

## ИННОВАЦИОННАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА



**Проект 1:** инновационная среда университета в регионе и эффективное управление

**Цель:** развитие инноваций и инновационных образовательных программ на основе интеграции образования, науки и бизнеса для организации подготовки и переподготовки кадров по широкому спектру специальностей и направлений.

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

# ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. АНАЛОГОВЫЕ УСТРОЙСТВА

Методические указания к лабораторным работам  
по дисциплине «Электроника и микропроцессорная техника»

Составители  
К.В. ТАТМЫШЕВСКИЙ  
Н.Ю. МАКАРОВА  
А.С. ГРИГОРЬЕВ

Владимир 2008

УДК 621.3

ББК 32.97

Э45

Рецензент

Доктор технических наук, профессор кафедры управления  
и информатики в технических и экономических системах  
Владимирского государственного университета

*С.И. Малафеев*

Печатается по решению редакционного совета  
Владимирского государственного университета

**Электронная** техника. Аналоговые устройства : метод.  
Э45 указания к лаб. работам по дисциплине «Электроника и микропроцессорная техника» / Владим. гос. ун-т ; сост. : К. В. Татмышевский, Н. Ю. Макарова, А. С. Григорьев. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. – 68 с.

Приведены методики выполнения лабораторных работ по исследованию основных электронных аналоговых узлов схем по дисциплине «Электроника и микропроцессорная техника». Рассматривается принцип действия исследуемых схем в среде схемотехнического моделирования Electronics WorkBench (Multisim).

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

Ил. 46. Библиогр.: 7 назв.

УДК 621.3

ББК 32.97

## ВВЕДЕНИЕ

Аналоговая электроника – один из основных разделов, входящих в курс «Электроника и микропроцессорная техника», а также во многие другие научно-образовательные дисциплины. Данный курс лабораторных работ посвящен исследованию основных аналоговых устройств измерительной техники.

Лабораторные работы построены следующим образом. В лабораторных работах № 1 – 3 исследуется работа выпрямителей и стабилизаторов напряжения. Далее рассматриваются схемы резистивного усилителя на транзисторе, эмиттерного повторителя, двухтактного усилителя мощности и дифференциального усилителя. В лабораторных работах № 8 – 11 для изучения предлагаются основные схемы генераторов сигналов.

В каждой лабораторной работе предусмотрено исследование схемы в среде схемотехнического моделирования Electronics Workbench (Multisim). Студентам предлагается провести сравнительный анализ результатов исследования реальных и виртуальных устройств. Изложены основные правила безопасности при выполнении лабораторных работ.

Методические указания предназначены для студентов специальностей 200101 – приборостроение и 200106 – информационно-измерительная техника и технологии очного обучения.

## ТРЕБОВАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Перед включением стендов необходимо убедиться в исправности сетевого кабеля и заземлить корпус прибора.

Все работы по ремонту стендов необходимо производить при отключенном питании прибора.

После окончания работы стенды необходимо отключить от сети тумблером «Сеть» и выдернуть вилку сетевого кабеля из розетки.

Не допускается попадание влаги внутрь прибора.

### Лабораторная работа № 1

#### ИССЛЕДОВАНИЕ МОСТОВОЙ СХЕМЫ ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Цель работы. Изучить схему построения мостового выпрямителя, определить амплитуду пульсаций выходного напряжения и коэффициент сглаживания фильтра.

Оборудование. Осциллограф СИ-73, лабораторный стенд 87Л-01, среда схемотехнического моделирования Electronics WorkBench версии 5.0 и выше.

#### 1. Общие сведения

Наиболее широкое применение в маломощных вторичных источниках питания (ВИП) получила мостовая схема выпрямителя, где в качестве выпрямляющих элементов чаще всего используют силовые полупроводниковые диоды. Принципиальная электрическая схема исследуемого выпрямителя показана на рис. 1.1.

В плечи моста включены диоды  $VD1...VD4$ , к одной диагонали моста подведено переменное напряжение, как правило, от вторичной обмотки трансформатора, а с другой снимается выпрямленное напряжение. Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения применен П-образный фильтр на элементах  $C1, R1, C2, R2$  - нагрузочный

резистор;  $PA$  - измеритель тока. При положительной полуволне напряжения на верхнем выводе вторичной обмотки трансформатора ток нагрузки будет протекать через диоды  $VD1$  и  $VD4$ , а при отрицательной - через диоды  $VD2$  и  $VD3$ . Через нагрузочный резистор  $R2$  (и резистор  $R1$ ) в любой полупериод протекает ток в одном направлении. Импульсы выпрямленного тока протекают последовательно через два диода, что увеличивает потери в устройстве. Поэтому желательно применять диоды с малым падением напряжения при заданном прямом токе. Напряжение на выходе выпрямителя имеет пульсирующий характер. Степень пульсаций оценивается коэффициентом пульсаций по напряжению, который представляет собой отношение амплитуды  $U_{r1}$  первой гармоники напряжения к его среднему значению  $U_0$ , равному постоянной составляющей выпрямленного напряжения:

$$K_{\Pi} = \frac{U_{r1}}{U_0}, \text{ или в процентах } K_{\Pi} = \frac{U_{r1}}{U_0} 100 \%.$$

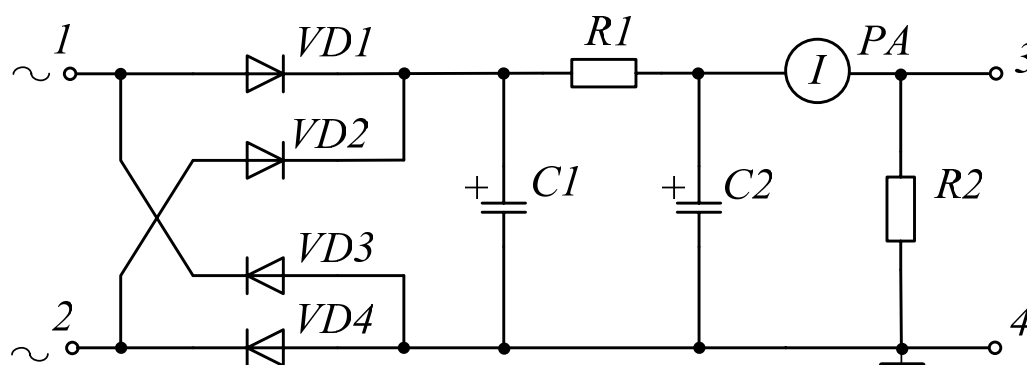


Рис. 1.1. Схема мостового выпрямителя:  $VD1...VD4$  – КД103;  $R1=200$  Ом;  $1\text{кОм}$ ;  $1,5\text{кОм}$ ;  $C1=C2=20$ ;  $50\text{мкФ}$

Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения применяют сглаживающие фильтры. Коэффициентом сглаживания фильтра называют величину, показывающую, во сколько раз фильтр ослабляет амплитуду первой гармоники выпрямленного напряжения

$$K_{cгл} = \frac{U_{r1вх}}{U_{r1вых}},$$

где  $U_{r1вх}$ ,  $U_{r1вых}$  амплитуды напряжения первой гармоники на входе и выходе фильтра соответственно. На практике широко применяют Г- и

П-образные  $LC$ - и  $RC$ - фильтры. В Г-образном фильтре заряд конденсатора  $C2$  происходит через резистор  $R1$ , а разряд - через сопротивление нагрузки  $R2$ . Для получения малого коэффициента пульсаций желательно выполнять условие  $R1 \gg R2 \gg \frac{1}{2\pi fC}$ . В таком фильтре за счет падения на резисторе  $R1$  уменьшается  $U_0$  и снижается КПД. Сопротивление конденсатора  $C2$  на частоте выходного напряжения должно быть много меньше, т.е.  $R2 \gg \frac{1}{2\pi fC1}$ . П-образный фильтр

можно рассматривать как последовательное соединение емкостного и Г-образного фильтров. Поэтому коэффициент пульсаций этих фильтров можно представить в виде произведения коэффициентов пульсаций каждого фильтра. Емкости обоих конденсаторов обычно равны, т.е.  $C1 = C2$ .  $LC$ -фильтры целесообразнее использовать в мощных ВИП, а  $RC$ -фильтры при небольших токах нагрузки.

Допустимые коэффициенты пульсации для усилителей низкой частоты  $K_{\Pi} = 0,05 \dots 0,5 \%$ ; для коллекторных и эмиттерных цепей транзисторов  $K_{\Pi} = 0,01 \%$ ; для радиоприемников  $K_{\Pi} = 0,01 \dots 0,10 \%$ .

## 2. Методика выполнения работы на стенде

2.1. Под руководством преподавателя при обесточенном лабораторном стенде собрать схему выпрямителя. Особое внимание обратить на полярность включения конденсаторов.

2.2. Исследование мостовой схемы выпрямителя при работе на активную нагрузку.

2.2.1. На вход выпрямителя подать переменное напряжение 15 В, соединив проводами гнезда "15 В", "общ.", "1" и "2". В качестве миллиамперметра использовать прибор АВМ2 стенда, а в качестве вольтметра выходного напряжения – АВМ1. При помощи осциллографа измерить и зарисовать в масштабе эпюры напряжений в точках "3", "4": при наличии конденсаторов  $C1$ ,  $C2$ ; при наличии только конденсатора  $C2$ ; без обоих конденсаторов.

2.2.2. Определить коэффициент пульсаций схемы для трех вариантов включения схемы по п. 2.2.1.

2.2.3. При  $R1 = 200$  Ом определить, как влияет на работу схемы изменение резистора  $R2$ . Для каждого значения сопротивления резистора  $R2$  провести измерение тока нагрузки  $I_H$ , напряжения на нагрузочном резисторе  $U_0$  и амплитуды пульсаций  $U_{r1}$ . Амплитуду пульсаций измерить при помощи осциллографа. Результаты исследований свести в таблицу.

Сопротивление $R2$ , Ом	$I_H$ , мА	$U_0$ , В	$U_{r1}$ , мВ

2.3. При  $R1 = 1$  кОм,  $R2 = 1,6$  кОм определить, как изменятся коэффициент пульсаций, ток нагрузки и напряжение на нагрузочном резисторе, если установить конденсаторы  $C1 = C2 = 50$  мкФ.

### 3. Исследование мостовой схемы выпрямителя в среде схемотехнического моделирования Electronics WorkBench

3.1. Соберите схему мостового выпрямителя в среде Electronics Workbench (Multisim) (рис. 1.2). Настройте необходимые параметры моделирования и получите осциллограммы на входе и выходе схемы (рис. 1.3).

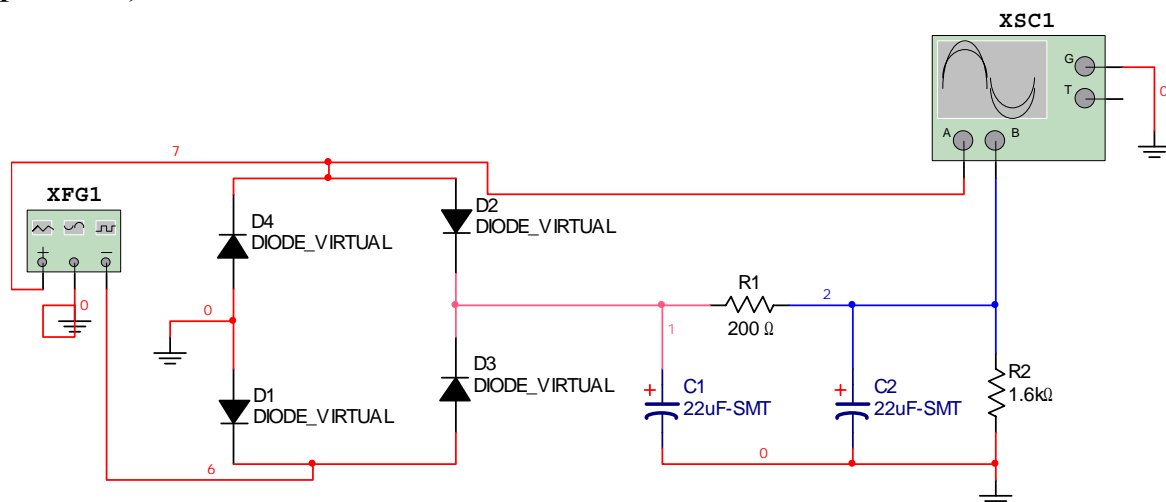


Рис. 1.2. Схема мостового выпрямителя в среде моделирования Multisim

3.2. При помощи осциллографа получить осциллограммы при наличии конденсаторов  $C1$ ,  $C2$ ; при наличии только конденсатора  $C2$ ; без обоих конденсаторов. Сравнить осциллограммы с результатами экспериментального исследования.

3.3. Определить коэффициент пульсаций схемы для трех вариантов включения схемы и сравнить со значением при прямом измерении.

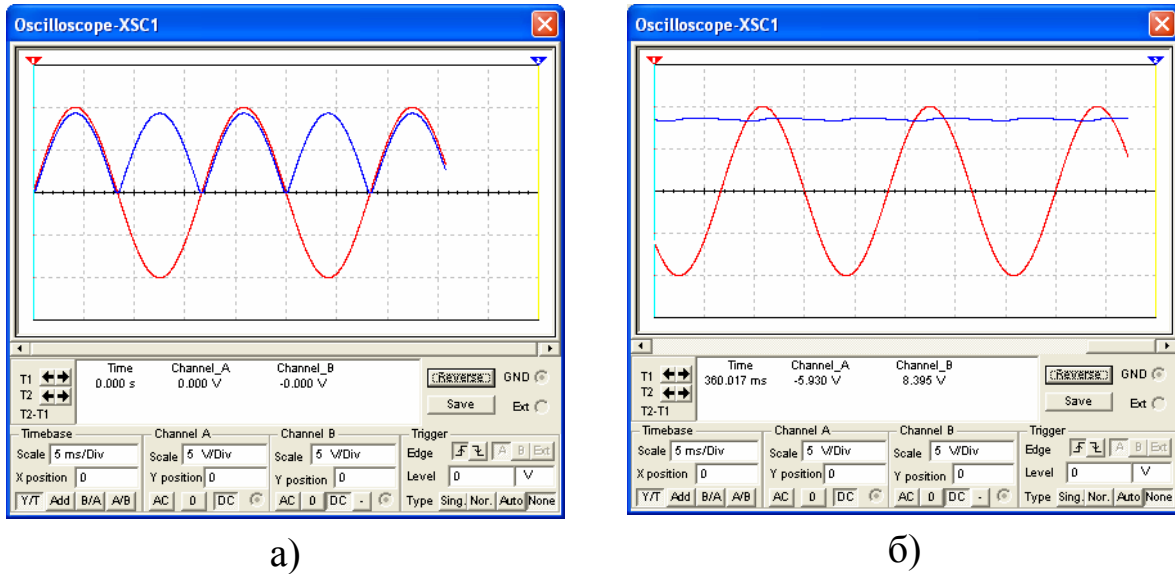


Рис. 1.3. Осциллограммы, полученные при виртуальном исследовании работы мостового выпрямителя: а – без сглаживающего фильтра; б – с фильтром

3.4. При  $R1 = 200$  Ом определить, как влияет на работу схемы изменение резистора  $R2$ . Для каждого значения сопротивления резистора  $R2$  провести измерение тока нагрузки  $I_H$ , напряжения на нагрузочном резисторе  $U_0$  и амплитуды пульсаций  $U_{r1}$ . Результаты исследований свести в таблицу. Сравнить с результатами, полученными при прямом измерении.

Сопротивление $R2$ , Ом	$I_H$ , мА	$U_0$ , В	$U_{r1}$ , мВ

3.5. При  $R1 = 1$  кОм,  $R2 = 1,6$  кОм определить, как изменятся коэффициент пульсаций, ток нагрузки и напряжение на нагрузочном резисторе, если изменять емкость конденсаторов  $C1, C2$ .

Емкость $C1=C2$ , мкФ	$I_H$ , мА	$U_0$ , В	$U_{r1}$ , мВ



## **4. Содержание отчета**

Отчет оформляет каждый студент самостоятельно. Защита проходит в начале каждого следующего занятия с демонстрацией работы устройства на ЭВМ (при необходимости). Студент, не подготовивший или не защитивший отчет по работе, к следующей лабораторной работе не допускается.

4.1. Цель работы.

4.2. Схема электрическая принципиальная исследуемого выпрямителя (см. рис. 1.1).

4.3. Результаты прямых измерений, сведенные в таблицу, эпюра напряжений в заданных точках.

4.4. Результаты исследования схемы мостового выпрямителя в среде моделирования Electronics WorkBench (Multisim).

4.4. Выводы по работе, сравнение результатов, полученных при прямом измерении и моделировании, отмеченные недостатки, преимущества и область применения рассмотренного мостового выпрямителя.

## **5. Контрольные вопросы**

5.1. Объясните назначение элементов исследуемого мостового выпрямителя.

5.2. Что такое коэффициент пульсации?

5.3. Какие паспортные данные силовых диодов вы знаете?

5.4. Как определить коэффициент сглаживания фильтра?

5.5. Как зависит коэффициент сглаживания емкостного фильтра от сопротивления нагрузки?

5.6. Какое обратное напряжение должны выдерживать диоды?

5.7. Поясните, почему применение однополупериодной схемы выпрямителя невыгодно.

## Лабораторная работа № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы. Изучить принципы построения параметрического стабилизатора напряжения, исследовать нагрузочную способность, определить амплитуду пульсаций выходного напряжения.

Оборудование. Осциллограф СИ-73, лабораторный стенд 87Л-01, среда схемотехнического моделирования Electronics WorkBench.

### 1. Общие сведения

Электропитание маломощных цепей электронных схем с небольшим пределом изменения тока потребления осуществляется от параметрических стабилизаторов напряжения (ПСН). Кроме того, ПСН широко используются в качестве источников опорного напряжения в компенсационных стабилизаторах напряжения и тока.

Для стабилизации постоянного напряжения в ПСН применяются элементы с нелинейной вольт-амперной характеристикой, например кремниевые стабилитроны. Принципиальная схема исследуемого ПСН приведена на рис. 2.1. Диоды  $V1... V4$  представляют собой мостовой выпрямитель, конденсаторы  $C1 - C2$  фильтрующие,  $R1$  - ограничительный резистор,  $R2$  - нагрузочный резистор,  $V5$  - кремниевый стабилитрон,  $PA$  - измеритель тока.

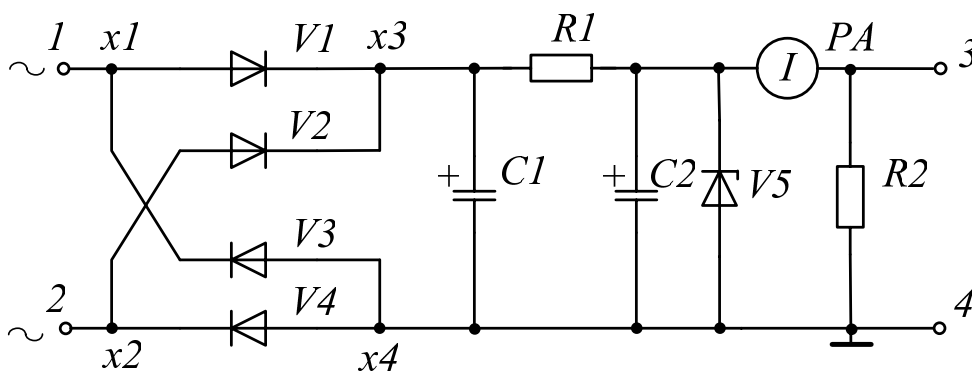


Рис. 2.1. Схема параметрического стабилизатора напряжения:  
 $V1... V4 = \text{КД103}$ ;  $C1, C2 = 20 \text{ мкФ}$ ;  $V5 = \text{Д814А}$ ;  $R1 = 1,2 \text{ кОм}$ ;  $R2 = 3,9 \text{ кОм}$

При увеличении напряжения на входе параметрического стабилизатора напряжения ток через стабилитрон в соответствии с его ВАХ резко увеличивается (рис. 2.2), что приводит к увеличению тока через резистор  $R1$  и соответствующему увеличению падения напряжения на этом резисторе. Напряжения на стабилитроне, а следовательно, и на нагрузке (резистор  $R2$ ) при этом практически не меняются.

