

В. А. КАНДАЕВ, К. В. АВДЕЕВА

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ К ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНАМ «ЭЛЕКТРОНИКА»,
«ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА»**

ЧАСТЬ 1

ОМСК 2017

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Омский государственный университет путей сообщения

В. А. Кандаев, К. В. Авдеева

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ К ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНАМ «ЭЛЕКТРОНИКА»,
«ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА»

Часть 1

Утверждено методическим советом университета

Омск 2017

УДК 621.38(075.8)

ББК 32.85я73

К19

Учебно-методическое пособие к выполнению лабораторных работ по дисциплинам «Электроника», «Электроника и схемотехника». Часть 1 / В. А. Кандаев, К. В. Авдеева; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2017. 32 с.

В учебно-методическое пособие включены три лабораторные работы, в которых изложены краткие теоретические сведения об операционных усилителях (инвертирующих и неинвертирующих, с дифференциальным входом), компараторах, интеграторах и дифференциаторах и методика исследования схем, выполненных на их основе.

Предназначено для студентов 2-го курса, обучающихся по специальностям «Системы обеспечения движения поездов», «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» и «Информационная безопасность автоматизированных систем».

Библиогр.: 3 назв. Табл. 11. Рис. 26.

Рецензенты: канд. техн. наук, доцент А. А. Руппель;
канд. техн. наук, доцент Е. Ю. Салита.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Правила техники безопасности и порядок проведения лабораторных работ	6
2. Стенд для исследования электронных приборов.....	7
Лабораторная работа 1. Операционный усилитель.....	8
1.1. Общие сведения об операционном усилителе	8
1.1.1. Инвертирующий усилитель	9
1.1.2. Неинвертирующий усилитель	10
1.1.3. Усилитель с дифференциальным входом	11
1.2. Порядок выполнения работы	11
1.3. Контрольные вопросы	15
1.4. Содержание отчета	16
Лабораторная работа 2. Компаратор.....	16
2.1. Принцип работы компаратора	16
2.2. Порядок выполнения работы	20
2.3. Контрольные вопросы	23
2.4. Содержание отчета	23
Лабораторная работа 3. Интегрирующие и дифференцирующие устройства, выполненные на основе операционных усилителей	23
3.1. Принцип действия интегрирующих и дифференцирующих устройств	24
3.2. Порядок выполнения работы	29
3.3. Контрольные вопросы	30
3.4. Содержание отчета	31
Библиографический список	31

ВВЕДЕНИЕ

В условиях эксплуатации электронные системы автоматики, телемеханики и связи подвергаются мощному воздействию дестабилизирующих факторов, источником которых является действующий электрифицированный железнодорожный транспорт, поэтому для грамотной эксплуатации электронных устройств современный специалист должен обладать необходимыми теоретическими знаниями и уметь применять их на практике.

В данном учебно-методическом пособии рассматриваются схемы, выполненные на основе операционных усилителей, а также интегрирующие и дифференцирующие схемы, которые используются во многих электронных устройствах.

Лабораторные работы выполняются фронтальным методом, по которому экспериментальные исследования проводятся после того, как материал данной темы был изложен на лекционном занятии.

Студент допускается к выполнению очередной лабораторной работы после предъявления преподавателю подготовленного (в соответствии с требованиями стандартов) отчета о предыдущей лабораторной работе, в котором должны быть отражены все материалы исследований и их анализ. Получив допуск к занятиям, студент собирает схему и самостоятельно настраивает ее. Если схема не работает или работает неправильно, то необходимо найти причину неисправности и устранить ее.

После настройки схемы и проверки соответствия ее выходных сигналов расчетным данным студент получает разрешение у преподавателя на проведение измерений, выполняет намеченные измерения, результаты которых предъявляет преподавателю, разбирает схему и приводит рабочее место в порядок.

Отчеты по лабораторным работам следует оформлять в соответствии с требованиями стандарта предприятия СТП ОмГУПС-1.2-2005.

1. ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Выполнение лабораторных работ по изучению электронных приборов и схем их включения связано с использованием напряжения, поэтому прежде чем приступить к исследованию электрических схем, студент обязан ознакомиться с инструкцией по технике безопасности, находящейся в лаборатории, получить инструктаж от преподавателя (лаборанта), изучить схемы питания и конструктивное исполнение стендов лаборатории.

Питание на стенды подается от распределительного щита, на котором расположен ввод (главный автоматический выключатель). Стенды для исследования электронных приборов, блоки питания, блоки индикации и осциллографы подключаются к розеткам с напряжением 220 В.

Во время исследования электрических схем студент обязан работать на закрепленном за ним рабочем месте, нести ответственность за сохранность оборудования и выполнять только ту работу, которая определена преподавателем;

сборку схем и необходимые переключения производить только исправными изолированными соединительными проводами при отключенном положении выключателей функциональных блоков стенда;

перед включением схемы под напряжение показать ее преподавателю для проверки правильности сборки и получения разрешения на работу;

не превышать номинальных параметров исследуемых и измерительных приборов;

при перерывах в работе или в подаче электрической энергии отключить стенд;

в случае неисправности какого-либо стенда или прибора, возникновения аномального режима (искрение, дуга, перегрев токоведущих частей, появление дыма и пр.) или при попадании кого-либо из находящихся в лаборатории под напряжение немедленно снять напряжение со всех электроустановок, отключив ввод на распределительном щите, и сообщить об этом преподавателю;

при загорании в блоке питания красных лампочек «Перегрузка» и появлении звукового сигнала, свидетельствующего об аварийном режиме работы стенда, немедленно отключить тумблер «ВКЛ» на лицевой панели блока питания.

После завершения исследований студент должен отключить лабораторный стенд, получить разрешение преподавателя на разборку схемы, разобрать ее, сдать преподавателю комплект соединительных проводов и исследуемых приборов, выданных ему перед началом работы.

Категорически запрещается приносить в лабораторию вещи и предметы, загромождающие рабочие места и способствующие созданию условий, которые могут привести к нарушению правил техники безопасности. В лаборатории запрещается громко разговаривать, покидать без разрешения преподавателя рабочие места и переходить от одного стенда к другому.

2. СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Лабораторный стенд для исследования электронных приборов предназначен для изучения свойств и характеристик различных полупроводниковых элементов и интегральных микросхем.

Стенд состоит из следующих функциональных блоков: блока питания (БП), блока индикации (БИ) и лабораторного модуля «Электронные приборы» (ЭП).

Блок питания включает в себя источники постоянного напряжения Е1 и Е2 и генератор низкой частоты (ГНЧ). БП подключается к сети однофазного напряжения 220 В выключателем «Сеть», расположенным на лицевой панели блока. Источники напряжения Е1, Е2 и ГНЧ включаются в работу соответствующими тумблерами «ВКЛ», о чем свидетельствует загорание лампочек на лицевой панели БП. Назначение переключателей и регулировочных потенциометров источников напряжения Е1, Е2 и ГНЧ расшифровано на лицевой панели БП.

Блок индикации содержит амперметры РА1 и РА2, которые используются для измерения постоянного тока, и вольтметры РV1 и РV2, предназначенные для измерения постоянного и переменного напряжения в зависимости от положения тумблеров «U₌» и «U_~». Напряжение на блок индикации подается выключателем «Сеть», расположенным на лицевой панели БИ.

Лабораторный модуль ЭП содержит коммутационное поле, на котором показаны условные обозначения и пределы измерения источников напряжения Е1 – Е4, ГНЧ, генератора импульсов, мультиметров 1 и 2 и имеются гнезда для

сборки схем. Регулирование сигналов на выходах Е1, Е2, ГНЧ и генератора импульсов осуществляется потенциометрами.

Лабораторная работа 1

ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Цель работы: изучение принципа действия операционного усилителя (ОУ), схем, выполненных на его основе, и измерение параметров этих схем.

1.1. Общие сведения об операционном усилителе

Операционный усилитель (многокаскадный) в интегральном исполнении и с дифференциальным входом имеет большой коэффициент усиления K_y , высокое входное сопротивление $R_{вх}$, широкий диапазон рабочей частоты, низкое выходное сопротивление $R_{вых}$, низкую чувствительность к синфазному сигналу и малое напряжение сдвига. В общем случае ОУ состоит из трех основных узлов (рис. 1.1).

