

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

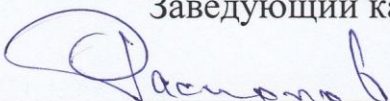
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Институт высокоточных систем им. В.П. Грязева

Кафедра «Приборы управления»

Утверждено на заседании кафедры  
«Приборы управления»  
«19» января 2022 г., протокол №1

Заведующий кафедрой

 В.Я. Распопов

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**по выполнению лабораторных работ**  
**по дисциплине (модулю)**  
**«Электроника-2»**

**основной профессиональной образовательной программы**  
**высшего образования – программы бакалавриата**

по направлению подготовки  
**12.03.02 – Опотехника**

с направленностью (профилем)  
**Оптико-электронные приборы и системы**

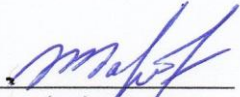
Форма(ы) обучения: *очная*

Идентификационный номер образовательной программы: 120302-01-2022

Тула 2022 год

## Разработчик(и) методических указаний

Иванов Ю.В., профессор кафедры ПУ, д. т.н.  
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)

  
(подпись)

## Содержание

Общие требования

Правила техники безопасности

1. Лабораторная работа №1. Исследование усилителя постоянного тока
2. Лабораторная работа №2. Исследование схем инвертирующего и неинвертирующего усилителей
3. Лабораторная работа №3. Исследование схем дифференциального усилителя
4. Лабораторная работа №4. Исследование схемы интегрирующего усилителя
5. Лабораторная работа №5 Исследование двухполупериодной схемы выпрямителя с нулевым выводом.
6. Лабораторная работа №6 Исследование мостовой схемы выпрямителя
7. Лабораторная работа №7 Исследование компенсационного стабилизатора напряжения
8. Лабораторная работа №8 Исследование схем активных фильтров верхних и нижних частот первого порядка.

Список литературы

Приложение

## ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ

Студенты должны являться на занятия, изучив необходимые разделы лекций по данной дисциплине, в часы, предусмотренные общеинститутским расписанием занятий. Вход в лабораторию, а также выход из нее разрешается лишь в течении перерыва между занятиями. В лаборатории студент изучает ту лабораторную работу, которая намечена по графику.

Прежде чем начать работу, он должен ознакомиться с описанием лабораторной работы. В ходе работы студент должен делать необходимые записи в ученической тетради. Расчеты должны быть выполнены в системе СИ и по ЕСКД.

По проделанным работам каждым студентом оформляется отчет. Отчет по лабораторной работе заверяется преподавателем, ведущим лабораторные работы. Сдача отчетов производится в индивидуальном порядке. При этом студент должен знать задачи и цель проведенной лабораторной работы, уметь объяснить результаты расчетов и ответить на контрольные вопросы. Отчет выполняется на листах формата А4. Образец титульного листа приведен в приложении.

## ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторных работ необходимо соблюдать общую инструкцию по технике безопасности при проведении лабораторных работ на кафедре ПУ. Инструктаж по технике безопасности проводится перед началом лабораторных работ, о чем делается запись в журнале.

Работу следует проводить на своем рабочем месте, не отвлекая внимания студентов, выполняющих другие лабораторные работы, особенно работы на испытательных стендах.

## Лабораторная работа №1

### Исследование усилителя постоянного тока

Ц е л ь р а б о т ы — изучение принципа действия дифференциального усилителя постоянного тока (УПТ) и приобретение навыков его балансировки; снятие и анализ амплитудных характеристик (рис. 77).

Пояснения. Усилители постоянного тока предназначены для усиления сигналов в диапазоне частот от  $f=0$  (постоянный ток) до некоторой максимальной частоты  $f_{\max}$ , обычно определяемой частотными свойствами транзисторов. Эта частота может достигать сотен мегагерц. Простейшая схема УПТ (рис. 78) используется в компенсационном стабилизаторе напряжения. При номинальном входном напряжении  $U_{\text{вх}}$  стабилизатора на электродах транзистора  $VT$  также устанавливаются номинальные напряжения  $U_{\text{эвт}}$ ,  $U_{\text{бвт}}$  и  $U_{\text{квт}}$ . Напряжение  $U_{\text{эвт}}$  создается параметрическим стабилизатором на стабилитроне  $VD$  и не зависит от входного напряжения  $U_{\text{вх}}$ , а напряжения  $U_{\text{бвт}}$  и  $U_{\text{квт}}$  изменяются. Входное напряжение УПТ  $U_{\text{бвт}}$  является частью выходного напряжения  $\alpha U_{\text{вых}}$  стабилизатора (где  $\alpha = R_2/(R_1 + R_2)$  — коэффициент деления делителя  $R_1 R_2$ ). Коллекторное напряжение  $U_{\text{квт}}$  управляет регулирующим транзистором стабилизатора (см. рис. 54). Если по какой-либо причине выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  стабилизатора изменилось, изменится и напряжение  $\alpha U_{\text{вых}}$ , например появится приращение напряжения  $+\Delta U_{\text{б}}$ . При этом базовый ток транзистора  $VT$  уменьшится на  $\Delta I_{\text{б}} = \Delta U_{\text{б}}/h_{11\text{э}}$ , а коллекторный — на  $\Delta I_{\text{к}} = h_{21\text{э}} \Delta I_{\text{б}} = h_{21\text{э}} \Delta U_{\text{б}}/h_{11\text{э}}$  и, следовательно, увеличится коллекторное напряжение на  $\Delta U_{\text{к}} = \Delta I_{\text{к}} R_{\text{к}}$ . Это напряжение  $\Delta U_{\text{к}}$  является выходным напряжением УПТ, вызывающим компенсирующее изменение электрического состояния регулирующего транзистора стабилизатора.

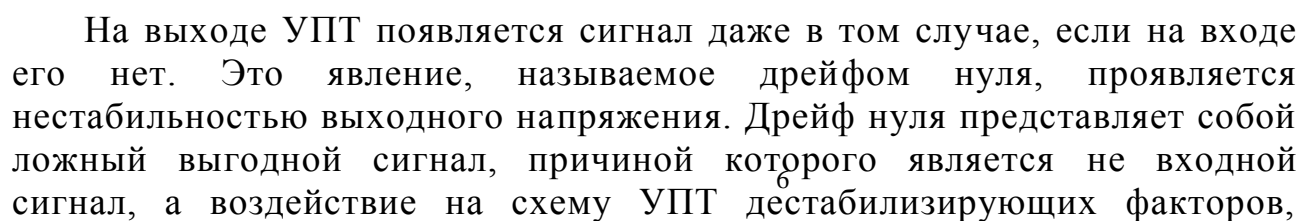
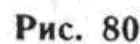
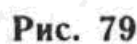
В рассматриваемом случае при  $+\Delta U_{\text{б}}$  на выходе УПТ появляется  $-\Delta U_{\text{к}}$ , способствующее уменьшению базового тока регулирующего транзистора, что равносильно увеличению сопротивления промежутка коллектор эмиттер, приводящего к уменьшению выходного напряжения стабилизатора  $U_{\text{вых}}$ .

Коэффициент усиления напряжения УПТ определяют по формуле

$$K = \Delta U_{\text{к}} / \Delta U_{\text{б}} = R_{\text{к}} h_{21\text{э}} / h_{11\text{э}}.$$

Следовательно, изменение входного напряжения УПТ вызывает в  $K$  раз большее изменение его выходного напряжения.

Кроме того, УПТ может усиливать переменное напряжение до некоторой предельной частоты, которая определяется частотными свойствами транзисторов, что особенно важно в стабилизаторах, работающих на схему с импульсным потреблением.



наиболее серьезный из которых — изменение температуры окружающей среды, влияющее на все без исключения элементы. Устранить или полностью скомпенсировать это влияние невозможно.

Так, в УПТ, показанном на рис. 78, с ростом температуры из-за увеличения тока коллектора уменьшается отрицательное коллекторное (выходное) напряжение, что равносильно поступлению на вход сигнала отрицательной полярности. Дрейф выходного напряжения может быть скомпенсирован подачей на вход УПТ сигнала необходимого значения и полярности, называемого дрейфом нуля, Приведенным ко входу УПТ. Зная абсолютный выходной дрейф  $\Delta$  и коэффициент усиления напряжения  $K$ , можно определить приведенный дрейф  $\delta = \Delta/K$ . Приведенный дрейф определяет чувствительность УПТ, т. е. минимальный сигнал на его входе, который будет различим на выходе. Так, если приведенный дрейф при воздействии определенных дестабилизирующих факторов составляет 100 мкВ, подавать на вход УПТ сигнал 1 мкВ не имеет смысла — он потеряется на фоне дрейфа. Сигнал же, соизмеримый с приведенным дрейфом, будет замечен на Выходе. Следовательно, снижение приведенного дрейфа сопровождается повышением чувствительности УПТ.

Для уменьшения дрейфа нуля используют параллельно-балансные УПТ (рис. 79), которые состоят из двух одинаковых каскадов, параллельно подключенных к источнику питания  $E_k$ . Перед началом работы УПТ балансируют так, чтобы потенциалы входных 1 и 4 и выходных 2 и 3 зажимов были попарно одинаковы. Это состояние соответствует отсутствию входного сигнала.

Коллекторные цепи транзисторов образуют мост, верхними плечами которого являются резисторы  $R3$  и  $R5$  одинаковых сопротивлений, а нижними — промежутки коллектор — эмиттер транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ , включенные последовательно резисторам  $R4$  и  $R6$ , сопротивления которых обычно невелики. Сопротивления нижних плеч моста после балансировки становятся одинаковыми.

Под действием входного сигнала (в простейшем случае его подают между зажимами 1 и 4) базовый ток одного из транзисторов уменьшается, при этом сопротивление его промежутка коллектор — эмиттер увеличивается, одновременно базовый ток другого транзистора увеличивается, а сопротивление его промежутка коллектор — эмиттер уменьшается. Баланс моста нарушается и на выходе схемы появляется сигнал. Входной сигнал противоположной полярности вызывает появление на выходе схемы сигнала также противоположной полярности. Таким образом, выходной сигнал содержит информацию не только о значении входного сигнала, но и о его знаке. При полной симметрии схемы дрейфы выходных напряжений отдельных каскадов будут одинаковы. Потому на нагрузке, подключенной к зажимам 2 и 3, дрейфа вообще не будет. В реальных схемах дрейф <sup>7</sup> выходного напряжения все же



наблюдается, однако он значительно меньше, чем в схеме, показанной на рис. 78, а.

