

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»
Институт права, социального управления и безопасности
Кафедра информационной безопасности в управлении

УСИЛИТЕЛИ: МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «СХЕМОТЕХНИКА»



Ижевск,
2023

УДК 621.375(075.8)
ББК 32.846р30
У748

Рекомендовано к изданию Учебно-методическим Советом УдГУ

Рецензент: канд. тех. наук, доцент каф. электротехники, электрооборудования и электроснабжения ФГБОУ ВО «Удмуртский ГАУ» Т.А. Широбокова

Составители: Стерхова, Т.Н., Бас А.С.

У748 Усилители: методические рекомендации по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Схемотехника»: [Электрон. ресурс]. / сост. Т.Н. Стерхова, А.С. Бас. – Ижевск : Удмуртский университет, 2023. – 42 с.

В методических рекомендациях излагаются краткие сведения из теории, необходимые для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Схемотехника», порядок выполнения работы, указания по оформлению отчёта, контрольные вопросы для проверки усвоенного материала.

Методические рекомендации предназначены для обучающихся специальности 10.05.05 «Безопасность информационных технологий в правоохранительной сфере» и направления подготовки 10.03.01 «Информационная безопасность».

УДК 621.375(075.8)
ББК 32.846р30

© Т.Н. Стерхова, А.С. Бас, сост., 2023
© ФГБОУ ВО «Удмуртский
государственный университет», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Правила внутреннего распорядка и техники безопасности при выполнении работ в лаборатории «Специальная техника»	5
Оформление отчёта по лабораторным работам	7
Лабораторная работа № 1 «Изучение работы операционного усилителя»	8
Лабораторная работа № 2 «Основные схемы включения операционных усилителей»	26
Лабораторная работа № 3 «Исследование сумматоров на операционных усилителях»	39
Список литературы	42

ВВЕДЕНИЕ

Данные методические указания являются составной частью комплексов учебно-методического обеспечения курсов «Схемотехника» и «Электроника и схемотехника» кафедры информационной безопасности в управлении Института права, социального управления и безопасности ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет».

В описании приведены:

- теоретические сведения, необходимые для выполнения лабораторных работ;
- порядок выполнения работ;
- указания по оформлению отчета;
- контрольные вопросы для проверки усвоенного материала.

При выполнении лабораторных работ обучающиеся должны достичь следующих целей:

- получить практический опыт работы с электрооборудованием, а также чтения и сборки электрических схем;
- научиться снимать показания электроизмерительных приборов, обрабатывать полученные данные и на их основе делать выводы о характере исследуемых процессов;
- получить необходимые навыки оформления электротехнической документации на основе нормативной документации для составления отчетов по лабораторным работам;
- получить практический опыт по управлению электрическим оборудованием и технике безопасности при работе с ним.

Настоящее учебное издание составлено применительно к лаборатории «Специальная техника», рассчитанной на одну учебную группу.

Коллоквиум по проверке готовности обучающихся к выполнению лабораторной работы проводится в начале каждого занятия. Хорошая подготовка к лабораторной работе – неперемное условие ее эффективности, так как проведение любого эксперимента имеет смысл только в том случае, если экспериментатор отчетливо представляет себе цель эксперимента и характер ожидаемых результатов.

ПРАВИЛА ВНУТРЕННЕГО РАСПОРЯДКА И ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТ В ЛАБОРАТОРИИ «СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕХНИКА»

При работе в лаборатории «Специальная техника» во избежание несчастных случаев, а также преждевременного выхода из строя приборов и электрооборудования обучающийся при выполнении лабораторных работ должен строго соблюдать следующие правила внутреннего распорядка и техники безопасности:

1. Чтобы приступить к работе в лаборатории, обучающийся должен ознакомиться с правилами внутреннего распорядка и техники безопасности.

2. Обязанность обучающегося не только строго выполнять правила техники безопасности, но и требовать неуклонного их выполнения от своих товарищей.

3. Обучающийся обязан расписаться в соответствующем журнале после ознакомления с правилами внутреннего распорядка и инструктажа по технике безопасности.

4. Категорически запрещается приносить с собой вещи и предметы, загромождающие рабочие места, способствующие созданию условий, которые могут привести к нарушению правил техники безопасности при работе в лаборатории.

5. В лаборатории запрещено покидать рабочие места и переходить от одного стенда к другому, громко разговаривать.

6. Приступая к работе в лаборатории, происходит разделение студенческой группы на бригады, которые затем распределяются по лабораторным стендам.

7. Все работы по сборке электрической цепи, в том числе переключения и исправления, производятся в строгом соответствии со схемой, представленной в методических рекомендациях, при помощи соединительных проводов при выключенном напряжении питания, обеспечивая при этом надежность электрических контактов всех разъёмных соединений.

8. Соединительные провода при сборке электрической цепи не должны перегибаться и скручиваться петлями. Приборы и электрооборудование расставляются так, чтобы было удобно ими пользоваться.

9. Собранная электрическая цепь предъявляется для проверки преподавателю или учебному мастеру.

10. Только после разрешения и в присутствии преподавателя или учебного мастера (после проверки) в электрическую цепь подается напряжение.

11. При обнаружении неисправностей в электрической цепи, в электрическом оборудовании, в приборах стенда, а также появления дыма, специфического запаха или искрения необходимо выключить напряжение питания стенда и известить об этом преподавателя или учебного мастера.

12. Запрещается прикасаться пальцами, карандашами и другими предметами к оголенным токоведущим частям электрической цепи, находящимся под напряжением.

13. После выполнения лабораторной работы необходимо выключить напряжение питания стенда, разобрать исследуемую электрическую цепь и привести в порядок рабочее место.

14. В случае поражения человека электрическим током необходимо немедленно обесточить стенд, выключив напряжение питания. При потере сознания и остановке дыхания необходимо немедленно освободить пострадавшего от стесняющей его одежды и делать искусственное дыхание до прибытия врача.

ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Составление отчета о проведенных исследованиях является важнейшим этапом выполнения лабораторной работы. По каждой выполненной работе обучающимися в рабочей тетради составляется отчет, руководствуясь следующими положениями:

1. Указать название и порядковый номер лабораторной работы, а также кратко сформулировать цель работы.

2. Схемы и графики вычертить с помощью трафарета радиоинженера или циркуля и линейки с соблюдением принятых стандартных условных обозначений.

3. Графические зависимости дать в прямоугольной системе координат в масштабе, с равномерными шкалами; произвольный перенос начала координат не допускается; на графиках необходимо наносить экспериментальные точки.

4. Отчет по каждой лабораторной работе должен содержать основные выводы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

«ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ»

1.1. Цель работы

Ознакомление с характеристиками и параметрами операционных усилителей с обратной связью.

1.2. Вопросы для самопроверки

- 1) Укажите различия между инвертирующим и неинвертирующими входами.
- 2) Укажите характер и назначение каждой из цепей обратной связи.
- 3) Какие выводы содержит операционный усилитель, и для чего они предназначены?
- 4) Какими основными параметрами характеризуется операционный усилитель?
- 5) В чем причина возникновения напряжения смещения и входных токов в операционном усилителе?
- 6) Чем ограничивается входное напряжение операционного усилителя?
- 7) Почему для работы операционного усилителя необходимо наличие цепей ООС, и в чем их назначение?
- 8) Как измеряются основные параметры операционного усилителя?
- 9) Как рассчитываются коэффициенты усиления для различных схем включения операционного усилителя?

1.3. Краткие сведения из теории

Обратные связи в усилителях

Усилителем называют устройство для увеличения напряжения, тока или мощности электрического сигнала. Усилитель, рис. 1.1, имеет входную цепь, к которой подключается усиливаемый сигнал, и выходную цепь, с которой выходной сигнал подается в нагрузку. Основными параметрами усилителя являются коэффициенты усиления по напряжению K_U , току K_I и мощности K_P .

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}; K_I = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}}; K_P = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}} \cdot I_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}} \cdot I_{\text{ВХ}}}$$

Здесь U, I – действующие значения напряжения и тока.

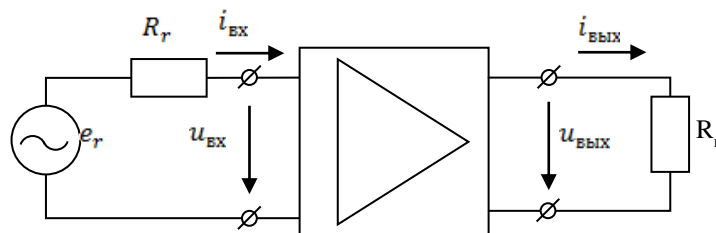


Рис. 1.1. Входные и выходные цепи усилителя

Для усилителя возможны различные значения коэффициентов усиления, но принципиально важно то, что коэффициент усиления по мощности K_P больше единицы. К усилителям с линейным режимом работы предъявляются требования получения выходного сигнала, близкого по форме к входному сигналу.

Введение обратной связи ОС призвано улучшить показатели усилителя или придать ему некоторые специфические свойства. Проанализируем общие закономерности, обуславливаемые введением обратных связей в усилитель. Обратная связь осуществляется подачей на вход усилителя сигнала с его выхода. Иллюстрацией усилителя с обратной связью служит структурная схема, приведенная на рис. 1.2. В общем случае усилитель без обратной связи характеризуется комплексным коэффициентом передачи $\dot{K} = K(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}$, где $K(\omega)$ — амплитудно-частотная, а $\varphi(\omega)$ — фазо-частотная характеристики усилителя. Комплексный коэффициент передачи звена обратной связи $\dot{\beta}_{ос} = \beta_{ос}(\omega) \cdot e^{j\varphi_{ос}(\omega)}$.

Если при наличии обратной связи входное напряжение $U_{вх}$ складывается с напряжением обратной связи $U_{ос}$, в результате чего на усилитель подается увеличенное напряжение U_1 , то ОС называется положительной. Если из $U_{вх}$ вычитается $U_{ос}$, и результирующий сигнал на выходе усилителя уменьшается, то обратная связь называется отрицательной.

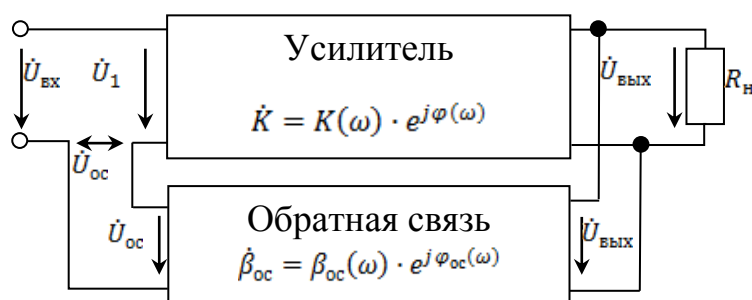


Рис. 1.2. Структурная схема усилителя с обратной связью

В усилителях применяются различные виды обратных связей. Вид обратной связи зависит от параметра выходного сигнала (напряжения или тока), используемого для создания обратной связи, и способа подачи обратной связи на вход усилителя. В связи с этим различают обратную связь по напряжению $\dot{U}_{ос} = \dot{\beta}_{ос} \cdot \dot{U}_{ввых}$ и по току $\dot{U}_{ос} = \dot{\beta}_{ос} \cdot \dot{I}_{ввых}$. Возможна и комбинированная обратная связь, т.е. одновременно как по напряжению, так и по току.

При подаче напряжения обратной связи с выхода четырехполюсника $\beta_{ос}$ последовательно с напряжением источника входного сигнала обратную связь называют последовательной. Когда же напряжение обратной связи подается на вход усилителя параллельно напряжению источника входного сигнала, обратная связь является параллельной.

Отрицательная обратная связь позволяет улучшить некоторые показатели усилителя, в связи с чем она нашла преимущественное применение. Оценку влияния обратной связи на показатели усилителя рассмотрим на примере схемы с последовательной обратной связью по напряжению, рис. 1.2.

Определим коэффициент усиления усилителя $\dot{K}_{оос} = \dot{U}_{ввых} / \dot{U}_{вх}$. В соответствии с рис. 1.2.

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{вх} - \dot{U}_{оос}; \dot{U}_{оос} = \dot{\beta}_{оос} \cdot \dot{U}_{ввых} \Rightarrow \dot{U}_{вх} = \dot{U}_1 + \dot{\beta}_{оос} \cdot \dot{U}_{ввых}$$

$$\dot{U}_{ввых} = \dot{K} \cdot \dot{U}_1 \Rightarrow \dot{K}_{оос} = \frac{\dot{U}_{ввых}}{\dot{U}_{вх}} = \frac{\dot{K}}{1 + \dot{K} \cdot \dot{\beta}_{оос}}$$

Для положительной обратной связи:

$$\dot{K} = \frac{\dot{K}}{1 - \dot{K} \cdot \dot{\beta}_{оос}}$$

Введение ООС уменьшает коэффициент усиления в $1 + \dot{K} \cdot \dot{\beta}_{оос}$ раз.