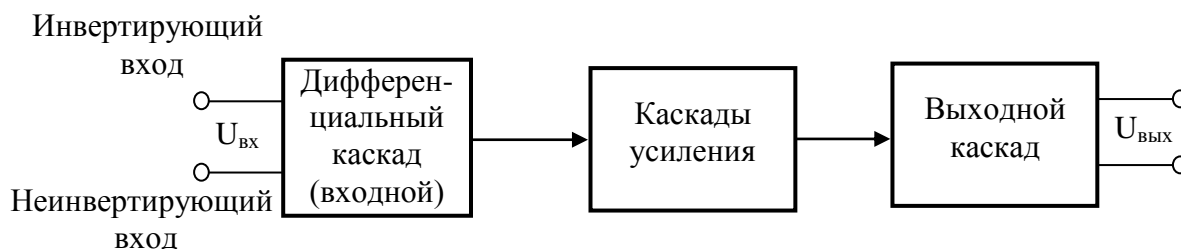


Рис. 1.1. Структурная схема операционного усилителя

Первый входной каскад операционного усилителя является дифференциальным усилителем, который имеет высокое входное сопротивление, большой коэффициент усиления по отношению к разности сигналов ΔU (дифференциальный сигнал, $\Delta U = U_1 - U_2$, где U_1 и U_2 — неинвертирующий и инвертирующий сигнал соответственно) и малый коэффициент усиления по отношению к поданным одновременно на входы сигналам, имеющим одинаковые амплитуду и фазу (синфазный сигнал). За входным каскадом включены несколько проме-

жуточных усилителей, которые обеспечивают необходимый коэффициент усиления по напряжению и току. В промежуточных усилителях используются дифференциальные и однополярные каскады.

Оконечный каскад, в качестве которого, как правило, используют эмиттерный повторитель, обеспечивает низкое выходное сопротивление.

1.1.1. Инвертирующий усилитель

Входной и выходной сигналы инвертирующего усилителя сдвинуты по фазе относительно друг друга на 180° .

Коэффициент усиления инвертирующего усилителя с обратной связью определяется по формуле:

$$K_{y.o.c} = -\frac{R_{o.c}}{R_1}, \quad (1.1)$$

где $R_{o.c}$ – сопротивление в цепи обратной связи;

R_1 – сопротивление на входе усилителя.

Схема инвертирующего усилителя приведена на рис. 1.2.

Знак минус в правой части формулы (1.1) указывает на то, что выходной сигнал инвертирован относительно входного.

На базе инвертирующего усилителя строится инвертирующий сумматор (рис. 1.3).

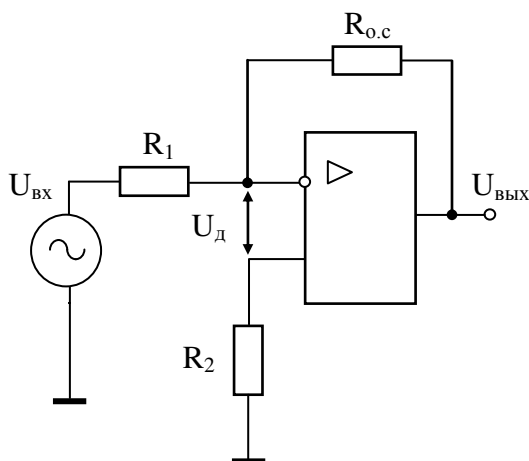


Рис. 1.2. Схема инвертирующего усилителя

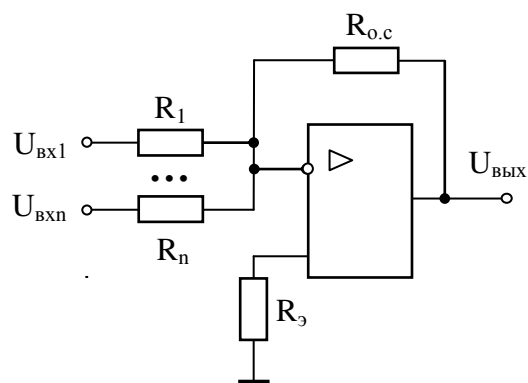


Рис. 1.3. Схема инвертирующего сумматора

Выходное напряжение инвертирующего сумматора определяется по формуле:

$$U_{\text{ВЫХ}} = R_{\text{o.c}} \sum_{i=1}^n \frac{U_{\text{ВХ } i}}{R_i}, \quad (1.2)$$

где $U_{\text{ВХ } i}$ – напряжение i -го входа;

R_i – сопротивление i -го входа.

Сопротивление, подключаемое к неинверсному входу усилителя (см. рис. 1.3)

$$R_9 = \frac{1}{G_9}, \quad (1.3)$$

где

$$G_9 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_{\text{o.c}}}. \quad (1.4)$$

1.1.2. Неинвертирующий усилитель

Фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами неинвертирующего усилителя на низких частотах равен нулю. С увеличением частоты наблюдается отставание по фазе выходного сигнала за счет наличия реактивных элементов схемы, в том числе паразитных. Схема неинвертирующего усилителя приведена на рис. 1.4.

Коэффициент усиления усилителя с замкнутой обратной связью

$$K_{\text{o.c}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (1.5)$$

Если $R_2 = 0$; $R_1 = \infty$, то получим схему повторителя напряжения, схема которого приведена на рис. 1.5, где $U_{\text{д}}$ – дифференциальное напряжение.

Из закона Кирхгофа имеем: $U_{\text{ВХ}} + U_{\text{д}} = U_{\text{ВЫХ}}$, а поскольку $K_{\text{ус}} U_{\text{д}} = U_{\text{ВЫХ}}$, $U_{\text{ВХ}} + U_{\text{ВЫХ}} / K_{\text{ус}} = U_{\text{ВЫХ}}$. Учитывая, что значение коэффициента усилителя без обратной связи $K_{\text{ус}}$ значительное (несколько тысяч), отношение $U_{\text{ВЫХ}} / K_{\text{ус}} \rightarrow 0$, получим: $U_{\text{ВХ}} \approx U_{\text{ВЫХ}}$. Входной сигнал подается на неинвертирующий вход, поэтому сигнал на выходе будет равен входному как по амплитуде, так и по фа-

зе. Повторитель напряжения используют в качестве буферного каскада, с помощью которого можно согласовать источник сигнала с высоким внутренним сопротивлением и низкоомную нагрузку.

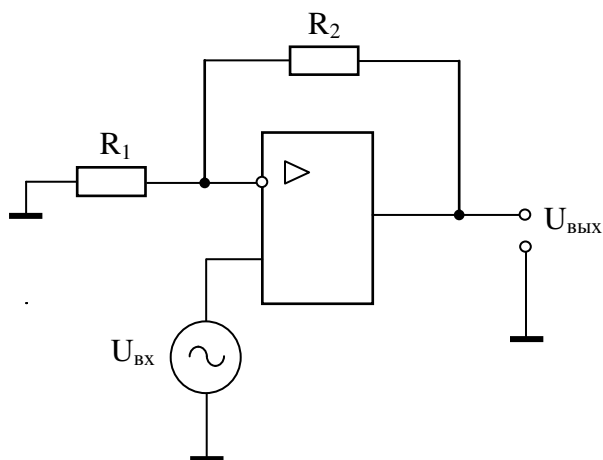


Рис. 1.4. Схема неинвертирующего усилителя

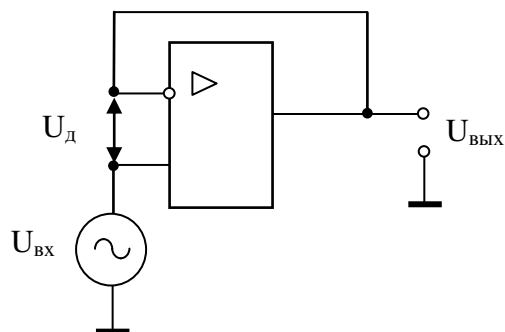


Рис. 1.5. Схема повторителя напряжения

1.1.3. Усилитель с дифференциальным входом

Схема усилителя с дифференциальным входом приведена на рис. 1.6.

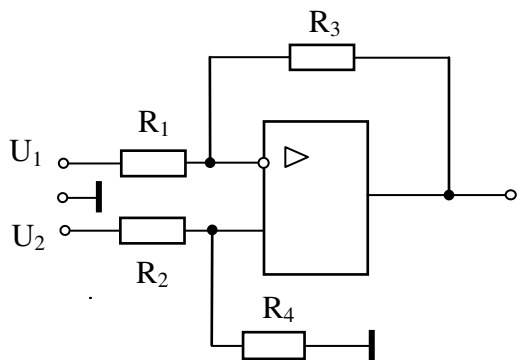


Рис. 1.6. Схема усилителя с дифференциальным входом

Для случая, когда $R_1 = R_2$ и $R_3 = R_4$ (ситуация, которая часто встречается на практике), получим: $U_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_3}{R_1}(U_2 - U_1)$.

Полярность (фаза) выходного сигнала определяется большим из приложенных входных сигналов U_1 и U_2 . Выбор резисторов осуществляется по принципу выбора для инвертирующего и неинвертирующего усилителей.

1.2. Порядок выполнения работы

Для снятия характеристик усилителя на наборном поле стенда требуется собрать схему, приведенную на рис. 1.7.

Для исследования операционного усилителя используется интегральная микросхема (ИМС) К1401УД2А (зарубежный аналог LM324N), структурная схема которой представлена на рис. 1.8.