Исследуемый в данной работе УПТ (см. рис. 77) выполнен по параллельно-балансной схеме. Такие УПТ называют также дифференциальными, поскольку их выходное напряжение пропорционально разности потенциалов входов.

Наилучшей с точки зрения минимального дрейфа является схема УПТ с симметричными входом и выходом. Входной сигнал подается на изолированные от корпуса зажимы 1 и 4, а выходной снимается также с изолированных от корпуса зажимов 2 и 3. Режим базовых цепей транзисторов обеспечивается одинаковыми делителями напряжения  $R1R2$  и  $R9R10$ . Напряжения эмиттерных переходов образуются на резисторах  $R2$  и  $R10$ . Резистор  $R4$  служит для балансировки схемы — выравнивания потенциалов на базах транзисторов. В коллекторные цепи включены имеющие одинаковые сопротивления резисторы  $R3$  и  $R8$ .

Потенциометр  $R5$  предназначен для установки нуля на выходе УПТ при нулевом входном сигнале. Потенциометр  $R6$  служит для выполнения аналогичных функций и, кроме того, для выравнивания неодинаковых сопротивлений эмиттерных областей транзисторов и создания небольшой по глубине ООС, дополнительно стабилизирующей режим транзисторов. Резистор  $R7$  предназначен для эмиттерной стабилизации рабочих точек транзисторов, что снижает дрейф нуля. Напряжение источника  $E_2$  подбирают так, чтобы потенциалы эмиттеров транзисторов были близки к нулю, а сами транзисторы находились в активном режиме. При выполнении работы напряжение источника  $E_2$  подбирают так, чтобы напряжение источника  $E_1$  распределялось поровну между промежутками коллектор — эмиттер транзисторов и резисторами в коллекторных цепях. При использовании транзисторов с одинаковыми параметрами и резисторов  $R1 = R9$ ,  $R2 = R10$  и  $R3 = R8$  схема после балансировки будет симметричной, а дрейфы потенциалов коллекторов транзисторов — одинаковыми.

Следовательно, дрейф нуля на нагрузке, включенной между коллекторами, будет равен нулю, так как представляет собой разность дрейфов одинаковых половин усилителя.

Перед началом работы схема должна быть сбалансирована, для чего необходимо:

установить движки потенциометров  $R4$ ,  $R5$  и  $R6$  в среднее положение;  
подключить к гнездам 2 и 3 схемы вольтметр с предельным значением шкалы, равным  $E_2$ , и закоротить гнезда 1 и 4. установить потенциометром  $R5$  нулевое напряжение на выходе УПТ, одновременно переключая вольтметр на все более чувствительные пределы (потенциометр  $R6$  используют при регулировке варианта 1 схемы УПТ на минимальный дрейф в диапазоне температур; он может быть исключен, а все гнезда для его подключения закорочены<sup>8</sup>; в работе исследуется также



вариант 2 схемы УПТ, когда установку нуля выполняют потенциометром  $R6$ , а потенциометр  $R5$  исключают);

раскоротить входы 1 и 4, восстановить потенциометром  $R4$  нулевое напряжение на выходе;

закоротить снова гнезда 1 и 4 и при появлении напряжения на выходе повторить балансировку в той же последовательности.

При подключении к гнезду 1 положительного полюса источника входного сигнала, а к гнезду 4 — отрицательного ток будет проходить по цепи: гнездо 1, база — эмиттер  $VT1$ ,  $R6$  (если он есть), эмиттер — база  $VT2$ , гнездо 4. Этим током транзистор  $VT1$  будет закрываться, и отрицательное напряжение на его коллекторе начнет расти, а транзистор  $VT2$  будет открываться, и отрицательное напряжение на его коллекторе начнет уменьшаться. Следовательно, вольтметр для измерения выходного напряжения при установленной полярности входного сигнала следует подключить плюсом к гнезду 3, а минусом — к гнезду 2.

При некотором входном сигнале транзистор  $VT1$  начнет закрываться, а транзистор  $VT2$  окажется в режиме насыщения, т. е. прекратится воздействие входного сигнала на УПТ. Этому состоянию схемы соответствуют напряжения  $+U_{\text{вых max}}$  и  $-U_{\text{вых max}}$  (рис. 80), ограничивающие линейный участок амплитудной характеристики, в пределах которого коэффициент усиления напряжения постоянен, т. е.

$$K = U_{\text{вых max}} / U_{\text{вх max}}. \quad (41)$$

Особенностью схемы дифференциального УПТ является отсутствие внутрикаскадной ООС при включении в общую эмиттерную цепь резистора  $R7$ , сопротивление которого определяется только напряжением источника питания  $E_2$ .

### Порядок выполнения работы

1. Вычертить табл. 36 и 37 для снятия амплитудных характеристик УПТ (для вариантов 1 и 2 схемы УПТ гнезда для подключения соответственно резисторов  $R5$  или  $R6$  закорачивают) и координатные оси (рис. 81) для их построения (масштаб по осям:  $U_{\text{вх}}$  — в 1 см 0,2 В;  $U_{\text{вых}}$  — в 1 см 2 В).

2. Вычертить табл. 38 для записи режимов транзисторов УПТ по постоянному току.

3. Зарисовать схему исследуемого усилителя постоянного тока (см. рис. 77), собрать ее вариант 1, пользуясь графическими обозначениями на сменной панели 87Л-01/17 снять амплитудную характеристику и занести результаты измерений в табл. 36.

4. Собрать вариант 2 схемы УПТ, снять амплитудную характеристику для трех значений коллекторных резисторов, занести результаты

измерений в табл. 37 и измерять режимы транзисторов по постоянному току, занося результаты измерений в табл. 38.

Т а б л и ц а 36

Входное напряжение $U_{вх}$ , В	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Входной ток $I_{вх}$ , мкА Выходное напряжение $U_{вых}$ , В							

Т а б л и ц а 37

Входное напряжение $U_{вх}$ , мВ		10	20	30	40	50	80	100
Входной ток $I_{вх}$ , мкА, при сопротивлении резисторов $R3 = R8$ , кОм	1 2,4 4,3							
Выходное напряжение $U_{вых}$ , В, при сопротивлении резисторов $R3 = R8$ кОм	1 2,4 4,3							

Т а б л и ц а 38

Сопротивление резисторов $R3 = R8$ , кОм		1	2,4	4,3
Напряжение питания $E_2$ , В				
Режим транзистора, В	VT1	$U_B$ $U_K$ $U_Э$		
	VT2	$U_B$ $U_K$ $U_Э$		

5. Построить амплитудные характеристики УПТ в координатных осях (см. рис. 81).

6. Вычислить коэффициенты усиления напряжения УПТ для двух вариантов схемы, пользуясь формулой (41).

### Методические указания

1. При выполнении работы используют:  $R1 = R9 = 12$  кОм;  $R2 = R10 = 620$  Ом;  $R3 = R8 = 1$ ; 2,4; 4,3 кОм;  $R4 = 2,2$  кОм (переменный);  $R5 = 1$  кОм (переменный);  $R6 = 470$  Ом (переменный);  $R7 = 510$  Ом, 1,2 и 2,4 кОм;  $VT1$  и  $VT2$  — транзисторы КТ361А; блок-переходник ПЗ.

2. Первый вариант схемы собирают, используя:  $R1 = R9 = 12$  кОм;  $R2 = R10 = 620$  Ом;  $R3 = R8 = 4,3$  кОм;  $R4 = 2,2$  кОм (переменный);  $R5$  закорачивают с помощью блока-переходника ПЗ;  $R6 = 470$  Ом (переменный);  $R7 = 2,4$  кОм;

$E_1$  — генератор напряжения ГН2 стенда;

$E_2$  — генератор напряжения ГН1 стенда;

АВМ2 — измеритель выходного напряжения на пределе «10 В» (по мере балансировки схемы прибор переключают на все более чувствительные пределы; окончательную балансировку производят на пределе «0,5 В»; неточность установки нуля на выходе УПТ не должна превышать половины деления шкалы «0,5 В», что составляет 10 мВ);

АВО — измеритель входного напряжения (на пределе «1 В» для первого варианта схемы и «0,1 В» для второго);

ИВ — измеритель входного тока на пределе «1 мА» (переключатель ИВ устанавливают в положение «ГТ 1 мА»);

ГТ — генератор тока стенда — источник входного сигнала.

3. Для снятия амплитудной характеристики следует подключить: ГН2 — к гнездам « $-E_1$ » и X5; ГН1 — к гнездам « $+E_2$ » и X2; ГТ — к гнездам 1 и 4; АВО — к гнездам X1 и X3; АВМ2 — к гнездам 2 и 3.

4. Для сборки второго варианта схемы необходимо: отключить резистор R6 и, установив на его место блок-переходник ПЗ, закоротить соединительным проводом гнезда для подключения резистора R6; установить R5,

$R3 = R8 = 1$  кОм и  $R7 = 510$  Ом (при  $R3 = R8 = 2,4$  кОм резистор  $R7 = 1,2$  кОм, а при  $R3 = R8 = 4,3$  кОм  $R7 = 2,4$  кОм).

5. Напряжение источника питания  $E_2$  при всех измерениях подбирают так, чтобы напряжение на коллекторах транзисторов после балансировки было равно половине напряжения источника питания  $E_1$ , которое необходимо установить по ИВ стенда равным 10 В.

6. Режимы транзисторов по постоянному току измеряют АВМ1 на пределах измерения «10 В», «5 В», «2,5 В» и «1 В», подключая его зажимами «+» и «-» соответственно к гнезду X4 и нужной точке исследуемой схемы.

7. Для балансировки схемы необходимо: закоротить гнезда 1 и 4, добиться потенциометром установки нуля ( $R5$  или  $R6$ ) нулевого напряжения на выходе; переключить вывод от зажима «+» АВМ2 в гнездо X4, отключив АВМ2 и установив переключателем АВМ1 предел измерения «10 В»; установить регулятором ГН1 «Грубо» такое напряжение источника  $E_2$  на выходе, при котором на коллекторах транзисторов будет по —5 В. Балансируют схему как описано в пояснениях к работе.

8. Для построения амплитудных характеристик второго варианта схемы УПТ необходимо изменить масштаб по оси  $U_{вх}$  в 10 раз, т. е. в 1 см должно быть 0,02 В.

