

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА АВТОМАТИКИ.

ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Методические указания
по выполнению лабораторных работ для студентов специальности
1-53 01 01-05 «Автоматизация технологических процессов и производств
(легкая промышленность)»

Витебск
2021

Составители:

В. Ф. Куксевич, Ю. В. Новиков, В. Н. Шут

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ», протокол № 2 от 21.10.2021.

Электронные устройства автоматики. Электронные усилители : методические указания по выполнению лабораторных работ / сост. В. Ф. Куксевич, Ю. В. Новиков, В. Н. Шут. – Витебск : УО «ВГТУ», 2021. – 55 с.

Методические указания являются руководством к лабораторным работам по дисциплине «Электронные устройства автоматики» для студентов специальности 1-53 01 01-05 «Автоматизация технологических процессов и производств (легкая промышленность)», содержат общие требования, предъявляемые к выполнению лабораторных работ, освещают теоретические вопросы подготовки к ним, приводят примеры получения характеристик электронных устройств автоматики с помощью программы Electronics Workbench.

УДК 621.38

© УО «ВГТУ», 2021

Содержание

| | |
|---|----|
| Общие требования к выполнению лабораторных работ | 4 |
| Лабораторная работа 1 | |
| <i>Исследование однокаскадного усилителя низкой частоты</i> | 5 |
| Лабораторная работа 2 | |
| <i>Исследование схем усилителей на БТ с ОБ и с ОК</i> | 12 |
| Лабораторная работа 3 | |
| <i>Исследование многокаскадных усилителей</i> | 18 |
| Лабораторная работа 4 | |
| <i>Исследование усилителей мощности</i> | 23 |
| Лабораторная работа 5 | |
| <i>Исследование дифференциального усилителя</i> | 32 |
| Лабораторная работа 6 | |
| <i>Исследование типовых схем на операционных усилителях</i> | 43 |
| Литература | 54 |

Общие требования к выполнению лабораторных работ

Студент должен предварительно изучить описание предстоящей лабораторной работы, теоретический материал, соответствующий данной работе.

Перед проведением каждой работы проводится проверка теоретической подготовки студента по данной теме. После разрешения преподавателя студенты приступают к выполнению лабораторной работы.

Отчет по выполненной лабораторной работе составляется каждым студентом индивидуально. Содержание отчета приведено в методических указаниях к каждой лабораторной работе.

При оформлении отчета обязательно соблюдение ГОСТа на буквенные и графические обозначения физических величин и элементов схем.

Графики и осциллограммы изображаются в прямоугольной системе координат с указанием масштабов по осям координат.

Формулы приводятся сначала в общем виде, затем с подставленными числовыми значениями.

Если преподавателем будет предложено переделать какую-либо часть отчета, то в этом случае исправления вносятся в текст при помощи корректирующих материалов, с тем расчетом, чтобы исправленная работа представляла единое целое. Листы с большим числом исправлений следует переделать полностью.

Лабораторная работа 1

Исследование однокаскадного усилителя низкой частоты

Цель работы: изучение назначения элементов и исследование характеристик усилителей низкой частоты (УНЧ), выполненных на биполярных транзисторах (БТ). Ознакомление с особенностями применения УНЧ в технике.

Теоретические сведения

Электронным усилителем называется устройство, преобразующее электрические сигналы небольшой мощности на входе в электрические сигналы большей мощности на выходе. Увеличение сигнала в усилителе происходит за счет преобразования энергии источника питания, осуществляемого с помощью активных управляемых элементов (УЭ), как правило, биполярных и полевых транзисторов.

Основными параметрами усилителей являются:

1. Коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}.$$

2. Коэффициент усиления по току:

$$K_I = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}}.$$

3. Коэффициент усиления по мощности:

$$K_P = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}.$$

Основными характеристиками усилителей являются:

1. Амплитудная характеристика (АХ) – зависимость амплитуды выходного сигнала от амплитуды сигнала на входе $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$ (рис. 1.1).

2. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) – зависимость коэффициента усиления усилителя от частоты подаваемого на его вход сигнала $K(f)$ (рис. 1.2). С помощью АЧХ определяется полоса пропускания усилителя Δf , в пределах которой величина коэффициента усиления отвечает заданным требованиям.

$$\Delta f = f_{\text{в}} - f_{\text{н}},$$

где $f_{\text{в}}$ и $f_{\text{н}}$ – соответственно верхняя и нижняя граничные частоты.

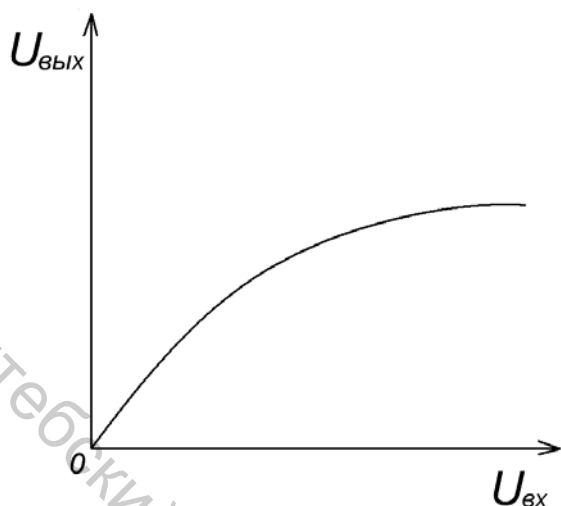


Рисунок 1.1 – Амплитудная характеристика

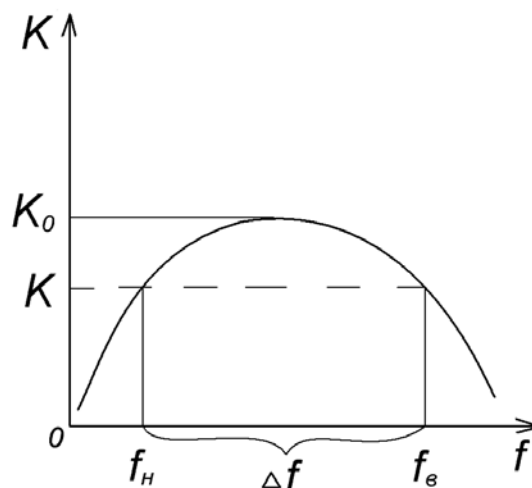


Рисунок 1.2 – Амплитудно-частотная характеристика

3. Фазочастотная характеристика (ФЧХ) – зависимость фазового сдвига между выходным и входным сигналами от частоты при гармоническом входном сигнале.

В зависимости от того, какой из выводов БТ при включении делают общим для входной и выходной цепей, различают схемы с общей базой (ОБ), общим коллектором (ОК) и общим эмиттером (ОЭ). При этом в схеме с ОБ усиливается только напряжение, в схеме с ОК – только ток, в схеме с ОЭ – и ток, и напряжение (мощность).

Наибольшее распространение в схемах усилительных каскадов получила схема с ОЭ и термостабилизацией режима покоя (рис. 1.3).

Основными элементами схемы являются:

- источник питания E_k , осуществляющий подачу энергии в выходную цепь для усиления сигнала;
- транзистор VT – управляемый входным сигналом элемент, изменяющий свое сопротивление;
- резистор R_k , выполняющий две функции: задающий ток покоя коллектора $I_{ко}$ и создающий динамический режим работы транзистора.

Остальные элементы схемы являются вспомогательными. Конденсаторы $C_б$ и C_k являются разделительными. $C_б$ используется для развязки входной цепи усилителя по постоянному току от источника входного сигнала. C_k пропускает в цепь нагрузки только переменную составляющую выходного сигнала и задерживает постоянную составляющую.

Резисторы R_1 и R_2 являются делителем напряжения и задают начальный режим работы базы: ток покоя базы $I_{бo}$ и напряжение покоя между базой и эмиттером $U_{бэo}$.

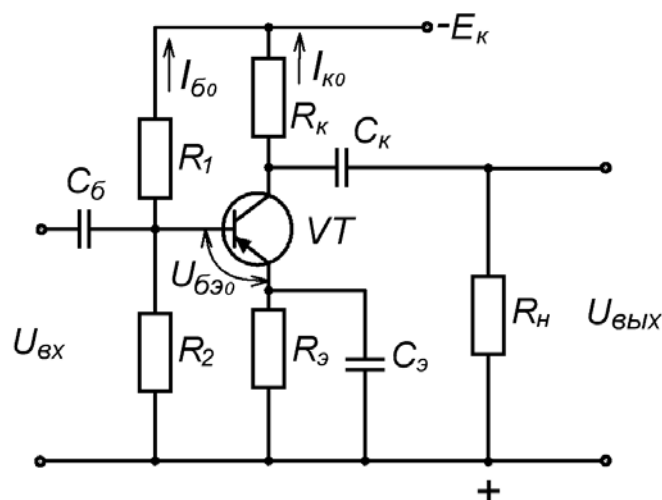


Рисунок 1.3 – Усилительный каскад на БТ с ОЭ и термостабилизацией режима покоя

Рассмотрим принцип действия данного каскада.

При отсутствии входного сигнала во входной и в выходной цепях протекают создаваемые дополнительным источником питания E_k токи покоя усилителя $I_{б0}$ и $I_{к0}$. Они поддерживают транзистор в активном (проводящем) состоянии.

При подаче на вход переменного напряжения:

– в случае отрицательной полуволны, отрицательное напряжение на базе увеличивается, увеличивается и ток базы i_b ; транзистор начинает работать в пропускном режиме и ток i_k возрастает; выходное напряжение в это время (согласно II закону Кирхгофа) становится менее отрицательным

$$U_k = -E_k + i_k R_k;$$

– в случае положительной полуволны, напряжение на базе становится менее отрицательным, ток базы i_b уменьшается, транзистор прикрывается, уменьшается ток i_k ; выходное напряжение в это время, определяемое тем же II законом Кирхгофа, становится более отрицательным.

В результате форма усиливаемого сигнала сохраняется неизменной, а амплитуда увеличивается, так как $|E_k| \gg |u_{вх}|$.

Работа данного каскада зависит от температурного режима. При изменении температуры изменяется прежде всего $I_{к0}$, а значит и коэффициент усиления тока транзистора β . Это может привести к переходу транзистора в работу на нелинейных участках характеристик, в результате чего нарушится форма выходного сигнала.

Для термостабилизации точки покоя в цепь эмиттера включен резистор R_3 , создающий отрицательную обратную связь (ООС) по току. При изменении температуры транзистора изменяется напряжение между базой и эмиттером за

счет изменения напряжения на R_3 . Изменение $U_{бз}$ приводит к изменению тока $I_{б}$, а значит и тока коллектора $I_{к}$. Таким образом $I_{ко}$ будет поддерживаться на заданном уровне.

Емкость C_3 шунтирует R_3 по переменному току, исключая тем самым проявление ООС в каскаде по переменным составляющим. Отсутствие C_3 привело бы к уменьшению коэффициентов усиления каскада.

В схеме с ОЭ фаза выходного сигнала противоположна фазе входного, поэтому такие усилители называются инвертирующими.

Порядок выполнения работы на унифицированном стенде УИЛС-1

1. Для выполнения работы выбрать модуль «RC-УСИЛИТЕЛИ НЧ», схема которого представлена на рисунке 1.4, и разместить его на наборном поле. Собрать схему, соответствующую рисунку 1.3. Для этого перемкнуть клеммы 1 и 4. Подключить к клеммам $K4$ и $K6$ нагрузку, используя блок переменных сопротивлений.

2. Подать напряжение питания 20 В с блока постоянных напряжений в соответствии с обозначением полярности на модуле.

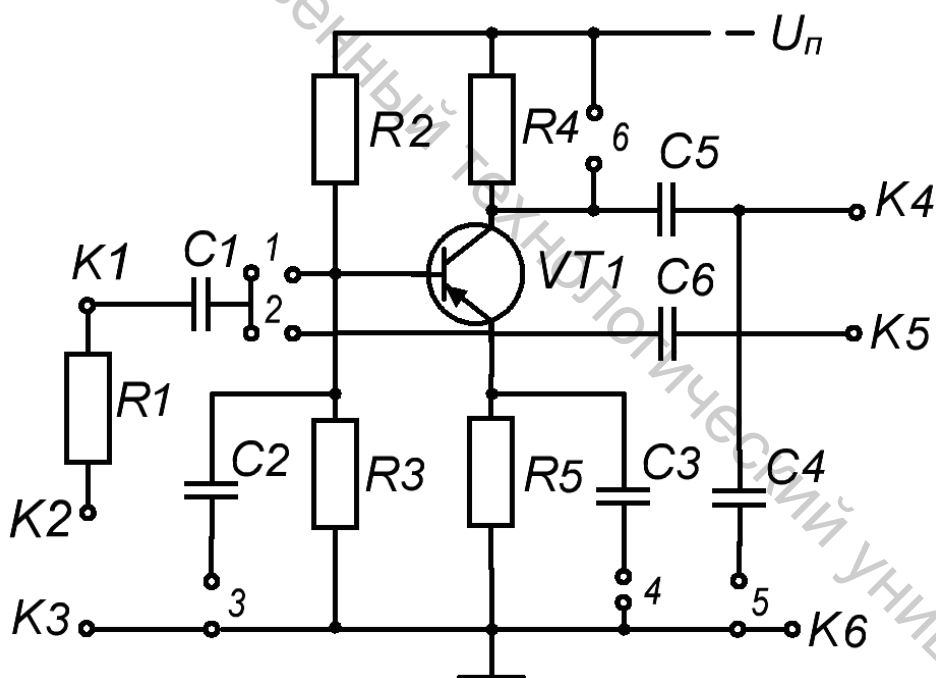


Рисунок 1.4 – Схема модуля «RC-УСИЛИТЕЛИ НЧ»

3. От генератора гармонического напряжения к клеммам $K1$ и $K3$ подать входной сигнал частотой 1 кГц . Изменяя напряжение входного сигнала в соответствии с данными таблицы 1.1, вольтметром измерить напряжение сигнала на выходе усилителя. Данные измерений занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

| | | | | | | | | |
|--------------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| $U_{вх}, B$ | 0,01 | 0,03 | 0,05 | 0,07 | 0,1 | 0,5 | 1,0 | 3,0 |
| $U_{вых}, B$ | | | | | | | | |

По полученным данным построить амплитудную характеристику усилителя $U_{вых}(U_{вх})$.

4. Для получения АЧХ усилителя установить напряжение на входе схемы равным $0,03 B$ (в процессе проведения опыта это значение необходимо поддерживать постоянным). Изменяя в соответствии с данными таблицы 1.2 частоту входного сигнала, измерить выходное напряжение усилителя. Данные измерений занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

| | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|
| f | 20 Гц | 50 Гц | 100 Гц | 500 Гц | 1 кГц | 5 кГц | 10 кГц | 50 кГц | 100 кГц | 150 кГц | 200 кГц |
| $U_{вых}, B$ | | | | | | | | | | | |
| K_U | | | | | | | | | | | |
| lgf | | | | | | | | | | | |

Рассчитать значения K_U и lgf . Данные расчета занести в таблицу 1.2. Построить АЧХ усилителя в форме зависимости $K_U(lgf)$.

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Произвести моделирование схемы усилительного каскада на БТ с ОЭ (рис. 1.5). Вольтметр схемы (на вкладке Value окна параметров вольтметра Voltmeter properties) перевести в положение «АС». Изменяя напряжение входного сигнала в соответствии с данными таблицы 1.1, измерить напряжение сигнала на выходе усилителя. Данные измерений (показания вольтметра, зафиксированные в момент включения схемы) занести в таблицу 1.1.

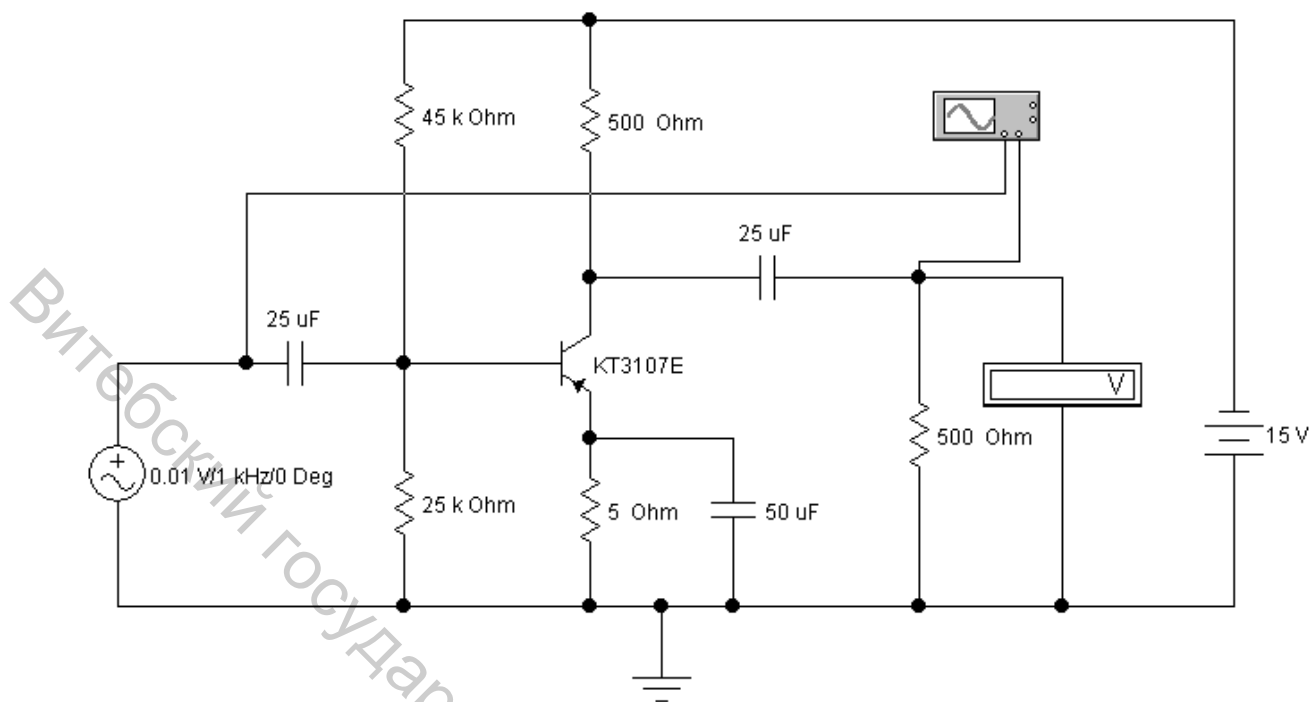


Рисунок 1.5 – Схема моделирования усилительного каскада на БТ с ОЭ

По полученным данным построить амплитудную характеристику усилителя $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$.

2. Для получения АЧХ усилителя установить напряжение на входе схемы равным $0,03 \text{ В}$. Изменяя в соответствии с данными таблицы 1.2 частоту входного сигнала, измерить выходное напряжение усилителя. Данные измерений (показания вольтметра, зафиксированные в момент включения схемы) занести в таблицу 1.2.

Рассчитать значения K_U и lgf . Данные расчета занести в таблицу 1.2. Построить АЧХ усилителя в форме зависимости $K_U(lgf)$.

3. Для получения осциллограмм напряжений схемы при отсутствии нелинейных искажений сигнала установить напряжение на входе схемы $0,01 \text{ В}$ и частоту сигнала 1 кГц . Настройку осциллографа произвести в соответствии с рисунком 1.6.

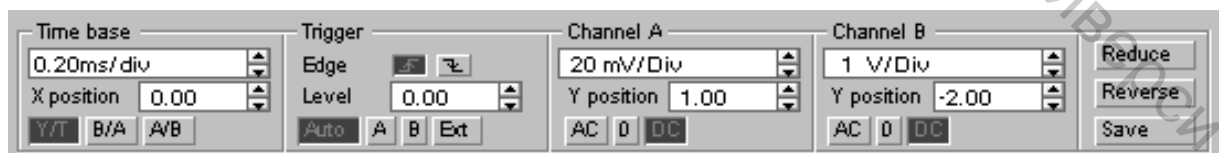


Рисунок 1.6 – Настройки осциллографа

Зарисовать в масштабе осциллограммы напряжений на входе схемы и на нагрузке в соответствии с рисунком 1.7.