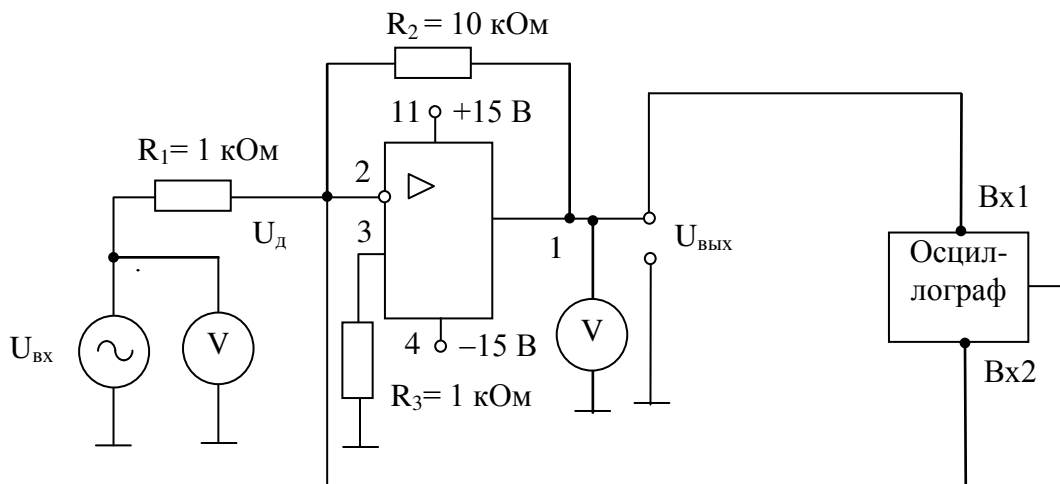


Рис. 1.7. Схема для исследования инвертирующего усилителя

1) Исследовать характеристику «вход – выход». Результаты измерений при постоянной частоте входного сигнала, равной 1000 Гц, необходимо занести в табл. 1.1. Зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжения.

2) По данным табл. 1.1 построить зависимость $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ для значений R_1 , равных 1 и 10 кОм. Зарисовать осциллограммы входного и выходного сигналов. Определить теоретическое значение коэффициента усиления с обратной связью K_y по известным значениям элементов схемы (см. рис. 1.7).

3) Снять амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) схемы при $R_1 = 1$ кОм; $U_{\text{вх}} = \text{const} = 0,5$ В. Заполнить табл. 1.2.

Построить зависимость $K_y = f(F)$ при $U_{\text{вх}} = \text{const}$ (при необходимости использовать логарифмический масштаб).

4) На наборном поле стенда собрать схему неинвертирующего усилителя, приведенную на рис. 1.9.

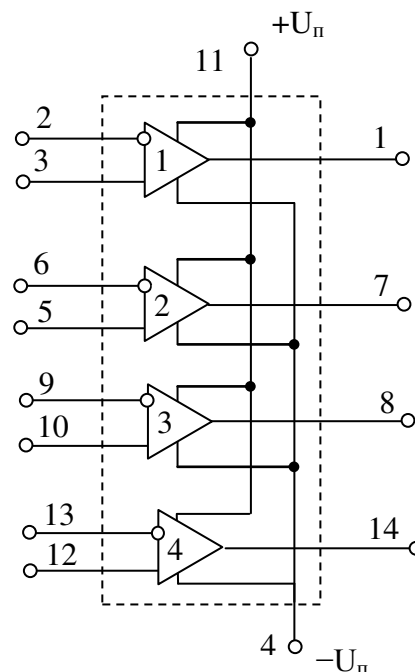


Рис. 1.8. Структурная схема интегральной микросхемы

Таблица 1.1

Результаты исследований зависимости $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$

$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$		$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	$3 \cdot 10^{-2}$	0,1	0,3	0,5	0,7	1	1,3	3,0	5,0
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$	$R_1 = 1 \text{ кОм}$											
	$R_1 = 10 \text{ кОм}$											

Таблица 1.2

Результаты исследований зависимости $K_y = f(F)$

$f, \text{Гц}$	40	65	100	400	10^3	$4 \cdot 10^3$	10^4	$6,5 \cdot 10^4$	10^5	$2,5 \cdot 10^5$
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$										
K_y										

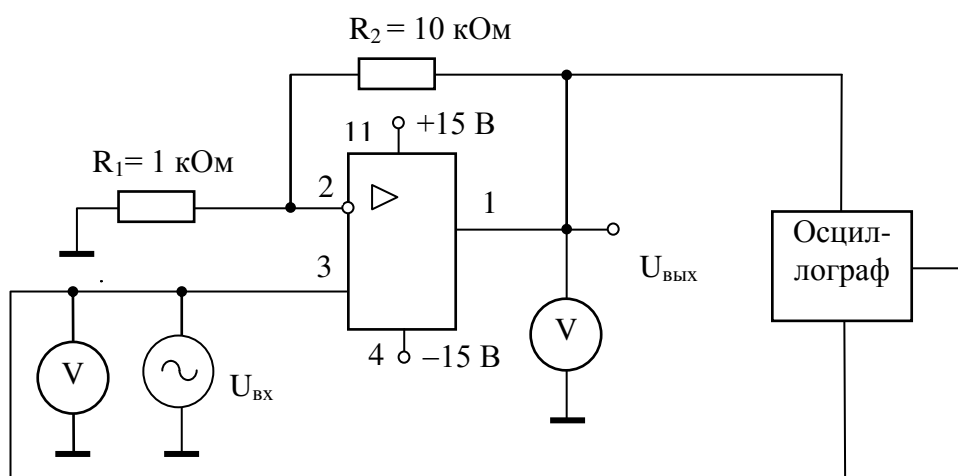


Рис. 1.9. Схема неинвертирующего усилителя

Выполнить измерения и заполнить табл. 1.1 и 1.2 для неинвертирующего усилителя, построить графики $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$, $K_y = f(F)$ при $U_{\text{ВХ}} = \text{const}$. Определить расчетное значение K_y , используя для этого известные величины элементов (см. рис. 1.9). Зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжения.

5) Собрать дифференциальную схему включения усилителя, представленную на рис. 1.10.

Выполнить измерения, полученные результаты занести в табл. 1.3 и построить графическую зависимость $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ1}} - U_{\text{ВХ2}})$.

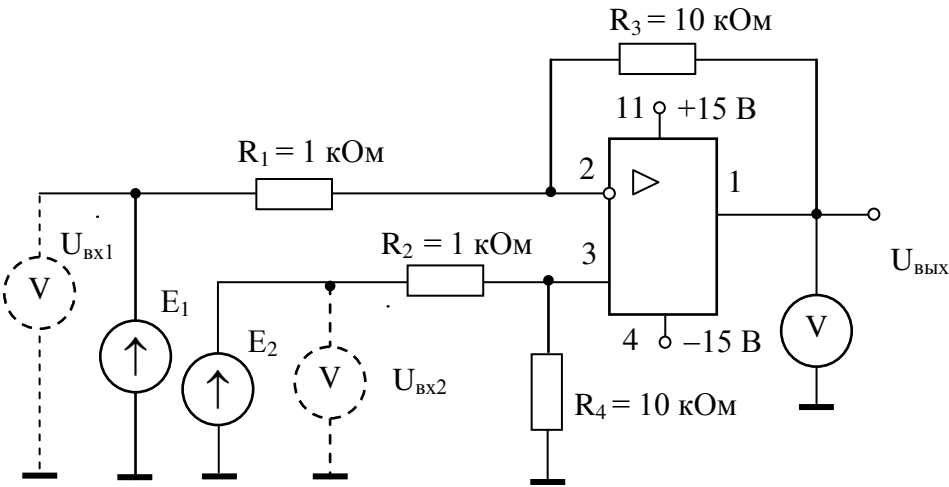


Рис. 1.10. Дифференциальная схема включения усилителя

Таблица 1.3

Результаты исследований зависимости $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ1}} - U_{\text{ВХ2}})$

$U_{\text{ВХ1}}$							
$U_{\text{ВХ2}}$							
$U_{\text{ВХ1}} - U_{\text{ВХ2}}$							
$U_{\text{ВЫХ}}$							

6) Для определения коэффициента ослабления синфазного сигнала $K_{\text{о.с.с}}$ собрать схему, представленную на рис. 1.11.