### **Контрольные вопросы**

1. Каковы особенности схем УПТ?
2. Что такое дрейф нуля?
3. Почему уменьшение приведенного дрейфа нуля сопровождается ростом чувствительности УПТ?
4. Каковы причины и основные способы уменьшения дрейфа нуля?
5. Какие параметры транзистора зависят от температуры окружающей среды?

# Исследование схем на операционных усилителях

## Лабораторная работа №2

### Исследование схем инвертирующего и неинвертирующего усилителей

Цель работы: изучение принципов работы, основных схем включения и основных параметров операционных усилителей (ОУ).

**Пояснения.** Операционным усилителем называется устройство, предназначенное для выполнения математических операций с аналоговыми сигналами, имеющее исключительно высокий коэффициент усиления, очень большое входное и малое выходное сопротивление и выполненное в микроэлектронном исполнении.

Термин "операционный усилитель" впервые использован в вычислительной технике, где он отождествляется с понятием "решающий усилитель". С этими терминами неизменно связывались математические операции: суммирования, дифференцирования, интегрирования, которые усилитель мог выполнять за счет введения отрицательной обратной связи (ООС) определенного вида. В настоящее время смысл этого термина существенно расширился и несколько изменился. Под операционным усилителем принято понимать универсальный электронный усилитель, который может выполнять самые различные функции и позволяет без нарушения его работоспособности вводить обратную связь (ОС) различного типа.

В настоящее время ОУ выполняются, как правило, в виде монолитных интегральных микросхем и по своим габаритным размерам и стоимости практически не отличаются от отдельно взятого транзистора.

Благодаря практически идеальным характеристикам ОУ реализация различных схем на их основе оказывается значительно проще, чем на отдельных транзисторах. Поэтому ОУ вытесняют отдельные транзисторы как элементы схем во многих областях электроники.

Характерной особенностью ОУ является то, что он дает возможность получить близкое к нулю выходное напряжение при отсутствии входного сигнала. При этом потенциалы обоих входов будут близки к потенциалу выхода усилителя. Эти свойства ОУ позволяют подключать нагрузку и источники входных напряжений, не заботясь о разделении переменной и постоянной составляющих.

Операционный усилитель включает в свой состав один или несколько дифференциальных каскадов усилителей постоянного тока (УПТ), генератор стабильного тока для питания этих каскадов и выходные эмиттерные повторители для увеличения входного и уменьшения выходного сопротивления.

Условное графическое изображение ОУ К553УД<sub>2</sub> приведено на рис. 1. Вход А – инвертирующий вход.

Вход В – неинвертирующий вход.

Выводы С – для подключения двуполярного ИП.

Выводы D – выводы для подключения цепей коррекции.

ОУ подразделяются по следующим признакам:

- 1) ОУ общего применения
- 2) Мощные ОУ
- 3) ОУ с управляемыми параметрами
- 4) Быстродействующие ОУ

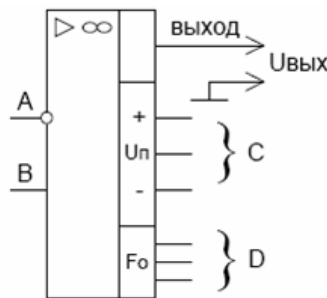


Рис. 1

Основные параметры ОУ делятся на статические и динамические.

К статическим параметрам относятся:

- 1) Напряжение ИП
- 2) Коэффициент усиления
- 3) Входное сопротивление
- 4) Потребляемый от ИП ток или потребляемая мощность
- 5) Коэффициент ослабления синфазного сигнала [дБ]

Динамические параметры:

- 1) Скорость нарастания выходного напряжения. Она показывает быстродействие ОУ [ В/мкс ] (рис. 2).

$$K_p = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta t \text{ [ В/мкс ]}$$

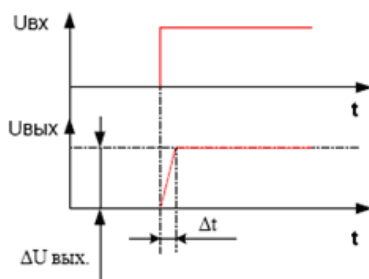


Рис. 2

## 7) Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ).

ОУ имеют коэффициент усиления порядка сотен - тысяч, поэтому при введении глубокой отрицательной обратной связи можно получить параметры схемы, которые зависят только от выбора элементов ООС.

Так как ОУ имеет очень большой коэффициент усиления и достаточно сложную схему, то при работе на определенных частотах возможно появление

нежелательных фазовых сдвигов, приводящих к образованию положительных ОС и, как следствие, к самовозбуждению усилителя.

Для устранения этих возможностей применяются цепи коррекции, представляющие различные RC-цепочки. Цепи коррекции могут быть как внешними, то есть при помощи навесных элементов, так и внутренними, то есть внутри корпуса микросхемы. Причём цепи коррекции разрабатываются на этапе проектирования ОУ и являются индивидуальными для каждого конкретного типа ОУ.

При рассмотрении типовых схем с ОУ обычно пользуются идеальной моделью ОУ. При этом считают, что его коэффициенты усиления по напряжению  $K_U \approx \infty$ , входное сопротивление  $R_{вх} \approx \infty$ , а выходное сопротивление  $R_{вых} \approx 0$ . Кроме того, к основным признакам идеального ОУ следует отнести: бесконечно широкую полосу частот, начиная с частоты  $f_0 = 0$ ; постоянство амплитуды усиливаемого сигнала во всем диапазоне частот, отсутствие статических, шумовых и дрейфовых ошибок во времени и в диапазоне рабочих температур. Перечисленных свойств ОУ полностью достичь нельзя, однако, высокие технические характеристики реальных конструкций ОУ по перечисленным ранее показателям подтверждают возможность использования идеальной модели ОУ при анализе электронных схем.

### Схемы включения ОУ

Поскольку на входе ОУ стоит дифференциальный каскад усиления, имеющий инвертирующий и неинвертирующий входы, то различают два основных вида включения – инвертирующее и не инвертирующее. Кроме этого ОУ за счёт высокого коэффициента усиления должен быть охвачен глубокой ООС для обеспечения устойчивости его работы.

1) Инвертирующая схема включения ОУ изображена на рисунке 4.

$$K = \frac{R_{оос}}{R_1}; \quad (1)$$

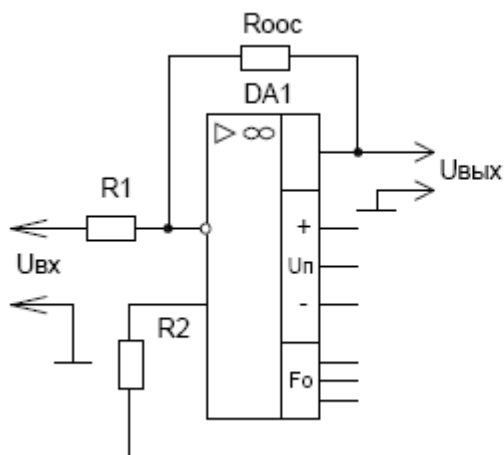
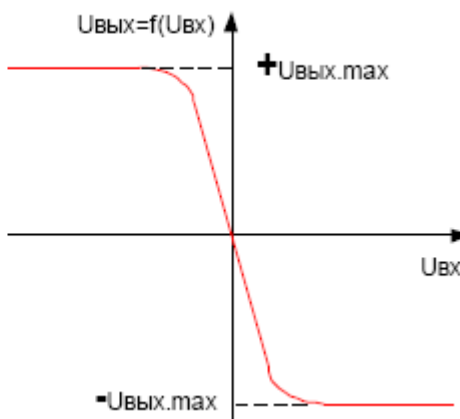


Рис.4





2) Неинвертирующая схема включения ОУ изображена на рисунке 5.

$$K = \frac{R_{оос}}{R_1} + 1; \quad (2)$$

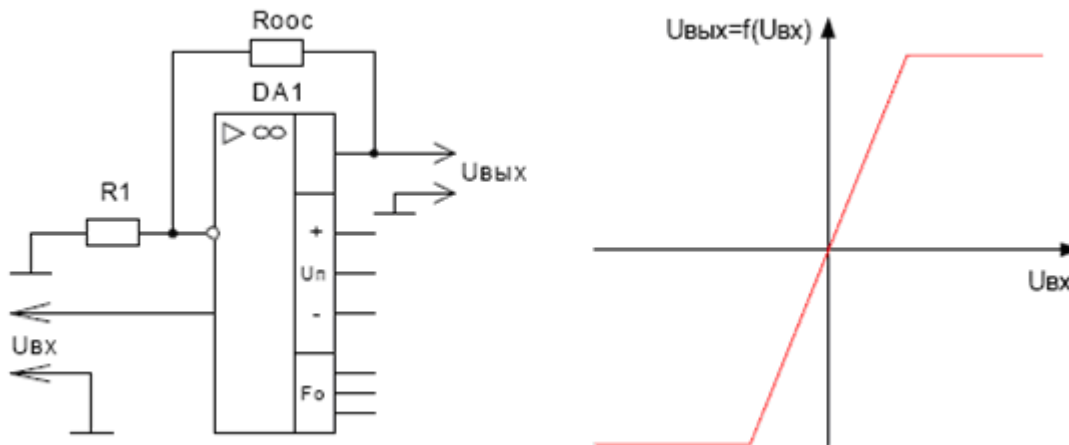


Рис 5.

### Порядок выполнения работы

Перед началом выполнения лабораторных работ обязательно ознакомьтесь с методическими указаниями.

#### 1. Инвертирующая схема включения

1. Используя карточку № 1, собрать с помощью джамперов (перемычек) схему, показанную на рис. 4. Выбрать в качестве первого сопротивления входной цепи -  $R_1$ , а в качестве первого сопротивления ОС -  $R_{ос1}$ .

2. Подключить собранную схему к генератору с помощью четырехжильного шнура (зеленые на вход, белый - земля).

3. Подключить собранную схему к осциллографу с помощью шнура с «крокодилами».

4. Подключить собранную схему при помощи «крокодилов» к источнику питания 24 В (скрученный провод, выходящий из корпуса стенда; белый(-), зеленый(+)).

5. Последовательно меняя входные сопротивления ( $R_1, R_2, R_3$ ) и сопротивления ОС ( $R_{ос1}, R_{ос2}$ ) при помощи осциллографа измерить амплитуду выходного напряжения и записать в табл. 1.

6. Вычислить коэффициент усиления ( $K_{расч}$ ) по формуле (1), записав в таблицу.