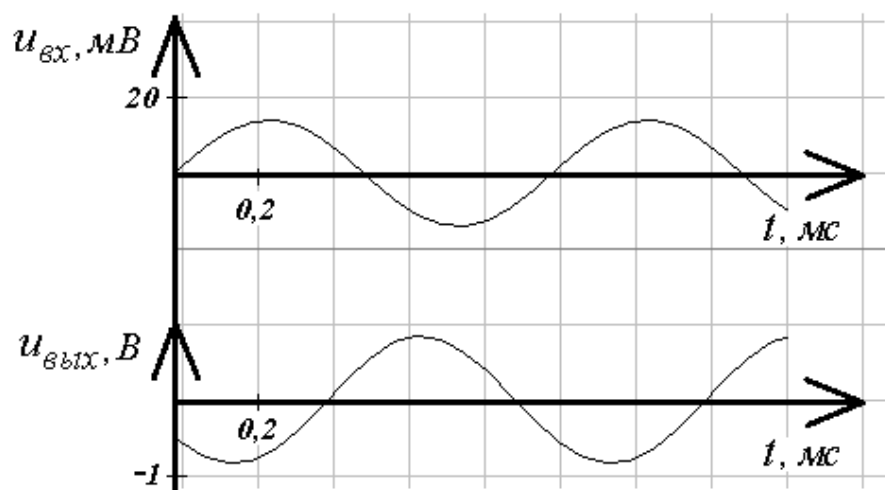


Рисунок 1.7 – Осциллограммы напряжений при отсутствии нелинейных искажений сигнала

4. Для получения осциллограмм напряжений схемы при наличии нелинейных искажений сигнала установить напряжение на входе схемы $0,5 В$ и частоту сигнала $1 кГц$. Зарисовать в масштабе осциллограммы напряжений на входе схемы и на нагрузке в соответствии с рисунком 1.8.

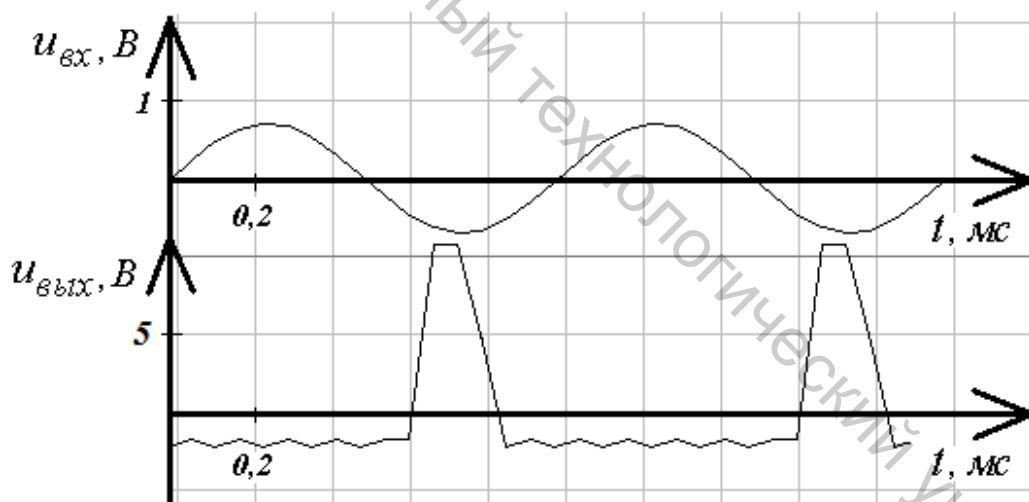


Рисунок 1.8 – Осциллограммы напряжений при наличии нелинейных искажений сигнала

Контрольные вопросы

1. Пояснить назначение элементов схемы УНЧ.
2. Пояснить принцип работы УНЧ.
3. С какой целью в схему усилителя включена цепь R_3C_3 ?
4. Что такое АХ и АЧХ усилителя?
5. Что такое полоса пропускания усилителя?

Лабораторная работа 2

Исследование схем усилителей на БТ с ОБ и с ОК

Цель работы: изучение назначения элементов и исследование характеристик усилителей, выполненных на БТ с ОБ и с ОК.

Теоретические сведения

Показатели усилительных каскадов зависят от способа включения транзистора, исполняющего роль управляемого элемента схемы. В связи с этим анализ усилительных каскадов на БТ проводят для трех способов включения транзистора: с общим эмиттером (ОЭ), общей базой (ОБ) и общим коллектором (ОК).

Усилительный каскад с ОБ (рис. 2.1) используют реже, чем каскады с ОЭ и ОК. Такой каскад имеет более линейные выходные характеристики, и используется для получения больших коллекторных напряжений, в тех случаях, когда схема с ОЭ не допускает таких значений $U_{вых}$.

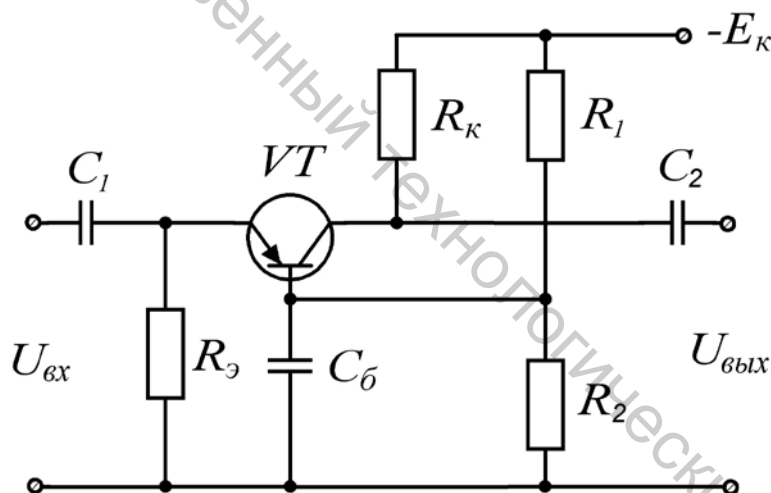


Рисунок 2.1 – Усилительный каскад с ОБ

В данной схеме резисторы R_1 и R_2 служат для создания оптимального тока базы в режиме покоя, обеспечивающего работу каскада на линейном участке входной характеристики. Конденсатор C_6 в полосе пропускания усилителя имеет сопротивление много меньше R_2 , и падение напряжения на нем от переменной составляющей тока мало. Поэтому можно считать, что по переменной составляющей тока база соединена с общей точкой усилительного каскада. Входное напряжение подается между эмиттером и базой через разделительный конденсатор C_1 . Выходное напряжение снимается между коллектором и базой через разделительный конденсатор C_2 . Резистор R_3 служит для прохождения постоянной составляющей тока эмиттера.

Выходные характеристики транзистора в схеме с ОБ более линейны, чем в схеме с ОЭ, поэтому нелинейные искажения в каскаде с ОБ меньше, чем в каскаде с ОЭ.

Входное сопротивление каскада определяется преимущественно сопротивлением эмиттерной области транзистора и составляет десятки Ом (10...50 Ом). Малая величина входного сопротивления каскада является существенным недостатком, так как каскад с ОБ создает большую нагрузку для источника входного сигнала.

Выходное сопротивление каскада с ОБ определяется, как и у каскада с ОЭ, сопротивлением резистора R_k и составляет единицы-десятки кОм.

Коэффициент усиления по току, как правило, меньше единицы, что является другим существенным недостатком каскада с ОБ.

Коэффициент усиления по напряжению каскада с ОБ существенно зависит от сопротивления нагрузки и внутреннего сопротивления источника сигнала. Для получения высокого значения коэффициента усиления по напряжению необходимо, чтобы внутреннее сопротивление источника сигнала имело значения, близкие к нулю, а сопротивление нагрузки было достаточно велико.

Особенностью каскада с ОБ является то, что он не изменяет фазу усиливаемого сигнала. При этом его частотные и переходные характеристики значительно лучше соответствующих характеристик каскада с ОЭ.

Усилительные каскады с ОБ, как правило, используют для работы на повышенных частотах и для усиления импульсных сигналов, где необходима хорошая переходная характеристика каскада.

Усилительный каскад с ОК (рис. 2.2) чаще называют эмиттерным повторителем, так как выходной сигнал совпадает с входным по фазе, а усиления по напряжению не происходит.

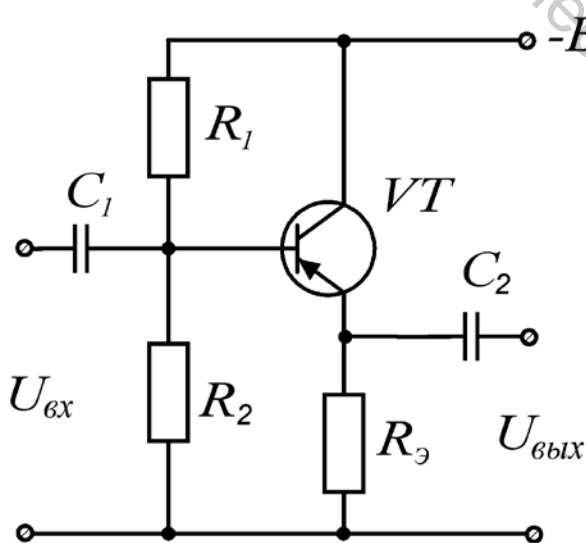


Рисунок 2.2 – Усилительный каскад с ОК

Резистор, с которого снимается выходное напряжение, включен в эмиттерную цепь. Коллектор через очень малое внутреннее сопротивление источника питания соединен с землей, а значит, вывод коллектора является общим для входной и выходной цепей усилителя.

Резисторы R_1 , R_2 и R_3 задают начальный ток смещения транзистора. Его значения выбирают таким, чтобы рабочая точка в режиме покоя находилась примерно посередине линейного участка входной характеристики. Разделительные конденсаторы C_1 и C_2 выполняют те же функции, что и в каскаде с ОБ.

Входное сопротивление каскада с ОК определяется параллельным соединением резисторов R_1 , R_2 и сопротивления входной цепи транзистора. В практических схемах оно достигает 200...300 кОм. Для увеличения входного сопротивления часто не включают резистор R_2 . Высокое входное сопротивление является одним из главных преимуществ каскада с ОК. Это требуется, например, в случае применения каскада в качестве согласующего устройства при работе от источника входного сигнала с большим внутренним сопротивлением.

Выходное сопротивление каскада с ОК представляет собой сопротивление схемы со стороны эмиттера, оно мало (порядка 10...50 Ом) и сильно зависит от внутреннего сопротивления источника сигнала. Малое выходное сопротивление очень важно при использовании каскада в качестве согласующего устройства для работы на низкоомную нагрузку.

Коэффициент усиления по току в каскаде с ОК достаточно большой (10...100), а по напряжению, как правило, чуть меньше единицы, поэтому его часто называют коэффициентом передачи напряжения.

Эмиттерный повторитель обычно применяют для согласования высокоомного источника усиливаемого сигнала с низкоомным нагрузочным устройством. Температурная стабилизация в каскаде с ОК обеспечивается резистором R_3 .

Коэффициенты усиления схем определяют по формулам:

- коэффициент усиления по напряжению $K_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$;
- коэффициент усиления по току $K_I = \frac{I_{вых}}{I_{вх}}$;
- коэффициент усиления по мощности $K_P = K_U \cdot K_I$.

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Произвести моделирование схемы усилительного каскада на БТ с ОБ (рис. 2.3). Вольтметр и амперметры схемы перевести в положение «АС». Изменяя напряжение входного сигнала в соответствии с данными таблицы 2.1, измерить значения напряжения и токов. Данные измерений (показания

измерительных приборов, зафиксированные в момент включения схемы) занести в таблицу 2.1.

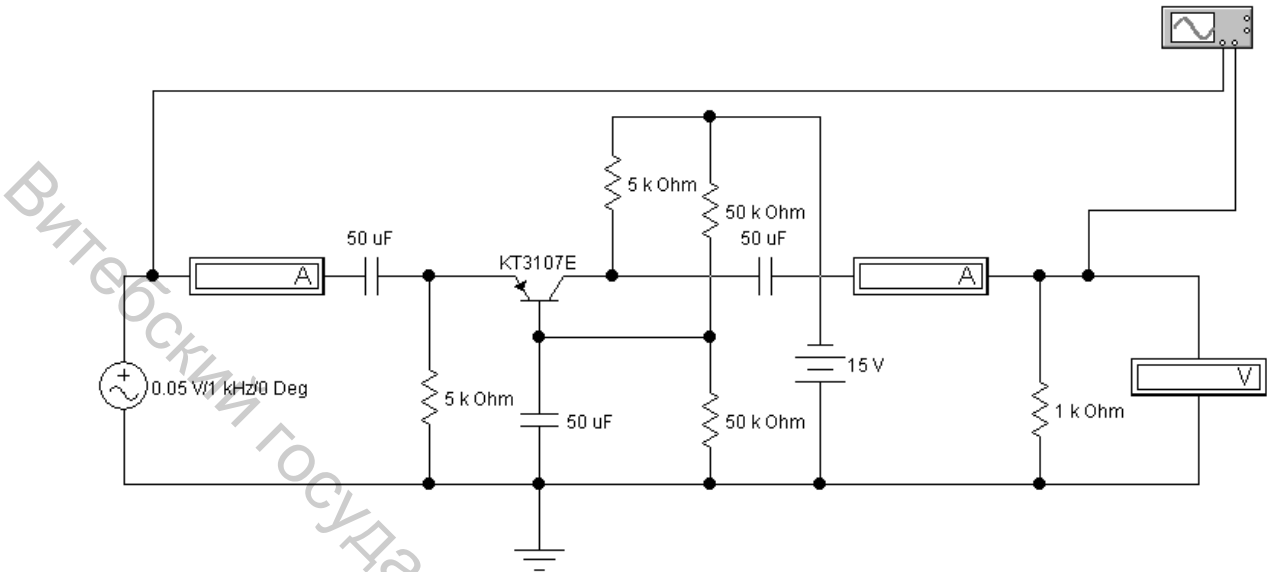


Рисунок 2.3 – Схема моделирования усилительного каскада на БТ с ОБ

Рассчитать значения K_U , K_I , K_P . Данные расчета занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

| | | | | | |
|---------------|------|-----|-----|-----|---|
| $U_{вх}, B$ | 0,05 | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 1 |
| $U_{вых}, B$ | | | | | |
| $I_{вх}, mA$ | | | | | |
| $I_{вых}, mA$ | | | | | |
| K_U | | | | | |
| K_I | | | | | |
| K_P | | | | | |

По полученным данным построить характеристики усилителя $U_{вых}(U_{вх})$ и $I_{вых}(I_{вх})$.

2. Для получения осциллограмм напряжений схемы при отсутствии нелинейных искажений сигнала установить напряжение на входе схемы $0,01 B$ и частоту сигнала $1 кГц$. Настройку осциллографа произвести в соответствии с рисунком 2.4.

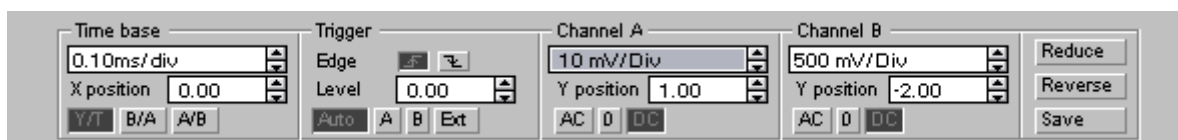


Рисунок 2.4 – Настройки осциллографа

Зарисовать в масштабе осциллограммы напряжений на входе схемы и на нагрузке в соответствии с рисунком 2.5.

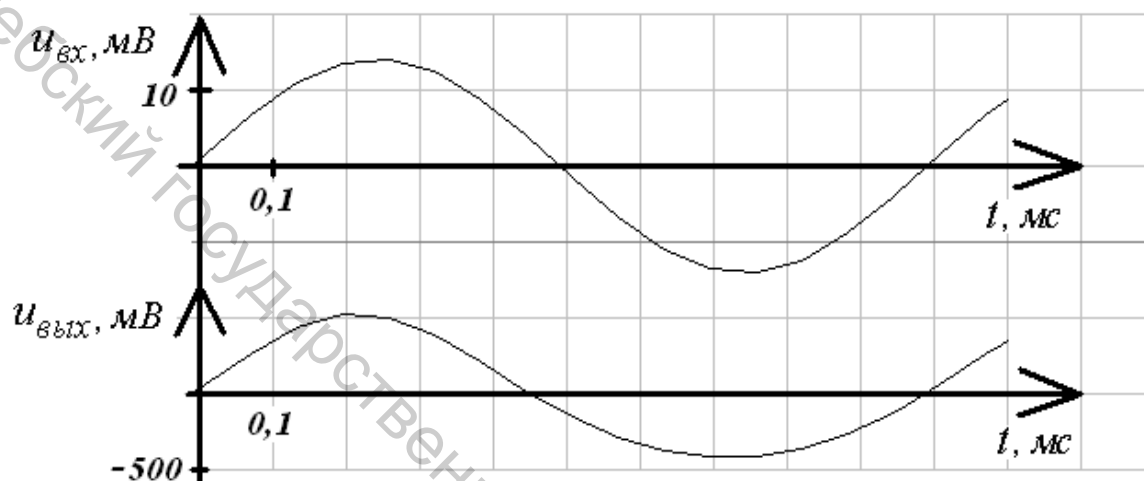


Рисунок 2.5 – Осциллограммы напряжений на входе схемы и на нагрузке

3. Произвести моделирование схемы усилительного каскада на БТ с ОК (рис. 2.6). Вольтметр и амперметры схемы перевести в положение «АС». Изменяя напряжение входного сигнала в соответствии с данными таблицы 2.2, измерить значения напряжения и токов. Данные измерений (показания измерительных приборов, зафиксированные в момент включения схемы) занести в таблицу 2.2.

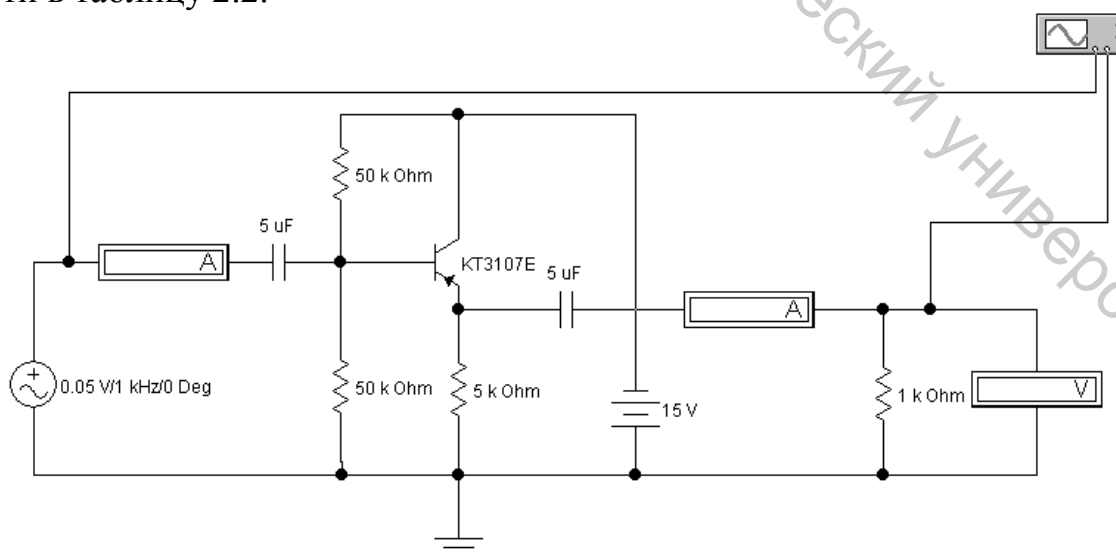


Рисунок 2.6 – Схема моделирования усилительного каскада на БТ с ОК

Рассчитать значения K_U , K_I , K_P . Данные расчета занести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2

| | | | | | |
|----------------|------|-----|-----|-----|---|
| $U_{вх}, В$ | 0,05 | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 1 |
| $U_{вых}, В$ | | | | | |
| $I_{вх}, мкА$ | | | | | |
| $I_{вых}, мкА$ | | | | | |
| K_U | | | | | |
| K_I | | | | | |
| K_P | | | | | |

По полученным данным построить характеристики усилителя $U_{вых}(U_{вх})$ и $I_{вых}(I_{вх})$.