Выполнить измерения, полученные результаты занести в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Результаты измерений $K_{\text{о.с.с}}$

f, Гц		40	100	1000	10000
$K_{\text{о.с.с}}$	$U_{\text{ВХ}} = 0,1 \text{ В}$				
	$U_{\text{ВХ}} = 1 \text{ В}$				
	$U_{\text{ВХ}} = 3 \text{ В}$				

Коэффициент ослабления синфазного сигнала определяется по выражению:

$$K_{o.c.c} = \frac{U_{BX}}{U_{ВЫХ}} \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (1.6)$$

или

$$K_{o.c.c} = 20 \lg \left[\frac{U_{BX}}{U_{ВЫХ}} \frac{R_1 + R_2}{R_1} \right], \text{ дБ.} \quad (1.7)$$

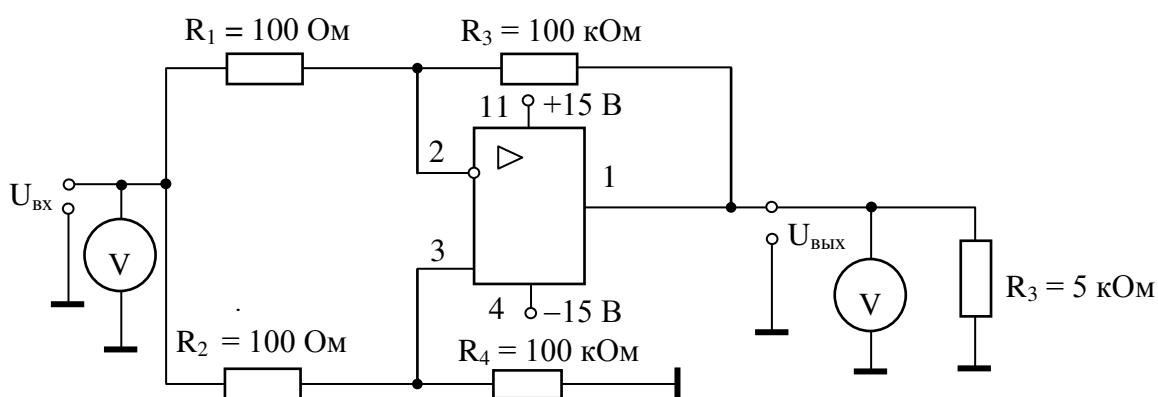


Рис. 1.11. Схема для измерения коэффициента $K_{o.c.c}$

1.3. Контрольные вопросы

- 1) Назначение, параметры, характеристики и особенности применения ОУ.
- 2) Приведите схемы инвертирующего, неинвертирующего и дифференциального включения интегральной микросхемы операционного усилителя, определите их основные параметры и дайте сравнительную характеристику.
- 3) Назначение неинвертирующего и инвертирующего повторителей напряжения, их схемная реализация.
- 4) Начертите схему сумматора напряжения, поясните ее.
- 5) Изобразите амплитудно-частотную характеристику интегральной микросхемы операционного усилителя и операционного усилителя, охваченного отрицательной обратной связью. Сравните эти характеристики и сделайте выводы.
- 6) Как осуществляется и для чего предназначена коррекция частотных характеристик интегральной микросхемы операционного усилителя?

1.4. Содержание отчета

- 1) Цель работы.
- 2) Краткие сведения из теории.
- 3) Расположение выводов на корпусе (цоколевка) и основные паспортные данные ИМС К1401УД2А.
- 4) Схемы исследования усилителей.
- 5) Полученные результаты, оформленные в виде таблиц и графиков, для различных схем включения ОУ.
- 6) Осциллограммы входных и выходных напряжений ОУ.
- 7) Ответы на контрольные вопросы.

Лабораторная работа 2

КОМПАРАТОР

Цель работы: изучение принципов функционирования различных схем компараторов напряжения, порядка выполнения измерений передаточных характеристик.

2.1. Принцип работы компаратора

Компаратор – это специальная интегральная схема, предназначенная для сравнения двух входных напряжений ($U_{вх1}$ и $U_{вх2}$) и получения выходного напряжения $U_{вых} = U_{max}$, если $U_{вх1} > U_{вх2}$; $U_{вых} = U_{min}$, если $U_{вх1} < U_{вх2}$, где U_{min} и U_{max} – два фиксированных значения выходного напряжения.

Обратная связь в компараторах, как правило, отсутствует, поэтому реализуется максимальный коэффициент усиления, достигающий нескольких десятков тысяч.

Дифференциальное напряжение на входе компаратора, равное разности двух входных напряжений, достаточно мало и составляет 0,1 – 3 мВ.

Вследствие малого значения дифференциального напряжения, при котором происходит переключение компаратора, его выходное напряжение соответствует напряжению насыщения. Передаточная характеристика, или зависимость выходного напряжения от разности входных напряжений ($\Delta U_{вх} = U_{вх1} - U_{вх2}$), приведена на рис. 2.1.

При двухполярном напряжении питания микросхемы выходное напряжение также будет двухполярным (рис. 2.2).

Многие параметры компаратора аналогичны параметрам операционного усилителя. Поэтому любой ОУ можно использовать в качестве компаратора.

В компараторе отсутствует ограничение на частотную характеристику, и, как правило, он работает без обратной связи, что обеспечивает его высокое быстродействие.

Выходное напряжение компаратора может принимать одно из двух фиксированных значений, поэтому при нулевом входном напряжении выходное напряжение равно U_{\max} либо U_{\min} . Значение выходного напряжения ОУ в режиме насыщения примерно на 1 – 2 В отличается от значения напряжения питания. В компараторах уровни выходного напряжения совместимы с уровнями схем цифровой логики.

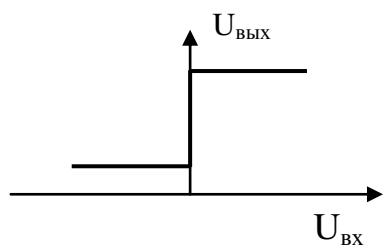


Рис. 2.1. Передаточная характеристика компаратора

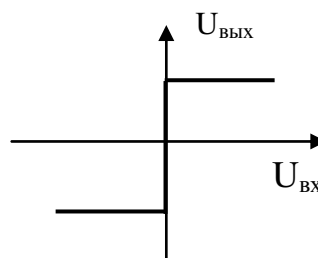


Рис. 2.2. Передаточная характеристика компаратора при двухполярном напряжении питания

В зависимости от схемы включения ОУ и изменения входного сигнала в окрестности нуля от отрицательного значения к положительному осуществляется переключение выходного напряжения компаратора из режима отрицательного насыщения в положительное и наоборот (рис. 2.3).

Наклон характеристик определяется коэффициентом усиления ОУ.

Пороговый уровень входного напряжения можно задать значением и знаком напряжения смещения, подаваемого на инвертирующий вход ОУ. Напряжение смещения можно задать любой схемой стабилизации (рис. 2.4 и 2.5).

Если входной сигнал колеблется (изменяется) возле порогового значения, то возможен так называемый «дребезг» – многократные переключения компаратора.

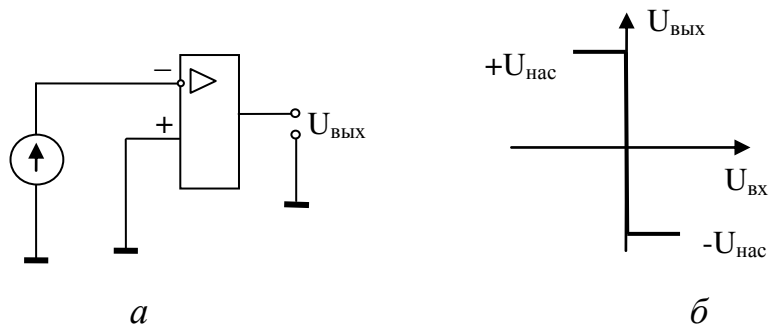


Рис. 2.3. Схема (а) и характеристика «вход – выход» компаратора (б) нулевого уровня

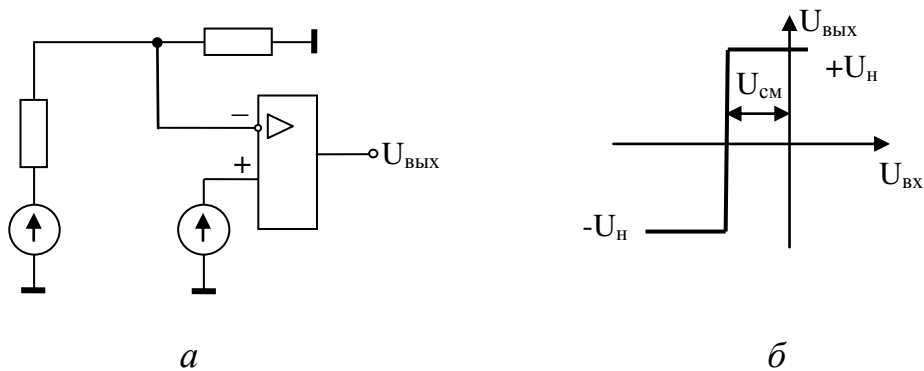


Рис. 2.4. Схема (а) и характеристика «вход – выход» компаратора (б) при наличии напряжения смещения на инвертирующем входе