7. Вычислить экспериментальный коэффициент усиления ( $K_{эксп}$ ) по формуле

$$K = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}; \quad 16$$

Сравнить экспериментальные данные с расчетными.

Таблица 1.

$U_{\text{вых}}, \text{В}$	$R$ входной цепи, Ом	$R_{\text{ОС}}, \text{Ом}$	$K_{\text{расч}}$	$K_{\text{эксп}}$

## Методические указания

Обозначения элементов, приведенные на схемах и на карточках, могут не совпадать. Схемы на рисунках являются принципиальными.

В качестве входного сигнала использовать гармонический сигнал, амплитудой  $U_{\text{вх}}=1 \text{ В}$  и частотой  $\nu=100 \text{ Гц}$ .

Номиналы элементов схемы:  $R_1=33 \text{ кОм}$ ,  $R_2=22 \text{ кОм}$ ,  $R_3=12 \text{ кОм}$ ,  $R_4=13 \text{ кОм}$ ,  $R_{\text{ос1}}=100 \text{ кОм}$ ,  $R_{\text{ос2}}=62 \text{ кОм}$ .

## 2. Неинвертирующая схема

1. Используя карточку № 2, собрать с помощью джамперов (перемычек) схему, показанную на рис. 5. Выбрать в качестве первого сопротивления входной цепи – использовать  $R_1$ , а в качестве первого сопротивления ОС –  $R_{\text{ос1}}$ .

2. Подключить собранную схему к генератору с помощью четырехжильного шнура (зеленые на вход, белый - земля).

3. Подключить собранную схему к осциллографу с помощью шнура с «крокодилами».

4. Подключить собранную схему при помощи «крокодилов» к источнику питания 24 В. Провода питания выходят из корпуса стенда.

5. Последовательно меняя входные сопротивления ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ) и сопротивления ОС ( $R_{\text{ос1}}$ ,  $R_{\text{ос2}}$ ) при помощи осциллографа измерить амплитуду выходного напряжения и записать в табл. 2.

7. Вычислить коэффициент усиления ( $K_{\text{расч}}$ ) по формуле (2), записав в таблицу.

8. Вычислить экспериментальный коэффициент усиления ( $K_{\text{эксп}}$ ) по формуле

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}};$$

9. Сравнить экспериментальные данные с расчетными.

Таблица 2.

$U_{\text{вых}}, \text{ В}$	$R$ входной цепи, Ом	$R_{\text{ОС}}, \text{ Ом}$	$K_{\text{расч}}$	$K_{\text{эксп}}$

### Методические указания

Обозначения элементов, приведенные на схемах и на карточках, могут не совпадать. Схемы на рисунках являются принципиальными.

В качестве входного сигнала использовать гармонический сигнал, амплитудой  $U_{\text{вх}}=1 \text{ В}$  и частотой  $\nu=100 \text{ Гц}$ .

Номиналы элементов схемы:  $R_1=33 \text{ кОм}$ ,  $R_2=22 \text{ кОм}$ ,  $R_3=12 \text{ кОм}$ ,  $R_{\text{ос1}}=100 \text{ кОм}$ ,  $R_{\text{ос2}}=62 \text{ кОм}$ .

### Контрольные вопросы

- 1) Что называют ОУ.
- 2) Каковы основные преимущества и недостатки ОУ.
- 3) Основные характеристики ОУ.
- 4) Основные схемы включения ОУ.
- 5) Выведете передаточную функцию интегрирующей, дифференцирующей схемы и апериодического звена (фильтр низких частот).
- 6) Структура ОУ.
- 7) Принцип работы дифференциального каскада.
- 8) Как зависит коэффициент усиления от частоты входного сигнала в основных схемах включения ОУ.

## Лабораторная работа №3

### Исследование схемы дифференциального усилителя

Цель работы: изучение принципов работы, основных схем включения и основных параметров операционных усилителей (ОУ).

**Пояснения.** Операционным усилителем называется устройство, предназначенное для выполнения математических операций с аналоговыми сигналами, имеющее исключительно высокий коэффициент усиления, очень большое входное и малое выходное сопротивление и выполненное в микроэлектронном исполнении.

Поскольку на входе ОУ стоит дифференциальный каскад усиления, имеющий инвертирующий и неинвертирующий входы, то различают два основных вида включения – инвертирующее и не инвертирующее. Кроме этого ОУ за счёт высокого коэффициента усиления должен быть охвачен глубокой ООС для обеспечения устойчивости его работы.

Так как ОУ предназначены для проведения математических операций с аналоговыми сигналами, то различают суммирующее, интегрирующее и дифференцирующее включение ОУ.

Схема дифференциального включения ОУ изображена на рисунке 9.

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх2}} * \frac{R_3}{R_3 + R_2} * \frac{R_1 + R_{oc}}{R_1} - U_{\text{вх1}} * \frac{R_{oc}}{R_1}; \quad (6)$$

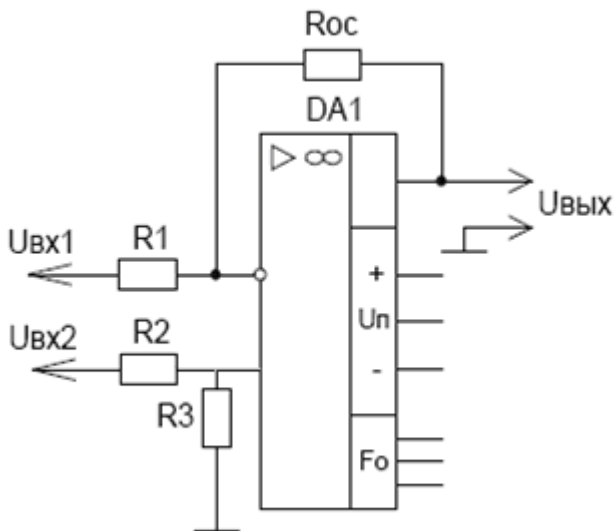


Рис. 9

### Порядок выполнения работы

Перед началом выполнения лабораторных работ обязательно ознакомьтесь с методическими указаниями.

1. Используя карточку № 4, собрать с помощью джамперов (перемычек) схему, показанную на рис. 9. Выбрать в качестве первого сопротивления инвертирующего входа -  $R_1$ , а в качестве первого сопротивления ОС -  $R_{oc1}$ .

2. Подключить собранную схему к генератору с помощью четырехжильного шнура (зеленые на вход, белый - земля).

3. Подключить собранную схему к осциллографу с помощью шнура с «крокодилами».

4. Подключить собранную схему при помощи «крокодилов» к источнику питания 24 В. Провода питания выходят из корпуса стенда.

5. Последовательно меняя входные сопротивления ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ) и сопротивления ОС ( $R_{oc1}$ ,  $R_{oc2}$ ) при помощи осциллографа измерить амплитуду выходного напряжения и записать в табл. 4.

6. Рассчитать выходное напряжение ( $U_{\text{вых расч}}$ , В) по формуле (6) и заполнить табл. 4.

7. Сравнить экспериментальные данные с расчетными.

Таблица 4

$R$ входной цепи, Ом	$R$ ОС, Ом	$U_{\text{вых}}$ , В	$U_{\text{вых расч}}$ , В

### Методические указания

Обозначения элементов, приведенные на схемах и на карточках, могут не совпадать. Схемы на рисунках являются принципиальными.

В качестве входного сигнала использовать гармонический сигнал, амплитудой  $U_{\text{вх}}=1$  В и частотой  $\nu=100$  Гц.

Номиналы элементов схемы:  $R_1=33$  кОм,  $R_2=22$  кОм,  $R_3=12$  кОм,  $R_4=2,7$  кОм,  $R_5=13$  кОм,  $R_{oc1}=100$  кОм,  $R_{oc2}=62$  кОм.

### Контрольные вопросы

- 1) Что называют ОУ.
- 2) Каковы основные преимущества и недостатки ОУ.
- 3) Основные характеристики ОУ.
- 4) Основные схемы включения ОУ.
- 5) Выведете передаточную функцию интегрирующей, дифференцирующей схемы и апериодического звена (фильтр низких частот).
- 6) Структура ОУ.

- 7) Принцип работы дифференциального каскада.
- 8) Как зависит коэффициент усиления от частоты входного сигнала в основных схемах включения ОУ.

## Лабораторная работа №4

### Исследование схемы интегрирующего усилителя

Цель работы: изучение принципов работы, основных схем включения и основных параметров операционных усилителей (ОУ).

**Пояснения.** Операционным усилителем называется устройство, предназначенное для выполнения математических операций с аналоговыми сигналами, имеющее исключительно высокий коэффициент усиления, очень большое входное и малое выходное сопротивление и выполненное в микроэлектронном исполнении.

Поскольку на входе ОУ стоит дифференциальный каскад усиления, имеющий инвертирующий и неинвертирующий входы, то различают два основных вида включения – инвертирующее и не инвертирующее. Кроме этого ОУ за счёт высокого коэффициента усиления должен быть охвачен глубокой ООС для обеспечения устойчивости его работы.

Так как ОУ предназначены для проведения математических операций с аналоговыми сигналами, то различают суммирующее, интегрирующее и дифференцирующее включение ОУ.

Схема интегрирующего включения ОУ изображена на рисунке 7.

$$U_{\text{АВ}} = K \int_0^t U_{\text{АВ}}(t) dt; \quad (4)$$

$$K = \frac{X_{\text{Coc}}}{R_1} = \frac{1}{j\omega C_{\text{oc}} R_1}; \quad (4.1)$$

$$T = C_{\text{oc}} R_1; \quad p = j\omega; \quad W(p) = \frac{1}{Tp};$$

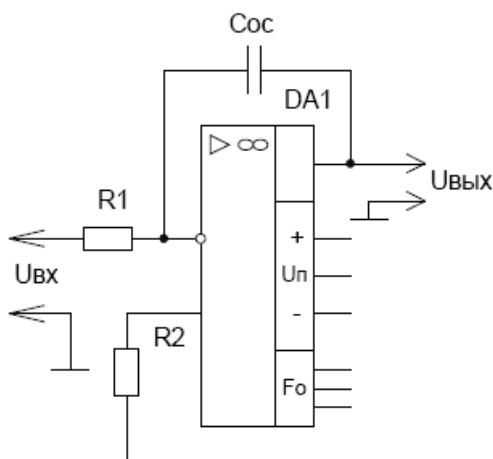


Рис. 7

### Порядок выполнения работы

Перед началом выполнения лабораторных работ обязательно ознакомьтесь с методическими указаниями.