Оценим стабильность коэффициента усиления усилителя с ООС. С этой целью продифференцируем выражение $U_{ввых}$

$$\frac{d\dot{K}_{оос}}{\dot{K}} = \frac{(1 + \dot{K} \dot{\beta}_{оос}) - \dot{K} \cdot \dot{\beta}_{оос}}{(1 - \dot{K} \dot{\beta}_{оос})^2} = \frac{1}{(1 - \dot{K} \dot{\beta}_{оос})^2}$$

Умножив левую и правую части на \dot{K} и учтя соотношение $U_{ввых}$, получим выражение для относительных изменений коэффициентов усиления:

$$\frac{d\dot{K}_{оос}}{\dot{K}_{оос}} = \frac{(1 + \dot{K} \dot{\beta}_{оос}) - \dot{K} \dot{\beta}_{оос}}{(1 - \dot{K} \dot{\beta}_{оос})^2} = \frac{d\dot{K} / \dot{K}}{1 - \dot{K} \dot{\beta}_{оос}}$$

Из выражения $\dot{K} = \frac{\dot{K}}{1 - \dot{K} \cdot \dot{\beta}_{оос}}$ следует, что относительное изменение коэффициента усиления усилителя с ООС в $1 + \dot{K} \cdot \dot{\beta}_{оос}$ раз меньше относительного изменения коэффициента усиления усилителя без обратной связи. При этом стабильность коэффициента усиления повышается с увеличением глубины обратной связи, т.е. величины $1 + \dot{K} \cdot \dot{\beta}_{оос}$. Если, например, предположить, что относительное изменение коэффициента усиления усилителя без ООС $d\dot{K} / \dot{K} = 20\%$ и $1 + \dot{K} \cdot \dot{\beta}_{оос} = 100$, то относительное изменение коэффициента усиления усилителя с ООС $d\dot{K}_{оос} / \dot{K}_{оос}$ составит всего $0,2\%$.

При большом коэффициенте усиления \dot{K} и глубокой ООС удастся практически полностью исключить зависимость коэффициента усиления усилителя от изменения его параметров. Введение ООС повышает входное сопротивление усилителя $R_{вх оос} = R_{вх} \cdot (1 + \dot{K} \cdot \dot{\beta}_{оос})$, снижает его выходное сопротивление $R_{ввых оос} = R_{вх} / (1 + \dot{K} \cdot \dot{\beta}_{оос})$, и расширяет полосу пропускания.

Коэффициент усиления операционного усилителя (ОУ) без обратной связи обычно составляет $10^3 - 10^6$ и теоретически может считаться бесконечно большим. Мгновенное значение напряжения на выходе ОУ пропорционально разности мгновенных напряжений между его входами и не превышает напряжения питания.

Основная схема включения ОУ в качестве инвертирующего усилителя приведена на рис. 1.3. Коэффициент усиления схемы:

$$K = -\frac{R_2}{R_1}$$

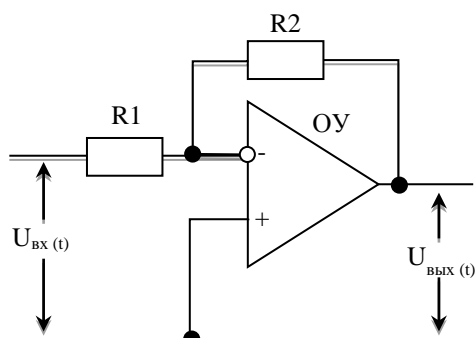


Рис. 1.3. Инвертирующий усилитель

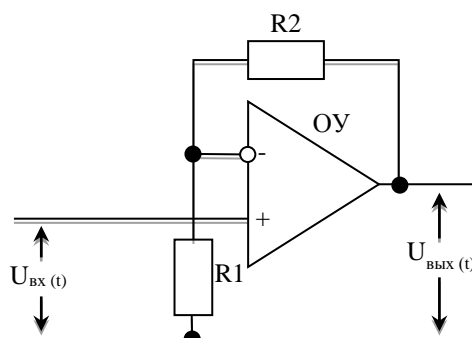


Рис. 1.4. Неинвертирующий усилитель

Поскольку напряжение на выходе ОУ не превышает напряжение питания:

$$|U_{ВЫХ\ МАКС}| \leq |U_{ПИТ}|$$

Усилитель работает в линейном режиме без ограничения при

$$|U_{ВХ}(t) \cdot K| < |U_{ПИТ}|$$

Максимальное входное напряжение, при котором обеспечивается линейный режим работы усилителя

$$U_{ВХ\ МАКС}(t) = \frac{|U_{ПИТ}|}{|K|}$$

Основная схема включения ОУ в качестве неинвертирующего усилителя приведена на рис. 1.4. Коэффициент усиления схемы:

$$K = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

На рис. 1.5. приведена принципиальная схема суммирующего усилителя.

Если $R_1 = R_2 = R_3$, то $U_{ВЫХ} = -(U_1 + U_2)$.

Если входные резисторы неодинаковые, например $R_1 = R_3 = 2R_2$, то получается взвешенная сумма: $U_{ВЫХ} = -(U_1 + 2U_2)$.

Если необходимо получить $U_{\text{ВЫХ}} = + (U_1 + 2U_2)$, напряжение с выхода сумматора подают на вход инвертирующего усилителя, у которого $K = -1$ (рис. 1.5).

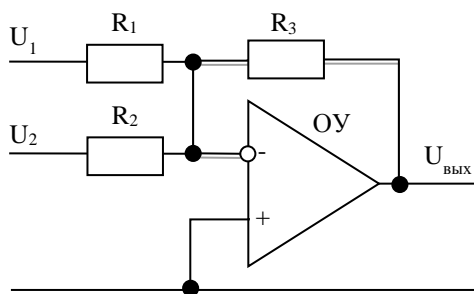
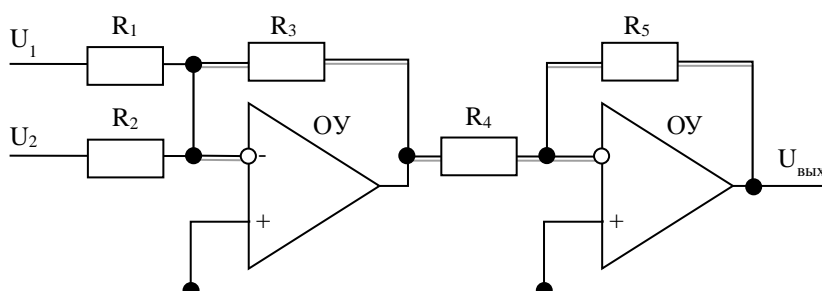


Рис. 1.5. Принципиальная схема суммирующего усилителя



1.6. Принципиальная схема суммирующего усилителя с инвертором

Примеры использования усилителей в ТКУИ

А. Вибрационный технический канал утечки информации.

Средой распространения акустических сигналов являются конструкции зданий, сооружений (стены, потолки, полы), трубы водоснабжения, отопления, канализации и другие твердые тела. Для перехвата акустических колебаний в этом случае используются контактные микрофоны (стетоскопы).

Контактные микрофоны, соединенные с электронным усилителем, называют электронными стетоскопами. По вибрационному каналу также возможен перехват информации с использованием закладных устройств. В основном для передачи информации используется радиоканал, поэтому такие устройства часто называют радиостетоскопами. Возможно использование закладных устройств с передачей информации по оптическому каналу в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн, а также по ультразвуковому каналу (по металлоконструкциям здания).

Б. Электроакустические технические каналы утечки информации.

Возникают за счет электроакустических преобразований акустических сигналов в электрические и включают перехват акустических колебаний через ВТСС, обладающие «микрофонным эффектом», а также путем «высокочастотного навязывания».

Некоторые элементы ВТСС, в том числе трансформаторы, катушки индуктивности, электромагниты вторичных электрочасов, звонков телефонных аппаратов, дроссели ламп дневного света, электрореле и т.п., обладают свойством изменять свои параметры (емкость, индуктивность, сопротивление) под действием акустического поля, создаваемого источником акустических колебаний.

Изменение параметров приводит либо к появлению на данных элементах электродвижущей силы (ЭДС), изменяющейся по закону воздействующего информационного акустического поля, либо к модуляции токов, протекающих по этим элементам, информационным сигналом. Например, акустическое поле, воздействуя и на якорь электромагнита вызывного телефонного звонка, вызывает его колебание. В результате чего изменяется магнитный поток сердечника электромагнита. Изменение этого потока вызывает появление ЭДС самоиндукции в катушке звонка, изменяющейся по закону изменения акустического поля. ВТСС, кроме указанных элементов, могут содержать непосредственно электроакустические преобразователи.

К таким ВТСС относятся некоторые датчики пожарной сигнализации, громкоговорители ретрансляционной сети и т.д.

Эффект электроакустического преобразования акустических колебаний в электрические часто называют «микрофонным эффектом». Причем из ВТСС, обладающих «микрофонным эффектом», наибольшую чувствительность к акустическому полю имеют абонентские громкоговорители и некоторые датчики пожарной сигнализации. Перехват акустических колебаний в данном канале утечки информации осуществляется путем непосредственного подключения к соединительным линиям ВТСС, обладающих «микрофонным эффектом», специальных высокочувствительных низкочастотных усилителей.

Например, подключая такие средства к соединительным линиям телефонных аппаратов с электромеханическими вызывными звонками, можно прослушивать разговоры, ведущиеся в помещениях, где установлены эти аппараты.

Технический канал утечки информации путём «высокочастотного навязывания» может быть осуществлен посредством несанкционированного контактного введения токов высокой частоты от соответствующего генератора в линии (цепи), имеющие функциональные связи с нелинейными или параметрическими элементами ВТСС, на которых происходит модуляция высокочастотного сигнала информационным.

Информационный сигнал в данных элементах ВТСС появляется вследствие электроакустического преобразования акустических сигналов в электрические.

В силу того, что нелинейные или параметрические элементы ВТСС для высокочастотного сигнала, как правило, представляют собой несогласованную нагрузку, промодулированный высокочастотный сигнал будет отражаться от нее

и распространяться в обратном направлении по линии или излучаться. Для приема излученных или отраженных высокочастотных сигналов используются специальные приемники с достаточно высокой чувствительностью. Для исключения влияния зондирующего и переотраженного сигналов могут использоваться импульсные сигналы.

Наиболее часто такой канал утечки информации используется для перехвата разговоров, ведущихся в помещении, через телефонный аппарат, имеющий выход за пределы контролируемой зоны. Для исключения воздействия высокочастотного сигнала на аппаратуру АТС в линию, идущую в ее сторону, устанавливается специальный высокочастотный фильтр.

Традиционными областями применения ОУ является решающая аналоговая техника, аппаратура обработки сигналов, радиовещательные устройства и др., в которых часто требуется выполнение операторных уравнений при замыкании выхода ОУ на инвертирующий вход с помощью пассивных цепей отрицательной обратной связи.

Сумматор

На вход подаются через R_1, R_2, R_3 входные сигналы $U_{и1}, U_{и2}, U_{и3}$.

Кроме того, в точку P через R_{oc} подается часть выходного напряжения $U_{вых}$.

Суммарное напряжение на входе усилителя (в точке P) определяется равенством (рис. 1.7).

$$\sum U_{вх} = \sum R \cdot (U_{и1}/R_1 + U_{и2}/R_2 + U_{и3}/R_3 + U_{вых}/R_{oc}),$$

где

$$\sum R = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 \parallel R_{oc}$$

При наличии одинаковых сопротивлений $R_1 = R_2 = R_3 = R_{oc}$ на выходе получают алгебраическую сумму напряжений. Пример: микшер – сигналы с трех микрофонов, которые должны усиливаться общим усилителем.

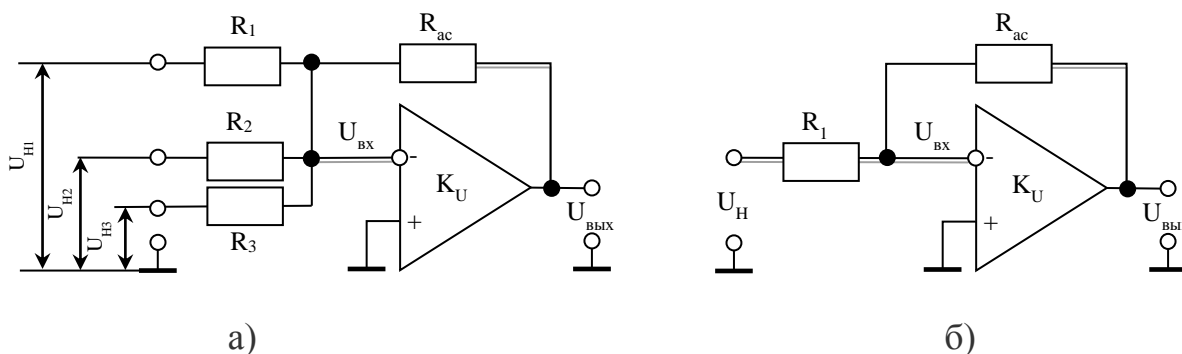


Рис. 1.7. Усилитель

$$U_{вых} = -(R_{oc}/R_1)(U_{и1} + U_{и2} + U_{и3})$$

Таким образом, выходное напряжение пропорционально сумме входных напряжений.

Масштабный усилитель

Назначение усилителя – изменение масштаба электрической величины посредством умножения входного сигнала на некоторый постоянный коэффициент (рис. 1.8).

$$U_{\text{ВЫХ}} = -(R_{\text{ОС}}/R_1)U_{\text{И}}$$

Уровень выходного напряжения (масштаба) устанавливается соотношениями сопротивлений $R_{\text{ОС}}$ и R_1 весового коэффициента.