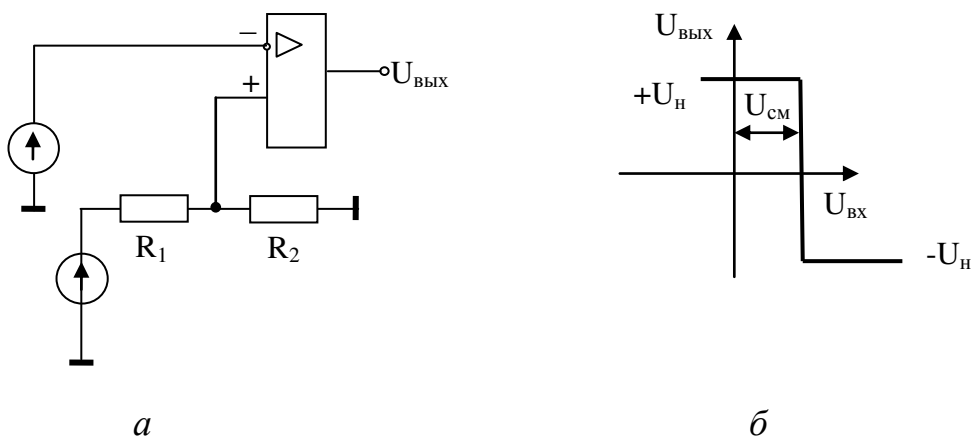


Рис. 2.5. Схема (а) и характеристика «вход – выход» компаратора (б) при наличии напряжения смещения на неинвертирующем входе

Подобного явления можно избежать, если характеристика компаратора имеет гистерезис, который реализуется введением положительной обратной связи.

Дополнительным смещением входного сигнала петлю гистерезиса можно сдвигать в область как положительных, так и отрицательных значений входного напряжения.

Схема компаратора с положительной обратной связью и его передаточная характеристика приведены на рис. 2.6.

Значение входного напряжения, при котором происходит переключение выходного сигнала из высокого значения напряжения в низкое (ВТО – высшая точка отключения) или из положительного в отрицательное, определяется по выражению:

$$U_{\text{ВТО}} = \frac{R_2 U_{\text{нас}}}{R_1 + R_2}. \quad (2.1)$$

Значение входного напряжения, при котором происходит переключение компаратора из низкого значения выходного напряжения в высокое (НТО – низшая точка отключения) или из отрицательного в положительное, рассчитывается по формуле:

$$U_{\text{НТО}} = \frac{R_2 (-U_{\text{нас}})}{R_1 + R_2}. \quad (2.2)$$

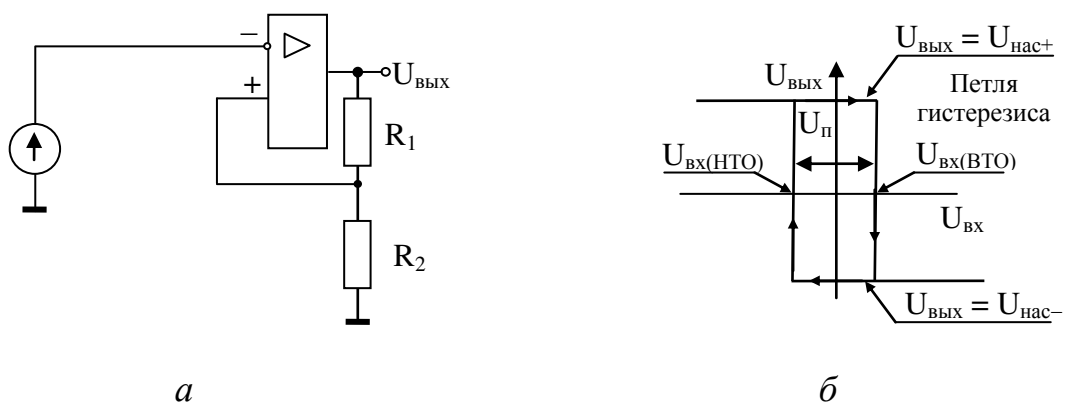


Рис. 2.6. Схема компаратора с петлей гистерезиса (а) и передаточная характеристика (б)

Напряжение, соответствующее петле гистерезиса,

$$U_{\pi} = \frac{(U_{\max} - U_{\min})R_2}{R_1 + R_2}. \quad (2.3)$$

2.2. Порядок выполнения работы

Для исследования компаратора собрать схему, приведенную на рис. 2.7.

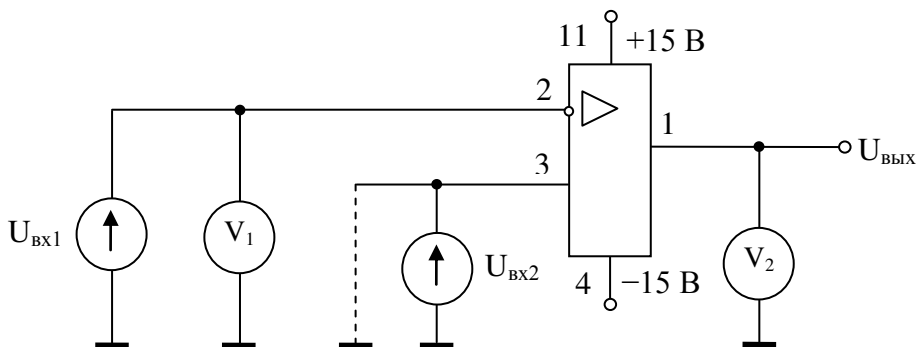


Рис. 2.7. Схема компаратора для однополярных входных сигналов

1) Отключить на схеме источник $U_{\text{BX}2}$ и соединить третий вывод микросхемы с общей точкой, как показано на рис. 2.7 пунктиром. Изменяя значения $U_{\text{BX}1}$, снять значения $U_{\text{ВЫХ}}$ и заполнить табл. 2.1. Определить ближайшие к U_{π} значение $U_{\text{BX}1}$ до переключения ($U_{\pi-}$) и значение $U_{\text{BX}1}$ сразу после переключения ($U_{\pi+}$) компаратора.

Таблица 2.1

Значения напряжения «вход – выход» при $U_{\text{BX}2} = 0$

$U_{\text{BX}1}, \text{ В}$	-2	-1	-0,5	$U_{\pi-}$	U_{π}	$U_{\pi+}$	0,5	1	2
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$									

2) Предварительно восстановив первоначальную схему (см. рис. 2.7), отключить источник напряжения $U_{\text{BX}1}$, соединить второй вывод микросхемы с общей точкой, вольтметр V_1 подключить к третьему выводу микросхемы. Изменяя значения $U_{\text{BX}2}$, снять значения $U_{\text{ВЫХ}}$ и заполнить табл. 2.2. Определить значения $U_{\pi+}$ и $U_{\pi-}$ аналогично п. 1.

Таблица 2.2

Значения напряжения «вход – выход» при $U_{\text{вх1}} = 0$

$U_{\text{вх2}}, \text{ В}$	-2	-1	-0,5	$U_{\text{п-}}$	$U_{\text{п}}$	$U_{\text{п+}}$	0,5	1	2
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$									

3) Восстановить первоначальную схему (см. рис. 2.7). Установить на третьем выводе микросхемы напряжение 1 В с помощью источника $U_{\text{вх2}}$. Изменяя значение $U_{\text{вх1}}$, снять значения $U_{\text{вых}}$ и заполнить табл. 2.3.

Таблица 2.3

Значения напряжения «вход – выход» при $U_{\text{вх2}} = 1 \text{ В}$

$U_{\text{вх1}}, \text{ В}$	-2	-1,5	-1,3	0	0,5	$U_{\text{п-}}$	$U_{\text{п}}$	$U_{\text{п+}}$	1,5	2
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$										

4) Произвести действия, аналогичные п. 3, и заполнить табл. 2.4.

Таблица 2.4

Значения напряжения «вход – выход» при $U_{\text{вх1}} = 1 \text{ В}$

$U_{\text{вх2}}, \text{ В}$	-2	-1,5	-1,3	0	0,5	$U_{\text{п-}}$	$U_{\text{п}}$	$U_{\text{п+}}$	1,5	2
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$										

По данным табл. 2.1 – 2.4 построить следующие зависимости: $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх1}})$ при $U_{\text{вх2}} = 0$; $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх2}})$ при $U_{\text{вх1}} = 0$; $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх1}})$ при $U_{\text{вх2}} = 1 \text{ В}$; $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх2}})$ при $U_{\text{вх1}} = 1 \text{ В}$.

5) Собрать схему, приведенную на рис. 2.8.

Зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжения при частоте генератора сигналов 1000 Гц и амплитудном значении сигнала 1 В. По осциллограмме определить скорость нарастания выходного сигнала как отношение приращения выходного напряжения $\Delta U_{\text{вых}}$ к соответствующему приращению времени Δt .

6) Собрать схему компаратора с петлей гистерезиса (рис. 2.9).