При уменьшении напряжения, наоборот, падение напряжения на  $R1$  уменьшается таким образом, что напряжение на стабилитроне и нагрузке остается неизменным.

Значение изменения напряжения на стабилитроне  $V5$  ( $\pm\Delta U_H$ ) зависит от изменения входного напряжения  $\pm U_{вх}$ , сопротивления ограничивающего резистора  $R1$  и дифференциального сопротивления стабилитрона  $r_g = \frac{\partial U_{см}}{\partial I_{см}}$ .

Коэффициент стабилизации (по входному напряжению) схемы ПСН:

$$K_{см} = \frac{\Delta U_{вх} U_H}{\Delta U_H U_{вх}} \approx \frac{U_H R1}{U_{вх} R2}.$$

Внутреннее сопротивление ПСН определяется в основном дифференциальным сопротивлением стабилитрона.

Температурный коэффициент напряжения  $k_t$  стабилитрона определяет величину отклонения входного напряжения ПСН при изменении температуры. Для стабилитронов с  $U_{см} > 5,5$  В при повышении температуры напряжение на стабилитроне возрастает. Поэтому температурная компенсация в этом случае может быть достигнута включением последовательно со стабилитроном диодов в прямом направлении, но при этом возрастает внутреннее сопротивление ПСН за счет дифференциальных сопротивлений термокомпенсирующих диодов в прямом направлении, которое зависит от выбранного типа диода и режима его работы.

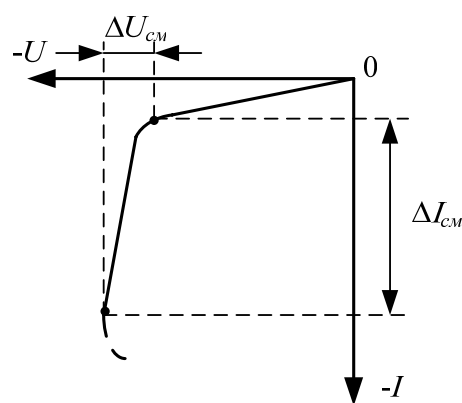


Рис. 2.2. ВАХ стабилитрона

## 2. Методика выполнения работы на стенде

**ВНИМАНИЕ!** Без разрешения преподавателя тумблер "СЕТЬ" стенда не включать!

2.1. Из элементов, подготовленных к работе, собрать схему ПСН (см. рис. 2.1). На вход ПСН (выводы 1 и 2) подать напряжение 15 В, соединив проводами гнезда "15 В", "общ.", "1" и "2". В качестве миллиамперметра использовать прибор АВМ2 стенда, а в качестве вольтметра выходного напряжения – АВМ1.

При помощи осциллографа измерить и зарисовать в масштабе величину пульсации в точках  $x_3$ ,  $x_4$  схемы при наличии конденсатора  $C1$  и без него. Аналогично все проделать для выходного напряжения (гнезда 3, 4 схемы рис. 2.1).

2.2. Исследовать работу ПСН. Для этого диоды  $V1$ ,  $V2$ ,  $V3$ ,  $V4$ , отключить от схемы (вытащить их из гнезд), а на гнезда  $x_3$ ,  $x_4$  подать напряжение от нуля до +15 В от гнезд "ГН2" стенда, соблюдая при этом полярность напряжения и правильность подключения измерительных приборов АВМ1 и АВМ2.

2.3. Определить пределы тока нагрузки  $I_n$ , обеспечивающие устойчивую стабилизацию напряжения при изменении  $R2$ . При выполнении необходимо проводить измерение амплитуды пульсаций  $U_n$ , стабилизированного напряжения  $U_n$  с помощью милливольтметра АВМ2 и осциллографа. Результаты исследований свести в таблицу.

Сопротивление $R2$ , Ом	$U_{вх}$ , В	$U_n$ , В (осциллограф)	$U_n$ , мВ (осциллограф)	$U_n$ , мВ (АВМ2)

## 3. Исследование схемы параметрического стабилизатора напряжения в среде схемотехнического моделирования Electronics WorkBench

3.1. Соберите схему параметрического стабилизатора напряжения в среде Electronics Workbench (Multisim) (рис. 2.3). Настройте необходимые параметры моделирования и получите осциллограммы на входе и выходе схемы (рис. 2.4).

3.2. При помощи осциллографа получить осциллограммы и измерить величину пульсации в точках  $x_3$ ,  $x_4$  схемы при наличии конденсатора  $C1$  и без него (см. рис. 2.1). Сравнить осциллограммы с результатами экспериментального исследования. Аналогично исследовать выходное напряжение.

3.3. Исследовать работу параметрического стабилизатора напряжения. Для этого отключить от схемы диоды  $V1 - V4$ , на гнезда  $x_3$ ,  $x_4$  подать напряжение от нуля до +15 В. Получить и проанализировать осциллограммы входного и выходного напряжения.

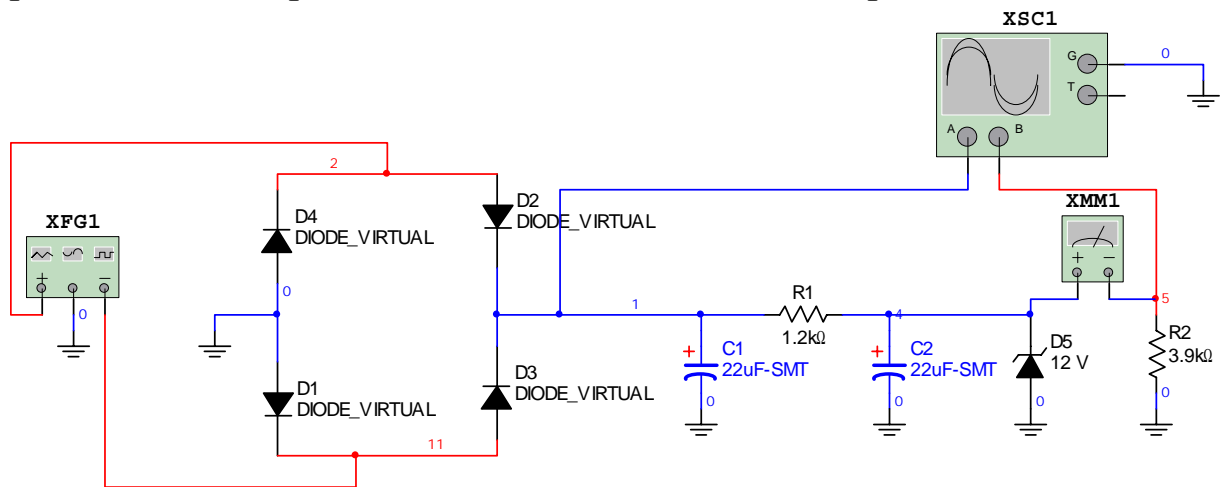
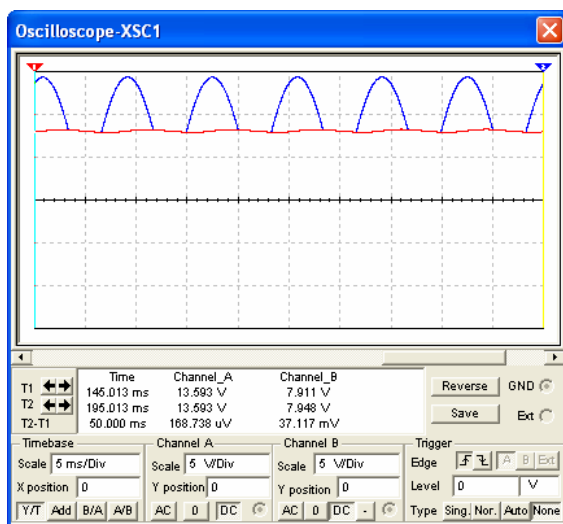
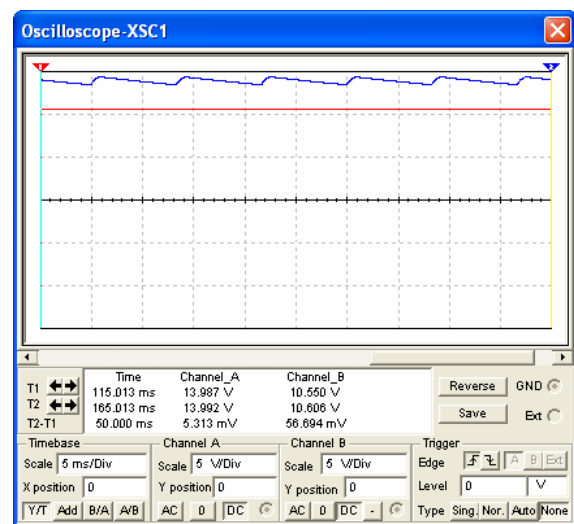


Рис. 2.3. Схема параметрического стабилизатора напряжения в среде моделирования Multisim



а)



б)

Рис. 2.4. Осциллограммы, полученные при виртуальном исследовании работы параметрического стабилизатора напряжения: а – без конденсатора  $C1$ ; б – с конденсатором  $C1$

3.4. Определить пределы тока нагрузки  $I_n$ , обеспечивающие устойчивую стабилизацию напряжения при изменении  $R_2$  (200 Ом – 20 кОм). Произвести измерение амплитуды пульсаций  $U_n$  стабилизированного напряжения  $U_n$  с помощью милливольтметра и осциллографа. Результаты исследований свести в таблицу. Сравнить с результатами, полученными при прямом измерении.

Сопротивление $R_2$ , Ом	$U_{вх}$ , В	$U_n$ , В (осциллограф)	$U_n$ , мВ (осцилло- граф)	$U_n$ , мВ (милли- вольтметр)

#### 4. Содержание отчета

Отчет оформляет каждый студент самостоятельно. Защита проходит в начале каждого следующего занятия с демонстрацией работы устройства на ЭВМ (при необходимости). Студент, не подготовивший или не защитивший отчет по работе, к следующей лабораторной работе не допускается.

4.1. Цель работы.

4.2. Схема электрическая принципиальная исследуемого параметрического стабилизатора напряжения (см. рис. 2.1).

4.3. Расчет схемы ПСН при  $U_{вх} = 15$  В,  $U_n = 7,8$  В,  $I_n = 5$  мА.

4.4. Результаты прямых измерений, сведенные в таблицу, и необходимые графики.

4.5. Результаты исследования схемы ПСН в среде моделирования Electronics WorkBench (Multisim).

4.6. Выводы по работе, сравнение результатов, полученных при прямом измерении и при моделировании, отмеченные недостатки, преимущества и область применения рассмотренного ПСН.

#### 5. Контрольные вопросы

5.1. Объясните назначение элементов схемы ПСН.

5.2. Что такое коэффициент стабилизации и как зависит его величина от режимов работы элементов схемы?

5.3. Объясните, что означает увеличение и уменьшение нагрузки стабилизатора.

5.4. Как влияет величина сопротивления нагрузки на коэффициент стабилизации?

5.5. Дайте определение дифференциального сопротивления стабилизатора.

5.6. Какие паспортные параметры стабилизаторов вы знаете?

5.7. Объясните методику расчета ПСН.

### **Лабораторная работа № 3** **ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО** **СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ**

Цель работы. Изучить принципы построения компенсационного стабилизатора напряжения, исследовать нагрузочную способность, определить амплитуду пульсаций выходного напряжения.

Оборудование. Осциллограф СИ-73, лабораторный стенд 87Л-01, среда схемотехнического моделирования Electronics WorkBench.

#### **1. Общие сведения**

Компенсационные стабилизаторы напряжения (КСН) обеспечивают необходимую стабильность напряжения на нагрузке при помощи цепи отрицательной обратной связи, воздействующей на регулирующий элемент (РЭ), включенный последовательно или параллельно с нагрузкой.

Схема последовательного КСН приведена на рис. 3.1 и содержит регулирующий элемент (РЭ), устройство сравнения (УС) и усилитель постоянного тока (УПТ).

РЭ выполнен на  $VT1$ , а схема сравнения и УПТ выполнены на  $R1, V5, VT2, R3, R4, R5$ .

$R5, R4, R6$  представляют собой делитель напряжения;  $R1, V5$  - источник опорного (эталонного) напряжения  $U_{оп}$ . Резистор  $R5$  являет-

ся нагрузкой КСП.  $V1...V4$  - мостовой выпрямитель;  $C1, C2$  - фильтрующие (сглаживающие) конденсаторы.

В таком КСН происходит непрерывное сравнение напряжения на нагрузочном резисторе  $R6$  (части его) с опорным напряжением  $U_{on}$ , создаваемым с помощью параметрического стабилизатора.

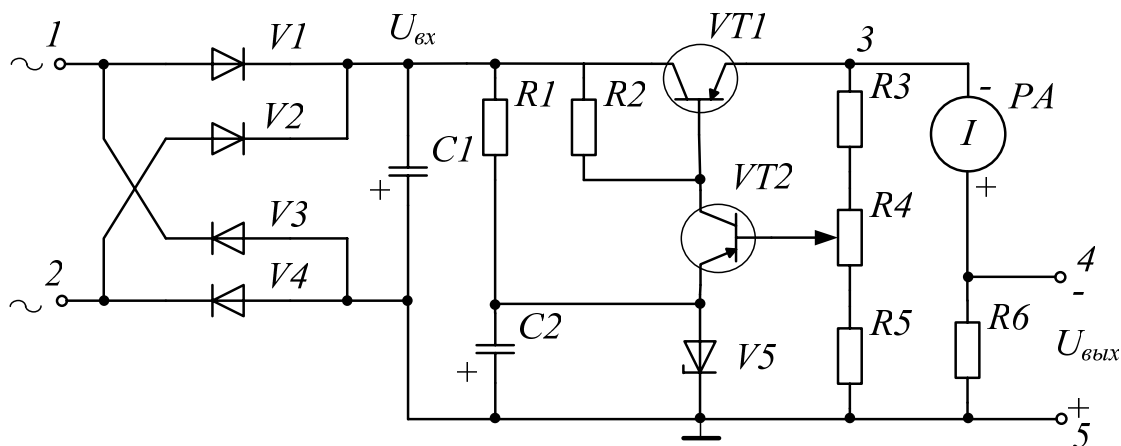


Рис. 3.1. Схема компенсационного стабилизатора напряжения:  $V1, V2, V3, V4$  – диоды КД103А (Д220);  $VT1, VT2$  – транзисторы МП40;  $R1=12$  кОм;  $R2=7,5$  кОм;  $R3=200$  Ом;  $R4=2,2$  кОм (переменное);  $R5=1$  кОм;  $R6=620$  кОм (1,2 кОм; 1,8 кОм);  $C1 – 50$  мкФ  $\times 25$  В;  $C2 – 20$  мкФ  $\times 25$  В

При увеличении  $R6$  (или уменьшении нагрузочного тока) напряжение  $U_{вых}$  повышается, отклоняясь от номинального значения.

Часть напряжения  $U_{вых}$ , равная  $KU_{вых}$  ( $K$  – коэффициент деления резистивного делителя  $R3, R4, R5$ ), являясь сигналом обратной связи, сравнивается с опорным напряжением  $U_{on}$ , снимаемым с параметрического стабилизатора. Так как  $U_{on}=\text{const}$ , то напряжение  $U_{эб}$  транзистора  $VT2$  из-за увеличения напряжения  $KU_{вых}$  уменьшается ( $U_{эб}=U_{on}-KU_{вых}$ ). Следовательно, коллекторный ток транзистора  $VT2$  снижается, это приводит к уменьшению напряжения между базой и коллектором  $VT1$ , что равносильно увеличению его сопротивления. Вследствие этого падение напряжения на транзисторе  $VT1$  возрастает, благодаря чему напряжение  $U_{вых}$  приобретает значение, близкое к номинальному с определенной степенью точности. С помощью резистора  $R4$  осуществляется регулирование напряжения  $U_{вых}$ . Конденсатор  $C2$  предназначен для улучшения переходных характеристик и повы-



шения степени устойчивости стабилизатора. Величина температурной нестабильности (изменение выходного напряжения при изменении температуры окружающей среды)  $\delta U_t$  определяется в основном температурным уходом напряжения  $U_{эб}$  транзистора  $VT2$ , параметров источника опорного напряжения и делителя выходного напряжения. Для получения минимального значения  $\delta U_t$  необходимо:

1. В делителе выходного напряжения применять термостабильные резисторы (типов ПТМН, 05-22, С2-31).
2. Каскад УПТ выполнять по дифференциальной схеме.
3. Применять термокомпенсированные стабилитроны (типов Д818Е, КС196Г).

Такие стабилизаторы получили наибольшее распространение вследствие сравнительно высоких КПД и качества стабилизации, которое определяется коэффициентом стабилизации и внутренним сопротивлением. Коэффициент стабилизации равен отношению относительных изменений напряжений на выходе КСН и определяется по формуле

$$K_{ст} = \frac{\Delta U_{вх} / U_{вх}}{\Delta U_{вых} / U_{вых}},$$

где  $\Delta U_{вх}$  и  $\Delta U_{вых}$  - приращения входного и выходного напряжений стабилизатора соответственно.

Внутреннее сопротивление стабилизатора определяется отношением изменения выходного напряжения к вызвавшему это изменение значению выходного тока.

## 2. Методика выполнения работы на стенде

2.1. Под руководством преподавателя при обесточенном стенде собрать схему компенсационного стабилизатора напряжения. Особое внимание необходимо обратить на полярность включения элементов.

2.2. Исследовать компенсационный стабилизатор напряжения при работе на активную нагрузку.

2.2.1. Изменяя величину резистора  $R4$ , установить на выходе КСН напряжение  $U_{вых} = 9$  В. Определить пределы стабилизации напряжения  $U_{вых}$  при дискретном изменении величины сопротивления резистора  $R6$ .

2.2.2. Измерить амплитуду пульсаций  $U_n$  стабилизированного напряжения  $U_{вых}$  при различных значениях  $R_6$  (тех же, что и в п. 2.2.1). Результаты исследований занести в таблицу.

Сопротивление нагрузки $R_6$ , кОм	$U_{вых}$ , В	$U_n$ , В

2.2.3. Определить режимы работы транзисторов и рассчитать токи  $I_э$ ,  $I_к$ ,  $I_б$ .

2.2.4. Определить внутреннее сопротивление КСН.

### 3. Исследование схемы параметрического стабилизатора напряжения в среде схемотехнического моделирования Electronics WorkBench

3.1. Соберите схему компенсационного стабилизатора напряжения в среде Electronics Workbench (Multisim) (рис. 3.2). Настройте необходимые параметры моделирования и получите осциллограммы на входе и выходе схемы (рис. 3.3). Сравнить осциллограммы с результатами экспериментального исследования.

3.2. Определить пределы стабилизации выходного напряжения при изменении величины сопротивления резистора  $R_6$  в пределах 100 Ом – 10 кОм. Построить зависимость  $U_{вых}(R_6)$ . Сравнить с результатами, полученными при прямом измерении.