4. Для получения осциллограмм напряжений схемы при отсутствии нелинейных искажений сигнала установить напряжение на входе схемы $0,01 В$ и частоту сигнала $1 кГц$. Настройку осциллографа произвести в соответствии с рисунком 2.7.

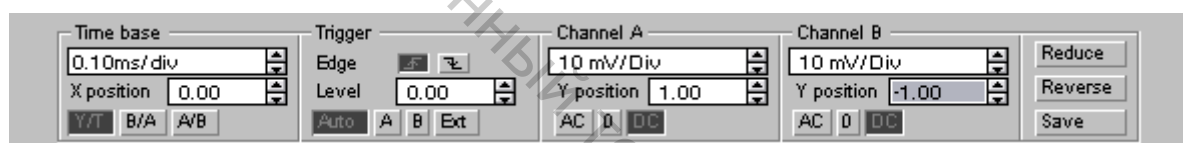


Рисунок 2.7 – Настройки осциллографа

Зарисовать в масштабе осциллограммы напряжений на входе схемы и на нагрузке в соответствии с рисунком 2.8.

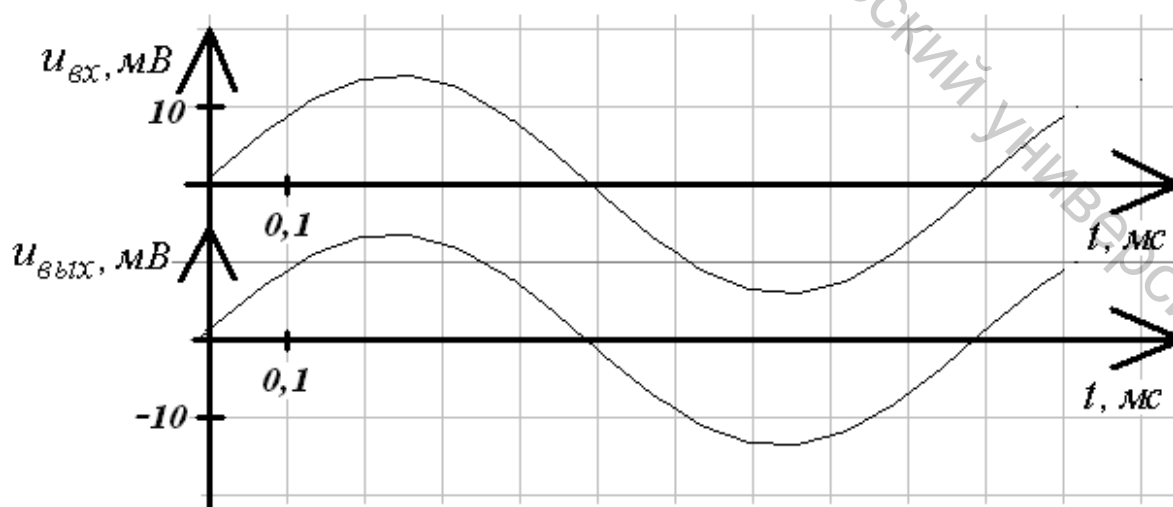


Рисунок 2.8 – Осциллограммы напряжений на входе схемы и на нагрузке

Контрольные вопросы

1. Пояснить три способа включения транзистора в усилительных каскадах.
2. Усилительный каскад с ОБ. Назначение элементов схемы.
3. Основные параметры усилительного каскада с ОБ.
4. Усилительный каскад с ОК. Назначение элементов схемы.
5. Основные параметры усилительного каскада с ОК.

Лабораторная работа 3

Исследование многокаскадных усилителей

Цель работы: изучение принципа действия многокаскадных схем усиления на БТ, экспериментальное исследование фазовых искажений сигнала.

Теоретические сведения

Многокаскадные усилители используются для получения большего коэффициента усиления. Соединение каскадов осуществляется либо только по переменному току (усилители с RC-связью, с трансформаторной связью, со связью через колебательный контур), либо гальванически (усилители с непосредственной связью, в которых с выхода предыдущего каскада на вход следующего подается и переменная, и постоянная составляющие сигнала).

Схема простейшего двухкаскадного усилителя с RC-связью на БТ с ОЭ показана на рисунке 3.1.

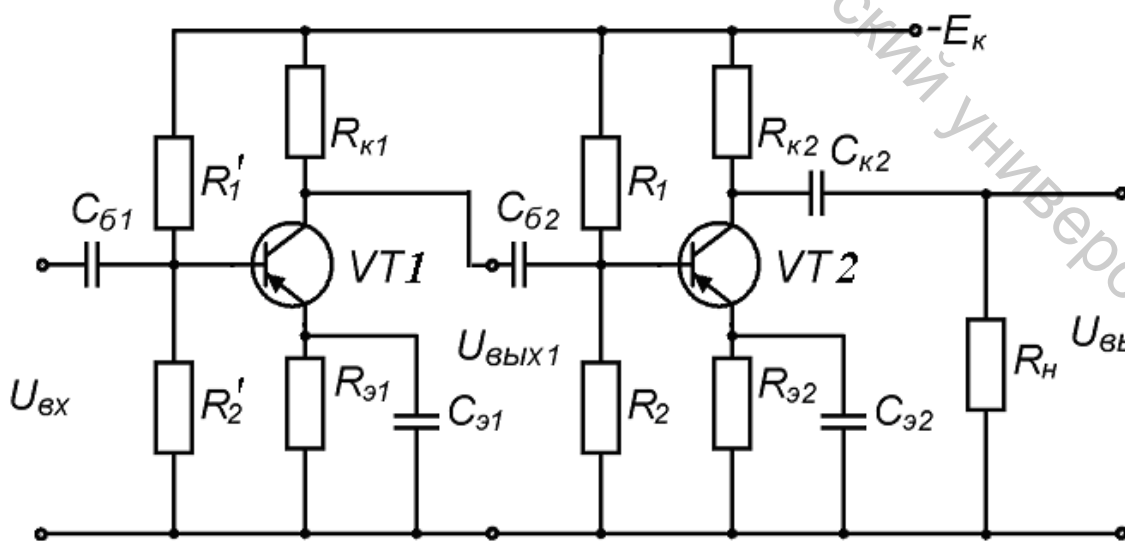


Рисунок 3.1 – Схема двухкаскадного усилителя с RC-связью

Каскады усилителя рассчитывают в последовательности от последующего к предыдущему, определяя по выходным параметрам последующего каскада его входные параметры, которые в свою очередь являются выходными для предыдущего каскада. Однако из-за наличия в таких схемах большого количества реактивных элементов расчет каскадов должен учитывать влияние частоты усиливаемого сигнала на параметры усилителя. Так как параметры конденсаторов и транзисторов зависят от частоты, то при изменении частоты входного сигнала, напряжение на выходе усилителя изменится и по амплитуде и по фазе. Так как разные частоты оказывают различное влияние на параметры элементов усилителя, рассматривают его работу в области средних, низких и высоких частот.

В области средних частот влиянием реактивных элементов схемы можно пренебречь, и поэтому частотные искажения в этой области минимальны.

В области низких частот сопротивление емкостных элементов увеличиваются, что увеличивает на них падение напряжения, а значит, уменьшает напряжение на выходе каскадов, т. е. коэффициент усиления K_U (действие C_p). Также снижение K_U происходит за счет уменьшения шунтирующего действия C_s .

В области высоких частот, когда сопротивление конденсаторов мало, влиянием C_p пренебрегают, но рассматривают шунтирующее действие C_n , а также емкости коллекторного перехода $C_{кэ}$.

Одной из разновидностей линейных искажений в усилителе являются фазовые искажения. Они являются результатом вносимых усилителем фазовых сдвигов между различными частотными компонентами сложного сигнала, вследствие чего искажается его форма.

Фазовые искажения в усилителе оценивают по фазочастотной характеристике (ФЧХ) (рис. 3.2). Эта характеристика представляет собой зависимость фазового сдвига φ выходного напряжения относительно входного напряжения от частоты при действии на входе усилителя синусоидального сигнала. При $\varphi \geq 0$ выходное напряжение опережает входное, при $\varphi \leq 0$ – отстает.

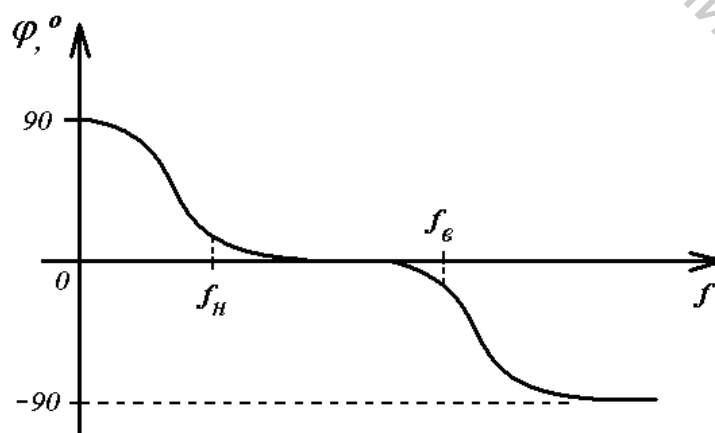


Рисунок 3.2 – ФЧХ усилителя

Часть ФЧХ без искажений формы сигнала представляет собой линейную зависимость фазового сдвига от частоты и находится в диапазоне полосы пропускания ($\Delta f = f_в - f_н$). При линейной ФЧХ все спектральные составляющие входного сигнала смещены на один и тот же интервал времени, что не вызывает искажения формы сигнала. Если ФЧХ нелинейная, то различные спектральные составляющие входного сигнала будут смещены на различные интервалы времени и форма выходного сигнала исказится.

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Произвести моделирование схемы двухкаскадного усилителя с RC-связью на БТ с ОЭ (рис. 3.3). Вольтметры схемы перевести в положение «АС». Изменяя напряжение входного сигнала в соответствии с данными таблицы 3.1, измерить значения напряжения на выходах каскадов. Данные измерений (показания измерительных приборов, зафиксированные в момент включения схемы) занести в таблицу 3.1.

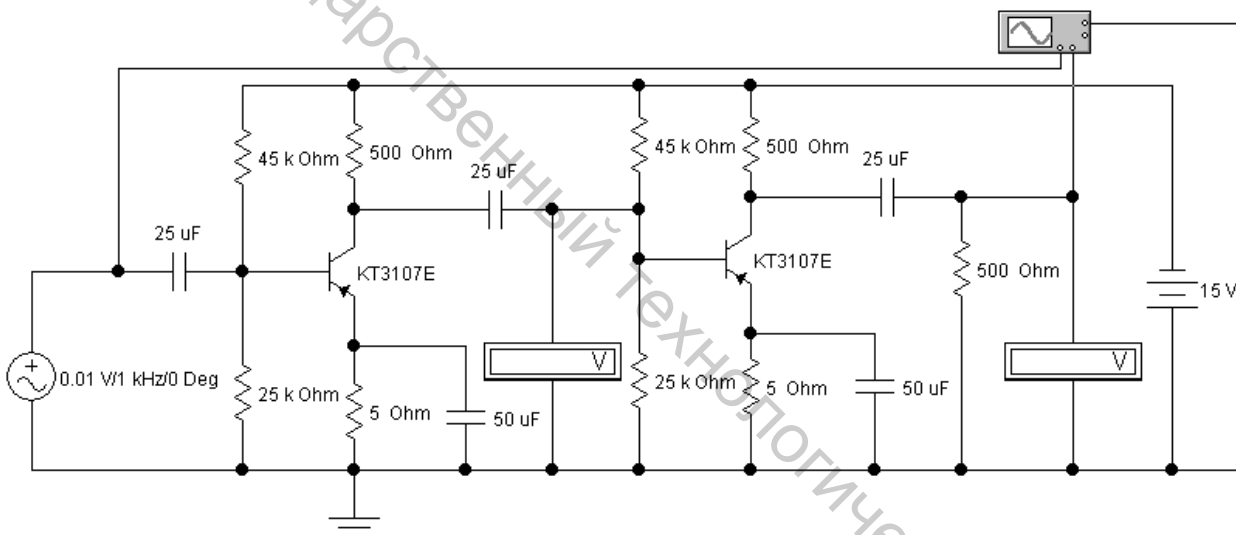


Рисунок 3.3 – Схема для исследования двухкаскадного усилителя с RC-связью

Таблица 3.1

| | | | | | | |
|---------------|------|------|------|-----|-----|-----|
| $U_{вх}, B$ | 0,01 | 0,03 | 0,05 | 0,1 | 0,3 | 0,5 |
| $U_{вых1}, B$ | | | | | | |
| $U_{вых2}, B$ | | | | | | |
| K_{U1} | | | | | | |
| K_{U2} | | | | | | |
| K_U | | | | | | |

Рассчитать коэффициенты усиления каскадов по напряжению с помощью формул:

$$K_{U1} = \frac{U_{\text{вых}1}}{U_{\text{вх}}}, K_{U2} = \frac{U_{\text{вых}2}}{U_{\text{вых}1}}, K_U = K_{U1} \cdot K_{U2}.$$

Данные расчета занести в таблицу 3.1.

По данным таблицы 3.1 построить амплитудную характеристику двухкаскадного усилителя $U_{\text{вых}2}(U_{\text{вх}})$.

3. Для изучения фазовых искажений в двухкаскадном усилителе (изменения фазового сдвига между входным и выходным сигналом) установить напряжение генератора входного сигнала равным $0,0001 \text{ В}$ и зарисовать осциллограммы:

1) входного $u_{\text{вх}}(t)$ и выходного $u_{\text{вых}}(t)$ сигналов двухкаскадного усилителя на низкой частоте (20 Гц) с указанными на рисунке 3.4 масштабами.

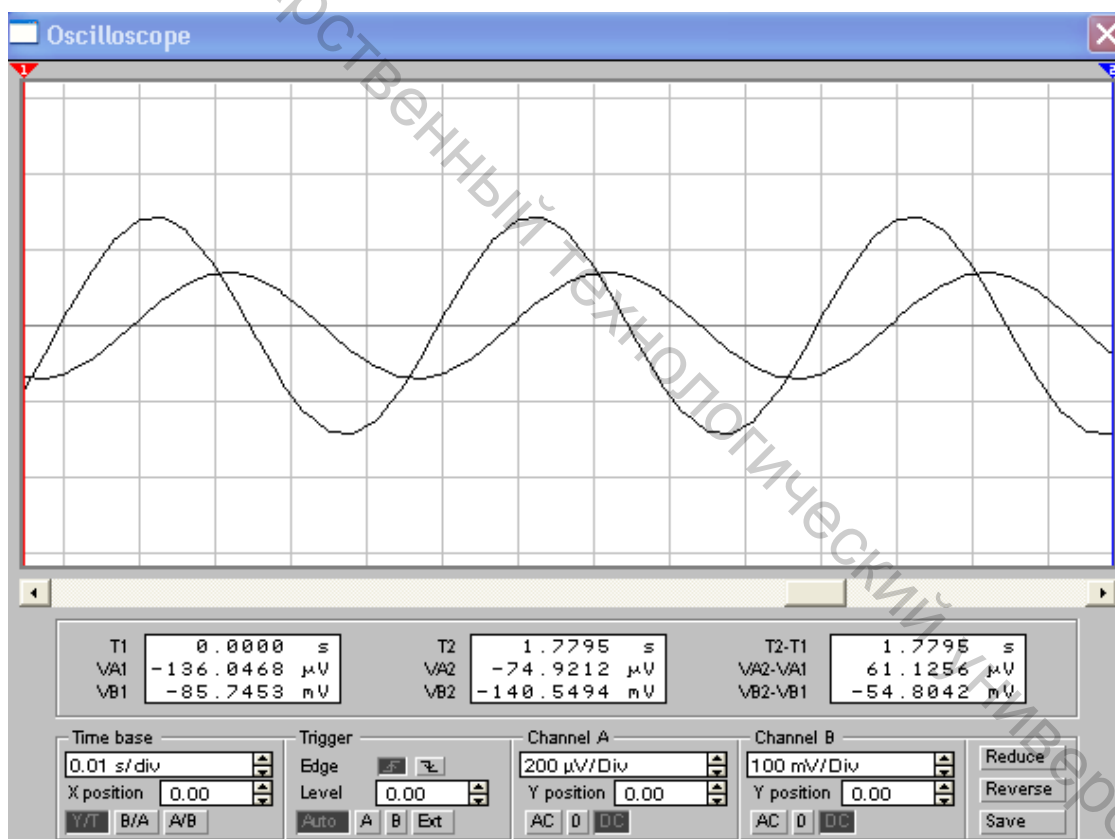


Рисунок 3.4 – Осциллограммы сигналов низкой частоты

Обозначения параметров осциллограмм выполнить в соответствии с рисунком 3.5.

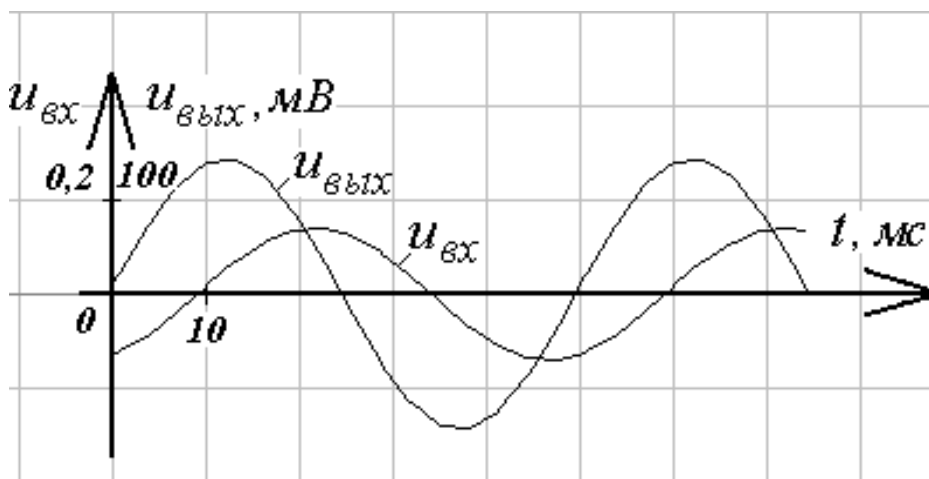


Рисунок 3.5 – Обозначения параметров осциллограмм

2) входного $u_{вх}(t)$ и выходного $u_{вых}(t)$ сигналов двухкаскадного усилителя на средней частоте (20 кГц) с указанными на рисунке 3.6 масштабами.

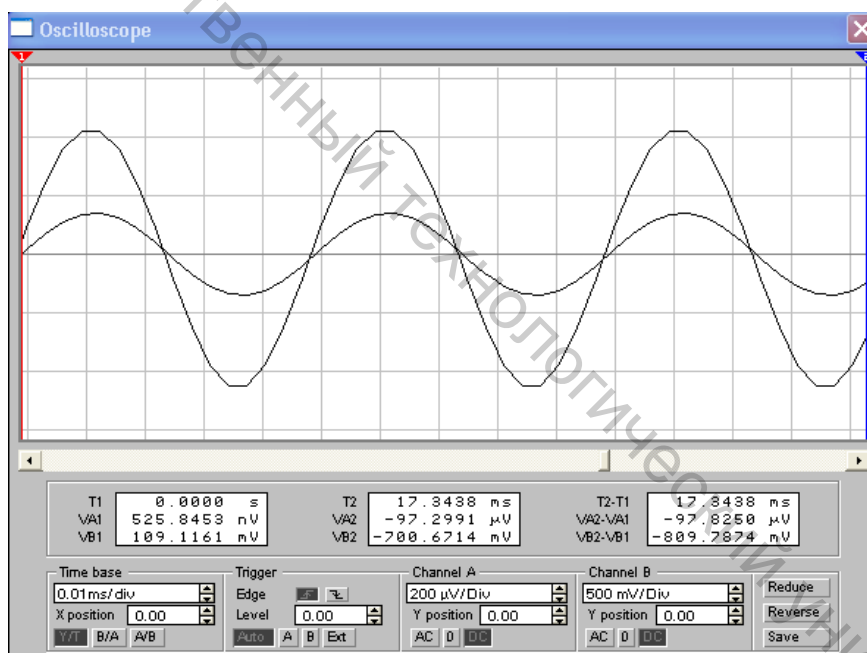


Рисунок 3.6 – Осциллограммы сигналов средней частоты

Обозначения параметров осциллограмм выполнить по аналогии с обозначениями на рисунке 3.5.