Зарисовать осциллограммы входного и выходного сигналов. Из данных осциллографических измерений определить верхнюю и нижнюю точки отключения (положительную и отрицательную) напряжения насыщения компаратора.

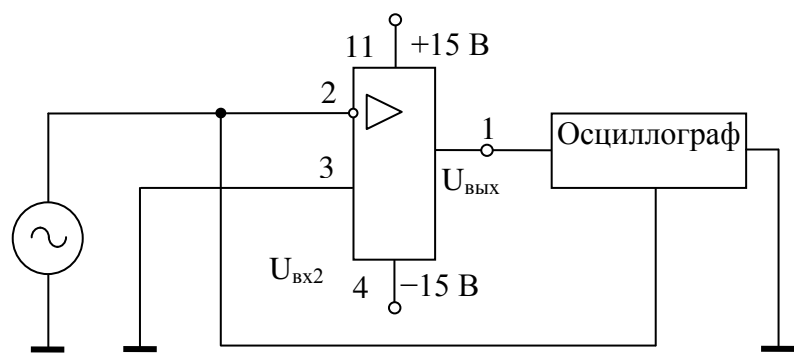


Рис. 2.8. Схема компаратора напряжения при нулевом смещении

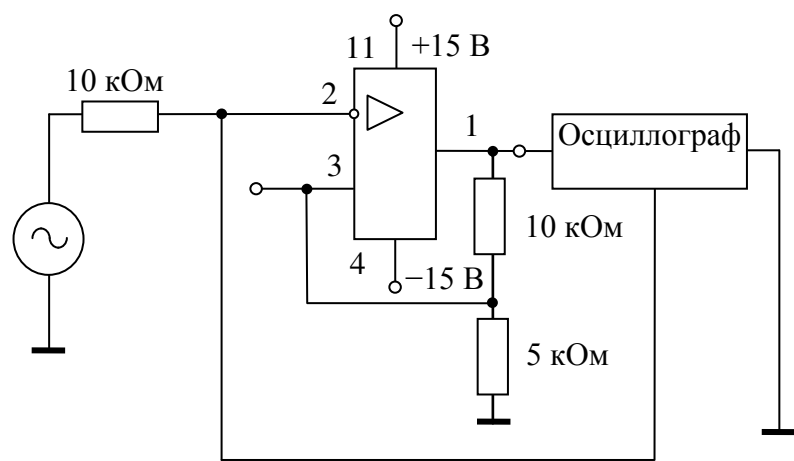


Рис. 2.9. Схема компаратора с петлей гистерезиса

По известным значениям элементов схемы (см. рис. 2.9) и результатам измерений рассчитать $U_{ВТО}$, $U_{НТО}$, $U_{п}$. Заполнить табл. 2.5.

Таблица 2.5

Параметры переключения компаратора

Результат	Параметр				
	$U_{ВХ(ВТО)}$	$U_{ВХ(НТО)}$	$U_{нас+}$	$U_{нас-}$	$U_{п}$
Измерение					
Расчет					

2.3. Контрольные вопросы

- 1) Каковы основные особенности построения компараторов на ОУ?
- 2) Почему в компараторах на ОУ не используется отрицательная обратная связь?
- 3) Как можно повысить помехоустойчивость компаратора?
- 4) Как определить синфазное напряжение на входах компаратора для сравнения однополярных сигналов?
- 5) Как осуществляется формирование нужных значений выходных напряжений в компараторах?
- 6) В чем состоит различие значений основных параметров компараторов на ОУ и компараторов в виде отдельной микросхемы?
- 7) Начертить схему двухпорогового компаратора и временные диаграммы ее работы, пояснить их.

2.4. Содержание отчета

- 1) Цель работы.
- 2) Краткие сведения из теории.
- 3) Цоколевка ИМС К1401УД2А.
- 4) Схемы исследования компараторов.
- 5) Результаты измерений, оформленные в виде таблиц, и графики следующих зависимостей: $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ2}})$ при $U_{\text{ВХ1}} = 0$; $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ1}})$ при $U_{\text{ВХ2}} = 1$; $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ2}})$ при $U_{\text{ВХ1}} = 1$ В; $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ1}})$ при $U_{\text{ВХ2}} = 0$ В.
- 6) Осциллограммы входных и выходных сигналов и результаты измерений $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$, Δt , $U_{\text{ВХ(ВТО)}}$, $U_{\text{ВХ(НТО)}}$, $U_{\text{П}}$.
- 7) Ответы на контрольные вопросы.

Лабораторная работа 3

ИНТЕГРИРУЮЩИЕ И ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА, ВЫПОЛНЕННЫЕ НА ОСНОВЕ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Цель работы: изучение принципа действия и схем интеграторов и дифференциаторов.

3.1. Принцип действия интегрирующих и дифференцирующих устройств

Необходимо иметь в виду, что ОУ, с помощью которых реализуется интегрирование или дифференцирование электрических сигналов, по своим параметрам близки к идеальным, т. е. имеют достаточно высокие входное сопротивление и коэффициент усиления, и ток смещения $I_{см}$ приблизительно равен нулю. Схема интегратора на ОУ представлена на рис. 3.1. Электрическая емкость $C = \frac{Q}{U}$, где Q – заряд конденсатора; U – разность потенциалов между обкладками конденсатора. Отсюда следует, что $Q = CU$. Изменение заряда за единицу времени есть не что иное, как ток заряда или разряда конденсатора:

$$i_c = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt}. \quad (3.1)$$

Так как ОУ близок по своим параметрам к идеальному, $I_{см} \approx 0$, $U_d \approx 0$, то $i_c = i_R$, т. е.

$$i_c = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} = i_R. \quad (3.2)$$

Учитывая, что $U_d = 0$ и $U_c = -U_{вых}$, запишем:

$$i_c = -C \frac{du_{вых}}{dt} = \frac{U_{вх}}{R_1} = i_R. \quad (3.3)$$

Из выражения (3.3) можно определить зависимость между $U_{вх}$ и $U_{вых}$:

$$du_{вых} = -\frac{1}{RC} U_{вх} dt \quad \text{или} \quad U_{вых} = -\frac{1}{RC} \int u_{вх} dt. \quad (3.4)$$

Пределами интегрирования в зависимости (3.4) являются временные моменты t_1 и t_2 , в интервале которых производятся наблюдения (t_1 – начало наблюдения, t_2 – окончание). Для вычисления интеграла от изменяющегося напряжения необходимо получить зависимость $u_{вх} = f(t)$.

Основной проблемой в аналоговых интеграторах является изменение («дрейф») выходного напряжения, вызванное зарядом конденсатора C , токами утечки, входными токами смещения и входным напряжением смещения ОУ. Схема фактически интегрирует «неидеальности» ОУ и других элементов. Если не принять никаких мер, то на выходе схемы появится большое смещение выход-

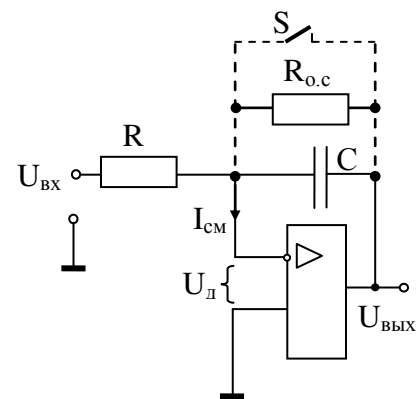


Рис. 3.1. Интегратор на ОУ

ного напряжения, которое в конечном счете приводит к насыщению ОУ. Предлагается три способа решения этой проблемы.

Если интегратор является частью схемы, охваченной общей обратной связью, то «дрейф» интегратора не вызывает особых осложнений, так как компенсируется общей обратной связью.

Если интегрируемый сигнал не содержит постоянной составляющей, то в цепь обратной связи ОУ специально включают резистор $R_{o.c}$ (см. рис. 3.1). Этот резистор обеспечивает путь для входных токов смещения в обход конденсатора C . Такой прием используется только в тех случаях, когда значение нижней частоты спектра входных сигналов более 1 Гц, так как при меньших значениях частоты необходимо очень большое значение сопротивления резистора $R_{o.c}$. Сопротивление $R_{o.c}$ должно быть, с одной стороны, достаточно малым, чтобы уменьшить выходное смещение до приемлемого уровня, а с другой – достаточно большим для того, чтобы схема работала как интегратор во всем диапазоне частоты входного сигнала.

Если требуется интегрировать сигналы постоянного тока, то в цепь обратной связи вводят ключ сброса S для периодического разряда конденсатора C .