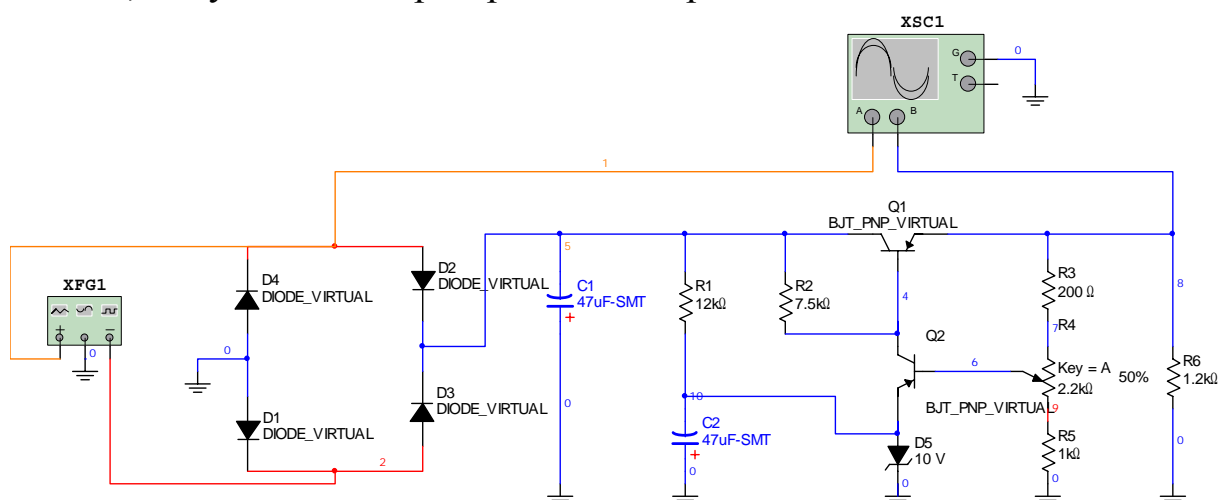


Рис. 3.2. Схема компенсационного стабилизатора напряжения в среде моделирования Multisim

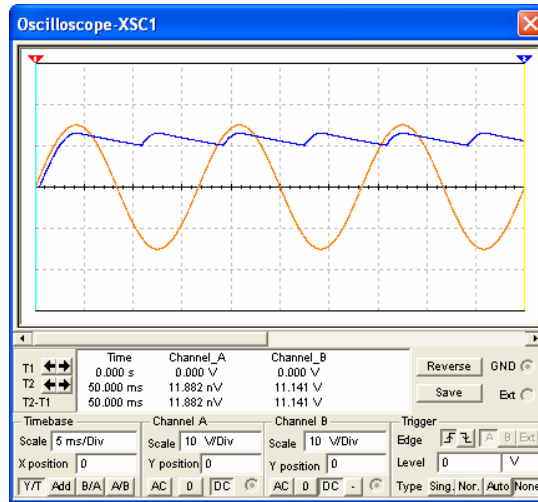


Рис. 3.3. Осциллограммы, полученные при виртуальном исследовании работы компенсационного стабилизатора напряжения

3.3. Измерить амплитуду пульсаций  $U_n$  стабилизированного напряжения  $U_{вых}$  при различных значениях  $R_6$  (тех же, что и в п. 3.2). Результаты исследований занести в таблицу. Сравнить результаты с экспериментальными данными.

Сопротивление нагрузки $R_6$ , кОм	$U_{вых}$ , В	$U_n$ , В

3.4. Исследовать работу КСН при разном значении емкости конденсаторов  $C1$ ,  $C2$ . Сделать вывод о влиянии емкости на выходное напряжение.

3.5. Определить токи  $I_э$ ,  $I_к$ ,  $I_б$  транзисторов и сравнить эти значения с расчетными.

#### 4. Содержание отчета

Отчет оформляет каждый студент самостоятельно. Защита проходит в начале каждого следующего занятия с демонстрацией работы устройства на ЭВМ (при необходимости). Студент, не подготовивший или не защитивший отчет по работе, к следующей лабораторной работе не допускается.

- 4.1. Цель работы.
- 4.2. Схема электрическая принципиальная исследуемого компенсационного стабилизатора напряжения (см. рис. 3.1).
- 4.3. Результаты измерений, сведенные в таблицу, и зависимость  $U_n(R6)$ .
- 4.4. Результаты исследования схемы КСН в среде моделирования Electronics WorkBench (Multisim).
- 4.5. Выводы по работе, сравнение результатов, полученных при прямом измерении и при моделировании, отмеченные недостатки, преимущества и область применения рассмотренного КСН.

## **5. Контрольные вопросы**

- 5.1. Объясните назначение элементов исследуемого стабилизатора.
- 5.2. Что такое коэффициент стабилизации и как зависит его величина от режимов работы элементов схемы стабилизатора?
- 5.3. Что такое увеличение и уменьшение нагрузки стабилизатора и как влияет величина нагрузки на коэффициент стабилизации?
- 5.4. Дайте определение внутреннего сопротивления стабилизатора.
- 5.5. Объясните принцип действия стабилизатора компенсационного типа
- 5.6. Дайте определение коэффициента усиления по току транзистора при включении его по схеме с ОЭ.
- 5.7. Чему равен коэффициент усиления составного транзистора?
- 5.8. Какие паспортные параметры стабилитронов вы знаете?
- 5.9. Что такое напряжение насыщения транзистора?
- 5.10. В каком соотношении находятся токи коллектора, базы и эмиттера транзистора?

## Лабораторная работа № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ НА ТРАНЗИСТОРЕ

Цель работы. Изучить построение и работу резистивного усилителя на транзисторе. Исследовать амплитудную и частотную характеристики.

Оборудование. Осциллограф С1-73 (или аналогичный), лабораторный стенд 87Л-01, среда схемотехнического моделирования Electronics WorkBench (Multisim).

#### 1. Общие сведения

Резистивный каскад является основным типом каскадов усилителей на транзисторах. Основные параметры усилительного каскада: коэффициент усиления по напряжению  $K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$ ; коэффициент усиления по току  $K_I = I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}}$ ; коэффициент усиления по мощности  $K_P = P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}} = K_U K_I$ .

В связи с тем что восприятие органов чувств человека подчиняется логарифмическому закону, коэффициенты усиления нередко выражаются в децибелах или неперах, для чего пользуются соотношениями

$$K_U (\text{дБ}) = 20 \lg K_U; \quad K_I (\text{дБ}) = 20 \lg K_I; \quad K_P (\text{дБ}) = 10 \lg K_P;$$

$$K_U (\text{Нп}) = \ln K_U; \quad K_I (\text{Нп}) = \ln K_I; \quad K_P (\text{Нп}) = 0,5 \ln K_P.$$

Амплитудной характеристикой усилителя называют зависимость амплитуды напряжения сигнала на выходе от амплитуды напряжения сигнала на входе. Усилитель может усиливать подводимые к его входу сигналы с напряжением не ниже  $U_{\text{вх min}}$ , так как более слабые сигналы заглушаются напряжением собственных шумов усилителя, и не выше  $U_{\text{вх max}}$ , так как иначе усилитель вносит очень большие нелинейные искажения.

Отношением  $U_{\text{вх max}} / U_{\text{вх min}}$  характеризуется диапазон напряжений сигнала, усиливаемых данным усилителем без чрезмерных помех и искажений, и называется динамическим диапазоном усилителя

$$D = \frac{U_{ex \max}}{U_{ex \min}};$$

$$D(\text{дБ}) = 20 \lg D = 20 \lg \frac{U_{ex \max}}{U_{ex \min}}.$$

Частотная характеристика (амплитудно-частотная) - это зависимость коэффициента усиления от частоты. Простейший усилительный каскад на транзисторе, включенный по схеме с общим эмиттером, приведен на рис. 4.1.

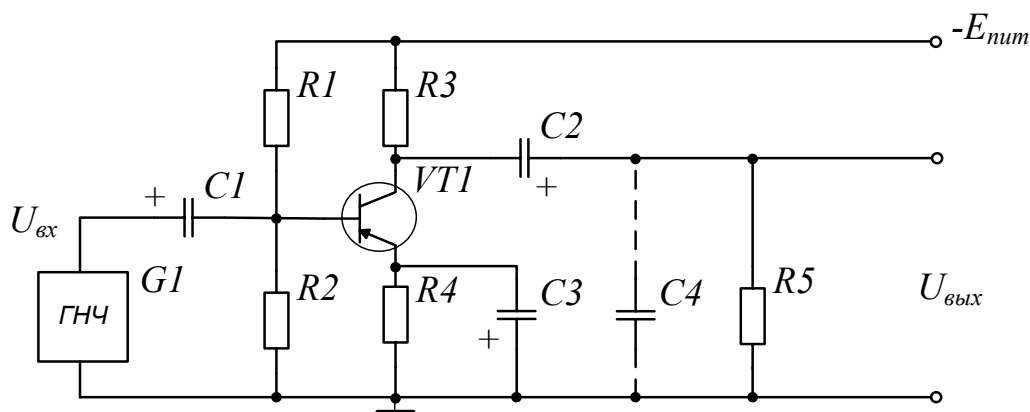


Рис. 4.1. Схема резистивного усилителя:  $R1 = 22 \text{ кОм}$

Нагрузкой коллекторной цепи является резистор  $R5$ , резисторы  $R1, R2$  обеспечивают подачу начального смещения на базу транзистора  $VT1$ ,  $R4$  вместе с  $R1$  и  $R2$  являются элементами схемы стабилизации рабочей точки. Конденсатор  $C3$  шунтирует резистор  $R4$  по переменному току, так как величина емкости  $C3$  значительна. Конденсаторы  $C1$  и  $C2$  разделительные. При подаче на вход усилителя напряжения сигнала неизменной амплитуды при различных частотах ГНЧ выходное напряжение в зависимости от частоты сигнала будет изменяться, так как сопротивления конденсаторов  $C1, C2$  на разных частотах различны. С уменьшением частоты входного сигнала величина сопротивления конденсаторов  $C1, C2$  увеличивается, следовательно,  $U_{вых}$  уменьшается. С увеличением частоты сопротивление конденсаторов, шунтирующих  $R4$ , уменьшается, что также уменьшает величину  $U_{вых}$ . Поэтому, чтобы  $U_{вых}$  оставалось постоянным ( $K_U = \text{const}$ ) в требуемом диапазоне частот, величину емкости конденсаторов  $C1, C2$  стремятся сделать как можно большей, а  $C_n$  - уменьшить до минимума.

## 2. Методика выполнения работы на стенде

2.1. При обесточенном лабораторном стенде под руководством преподавателя из деталей, тип и номиналы которых указаны на рис. 4.1, собрать схему усилителя. При сборке особое внимание обратить на полярность включения элементов.

2.2. Исследование усилителя.

2.2.1. Проверить режим работы УНЧ по постоянному току и рассчитать токи  $I_{дел}$ ,  $I_э$ ,  $I_к$ ,  $I_б$ . При расчете необходимо определить мощности, выделяемые на элементах схемы.

2.2.2. Исследовать амплитудную характеристику усилителя для двух случаев сопротивления в цепи коллектора (по указанию преподавателя), для частоты входного сигнала 2 кГц. Определить динамический диапазон усилителя. Данные измерений свести в таблицу.

$R_к = R3 =$		$R_к = R3 =$	
$U_{вх}$ , мВ	$U_{вых}$ , мВ	$U_{вх}$ , мВ	$U_{вых}$ , мВ

2.2.3. Исследовать частотную характеристику усилителя при  $f_н = 20$  Гц,  $f_в = 50$  кГц для двух случаев включения емкостей в цепях базы, эмиттера и коллектора (по указанию преподавателя). Данные измерений свести в таблицу, аналогичную приведенной. Построить АЧХ и пронормировать ее.

2.2.4. Исследовать прохождение импульсных сигналов для четырех частот ( $f1 = 50$  Гц,  $f2 = 1$ кГц,  $f3 = 10$  кГц,  $f4 = 50$  кГц). Нарисовать осциллограммы.

2.2.5. Определить  $K_U$  (дБ).

## 3. Исследование схемы параметрического стабилизатора напряжения в среде схемотехнического моделирования Electronics WorkBench

3.1. Соберите схему резистивного усилителя на транзисторе в среде Electronics Workbench (рис. 4.2). Настройте необходимые параметры моделирования и получите осциллограммы на входе и выходе схемы (рис. 4.3). Определите коэффициент усиления схемы по напряжению.

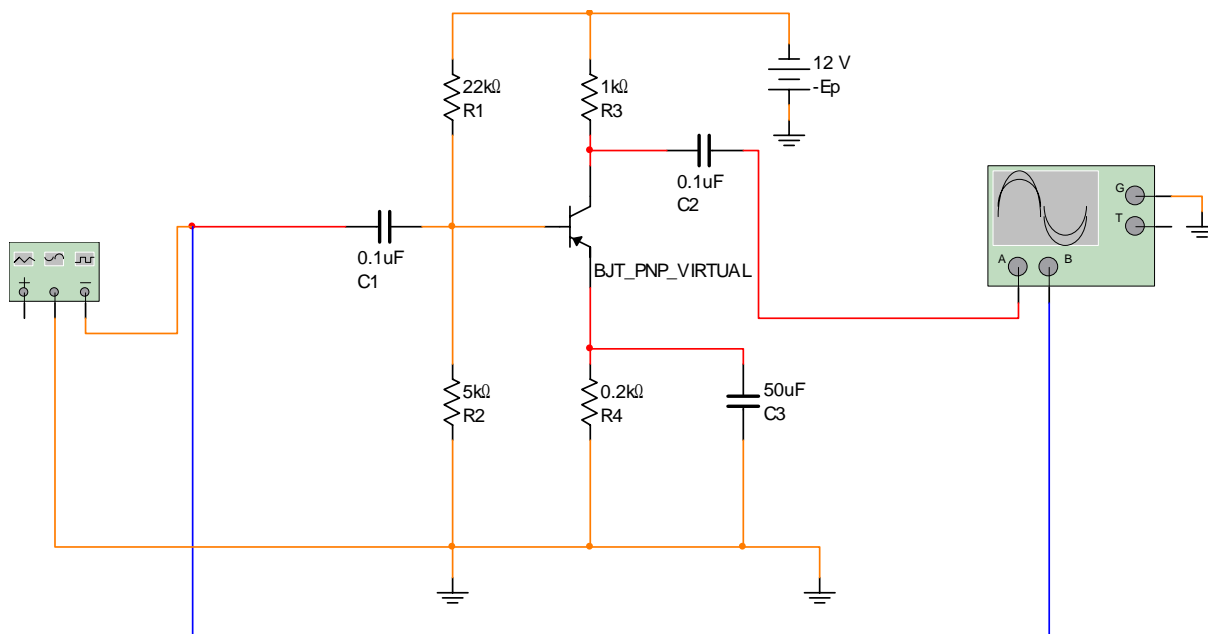


Рис. 4.2. Схема резистивного усилителя в среде моделирования Multisim

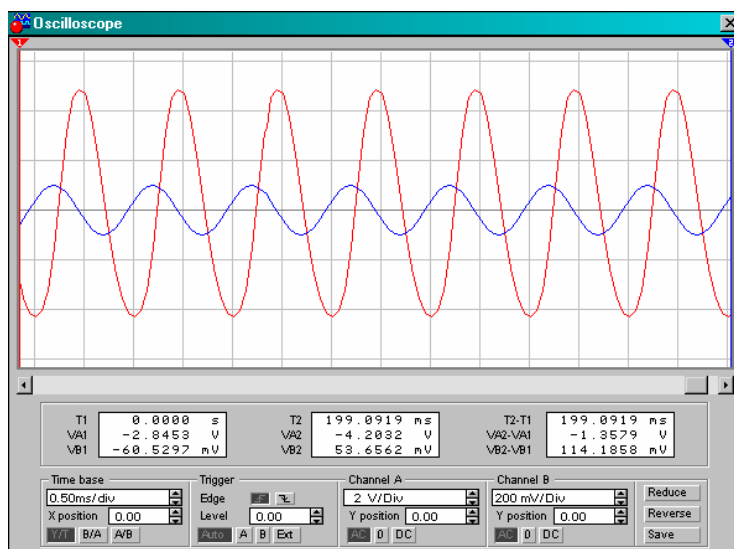


Рис. 4.3. Осциллограммы, полученные при виртуальном исследовании работы резистивного усилителя

3.2. Определите токи  $I_k$ ,  $I_э$ ,  $I_б$  для режима работы усилителя по постоянному току. Сравните результаты теоретического расчета с результатами, полученными в ходе прямого измерения.

3.3. Исследование амплитудной характеристики усилителя. Для двух случаев сопротивления в цепи коллектора (по указанию преподавателя), для частоты входного сигнала 1 кГц постройте амплитуд-



ную характеристику. Определите динамический диапазон усилителя. Результаты измерений сведите в таблицу.

$R_k=R3=$		$R_k=R3=$	
$U_{вх}, мВ$	$U_{вых}, мВ$	$U_{вх}, мВ$	$U_{вых}, мВ$

3.4. Исследование амплитудно-частотной характеристики усилителя. Изменяя частоту входного сигнала, постройте АЧХ усилителя. Определите полосу пропускания усилителя.

3.5. Исследование прохождения импульсных сигналов. Для четырех частот (по указанию преподавателя) получить осциллограммы прохождения импульсных сигналов.

#### 4. Содержание отчета

Отчет оформляет каждый студент самостоятельно. Защита проходит в начале каждого следующего занятия с демонстрацией работы устройства на ЭВМ (при необходимости). Студент, не подготовивший или не защитивший отчет по работе, к следующей лабораторной работе не допускается.

4.1. Цель работы.

4.2. Схема электрическая принципиальная исследуемого усилителя.

4.3. Результаты исследований, измерений и расчетов, графики, построенные по результатам измерений.

4.4. Результаты моделирования работы резистивного усилителя в среде Electronics Workbench (Multisim). Сравнение результатов моделирования с результатами прямого измерения.

4.5. Выводы по работе, отмеченные недостатки, преимущества и области применения.

#### 5. Контрольные вопросы

5.1. Дать определение основным параметрам усилителя.

5.2.  $K_P$  (дБ) =  $10 \lg K_P$ ,  $K_U$  (дБ) =  $20 \lg K_U$ . Почему перед логарифмами разные коэффициенты?

5.3. Как зависит  $K_U$  от режима работы каскада усиления по постоянному току? Дать качественный анализ.

5.4. Как обеспечивается стабилизация режима работы по постоянному току?

5.5. Что произойдет с параметрами схемы, изображенной на рис. 4.1, если элементы  $R1$  и  $R2$  поменять местами? Дать качественный анализ.

5.6. Чему равен коэффициент усиления транзистора?

5.7. Что происходит с фазами сигнала на входе и выходе схемы? Почему?

5.8. Как выбрать рабочее напряжение конденсаторов  $C2$ ,  $C3$ ?

5.9. Как определить постоянную мощность, рассеиваемую на коллекторе транзистора? Дать несколько вариантов ответа.

5.10. Объясните, чем определяются режимы работы каскада усиления по постоянному и переменному току.

5.11. Объясните особенности прохождения импульсных сигналов через усилитель.

## **Лабораторная работа № 5** **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИТТЕРНОГО ПОВТОРИТЕЛЯ**

Цель работы. Изучить построение и работу эмиттерного повторителя (ЭП), исследовать основные свойства ЭП, оценить его характеристики.

Оборудование. Осциллограф С1-73, лабораторный стенд 87Л-01, среда схемотехнического моделирования Electronics WorkBench (Multisim).

### **1. Общие сведения**

В качестве согласующих устройств во входных и выходных каскадах, в том числе и электронных устройств приборов времени, широко используется ЭП, принципиальная схема которого приведена на рис. 5.1. В схеме существуют последовательная отрицательная обратная связь (ООС) по входу и параллельная по выходу как по постоянному, так и по переменному току, создаваемая резистором  $R3$ .