1. Используя карточку № 5, собрать с помощью джамперов (перемычек) схему, показанную на рис. 7. В качестве входного сопротивления выбрать любой из  $R_1, R_2, R_3$ .

2. Подключить собранную схему к генератору с помощью четырехжильного шнура (зеленые на вход, белый - земля).

3. Подключить собранную схему к осциллографу с помощью шнура с «крокодилами».

4. Подключить собранную схему при помощи «крокодилов» к источнику питания 24 В. Провода питания выходят из корпуса стенда.

5. При помощи осциллографа снять зависимость коэффициента усиления ( $K$ ) от частоты для двух любых входных сопротивлений и занести в табл. 5. Работу с осциллографом проводить в режиме измерения переменного тока.

Таблица 5.

Вар. 1	$f, \text{Гц}$	5	10	20	40	80	160	320
	$K_1$							
Вар. 2	$K_2$							

6. Построить ЛАЧХ для схемы по данным табл. 5.

7. Подать на вход импульсный сигнал, амплитудой 1 В и периодом 0,2 с и зарисовать форму выходного сигнала. Объяснить форму сигнала.

### Методические указания

Обозначения элементов, приведенные на схемах и на карточках, могут не совпадать. Схемы на рисунках являются принципиальными.

В качестве входного сигнала использовать гармонический сигнал, амплитудой  $U_{\text{ам}}=1 \text{ В}$ .

Номиналы элементов схемы:  $R_1=33 \text{ кОм}$ ,  $R_2=22 \text{ кОм}$ ,  $R_3=12 \text{ кОм}$ ,  $R_4=13 \text{ кОм}$ ,  $C_{\text{ос}}=0,47 \text{ мкФ}$ .

### Контрольные вопросы

- 1) Что называют ОУ.
- 2) Каковы основные преимущества и недостатки ОУ.
- 3) Основные характеристики ОУ.
- 4) Основные схемы включения ОУ.
- 5) Выведите передаточную функцию интегрирующей, дифференцирующей схемы и апериодического звена (фильтр низких частот).
- 6) Структура ОУ.
- 7) Принцип работы дифференциального каскада.
- 8) Как зависит коэффициент усиления от частоты входного сигнала в основных схемах включения ОУ.

## Лабораторная работа №5

### Исследование двухполупериодного выпрямителя с нулевым выводом

Цель работы — исследование двухполупериодной схемы выпрямления с нулевым выводом и сглаживающего  $RC$ -фильтра; построение нагрузочной характеристики выпрямителя (рис. 42).

**Пояснения.** Выпрямителями (рис. 43) называют устройства, служащие для преобразования переменных напряжений и токов в постоянные, используемые для питания радиоэлектронной аппаратуры. Переменное напряжение  $U_1$  сети поступает на первичную обмотку трансформатора  $T$ , с вторичной обмотки которого напряжение  $U_2$  подается на выпрямитель  $B$ . Выпрямленное пульсирующее напряжение сглаживается фильтром  $\Phi$ , превращаясь в постоянное напряжение  $U_{RH}$  для питания устройства, эквивалентно представленного резистором нагрузки  $R_H$ .

Схема двухполупериодного выпрямителя с нулевым выводом трансформатора (вывод 2) с активной нагрузкой  $R_H$  показана на рис. 44, а. Вторичная обмотка трансформатора выполнена так, чтобы в точках 1 и 3 были одинаковые, но противофазные относительно точки 2 напряжения  $U_2^I$  и  $U_2^{II}$  (рис. 44, б).

Рассмотрим работу схемы в полупериод, когда в точке 1 относительно точки 2 действует положительное напряжение, а в точке 3 — отрицательное. Напряжение  $U_2^I$  вызывает ток  $I_{VD1}$  (рис. 44, в), который проходит по цепи (рис. 44, а): вывод 1, диод  $VD1$ , резистор  $R_H$ , вывод 2. Таким образом, ток в нагрузку отдает

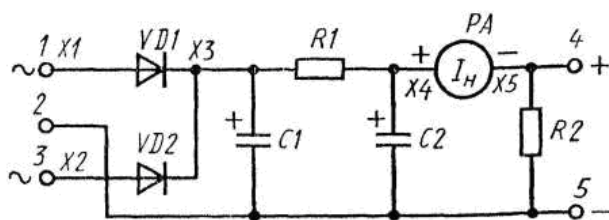


Рис. 42

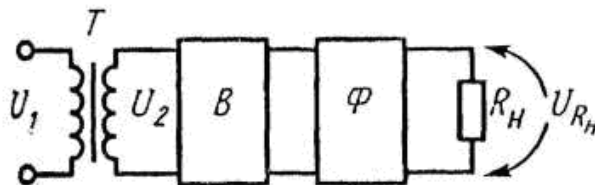


Рис. 43

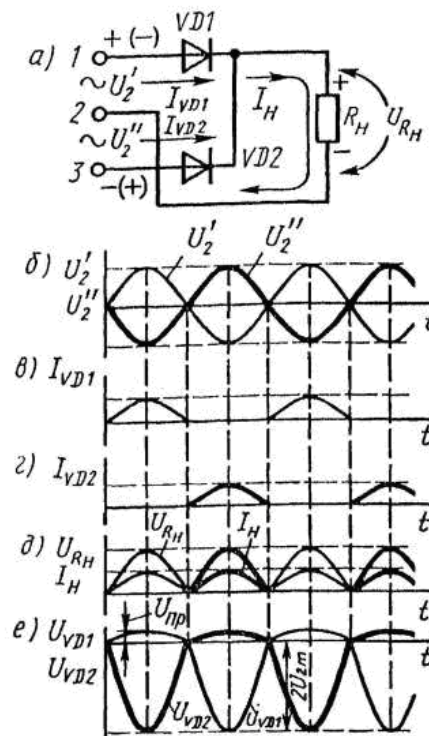


Рис. 44

верхняя половина вторичной обмотки трансформатора. Этот ток создает на резисторе нагрузки  $R_n$  падение напряжения  $U_{R_n}$  (рис. 44, д), полярность которого указана на рис. 44, а, амплитуда равна амплитуде напряжения  $U_2'$ , т. е.  $U_{2m}$ . В течение этого полупериода диод  $VD2$  закрыт напряжением, действующим между выводами 1 и 3, а следовательно, его максимальное напряжение равно  $2U_{2m}$  (рис. 44, е). На диоде  $VD1$  проводящем ток в течение всего полупериода, образуется небольшое прямое падение напряжения  $U_{пр}$ .

В следующий полупериод диод  $VD2$  начинает проводить ток  $I_{VD2}$  (рис. 44, в) по цепи (рис. 44, а): вывод 3, диод  $VD2$ , резистор  $R_n$ , вывод 2. При этом на нагрузке появляется синусоидальный импульс напряжения той же полярности, что и в первый полупериод. В течение этого полупериода диод  $VD1$  закрыт.

Таким образом, диоды поочередно каждый в течение своего полупериода проводят ток в общую нагрузку. Частота пульсаций выходного напряжения двухполупериодной схемы равна удвоенной частоте сети, так как за период напряжения сети ток в нагрузке и напряжение на ней дважды достигают максимума. Двухполупериодную схему применяют в силовых низковольтных выпрямителях. Это объясняется тем, что в цепи тока нагрузки в любой момент выпрямительного процесса находится только один диод.

Пульсации выпрямленного напряжения оценивают коэффициентом пульсаций  $k_p$ , являющимся отношением амплитуды первой гармонической к среднему значению напряжения на нагрузке  $U_{Im}$

$$k_n = U_{1m} / U_{R_{ннс}} \cdot U_{R_{н, ср}} \quad (13)$$

Коэффициент пульсаций двухполупериодной схемы выпрямления без сглаживающего фильтра  $k_n = 0,67$ . Сглаживающий фильтр уменьшает  $k_n$ . Это его свойство оценивается коэффициентом сглаживания  $k_{сгл}$ , который является отношением коэффициентов пульсаций на входе  $k_{п.вх}$  и выходе  $k_{п.вых}$  фильтра:

$$k_{сгл} = k_{п.вх} / k_{п.вых} \quad (14)$$

Простейшим сглаживающим фильтром является емкостный, состоящий из конденсатора, подключенного параллельно нагрузке  $R_H$ . Заряжаясь во время, когда напряжение на входе фильтра близко к максимальному, конденсатор отдает запасенную энергию в нагрузку при уменьшении входного напряжения. В схеме, которая была показана на рис. 42, сглаживающим может быть, например, конденсатор  $C1$ . Коэффициент сглаживания емкостного фильтра тем выше, чем больше емкость конденсатора. Правда, при этом укорачиваются импульсы тока подзаряда конденсатора, а следовательно, растет и амплитуда, что усложняет работу выпрямительных диодов. Емкостные фильтры широко применяют в источниках питания радиоэлектронных устройств, так как они просты и недороги.

Намного эффективнее сглаживающий фильтр, состоящий из двух звеньев: емкостного  $C1$  и  $RC$ -звена из элементов  $R1$  и  $C2$ . Напряжение на конденсаторе  $C1$  поднимается почти до амплитуды входного, при этом предварительно сглаживаются пульсации. Для их окончательного сглаживания служит второе звено. Такой фильтр прост в изготовлении и недорог. Недостатком  $RC$ -фильтров является низкий кпд. Обычно на резисторе  $R1$  теряется до 10 % выпрямленного напряжения, что допустимо только в маломощных источниках питания.

Внешняя, или нагрузочная, характеристика источника питания выражает зависимость выходного напряжения от тока нагрузки и показывает, в какой степени уменьшается выходное напряжение источника при увеличении нагрузки.

### Порядок выполнения работы

1. Вычертить табл. 19 для записи результатов измерений и координатные оси для изображения осциллограмм, снятых в схеме без фильтра (рис. 45, а) и с фильтром (рис. 45, б), а также для построения нагрузочной характеристики выпрямителя (рис. 46).

Т а б л и ц а 19

Элементы схемы	$R1$ , кОм	$\infty$		1,6		1		0,51	
	$C1 = C2$ , мкФ	20	50	20	50	20	50	20	50
$U_{C1}$ , В									
$\Delta U_{C1}$ , мВ									
$\Delta U_{C2}$ , мВ									
$I$ , мА									
$U_{R1} (U_{R2})$ , В									
$K_{пд} = (P_{вмк}/P_{вк}) \cdot 100\%$									

2. Зарисовать электрическую схему исследуемого выпрямителя (см. рис. 42) и собрать ее, пользуясь графическими обозначениями на сменной панели 87II-01/8.