3) входного $u_{вх}(t)$ и выходного $u_{вых}(t)$ сигналов двухкаскадного усилителя на высокой частоте (20 МГц) с указанными на рисунке 3.7 масштабами.

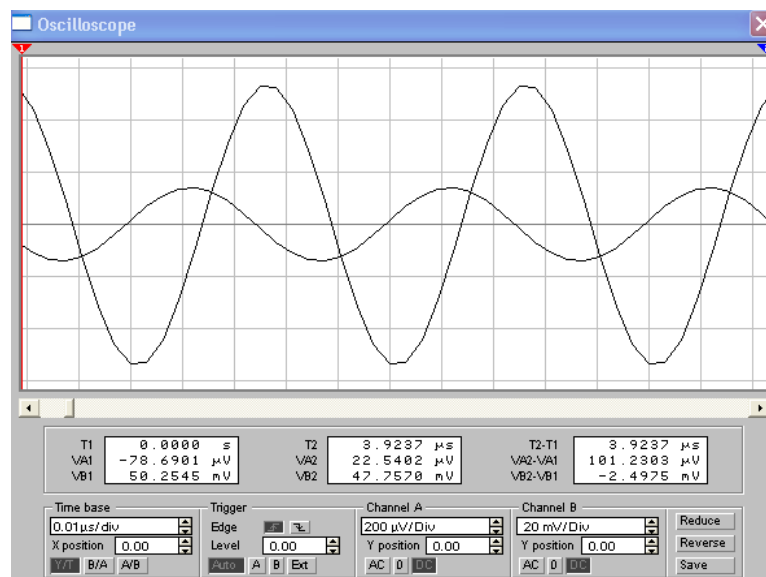


Рисунок 3.7 – Осциллограммы сигналов высокой частоты

Обозначения параметров осциллограмм выполнить по аналогии с обозначениями на рисунке 3.5.

Контрольные вопросы

1. Назначение, устройство, виды и параметры многокаскадных усилителей.
2. Особенности работы многокаскадных усилителей в области низких частот.
3. Особенности работы многокаскадных усилителей в области средних частот.
4. Особенности работы многокаскадных усилителей в области высоких частот.
5. Линейные искажения сигнала в усилителях и способы их устранения.

Лабораторная работа 4

Исследование усилителей мощности

Цель работы: изучение принципа действия усилителей мощности на БТ, анализ влияния параметров составляющих их элементов на амплитудную, амплитудно-частотную и нагрузочную характеристики.

Теоретические сведения

Каскады усиления мощности (выходные каскады) предназначены для обеспечения в нагрузке требуемой мощности выходного сигнала. Так как

мощность обычно велика, они работают в режиме B или AB . Для передачи в нагрузку максимальной мощности необходимо согласование сопротивлений этих каскадов с сопротивлением нагрузки. Для этого используют согласующие трансформаторы или бестрансформаторные интегральные схемы. Выходные каскады выполняются двух типов: однотактные (имеют небольшой КПД и рассчитаны на небольшую мощность) и двухтактные (имеют высокий КПД, большую мощность, но и большие нелинейные искажения).

Схема однотактного каскада с трансформаторной связью представлена на рисунке 4.1.

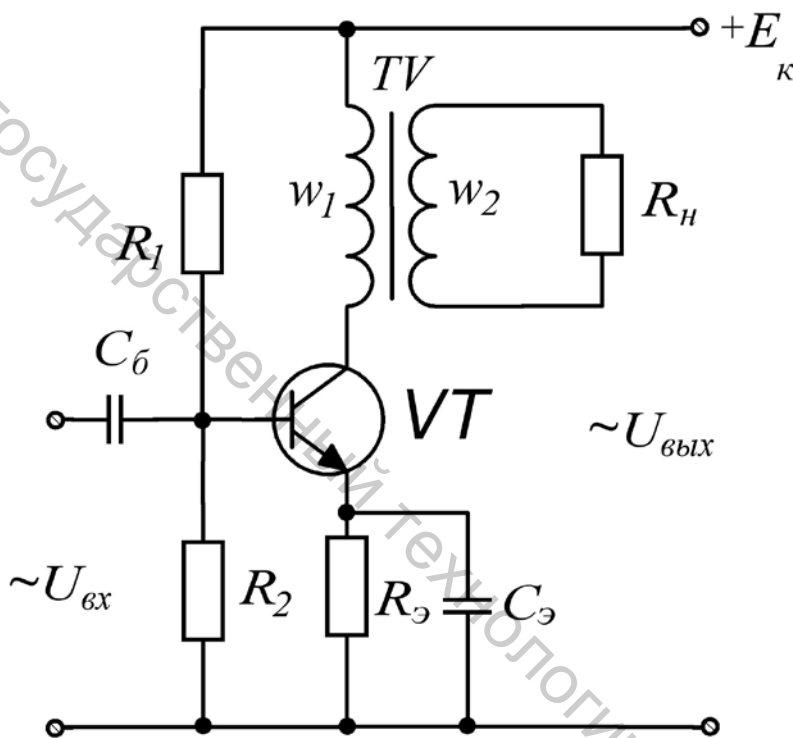


Рисунок 4.1 – Схема однотактного каскада усиления мощности с трансформаторной связью

Режим согласования каскада с нагрузкой обеспечивается, если выходное сопротивление каскада

$$R_{\text{вых}} = k^2 R_H,$$

где $k = \frac{w_1}{w_2}$ – коэффициент трансформации; w_1 и w_2 – количество витков первичной и вторичной обмотки.

Так как обмотки трансформатора – катушки индуктивности, то параметры трансформатора (а значит и усилителя) зависят от частоты сигнала.

Недостатками схемы являются: подмагничивание сердечника трансформатора постоянными составляющими тока усилителя и

чувствительность к внешним магнитным полям, создающим фоновые помехи сигнала.

Схема двухтактного каскада с трансформаторной связью представлена на рисунке 4.2.

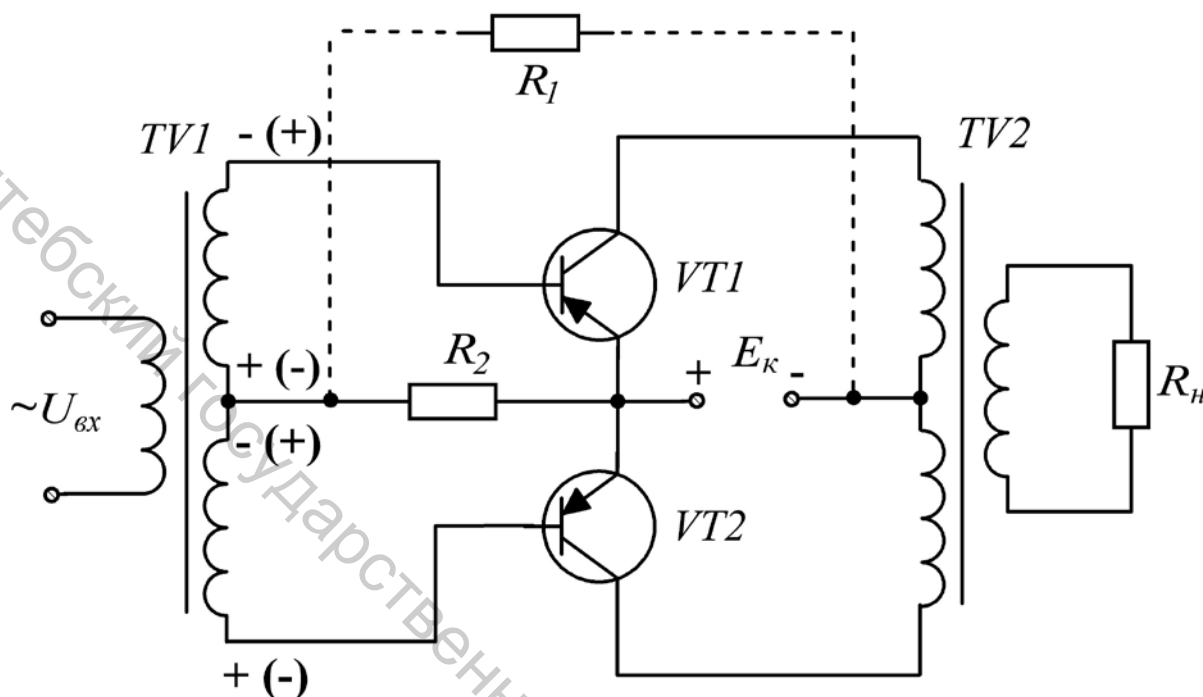


Рисунок 4.2 – Схема двухтактного каскада усиления мощности с трансформаторной связью

Данный каскад может работать в режиме *B* (резистор R_1 отсутствует) или *AB* (R_1 создает начальное смещение). Процесс усиления происходит в два такта. В первом такте (полярность напряжения на рисунке 4.2 показана без скобок) одна полуволна усиливается транзистором $VT1$. Во втором – другая усиливается $VT2$. Значение напряжения на нагрузке будет зависеть от коэффициента трансформации $TV2$.

Достоинства схемы в сравнении с однотактной: обеспечивается большая мощность в нагрузке при вдвое меньшей мощности каждого транзистора; отсутствует подмагничивание сердечника трансформатора; высокий КПД схемы.

Однако использование трансформатора ограничивает полосу пропускания усилителя, делает схему габаритной.

Данные недостатки устраняются в схемах бестрансформаторных каскадов усиления мощности.

Схема бестрансформаторного двухтактного каскада представлена на рисунке 4.3.

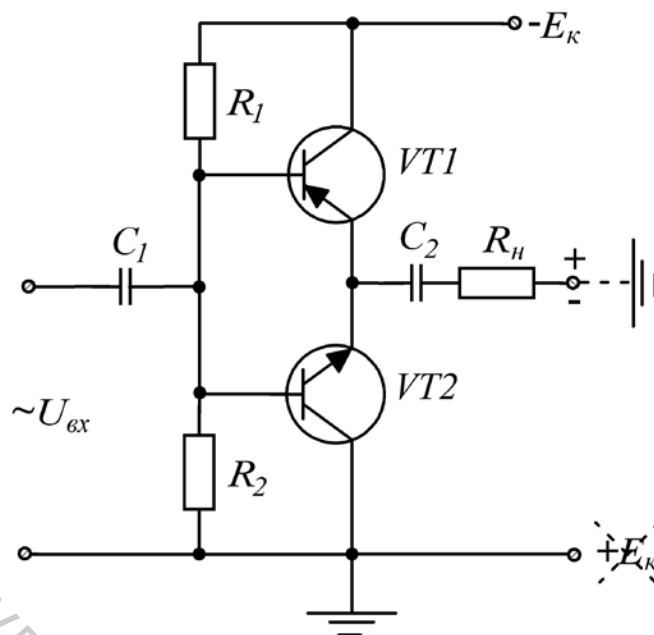


Рисунок 4.3 – Схема бестрансформаторного двухтактного каскада усиления мощности

В схеме могут быть использованы 2 различных или один (----) источник питания. В первом случае ток в нагрузку попеременно протекает от обоих источников, во втором – схема работает следующим образом. В отсутствие входного сигнала C_2 заряжается до $0,5E_k$, в такте работы $VT2$ ток через R_n протекает от энергии конденсатора, в такте работы $VT1$ – от энергии источника, C_2 при этом заряжается.

В данной схеме трудно осуществить согласование $R_{вых}$ и R_n для передачи в нагрузку максимальной мощности, а также необходима большая емкость конденсатора.

$$C > \frac{I}{\omega(R_{вых} + R_n)}.$$

Схема (рис. 4.3) работает в режиме B с присущими ему нелинейными искажениями. При усилении напряжения синусоидальной формы в местах изменения его полярности появляются небольшие горизонтальные участки, образующие как бы ступеньку между положительным и отрицательным полупериодами результирующего напряжения. Поэтому такие искажения получили название искажений типа «ступеньки».

Для их устранения транзисторы необходимо приоткрыть в состоянии покоя (перевести в режим AB). Это достигается включением между базами резистора или диода, обеспечивающего требуемое, как правило, небольшое ($\geq 0,6 B$) напряжение смещения. Иногда в цепь базы $VT1$ включают не один, а несколько последовательно соединенных диодов для создания требуемого напряжения смещения (рис. 4.4). Использование диодов повышает

температурную стабильность каскадов. Для расширения динамического диапазона усилителя R_1 и R_2 должны быть малы, но это уменьшает входное сопротивление каскада, поэтому вместо них иногда используется источник постоянного тока с большим внутренним сопротивлением.

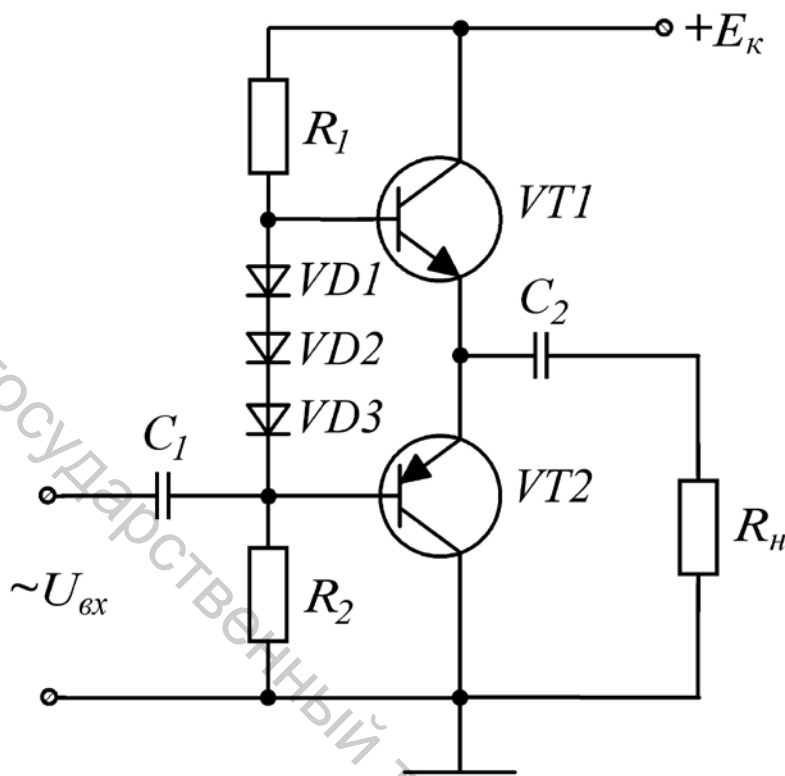


Рисунок 4.4 – Схема бестрансформаторного двухтактного каскада усиления мощности с диодами в базовых цепях

Так как транзисторы в схеме разных типов, то и параметры их различаются. Для устранения этого недостатка используют «пары» транзисторов с одинаковыми параметрами, но разной электропроводностью (например, ГТ402 и ГТ404) – комплементарные транзисторы, а для увеличения мощности каскада используют составные транзисторы.

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Произвести моделирование схемы однотактного каскада усиления мощности с трансформаторной связью (рис. 4.5). Вольтметр схемы перевести в положение «АС». Изменяя напряжение входного сигнала в соответствии с данными таблицы 3.1, измерить значения напряжения на выходе. Данные измерений (показания, зафиксированные в момент включения схемы) занести в таблицу 4.1.

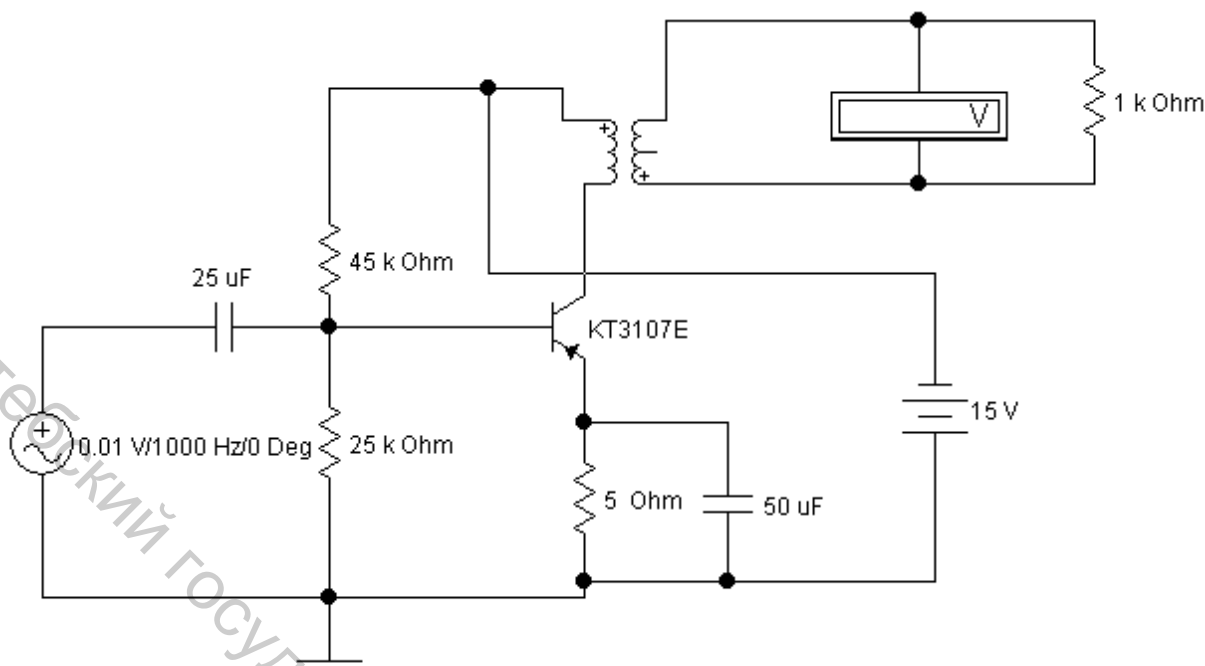


Рисунок 4.5 – Схема для исследования однотактного каскада усиления мощности с трансформаторной связью

Таблица 4.1

| | | | | | | | | |
|---------------------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| $U_{\text{вх}}, B$ | 0,01 | 0,03 | 0,05 | 0,07 | 0,1 | 0,5 | 1,0 | 3,0 |
| $U_{\text{вых}}, B$ | | | | | | | | |

По данным таблицы 4.1 построить амплитудную характеристику однотактного каскада усиления мощности с трансформаторной связью $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$.

2. Для снятия амплитудно-частотной характеристики однотактного каскада усиления мощности с трансформаторной связью установить напряжение генератора входного сигнала равным $0,03 B$. Изменяя частоту генератора от $20 Гц$ до $200 кГц$, измерить выходное напряжение каскада. В таблицу 4.2 занести установившиеся значения показаний вольтметра.

Рассчитать коэффициент усиления схемы по напряжению K_U с помощью формулы $K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вых}}}{0,03}$. Данные расчета занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2

| f | 20 Гц | 50 Гц | 100 Гц | 500 Гц | 1 кГц | 5 кГц | 10 кГц | 50 кГц | 100 кГц | 150 кГц | 200 кГц |
|--------------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| (lgf) | | | | | | | | | | | |
| $U_{вых}, B$ | | | | | | | | | | | |
| K_U | | | | | | | | | | | |

По данным таблицы 4.2 построить амплитудно-частотную характеристику однотактного каскада усиления мощности с трансформаторной связью $K_U(lgf)$.

3. Произвести моделирование схемы бестрансформаторного двухтактного каскада усиления мощности (рис. 4.6).