В режиме покоя напряжение  $U_{R3} = I_{\text{э}} R3$  совместно с  $U_{R2}$  обеспечивает необходимое напряжение смещения  $U$ . При подаче на вход ЭП сигнала переменная составляющая создает падение напряжения  $U_{R2} \sim I_{\text{э}} \sim R3$ , которое является выходным ( $U_{\text{вых}}$ ) и одновременно напряжением обратной связи  $U_{\text{ос}}$ . Коэффициент передачи напряжения цепи ООС  $\beta = \frac{U_{\text{ос}}}{U_{\text{вых}}} = 1$ .

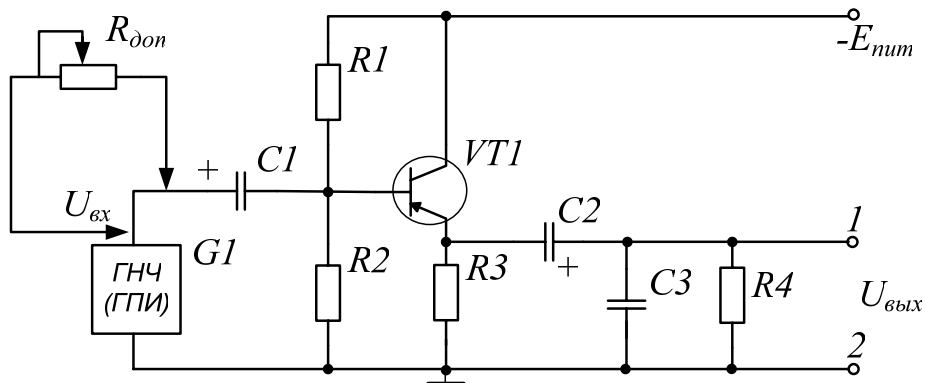


Рис. 5.1. Схема эмиттерного повторителя:  $G1$  – генераторы ГНЧ, ГПИ;  $R1$ ,  $R2 = 10$  кОм;  $R3 = 1$  кОм;  $R4 = 510$  Ом,  $5,1$  кОм;  $C1 = 20$  мкФ;  $C2 = 10$  мкФ;  $C3 = 0,033$  мкФ;  $VT1 = \text{МП40}$ ;  $E_{\text{пит}} = -10$  В

Коэффициент усиления по напряжению ЭП

$$K_U = \frac{K_0}{1 + \beta K_0} < 1,$$

где  $K_0 = S_{\text{э}} R_{\text{э}}$ ;  $S_{\text{э}} = h_{21\text{э}}/h_{11\text{э}}$ ;

$S_{\text{э}}$  - статическая крутизна ВАХ транзистора;

$h_{21\text{э}}$  - статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером;

$h_{11\text{э}}$  - входное сопротивление транзистора в схеме с общим эмиттером.

Коэффициент усиления по току ЭП

$$K_I \approx (1 + h_{21\text{э}}) \frac{R'_{\text{э}}}{R_{\text{вх. сл}}},$$

где  $R'_{\text{э}} = \frac{R3 \cdot R4}{R3 + R4}$ ;

$R4$  - сопротивление нагрузочного резистора;

$R_{\text{вх. сл}}$  - входное сопротивление следующего за ЭП каскада.

Входное сопротивление ЭП

$$R'_{ex} \approx (1 + h_{21Э})R'_Э,$$

а с учетом делителя на резисторах  $R1, R2$

$$R_{ex} = \frac{R'_{ex}R_\partial}{R'_{ex} + R_\partial},$$

где  $R_\partial = \frac{R1R2}{R1 + R2}$ .

## 2. Методика выполнения работы на стенде

2.1. Под руководством преподавателя при обесточенном лабораторном стенде собрать из деталей, тип и номиналы которых указаны на рис. 5.1, схему эмиттерного повторителя. Особое внимание необходимо обратить на полярность включения элементов.

2.2. Исследование эмиттерного повторителя.

2.2.1. Определить амплитудную характеристику ЭП для двух случаев включения нагрузки  $R3 = 510 \text{ Ом}$ ,  $R4 = 5,1 \text{ кОм}$  и для частоты входного сигнала  $f = 1 \text{ кГц}$ . Рассчитать динамический диапазон ЭП. Данные измерений свести в таблицу.

$R3 = 510 \text{ Ом}$	$R4 = 5,1 \text{ кОм}$

2.2.2. Снять амплитудно-частотную характеристику для двух случаев включения нагрузки при  $U_{ex} = 0,7 \text{ В}$ . Определить полосу пропускания  $\Delta f = f_B - f_H$ . Результаты измерений свести в таблицу, аналогичную приведенной выше.

2.2.3. Измерить входное сопротивление ЭП. Входной сигнал от генератора ГНЧ подается на вход ЭП через дополнительный переменный резистор (на схеме рис. 5.1 условно показан), который включается последовательно с конденсатором при помощи проводов и зажимов. Измерение проводится путем изменения сопротивления дополнительного переменного резистора до величины, при которой входное напряжение ЭП уменьшается в два раза по сравнению с величиной выходного напряжения ГНЧ. Входное сопротивление каска-

да при этом равно значению сопротивления дополнительного переменного резистора, измеренного омметром стенда. Рассчитать входное сопротивление ЭП  $R_{вх}$ .

2.2.4. Определить режим работы транзистора  $VT1$  и рассчитать коллекторный и эмиттерный токи.

2.2.5. Проверить прохождение импульсных сигналов от ГПИ стенда через ЭП в диапазоне частот 25 Гц - 100 кГц. Зарисовать изображение осциллограмм импульсных сигналов для  $f1 = 25$  Гц,  $f2 = 1$  кГц,  $f3 = 50$  кГц.

### 3. Исследование схемы эмиттерного повторителя в среде схемотехнического моделирования Electronics WorkBench (Multisim)

3.1. Соберите схему эмиттерного повторителя в среде Electronics Workbench (Multisim) (рис. 5.2). Настройте необходимые параметры моделирования и получите осциллограммы на входе и выходе схемы (рис. 5.3). Определите коэффициент усиления схемы по напряжению.

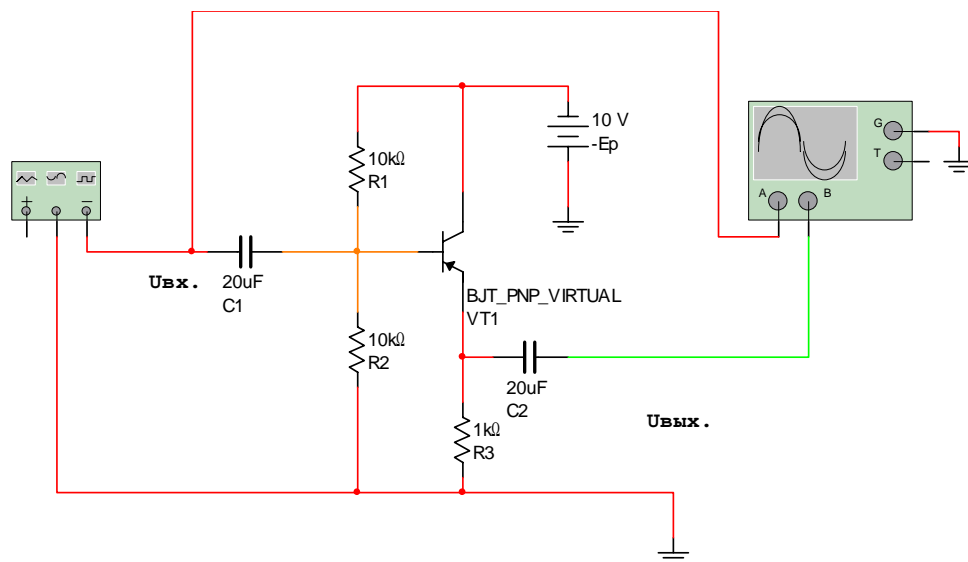


Рис. 5.2. Схема эмиттерного повторителя в среде моделирования Multisim

3.2. Определите токи  $I_k$ ,  $I_э$ ,  $I_б$  для режима работы усилителя по постоянному току. Сравните результаты теоретического расчета с результатами, полученными в ходе прямого измерения.

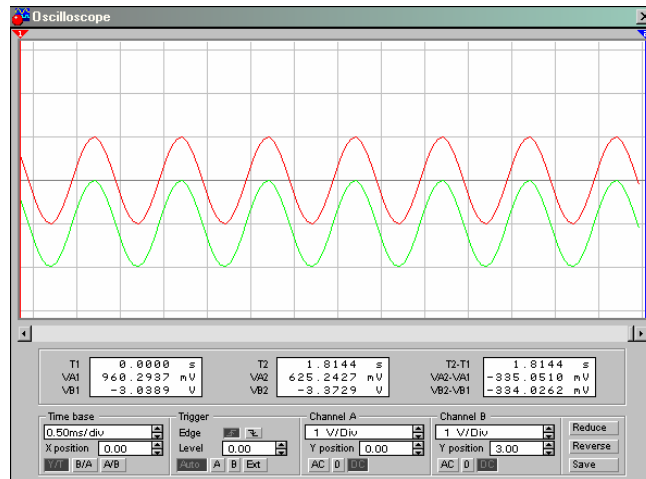


Рис. 5.3. Осциллограммы на входе и выходе усилителя

3.3. Исследование амплитудной характеристики усилителя. Для двух случаев нагрузки на выходе усилителя (по указанию преподавателя) и частоты входного сигнала 1 кГц постройте амплитудную характеристику. Определите динамический диапазон усилителя. Данные измерений сведите в таблицу.

$R_H =$		$R_H =$	
$U_{вх}, мВ$	$U_{вых}, мВ$	$U_{вх}, мВ$	$U_{вых}, мВ$

3.4. Исследование амплитудно-частотной характеристики усилителя. Для двух случаев нагрузки постройте АЧХ усилителя. Определите полосу пропускания усилителя. Результаты измерений сведите в таблицу, аналогичную приведенной выше.

3.5. Измерение входного сопротивления эмиттерного повторителя. Для измерения входного сопротивления включите в схему, приведенную на рис. 5.2, переменный резистор последовательно перед емкостью  $C1$ . Измерение входного сопротивления проводить путем изменения сопротивления переменного резистора до величины, при которой входное напряжение эмиттерного повторителя уменьшается в два раза по сравнению с величиной выходного напряжения генератора импульсов. Входное сопротивление каскада при этом будет равно значению сопротивления переменного резистора.

3.6. Исследование прохождения импульсных сигналов. Для четырех частот (по указанию преподавателя) получить осциллограммы прохождения импульсных сигналов.

#### **4. Содержание отчета**

Отчет оформляет каждый студент самостоятельно. Защита проходит в начале каждого следующего занятия с демонстрацией работы устройства на ЭВМ (при необходимости). Студент, не подготовивший или не защитивший отчет по работе, к следующей лабораторной работе не допускается.

4.1. Цель работы.

4.2. Схема электрическая принципиальная исследуемого ЭП.

4.3. Результаты исследований и измерений, сведенные в таблицы; графики, построенные по полученным значениям, и результаты расчетов.

4.4. Результаты виртуального исследования ЭП.

#### **5. Контрольные вопросы**

5.1. Как влияет ООС на качественные показатели ЭП? Типы ООС.

5.2. В каких случаях целесообразно использовать ЭП?

5.3. Каково усиление по току, напряжению, мощности ЭП?

5.4. Почему коэффициент усиления по напряжению ЭП меньше единицы?

5.5. Каковы преимущества и недостатки схемы включения транзистора с общим коллектором?

### **Лабораторная работа № 6**

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХТАКТНОГО УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ**

Цель работы. Исследовать двухтактный усилитель мощности, определить основные параметры схемы.

Оборудование. Осциллограф С1-73 (или аналогичный), лабораторный стенд 87Л-01, среда схемотехнического моделирования Electronics WorkBench (Multisim).

## 1. Общие сведения

Классическая схема усилителя мощности диапазона звуковых частот приведена на рис. 6.1. Эта схема состоит из входного каскада класса А, выполненного на транзисторе  $VT1$ , и оконечного каскада класса АВ, выполненного на транзисторах  $VT2$  и  $VT3$ . Каскад класса А обеспечивает усиление по напряжению и по мощности для того, чтобы довести слабый входной сигнал до уровня, пригодного для раскачивания мощного каскада класса АВ.

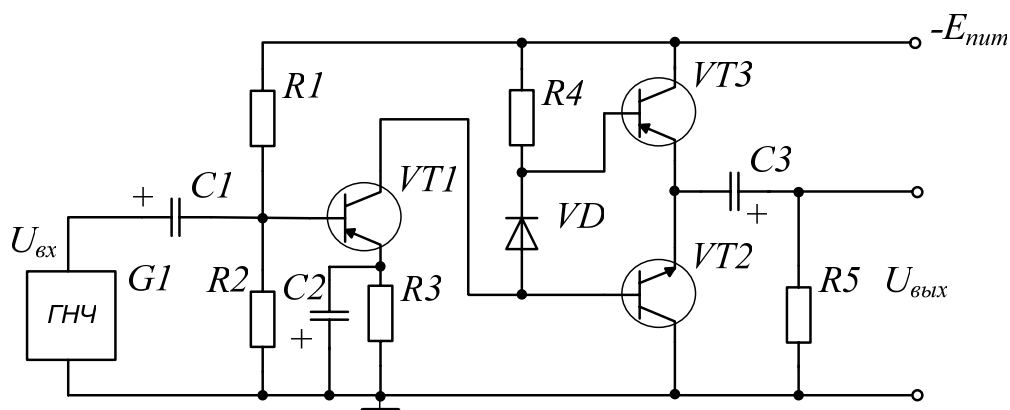


Рис. 6.1. Схема двухтактного усилителя мощности:  $R1 = 33 \text{ кОм}$ ;  $R2 = 5,1 \text{ кОм}$ ;  $R3 = 330 \text{ Ом}$ ;  $R4 = 1,2 \text{ кОм}$ ;  $R5 = R_n = 10 \text{ Ом}$ ;  $C1 = 20 \text{ мкФ}$ ;  $C2 = 50 \text{ мкФ}$ ;  $C3 = 50 \text{ мкФ}$ ;  $VD$  – КД103;  $VT1, VT3$  – МП40А;  $VT2$  – МП39А

Стабилизация рабочей точки входного каскада достигается применением базового делителя напряжения. Эмиттерное сопротивление зашунтировано конденсатором  $C2$  с тем, чтобы устранить отрицательную обратную связь (ООС) по переменному току. При фиксированном постоянном напряжении на базе  $VT1$  вследствие падения напряжения на эмиттерном резисторе  $R5$  возникает последовательная обратная связь по постоянному току. При увеличении коллекторного тока потенциал эмиттера будет также изменяться, что приведет к уменьшению напряжения между базой и эмиттером, а значит, и базового тока, что, в свою очередь, приведет к уменьшению коллекторного тока, чем и достигается стабилизация рабочей точки. При отсутствии конденсатора  $C2$  происходит уменьшение усиления.



Выходной каскад представляет собой эмиттерный повторитель, а мощность в нагрузке ограничена конечным значением тока, протекающего через резистор  $R_5$ . При положительных входных сигналах транзистор  $VT_2$  работает как эмиттерный повторитель, а транзистор  $VT_5$  заперт, при отрицательных входных напряжениях - наоборот.

Таким образом, транзисторы  $VT_2$  и  $VT_3$  работают попеременно, каждый в течение одного полупериода входного напряжения. Такой режим работы схемы называют двухтактным режимом класса В. Ток, потребляемый от источника напряжения, равен току в нагрузке. Схема обладает более высоким КПД, чем обычный эмиттерный повторитель. Однако работа в классе В может привести к появлению переходного искажения. Из открытого состояния в закрытое транзистор переходит за определенный промежуток времени. Если длительность колебаний входного напряжения меньше этого промежутка времени, оба транзистора могут оказаться открытыми. При этом через них течет большой ток, который может привести к мгновенному разрушению транзисторов. При работе в классе В на результирующей амплитудной характеристике появляется излом вблизи нуля, так как вблизи нуля ток в открытом транзисторе очень мал, а внутреннее сопротивление велико (рис. 6.2).

При задании небольшого тока покоя транзисторов их внутреннее сопротивление уменьшается, а переходная характеристика изменяется и принимает вид, изображенный на рис. 6.3. Пунктиром показаны переходные характеристики отдельных транзисторов. Если задать ток покоя равным максимальному току нагрузки, то такой режим называется двухтактным класса А. Однако переходные искажения уменьшаются, если ток покоя составит незначительную часть максимального тока. Такой режим работы называется двухтактным режимом АВ. Для обеспечения малого тока покоя следует приложить постоянное смещение порядка 0,7 В между базовыми выводами  $VT_2$  и  $VT_5$ . В этом случае возникает разность потенциалов на входе и выходе. Такое смещение обеспечивается включением диода  $VD$  между базами транзисторов  $VT_2$  и  $VT_3$ .

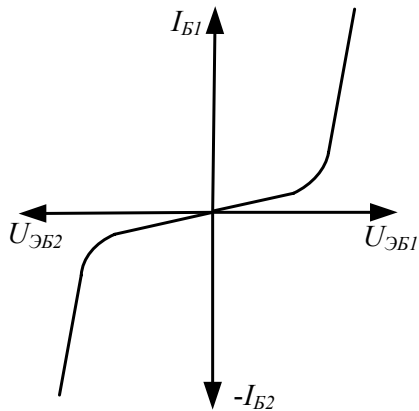


Рис. 6.2. ВАХ транзисторов

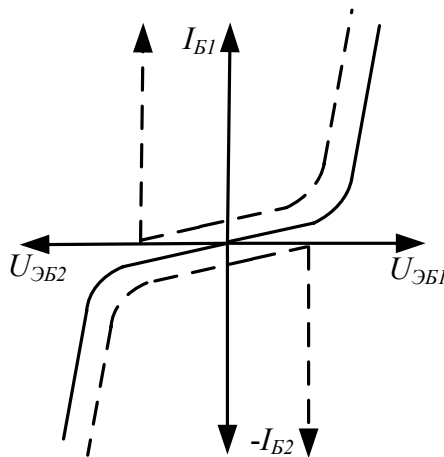


Рис. 6.3. Переходная характеристика

## 2. Методика выполнения работы на стенде

2.1. При обесточенном лабораторном стенде под руководством преподавателя из деталей собрать схему усилителя, представленную на рис. 6.1. При этом особое внимание обратить на полярность включения элементов.

### 2.2. Исследование усилителя

2.2.1. Проверить режим работы транзисторов и определить основные параметры схемы по постоянному току при  $U_{пит} = 10$  В.

2.2.2. Снять амплитудную характеристику усилителя для частого входного сигнала 1 кГц. Данные измерений свести в таблицу. Построить зависимость  $U_{вых} = f(U_{вх})$ .

$U_{вх},$ В	
$U_{вых},$ В	

2.2.3. Зарисовать осциллограммы синусоидального сигнала на выходе усилителя при  $R5 = 10$  Ом. Исключить из схемы диод смещения путем установки перемычки между гнездами х5 и х8 и зарисовать осциллограмму сигнала на выходе усилителя. Повторить измерения при  $R5 = 200$  Ом.

2.2.4. Снять частотную характеристику усилителя при  $R5 = \infty$ ,  $U_{вх} = 75$  мВ. Данные измерений свести в нижеследующую таблицу и построить зависимость  $U_{вых} = F(f_{вх})$ . Диапазон исследуемых частот от 40 Гц до 30 кГц. Определить полосу пропускания усилителя  $\Delta f$ .

$f_{вх}, \Gamma\text{Ц}$	
$U_{ввых}, \text{В}$	

### 3. Исследование схемы двухтактного усилителя мощности в среде схемотехнического моделирования Electronics WorkBench (Multisim)

3.1. Соберите схему двухтактного усилителя мощности в среде Electronics Workbench (Multisim) (рис. 6.4). Настройте необходимые параметры моделирования и получите осциллограммы на входе и выходе схемы (рис. 6.5).