3. Измерить электрические параметры схемы выпрямителя для приведенных в табл. 19 значений  $R1$  и  $C1 = C2$ , рассчитать КПД и занести результаты вычислений и измерений в табл. 19.

4. Вычислить коэффициенты пульсаций и сглаживания для максимальной нагрузки ( $R_2 = 510$  Ом) и двух номиналов конденсаторов  $C1$  и  $C2$ , пользуясь формулами (13) и (14) и данными табл. 19.

5. Снять и зарисовать в координатных осях (см. рис. 45, а, б) осциллограммы напряжений в схеме выпрямителя.

6. Построить в координатных осях (рис. 46) нагрузочную характеристику выпрямителя, пользуясь данными табл. 19.

### Методические указания

1. При выполнении работы используют:  $VD1$  и  $VD2$  — диоды Д220 (КД 103А); резистор  $R1 = 200$  Ом; конденсаторы  $C1 = C2$  емкостью 20 и 50 мкФ; резистор  $R2$  сопротивлением 510 Ом, 1 кОм, 1,6 кОм.

2. Переменное напряжение подводят к гнездам 1 и 3 исследуемой схемы от крайних зажимов источника питания ИП стенда, а к гнезду 2 — от зажима «Общ.». Положение тумблера ИП значения не имеет, но при выполнении работы его не следует изменять, так как в этом случае на 15 % изменится входное напряжение, что внесет погрешность в измерения.

3. В качестве измерителя тока нагрузки  $PA(I)$  используют АВМ2 на пределах «50 мА» и «10 мА».

4. Постоянные напряжения в схеме измеряют АВМ1 на пределах «25 В» и «10 В».

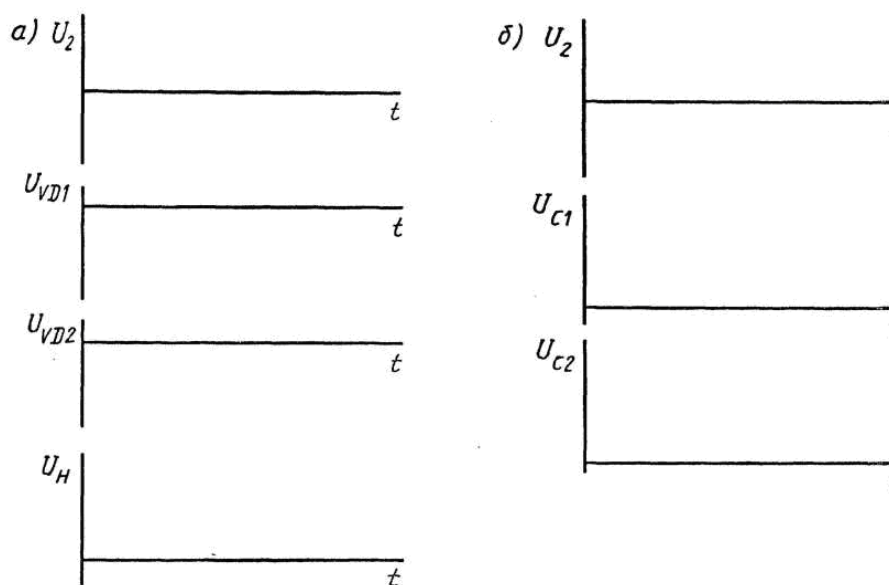


Рис. 45

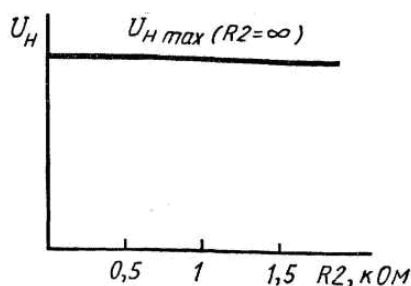


Рис. 46

5. Переменное напряжение на входе схемы измеряют *ИВ* стенда, переводя переключатель в положение «ИП~ ~25 В».

6. Пульсации в схеме измеряют милливольтметром *МВ* стенда на пределах «5 В>>, «1 В», «500 мВ» и «100 мВ», а их форму наблюдают с помощью осциллографа.

7. В координатных осях (см. рис. 45, *а*, *б*) следует построить не менее двух полных периодов пульсаций с учетом постоянной составляющей.

8. Кпд выпрямителя вычисляют как отношение мощности на нагрузке  $P_{\text{вых}} = U_{R2}I$  к мощности на входе сглаживающего фильтра  $P_{\text{вх}} = U_{C1}I$ , выраженное в процентах.

### Контрольные вопросы

1. Сколько диодов одновременно находится в цепи тока исследованного выпрямителя?
2. Почему напряжения на крайних выводах трансформатора должны быть одинаковыми?
3. Какова частота пульсаций на выходе выпрямителя?
4. Как влияют конденсаторы фильтра на пульсации?
5. Почему исследуемую схему применяют в сильноточных выпрямителях?

## Лабораторная работа №6

### Исследование мостовой схемы выпрямителя

Цель работы — исследование однофазной мостовой схемы выпрямления со сглаживающим С-фильтром (рис. 47).

**Пояснения.** Мостовая схема выпрямления дает точно такой же результат, как двухполупериодная, но имеет более простой трансформатор с одной вторичной обмоткой, рассчитанной на напряжение  $U_2$ .

Схема мостового выпрямителя без фильтра и ее временные диаграммы показаны на рис. 48, а—е.

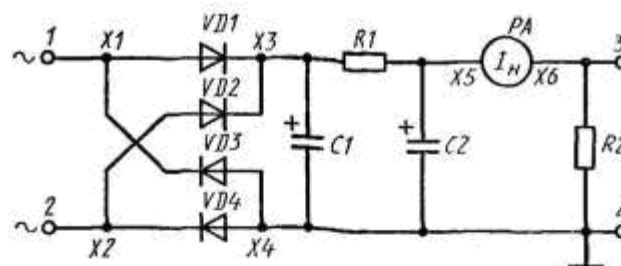


Рис. 47

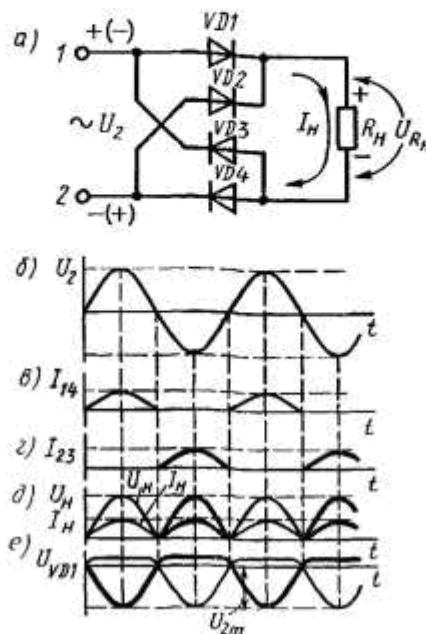


Рис. 48

Пусть в первый полупериод (рис. 48, а—в) напряжения  $U_2$  на выводе 1 вторичной обмотки трансформатора действует положительное по отношению к выводу 2 напряжение и ток  $I_{14}$  проходит по цепи: вывод диод  $VD1$ , резистор  $R_n$  диод  $VD4$ , вывод 2. При этом на нагрузке образуется падение напряжения  $U_{R_n}$ , полярность которого указана на рис. 48, а. Форма напряжения  $U_{R_n}$  это следующие один за другим синусоидальные импульсы (рис. 48, д). Диоды  $VD2$  и  $VD3$  в течение этого полупериода тока не проводят,



так как закрыты поступающим на них через открытые диоды  $VD1$  и  $VD4$  напряжением  $U_{2m}$  (рис. 48, *е*). Максимальное обратное напряжение за крытых диодов равно амплитуде напряжения  $U_{2m}$  на обмотке трансформатора, т. е. вдвое меньше, чем в двухполупериодной схеме.

В следующий полупериод, когда знаки напряжения на вторичной обмотке трансформатора изменяются на противоположные (на рис. 48, *а* они даны в скобках), ток  $I_{23}$  (рис. 48, *з*) будет проходить по цепи (рис. 48, *а*): вывод 2, диод  $VD2$ , резистор  $R_n$  диод  $VD3$ , вывод 1.

Достоинство мостовой схемы по сравнению с двухполупериодной состоит в том, что диоды могут быть рассчитаны на вдвое меньшее обратное напряжение. Однако в цепи прямого тока в любой момент выпрямительного процесса находятся два последовательно включенных диода, что снижает экономичность схемы из-за падения напряжения на них при прохождении прямого тока. В выпрямителях, выпрямленное напряжение которых значительно выше прямого падения напряжения на диодах, этот недостаток незаметен. В тех же случаях, когда выпрямленное напряжение соизмеримо с прямым падением напряжения, применяют двухполупериодную схему.

В мостовой схеме, как и в двухполупериодной, частота пульсаций равна удвоенной частоте сети.

### Порядок выполнения работы

1. Вычертить таблицу, аналогичную табл. 19 в работе № 8, а также координатные оси (см. рис. 45, *а*, *б*) для построения временных диаграмм.

2. Зарисовать электрическую схему исследуемого выпрямителя (см. рис. 47) и собрать ее, пользуясь условными графическими обозначениями, приведенными на сменной панели 87Л-01/9.

3. Выполнить п. 3—6 задания к работе № 1.

### Методические указания

1. Переменное напряжение подводят к гнезду 1 исследуемой схемы от одного из крайних зажимов источника питания *ИП* стенда, а к гнезду 2 — от зажима «Общ.». Желательно, чтобы тумблер *ИП* находился в том же положении, что и при выполнении работы № 8.

2. При выполнении работы используют диоды Д220 (КД103А). Остальные съемные элементы те же, что в работе № 8.

### Контрольные вопросы

1. Сколько последовательно включенных диодов имеется в цепи тока нагрузки при мостовой схеме выпрямления?

2. Каким должно быть максимально допустимое обратное напряжение диода в мостовой схеме?
3. Как влияют конденсаторы фильтра и сопротивление нагрузки на амплитуду пульсаций?
4. Какой будет осциллограмма напряжения на нагрузке, если один из диодов отключен?
5. Когда применяют мостовую схему выпрямления?

## Лабораторная работа №7

### Исследование компенсационного стабилизатора напряжения

Цель работы — изучение принципа действия компенсационного стабилизатора напряжения и его исследование при изменении входного напряжения и нагрузки; расчет коэффициента стабилизации и выходного сопротивления (рис. 53).