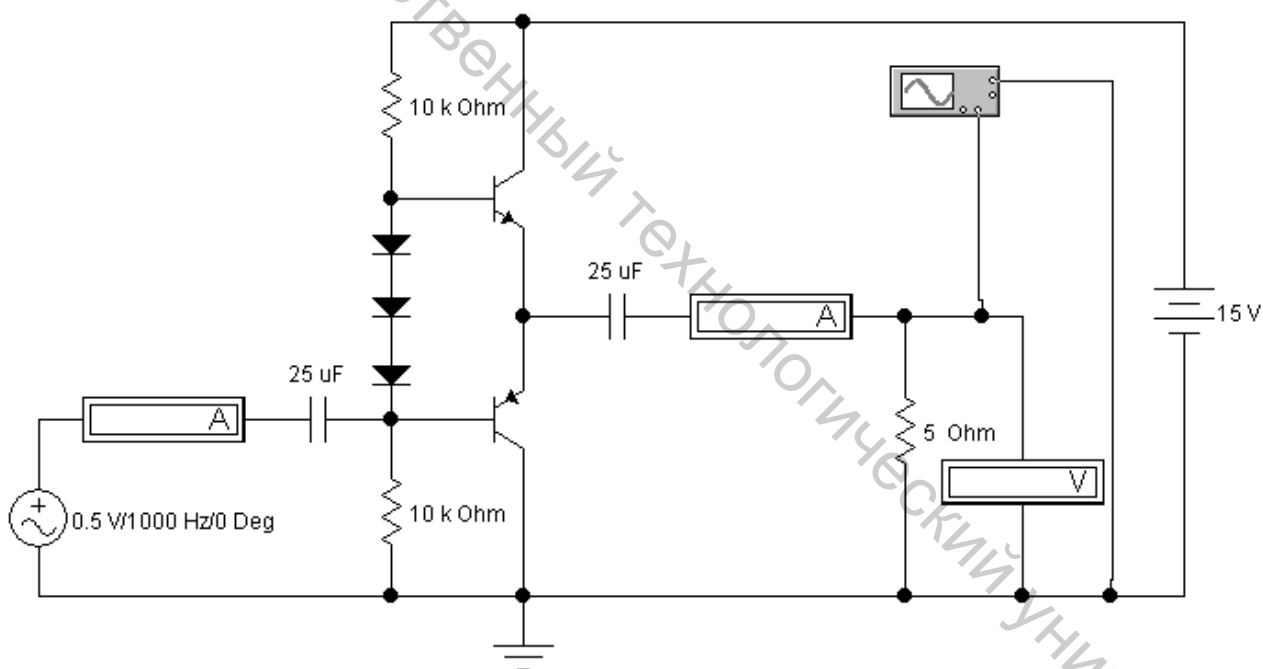


Рисунок 4.6 – Схема для исследования бестрансформаторного двухтактного каскада усиления мощности

Изменяя сопротивление нагрузки от 5 до 30 Ом, измерить значения $I_{вых}$, $U_{н}$, $I_{н}$ и занести их в таблицу 4.3.

Таблица 4.3

| | | | | | | |
|----------------------|---|----|----|----|----|----|
| $R_n, \text{Ом}$ | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| $I_{ex}, \text{мА}$ | | | | | | |
| $U_n, \text{В}$ | | | | | | |
| $I_n, \text{мА}$ | | | | | | |
| $P_{ex}, \text{мВт}$ | | | | | | |
| $P_n, \text{мВт}$ | | | | | | |
| K_P | | | | | | |

Произвести расчет энергетических параметров каскада с помощью формул:

$$P_{ex} = U_{ex} \cdot I_{ex}; \quad P_n = U_n \cdot I_n; \quad K_P = \frac{P_n}{P_{ex}},$$

где $U_{ex} = 0,5 \text{ В}$.

Данные расчета занести в таблицу 4.3.

По данным таблицы 4.3 построить нагрузочную характеристику бестрансформаторного двухтактного каскада усиления мощности $P_n(R_n)$.

4. Для изучения нелинейных искажений типа «ступенька» в схеме бестрансформаторного двухтактного каскада усиления мощности (рис. 4.6) установить сопротивление нагрузки равным 30 Ом и зарисовать осциллограммы:

– выходного неискаженного $u_{n(cVD)}(t)$ сигнала с указанными на рисунке 4.7 масштабами;

– выходного искаженного $u_{n(безVD)}(t)$ сигнала (удалив из схемы один из диодов базовых цепей транзисторов) с указанными на рисунке 4.8 масштабами.

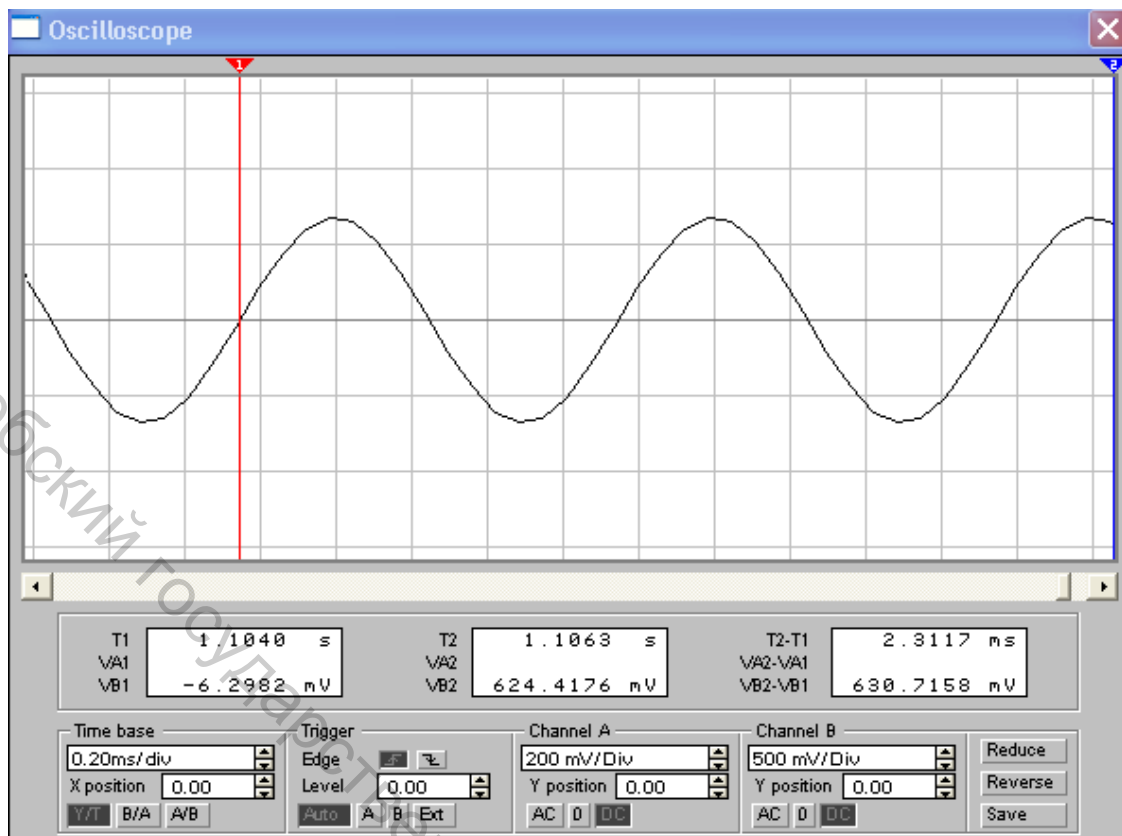


Рисунок 4.7 – Осциллограмма выходного неискаженного сигнала

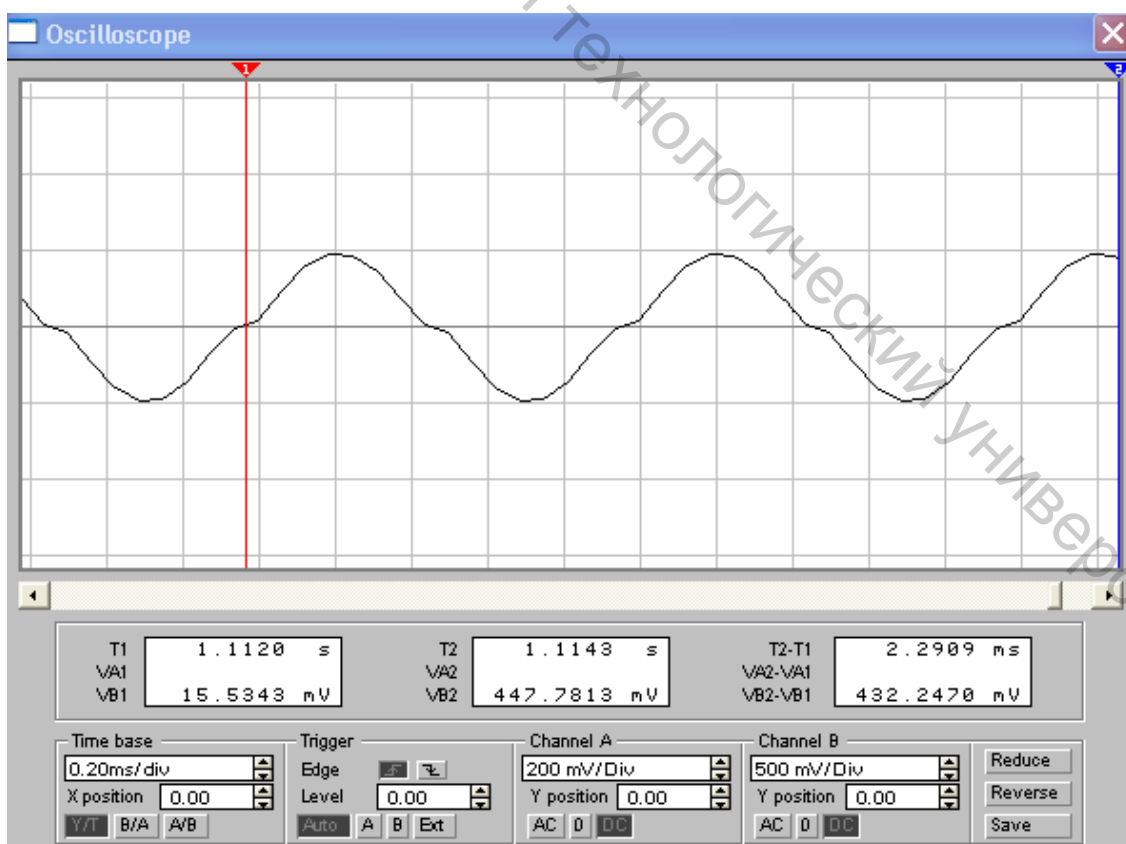


Рисунок 4.8 – Осциллограмма выходного искаженного сигнала

Контрольные вопросы

1. Назначение, устройство и принцип действия однотактного и двухтактного каскадов усиления мощности с трансформаторной связью.
2. Назначение, устройство и принцип действия бестрансформаторного двухтактного каскада усиления мощности.
3. Нелинейные искажения сигнала в бестрансформаторном двухтактном каскаде усиления мощности и способы их устранения.
4. Амплитудная, амплитудно-частотная и нагрузочная характеристики усилителей мощности и способы их получения.

Лабораторная работа 5

Исследование дифференциального усилителя

Цель работы: изучение принципа действия дифференциального усилителя на БТ, экспериментальное исследование параметров режимов его работы.

Теоретические сведения

Для средств автоматики и контроля современных производств разработано большое количество датчиков, позволяющих контролировать параметры технологических процессов. При современных требованиях к данным параметрам выходной сигнала датчиков находится в пределах 0...20 мА, при этом колебания выходного сигнала иногда соизмеримы с колебаниями источников питания (десятки мкА). Поэтому применение обычных аналоговых усилителей неэффективно. Выходом из ситуации является использование усилителей, выполненных по балансно-разностным схемам, основанным на электрических мостах с симметричными плечами.

Одним из таких усилителей является дифференциальный усилитель (ДУ) – электронный прибор, имеющий два входа и усиливающий разность напряжений, приложенных к ним. Простейшая схема транзисторного ДУ (рис. 5.1) представляет собой уравновешенный мост, два плеча которого – резисторы $R_{к1}$ и $R_{к2}$, два других плеча – транзисторы $VT1$ и $VT2$.

ДУ может иметь как симметричный, так и несимметричный вход. При симметричном входе входные сигналы подаются на базы обоих транзисторов. При несимметричном входе входной сигнал подается на базу одного из транзисторов относительно общей точки схемы, при этом база другого транзистора соединяется с общей точкой схемы.

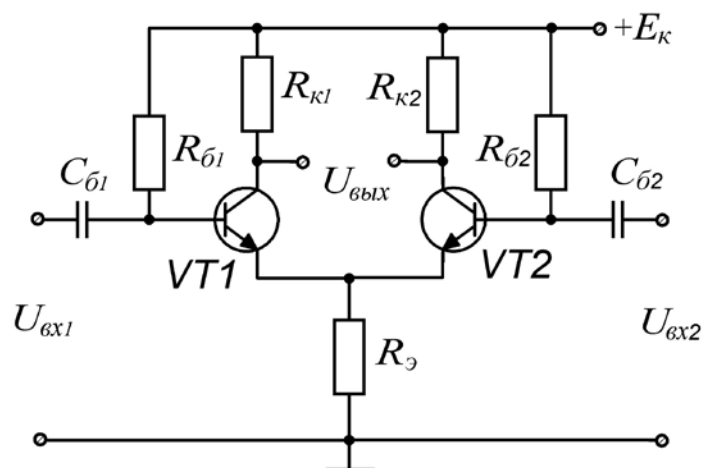


Рисунок 5.1 – Схема простейшего транзисторного ДУ

Выход ДУ также может быть симметричным или несимметричным. В первом случае выходное напряжение снимается между коллекторами транзисторов, во втором – между одним из коллекторов и общей точкой схемы.

Рассмотрим принцип действия схемы ДУ. В случае воздействия сигнала напряжения на один или оба входа схемы происходит изменение внутреннего сопротивления одного или обоих транзисторов, разбалансировка моста и изменение выходного напряжения.

Например, при подаче $+U_{вх1}$ $VT1$ прикрывается, а $\varphi_{э1}$ становится более положительным. Так как эмиттеры транзисторов связаны, $\varphi_{э2}$ также становится более положительным, а значит, увеличивается $I_{к2}$ и $\varphi_{к2}$. Приходящий на базу $VT2$ сигнал $U_{вх2}$, таким образом, либо прикрывает $VT2$ ($+U_{вх2}$), либо еще больше открывает его ($-U_{вх2}$).

Если принять равными коэффициенты усиления обеих частей ДУ: $K_1 = K_2 = K$, то

$$U_{вых} = K_1 U_{вх1} - K_2 U_{вх2} = K(U_{вх1} - U_{вх2}).$$

В общем случае:

$$U_{вых} = K_{уд}(U_{вх1} - U_{вх2}) + K_{исф} \frac{(U_{вх1} + U_{вх2})}{2},$$

где $K_{уд}$ – коэффициент усиления дифференциального сигнала (при больших

$R_э$: $K_{уд} = \frac{\beta R_к}{R_{ген} + 2R_{э0э}}$); $K_{исф}$ – коэффициент усиления синфазного сигнала

(для одного из выходов ДУ его можно определить: $K_{исф} = \frac{R_к}{2R_э}$).

Дифференциальными называют сигналы на входах ДУ одинаковой амплитуды, но противоположные по фазе. Таким образом, поданный на вход ДУ дифференциальный (полезный) сигнал вызывает появление усиленного сигнала на выходе.

Синфазные сигналы – это сигналы на входах ДУ, имеющие одинаковую амплитуду и фазу. Так как в большинстве случаев синфазный сигнал – помехи и наводки, действующие на входах ДУ, то $K_{усф}$ стремятся уменьшить. В полностью симметричном ДУ $K_{усф} = 0$, но в реальных ДУ его приходится учитывать.

Уменьшить $K_{усф}$ можно увеличив $R_{э}$, но так как при этом необходимо увеличить ЭДС источника питания схемы для обеспечения требуемого режима покоя транзисторов, а на $R_{э}$ рассеивается большая мощность, то часто $R_{э}$ заменяется источником постоянного тока. Схема такого ДУ:

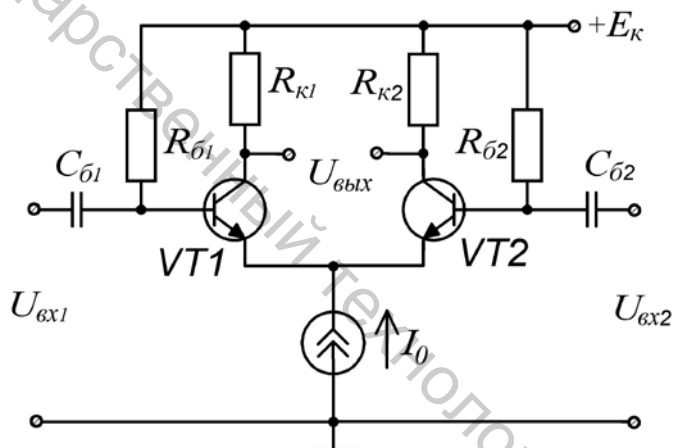


Рисунок 5.2 – Схема ДУ с источником постоянного тока

ДУ обычно применяют для усиления малых дифференциальных сигналов на фоне больших синфазных помех, поэтому качество усиления оценивают по коэффициенту подавления синфазного сигнала:

$$K_{нод} = \frac{K_{уд}}{K_{усф}}.$$

Усиление считается оптимальным, если $K_{нод} \geq 10^4 \dots 10^6$. Большие значения $K_{нод}$ имеет в схемах с симметричным выходом.

Так как в основе работы ДУ лежит идеальная симметричность его плеч, практически выполнить это возможно только в микроэлектронном исполнении – в интегральных микросхемах.

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Для исследования ДУ при противофазном (дифференциальном) сигнале на симметричном входе собрать в программе Electronics Workbench схему (рис. 5.3), установив фазу сигнала источника $G1$ равной 180° . Вольтметр схемы перевести в положение «АС».

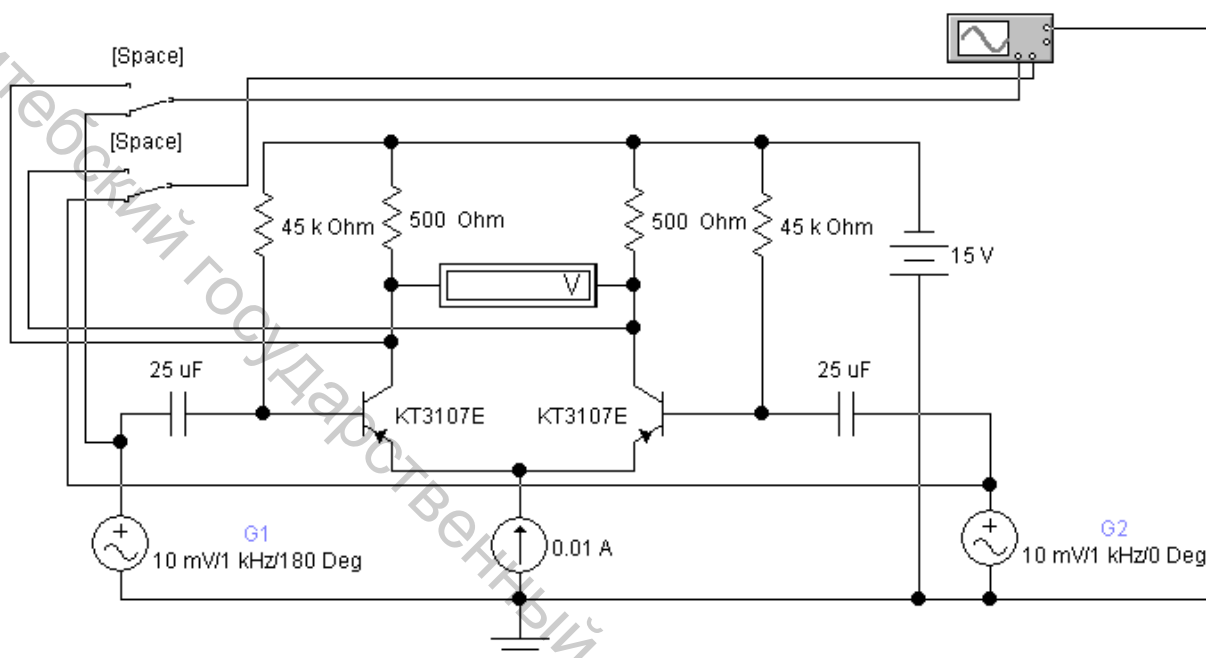


Рисунок 5.3 – Схема для исследования ДУ при противофазном сигнале

Включив схему, вольтметром измерить напряжение на выходе. Данное измерение, а также параметры сигналов на входах схемы занести в таблицу 5.1.

