1101	К140УД13 К140УД14А	КР140УД1408А К140УД14Б	КР140УД1408Б	К140УД17А	К140УД17Б	КР140УД20	К140УД22 К153УД1А К553УД1А
	17	18	19	20	21	22	23	24
$U_{пит.ном}, В$	2×15	2×15	2×15	2×15	2×15	2×15	2×15	2×15
$I_{ном}, мА$	8	2	1	1	5	5	3	10
$K_U, \times 10^3$	30	10	50	25	300	200	50	100
$U_{см}, мВ$	10	0,05	5	5	0,025	0,075	5	10
$TKU_{см},$ мкВ/°С	50	1	20	20	0,6	1,3	20	0,6
$I_{вх}, нА$	500	0,5	5	5	2	3	100	1000
$\Delta I_{вх}, нА$	200	0,2	1	1	2	3	30	500
$K_{ос.сф}, дБ$	70	90	85	80	100	100	70	80
$f_1, МГц$	15	0,3	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	1
$V_U, В/мкс$	50	0,2	0,05	0,05	0,1	0,1	0,3	7,5
$U_{вых.мах}, В$	12	1	12	12	12	12	11	12
$R_{вх}, МОм$	0,4	50	30	10	30	30	0,4	0,4
$U_{дф.мах}, В$	10	10	13	13	15	15	10	20
$U_{сф.мах}, В$	11	13,5	13	13	13	13	12	10
$R_{наг.min}, кОм$	2	10	1	1	2	2	1	2

Параметр	Тип операционного усилителя							
	К553УД101А К153УД1Б К553УД1Б К553УД101Б К153УД1В К553УД1В К553УД101Б	К153УД2 К553УД2	К553УД201 К153УД3	К553УД3	К153УД4 К153УД5А	К553УД5А К153УД5Б	К553УД5Б	
	25	26	27	28	29	30	31	32
$U_{пит.ном}, В$	2×15	2×15	2×15	2×15	2×15	2×6	2×15	2×15
$I_{ном}, МА$	6	6	6	3	4	0,8	3,5	3,5
$K_U, \times 10^3$	15	10	25	25	25	5	1000	1000
$U_{см}, МВ$	7,5	7,5	2	7,5	2	5	2	2
$TKU_{см},$ мкВ/°С	30	30	30	30	15	50	10	10
$I_{вх}, НА$	1500	2000	200	1500	200	400	100	100
$\Delta I_{вх}, НА$	500	600	50	500	50	150	20	20
$K_{ос.сф}, дБ$	70	70	70	70	80	70	110	100
$f_1, МГц$	1	1	1	1	1	0,7	0,2	0,2
$V_U, В/мкс$	0,2	0,2	0,2	0,5	0,2	0,1	0,01	0,01
$U_{вых.мах}, В$	10	9	8	10	10	1	10	10
$R_{вх}, МОм$	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	1	1
$U_{дф.мах}, В$	5	5	5	30	5	2	5	5
$U_{сф.мах}, В$	8	8	8	12	8	5	13	13
$R_{наг.min}, кОм$	2	2	2	2	2	5	2	2

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Изьюрова, Г.И. Расчет электронных схем. Примеры и задачи: учеб. пособие для вузов по спец. электрон. техники / Г.И. Изьюрова, Г.В. Королев, В.А. Терехов и др. – М.: Высш. шк., 1987. – 335 с.
2. Пейтон, А.Дж. Аналоговая электроника на операционных усилителях / А. Дж. Пейтон, В. Волш. – М.: Бинوم, 1994. – 352 с.
3. Александров, К.К. Электротехнические чертежи и схемы / К.К. Александров, Е.Г. Кузьмина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.: – ISBN 5-283-00618-2.
4. Гутников, В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отделение, 1988. – 304 с.: – ISBN 5-283-04375.
5. Датчики теплофизических и механических параметров: справочник в трёх томах. Т. I / Под общ. ред. Ю.Н. Коптева. – М.: ИПРЖР, 1998. – 458 с.: – ISBN 5-88070-005-4.
6. Алексеенко, А.Г. Применение прецизионных аналоговых микросхем / А.Г. Алексеенко, Е.А. Коломбет, Г.И. Стародуб. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1985. – 304 с.
7. Артамонов, В.В. Маломощные выпрямители. Основы теории и расчёт. – М.: Связь, 1970. – 240 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Общие положения	4
1.1. Организация курсовой работы	4
1.2. Тематика курсовых работ	4
1.3. Объём и содержание курсовой работы	5
2. Теоретическая часть	6
2.1. Общие сведения об операционных усилителях	6
2.2. Компенсация напряжения смещения ОУ	14
2.3. Устойчивость к самовозбуждению ОУ	17
2.4. Общие сведения о компараторах	19
2.5. Расчёт схем с ОУ	24
3. Разработка электрической принципиальной схемы	32
3.1. Общие требования к выполнению схем	32
3.2. Электрические схемы	34
3.3. Пример расчёта и выполнения электрической принципиальной схемы ...	36
3.4. Выбор и расчёт источника питания схемы	41
4. Разработка печатной платы	52
4.1. Чертежи печатных плат	52
4.2. Классификация плат	56
5. Разработка сборочного чертежа	57
6. Моделирование в программной среде Electronic Workbench (Multisim)	58
6.1. Общие сведения	58
6.2. Пример выполнения моделирования	60
Контрольные вопросы	62
Приложение А	63
Приложение Б	64
Приложение В	68
Библиографический список	79

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ
НА БАЗЕ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ
Методические указания к курсовой работе по дисциплине
«Электроника и микропроцессорная техника»

Составитель
КЛИМЕНКОВ Юрий Сергеевич

Ответственный за выпуск – зав. кафедрой профессор В.П. Легаев

Подписано в печать
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 4,9. Тираж 100 экз.
Заказ
Издательство
Владимирского государственного университета.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.