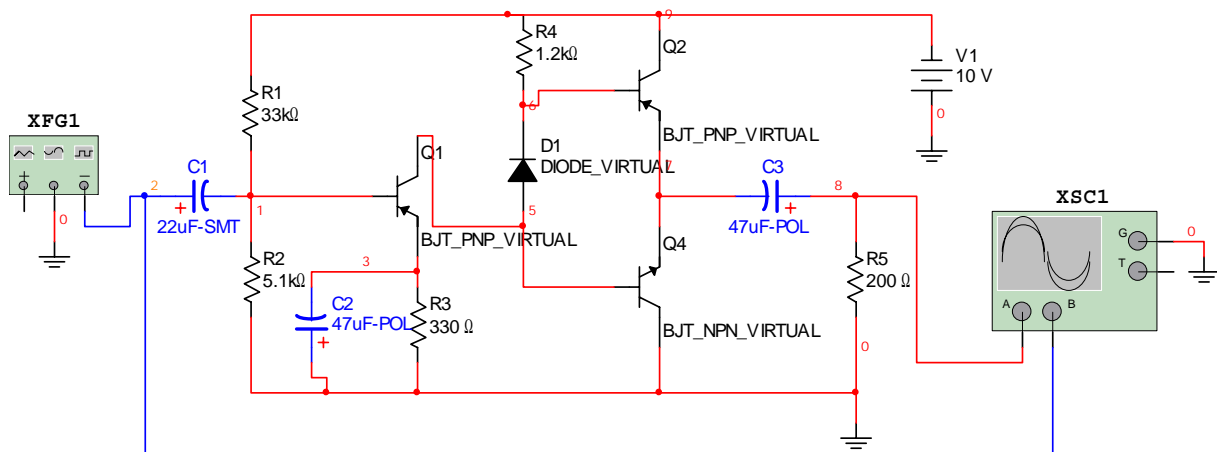


Рис. 6.4. Схема двухтактного усилителя мощности в среде схемотехнического моделирования Multisim



Рис. 6.5. Результаты моделирования схемы

3.2. Снять амплитудную характеристику усилителя для частоты входного сигнала 1 кГц. Данные свести в таблицу. Построить характеристику  $U_{вых} = f(U_{вх})$ . Сравнить с результатами, полученными при прямом измерении.

$U_{вх}, В$	
$U_{вых}, В$	

3.3. Изменяя сопротивление резистора  $R5$  (10 Ом, 200 Ом, 1 кОм), получить осциллограммы выходного сигнала. Исследовать работу схемы с диодом и без него. Сравнить результаты с экспериментальными данными.

3.4. Получить частотную характеристику усилителя при  $R5=\infty$ ,  $U_{вх}=75$  мВ. Данные измерений свести в таблицу. Построить зависимость  $U_{вых} = F(f_{вх})$ . Определить полосу пропускания усилителя  $\Delta f$ . Сравнить с экспериментально полученными значениями.

$f_{вх}, Гц$	
$U_{вых}, В$	

#### 4. Содержание отчета

Отчет оформляет каждый студент самостоятельно. Защита проходит в начале каждого следующего занятия с демонстрацией работы устройства на ЭВМ (при необходимости). Студент, не подготовивший или не защитивший отчет по работе, к следующей лабораторной работе не допускается.

4.1. Цель работы.

4.2. Схема электрическая принципиальная исследуемого усилителя.

4.3. Результаты исследований, измерений и расчетов, графики, построенные по результатам прямых измерений.

4.4. Результаты исследования двухтактного усилителя мощности в среде схемотехнического моделирования.

4.5. Выводы по работе.

## 5. Контрольные вопросы

- 5.1. Дать определение основных параметров усилителя.
- 5.2. Объяснить принцип действия усилителя.
- 5.3. Объяснить назначение каждого элемента схемы.

### Лабораторная работа № 7

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы. Изучить схему построения дифференциального усилителя постоянного тока, провести балансировку схемы, определить режим работы транзисторов по постоянному току.

Оборудование. Осциллограф CI-73, лабораторный стенд 87Л-01, среда схемотехнического моделирования Electronics WorkBench (Multisim).

### 1. Общие сведения

В настоящее время наибольшее распространение получили дифференциальные (параллельно-балансные, или разностные) усилители. Они отличаются высокой стабильностью работы, малым дрейфом нуля, большими коэффициентами усиления дифференциального сигнала и подавления синфазных помех.

На рис. 7.1 приведена принципиальная схема простейшего варианта дифференциального усилителя (ДУ). ДУ выполнен по принципу сбалансированного моста, два плеча которого образованы резисторами  $R3$ ,  $R8$ , а два других - транзисторами  $VT1$ ,  $VT2$ . Сопротивление нагрузки включается между коллекторами транзисторов (точки 2 и 3 на схеме), т.е. в диагональ моста. Резистор  $R6$  имеет небольшую величину, а часто вообще отсутствует, поэтому можно считать, что резистор  $R7$  подключен к эмиттерам транзисторов.

Питание ДУ осуществляется от двух источников, напряжения которых по модулю равны друг другу. Суммарное напряжение питания ДУ равно  $2E_{пит}$ . Использование второго источника  $-E_{пит}$  – позволяет снизить потенциалы эмиттеров  $VT1$  и  $VT2$  до потенциала общей шины. Это позволяет подавать сигналы на входы ДУ без введения дополнительных компенсирующих напряжений.

При анализе работы ДУ принято выделять в нем два общих плеча, одно из которых состоит из  $VT1$ ,  $R3$  и части резистора  $R5$ , а другое – из  $VT2$ ,  $R8$  и другой части резистора  $R5$ . Каждое плечо является каскадом усиления по схеме с общим эмиттером. В общую цепь эмиттеров транзисторов включен резистор  $R7$ , который задает общий ток каскадов.

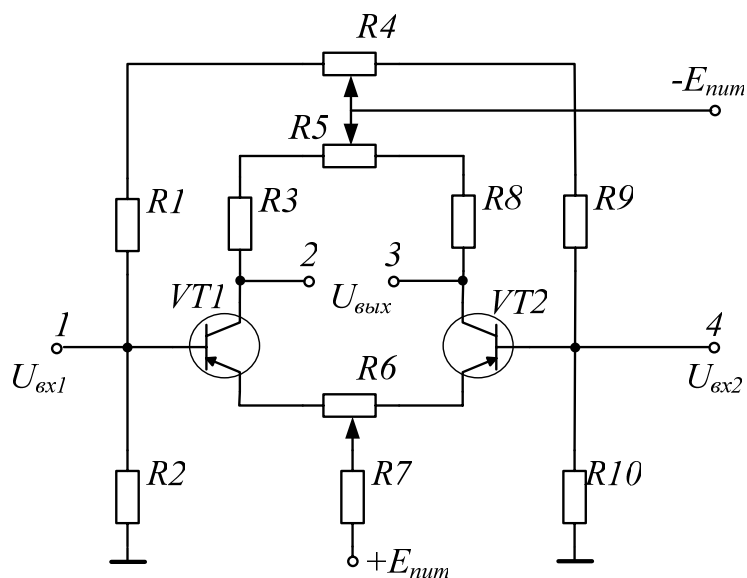


Рис. 7.1. Схема дифференциального усилителя:  $R1=R9=12$  кОм;  $R2=R10=1$  кОм;  $R4=2,2$  кОм (переменный);  $R5=1$  кОм (переменный);  $R6=470$  Ом (переменный);  $R7=2,2$  кОм;  $R3=R8=3$  кОм;  $VT1, VT2$  – МП40

Реальным ДУ предъявляются два основных требования. Первое требование состоит в симметрии обоих плеч ДУ. Необходимо обеспечить идентичность параметров каскадов ОЭ. При этом должны быть одинаковыми параметры транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ , а также  $R3 = R8$ . Если первое требование выполнено полностью, то при  $U_{вх1} = U_{вх2} = 0$  достигается полный баланс моста, т.е. потенциалы коллекторов транзисторов одинаковы, следовательно, напряжение на нагрузке равно нулю. При одинаковом дрейфе нуля в обоих каскадах ДУ потенциалы коллекторов будут изменяться одинаково, поэтому дрейф нуля на выходе ДУ будет отсутствовать, однако при изготовлении ДУ на дискретных элементах выполнить первое требование чрезвычайно сложно. Второе требование состоит в обеспечении глубокой отрицательной обратной связи для синфазного сигнала. Синфазные сигналы

обычно обусловлены наличием помех, наводок и т.д. Они могут иметь амплитуду, заметно превышающую полезный сигнал, и являются крайне нежелательными. Второе требование выполняется за счет введения в ДУ резистора  $R7$ . Если на вход ДУ поступает сигнал синфазной помехи, то транзисторы приоткроются и токи их эмиттеров возрастут. Через резистор  $R7$  будет протекать суммарное приращение этих токов, образующее на нем сигнал ООС по току. Коэффициент усиления по напряжению синфазных сигналов каскадов уменьшится.

Рассмотрим работу ДУ при подаче дифференциального сигнала. Дифференциальными принято называть сигналы, имеющие одинаковые амплитуды, но противоположные фазы. Если  $U_{вх1}$  представляется отрицательной полуволной, а  $U_{вх2}$  – положительной, то транзистор  $VT1$  приоткрывается и ток его эмиттера увеличивается на  $\Delta I_{Э1}$ , а  $VT2$  прикрывается, его ток уменьшается на  $\Delta I_{Э2}$ . В результате изменение тока в цепи резистора  $R7$   $\Delta I_{RЭ} = \Delta I_{Э1} - \Delta I_{Э2}$ . Если общие плечи ДУ идеально симметричны, то  $\Delta I_{RЭ} = 0$  и ООС для дифференциального сигнала отсутствует. Так как в реальных ДУ идеальную симметрию плеч создать нельзя, то  $R7$  и для дифференциального сигнала будет создавать ООС, тем меньшую, чем лучше симметрия плеч. Для обеспечения приемлемой симметрии плеч в них устанавливаются подстроечные резисторы, или потенциометры.

## 2. Методика выполнения работы на стенде

2.1. Из элементов, подготовленных к работе, собрать схему ДУ (см. рис. 7.1). Установить с помощью осциллографа напряжение  $E_{пит} = \pm 7,5$  В на ГН1 и ГН2. Подать напряжение питания на ДУ, строго соблюдая указанную в схеме полярность.

2.2. Провести балансировку схемы ДУ. Для этого вращением ручек потенциометров  $R4$ ,  $R5$ ,  $R6$  добиться значения  $U_{вых} = 0$ . При этом входы ДУ должны быть соединены между собой.

2.3. Измерить выходное напряжение ДУ при подаче напряжения  $U_{вх}$  от 0,1 до 7 В на обе базы транзисторов  $VT1$  и  $VT2$  одновременно. Результаты измерений свести в таблицу. Построить график зависимости  $U_{вых} = f(U_{вх})$ .

2.4. Измерить отдельно потенциал каждой из баз транзисторов. Подавая входное напряжение от источника ГНЗ только на одну из баз (входов) ДУ, измерить напряжение на выходе ДУ. Результаты свести в таблицу и построить график  $U_{вых} = f(U_{вх})$ .

### 3. Исследование схемы дифференциального усилителя в среде схемотехнического моделирования Electronics WorkBench (Multisim)

3.1. Собрать схему дифференциального усилителя в среде Electronics Workbench (Multisim) (рис. 7.2). Настроить необходимые параметры моделирования и получить осциллограммы на выходе схемы (рис. 7.3).

3.2. Провести балансировку схемы дифференциального усилителя. Входы ДУ соединить между собой, измерить напряжение на выходе.

3.3. Измерить напряжение на выходе при разных входных напряжениях. Результаты свести в таблицу, построить график  $U_{вых} = f(U_{вх})$ .

3.4. С помощью вольтметров измерить отдельно потенциал каждой базы транзисторов. Подавая входное напряжение от источника ГНЗ только на одну из баз (входов) ДУ, измерить напряжение на выходе ДУ. Результаты свести в таблицу и построить график  $U_{вых} = f(U_{вх})$ .

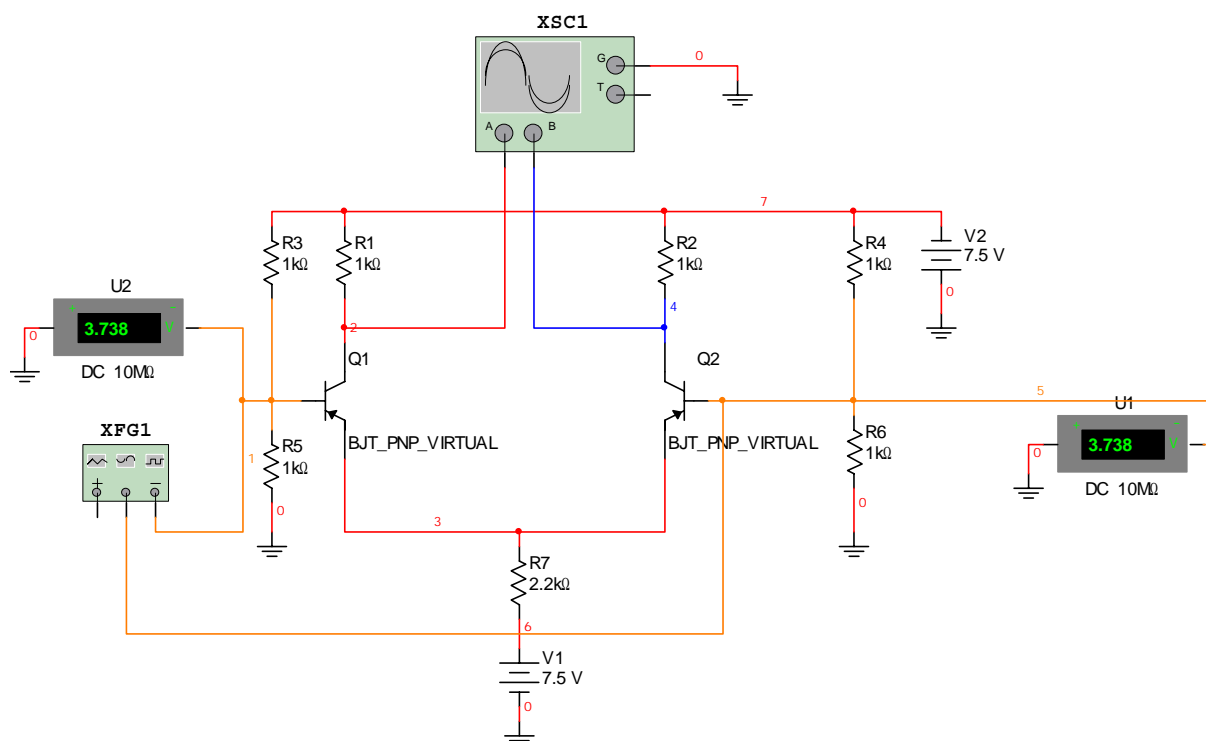


Рис. 7.2. Схема дифференциального усилителя в среде Multisim



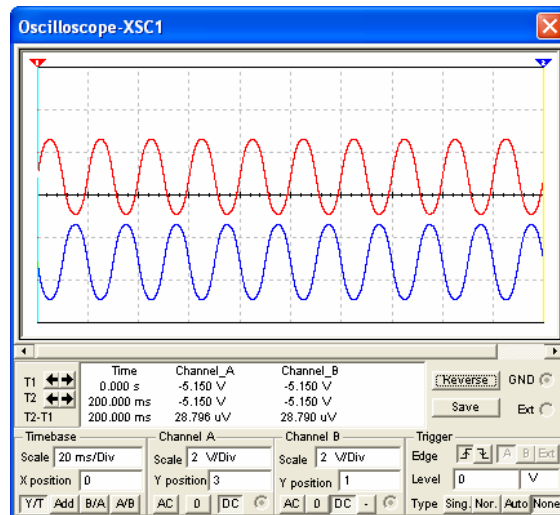


Рис. 7.3. Результаты моделирования работы дифференциального усилителя в среде Multisim

#### 4. Содержание отчета

Отчет оформляет каждый студент самостоятельно. Защита проходит в начале каждого следующего занятия с демонстрацией работы устройства на ЭВМ (при необходимости). Студент, не подготовивший или не защитивший отчет по работе, к следующей лабораторной работе не допускается.

- 4.1. Цель работы.
- 4.2. Схема электрическая принципиальная исследуемого ДУ.
- 4.3. Результаты измерений, сведенные в таблицы, и необходимые графики.
- 4.4. Результаты моделирования дифференциального усилителя в среде Electronics Workbench (Multisim): осциллограммы, графики.
- 4.5. Выводы по работе, отмеченные недостатки, преимущества применения ДУ.

#### 5. Контрольные вопросы

- 5.1. Объясните назначение элементов схемы ДУ.
- 5.2. Объясните цель балансировки ДУ.
- 5.3. Чем вызвана необходимость балансировки ДУ?
- 5.4. Что такое синфазный сигнал?
- 5.5. Что такое дифференциальный сигнал?
- 5.6. Какие паспортные данные транзистора вы знаете?

## Лабораторная работа № 8 ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИВИБРАТОРА

Цель работы. Изучить схему построения симметричного мультивибратора (МВ), исследовать его работу в разных режимах.

Оборудование. Осциллограф CI-73, лабораторный стенд 87Л-01, среда схемотехнического моделирования Electronics WorkBench (Multisim).

### 1. Общие сведения

Мультивибраторы относятся к классу релаксационных генераторов и используются для получения прямоугольных импульсов с крутыми фронтами. Симметричный МВ, работающий в автоколебательном режиме, представляет собой генератор прямоугольных колебаний, имеющих вид меандра. Скважность импульсов  $Q = 2$ . На рис. 8.1 приведена наиболее распространенная схема МВ на транзисторах  $p-n-p$ -типа с емкостными коллекторно-базовыми связями. В МВ имеют место два неустойчивых состояния равновесия, когда один из транзисторов закрыт, а другой открыт. Переход из одного состояния равновесия в другое происходит скачком. Пусть в начальный момент транзистор  $VT1$  открылся, а  $VT2$  закрылся. Открытие транзистора  $VT1$  обусловлено прекращением разряда конденсатора  $C4$  и появлением на его базе отрицательного напряжения, подаваемого через резистор  $R3$ .