Таблица 5.1

| $U_{вх1}, B$ | $U_{вх2}, B$ | $f_1, кГц$ | $f_2, кГц$ | $\varphi_1, ^\circ$ | $\varphi_2, ^\circ$ | $U_{вых}, B$ | $K_{уд}$ |
|--------------|--------------|------------|------------|---------------------|---------------------|--------------|----------|
| | | | | | | | |

Рассчитать коэффициент усиления дифференциального сигнала по формуле $K_{уд} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{U_{вых}}{0,01}$. Данные расчета занести в таблицу 5.1.

Зарисовать осциллограммы напряжений на входах и выходах транзисторных каскадов ДУ. Переключение каналов осциллографа между входами и выходами осуществляется клавишей «Пробел».

Для получения осциллограмм на входах транзисторных каскадов ДУ настройки осциллографа произвести в соответствии с рисунком 5.4.

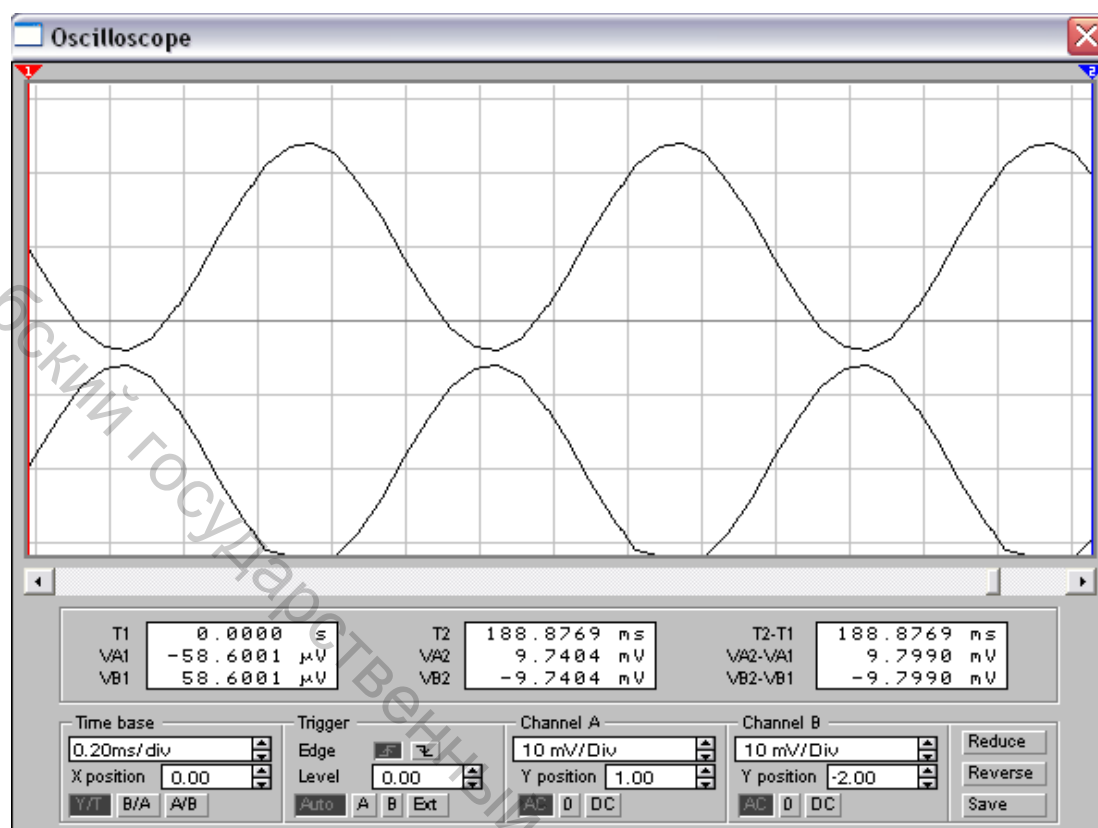


Рисунок 5.4 – Настройки осциллографа

Осциллограммы изобразить в соответствии с указанными на рисунке 5.5 масштабами.

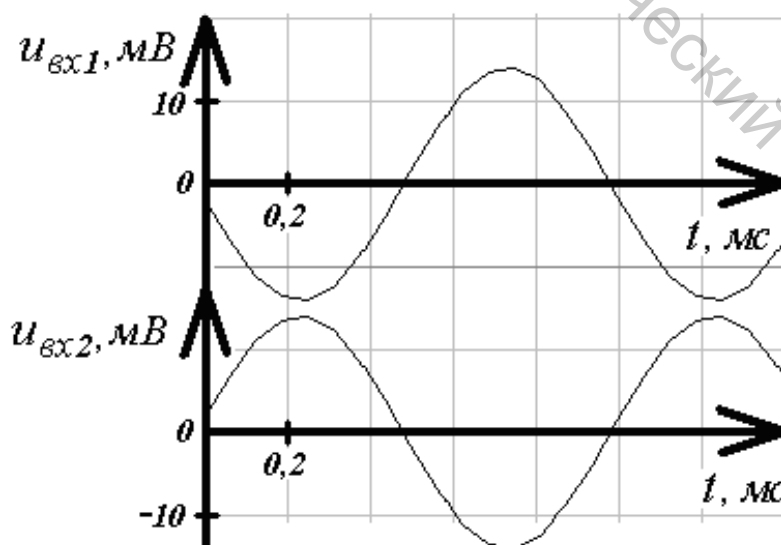


Рисунок 5.5 – Осциллограммы напряжений на входах транзисторных каскадов ДУ

Для получения осциллограмм на выходах транзисторных каскадов ДУ настройки осциллографа произвести в соответствии с рисунком 5.6.

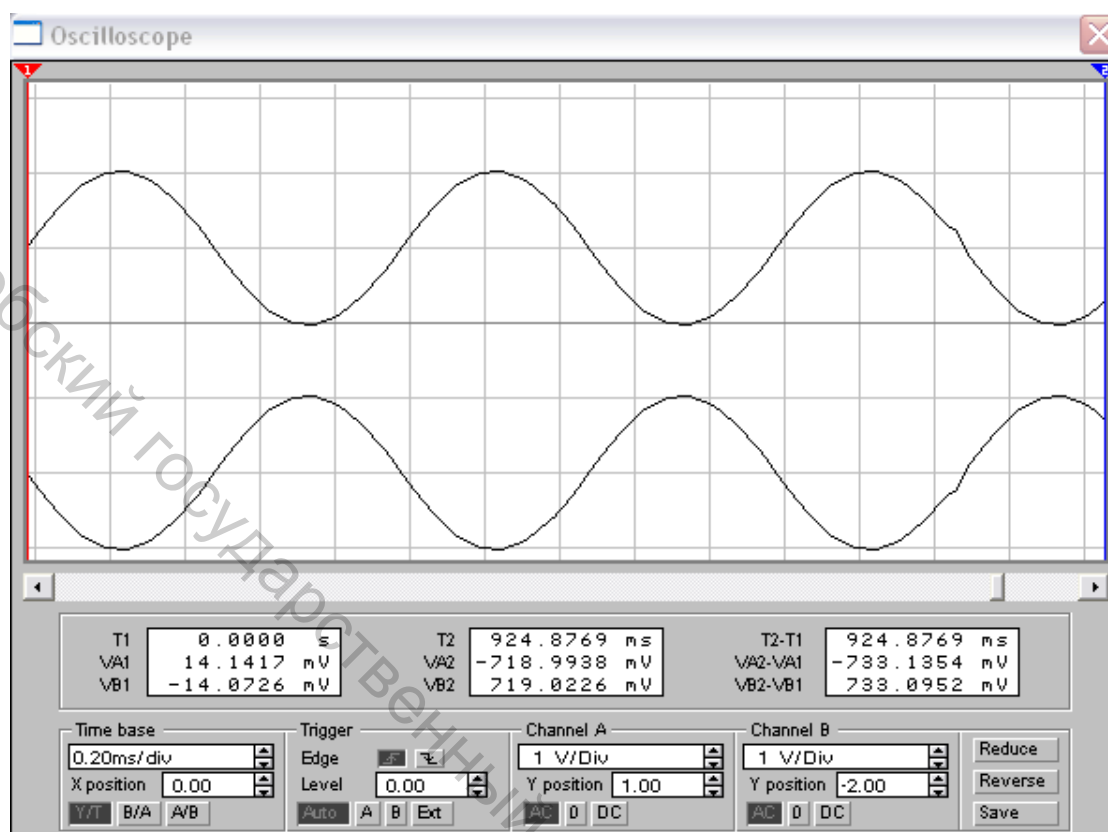


Рисунок 5.6 – Настройки осциллографа

Осциллограммы изобразить в соответствии с указанными на рисунке 5.7 масштабами.

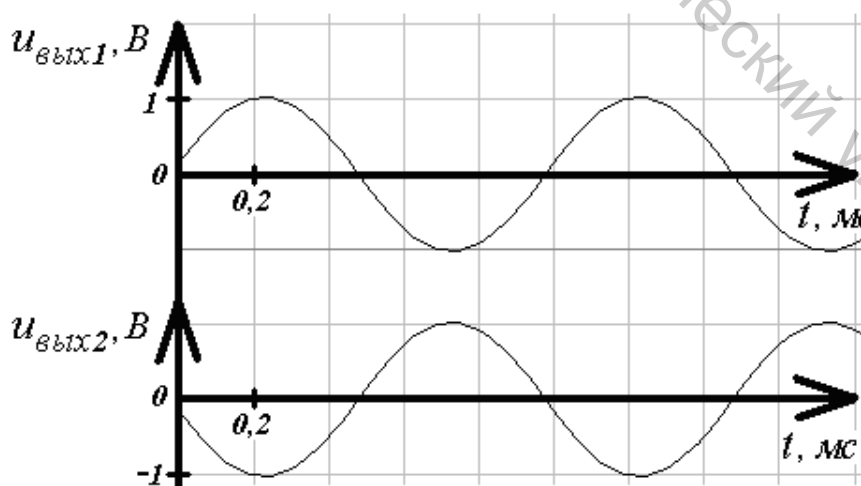


Рисунок 5.7 – Осциллограммы напряжений на выходах транзисторных каскадов ДУ

2. Для исследования ДУ при синфазном сигнале на симметричном входе собрать в программе Electronics Workbench схему (рис. 5.8), установив фазу сигнала источника $G1$ равной 0° . Вольтметр схемы перевести в положение «АС».

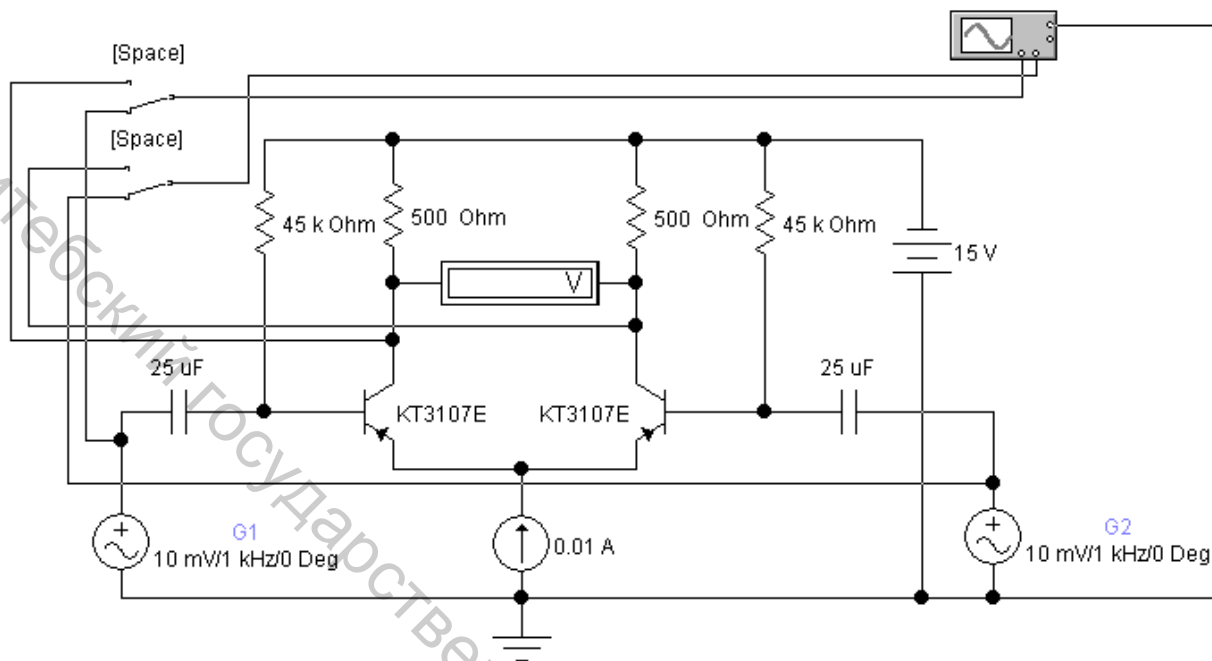


Рисунок 5.8 – Схема для исследования ДУ при синфазном сигнале

Включив схему, вольтметром измерить напряжение на выходе. Данное измерение, а также параметры сигналов на входах схемы занести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2

| $U_{вх1}, B$ | $U_{вх2}, B$ | $f_1, кГц$ | $f_2, кГц$ | $\varphi_1, ^\circ$ | $\varphi_2, ^\circ$ | $U_{вых}, B$ | $K_{исф}$ |
|--------------|--------------|------------|------------|---------------------|---------------------|--------------|-----------|
| | | | | | | | |

Рассчитать коэффициент усиления синфазного сигнала по формуле

$$K_{исф} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{U_{вых}}{0,01}.$$

Данные расчета занести в таблицу 5.2.

Зарисовать осциллограммы напряжений на входах и выходах транзисторных каскадов дифференциального усилителя. Переключение каналов осциллографа между входами и выходами осуществляется клавишей «Пробел».

Для получения осциллограмм на входах транзисторных каскадов

дифференциального усилителя настройки осциллографа произвести в соответствии с рисунком 5.9.

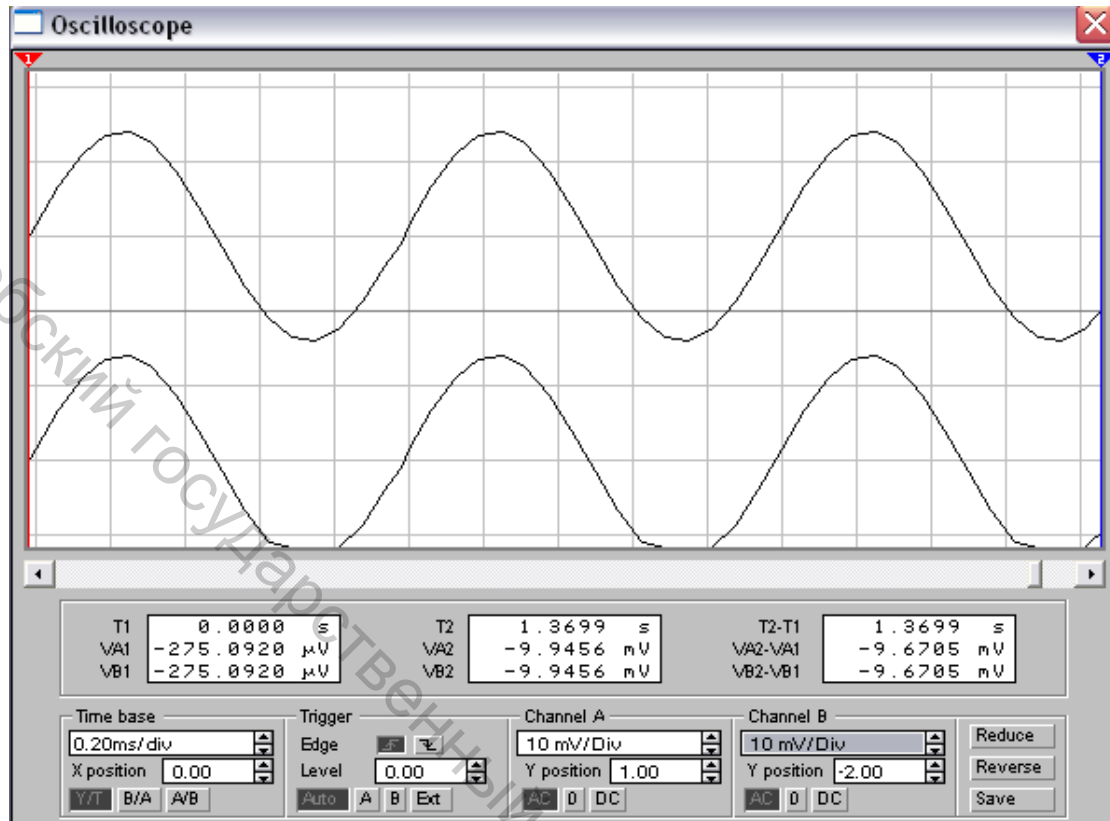


Рисунок 5.9 – Настройки осциллографа

Осциллограммы изобразить в соответствии с указанными на рисунке 5.10 масштабами.

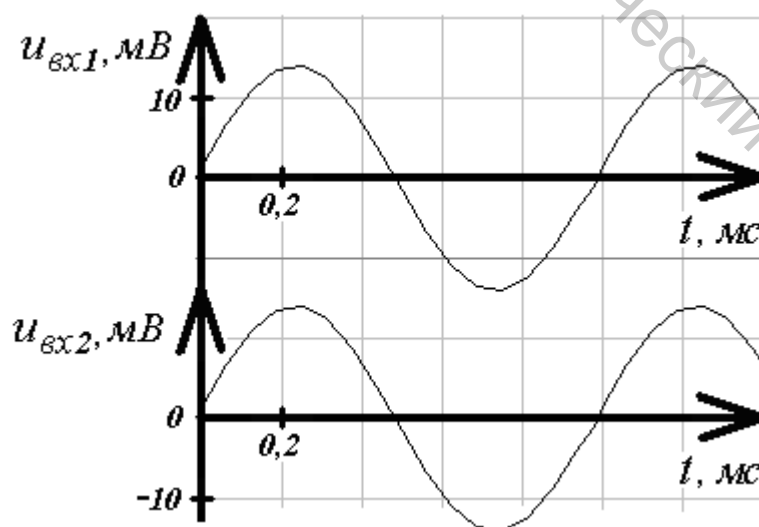


Рисунок 5.10 – Осциллограммы напряжений на входах транзисторных каскадов ДУ

Для получения осциллограмм на выходах транзисторных каскадов ДУ настройки осциллографа оставить такими же, как на рисунке 5.9.

Осциллограммы изобразить в соответствии с указанными на рисунке 5.11 масштабами.

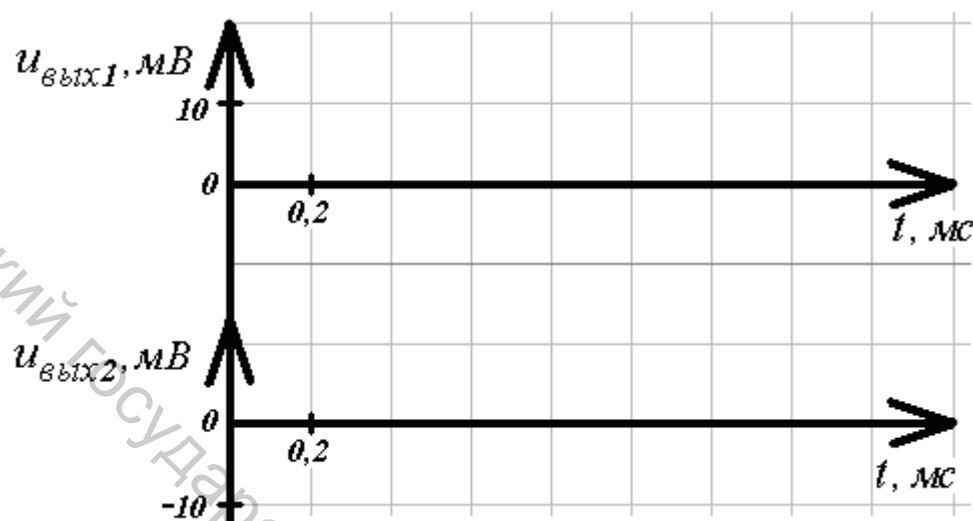


Рисунок 5.11 – Осциллограммы напряжений на выходах транзисторных каскадов ДУ

3. Для исследования ДУ с несимметричным входом собрать в программе Electronics Workbench схему (рис. 5.12), установив фазу сигнала источника $G1$ равной 0° . Вольтметр схемы перевести в положение «АС».