Интегрирующий усилитель (интегратор)

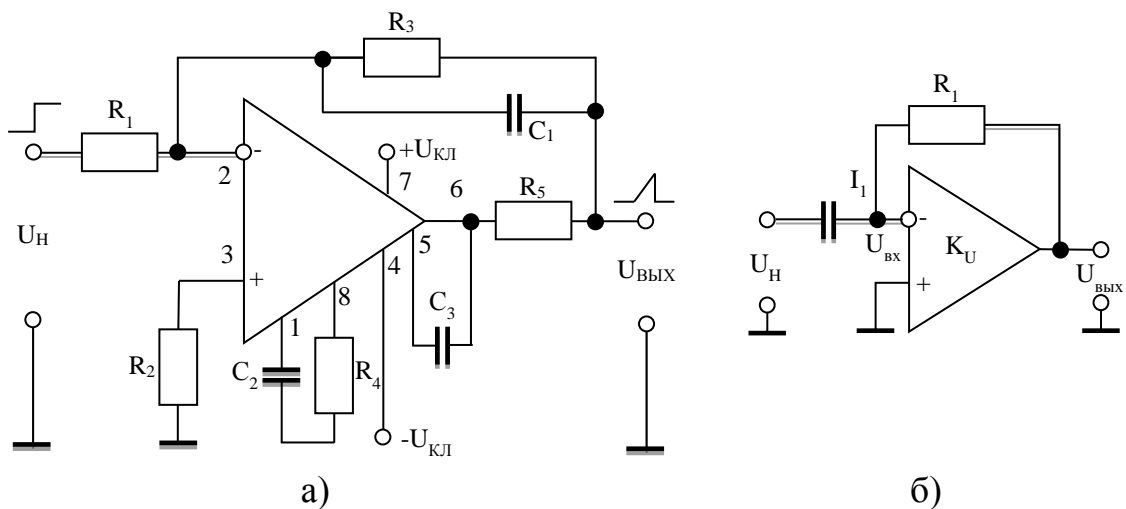


Рис. 1.8. Масштабный усилитель

Выходное напряжение интегратора пропорциональное интегралу от входного напряжения, можно получить заменой активного сопротивления обратной связи $R_{\text{ОС}}$ в масштабном усилителе конденсатором C (рис. 1.8).

Во время переходного процесса в цепи R, C , протекающего при подаче на вход схемы сигнала $U_{\text{И1}}$, усилитель работает в линейном режиме. Этому режиму соответствует процесс интегрирования. Если принять, что $K_U \rightarrow \infty$, то в схеме существует полная отрицательная связь и $\sum U_{\text{ВХ}} = 0$. Поэтому ток, протекающий через резистор R , определяется по формуле $I_R \approx U_U/R_1$.

Так как ток идеального ОУ не втекает, то $i_C = -i_R$ и напряжение на конденсаторе или, что то же самое, на выходе усилителя ($\sum U_{\text{ВЫХ}} = 0$) определяется выражением:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_C = \int i_2 dt \cdot 1/R_1 C = \int U_{\text{И}} dt \cdot 1/R_1 C$$

Если к входу ОУ приложить напряжение в виде скачка с постоянной амплитудой $U_{и}$, то

$$U_{ВЫХ} = - [U_{и}/(R_1C)]dt ,$$

где R_1C – постоянная времени интегратора.

В соответствии с выражением интегрирующий усилитель можно использовать для получения линейно-изменяющегося напряжения, что применяется при проектировании высокоточных генераторов пилообразного напряжения на ОУ.

Дифференциальный усилитель (дифференциатор)

Так как всё напряжение источника выходного сигнала $U_{и}$ практически приложено к конденсатору $C(\sum U_{ВХ}=0)$, то значение тока, протекающего через конденсатор, определяется как $i_C = C(dU_{и}/dt)$ (рис. 1.9).

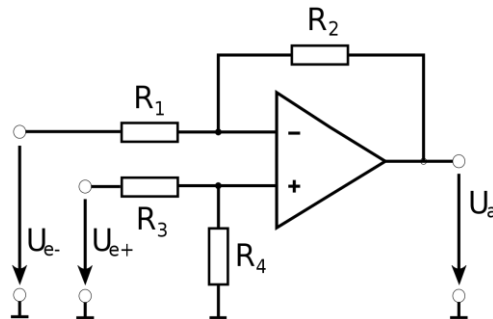


Рис. 1.9. Дифференциальный усилитель

По той же причине, что и для интегратора, $-i_C = i_R$ и

$$U_{ВЫХ} = i_R R_1 = -R_1 C(dU_{и}/dt) ,$$

где R_1C – постоянная времени дифференциатора.

Поскольку емкость C может быть достаточно малой, дифференциатор является усилителем высокочастотных сигналов.

Компаратор напряжений

Компараторное включение ОУ используется для сравнения напряжения источника сигнала $U_{и}$ с опорным сигналом $U_{оп}$. Компараторный режим ОУ обычно используется без внешних цепей отрицательной обратной связи с подачей сравниваемых сигналов на один или оба входа усилителя.

В промежутке от $0-t_1$ выполняется неравенство $|U_{и}| < |U_{оп}|$, поэтому $U_{ВХ} < 0$ и напряжение на выходе компаратора $U_{ВЫХ} = U_{ВЫХ.МАКС} \approx -U_{оп}$.

В момент времени t_1 входной сигнал достигает порогового значения:

$$U_{и} = U_{ВХ.ПОР.} = U_{оп} \cdot R_1/R_2 ,$$

а затем (при $t > t_1$) превышает его, чему соответствует наличие отрицательного потенциала на инвертирующем входе ОУ ($U_{ВХ} < 0$), сопровождающийся переключением компаратора в другое состояние, при котором $U_{ВЫХ.МАКС} \approx U_{и}$.

Моменту времени (t_1), при котором выполняется равенство $U_{И} = U_{ВХ.ПОР.} = U_{ОП} \cdot R_1/R_2$, соответствует неустойчивый линейный режим усилителя компаратора (рис. 1.10).

При этом наклон переходной характеристики определяется собственным коэффициентом усиления K_U . Поэтому отсутствие в ОУ ООС способствует увеличению скорости переключения компаратора.

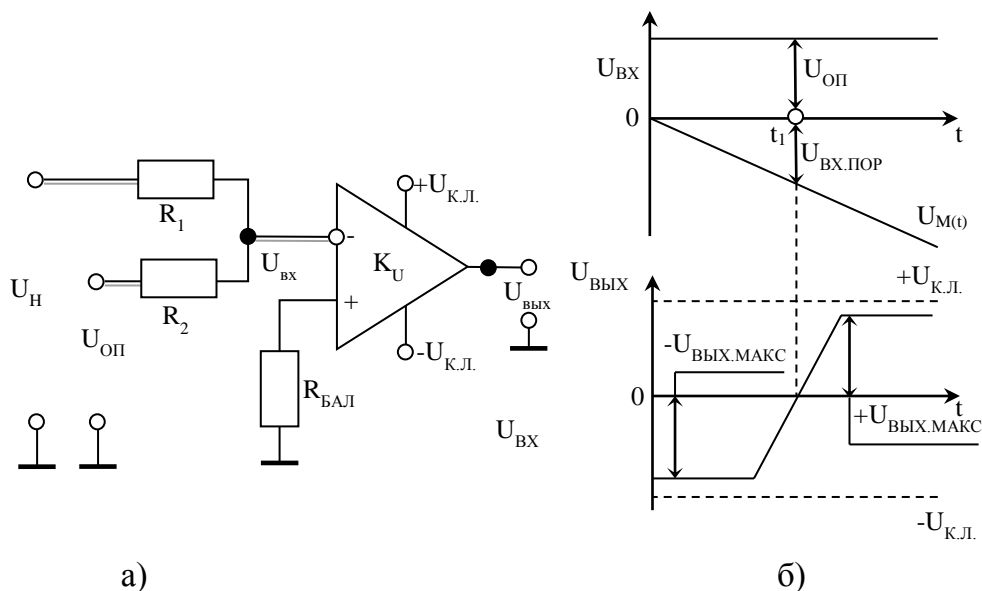


Рис. 1.10. Усилитель компаратор

Точность сравнения напряжений увеличивается с увеличением их амплитуд. Сопротивление балансирующего резистора в цепи неинвертирующего входа определяется по формуле:

$$R_{БАЛ} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$$

Логарифмический усилитель

Логарифмическая передаточная функция реализуется включением в цепь ООС ОУ $p-n$ перехода (рис. 1.11).

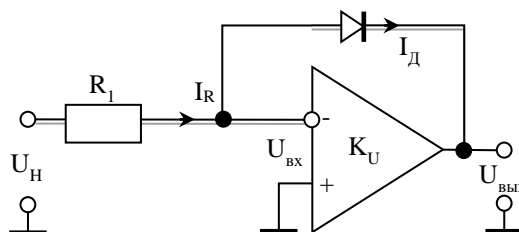


Рис. 1.11. Усилитель с $p-n$ переходом

ВАХ которого описывается $i = i_0(e)$. Для идеального ОУ $I_R = I_D$ и $\sum U_{ВХ} = 0$, с учетом этого $e \gg 1$ имеем $U_{И}/R = I_0 e$, откуда $U_{ВЫХ}/\varphi_T = \ln(U_{И}/I_0 R)$.

Таким образом, из этого уравнения получим:

$$U_{ВЫХ} = K \lg(U_{И}/I_0 R) \text{ где } K = 2.3 \varphi_T$$

1.4. Экспериментальная часть

В экспериментальной части необходимо:

- собрать схему инвертирующего усилителя и убедиться в правильности произведенных расчетов;
- собрать схему неинвертирующего усилителя и убедиться в правильности произведенных расчетов;
- собрать схему сумматора и изучить влияние сопротивления резисторов на параметры суммирования;
- наблюдать режим ограничения выходного напряжения при

$$|U_{ВХ}(t) \cdot K| > |U_{ПИТ}|$$

Соберите схему инвертирующего усилителя согласно рис. 1.12 и 1.13 (см. стр. 19) при $R_1 = 10 \text{ кОм}$, $R_2 = 20 \text{ кОм}$.

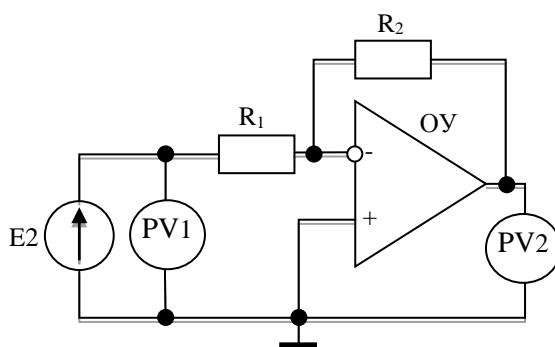


Рис. 1.12. Принципиальная схема исследования инвертирующего усилителя

Установите предел измерения вольтметра PV1 равным 20 В, вольтметра PV2 – равным 20 В. Тумблеры переключения режимов работы вольтметров установите в положение измерения постоянного напряжения (=). Регулятор выходного напряжения источника E2 поверните против часовой стрелки до упора. Собранный схему предъявите преподавателю. После проверки преподавателем собранной схемы включите установку.

Включите источник E2. Последовательно установите напряжение источника E2 согласно таблице 1.1. Показания вольтметра PV2 занесите в табл. 1.1. Определите точно и запишите значения величин $U_{ВХ \text{ МАКС}}$ и $U_{ВЫХ \text{ МАКС}}$.

Выключите источник напряжения E2.

Таблица 1.1

Расчетные показатели напряжения на инвертирующем усилителе
при $R_1 = 10 \text{ кОм}$

$U_{ВХ}, \text{ В}$	2	3	4	5	6	7	8	9	12	11
$U_{ВЫХ}, \text{ В}$										

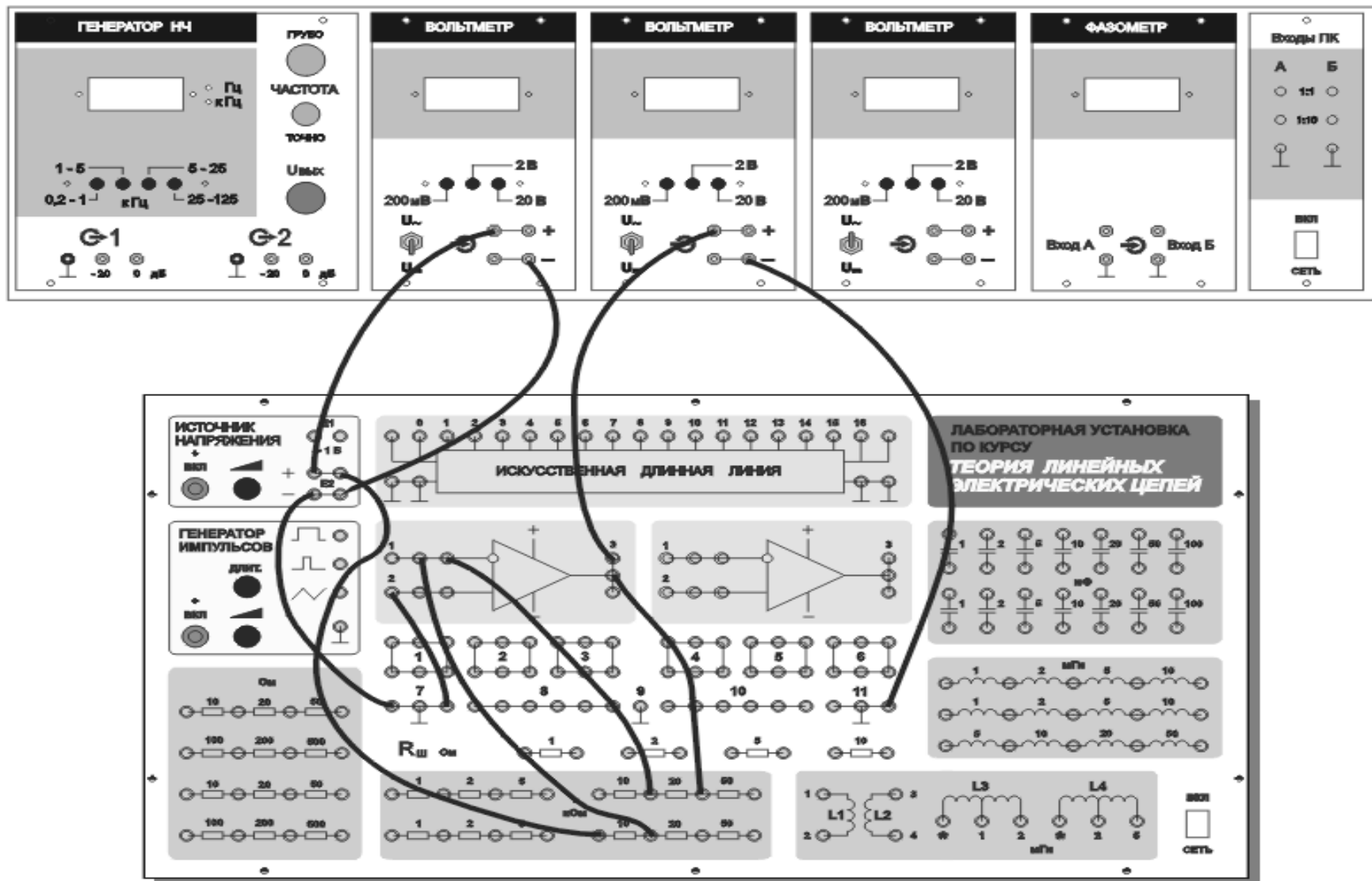


Рис. 1.13. Схема соединения элементов установки для исследования инвертирующего усилителя

Аналогичным образом проведите измерения для $R_1=20$ кОм. Полученные данные занесите в таблицу 1.2.