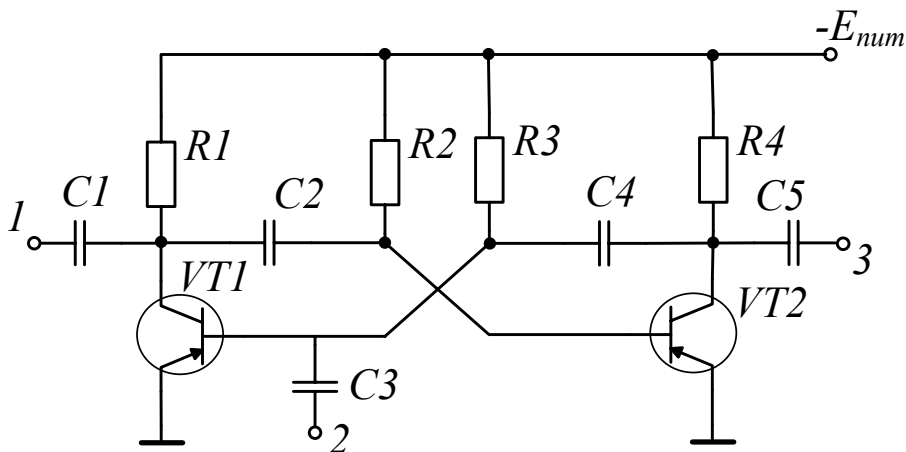


Рис. 8.1. Схема мультивибратора:  $R1=R4=1,2$  кОм;  $R2=R3=33$  кОм;  $C1=C5=0,1$  мкФ;  $C2=C4=0,022$  мкФ;  $C3=0,033$  мкФ;  $VT1, VT2$  – МП40

Пока транзистор  $VT1$  открыт, через него и  $R3$  происходит разряд конденсатора  $C4$ . По мере разряда дополнительное напряжение на базе транзистора  $VT2$  уменьшается, а через определенный промежуток времени транзистор  $VT2$  открывается. При этом конденсатор  $C2$  начинает разряжаться через транзистор  $VT1$  и резистор  $R2$ , закрывая своим напряжением  $VT2$ . В это время конденсатор  $C4$  будет заряжаться через эмиттерный переход транзистора  $VT1$  и резистор  $R3$ . МВ является симметричным, когда длительность открытого состояния одинакова для каждого из транзисторов. Для симметричного МВ  $R1=R4$ ,  $R2=R3$ ,  $C2=C4$ . Возможны автоколебательный и ждущий режимы работы, мультивибраторов. В ждущем режиме (или режиме синхронизации) частота колебаний МВ поддерживается равной или кратной частоте внешнего синхронизирующего напряжения (импульсного или синусоидального). Полярность импульсов синхронизации должна быть отрицательная, отпирающая транзисторы  $p-n-p$ -типа. Для устойчивости работы период повторения синхроимпульсов должен быть несколько меньше периода собственных колебаний МВ.

## 2. Методика выполнения работы на стенде

2.1. Из элементов, подготовленных к работе, собрать схему МВ (см. рис. 8.1). Подать на схему напряжение питания  $E_{пит} = -12$  В. При помощи осциллографа измерить и зарисовать в масштабе эпюры напряжений на выходе МВ и на базе одного из транзисторов. Определить период собственных колебаний МВ.

2.2. Исследовать работу МВ. Для этого, изменяя значения конденсаторов  $C2$  и  $C4$ , определить, как изменяется период колебаний МВ. Результаты измерений свести в таблицу. Аналогично определить влияние изменения базовых сопротивлений на период колебаний МВ путем дискретного изменения этих сопротивлений. Результаты также свести в таблицу.

2.3. Исследовать работу МВ в режиме синхронизации. Для этого подать на клемму "2" макета напряжение с генератора ГПИ. Определить, как изменяется частота колебаний МВ с изменением напряжения на выходе синхронизирующего генератора. Зарисовать в масштабе эпюры напряжений на выходе МВ и на базе одного из транзисторов.

### 3. Исследование схемы мультивибратора в среде схемотехнического моделирования Electronics WorkBench (Multisim)

В схеме на рис. 8.2 конденсаторы  $C1$  и  $C2$  специально выбраны разных номиналов для обеспечения возбуждения колебаний в среде Electronics Workbench.

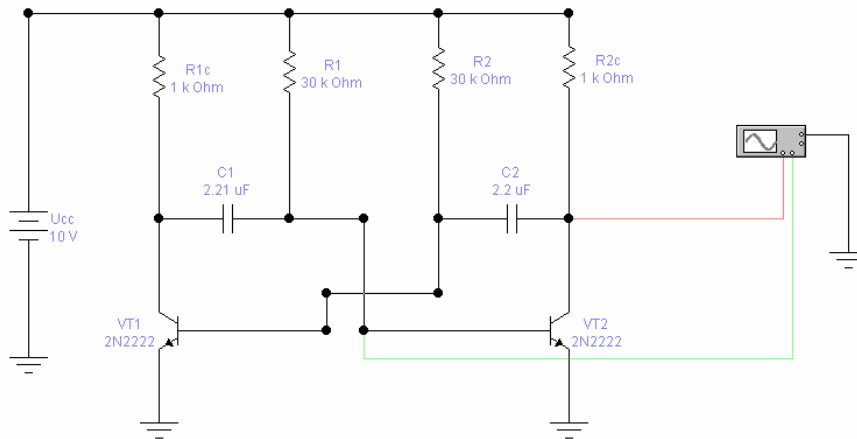


Рис. 8.2. Схема мультивибратора

Классическая схема мультивибратора содержит два ключа на транзисторах  $VT1$ ,  $VT2$  и времязадающие (хронирующие)  $R1C1$ -,  $R2C2$ -цепи. Переход из одного состояния равновесия в другое происходит скачком.

Если за исходное состояние мультивибратора принять положение, соответствующее установке визирной линейки (рис. 8.3), то можно констатировать, что транзистор  $VT2$  открыт, при этом напряжение на его коллекторе (осциллограмма А)  $VA1 \approx 70$  мВ, а на базе (осциллограмма В)  $VB1 \approx 0,7$  В.

При дальнейшем незначительном уменьшении этого напряжения транзистор  $VT2$  закрывается, после чего на его коллекторе начинает формироваться передний фронт выходного импульса. Как видно из осциллограммы А, этот фронт имеет экспоненциальную форму, поскольку при этом происходит заряд конденсатора  $C2$  по цепи  $R2c$ - $C2$ -база  $VT1$ , приводящий к открытию транзистора  $VT1$  и, следовательно, к подключению к базе  $VT2$  конденсатора  $C1$ , заряженного до напряжения, примерно равного  $U_{cc} - VB1 - VA1$ , и разряжающегося через открытый  $VT1$  и резистор  $R1$ . Разряд конденсатора  $C1$  происхо-

дит до напряжения  $V_{B1} \approx 0,7$  В, после чего транзистор  $VT2$  закрывается и аналогичным образом начинается формирование паузы. Заметим, что в разряде конденсатора  $C1$  принимает также участие тепловой ток закрытого транзистора  $VT2$ . Если этим током пренебречь, что является вполне приемлемым для кремниевых транзисторов (например, для 2N2222 он равен около  $10^{-10}$  А), то длительность выходного импульса определится формулой

$$T_{и} = 0,7 \cdot R1 \cdot C1,$$

а длительность паузы – формулой

$$T_{п} = 0,7 \cdot R2 \cdot C2,$$

т.е. период колебаний

$T = T_{и} + T_{п} = 0,7(R1 \cdot C1 + R2 \cdot C2) = 0,7(30 \cdot 10^3 \cdot 2,21 \cdot 10^{-6} + 30 \cdot 10^3 \cdot 2,22 \cdot 10^{-6}) = 92,8$  мс, что достаточно близко к полученному при моделировании,  $T2 - T1 = 94$  мс.

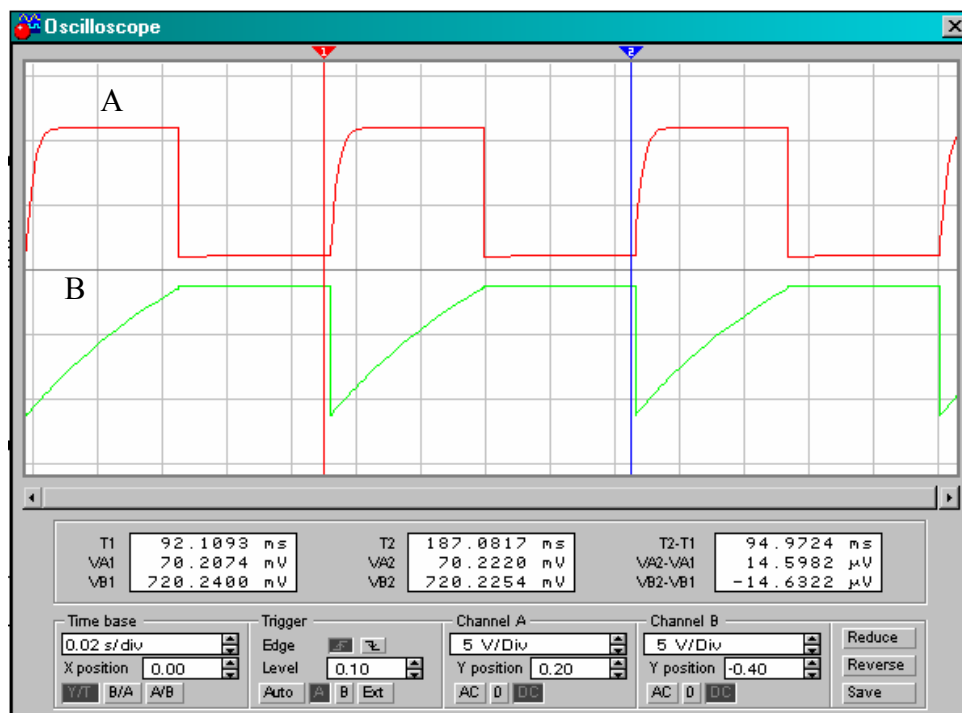


Рис. 8.3. Осциллограмма работы схемы МВ

Мультивибратор может работать в двух режимах – автоколебательном и ждущем (режиме синхронизации). В ждущем режиме частота колебаний МВ поддерживается равной или кратной частоте внешнего синхронизирующего напряжения (импульсного или синусоидального). Полярность импульсов синхронизации должна быть

положительная, отпирающая транзисторы *n-p-n*-типа. Для устойчивости работы период повторения синхроимпульсов должен быть несколько меньше периода собственных колебаний МВ.

3.1. Соберите схему МВ в среде Electronics Workbench. Настройте необходимые параметры моделирования и получите осциллограммы колебаний МВ на базах и коллекторах транзисторов. Определите период колебаний МВ и скважность импульсов.

3.2. Рассчитайте длительности импульса  $T_{и}$  и паузы  $T_{п}$  по формулам, приведенным выше, и сравните расчетные результаты с результатами, полученными в п. 3.1.

3.3. Исследуйте зависимость периода колебаний МВ от номиналов конденсаторов  $C1$  и  $C2$ . Для этого, изменяя их значение, определите период колебаний МВ, результаты измерений сведите в таблицу.

3.4. Аналогично п. 3.3, определите зависимость периода колебаний МВ от номиналов резисторов  $R1$  и  $R2$ . Результаты измерений сведите в таблицу.

3.5. Поставьте на стенде в схеме на (см. рис. 8.2) конденсаторы  $C1$  и  $C2$  разных номиналов. Определите, как изменится скважность импульсов. Результаты сведите в таблицу.

3.6. Исследование работы МВ в режиме синхронизации. В схеме, представленной на рис. 8.2, подайте на базу транзистора  $V_{T1}$  сигнал с генератора импульсов (для версии Electronics Workbench 5.12 можно использовать «Function generator»). Определите, как изменяется частота колебаний МВ с изменением частоты импульсов на выходе синхронизирующего генератора. Результаты измерений сведите в таблицу.

#### 4. Содержание отчета

Отчет оформляет каждый студент самостоятельно. Защита проходит в начале каждого следующего занятия с демонстрацией работы устройства на ЭВМ (при необходимости). Студент, не подготовивший или не защитивший отчет по работе, к следующей лабораторной работе не допускается.

4.1. Цель работы.

4.2. Схема электрическая принципиальная исследуемого МВ.

4.3. Результаты измерений, сведенные в таблицы, и необходимые графики.

4.4. Результаты моделирования работы мультивибратора в среде Electronics Workbench (Multisim): осциллограммы, таблицы, графики.

4.5. Выводы по работе, отмеченные недостатки, преимущества и область применения мультивибраторов.

## **5. Контрольные вопросы**

5.1. Объясните назначение элементов схемы симметричного МВ.

5.2. Поясните работу схема мультивибратора.

5.3. Покажите направления токов в коллекторных и базовых цепях схемы МВ.

5.4. Покажите пути и направления токов заряда и разряда время-задающих конденсаторов.

5.5. Какими параметрами схемы определяется длительность импульсов, генерируемых МВ?

5.6. Чему равна скважность импульсов в симметричном МВ? Как можно изменить скважность импульсов?

5.7. Что такое симметричный мультивибратор?

5.8. Поясните работу МВ в режиме синхронизации.

5.9. Каково условие осуществления внешней синхронизации МВ и чем оно объясняется?

5.10. Способы регулирования длительности импульсов. Их особенности.

## **Лабораторная работа № 9**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ЛИНЕЙНО ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ (ГЛИН)**

Цель работы. Изучить процессы, протекающие при заряде и разряде конденсатора постоянным по величине током, исследовать ГЛИН и определить параметры последовательности импульсов линейно изменяющейся формы.

Оборудование. Осциллограф СІ-73 (или аналогичный), лабораторный стенд 87Л-01, среда схемотехнического моделирования Electronics WorkBench (Multisim).

## 1. Общие сведения

Напряжение линейно изменяющейся формы пилообразное, обычно получают с помощью емкостной интегрирующей цепи или интегрирующего усилителя, периодически заряжая и разряжая конденсатор, поэтому ГЛИН часто называют интеграторами. Упрощенная схема ГЛИН показана на рис. 9.1:  $R$  и  $C$  образуют интегрирующую цепь, а ключ Кл служит для переключения конденсатора  $C$  с разряда на заряд и наоборот. Сопротивление  $R$  можно рассматривать как вынесенное сопротивление замкнутого ключа. На рис. 9.2 представлена форма напряжения, получаемого при замыкании и размыкании ключа. Это напряжение характеризуется следующими параметрами:

$t_p$  - длительность рабочего (прямого) хода;

$t_b$  - время восстановления (длительность обратного хода);

$T$  - период следования импульсов;

$U_m$  - амплитуда импульсов.

Коэффициент нелинейности  $\zeta$  показывает степень отклонения реального напряжения от идеально линейно изменяющегося и определяется формулой

$$\zeta = \frac{U'_{\max} - U'_{\min}}{U'_{\max}},$$

где  $U'_{\max}$ ,  $U'_{\min}$  - максимальная и минимальная производные по времени от напряжения на конденсаторе. Обычно максимальная производная соответствует начальному участку пилообразного напряжения, а минимальная - конечному. Связывая известной зависимостью  $i_c = C \frac{dU_c}{dt}$  ток через конденсатор с напряжением на нем, выражение

можно записать в следующем виде:

$$\zeta = \frac{I_{c \max} - I_{c \min}}{I_{c \max}} = \frac{I_m}{I_{c \max}},$$

где  $I_{c \max}$ ,  $I_{c \min}$  - максимальное и минимальное значения тока через конденсатор;  $I_m$  - амплитуда тока.



Идеально линейное напряжение на конденсаторе можно получить только в том случае, если ток, протекающий через него, постоянен.

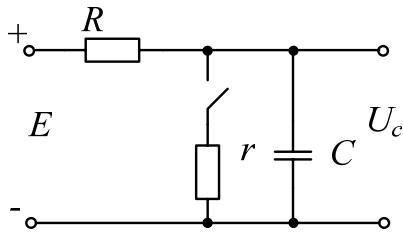


Рис. 9.1. Упрощенная схема ГЛИН

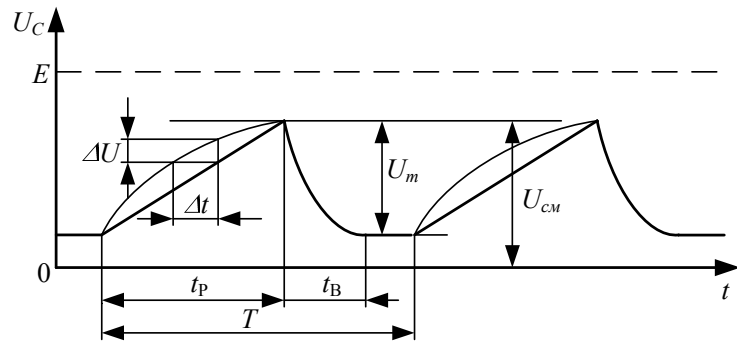


Рис. 9.2. Форма напряжения на выходе ГЛИН

Рассмотрим принцип работы простейшего генератора. При заряде конденсатора от источника постоянного напряжения (см. рис. 9.1) ток заряда  $i_c = \frac{E - U_c}{R}$  по мере увеличения  $U_c$  уменьшается.

Для поддержания постоянства тока  $i_c$  сопротивление  $R$  в процессе заряда необходимо уменьшать. Для этого в качестве зарядного сопротивления необходимо использовать токостабилизирующий нелинейный элемент, вольт-амперная характеристика которого имеет горизонтальный участок. В реальных условиях близкими по форме к идеальным являются ВАХ полупроводниковых транзисторов. Есть и другие способы стабилизации зарядного тока, например компенсационный.

В этом случае зарядный ток можно стабилизировать, подключив последовательно к резистору источник  $U(t)$ , напряжение которого изменяется по тому же закону, что и напряжение на конденсаторе, но в противофазе с ним. Тогда  $i_c = \frac{E - U(t) - U_c}{R}$ . Таким образом, если  $U(t) = -U_c$ , то  $i_c = \frac{E}{R} = \text{const}$ .

Схемы с компенсирующей ЭДС применяются для улучшения линейности пилообразного напряжения. Принципиальная схема управляемого ГЛИН с компенсирующей ЭДС приведена на рис. 9.3. Здесь компенсирующая ЭДС создается с помощью эмиттерного повторителя и коэффициент нелинейности таких устройств достигает 2 - 5 %.

Кл

При отсутствии входных импульсов транзистор  $VT1$  закрыт, а  $VT2$  открыт. Диод  $VD1$  находится в открытом состоянии, а конденсатор  $C2$  заряжен до максимально возможного напряжения. Напряжение на конденсаторе  $C3$  равно напряжению  $U_k$  на коллекторе транзистора. Управляющий импульс отрицательной полярности отпирает  $VT1$ , и через него происходит разряд конденсатора  $C3$ . Напряжение на базе транзистора  $VT2$  относительно земли уменьшается, и транзистор  $VT2$  начинает закрываться. Входным напряжением для  $VT2$  является напряжение на конденсаторе  $C3$ , выходным – напряжение на резисторе  $R3$ . При открытом диоде  $VD1$  резистор  $R5$  через конденсатор большой емкости  $C2$  шунтирован малым сопротивлением диода  $r_n$  в прямом направлении, поэтому коэффициент усиления эмиттерного повторителя значительно меньше единицы, а увеличение  $U_{C3}$  (с учетом полярности) вызывает лишь незначительное увеличение напряжения на резисторе  $R3$ .

А

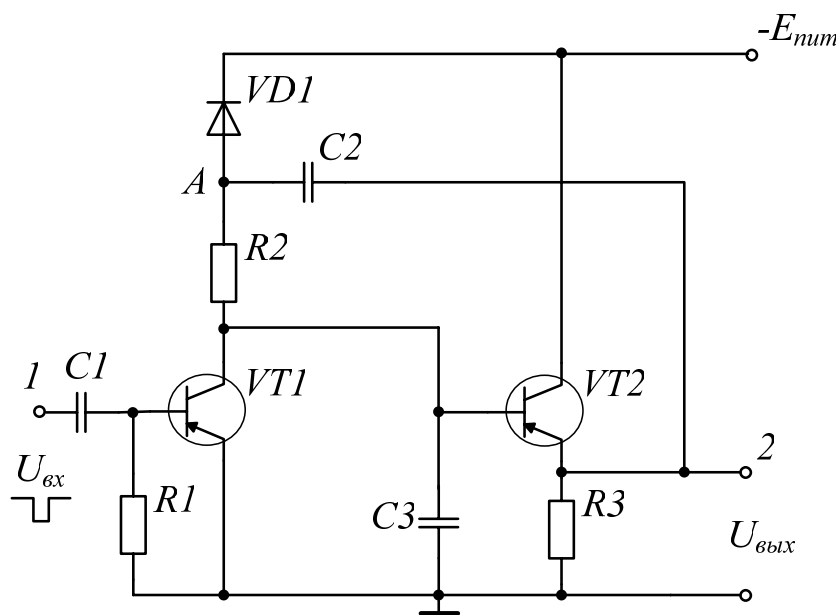


Рис. 9.3. Схема генератора линейно изменяющегося напряжения:  $R1=15$  кОм;  $R2=7,5$  кОм;  $R3=1,6$  кОм;  $C1=0,1$  мкФ;  $C2=0,033$  мкФ;  $C3=0,033$  (0,1; 0,05) мкФ;  $VT1, VT2$  – МП40А;  $VD1$  – КД103

Потенциал точки А (см. рис. 9.3) численно равен сумме напряжений:  $U_A = U_{C2} + U_{R3}$ . Емкость конденсатора  $C2$  велика, поэтому напряжение на нем изменяется незначительно, напротив, увеличение напряжения на  $R5$  приводит к повышению потенциала точки А. Так как в исходном состоянии потенциал этой точки незначительно отли-

чается от  $-E_{num}$ , то изменение  $U_{C3}$  приводит к тому, что потенциал точки А становится ниже  $-E_{num}$  и диод  $VD1$  запирается. Конденсатор  $C3$  продолжает разряжаться, однако сам несколько подзаряжается от конденсатора  $C2$ . Сопротивление диода не шунтирует резистор  $R3$ , и коэффициент усиления эмиттерного повторителя становится близким к единице. В общей цепи разряда напряжения  $U_{C3}$  и  $U_{C2}$  оказываются в противофазе и почти полностью компенсируют друг друга.