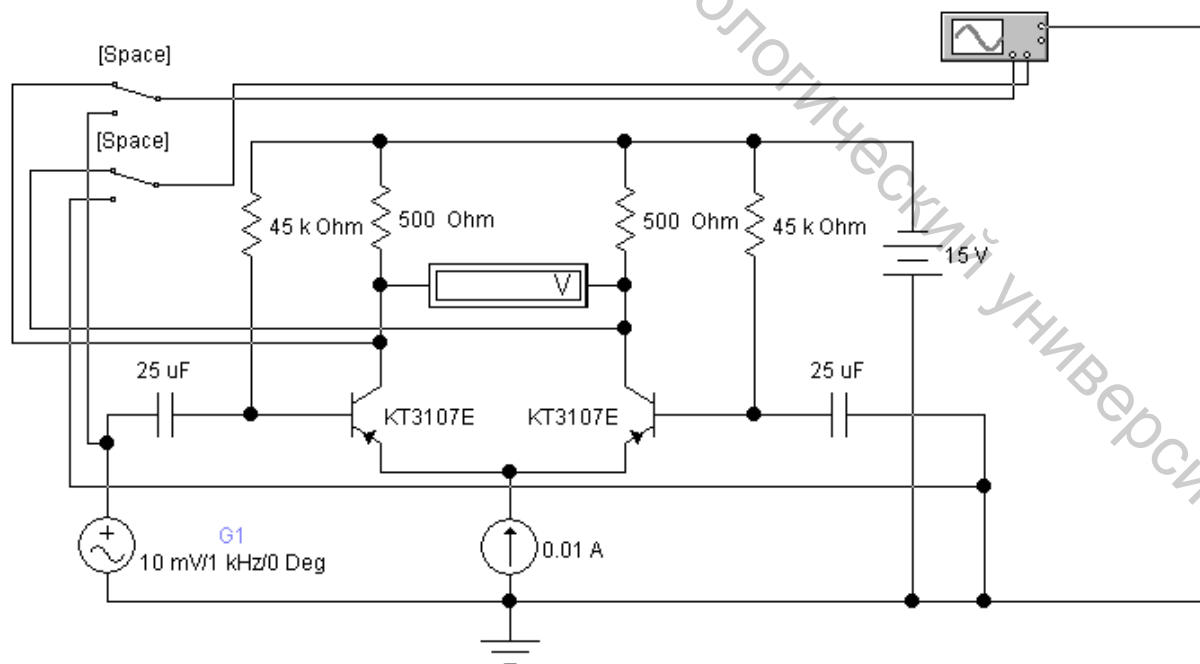


Рисунок 5.12 – Схема для исследования ДУ с несимметричным входом

Включив схему, вольтметром измерить напряжение на выходе. Данное измерение, а также параметры сигналов на входах схемы занести в таблицу 5.3.

Таблица 5.3

| $U_{\text{вх1}}, \text{В}$ | $f_1, \text{кГц}$ | $\varphi_1, ^\circ$ | $U_{\text{вых}}, \text{В}$ | K_u |
|----------------------------|-------------------|---------------------|----------------------------|-------|
| | | | | |

Рассчитать коэффициент усиления схемы по формуле

$$K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вых}}}{0,01}.$$

Данные расчета занести в таблицу 5.3.

Зарисовать осциллограммы напряжений на входах и выходах транзисторных каскадов ДУ. Переключение каналов осциллографа между входами и выходами осуществляется клавишей «Пробел».

Для получения осциллограмм на входах транзисторных каскадов ДУ настройки осциллографа произвести в соответствии с рисунком 5.4.

Осциллограммы изобразить в соответствии с указанными на рисунке 5.13 масштабами.

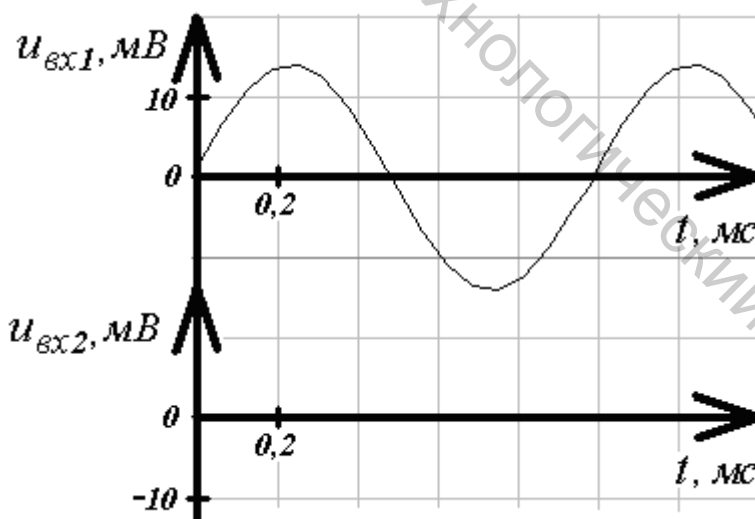


Рисунок 5.13 – Осциллограммы напряжений на входах транзисторных каскадов ДУ

Для получения осциллограмм на выходах транзисторных каскадов ДУ настройки осциллографа произвести в соответствии с рисунком 5.6.

Осциллограммы изобразить в соответствии с указанными на рисунке 5.14 масштабами.

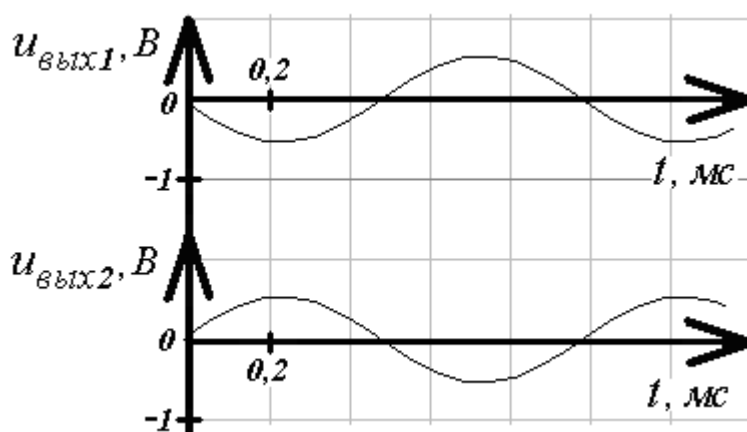


Рисунок 5.14 – Осциллограммы напряжений на выходах транзисторных каскадов ДУ

Контрольные вопросы

1. Назначение, устройство и принцип действия простейшего транзисторного ДУ.
2. Что такое дифференциальный и синфазный сигналы?
3. Основные параметры ДУ.

Лабораторная работа 6

Исследование типовых схем на операционных усилителях

Цель работы: изучение принципа работы схем на операционных усилителях, ознакомление с порядком расчета их основных параметров.

Теоретические сведения

Операционные усилители (ОУ) – это усилители с большими коэффициентами усиления дифференциального сигнала и подавления синфазного. Они основаны на базе ДУ. Называются операционными, так как первоначально использовались для операций над аналоговыми сигналами (сложение, вычитание, интегрирование и др.). Сейчас применяются также в усилительной технике, в качестве генераторов синусоидальных и импульсных сигналов, стабилизаторов напряжения, активных фильтров и т. д.

Достоинства ОУ – большие коэффициенты усиления, широкая полоса пропускания, широкий динамический диапазон, большое входное и малое выходное сопротивление, низкий уровень линейных и нелинейных искажений, стабильность параметров при изменении условий окружающей среды.

ОУ имеют два входа, инвертирующий и неинвертирующий, и один

общий выход. Условное обозначение ОУ представлено на рисунке 6.1.

При подаче сигнала на инвертирующий (отрицательный) вход получают на выходе инвертированный (противоположный по фазе) сигнал. Этот вход используется для введения в ОУ отрицательной обратной связи (ООС).

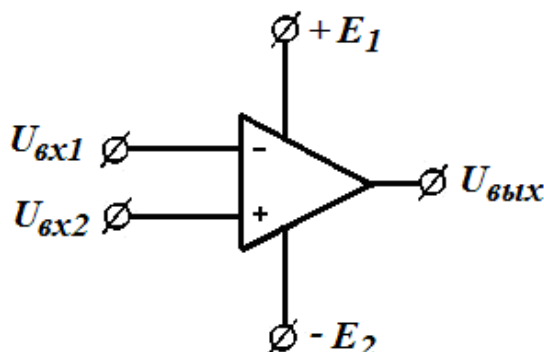


Рисунок 6.1 – Условное обозначение ОУ

При проектировании схем на ОУ предполагают их основные параметры: $R_{вх} \rightarrow \infty$, $R_{вых} \rightarrow 0$, $K_{иос} \rightarrow \infty$.

Изменяя характеристики ООС, получают следующие типовые схемы с ОУ.

Инвертирующий усилитель. Предназначен для усиления сигнала $U_{вх}$, поступающего на инвертирующий вход ОУ (рис. 6.2). Выходной сигнал имеет фазу, противоположную фазе входного сигнала.

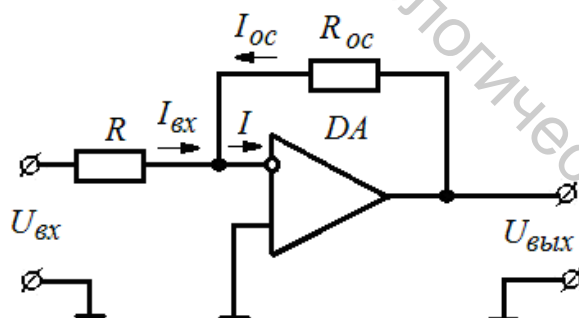


Рисунок 6.2 – Инвертирующий усилитель на ОУ

Коэффициент усиления такой схемы

$$K_U = -\frac{R_{oc}}{R}. \quad (6.1)$$

Знак « $-$ » означает, что $U_{вых}$ сдвинуто по фазе относительно $U_{вх}$ на 180° . При $R_{oc} = R$ схема является инвертором сигнала.

Неинвертирующий усилитель. Предназначен для усиления сигнала $U_{вх}$, поступающего на неинвертирующий вход (рис. 6.3).

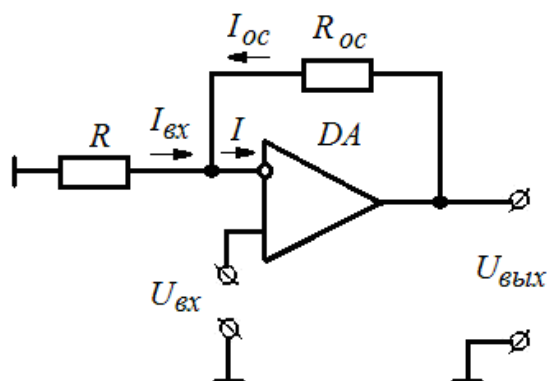


Рисунок 6.3 – Неинвертирующий усилитель на ОУ

Согласно второму закону Кирхгофа, составив уравнения для схемы замещения такого ОУ и решив систему уравнений одним из методов расчета сложных цепей, получают

$$K_U = 1 + \frac{R_{oc}}{R}. \quad (6.2)$$

При $R_{oc} = 0$ или $R \rightarrow \infty$ получают повторитель напряжения.

Инвертирующий сумматор. Предназначен для суммирования нескольких входных сигналов с изменением на 180° фазы выходного сигнала (рис. 6.4).

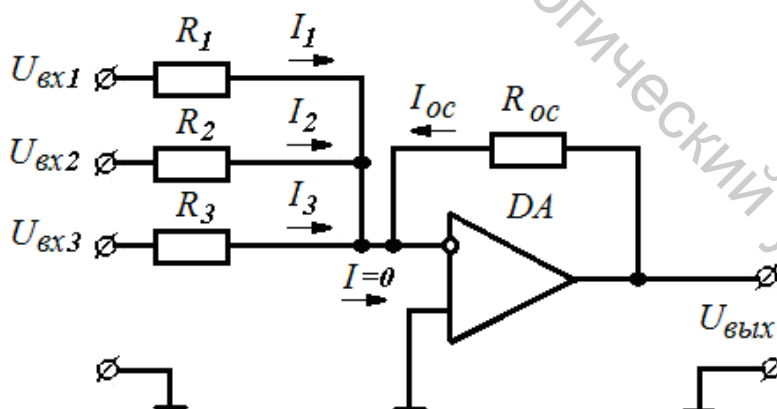


Рисунок 6.4 – Инвертирующий сумматор на ОУ

Число параллельных ветвей на входе равно количеству суммируемых сигналов. Так как $I=0$, то согласно I закону Кирхгофа

$$I_1 + I_2 + \dots + I_n = -I_{oc}.$$

Принимая $R_1=R_2=R_n=R$, получают

$$U_{вых} = -\frac{R_{oc}}{R}(U_{ex1} + U_{ex2} + \dots + U_{exn}). \quad (6.3)$$

Неинвертирующий сумматор получают подключением таких же параллельных ветвей, что и на рисунке 6.4, к неинвертирующему входу ОУ. Тогда

$$U_{вых} = \frac{R + R_{oc}}{nR}(U_{ex1} + U_{ex2} + \dots + U_{exn}), \quad (6.4)$$

где R и R_{oc} – резисторы схемы на рисунке 6.4.

Дифференциальный (разностный) усилитель. Предназначен для получения на выходе ОУ сигнала, пропорционального алгебраической разности сигналов, поступающих на неинвертирующий и инвертирующий входы (рис. 6.5).

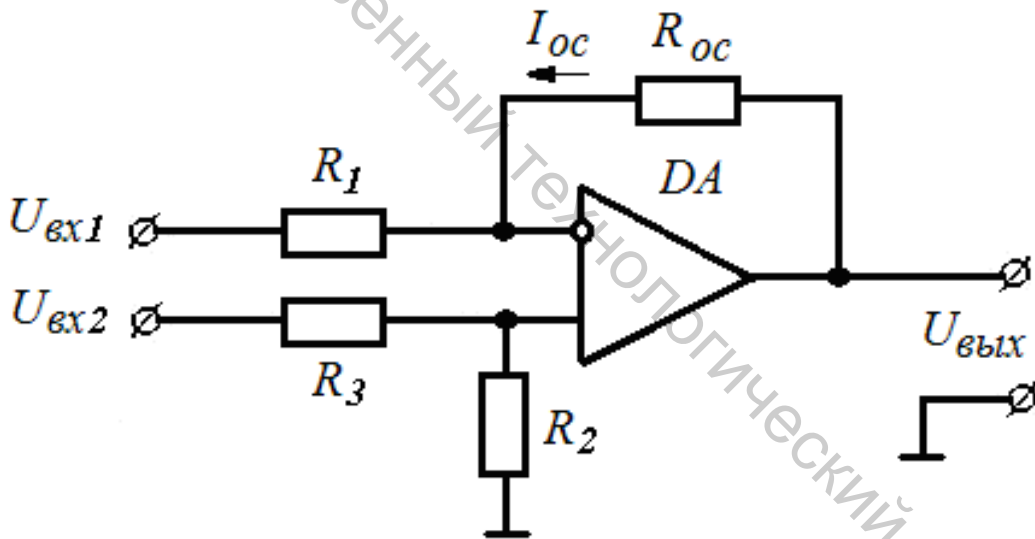


Рисунок 6.5 – Дифференциальный (разностный) усилитель на ОУ

При этом если $R_1=R_3$, а $R_{oc}=R_2$, то

$$U_{вых} = \frac{R_{oc}}{R_1}(U_{ex2} - U_{ex1}). \quad (6.5)$$

Интегратор. Предназначен для получения на выходе ОУ сигнала, пропорционального по времени интегралу входного сигнала (рис. 6.6).

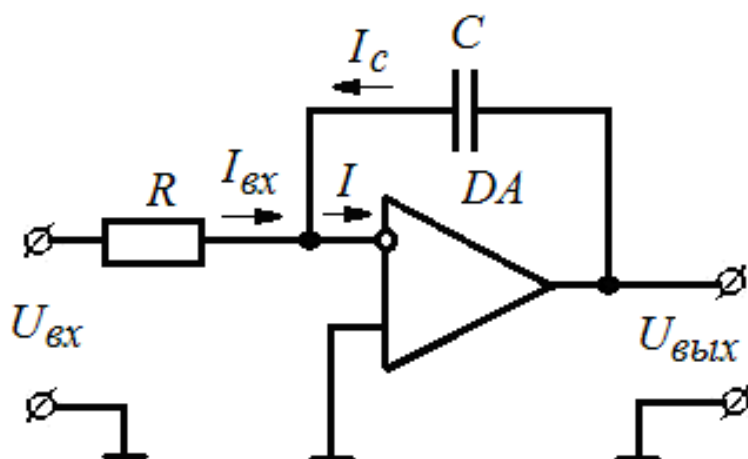


Рисунок 6.6 – Интегратор на ОУ

Так как это схема инвертирующего усилителя с заменой R_{oc} на C , то:

$$u_{вых} = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{вх} dt. \quad (6.6)$$

Дифференциатор. Предназначен для получения на выходе ОУ сигнала, пропорционального по времени дифференциалу входного сигнала (рис. 6.7).

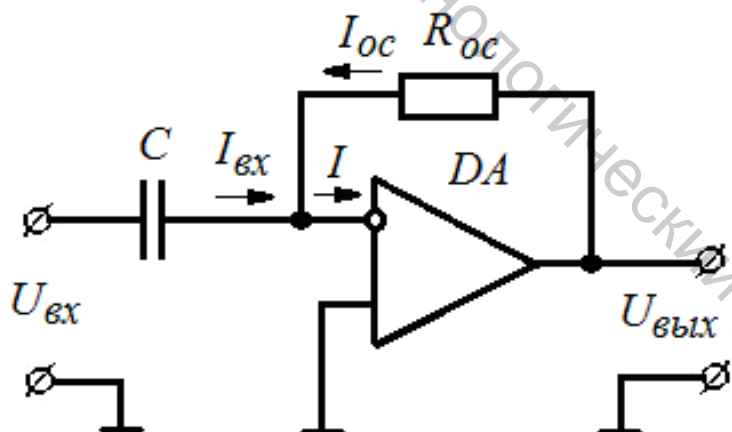


Рисунок 6.7 – Дифференциатор на ОУ

Так как это схема инвертирующего усилителя с заменой R на C , то:

$$u_{вых} = -R_{oc} C \frac{du_{вх}}{dt}. \quad (6.7)$$

Компаратор сигнала. Предназначен для сравнения двух сигналов: опорного U_{on} (постоянного или медленно изменяющегося) и входного U_{ex} , имеющего большую скорость изменения во времени.

Различают компараторы напряжений без гистерезиса и с гистерезисом.

Компараторы первой группы (рис. 6.8) позволяют получать передаточную характеристику, изображенную на рисунке 6.9.

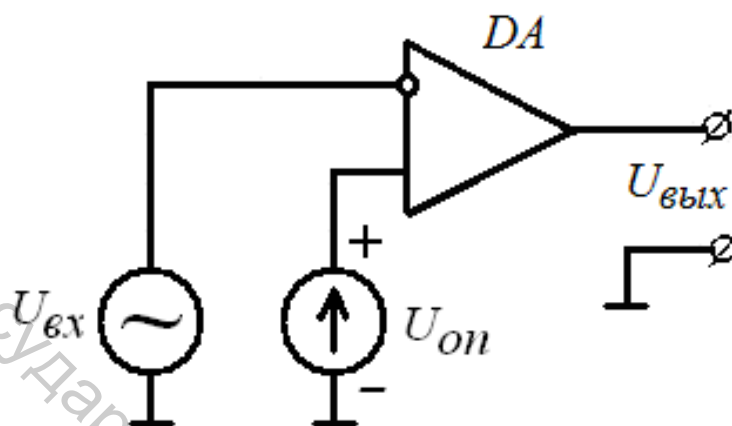


Рисунок 6.8 – Компаратор напряжений без гистерезиса на ОУ

При изменении полярности на входах ОУ изменяется полярность выходного напряжения. Так как в интервале $0 \div t_1$ (рис. 6.9) выполняется условие $U_{on} > U_{ex}$, то $U_{вых}$ совпадает по фазе с U_{on} . В интервале $t_1 \div \infty$, когда $U_{ex} > U_{on}$, сигнал на выходе инвертируется.