Напряжения на инвертирующем усилителе при $R_1 = 10$ кОм, $R_2=20$ кОм

По данным эксперимента рассчитайте коэффициент усиления ОУ.

Напряжения на инвертирующем усилителе при $R_1=20$ кОм, $R_2=20$ кОм

Таблица 1.2

Расчетные показатели напряжения на инвертирующем усилителе
при $R_1 = 20$ кОм

$U_{ВХ}, В$	2	3	4	5	6	7	8	9	12	11
$U_{ВЫХ}, В$										

Соберите схему неинвертирующего усилителя согласно рис. 1.14 и 1.15 (см. стр. 21) при $R_1 = 10$ кОм, $R_2 = 10$ кОм.

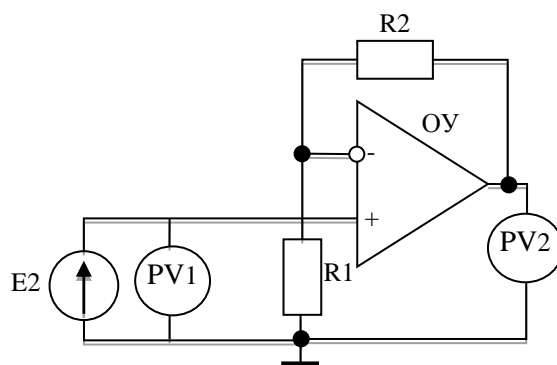


Рис. 1.14. Принципиальная схема исследования неинвертирующего усилителя

Включите источник E_2 . Последовательно установите напряжение источника E_2 согласно таблице 1.3. Показания вольтметра PV_2 занесите в табл. 1.3. Определите точно и запишите значения величин $U_{ВХ МАКС}$ и $U_{ВЫХ МАКС}$.

Напряжения на неинвертирующем усилителе при $R_1=10$ кОм, $R_2=10$ кОм.

Таблица 1.3

Расчетные показатели напряжения на инвертирующем усилителе при $R_1 = 10$ кОм

$U_{ВХ}, В$	2	3	4	5	6	7	8	9	12	11
$U_{ВЫХ}, В$										

По данным эксперимента рассчитайте коэффициент усиления ОУ.

Аналогичным образом проведите измерения для $R_1 = 10$ кОм, $R_2 = 20$ кОм.

Полученные данные занесите в таблицу 1.4.

Напряжения на неинвертирующем усилителе при $R_1 = 10$ кОм, $R_2 = 20$ кОм.

Таблица 1.4

Расчетные показатели напряжения на инвертирующем усилителе при $R_1 = 20$ кОм

$U_{ВХ}, В$	2	3	4	5	6	7	8	9	12	11
$U_{ВЫХ}, В$										

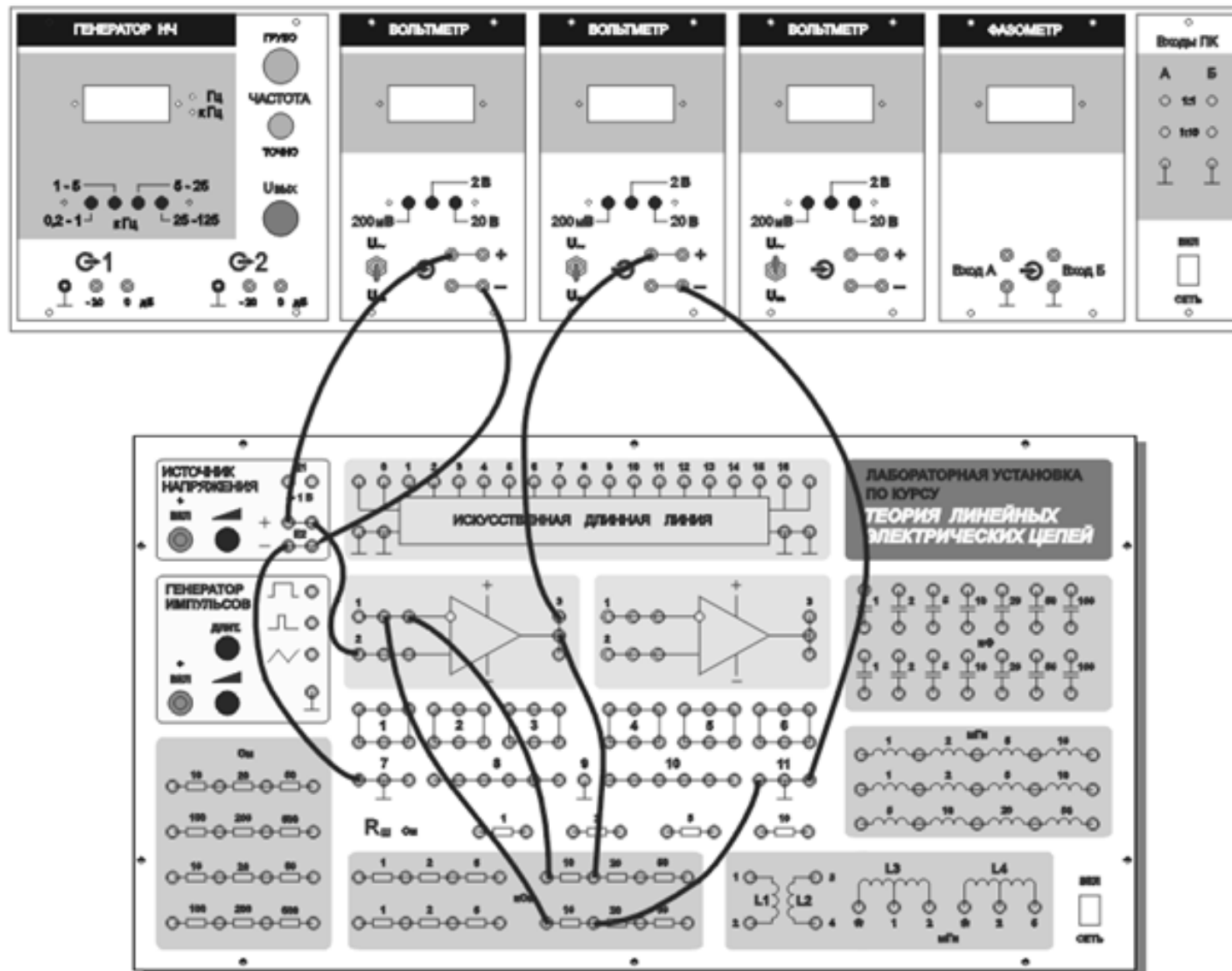


Рис. 1.15. Схема соединения элементов установки для исследования неинвертирующего усилителя

По данным эксперимента рассчитайте коэффициент усиления ОУ.
Внесите изменения в схему неинвертирующего усилителя согласно рис. 1.16.

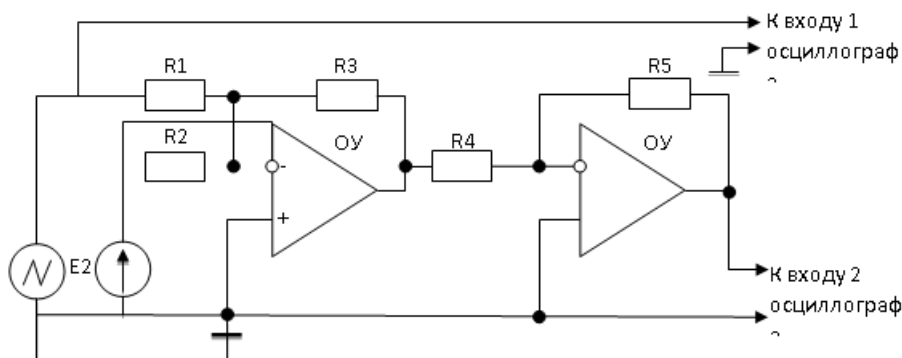


Рис. 1.16. Принципиальная схема исследования суммирующего усилителя с инвертором

Проведите измерения для $R_1=10$ кОм, $R_2=0$ кОм. Полученные данные занесите в таблицу 1.5.

Напряжения на неинвертирующем усилителе при $R_1 = 10$ кОм, $R_2= 0$ кОм.

Таблица 1.5

Расчетные показатели напряжения на неинвертирующем усилителе при $R_1= 10$ кОм, $R_2=0$ кОм

$U_{вх}, В$	2	3	4	5	6	7	8	9	12	11
$U_{вых}, В$										

По данным эксперимента рассчитайте коэффициент усиления ОУ.

Сравните результаты эксперимента с ранее произведенными расчетами.

Соберите суммирующий усилитель с инвертором согласно рис. 1.17 (см. стр. 23) и 1.18 (см. стр. 24).

$R_1= 20$ кОм; $R_2=10$ кОм; $R_3=20$ кОм; $R_4=5$ кОм; $R_5=5$ кОм.

Включите питание осциллографа. Режим работы осциллографа:

Двухканальный с одновременной индикацией напряжений обоих каналов:

- вход 1 – открытый; чувствительность 2 В / деление;
- вход 2 – открытый; 2 В / деление;
- синхронизация – внешняя (подключение к гнездам на левой боковой поверхности лабораторного модуля).

При первоначальной настройке линии нулевых напряжений обоих каналов необходимо совместить и установить в центре экрана.

Расчетная часть

Для заданных значений сопротивления резисторов R_1 и R_2 и напряжений питания ОУ рассчитайте коэффициент усиления ОУ и величину входного напряжения $U_{вх \text{ макс}}$, при котором наступает ограничение выходного напряжения. Результаты вычислений занесите в таблицу 1.6 (на. стр. 25).

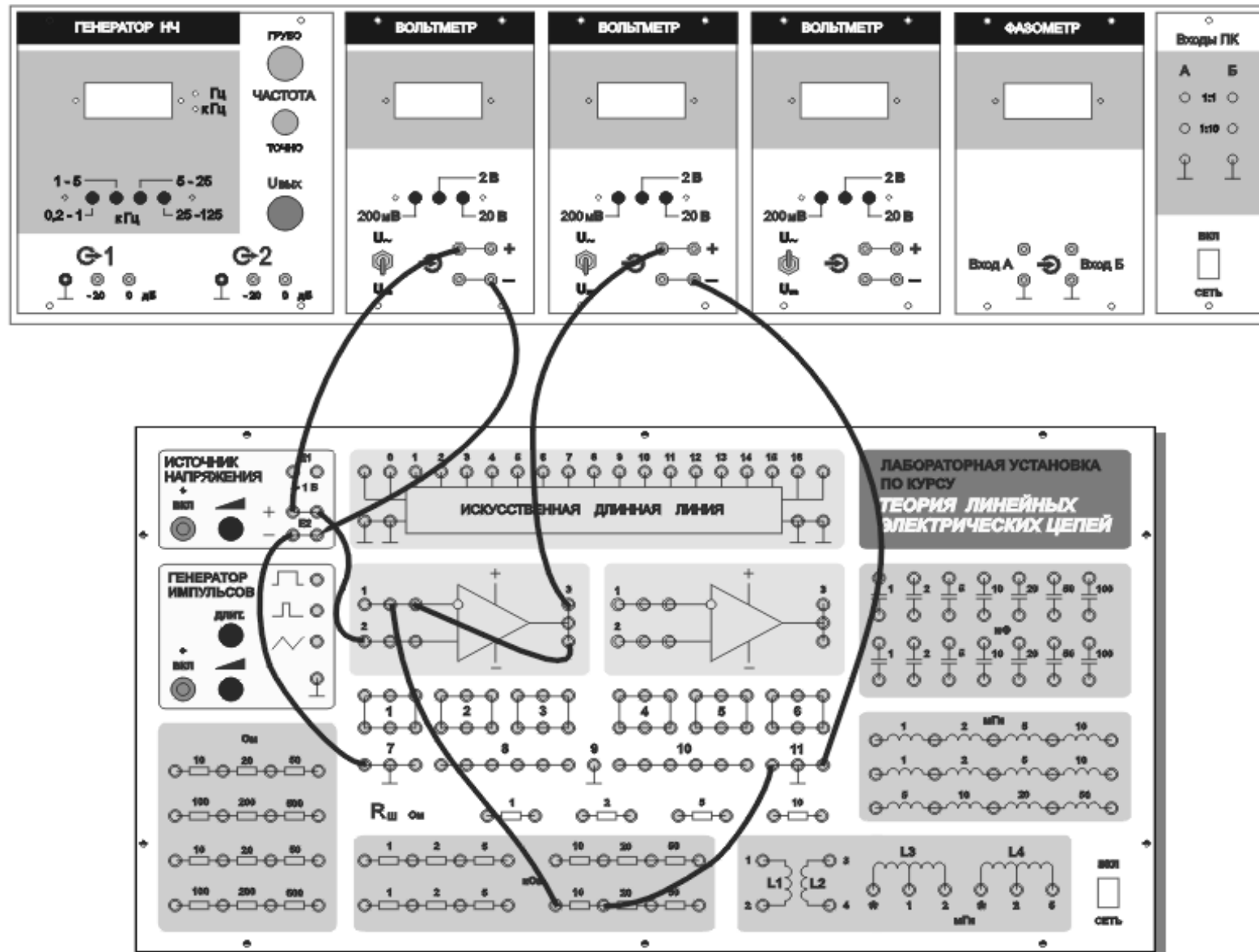


Рис. 1.17. Схема соединения элементов установки для исследования неинвертирующего усилителя при $R_2 = 0$