## 2. Методика выполнения работы на стенде

2.1. Под руководством преподавателя собрать схему, представленную на рис. 9.3. Номиналы элементов указаны под рисунком. Установить на клеммах источника питания напряжение  $E_{num} = -12$  В, не подключая его к схеме.

2.2. Включить генератор прямоугольных импульсов ГПИ стенда и проверить его работоспособность с помощью осциллографа. Установить предварительную длительность запускающего импульса 0,5 мс и период повторения 1 мс. Подключить ГПИ к схеме. Выключить стенд.

2.3. Подключить  $E_{num}$  к схеме и снова включить тумблером «Сеть».

2.4. Получить изображение выходного сигнала на экране осциллографа и измерить его параметры (амплитуду, длительность прямого и обратного хода, период).

2.5. Изменяя частоту входных (запускающих) импульсов, определить диапазон частот, в котором ГЛИН сохраняет работоспособность.

2.6. Зарисовать в масштабе эпюры напряжений на выходе ГЛИН при последовательно отключенных конденсаторе  $C2$  и диоде  $VD1$ . Сравнить их с рабочими эпюрами ГЛИН.

## 3. Исследование схемы ГЛИН в среде схемотехнического моделирования Electronics WorkBench (Multisim)

3.1. Собрать схему ГЛИН в среде Electronics Workbench (Multisim) (рис. 9.4). Настроить необходимые параметры моделирования и получить осциллограммы колебаний на входе и выходе (рис. 9.5).

3.2. По осциллограммам выходного сигнала определить параметры сигнала – амплитуду, длительность прямого и обратного хода, период.

3.3. Изменяя частоту входных (запускающих) импульсов, определить диапазон частот, в котором ГЛИН сохраняет работоспособность.

3.4. Получить осциллограммы ГЛИН при последовательно отключенных конденсаторе  $C3$  и диоде.

3.5. Изменяя емкость конденсатора  $C2$  и сопротивление резистора  $R3$ , определить диапазон  $C$  и  $R$ , в котором ГЛИН сохраняет работоспособность.

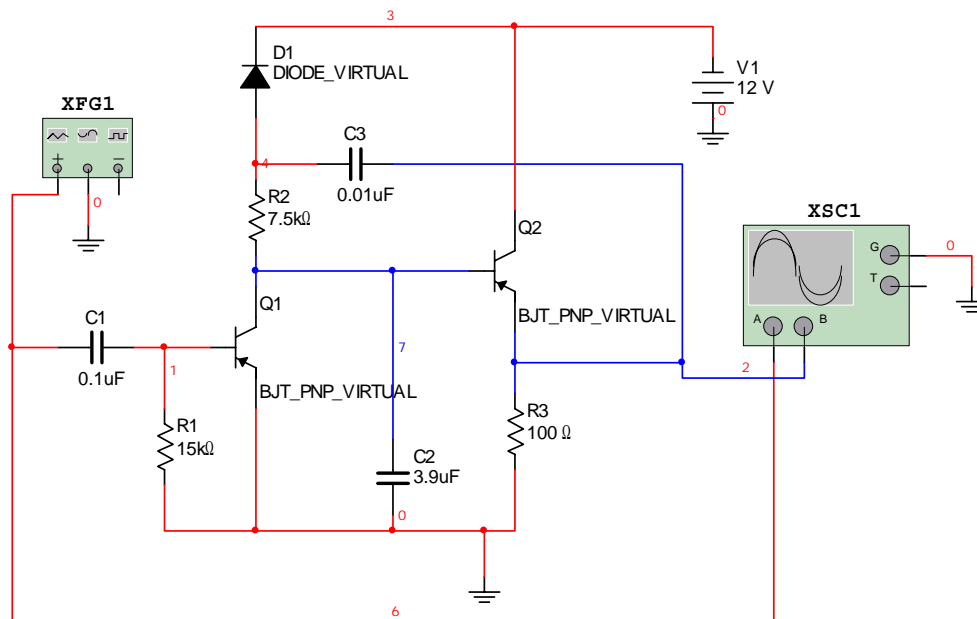


Рис. 9.4. Схема ГЛИН в Multisim

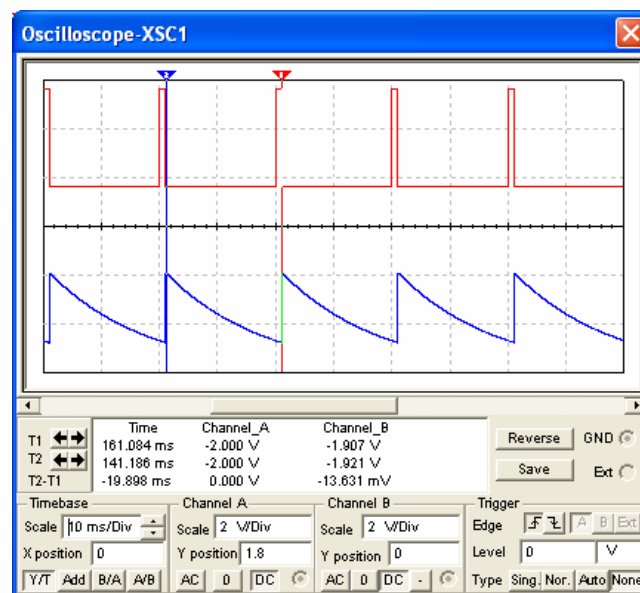


Рис. 9.5. Результаты моделирования ГЛИН в Multisim

#### 4. Содержание отчета

Отчет оформляет каждый студент самостоятельно. Защита проходит в начале каждого следующего занятия с демонстрацией работы устройства на ЭВМ (при необходимости). Студент, не подготовивший или не защитивший отчет по работе, к следующей лабораторной работе не допускается.

- 4.1. Цель работы.
- 4.2. Схема электрическая принципиальная ГЛИН.
- 4.3. Результаты измерений, сведенные в таблицы, и необходимые графики.
- 4.4. Результаты моделирования работы ГЛИН в среде Multisim.
- 4.5. Выводы по работе, отмеченные недостатки, преимущества рассмотренного ГЛИН.

#### 5. Контрольные вопросы

- 5.1. Объясните назначение каждого элемента схемы ГЛИН.
- 5.2. В каком режиме работают транзисторы  $VT1$ ,  $VT2$ ?
- 5.3. Почему период импульсов слабо зависит от напряжения питания?
- 5.4. Каким образом элементы схемы влияют на коэффициент нелинейности линейно изменяющегося напряжения?
- 5.5. Перечислите основные параметры линейно изменяющихся сигналов.
- 5.6. Для каких целей необходимо получение линейно изменяющегося напряжения с малым коэффициентом нелинейности?

### Лабораторная работа № 10 ИССЛЕДОВАНИЕ БЛОКИНГ-ГЕНЕРАТОРА В АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ

Цель работы. Исследовать работу блокинг-генератора.

Оборудование. Осциллограф С1-73 (или аналогичный), лабораторный стенд 87Л-01, среда схемотехнического моделирования Electronics WorkBench (Multisim).

## 1. Общие сведения

Блокинг-генератор является генератором коротких импульсов длительностью до  $10^{-2}$  мкс, повторяющихся с большой скважностью  $Q > 10$ . Он может работать в автоколебательном и ждущем режимах.

Автоколебательный режим. Принципиальная схема блокинг-генератора представлена на рис. 10.1. При подключении в момент времени  $t = 0$  источника питания к коллекторной цепи транзистора (а значит, и базы) транзистор насыщается.

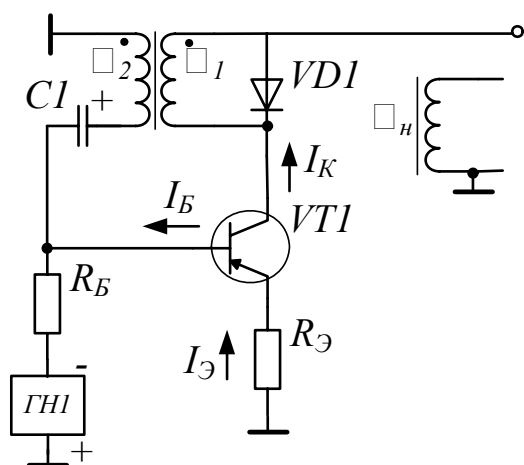


Рис. 10.1. Принципиальная схема блокинг-генератора

Возрастающий коллекторный ток индуктирует во вторичной обмотке трансформатора ЭДС, которая ускоряет насыщение транзистора. Сильная положительная обратная связь приводит к лавинообразному и глубокому насыщению транзистора, происходящему практически мгновенно, процессу релаксации. Вслед за насыщением транзистора  $U_{КЭ} \approx U_{БЭ} \approx 0$  происходит зарядка конденсатора  $C1$  в цепи положительной обратной связи. Считая трансформа-

тор идеальным (т.е. потери отсутствуют), можно для определения изменения напряжения на конденсаторе  $C1$  пользоваться эквивалентной схемой замещения (рис. 10.2), из которой следует:

$$U_{C1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} U_{C1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} E_{num} (1 - e^{-\frac{t}{r'_0 C'1}}),$$

где  $r'_0 = r_0 \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2$ ,  $C'1 = C1 \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2$ ;

$r_0$  - активное сопротивление обмотки  $\omega_1$ .

Зарядка  $C1$  до напряжения, близкого к  $E_{num} \frac{\omega_2}{\omega_1}$ , происходит за малый интервал времени  $\Delta t_1 \approx 3r_0 C1$ , который соответствует (рис. 10.3) длительности импульсов коллекторного тока  $I_K$ .

После окончания зарядки конденсатора  $CI$  начинается процесс его перезарядки от напряжения, близкого к  $E_{num} \frac{\omega_2}{\omega_1}$ , до напряжения  $E_{num}$ , в результате которого транзистор закрывается. Пренебрегая током базы  $I_6$  закрытого транзистора, и полагая, что сопротивление  $r_0 \approx 0$ , найдем напряжение на  $CI$ :

$$U_{C1} = U_{BЭ} = -E_{num} + E_{num} \left(1 + \frac{\omega_2}{\omega_1}\right) e^{-\frac{t-\Delta t_1}{r_0 C1}}.$$

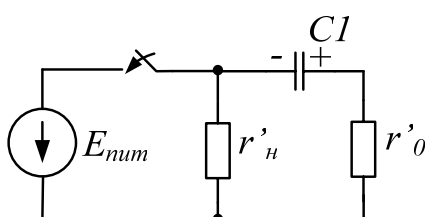


Рис. 10.2. Эквивалентная схема замещения

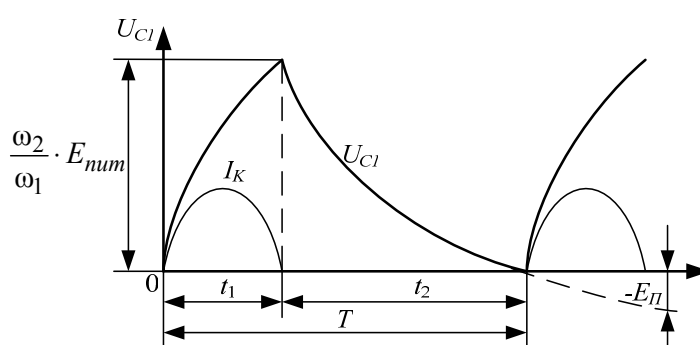


Рис. 10.3. Зарядка  $CI$

Пренебрегая малым значением  $\Delta t_1$ , длительность интервала  $\Delta t_2$  закрытого состояния транзистора блокинг-генератора определим при условии  $U_{BЭ} \geq 0$

$$\Delta t_2 = r_0 C1 \ln \left(1 + \frac{\omega_2}{\omega_1}\right).$$

Переключение транзистора из открытого состояния в закрытое сопровождается быстрым уменьшением потокосцепления с обмотками трансформатора, полярность которого противоположна полярности на обмотках при включении транзистора. Чтобы уменьшить величину напряжения на обмотках трансформатора при запираии транзистора, одну из них обычно шунтируют диодом.

Ждущий режим. Принципиальная схема блокинг-генератора представлена на рис. 10.4.

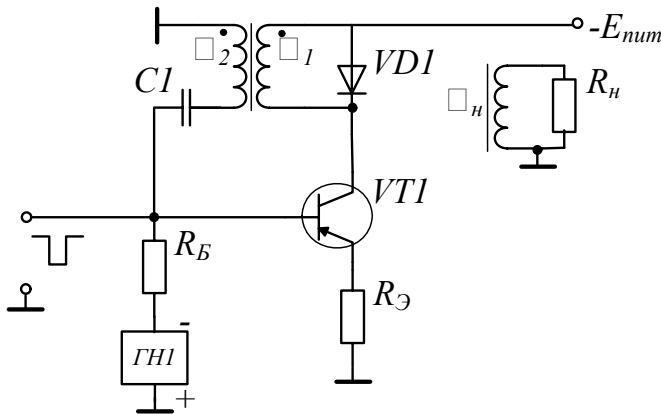


Рис. 10.4. Схема блокинг-генератора

Блокинг-генератор находится в устойчивом состоянии при закрытом транзисторе ( $U_{БЭ} \approx E_B > 0$ ) до тех пор, пока на его вход не поступит импульс напряжения отрицательной полярности. Под действием напряжения  $U_{вх}$  возникает релаксационный процесс, при котором

транзистор открывается. Как и в случае режима автоколебаний, транзистор находится в открытом состоянии  $\Delta t_1 \approx 3r_0 C1$ , после чего снова закрывается, и блокинг-генератор возвращается в устойчивое состояние.

Блокинг-генератор позволяет получить большую скважность импульсов, чем мультивибратор и одновибратор, и осуществить трансформаторную связь с приемником, что в ряде случаев весьма желательно.

## 2. Методика выполнения работы на стенде

2.1. Под руководством преподавателя собрать схему блокинг-генератора (при обесточенном стенде), параметры и номиналы указаны на рис. 10.5.

2.2. Исследовать блокинг-генератор и убедиться в том, что при неправильном включении обмоток генерация не возникает.

Определить период и амплитуду импульса, а также длительность переднего и заднего фронтов импульса. Снять зависимость периода от величины емкости конденсатора  $C2$  при постоянном напряжении питания. Построить график  $T = f(C2)$ , где  $T$  - период импульсов.

Снять зависимость периода от напряжения питания и построить эту зависимость,  $T = f(E_{пит})$ . Результаты измерений оформить таблично.

2.3. Рассчитать режимы работы элементов схемы по постоянному току.



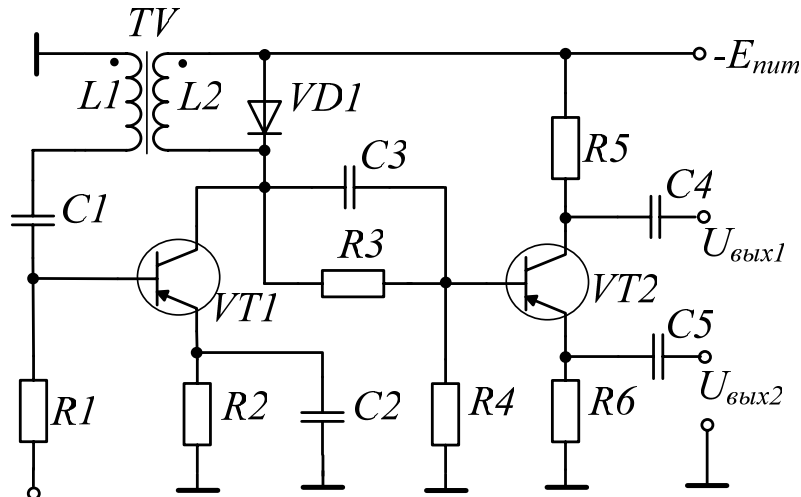


Рис. 10. 5. Схема блокинг-генератора:  $R1=15$  кОм;  $R2=510$  Ом;  $R3=12$  кОм;  $R4=20$  кОм;  $R5=R6=2,4$  кОм;  $C1=100$  пФ;  $C2=0,1$  мкФ;  $C3=100$  пФ;  $C4=0,68$  мкФ;  $C5=0,68$  мкФ;  $VT1, VT2$  – МП40;  $VD1$  – КД103;  $TV$  – трансформатор

### 3. Содержание отчета

Отчет оформляет каждый студент самостоятельно. Защита проходит в начале каждого следующего занятия с демонстрацией работы устройства на ЭВМ (при необходимости). Студент, не подготовивший или не защитивший отчет по работе, к следующей лабораторной работе не допускается.

3.1. Цель работы.

3.2. Принципиальная схема исследуемого генератора.

3.3. Результаты исследований, измерений и расчетов, графики, построенные по результатам измерений.

3.4. Выводы по работе.

### 4. Контрольные вопросы

4.1. Показать на выходных характеристиках режимы работы транзистора.

4.2. Объяснить назначение каждого элемента схемы.

4.3. Что такое скважность?

4.4. Чем определяется длительность импульса?

4.5. Объясните правильность подключения обмоток трансформатора.

## Лабораторная работа № 11

### ИССЛЕДОВАНИЕ $RC$ -ГЕНЕРАТОРА С МОСТОМ ВИНА

Цель работы. Изучить принцип действия  $RC$ -генератора с мостом Вина; исследовать основные свойства генератора.

Оборудование. Осциллограф С1-73 (или аналогичный), лабораторный стенд 87Л-01, среда схемотехнического моделирования Electronics WorkBench (Multisim).

#### 1. Общие сведения

Для получения гармонических колебаний инфранизкой и низкой частот (от долей герца до нескольких десятков килогерц), применение  $LC$ -генераторов нецелесообразно из-за больших величин индуктивностей катушек и емкостей конденсаторов в колебательном контуре, что приводит к увеличению массогабаритных параметров генераторов. Поэтому для создания гармонических колебаний используют  $RC$ -генераторы, которые могут вырабатывать колебания относительно высокой частоты (до нескольких мегагерц). Однако преимущества  $RC$ -генераторов по сравнению с  $LC$ -генераторами проявляются именно на низких и инфранизких частотах, так как в этом частотном диапазоне колебания имеют высокую стабильность частоты за счет применения резисторов и конденсаторов с хорошей стабильностью параметров. Кроме того,  $RC$ -генераторы при одной и той же потребляемой мощности по сравнению с  $LC$ -генераторами имеют меньшие габариты, массу и стоимость.