**Пояснения.** Значительно лучшими параметрами обладает компенсационный стабилизатор напряжения: его коэффициент стабилизации может достигать сотен и

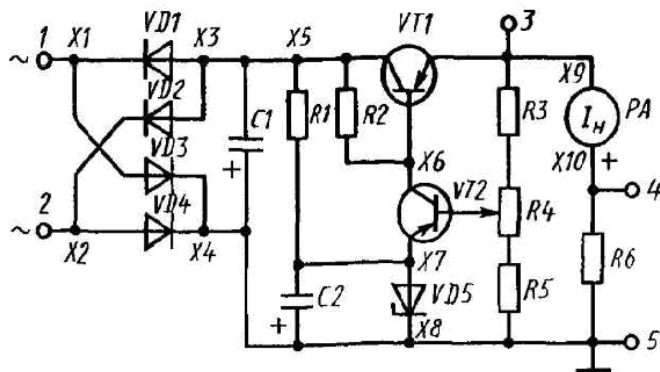


Рис. 53

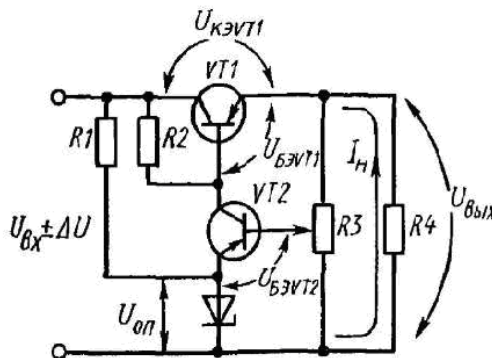


Рис. 54

даже тысяч единиц. Наиболее распространен компенсационный стабилизатор напряжения, регулирующий элемент которого включен последовательно нагрузке (рис. 54). На вход схемы подается отфильтрованное нестабилизированное напряжение  $U_{вх}$  (его предельные отклонения от среднего значения  $\pm \Delta U$ ), которое распределяется между регулирующим транзистором  $VT1$  и сопротивлением нагрузки  $R4$ , т. е.

$$U_{вх} = U_{кэVT1} + U_{вых}. \quad (20)$$

Принцип действия стабилизатора состоит в следующем. Если увеличится  $U_{вх}$ , то автоматически почти на столько же увеличится  $U_{кэВТ1}$ , а  $U_{вых}$  — незначительно.

При уменьшении  $U_{вх}$  уменьшается  $U_{кэВТ1}$ , а  $U_{вых}$  — незначительно.

Усилитель сигнала рассогласования выполнен на транзисторе  $VT2$ , на эмиттерный переход которого поступает два напряжения: опорное  $U_{оп}$ , вырабатываемое параметрическим стабилизатором на стабилитроне  $VD$  и напряжение  $\alpha U_{вых}$  пропорциональное выходному напряжению ( $\alpha$  — коэффициент деления делителя, выполненного на потенциометре  $R3$ ). Сигнал рассогласования складывается из этих двух напряжений:

$$U_{бэВТ1} = U_{кВТ2} - U_{вых}, \quad (22)$$

$$U_p = U_{бэВТ2} = \alpha U_{вых} - U_{оп}, \quad (21)$$

усиливается и поступает на базу регулирующего транзистора  $VT1$ , потенциал эмиттера которого равен выходному напряжению  $U_{вых}$  стабилизатора. Напряжение в эмиттерной цепи транзистора складывается из двух напряжений:

$$U_{бэВТ1} = U_{кВТ2} - U_{вых}$$

Увеличение входного напряжения сопровождается увеличением выходного, а, следовательно, напряжения  $\alpha U_{вых}$ . При этом напряжение  $U_{бэВТ2}$  и ток коллектора транзистора  $VT2$  увеличиваются, а напряжения  $U_{кВТ2}$  и  $U_{бэВТ1}$  в соответствии с формулой (22) уменьшаются.

Одновременно уменьшается коллекторный ток транзистора  $VT1$ , что равноценно увеличению сопротивления его промежутка коллектор — эмиттер и, следовательно, напряжения  $U_{кэВТ1}$ . Таким образом, почти все приращение напряжения  $U_{вх}$  приходится на регулирующий транзистор  $VT1$ , а напряжение  $U_{вых}$  в соответствии с формулой (20) остается неизменным. Выходное напряжение стабилизатора все же изменяется, так как для поддержания нового электрического состояния транзистора  $VT1$  необходим некоторый сигнал рассогласования, тем меньший, чем выше коэффициент усиления усилителя сигнала рассогласования.

Уменьшение входного напряжения схема компенсирует уменьшением сопротивления промежутка коллектор — эмиттер транзистора  $VT1$ , напряжение на котором уменьшается, а выходное напряжение стабилизатора изменяется незначительно. Аналогично стабилизатор реагирует на пульсации входного напряжения, значительно ослабляя их на выходе.

При изменении положения движка потенциометра  $R3$  изменяется выходное напряжение  $U_{вых}$  стабилизатора. Это происходит потому, что в

схеме автоматически поддерживается соотношение между напряжениями в эмиттерной цепи транзистора  $VT2$  в соответствии с формулой (21). Из этой формулы следует, что  $U_{\text{вых}} \approx U_{\text{оп}}/\alpha$ . Если движок потенциометра  $R3$  сместить к верхнему по схеме выводу ( $\alpha = 1$ ), то выходное напряжение стабилизатора приблизится к опорному.

При уменьшении  $\alpha$  (смещение движка потенциометра  $R3$  к нижнему выводу) выходное напряжение увеличивается и соответственно уменьшается напряжение  $U_{\text{кэ}VT1}$ , пока транзистор  $VT1$  не перейдет в насыщение. Тогда  $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} - U_{\text{кэ}VT1\text{нас}} \approx U_{\text{вх}}$ . В этом режиме транзистор  $VT1$  перестает управляться, а стабилизатор — стабилизировать напряжение. Обычно напряжение на промежутке коллектор — эмиттер транзистора  $VT1$  составляет не менее 3—5 В при максимальном напряжении на выходе схемы. Такое же минимальное напряжение  $U_{\text{кэ}VT1}$  необходимо для сглаживания пульсаций.

### Порядок выполнения работы

1. Вычертить табл. 21 для записи электрических режимов схемы стабилизатора.
2. Зарисовать электрическую схему исследуемого стабилизатора (см. рис. 53) и собрать ее, пользуясь графическими обозначениями на сменной панели 87Л-01/11.
3. Выполнить измерения и занести результаты в табл. 21.
4. Рассчитать мощность, рассеиваемую транзистором  $VT1$ , при всех режимах работы стабилизатора и определить режим, когда она максимальна.
5. Пользуясь данными табл. 21, рассчитать коэффициент стабилизации и выходное сопротивление стабилизатора.

Таблица 21

Напряжение сети	$U_1 = 15 \text{ В}$				$U_2 = 17,25 \text{ В}$			
$R6(R_n)$ , кОм	0,51	1	1,6	$\infty$	0,51	1	1,6	$\infty$
$U_{C1}$ , В								
$\Delta U_{C1}$ , мВ								
$U_{\text{кэ}VT2}$ , В								
$U_{\text{кэ}VT1}$ , В								
$\Delta U_{\text{кэ}VT1}$ , мВ								
$U_{R6}(U_{\text{вых}})$ , В								
$I_n$ , мА								
$U_{\text{бэ}VT2}$ , В								
$P_{\text{кэ}VT1} = I_n U_{\text{кэ}VT1}$ , мВт								

## Методические указания

1. При выполнении работы используют:  $R1 = 1,6 \text{ кОм}$ ;  $R2 = 7,5 \text{ кОм}$ ;  $R3 = 200 \text{ Ом}$ ;  $R4 = 2,2 \text{ кОм}$  (переменный);  $R5 = 1 \text{ кОм}$ ;  $R6 = 510 \text{ Ом}$ ,  $1 \text{ кОм}$ ;  $1,6 \text{ кОм}$ ;  $C1 = 50 \text{ мкФ}$ ;  $C2 = 20 \text{ мкФ}$ ;  $VD1 - VD4$  — диоды Д220 (КД103А);  $VT1$  и  $VT2$  — транзисторы КТ361А;  $VD5$  — стабилитрон Д814А.

2. На гнезда 1 и 2 исследуемой схемы подают переменное напряжение с зажимов «~15 В» и «Общ.» источника питания ИП стенда.

3. Ток нагрузки  $I_n$  измеряют *АВМ2* (на пределах измерения «50 мА» и «10 мА»), напряжение — *АВМ1* (на пределах «25 В» и «10 В»), пульсации напряжения — милливольтметром МВ (действующее значение) и осциллографом (измеряют амплитудное значение и наблюдают форму пульсаций, их частоту).

4. Для измерения нестабильности выходного напряжения следует собрать схему, показанную на рис. 52 (прибор, измеряющий нестабильность выходного напряжения стабилизатора, подключают к гнезду 4 схемы, приведенной на рис. 53), и используют АВО сначала на пределе «5 В», а затем по мере компенсации выходного напряжения стабилизатора переключая на все более чувствительные пределы измерения («1 В», «0,5 В», «6,1 В»).

Затем устанавливают  $R6 = 510 \text{ Ом}$ , переводят тумблер *ИП* в положение «15 В+15%»; при этом напряжение на выходе стабилизатора должно быть равно 10 В. Изменяя напряжение  $ГН2$ , компенсируют выходное напряжение стабилизатора (АВО показывает ноль, когда напряжение на выходах исследуемой схемы и  $ГН2$  одинаковы). Записывают значение тока нагрузки  $I_n$  (при  $R6 = 510 \text{ Ом}$ ) и отключают резистор  $R6$ . При этом выходное напряжение стабилизатора увеличивается на  $\delta U'_{R6}$ , что и является его нестабильностью, вызванной изменением тока нагрузки. Выходное сопротивление стабилизатора рассчитывают по формуле  $R_{вых} = \delta U'_{R6} / \Delta I_n$ , где  $\Delta I_n$  — изменение тока нагрузки, вызвавшее изменение выходного напряжения на  $\delta U'_{R6}$ , в данном случае  $\Delta I_n = I_n$  при  $R6 = 510 \text{ Ом}$ , так как ток нагрузки при отключенном резисторе  $R6$  равен нулю.