Идеальный интегратор имеет частотную характеристику с постоянной крутизной сигнала (20 дБ на декаду) во всем диапазоне частоты. Характеристика реальных интеграторов отличается от характеристики идеальных (рис. 3.2). Нижняя рабочая частота определяется либо конечным коэффициентом усиления ОУ, либо конечным значением сопротивления утечки $R_{o.c}$. Интегратор может оказаться неработоспособным на низких частотах из-за большого выходного «дрейфа». Верхняя рабочая частота ограничена конечным значением произведения коэффициента усиления на ширину полосы пропускания ОУ. Чтобы схема работала как интегратор, спектр входного сигнала должен с определенным запасом находиться в рабочем диапазоне частоты (например, в 10 раз выше нижней и ниже $1/10$ верхней предельной частоты).

Как было отмечено выше, верхний предел частотной характеристики интегратора ограничивается конечной шириной полосы пропускания ОУ, который создает дополнительный полюс на АЧХ на частоте, примерно равной f_A , где f_A – произведение коэффициента усиления на ширину полосы пропускания ОУ. Этот дополнительный полюс вызывает появление при высоких значениях частоты погрешности фазового сдвига и коэффициента усиления. Один из способов коррекции этой погрешности – включение небольшого конденсатора C_k параллельно резистору R для устранения дополнительного полюса. Учитывая, что

$1/2\pi RC \ll f_{\text{ср}}$, значение C_k выбирается из условия: $f_{\text{ср}} = 1/2\pi(RC_k)$. Добиться полной коррекции трудно, так как точное значение f_A , как правило, неизвестно. Этим способом можно уменьшить погрешность на порядок, однако при очень большом значении C_k схема может возбудиться.

В случае значительных входных сигналов в схеме появляются искажения, связанные с ограниченной скоростью нарастания выходного напряжения ОУ. Это особенно важно в быстродействующих схемах при больших емкостях конденсатора C .

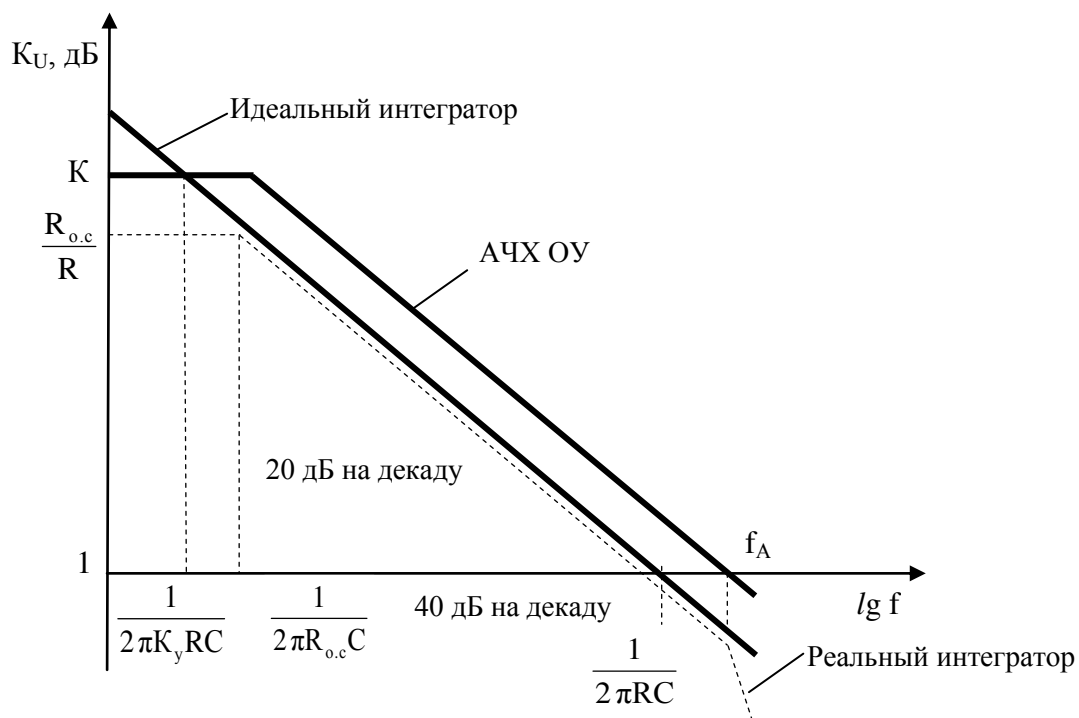


Рис. 3.2. Частотная характеристика интегратора

Если требуется большая постоянная времени интегратора, то значения R и C должны быть порядка 1 МОм и 1 мкФ соответственно, а это вызывает некоторые трудности в построении схемы интегратора, поскольку конденсаторы емкости более 1 мкФ имеют большие габариты и неудовлетворительные электрические характеристики (сопротивление утечки, повышенная электрическая абсорбция и потери в диэлектрике). Введение в схему высокоомных резисторов (более 1 МОм) делает ее более подверженной влиянию паразитных емкостей и утечек, кроме того, такие резисторы менее стабильны и более дороги. Чтобы устранить эти проблемы, используют специальные схемы.

Дифференциатор создает выходное напряжение, пропорциональное скорости изменения входного. Схема дифференциатора приведена на рис. 3.3.

При дифференцировании усилитель должен пропускать только переменную составляющую входного сигнала и коэффициент усиления схемы должен

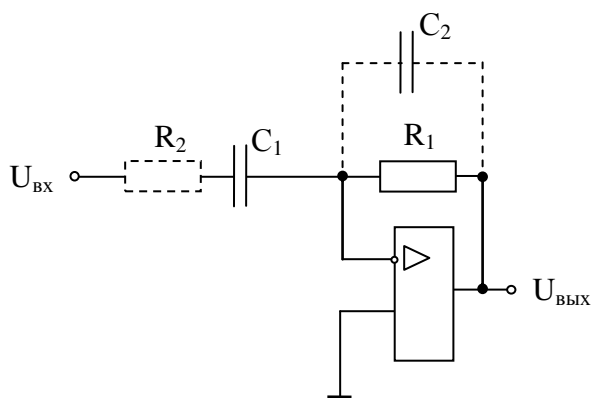


Рис. 3.3. Схема дифференцирующего устройства на ОУ

возрастать при увеличении скорости изменения входного сигнала. Выполнить эти требования позволяет конденсатор, включенный на вход ОУ. Известно, что ток, проходящий через конденсатор, можно выразить в следующем виде: $i_c = C \frac{du_c}{dt}$. Значение

этого тока равно по абсолютной величине значению тока, протекающего через сопротивление обратной связи, однако эти токи противоположны по направлению, т. е. $i_R = -i_c$, и в то же время $u_{\text{ВЫХ}} = Ri_R = -Ri_c$, поэтому выходное напряжение $u_{\text{ВЫХ}} = -RC \frac{du_1}{dt}$.

Уменьшение реактивной составляющей сопротивления конденсатора с увеличением частоты приводит к тому, что падение напряжения на нем уменьшается, за счет чего увеличивается напряжение на выходе. Частотная характеристика дифференциатора приведена на рис. 3.4.

Присущая простому дифференциатору неустойчивость иллюстрируется диаграммой (см. рис. 3.4), на которой показано пересечение графиков коэффициентов усиления ОУ с разомкнутой обратной связью и прямой $1/\beta$, где β – коэффициент передачи петли обратной связи. Взаимный наклон кривых в точке пересечения равен 40 дБ на декаду, т. е. схема оказывается потенциально неустойчивой.

Приведенные кривые (см. рис. 3.4) можно интерпретировать еще одним способом. ОУ благодаря внутренней коррекции вносит фазовое запаздывание на 90° . Резистор и конденсатор обратной связи также вносят фазовый сдвиг на 90° . Общий фазовый сдвиг в петле обратной связи, включая сдвиг на 180° по инвертирующему входу, составляет 360° , и система оказывается неустойчивой. В лучшем случае на выходе схемы появляется «звон», в худшем – схема возбуждается. Для стабилизации схемы в передаточную функцию $1/\beta$ вводится полюс за счет добавления резистора R_2 . Теперь взаимный наклон характеристик

ОУ и обратной связи $1/\beta$ в точке пересечения составляет 20 дБ на декаду, что обеспечивает устойчивость схемы. Частота видимого полюса, равная $1/2\pi R_2 C_1$, должна быть меньше частоты, на которой происходит пересечение характеристик ОУ и обратной связи, в противном случае влияние полюса незначительно. Характеристика дифференциатора с учетом влияния резистора R_2 также показана на рис. 3.4.