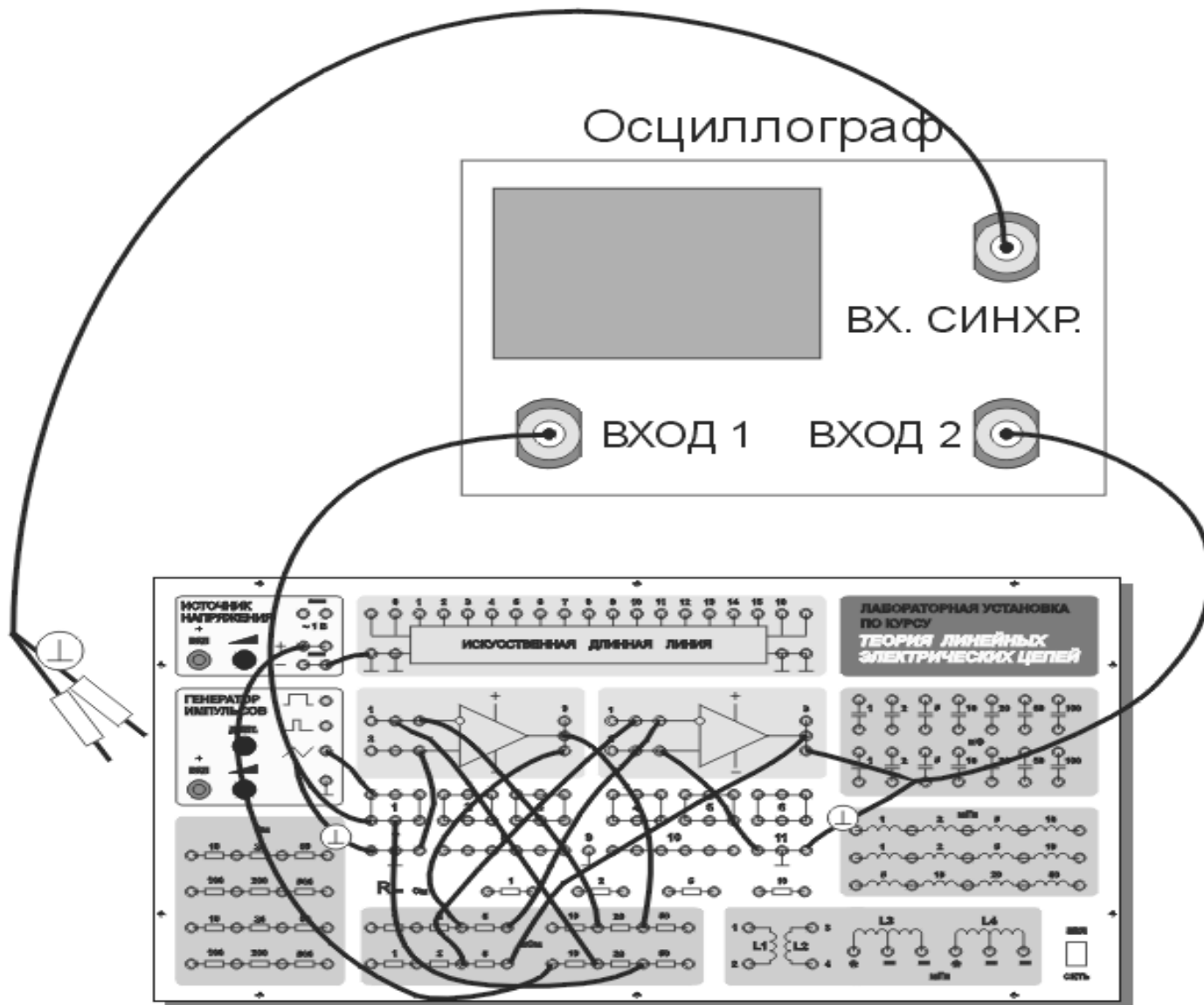


Рис. 1.18. Схема соединения элементов установки для исследования суммирующего усилителя с инвертором

Расчетные показатели при заданных значениях $R1$ и $R2$

Вид схемы	$U_{ПИТ}$, В	$R1$, кОм	$R2$, кОм	K	$U_{ВХ МАКС}$, В
Инвертирующий усилитель	+ 15 В				
Неинвертирующий усилитель	- 15 В				

Включите питание источника $E2$ и генератора импульсов.

Получите на экране осциллографа устойчивое изображение формы напряжений на входе A сумматора (точка 1) и на выходе сумматора. Переключите вход 2 осциллографа на выход инвертора, сравните напряжения на выходе сумматора и на выходе инвертора.

Переключите вход 2 осциллографа на выход сумматора. Увеличивайте напряжение источника $E2$ от минимального до максимального. Наблюдайте за формой напряжения на выходе сумматора.

Переключите вход 2 осциллографа на выход инвертора. Увеличивайте напряжение источника $E2$ от минимального до максимального. Наблюдайте за формой напряжения на выходе инвертора.

Сделайте выводы по результатам эксперимента.

1.5. Контрольные вопросы

- 1) Как рассчитывается коэффициент усиления схемы?
- 2) Когда усилитель работает в линейном режиме без ограничения?
- 3) Как определяется максимальное входное напряжение, при котором обеспечивается линейный режим работы усилителя?
- 4) Как определяется коэффициент усиления схемы?
- 5) В каком случае $U_{ВЫХ} = - (U_1 + 2U_2)$?
- 6) В каком случае $U_{ВЫХ} = - (U_1 + U_2)$?
- 7) Как получить $U_{ВЫХ} = + (U_1 + 2U_2)$?
- 8) Какие требования предъявляются к усилителям с линейным режимом работы?
- 9) Какому типу усилителей принадлежит операционный усилитель?
- 10) Какое устройство выполняет функцию преобразования постоянного напряжения одного уровня в постоянное напряжение другого уровня?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

«ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ»

2.1. Цель работы

Ознакомление с характеристиками и параметрами операционных усилителей с обратной связью.

2.2. Вопросы для самопроверки

- 1) Что называется электронным усилителем?
- 2) Перечислите основные характеристики и параметры усилителей.
- 3) С какой целью в усилитель вводится обратная связь?
- 4) Почему в усилителях постоянного тока нельзя применять конденсаторы как элементы межкаскадной связи?
- 5) Что такое синфазное и дифференциальное напряжения?
- 6) Чем операционный усилитель отличается от усилителей на биполярных и полевых транзисторах?
- 7) Поясните основные параметры операционных усилителей.
- 8) Каковы основные схемы включения операционных усилителей?
- 9) Сравните характеристики реального и идеального операционного усилителя.
- 10) Какие существуют классы операционных усилителей?

2.3. Краткие сведения из теории

Характеристики и параметры операционных усилителей

Операционным усилителем (ОУ) называют усилитель электрических сигналов, предназначенный для выполнения различных операций над аналоговыми и импульсными величинами при работе с обратными связями.

В настоящее время промышленность выпускает операционные усилители второго и третьего поколений, построенные по двухкаскадной схеме. Эти ОУ по своим основным параметрам значительно превосходят операционные усилители первого поколения, создаваемые по трехкаскадной схеме.

Основу всех ОУ составляют дифференциальные каскады. Первый каскад обеспечивает коэффициент усиления, достигающий нескольких сотен тысяч и единиц миллионов. Входной каскад, в котором часто используются полевые транзисторы, обеспечивает входные характеристики ОУ, в частности его высокое входное сопротивление. Выходным каскадом является бестрансформаторный двухтактный усилитель мощности (эмиттерный повторитель, работающий в режиме усиления В или АВ). Он служит для согласования высокого выходного сопротивления первого дифференциального каскада ОУ с низкоомным нагрузочным устройством. Поэтому ОУ имеет низкое выходное сопротивление.

Кроме того, в состав современных ОУ входят цепи защиты по входу от перенапряжений и по выходу от превышения выходного тока.

В настоящее время операционные усилители, изготавливаемые по интегральной технологии, являются самыми универсальными и массовыми аналоговыми устройствами. ОУ широко применяются не только в усилителях, но также в различных генераторах, преобразователях, стабилизаторах напряжения, компараторах, источниках эталонных напряжений, активных фильтрах, электронных ключах и т.д.

Широкие функциональные возможности при небольшом числе стандартных типов ОУ, выпускаемых промышленностью, достигаются за счет включения разнообразных внешних цепей обратных связей. Наибольшее распространение получили интегральные полупроводниковые ОУ, обладающие наименьшими габаритами и массой, способные работать в диапазоне температур от -60 до $+125^{\circ}\text{C}$. Они имеют коэффициент усиления 10^6 и более при усилении сигналов частотой от нуля до единиц мегагерц. На работу подобных ОУ весьма слабо влияют такие дестабилизирующие факторы, как изменения температуры и питающего напряжения. Современные ОУ относительно дешевы и доступны для широкого применения, что обеспечивается их массовым автоматизированным изготовлением. Надежность операционного усилителя, включающего в себя несколько сотен элементов и более, соответствует надежности отдельного транзистора, что обеспечивается интегральной технологией, при которой все элементы (транзисторы, диоды, резисторы и др.) и соединения между ними выполняются в едином технологическом цикле. Как показывает практика, срок службы хорошего полупроводникового интегрального ОУ может превысить 20 лет. На рис. 2.1 а приведено условное обозначение операционного усилителя.

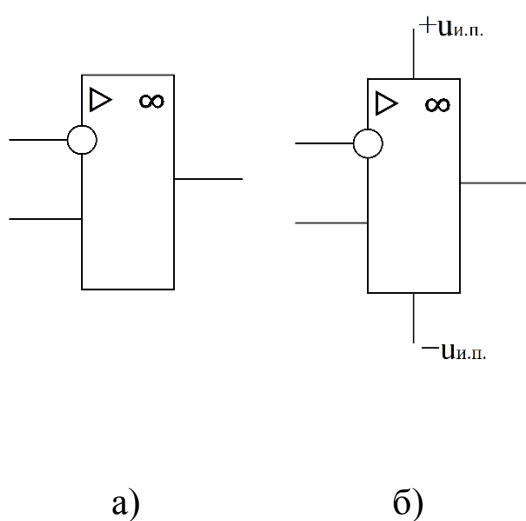


Рис. 2.1. Условное графическое обозначение операционного усилителя без источников питания (а) и с источником питания (б)

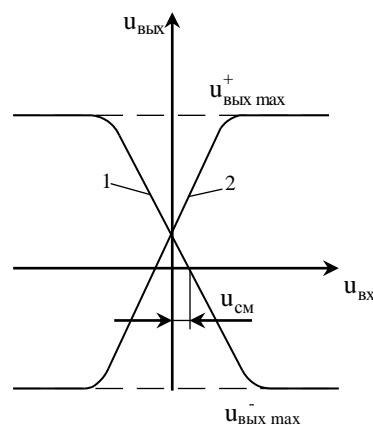


Рис. 2.2. Амплитудная (передаточная) характеристика ОУ

Как видно, ОУ имеет два входа и один выход. Вход, напряжение на котором сдвинуто по фазе на 180° относительно выходного напряжения, называют инвертирующим и обозначают кружком. Вторым входом является неинвертирующий, так как напряжение на нем и выходное напряжение совпадают по фазе.

Выводы, к которым подключаются источники питающего напряжения $+U_{и.п.}$ и $-U_{и.п.}$, а также вспомогательные цепи на принципиальных схемах обычно не обозначают. При необходимости выводы ОУ, к которым подключаются, например источники напряжения, изображают так, как показано на рис. 2.1 б. На рис. 2.2 изображена одна из важнейших характеристик – амплитудная (передаточная) характеристика ОУ, представляющая собой зависимость $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$ при нулевой частоте. Кривая 1 соответствует подаче входного напряжения на инвертирующий вход, кривая 2 – на неинвертирующий вход. Эти характеристики получают при подаче входного напряжения на один из входов при отсутствии напряжения на другом входе.