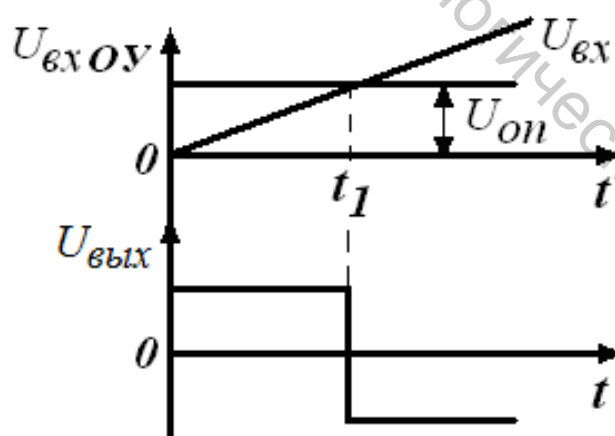


Рисунок 6.9 – Графики напряжений компаратора без гистерезиса

Компараторы второй группы (рис. 6.10) состоят из ОУ, охваченных положительной обратной связью (ПОС) по неинвертирующему входу с помощью резисторов $R1$ и $R2$.

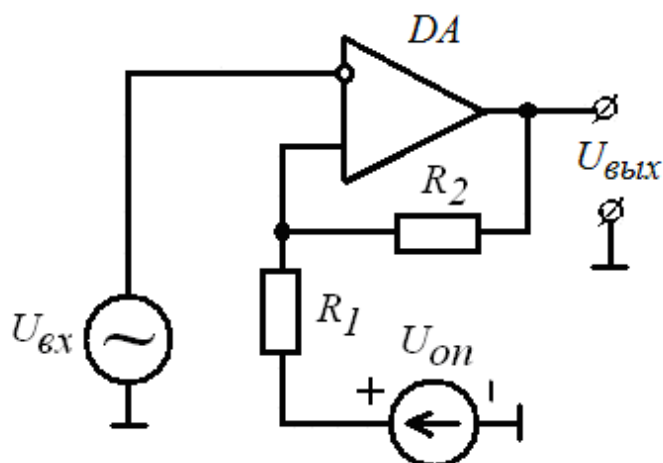


Рисунок 6.10 – Компаратор напряжений с гистерезисом на ОУ

Компаратор такого типа называют триггером Шмитта или пороговым устройством. Его передаточная характеристика изображена на рисунке 6.11.

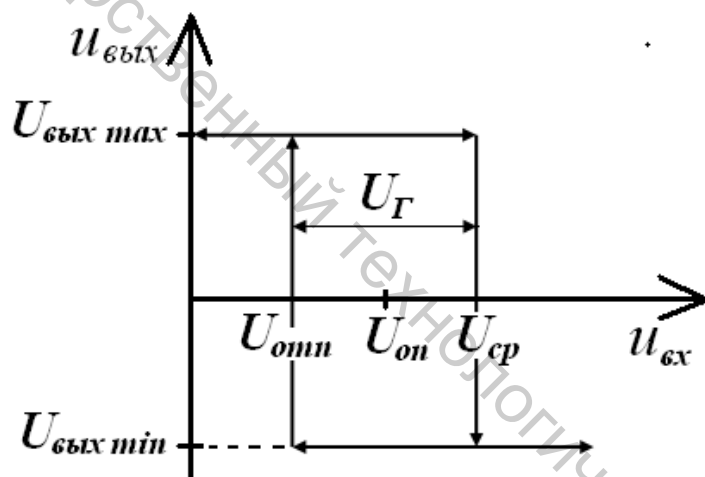


Рисунок 6.11 – Передаточная характеристика триггера Шмитта

При достижении $U_{вх} = U_{сп}$ происходит переключение компаратора в состояние $U_{вых min}$. Возвращение в состояние $U_{вых max}$ происходит при $U_{вх} = U_{отп}$. Таким образом, формируются пороги срабатывания и отпускания.

$$U_{сп} = U_{он} + \frac{U_{вых max} - U_{он}}{R_1 + R_2} R_1. \quad (6.8)$$

$$U_{отп} = U_{он} - \frac{|U_{вых min}| + U_{он}}{R_1 + R_2} R_1. \quad (6.9)$$

Тогда ширина зоны гистерезиса:

$$U_{\Gamma} = U_{cp} - U_{omn} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (U_{выхmax} + |U_{выхmin}|). \quad (6.10)$$

Схемы компараторов используются для преобразования формы сигнала, получения импульсов прямоугольной формы.

Так как при увеличении частоты сигналов из-за влияния паразитных емкостей в ОУ падает коэффициент усиления и увеличивается фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами, то при некоторой критической частоте ООС превращается в ПОС, усилитель самовозбуждается и становится генератором незатухающих колебаний. Для обеспечения устойчивости ОУ проводят оценку устойчивости по ЛАЧХ и ЛФЧХ, рассчитывая и включая в схему пассивные RC-цепи. Промышленностью выпускается как ОУ с внутренней коррекцией (RC-цепи включены в схему ОУ, но сужена полоса пропускания), так и с внешней коррекцией (с выводами для подключения RC-цепей).

Порядок выполнения работы в программе Electronics Workbench

1. Произвести моделирование схемы инвертирующего усилителя в соответствии с рисунком 6.12, задав следующие параметры:

- входное напряжение $U_{вх} = \text{№ компьютера} \times 0,01 \text{ (В)}$;
- частота сигнала $f = \text{№ компьютера} \text{ (кГц)}$;
- сопротивление нагрузки на выходе схемы $R_n = \text{№ компьютера} \text{ (кОм)}$;
- сопротивление резистора $R = 0,5 \text{ кОм}$;
- сопротивление резистора $R_{oc} = \text{№ компьютера} \text{ (кОм)}$.

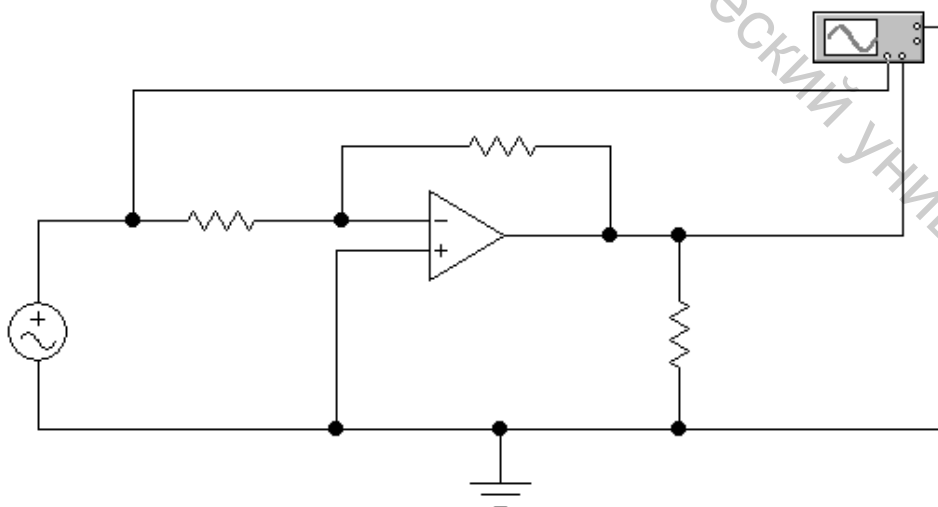


Рисунок 6.12 – Схема моделирования инвертирующего усилителя на ОУ

Включив схему, получить осциллограммы напряжения на входе $u_{\text{вх}}(t)$ и выходе $u_{\text{вых}}(t)$ усилителя в соответствии с рисунком 6.13.

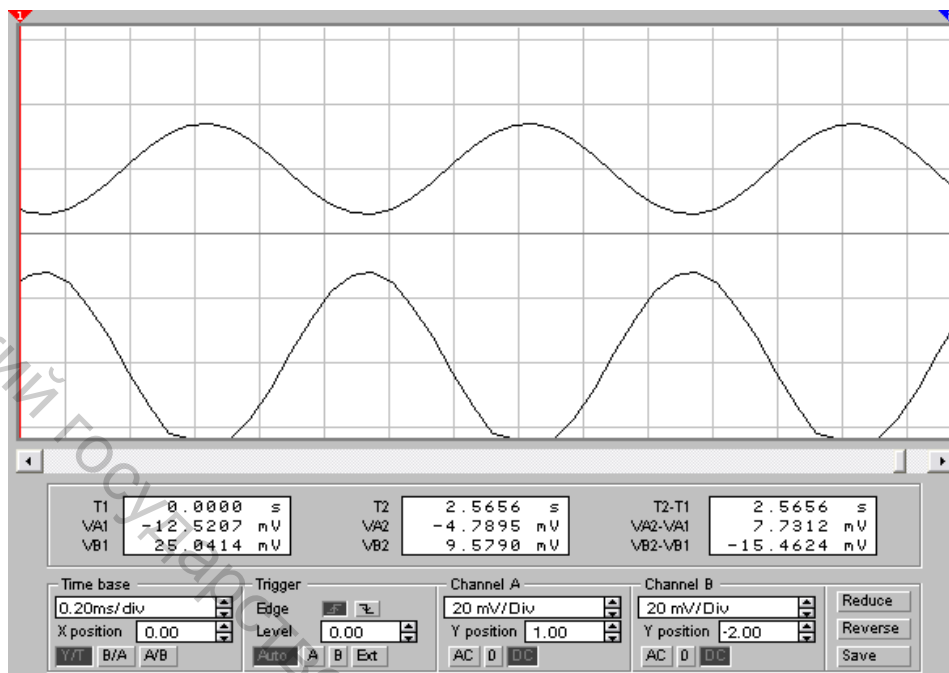


Рисунок 6.13 – Осциллограммы напряжения на входе и выходе усилителя

Зарисовать в масштабе полученные осциллограммы в соответствии с рисунком 1.7.

Рассчитать коэффициент усиления схемы K_U по формуле (6.1).

2. Произвести моделирование схемы неинвертирующего усилителя (рис. 6.3), задав следующие параметры:

- входное напряжение $U_{\text{вх}} = \text{№ компьютера} \times 0,01 \text{ (В)}$;
- частота сигнала $f = \text{№ компьютера (кГц)}$;
- сопротивление нагрузки на выходе схемы $R_n = \text{№ компьютера (кОм)}$;
- сопротивление резистора $R = 1 \text{ кОм}$;
- сопротивление резистора $R_{\text{ос}} = \text{№ компьютера (кОм)}$.

Зарисовать осциллограммы входного $u_{\text{вх}}(t)$ и выходного $u_{\text{вых}}(t)$ сигналов с указанием масштабов.

Рассчитать коэффициент усиления схемы K_U по формуле (6.2).

3. Произвести моделирование схемы инвертирующего сумматора (рис. 6.4), задав следующие параметры:

- входные напряжения $U_{\text{вх1}} = U_{\text{вх2}} = U_{\text{вх3}} = \text{№ компьютера} \times 0,01 \text{ (В)}$;
- частота сигнала $f = \text{№ компьютера (кГц)}$;
- сопротивление нагрузки на выходе схемы $R_n = \text{№ компьютера (кОм)}$;
- сопротивления резисторов $R_1 = R_2 = R_3 = 1 \text{ кОм}$.

– сопротивление резистора $R_{oc} = N_2 \text{ компьютера (кОм)}$.

Зарисовать осциллограммы входного $u_{ex}(t)$ и выходного $u_{вых}(t)$ сигналов с указанием масштабов.

Рассчитать значение $U_{вых}$ по формуле (6.3).

4. Произвести моделирование схемы дифференциального (разностного) усилителя (рис. 6.5), задав следующие параметры:

– входные напряжения $U_{ex1} = U_{ex2} = N_2 \text{ компьютера} \times 0,01 \text{ (В)}$;

– частота сигнала $f = N_2 \text{ компьютера (кГц)}$;

– сопротивление нагрузки на выходе схемы $R_n = N_2 \text{ компьютера (кОм)}$;


– сопротивления резисторов $R_1 = R_3 = 1 \text{ кОм}$.

– сопротивления резисторов $R_{oc} = R_2 = N_2 \text{ компьютера (кОм)}$.

Зарисовать осциллограммы входного $u_{ex}(t)$ и выходного $u_{вых}(t)$ (равного нулю) сигналов с указанием масштабов.

Рассчитать значение $U_{вых}$ по формуле (6.5).

5. Произвести моделирование схемы интегратора (рис. 6.6), задав следующие параметры:

– входное напряжение – прямоугольной формы (элемент Function generator  панели Instruments), $U_{ex} = 1 \text{ В}$;

– частота сигнала $f = 1 \text{ кГц}$;


– сопротивление нагрузки на выходе схемы $R_n = N_2 \text{ компьютера (кОм)}$;

– сопротивление резистора $R = 1100 \text{ Ом}$;

– емкость конденсатора $C = 0,011 \text{ мкФ}$.

Зарисовать осциллограммы входного $u_{ex}(t)$ и выходного $u_{вых}(t)$ сигналов с указанием масштабов.

6. Произвести моделирование схемы дифференциатора (рис. 6.7), задав следующие параметры:

– входное напряжение – пилообразной формы (элемент Function generator  панели Instruments), $U_{ex} = 1 \text{ (В)}$;

– частота сигнала $f = 1 \text{ кГц}$;

– сопротивление нагрузки на выходе схемы $R_n = N_2 \text{ компьютера (кОм)}$.

– сопротивление резистора $R_{oc} = 500 \text{ Ом}$.


– емкость конденсатора $C = 10 \text{ мкФ}$.

Зарисовать осциллограммы входного $u_{ex}(t)$ и выходного $u_{вых}(t)$ сигналов с указанием масштабов.

7. Произвести моделирование схемы компаратора напряжений без гистерезиса (рис. 6.8), задав следующие параметры:

– входное напряжение синусоидальной формы, $U_{ex} = 20 \text{ В}$;

– частота сигнала $f = N_{\text{компьютера}} \text{ (кГц)}$;

– опорное напряжение – постоянное (элемент Battery  панели Sources), $U_{on} = 10 \text{ В}$;

– сопротивление нагрузки на выходе схемы $R_n = N_{\text{компьютера}} \text{ (кОм)}$.

Зарисовать в масштабе осциллограммы напряжения на входе $u_{\text{вх}}(t)$ и выходе $u_{\text{вых}}(t)$ компаратора в соответствии с рисунком 6.14.

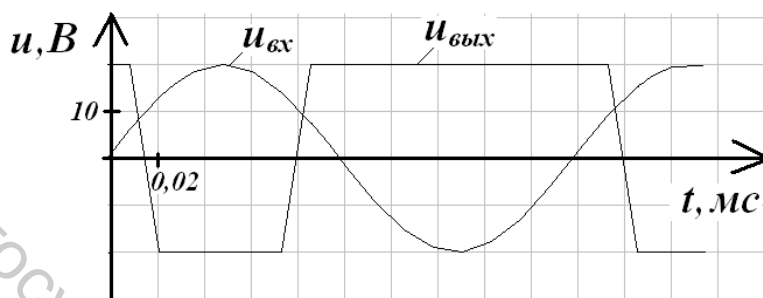



Рисунок 6.14 – Осциллограммы напряжения на входе и выходе компаратора без гистерезиса

Линию графика U_{on} на рисунке 6.14 изобразить и обозначить самостоятельно.

8. Произвести моделирование схемы компаратора напряжений с гистерезисом (рис. 6.10), задав следующие параметры:

– входное напряжение синусоидальной формы, $U_{\text{вх}} = 15 \text{ В}$;

– опорное напряжение – постоянное (элемент Battery  панели Sources), $U_{on} = 5 \text{ В}$;

– частота сигнала $f = N_{\text{компьютера}} \text{ (кГц)}$;

– сопротивление нагрузки на выходе схемы $R_n = N_{\text{компьютера}} \text{ (кОм)}$.

– сопротивления резисторов $R_1 = R_2 = N_{\text{компьютера}} \text{ (кОм)}$.

Зарисовать в масштабе осциллограммы напряжения на входе $u_{\text{вх}}(t)$ и выходе $u_{\text{вых}}(t)$ компаратора в соответствии с рисунком 6.15.

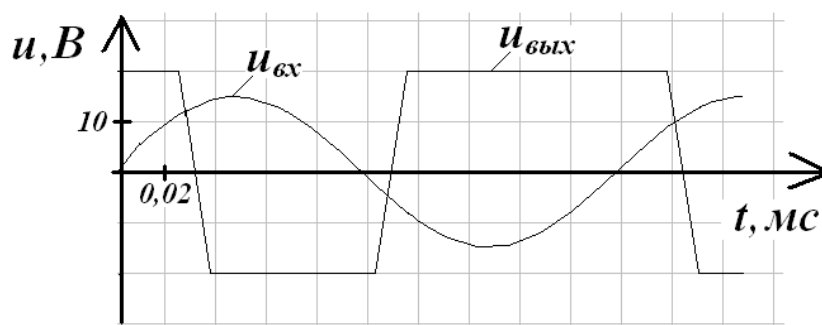


Рисунок 6.15 – Осциллограммы напряжения на входе и выходе компаратора с гистерезисом

Линию графика U_{on} на рисунке 6.15 изобразить и обозначить самостоятельно.

Рассчитать значения U_{cp} , U_{omn} , U_T по формулам (6.8) ÷ (6.10).

Контрольные вопросы

1. Каковы назначение, область применения и достоинства ОУ?
2. Пояснить условное обозначение и основные параметры ОУ.
3. Пояснить назначение, параметры и диаграммы напряжений инвертирующего усилителя на ОУ.
4. Пояснить назначение, параметры и диаграммы напряжений неинвертирующего усилителя на ОУ.
5. Пояснить назначение, параметры и диаграммы напряжений интегратора на ОУ.
6. Пояснить назначение, параметры и диаграммы напряжений дифференциатора на ОУ.
7. Пояснить назначение, параметры и диаграммы напряжений компаратора без гистерезиса на ОУ.
8. Пояснить назначение, параметры и диаграммы напряжений компаратора с гистерезисом на ОУ.

Литература

1. Электротехника с основами электроники / А. А. Федорченко, Ю. Г. Синдеев. – Москва : Дашков и К, 2007. – 416 с.
2. Электротехника и электроника / Б. И. Петленко [и др.]. – Москва : Академия, 2007. – 320 с.
3. Электротехника, электроника и импульсная техника / А. Г. Морозов. – Москва : Высшая школа, 1987. – 448 с.
4. Основы промышленной электроники / под ред. В. Г. Герасимова. – Москва : Высшая школа, 1986. – 336 с.
5. Промышленная электроника / Ю. С. Забродин. – Москва : Высшая школа, 1982. – 496 с.
6. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника : справочное руководство / У. Титце, К. Шенк. – Москва : Мир, 1982 – 512 с.
7. Алексеев, А. Г. Операционные усилители и их применение / А. Г. Алексеев, Г. В. Войшвилло. – Москва : Радио и связь, 1989 – 120 с.
8. Фолкенберри, Л. Применение операционных усилителей и линейных ИС; пер. с англ. / Л. Фолкенберри. – Москва : Мир, 19852 – 572 с.
3. Королев, Г. В. Электронные устройства автоматики : учеб. пособие / Г. В. Королев. – Москва : Высшая школа, 1991. – 255 с.
4. Никулин, В. И. Электроника: методические указания к лабораторным работам / В. И. Никулин, Ставрополь : СКФУ, 2017 – 114 с.
9. Ткаченко, Ф. А. Техническая электроника / Ф. А. Ткаченко. – Минск : Дизайн ПРО, 2000. – 352 с.
10. Гусев, В. Г. Электроника и микропроцессорная техника : учебник / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – Москва : КНОРУС, 2013. – 800 с.
11. Режим доступа: <https://www.electronicblog.ru/usilitelnaya-sxemotexnika/differencialnye-usiliteli.html>. – Дата обращения: 15.10.2021.

Учебное издание

ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА АВТОМАТИКИ.

ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Методические указания по выполнению лабораторных работ

Составители:

Куксевич Виталий Федорович

Новиков Юрий Васильевич

Шут Виктор Николаевич

Редактор *Т.А. Осипова*

Корректор *А.В. Пухальская*

Компьютерная верстка *В.Ф. Куксевич*

Подписано к печати 18.11.2021. Формат 60х90 ¹/₁₆. Усл. печ. листов 3,4.
Уч.-изд. листов 4,3. Тираж 45 экз. Заказ № 307.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.