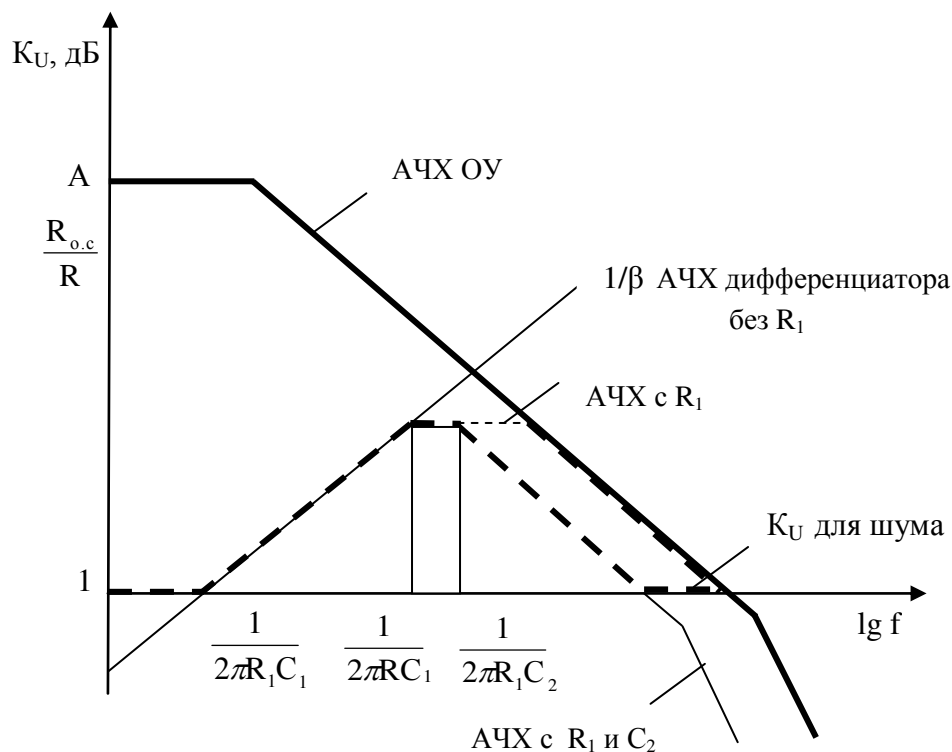


Рис. 3.4. Частотная характеристика дифференциатора

Из анализа приведенных характеристик следует вывод: коэффициент усиления на высоких частотах равен отношению R_1/R_2 , что значительно больше значения коэффициента передачи на низкой частоте. Это может вызвать появление на выходе дифференциатора значительного высокочастотного шума. Чтобы избавиться от лишних шумов, в передаточную функцию вводят еще один полюс, используя конденсатор C_2 для ограничения полосы пропускания схемы. Если конденсатор C_2 отсутствует, то полоса пропускания ограничивается либо паразитными емкостями, параллельными R_2 , либо операционным усилителем. Введение конденсатора C_2 способствует также стабилизации схемы. При больших выходных сигналах высокочастотная характеристика дифференциатора ограничивается скоростью нарастания напряжения ОУ.

3.2. Порядок выполнения работы

1) Собрать на контактном поле схему интегратора, приведенную на рис. 3.5.

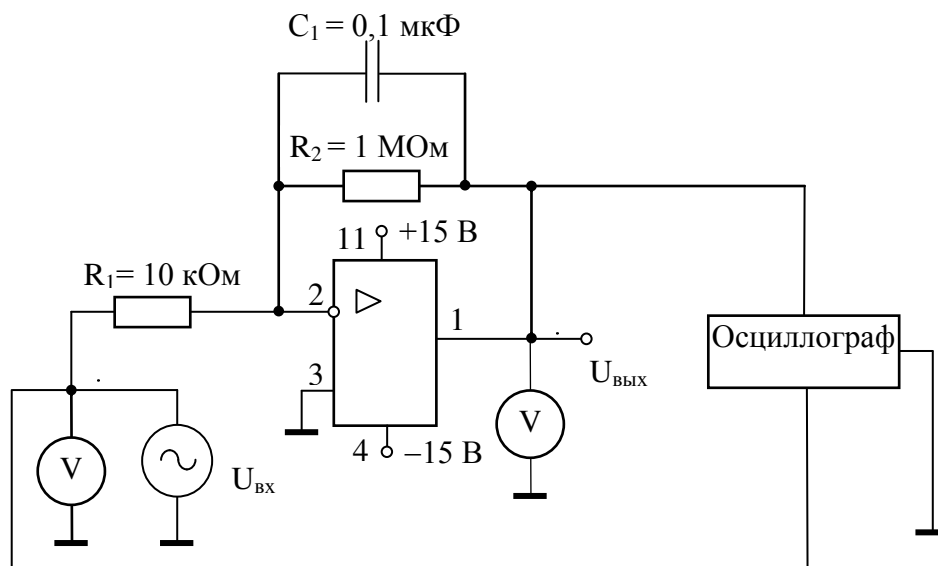


Рис. 3.5. Схема интегратора

2) Поддерживая постоянное напряжение на входе ($U_{\text{вх}} = 100 \text{ мВ}$), снять значения $U_{\text{вых}}$ и заполнить табл. 3.1.

Таблица 3.1

Значения напряжения «вход – выход» при различных значениях C

$f, \text{кГц}$		0,04	0,1	0,65	1	10	65	100	250	400
$U_{\text{вых}}, \text{В}$	$C = 0,1 \text{ мкФ}$									
	$C = 0,01 \text{ мкФ}$									

3) Зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжения, подавая на вход схемы синусоидальный и прямоугольный сигналы.

4) Собрать схему дифференциатора, приведенную на рис. 3.6.

5) Поддерживая постоянное напряжение на входе ($U_{\text{вх}} = 0,1 \text{ В}$), снять значения $U_{\text{вых}}$ и заполнить табл. 3.2.

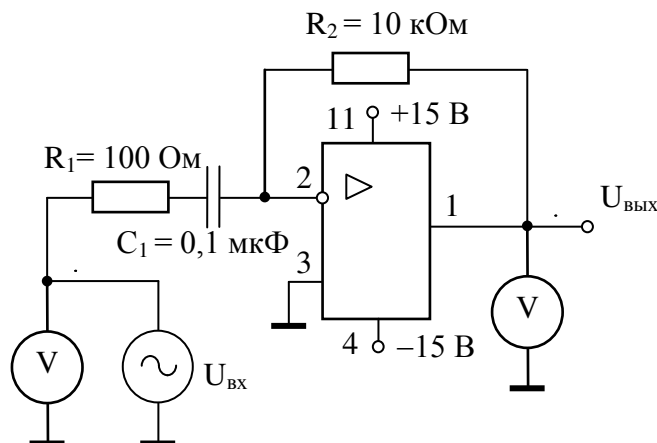


Рис. 3.6. Схема дифференциатора

Таблица 3.2

Значения напряжения «вход – выход» при различных значениях C

$f, \text{ кГц}$		0,04	0,1	0,65	1	10	65	100	250	400
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$	$C = 0,1 \text{ мкФ}$									
	$C = 0,01 \text{ мкФ}$									

6) Зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжения, подавая на вход синусоидальный сигнал и прямоугольные импульсы.

3.3. Контрольные вопросы

- 1) Приведите схемы дифференцирующего и интегрирующего ОУ, дайте их сравнительную характеристику.
- 2) Какую роль играет сопротивление, включенное параллельно конденсатору в схеме интегратора на ОУ?
- 3) Является ли схема, исследуемая в лабораторной работе, схемой идеального интегратора входного напряжения?

4) От параметров каких элементов в схеме интегратора зависит скорость изменения выходного напряжения при подаче на вход скачка напряжения?

5) Почему схема, приведенная на рис. 3.6, является дифференцирующим каскадом?

6) Зависит ли выходное напряжение дифференцирующего каскада от скорости изменения входного напряжения, от сопротивления обратной связи, от емкости конденсатора?

3.4. Содержание отчета

- 1) Цель работы.
- 2) Краткие сведения из теории.
- 3) Цоколевка ИМС К1401УД2А.
- 4) Схемы исследования интегрирующих и дифференцирующих устройств.
- 5) Результаты измерений, оформленные в виде таблиц и графиков.
- 6) Осциллограммы сигналов на входе и выходе схем при различных формах сигнала.
- 7) Ответы на контрольные вопросы.

Библиографический список

1. Л а ч и н В. И. Электроника / В. И. Л а ч и н, Н. С. С а в е л о в. Ростов-на-Дону: Феникс, 2010. 704 с.
2. Г у с е в В. Г. Электроника и микропроцессорная техника / В. Г. Г у с е в, Ю. М. Г у с е в. М.: КноРус, 2013. 800 с.
3. Элементы электронных схем: Учебно-методическое пособие к выполнению лабораторных работ / Е. Ю. С а л и т а, Т. В. К о м я к о в а / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2015. 58 с.

Учебное издание

КАНДАЕВ Василий Андреевич,
АВДЕЕВА Ксения Васильевна

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ К ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНАМ «ЭЛЕКТРОНИКА»,
«ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА»

Часть 1

Редактор Н. А. Майорова

Подписано в печать 05.09.2017. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$.
Офсетная печать. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 2,3.
Тираж 100 экз. Заказ .

**

Редакционно-издательский отдел ОмГУПСа
Типография ОмГУПСа

*

644046, г. Омск, пр. Маркса, 35