Наклонный (линейный) участок кривых подчеркивает линейность зависимости $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$. Горизонтальные участки кривых соответствуют режиму работы ОУ, при котором входное напряжение выходит за пределы линейного участка передаточной характеристики.

Значения исходного напряжения $U_{ВЫХmax}^+$ и $U_{ВЫХmax}^-$, характеризующие эти участки, обычно на 1 – 2 В меньше напряжения питания.

Операционный усилитель характеризуется теми же параметрами, что и другие усилители. Знание параметров интегральных ОУ позволяет быстро и грамотно спроектировать различные электронные блоки и устройства, а также предотвратить выход их из строя, т.е. работу в недопустимых режимах.

Современные ОУ имеют следующие основные параметры:

1. *Коэффициент усиления $K_{и}$* . Представляет собой отношение приращения выходного напряжения к вызвавшему его приращению входного напряжения. В современных ОУ $K_{и}$ при нулевой частоте достигает значений от десятков и сотен тысяч до нескольких миллионов. По углу наклона линейного участка амплитудной характеристики определяют коэффициент усиления.

Коэффициент усиления ОУ зависит от изменения напряжения питания, тока нагрузочного устройства, температуры окружающей среды. По этой причине ОУ (за исключением компараторов) не применяют без цепей внешней обратной связи, которые стабилизируют коэффициент усиления.

2. *Напряжение смещения $U_{см}$* . Определяется входным напряжением, при котором выходное напряжение равно нулю (рис. 2.3). Напряжение смещения появляется вследствие разброса параметров элементов ОУ или изменений режимов работы входных транзисторов за счет рассогласования во входных цепях ОУ. Обычно в ОУ широкого применения $U_{см} = 5-20\text{мВ}$. Напряжение

смещения зависит от температуры и напряжения источника питания. Изменение $U_{см}$ в зависимости от температуры для ОУ широкого применения составляет примерно 50 мкВ/град. Для устранения напряжения смещения на входе ОУ вводят специальные электрические цепи.

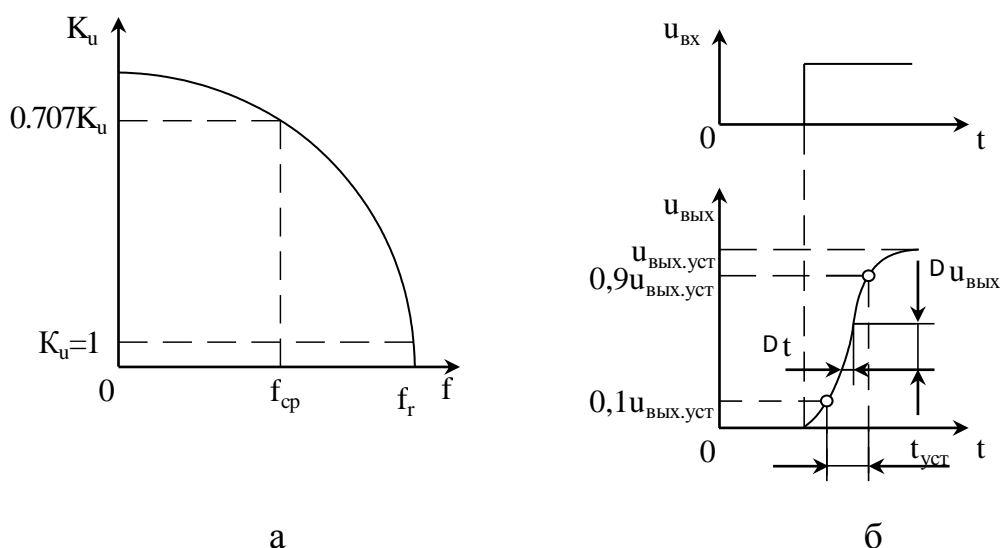


Рис. 2.3. Амплитудно-частотная характеристика ОУ (а), характеристики $U_{вых}(t)$ к объяснению параметра ОУ – скорости нарастания выходного напряжения $U_{вых}$ (б)

3. *Входной ток $I_{вх}$.* Это ток во входной цепи ОУ, который может составить 0-100 мкА. Его необходимо учитывать при подключении к обоим входам ОУ внешних электрических цепей. Если сопротивления внешних электрических цепей по инвертирующему и неинвертирующему входам неодинаковые, то разность падений напряжений на них вызовет дополнительные напряжения, складывающиеся с напряжением смещения. Для исключения этого, сопротивления этих выводов стремятся сделать равными.

4. *Входное сопротивление $R_{вх}$.* Различают входные сопротивления для дифференциального сигнала ($R_{вх.д}$) и синфазного сигнала ($R_{вх.сф}$). Для получения большего входного сопротивления первый каскад ОУ выполняют на полевых транзисторах; $R_{вх.д}$ имеет значение от нескольких килоом для биполярных транзисторов до нескольких единиц и десятков мегаом для полевых транзисторов, а $R_{вх.сф} > 100 \text{ МОм}$.

5. *Выходное сопротивление $R_{вых}$.* Это сопротивление, измеренное со стороны нагрузочного устройства, представляет собой выходное сопротивление выходных каскадов ОУ, построенных на эмиттерных повторителях. Значения $R_{вых} = 20-2000 \text{ Ом}$.

Усиление сигналов различных частот определяется амплитудно-частотной характеристикой ОУ (рис. 2.3 а), а усиление импульсных (обычно прямоугольных) сигналов скоростью нарастания выходного напряжения (рис. 2.3 б). В соответствии с этим вводят динамические параметры ОУ:

1) частоту среза $f_{ср}$, значению которой соответствует снижение модуля коэффициента усиления ОУ в $\sqrt{2}$ раза (3 дБ);

2) частоту единичного усиления f_t , при которой модуль коэффициента усиления ОУ уменьшается до единицы (для современных ОУ $f_t=15-20$ МГц);

3) максимальную скорость нарастания выходного напряжения $V_{УВЫХ}$ определяющую наибольшую скорость изменения выходного напряжения ОУ (рис. 2.3 б) при воздействии прямоугольного входного импульса; скорость нарастания определяется как отношение $\Delta U_{ВЫХ}$ к Δt (для современных ОУ $V_{УВЫХ}=0,1-100$ В/мкс);

4) время установления $t_{уст}$, определяющее изменение выходного напряжения ОУ от уровня 0,1 (рис. 2.3 б) до уровня 0,9 от установившегося выходного напряжения при воздействии на вход прямоугольного импульса (для ОУ широкого применения $t_{уст}=0,05-2$ мкс).

Одним из важных достоинств ОУ является подавление синфазных сигналов. Поэтому ОУ характеризуется *коэффициентом ослабления синфазных сигналов* $K_{оссф}=201 \lg(K_{сф}/K_{н})$ (для ОУ общего назначения $K_{оссф}=70-120$ дБ).

Выпускаемые в настоящее время интегральные ОУ классифицируют по следующим группам:

– ОУ общего назначения, составляющие наиболее многочисленную группу универсальных ОУ;

– прецизионные ОУ, позволяющие поддерживать с высокой точностью большой коэффициент усиления $K_{н}$; они имеют высокое входное сопротивление и малое напряжение смещения ($U_{см} \leq 0,5$ мВ); типичным прецизионным ОУ является интегральная микросхема 153УД5;

– быстродействующие ОУ, характеризующиеся повышенной скоростью нарастания выходного напряжения и малым временем установления; они имеют частоту единичного усиления 15–20 МГц (например, ОУ 140УД10 и КР544УД2);

– микромощные ОУ, потребляющие наименьшую энергию от источника питания (например, ОУ 140УД12, $I_{потр} \leq 0,18$ мА при $U_{н.п} = \pm 6$ В). Наиболее широко используются ИМС серий 140 и 153.

Операционные усилители рассчитаны на применение симметричных разнополярных источников питания напряжением от ± 5 до ± 27 В. В настоящее время чаще всего используют напряжения ± 5 и ± 15 В с допуском отклонением $\pm(5-10)$ %.

Применение подобных источников питания упрощает задачу компенсации смещения нуля ОУ и предотвращает появление ненужной постоянной составляющей тока в нагрузочном устройстве.

Для анализа работы ОУ часто пользуются схемой замещения, изображенной на рис. 2.4. Входная часть схемы замещения определяется входным дифференциальным сопротивлением $R_{вх.д}$, а выходная часть содержит источник ЭДС $K_u(f) U_{вх}$ и резистивный элемент с сопротивлением $R_{вых}$.

Для удобства расчетов устройств с ОУ вводят понятие идеального ОУ, у которого:

- коэффициент усиления стремится к бесконечности в бесконечно широкой полосе частот;
- входное дифференциальное сопротивление $R_{вх.д}$ стремится к бесконечности;
- выходное сопротивление $R_{вых}$ стремится к нулю;
- выходное напряжение равно нулю при нулевом входном напряжении.

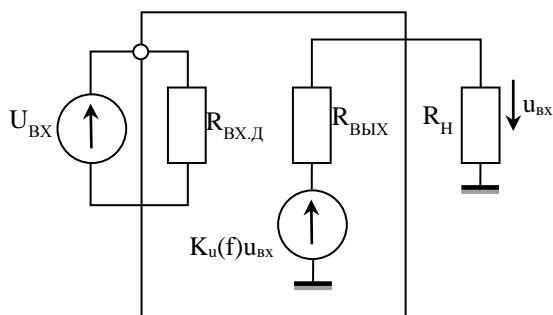


Рис. 2.4. Схема замещения ОУ

Применение операционных усилителей

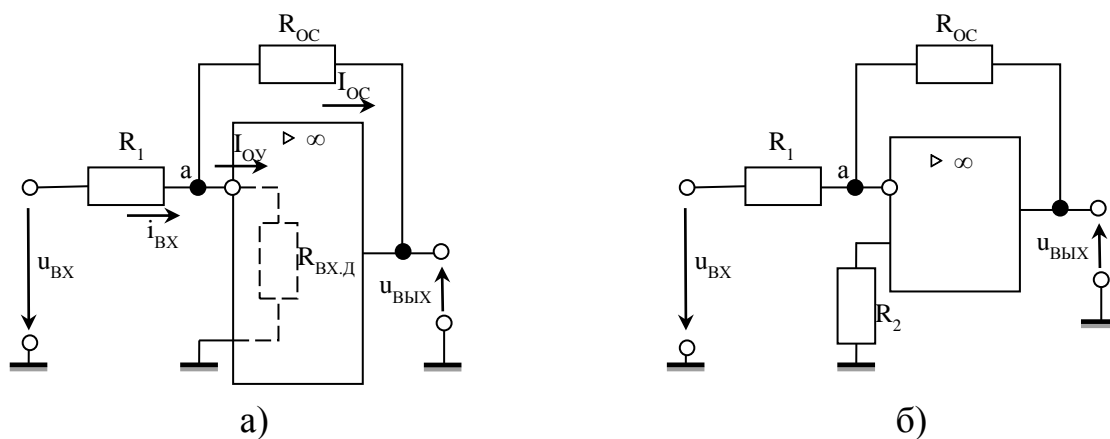


Рис. 2.5. Схема инвертирующего усилителя (а) и инвертирующего усилителя с «выравнивающим» резистором (б)

При использовании ОУ в качестве инвертирующего усилителя (рис. 2.5 а) выходное напряжение сдвинуто по отношению к входному на 180° . Входное напряжение $U_{вх}$ подается на инвертирующий вход через резистор R_1 . С помощью резистора R_{oc} осуществляется отрицательная параллельная обратная связь по напряжению. Неинвертирующий вход усилителя при этом заземлен. В соот-

ветствии с первым законом Кирхгофа для узла a уравнение для токов записывается в виде:

$$I_{\text{вх}} = I_{\text{ос}} + I_{\text{оу}}$$

Анализ рассматриваемой схемы включения ОУ значительно упрощается при допущении, что ОУ идеален. Тогда при любом значении $R_{\text{н}} \neq 0$ и конечном значении выходного напряжения (оно не может быть больше напряжения питания ОУ) входное напряжение будет равно нулю. В этом случае инвертирующий и неинвертирующий входы при $U_{\text{вх}} = 0$ как бы замкнуты накоротко. Это так называемое виртуальное замыкание. В отличие от обычного короткого замыкания при виртуальном замыкании ток между входами ОУ отсутствует, т.е. $I_{\text{оу}} = 0$ и $I_{\text{вх}} = I_{\text{ос}}$. Тогда $U_{\text{вх}} = R_1 \cdot I_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}} = R_{\text{ос}} \cdot I_{\text{ос}}$.

Коэффициент усиления инвертирующего усилителя:

$$K_{U_{\text{ос}}} = - \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = - \frac{R_{\text{ос}} \cdot I_{\text{ос}}}{R_1 I_{\text{вх}}} = - \frac{R_{\text{ос}}}{R_1}$$

Знак « \rightarrow » в данном выражении означает, что в инвертирующем усилителе входное и выходное напряжения находятся в противофазе.

Нетрудно убедиться, что входное сопротивление инвертирующего усилителя:

$$R_{\text{вх.ос}} \approx R_1$$

Выходное сопротивление:

$$R_{\text{вх.ос}} \approx \frac{R_{\text{вых}} \cdot (1 + R_{\text{ос}}/R_1)}{K_U}$$

При $K_U \rightarrow \infty$ значение $R_{\text{вх.ос}}$ будет стремиться к нулю. Для устранения различия сопротивлений во входных цепях по инвертирующему и неинвертирующему входам ОУ, вызванного подключением к инвертирующему входу резисторов R_1 , $R_{\text{ос}}$, в цепь неинвертирующего входа включают резистор $R_2 = R_{\text{ос}} / (R_1 + R_{\text{ос}})$ (рис. 2.5 б).