5. Вновь устанавливают Ом, измеряют напряжение на конденсаторе  $C1$  (постоянную составляющую) и компенсируют выходное напряжение стабилизатора. Переводят тумблер *МП* в положение «15 В» и снова измеряют напряжение на конденсаторе  $C1$ , а также  $\delta U''_{R6}$ . Коэффициент стабилизации рассчитывают по формуле

$$k_{ст} = \frac{2(U'_{C1} - U''_{C1})}{U'_{C1} + U''_{C1}} \cdot \frac{\delta U'_{R6}}{U'_{R6} - 0,5 \delta U''_{R6}},$$

где  $U'_{C1}$  и  $U''_{C1}$  — напряжения на конденсаторе  $C1$  при напряжениях на входе стабилизатора 17,25 и 15 В;

$(U_{C1}' + U_{C1}'')/2$  и  $U_{R6}' - 0,5\delta U_{R6}''$  — средние напряжения на входе и выходе стабилизатора;  $\delta U_{R6}''$  — изменение выходного напряжения, вызванное изменением входного на 15%.

### Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия компенсационного стабилизатора напряжения?
2. Какие максимальное и минимальное напряжения можно получить на выходе исследуемой схемы?
3. Как влияет сопротивление резистора  $R2$  на коэффициент стабилизации?
4. Почему компенсационный стабилизатор сглаживает пульсации?
5. В каком режиме мощность, рассеиваемая транзистором, минимальна?

## Лабораторная работа №8

### Исследование схем активных фильтров верхних и нижних частот первого порядка

Цель работы: изучение принципов работы, основных схем включения и основных параметров фильтров верхних и нижних частот первого порядка на операционных усилителях.

**Пояснения.** Схема дифференцирующего включения ОУ изображена на рис. 8.

$$U_{\Delta\hat{O}\hat{O}} = K \frac{dU_{\Delta\hat{O}}}{dt}; \quad (5)$$

$$K = \frac{R_{oc}}{X_{C1} + R_1} = \frac{j\omega C_1 R_{oc}}{1 + j\omega C_1 R_1}; \quad (5.1)$$

$$T_1 = C_1 R_{oc}; \quad T_2 = C_1 R_1; \quad p = j\omega;$$

$$W(p) = \frac{T_1 p}{T_2 p + 1};$$

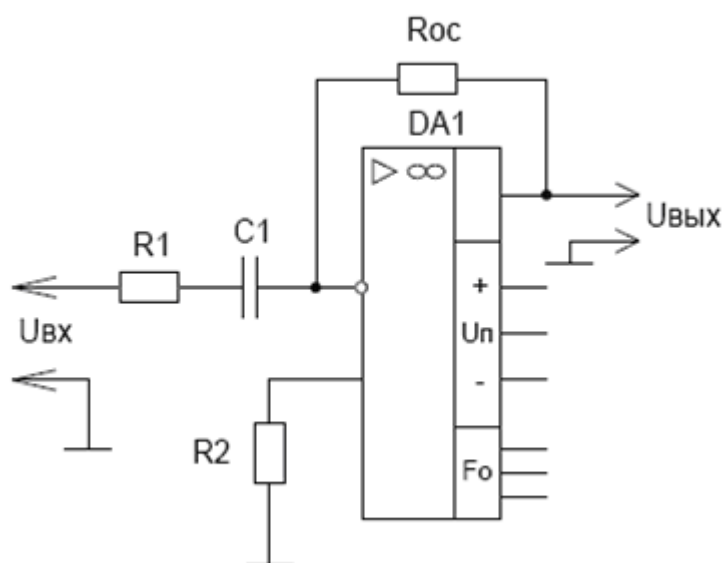


Рис. 8

Схема фильтра низких частот первого порядка (апериодическое звено) изображена на рис 9.

$$K = \frac{R_{oc} \parallel X_{oc}}{R_1} = \frac{R_{oc}}{R_1} \frac{1}{1 + j\omega C_{oc} R_{oc}}; \quad (7)$$

$$T = C_{oc} R_{oc}; \quad k = \frac{R_{oc}}{R_1}; \quad p = j\omega;$$

$$W(p) = \frac{k}{1 + Tp};$$



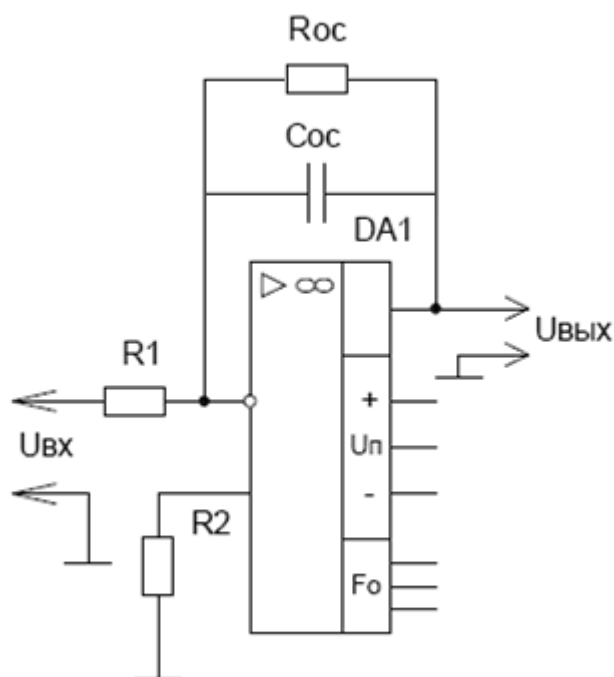


Рис. 9

### Порядок выполнения работы

Перед началом выполнения лабораторных работ обязательно ознакомьтесь с методическими указаниями.

Дифференцирующая схема.

1. Используя карточку № 6, собрать с помощью джамперов (перемычек) схему, показанную на рис. 8. В качестве сопротивления ОС выбрать любой из  $R_{oc1}$ ,  $R_{oc2}$ .

2. Подключить собранную схему к генератору с помощью четырехжильного шнура (зеленые на вход, белый - земля).

3. Подключить собранную схему к осциллографу с помощью шнура с «крокодилами».

4. Подключить собранную схему при помощи «крокодилов» к источнику питания 24 В. Провода питания выходят из корпуса стенда.

5. При помощи осциллографа снять зависимость коэффициента усиления от частоты для двух сопротивлений ОС и занести в табл. 6. Работу с осциллографом проводить в режиме измерения переменного тока.

Таблица 6.

Вар. 1	$f, \text{Гц}$	1	2	4	6	8	10	12	14
	$K_1$								
Вар. 2	$K_2$								

6. Построить ЛАЧХ для схемы по данным табл. 6.

7. Подать на вход схемы импульсный сигнал, амплитудой 1 В и периодом 0,1 с и зарисовать форму выходного сигнала. Объяснить форму сигнала.

### Методические указания

Обозначения элементов, приведенные на схемах и на карточках, могут не совпадать. Схемы на рисунках являются принципиальными.

В качестве входного сигнала использовать гармонический сигнал, амплитудой  $U_{\text{вх}}=1$  В.

Номиналы элементов схемы:  $R_1=1,7$  кОм,  $R_2=13$  кОм,  $C_1=0,47$  мкФ,  $R_{\text{ос1}}=100$  кОм,  $R_{\text{ос2}}=62$  кОм.

Фильтр низких частот (апериодическое звено).

1. Используя карточку № 7, собрать с помощью джамперов (перемычек) схему, показанную на рис. 9. В качестве сопротивления ОС выбрать любой из  $R_{\text{ос1}}$ ,  $R_{\text{ос2}}$ , а в качестве входного сопротивления выбрать любой из  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ .

2. Подключить собранную схему к генератору с помощью четырехжильного шнура (зеленые на вход, белый - земля).

3. Подключить собранную схему к осциллографу с помощью шнура с «крокодилами».

4. Подключить собранную схему при помощи «крокодилов» к источнику питания 24 В. Провода питания выходят из корпуса стенда.

5. При помощи осциллографа снять зависимость коэффициента усиления от частоты для двух любых входных или двух любых сопротивлений ОС и занести в табл. 7.

Таблица 7.

Вар. 1	$f$ , Гц	1	2	4	8	16	32	64	128
	$K_1$								
Вар. 2	$K_2$								

6. Построить ЛАЧХ для схемы по данным табл. 7.

7. Подать на вход схемы импульсный сигнал амплитудой 1 В и периодом 0,2 с и зарисовать форму выходного сигнала. Объяснить форму сигнала.

### Методические указания

Обозначения элементов, приведенные на схемах и на карточках, могут не совпадать. Схемы на рисунках являются принципиальными.

В качестве входного сигнала использовать гармонический сигнал, амплитудой  $U_{\text{вх}}=1$  В.

Номиналы элементов схемы:  $R_1=33$  кОм,  $R_2=22$  кОм,  $R_3=12$  кОм,  $R_4=13$  кОм,  $R_{\text{ос1}}=100$  кОм,  $R_{\text{ос2}}=62$  кОм,  $C_{\text{ос}}=0,47$  мкФ.

### Контрольные вопросы

1. Основные характеристики ОУ.
2. Основные схемы включения ОУ.
3. Выведете передаточную функцию интегрирующей, дифференцирующей схемы и апериодического звена (фильтр низких частот).
4. Структура ОУ.
5. Принцип работы дифференциального каскада.
6. Как зависит коэффициент усиления от частоты входного сигнала в основных схемах включения ОУ.

## Список литературы

### Основная литература

1. Максина Е.Л. Электроника [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Максина Е.Л.— Электрон. текстовые данные.— Саратов: Научная книга, 2012.— 159 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/6270>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю.

### Дополнительная литература

1. Скаржепа В.А. Электроника и микросхемотехника: учебник в 2 ч. Ч.1. Электронные устройства информационной автоматики / В.А. Скаржепа, А.Н. Луценко; под общ. ред. А.А. Краснопрошеной. – Киев: Выща школа. 1989. – 430 с. – 50 экз.  
50 экз.
2. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для вузов / Ю.С. Забродин – М.: Высш. школа, 1982. – 496 с. – 82 экз.

Приложение. *Образец титульного листа отчета по лабораторной работе*

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Институт высокоточных систем им. В.П. Грязева  
Кафедра «Приборы управления»

Отчет  
по лабораторной работе №  
«*Название лабораторной работы*»

по дисциплине

«Электроника-2»

Выполнил: студент гр. XXXXXX  
Фамилия И.О.

Проверил: уч. степень, Фамилия И.О.

Тула 20XX г.  
41