Все  $RC$ -генераторы можно разделить на две группы: с поворотом фазы на  $180^\circ$  и без поворота фазы. Структурную схему любого автогенератора можно представить следующим образом (рис. 11.1): усилитель (одно- и многокаскадный) и цепь обратной связи  $\beta$ , являющаяся частотно-зависимой цепью. В качестве последней могут быть использованы  $\Gamma$ -образная  $RC$ -цепь (рис. 11.2 и 11.4), мост Вина (рис. 11.3) и двойной  $T$ -образный мост (рис. 11.5).

$RC$ -генератор с  $\Gamma$ -образной  $RC$ -цепью обратной связи представляет собой каскад усиления, охваченный положительной обратной связью. Входное и выходное напряжения цепи обратной связи сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ .

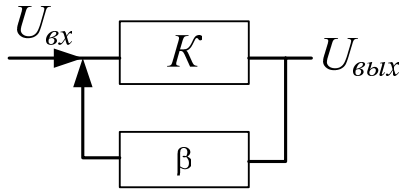


Рис. 11.1. Структурная схема автогенератора

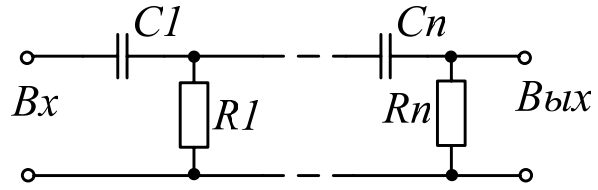


Рис. 11.2.  $\Gamma$ -образная  $RC$ -цепь с параллельным резистором

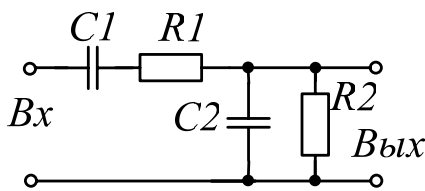


Рис. 11.3. Мост Вина

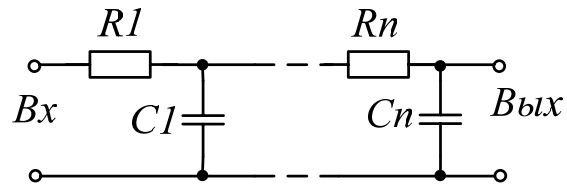


Рис. 11.4.  $\Gamma$ -образная  $RC$ -цепь с последовательным резистором

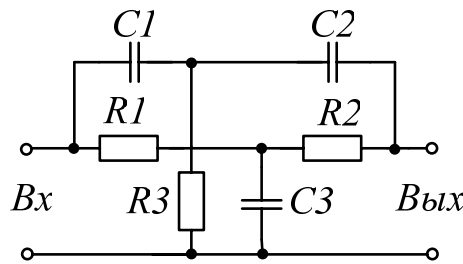


Рис. 11.5. Т-образный мост

Если выходное напряжение непосредственно подать на вход усилителя, то получится отрицательная обратная связь. Следовательно, для выполнения условия баланса фаз необходимо выходное напряжение цепи обратной связи сдвинуть по фазе на  $180^\circ$ . Эту задачу выполняет  $\Gamma$ -образная  $RC$ -цепь. Достоинством такого генератора является то, что он может применяться как генератор низкой частоты (см. рис. 11.1), так и высокой (см. рис. 11.2), для чего достаточно поменять резисторы и емкости местами. Недостатки таких генераторов следующие: цепь обратной связи сильно шунтирует каскад усиления, вследствие чего снижается коэффициент усиления и нарушается условие баланса амплитуд или возникающие колебания будут неустой-

чивы; генерируемые колебания имеют значительные искажения формы, вызванные тем, что условия возбуждения выполняются для гармоник с частотой, близкой к  $f_{\Gamma}$  (генерируемая частота), что объясняется отсутствием строгой избирательной способности к основной частоте  $\Gamma$ -образных  $RC$ -цепей; для выполнения условия баланса амплитуд необходим большой коэффициент усиления ( $K > 29$ ).

$RC$ -генератор с симметричным двойным  $T$ -образным мостом содержит два каскада усиления, цепь положительной частотно-независимой обратной связи и цепь отрицательной обратной связи, являющуюся двойным  $T$ -образным мостом. Преимущество такого генератора: условие баланса амплитуд выполняется только для одной частоты, что обуславливает высокую избирательность. Недостатки: регулировка частоты колебаний автогенератора осуществляется изменением величин всех резисторов либо всех конденсаторов двойного  $T$ -образного моста, а в противном случае нарушаются избирательные свойства моста; сравнительно большой коэффициент усиления ( $K > 11$ ); для предотвращения шунтирования усилителя в цепь включен дополнительный каскад, что приводит к усложнению схемы.

Рассмотрим  $RC$ -генератор с мостом Вина, который обеспечивает относительную простоту перестройки частоты в широких пределах. Такие генераторы (рис. 11.6) широко применяются в различной измерительной аппаратуре как широкодиапазонные генераторы (частота может изменяться от долей герца до нескольких сотен килогерц) с относительно хорошей стабильностью частоты.

При построении такого генератора на многокаскадном усилителе (как минимум двухкаскадном) звено частотно-зависимой обратной связи (мост Вина) включают между входом и выходом. Для создания в автогенераторе незатухающих колебаний должно выполняться условие баланса амплитуд, т.е. потери энергии в автогенераторе восполняются за счет энергии источника питания с помощью цепи положительной обратной связи. Обычно значение коэффициента усиления  $K$  и коэффициента передачи цепи обратной связи  $\beta$  выбирают таким образом, чтобы  $K\beta \geq 1$ . Появившиеся на входе усилителя слабые колебания усиливаются в  $K$  раз и ослабляются в  $\beta$  раз цепью обратной связи, попадая

вновь на вход усилителя в той же фазе, но с большей амплитудой. Далее они опять усиливаются, и процесс повторяется. В этом режиме амплитуда возрастает, что соответствует условию  $K\beta \geq 1$ . По мере роста амплитуды входного напряжения в усилителе из-за нелинейности его амплитудной характеристики, которая при больших входных напряжениях имеет участок насыщения, коэффициент усиления начинает уменьшаться, и произведение  $K\beta = 1$ . При этом появляются колебания с постоянной автоматически поддерживаемой амплитудой, что соответствует установившемуся режиму колебаний. Поскольку на частоте генерации  $f_{\Gamma}$  коэффициент передачи звена частотно-зависимой обратной положительной связи типа моста Вина максимален  $\beta=1/3$  (рис. 11.7), то самовозбуждение возможно при  $K\beta \geq 3$ . Таким образом, условие баланса амплитуд выполняется. Баланс фаз выполняется автоматически, так как усилитель двухкаскадный. Если исключить из схемы автогенератора положительную обратную связь ( $R1, R2, R3, R4, C1, C2$ ) и подсоединить выход усилителя на вход, то появятся колебания резко нелинейной формы, так как условие баланса фаз и амплитуд будет выполняться для граничных частот усиления транзисторов  $f_{\Gamma}$ .

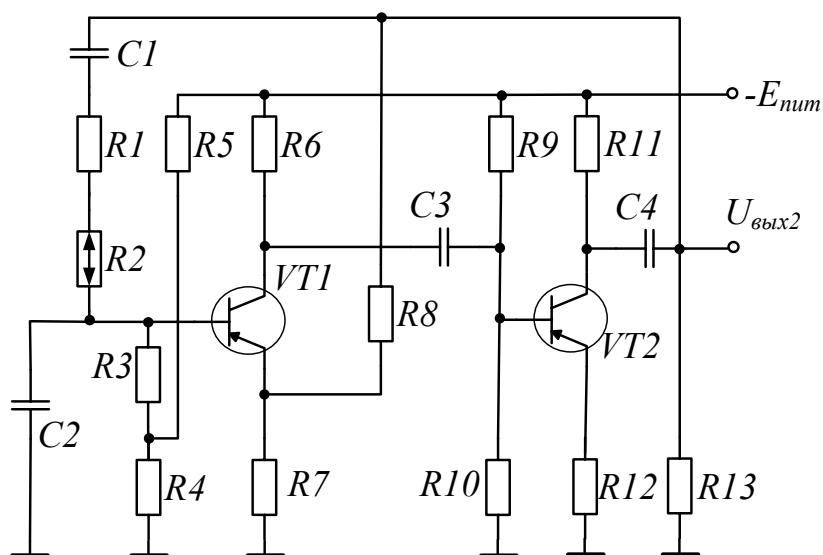


Рис. 11.6. RC-генератор с мостом Вина:  $C1=C2=510$  пФ; ( $C1=C2=680$  пФ);  $VT1, VT2$  – МП40А;  $R1=2,4$  кОм;  $R2$  – переключатель;  $R3=R4=1,2$  кОм;  $R5=15$  кОм;  $R6=2$  кОм;  $R7=200$  Ом;  $R8=20$  кОм;  $R9=5,1$  кОм;  $R10=200$  Ом;  $R11=2$  кОм;  $R12=200$  Ом;  $R13=33$  кОм

Для улучшения термостабильности автогенератора используются две цепи отрицательной обратной связи (ООС). Первая выполнена на резисторе  $R7$ , который выполняет роль сопротивления ООС

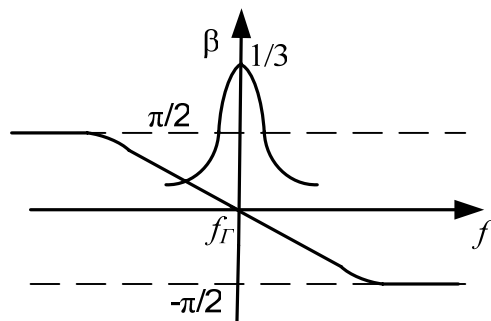


Рис. 11.7. Коэффициент передачи звена частотно-зависимой обратной связи положительной связи

как по постоянному току, так и по переменному, вторая – на резисторе  $R8$  (последовательная ООС по напряжению). Кроме того, резистор  $R12$  выполняет функции, аналогичные  $R7$ .

Резисторы  $R3, R4, R5, R9, R10$  выполняют роль делителя напряжения и задают положение рабочей точки транзисторов  $VT1, VT2$ . Резисторы  $R8, R11$  – нагрузочные в

цепи коллекторов транзисторов. Резистор  $R13$  представляет собой нагрузку автогенератора, а  $C3, C4$  – разделительные.

## 2. Методика выполнения работы на стенде

2.1. При обесточенном лабораторном стенде под руководством преподавателя собрать схему генератора (см. рис. 11.6). При сборке особое внимание обратить на полярность включения элементов.

2.2. Исследовать работу автогенератора.

2.2.1. Проверить режим работы каскадов по постоянному току и рассчитать токи  $I_{K1,2}, I_{Э1,2}, I_{Б1,2}$ .

2.2.2. Путем подбора  $C1, C2, R3, R4$  добиться на выходе схемы синусоидального сигнала.

2.2.3. Снять зависимости  $U_{вых}$  от  $E_{пит}$ ;  $f_G$  от  $E_{пит}$ . Данные измерений занести в таблицу.

## 3. Исследование RC-генератора с мостом Вина в среде схемотехнического моделирования Electronics WorkBench (Multisim)

3.1. Соберите схему RC-генератора с мостом Вина в среде Electronics Workbench (Multisim) (рис. 11.8). Настройте необходимые параметры моделирования и получите осциллограммы на входе и выходе схемы (рис. 11.9).

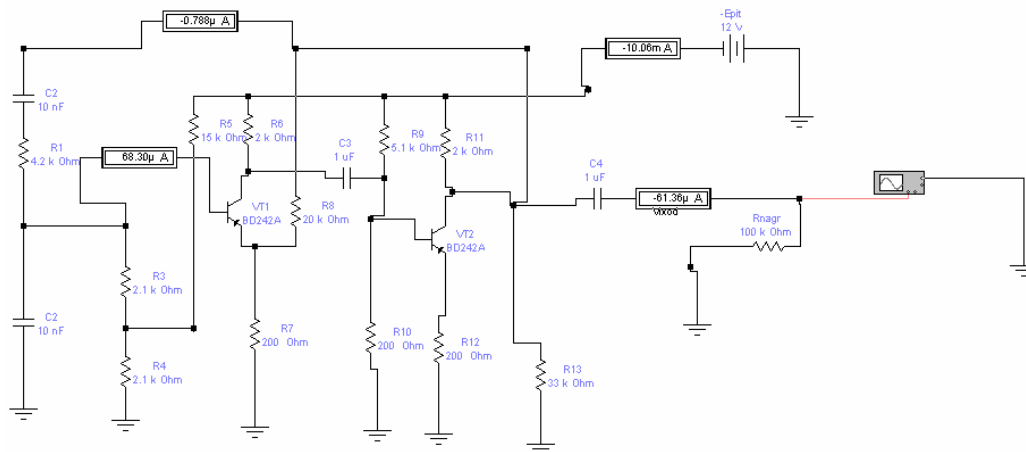


Рис. 11.8. Схема RC-генератора с мостом Вина в среде схемотехнического моделирования Multisim

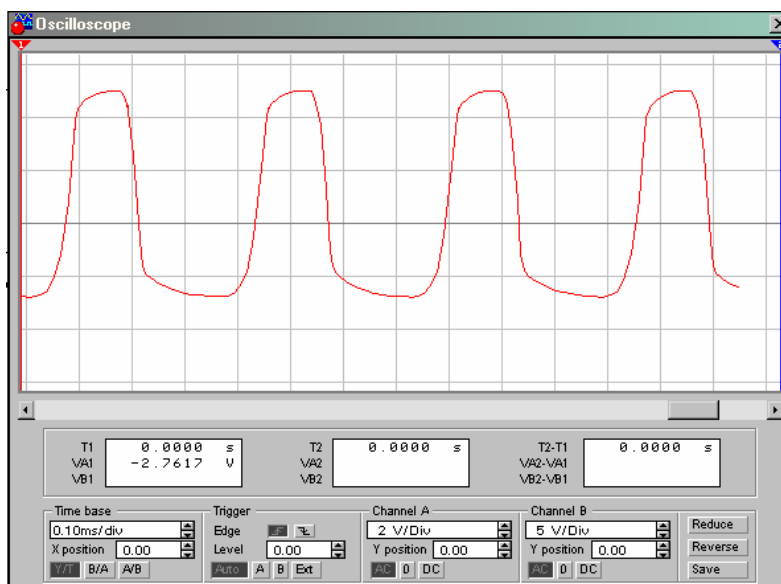


Рис. 11.9. Результаты моделирования схемы

3.2. Путем подбора  $C1$ ,  $C2$ ,  $R3$ ,  $R4$  добиться на выходе схемы идеального синусоидального сигнала.

3.3. Определить, как изменяется частота сигнала в зависимости от  $C1$ ,  $C2$ ,  $R3$ ,  $R4$ .

3.4. Снять зависимости  $U_{\text{вых}}$  от  $E_{\text{num}}$ ;  $f_{\text{г}}$  от  $E_{\text{num}}$ . Данные измерений занести в таблицу.

$E_{\text{num}}$ , В	
$U_{\text{ex}}$ , В	
$f_{\text{г}}$ , Гц	

#### **4. Содержание отчета**

Отчет оформляет каждый студент самостоятельно. Защита проходит в начале каждого следующего занятия с демонстрацией работы устройства на ЭВМ (при необходимости). Студент, не подготовивший или не защитивший отчет по работе, к следующей лабораторной работе не допускается.

4.1. Цель работы.

4.2. Принципиальная схема исследуемого генератора.

4.3. Результаты исследований, измерений и расчетов, графики, построенные по результатам измерений.

4.4. Результаты моделирования работы  $RC$ -генератора с мостом Вина в среде Multisim.

4.5. Выводы по работе.

#### **5. Контрольные вопросы**

5.1. Дать определение основных параметров автогенераторов  $RC$ -типа.

5.2. В чем заключаются условия самовозбуждения?

5.3. Каковы функции моста Вина?

5.4. Как обеспечивается стабилизация режима работы по постоянному току?

5.5. Чему равен коэффициент усиления двухкаскадного усилителя?

5.6. Объясните принцип работы автогенератора с мостом Вина.

5.7. Почему система называется квазирезонансной?



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном издании представлен цикл лабораторных работ, входящих в курс «Электроника и микропроцессорная техника». При разработке методических указаний была предпринята попытка объединить в практических занятиях работу студентов непосредственно с оборудованием и изучение исследуемых устройств виртуально при помощи компьютерного моделирования. Данный инновационный подход к обучению не только позволит дать студентам углубленные знания по изучаемой дисциплине, но и подготовит их к самостоятельному решению более сложных инженерных задач.

Особая ценность данного издания состоит в том, что представленный цикл лабораторных работ можно полностью выполнять виртуально на компьютере без использования учебных стендов, что становится особо актуально в современных условиях недофинансирования учебных заведений. Кроме того, данные методические указания можно рекомендовать для дистанционного обучения студентов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Горошков, Б. И.* Элементы радиоэлектронных устройств : справочник / Б. И. Горошков. – М. : Радио и связь, 1988. – 176 с.
2. *Лившиц, Н. С.* Радиотехнические измерения / Н. С. Лившиц, Б. Б. Телешевский. – М. : Высш. шк., 1968. – 200 с.
3. *Опадчий, Ю. Ф.* Аналоговая и цифровая электроника : учеб. для вузов / Ю. Ф. Опадчий. – М. : Горячая линия–Телеком, 2002. – 768 с. – ISBN 5-93517-002-7.
4. Применение интегральных микросхем : практ. рук. : в 2 кн. / под ред. А.Уильямса ; пер. с англ. – М. : Мир, 1987. Кн.2. – 413 с.
5. *Ровдо, А. А.* Схемотехника усилительных каскадов на биполярных транзисторах / А. А. Ровдо. – М. : Додэка–XXI, 2002. – 254 с. – ISBN 5-94120-062-5.
6. *Хоровиц, П.* Искусство схемотехники : монография / пер. с англ. П. Хоровиц, У. Хилл. – 6-е изд. – М. : Мир, 2003. – 704 с. – ISBN 5-03-003395-5.
7. Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы : справочник / под ред. С. В. Якубовского. – М. : Радио и связь, 1990. – 496 с. – ISBN 5-256-00259-7.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
ТРЕБОВАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ .....	4
Лабораторная работа № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ МОСТОВОЙ СХЕМЫ ВЫПРЯМИТЕЛЯ .....	4
Лабораторная работа № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ .....	10
Лабораторная работа № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ.....	15
Лабораторная работа № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТИВНОГО УСИЛИТЕЛЯ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ НА ТРАНЗИСТОРЕ.....	21
Лабораторная работа № 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИТТЕРНОГО ПОВТОРИТЕЛЯ.....	26
Лабораторная работа № 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХТАКТНОГО УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ .....	31
Лабораторная работа № 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УСИЛИТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	37
Лабораторная работа № 8. ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИВИБРАТОРА .....	42
Лабораторная работа № 9. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ЛИНЕЙНО ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ (ГЛИН).....	47
Лабораторная работа № 10. ИССЛЕДОВАНИЕ БЛОКИНГ- ГЕНЕРАТОРА В АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ .....	53
Лабораторная работа № 11. ИССЛЕДОВАНИЕ РС-ГЕНЕРАТОРА С МОСТОМ ВИНА.....	58
Заключение .....	65
Библиографический список.....	66

## ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. АНАЛОГОВЫЕ УСТРОЙСТВА

Методические указания к лабораторным работам  
по дисциплине «Электроника и микропроцессорная техника»

Составители

ТАТМЫШЕВСКИЙ Константин Вадимович

МАКАРОВА Наталья Юрьевна

ГРИГОРЬЕВ Алексей Сергеевич

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

Подписано в печать 20.03.08.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 3,95. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета.

600000, Владимир, ул. Горького, 87.