Если входной сигнал подать на неинвертирующий вход ОУ, а на инвертирующий вход с помощью цепи обратной связи R_1 , $R_{\text{ос}}$ подать часть выходного напряжения, т.е. осуществить последовательную отрицательную обратную связь по напряжению, то получится неинвертирующий усилитель (рис. 2.6). При таком виде обратной связи в соответствии со вторым законом Кирхгофа для входной цепи уравнение запишется так:

$$U_{\text{вх}} \approx U_0 + U_{\text{вых}} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{\text{ос}}}$$

Вследствие «виртуального замыкания» инвертирующего и неинвертирующего входов $U_0 = 0$ и тогда:

$$U_{\text{вх}} \approx U_{\text{вых}} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{\text{ос}}}$$

Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя:

$$K_{Uoc} = 1 + R_{oc}/R_1$$

Входное сопротивление этого усилителя:

$$U_{BX} = R_{BX,д} \cdot (1 + \beta \cdot K_U) \approx R_{BX,д} \cdot \frac{R_1 \cdot K_U}{R_1 + R_{oc}}$$

На рис. 2.6 приведены схемы неинвертирующего усилителя и низкочастотного неинвертирующего усилителя.

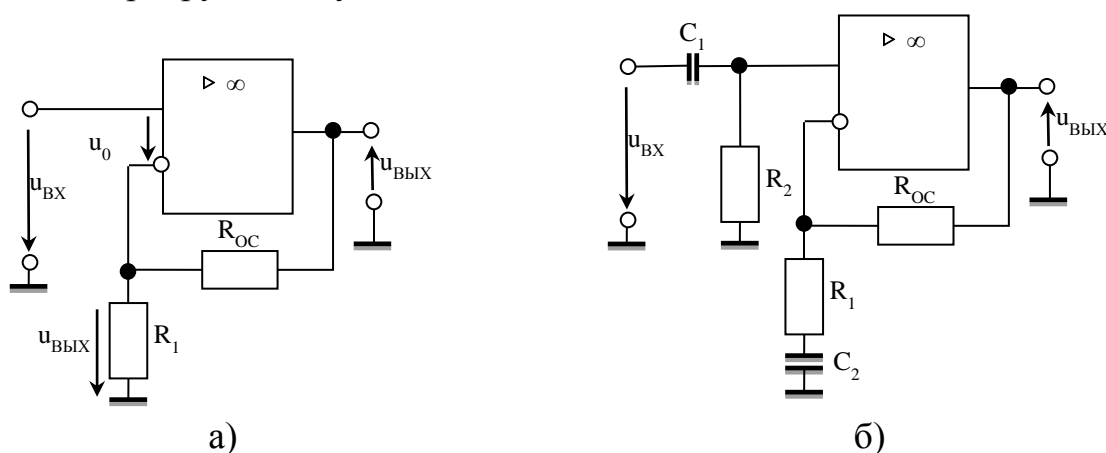


Рис. 2.6. Схемы неинвертирующего усилителя (а) и низкочастотного неинвертирующего усилителя (б)

При $K_U \rightarrow \infty$ входное сопротивление стремится к бесконечности. Из формул видно, что входное сопротивление неинвертирующего усилителя довольно большое. Отметим, что значение $R_{BX,oc}$ у неинвертирующего усилителя значительно больше, чем у инвертирующего. Выходное сопротивление неинвертирующего усилителя:

$$R_{ВЫХ,oc} = R_{ВЫХ}/(1 + \beta \cdot K_U)$$

При $K_U \rightarrow \infty$ выходное сопротивление стремится к нулю.

Учитывая, что у неинвертирующего усилителя сопротивление $R_{BX,oc}$ ее очень большое, а $R_{ВЫХ,oc}$ мало, такой усилитель применяют часто как согласующий элемент при работе с высокоомным источником сигнала и низкоомным нагрузочным устройством.

Обычно для усилителей большое входное сопротивление не нужно, так как при этом они оказались бы весьма чувствительными к изменениям входного тока флуктуационного происхождения. Поэтому во входную цепь усилителя включают резистор $R_2 \ll R_{BX,д}$, который и должен определять входное сопротивление неинвертирующего усилителя. Значение сопротивления R_2 выбирают в пределах 0,5-1 Мом.

На рис. 2.6 б изображена схема низкочастотного неинвертирующего усилителя, в котором введена отдельная обратная связь по переменной и постоян-

ной составляющим. Для полезного (усиливаемого) сигнала коэффициент обратной связи $\beta = R_2 / (R_2 + R_{oc})$, так как емкость конденсатора C_2 выбирают такой, чтобы можно было пренебречь его сопротивлением в частотном диапазоне усиливаемых напряжений ($X_{C2} \ll R_1$ на самой нижней частоте частотного диапазона). Для постоянной составляющей, определяемой напряжением $U_{см}$, благодаря тому, что $X_{C2} = \infty$, действует 100 %-ная отрицательная обратная связь ($K_{Uoc} = 1$). Если не предусмотреть подавления напряжения смещения $U_{см}$, то транзисторы ОУ могут войти в режим насыщения, что вызовет нелинейные искажения в работе усилителя и снижение коэффициента усиления.

Устранение $U_{см}$ в усилителях на ОУ производится чаще подключением потенциометра $R_{бал}$ к специальным выводам ОУ.

Как отмечалось, на основе двух ОУ – инвертирующего и неинвертирующего – при использовании различных цепей обратных связей строят разнообразные электронные устройства. На основе инвертирующего усилителя можно построить *сумматор* (рис. 2.7).

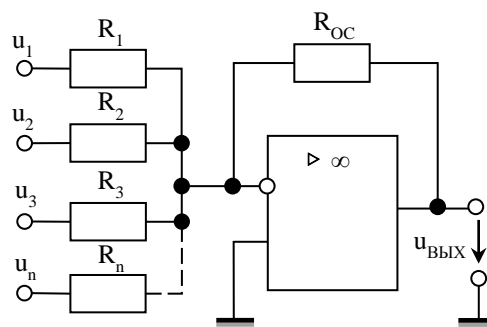


Рис. 2.7. Схема сумматора на ОУ

Если по-прежнему считать ОУ идеальным, то при подаче на инвертирующий вход ОУ через резисторы R_1, R_2, \dots, R_n входных напряжений U_1, U_2, \dots, U_n выходное напряжение будет равно сумме входных напряжений:

$$U_{\text{вых}} = -R_{oc}/R_0 \cdot (U_1 + U_2 + \dots + U_n),$$

где $R_0 = R_1' = R_1'' = \dots = R^n$, $R_0 < R_{\text{вх.д}}$.

Если в инвертирующем усилителе (см. рис. 2.5) резистор R_{oc} заменить конденсатором C_{oc} , то получится *интегратор* (рис. 2.8).

Действительно, $u_{\text{вых}} = R_1 \cdot i_{\text{вх}}$, а $u_{\text{вых}} = u_c$. Так как

$$i_{\text{вх}} = -i_{oc} = -C_{oc} \cdot \frac{du_{\text{вых}}}{dt},$$

то

$$\frac{u_{\text{вых}}}{R_1} = -C_{oc} \cdot \frac{du_{\text{вых}}}{dt}$$

Следовательно:

$$u_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{R_1 \cdot C_{\text{OC}}} \int u_{\text{ВХ}} dt$$

При замене резистора R_1 конденсатором C_1 схема (рис. 2.8) превращается в схему дифференциатора (рис. 2.9).

Так как $U_{\text{ВХ}}=U_c$, а $U_{\text{ВЫХ}}=-R_{\text{OC}} \cdot i_{\text{OC}}$, то, учитывая, что

$$i_{\text{OC}} = C_1 \cdot \frac{du_{\text{ВХ}}}{dt},$$

получим:

$$u_{\text{ВЫХ}} = -R_{\text{OC}} \cdot C_{\text{OC}} \cdot \frac{du_{\text{ВХ}}}{dt}$$

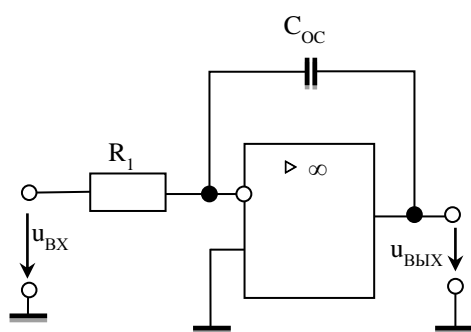


Рис. 2.8. Схема интегратора на ОУ

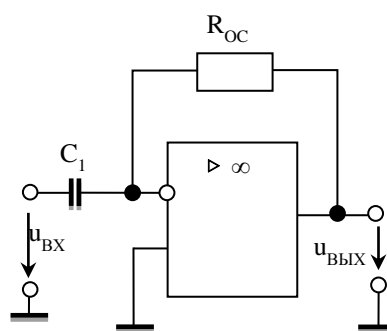


Рис. 2.9. Схема дифференциатора на ОУ

Как известно из электротехники, в интегрирующих и дифференцирующих RC-цепях степень точности интегрирования и дифференцирования входного сигнала зависит от степени выполнения неравенства $U_{\text{ВЫХ}} \ll U_{\text{ВХ}}$. Чем точнее RC-цепь производит ту или иную названную операцию, тем меньше должно быть выходное напряжение.

Если ввести интегродифференцирующую обратную связь в ОУ, как показано на рис. 2.10, то получится избирательный RC-усилитель. Такой усилитель на частоте квазирезонанса

$$f_0 = 1/(2\pi \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2)$$

имеет максимальный коэффициент усиления (рис. 2.10), определяемый по формуле:

$$K_{\text{OC.max}} = R_2 \cdot C_2 / R_1 \cdot (C_1 + C_2)$$

Добротность данного усилителя:

$$Q = \frac{\sqrt{(R_2/R_1) \cdot C_2}}{C_1 + C_2}$$

Обычно выбирают $C_1 = C_2$. Тогда:

$$K_{\text{OC.max}} = R_2 / (2 \cdot R_1),$$

$$Q = \frac{\sqrt{(R_2/R_1)}}{2}$$

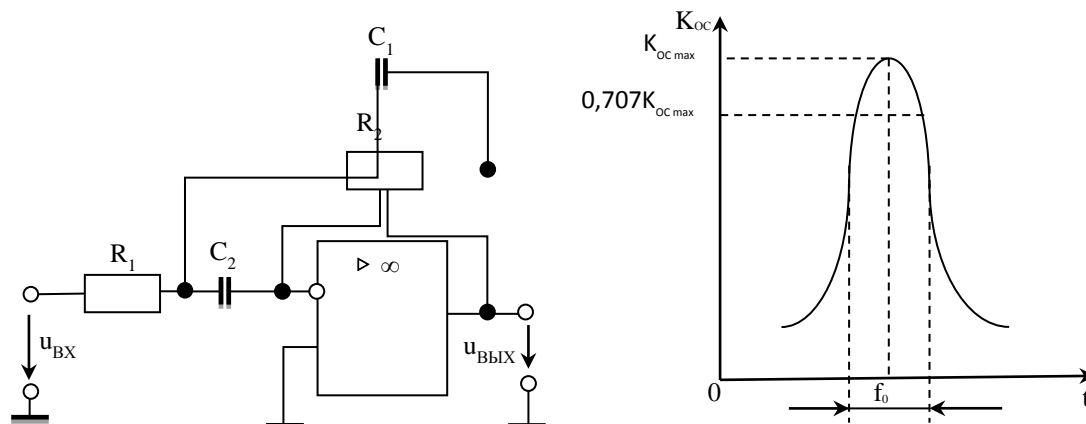


Рис. 2.10. Схема и амплитудно-частотная характеристика избирательного RC-усилителя на ОУ

Избирательный RC-усилитель называют также активным фильтром. Избирательные RC-усилители успешно работают на частотах до 5 МГц.

2.4. Экспериментальная часть

1) Установить и закрепить на стойке два стационарных блока «Питание», «Измерительные приборы» и сменный блок № 4 «Исследование операционного усилителя».

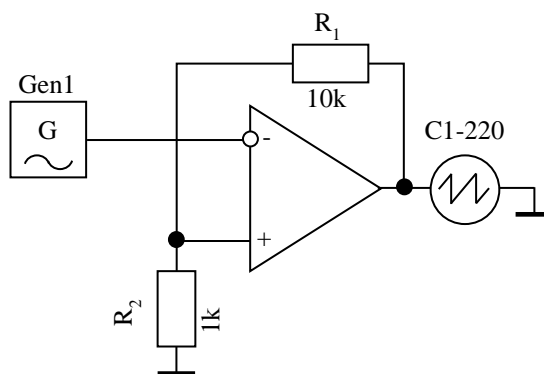


Рис. 2.11. Рекомендуемая схема соединений

2) Произвести соединение проводами перемычками элементов стенда. Рекомендуемая схема соединений изображена на рис. 2.11, практическая схема на рис. 2.12 (см. стр. 37).

3) Снять амплитудную характеристику ОУ с обратной связью. Подать постоянное напряжение на вход ОУ с фиксированной обратной связью. Изменяя входное напряжение, измерять $U_{\text{ВЫХ}}$, при $R_{\text{Н}} = \infty$.

4) Заменить $R_{\text{ос}}$, измерить $U_{\text{ВХ}}$ и $U_{\text{ВЫХ}}$, данные измерения производить без нагрузки.

Результаты измерений занести в таблицу 2.1.

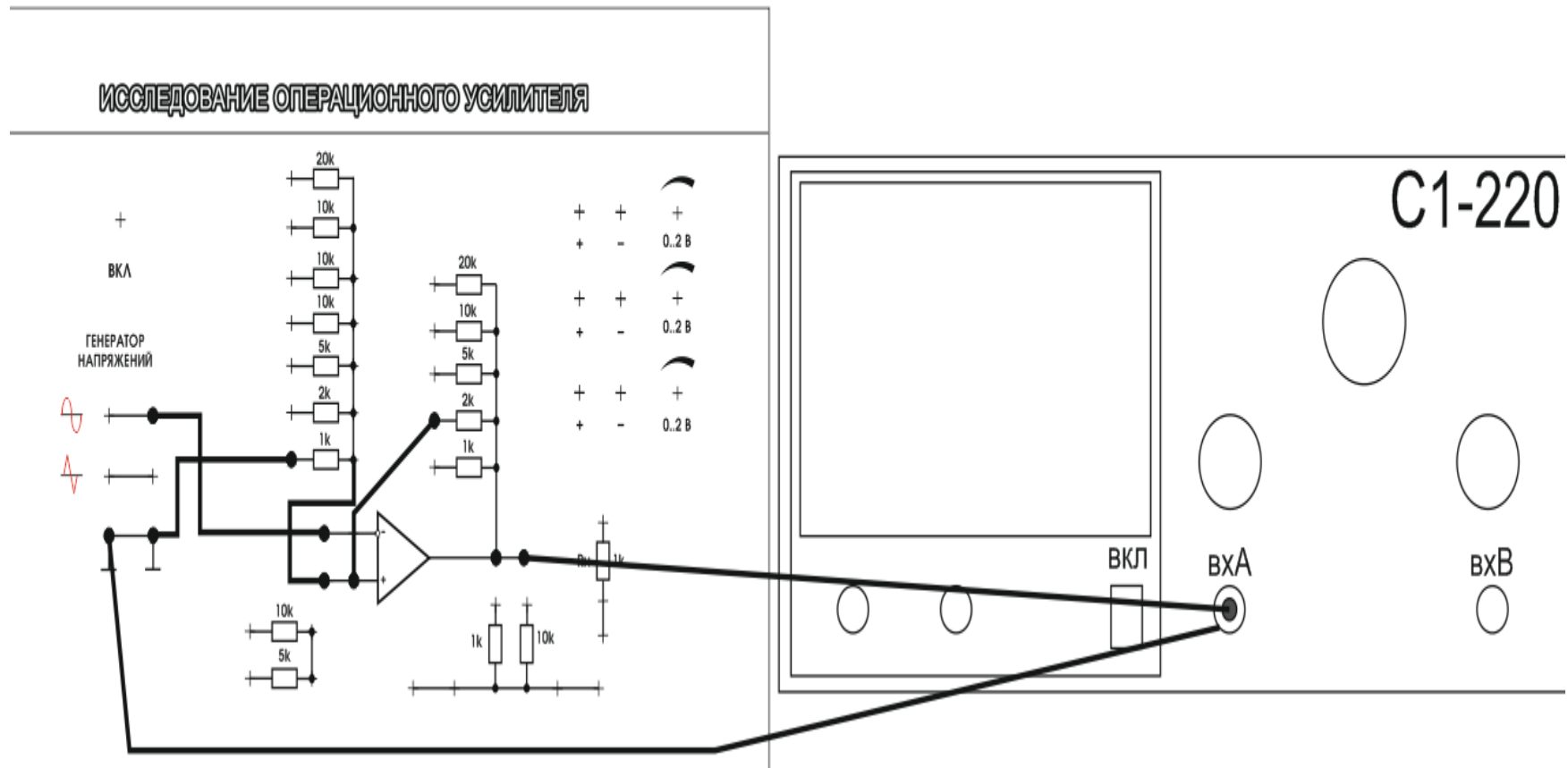


Рис. 2.12. Практическая схема соединений

Примечание: приведенные в данном руководстве принципиальные схемы и схема внешних соединений показаны в качестве примера и носят рекомендательный характер.

Таблица 2.1

Расчетные показатели при изменении R

R, кОМ	1	2	5	10	20
$U_{вх}$, В					
$U_{вых}$, В					

2.5. Контрольные вопросы

- 1) Где применяются операционные усилители?
- 2) Что определяется входным напряжением, при котором выходное напряжение равно нулю?
- 3) Перечислите динамические параметры ОУ.
- 4) Что называется виртуальным замыканием?
- 5) Как определяется коэффициент усиления инвертирующего усилителя?
- 6) Для чего в цепь неинвертирующего входа включают резистор? По какой формуле?
- 7) В каком случае выходное сопротивление неинвертирующего усилителя: $R_{вых.ос} = R_{вых} / (1 + \beta \cdot K_U)$?
- 8) Как определяется для полезного (усиливаемого) сигнала коэффициент обратной связи? Почему?
- 9) Как получить интегратор, дифференциатор и избирательный RC-усилитель?
- 10) По каким формулам определяется максимальный коэффициент усиления и добротность данного усилителя?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

«ИССЛЕДОВАНИЕ СУММАТОРОВ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ»

3.1. Цель работы

Ознакомление с характеристиками и параметрами операционных усилителей без обратной связи и с обратными связями. Исследование применений операционных усилителей в качестве избирательных усилителей, сумматоров, интеграторов и дифференциаторов.

3.2. Вопросы для самопроверки

- 1) В чем заключается принцип действия компаратора? Объяснить, используя временные диаграммы.
- 2) Каковы особенности применения ОУ в схемах компараторов?
- 3) Объясните принцип работы схем детекторов положительного уровня входного напряжения.
- 4) Каким образом оценивается быстродействие компараторов?
- 5) Чем определяется точность задания порогов входного напряжения в схемах детекторов уровня на основе ОУ?
- 6) На чём основана работа компаратора с фиксированной зоной входного напряжения?
- 7) Объясните работу компаратора с фиксированной зоной входного напряжения.
- 8) Приведите схему триггера Шмидта.
- 9) Объясните работу схемы триггера Шмидта.
- 10) Можно ли в компараторе на основе триггера Шмидта сделать уровни порогов входного напряжения разными?

3.3. Краткие сведения из теории

(По данной части см. пункт 2.3 лабораторной работы № 2).

3.4. Экспериментальная часть

- 1) Установить и закрепить на стойке два стационарных блока «Питание» и «Измерительные приборы» и сменный блок № 4 «Исследование операционного усилителя».
- 2) Произвести соединение проводами перемычками элементов стенда. Рекомендуемая схема соединений изображена на рис. 3.11 (см. стр. 40). В процессе измерений изменять входное напряжение.
- 3) Подать на вход напряжения U_1 , U_2 через ограничивающие резисторы и убедиться, что на выходе будет напряжение $U_{вх} = K_{Уос} \cdot (U_1 + U_2)$. Определить экспериментальную погрешность, суммирования.
- 4) Не превышать напряжение $U_{вх}$ больше 0,1 В.

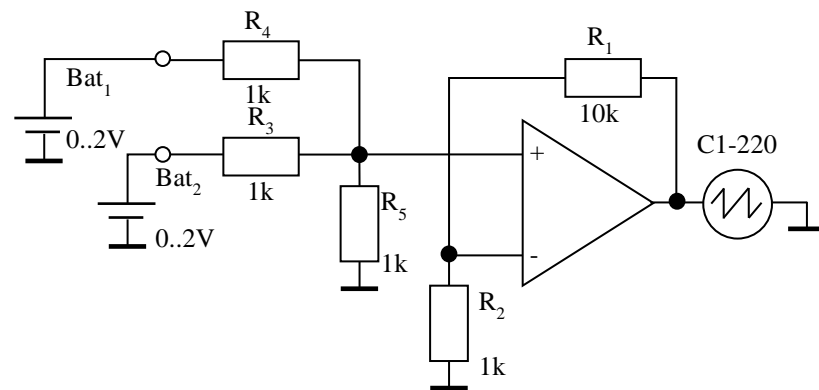


Рис. 3.11. Рекомендуемая схема соединений

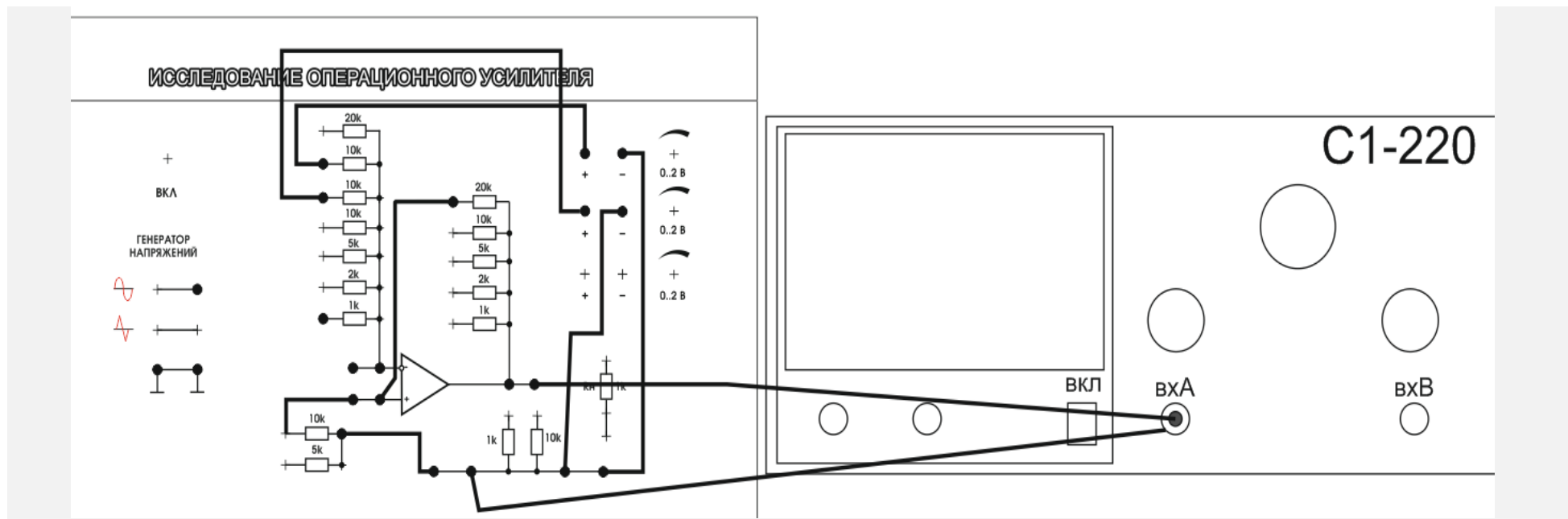


Рис. 3.12. Практическая схема соединений

3.5. Контрольные вопросы

- 1) Приведите схему инвертирующего сумматора.
- 2) Объясните принцип работы схемы инвертирующего сумматора.
- 3) Как определить значение выходного напряжения сумматора?
- 4) Какую схему используют для суммирования постоянного и переменного напряжений? Объясните принцип ее работы.
- 5) Какие параметры схемы определяют величину постоянной составляющей и амплитуды выходного напряжения?
- 6) Какую схему используют для суммирования переменных напряжений? Объясните принцип ее работы.
- 7) Почему зачастую для усилителей большое входное сопротивление не нужно? Как определяется добротность усилителя?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беркович Е.И., Ковалев В.Н., Ковалев Ф.И. и др. Полупроводниковые выпрямители : учеб. – Челябинск, 2022. – 447 с.
2. Беглецов Н.Н. Основы аналоговой электроники. Руководство по выполнению базовых экспериментов. – Челябинск : «ООО ИПЦ «Учебная техника», 2018. – 175 с.
3. Мишулин, Ю.Е., Немонтов В.А. Цифровая схемотехника : учеб. пособие / М71 ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. И. Н. Г. Столетовых. – Изд. 2-е, стер. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2019 – 144 с.
4. Сивков А.М., Чирков Б.В., Радикова А.В. Схемотехника ЭВМ : сб. описаний лаб. работ / М-во науки и высш. образования РФ, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», Ин-т граждан. защиты, каф. общетеорет. дисциплин. – Ижевск : Удмуртский университет, 2021. – 55 с.
5. Новожилов О.П. Электроника и схемотехника : учеб. / Науч. шк. : «Московский политехнический университет». Часть 1. – Москва, 2023. – 423 с.
6. Новожилов О.П. Электроника и схемотехника : учеб. / Науч. шк. : «Московский политехнический университет». Часть 2. – Москва, 2023. – 373 с.
7. Миленина С.А, Миленин Н.К. Электротехника, электроника и схемотехника : учеб. и практикум для вузов / Науч. шк. «МИРЭА – Российский технологический университет». – Изд. 2-е, пер. и доп. – Москва, 2023. – 407 с.

Учебное издание

Составители:

Татьяна Николаевна Стерхова,

Анатолий Степанович Бас

**УСИЛИТЕЛИ: МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «СХЕМОТЕХНИКА»**

Редактор И.А. Бусоргина

Издательский центр «Удмуртский университет»
426034, г. Ижевск, ул. Ломоносова, 4Б, каб. 021
Тел.: + 7 (3412) 916-364, E-mail: editorial@udsu.ru