

Федеральное агентство по образованию Российской Федерации (РФ)

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра Электронных приборов (ЭП)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ЭП

_____ С.М. Шандаров

«Математические модели и САПР электронных приборов и устройств»

Учебно-методическое пособие

Методические указания к лабораторным работам

Разработчик:

доцент каф. ЭП

_____ Ю.Р.Саликаев

2007

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Лабораторная работа № 1. Исследование биполярного транзистора.....	5
Лабораторная работа № 2. Задание рабочей точки в транзисторном каскаде.....	12
Лабораторная работа № 3. Работа транзисторного каскада в режиме малого сигнала.....	31
Лабораторная работа №4. Выпрямители. Однополупериодные и двухполупериодные выпрямители.....	43
Лабораторная работа №5. Диодные ограничители и диодные формирователи..	60
Лабораторная работа №6. Характеристики операционного усилителя.	72

Введение

Лабораторный практикум состоит из пяти лабораторных работ.

Работы № 1-3 выполняются с использованием программной системы Electronic Work Bench (предлагается использовать версию программы 4.1) и посвящены исследованию свойств биполярного транзистора.

Работы № 4 и 5 предполагается выполнять с использованием готовых программных модулей, написанных на языке Fortran. Исполняемые файлы используют специальный входной язык, описание которого приведено в работе № 4.

По каждой из предложенных лабораторных работ необходимо составить отчет, который должен содержать:

- титульный лист;
- цель работы;
- краткие сведения из теории, содержащие расчетные формулы;
- схемы, собранные при проведении экспериментов;
- результаты расчетов и экспериментов в виде таблиц и графиков;
- ответы на контрольные вопросы;
- выводы по проведенной работе.

Лабораторная работа № 1. Исследование биполярного транзистора

Цель

1. Исследование зависимости тока коллектора от тока базы и напряжения база-эмиттер.
2. Анализ зависимости коэффициента усиления по постоянному току от тока коллектора.
3. Исследование работы биполярного транзистора.
4. Получение входных и выходных характеристик транзистора.
5. Определение коэффициента передачи по переменному току.
6. Исследование динамического входного сопротивления транзистора.

Приборы и элементы:

- – биполярный транзистор 2N3904;
- – источники постоянной ЭДС;
- – источники переменной ЭДС;
- – амперметры;
- – вольтметры;
- – осциллограф;
- – диод;
- – резисторы.

Краткие сведения из теории

Исследуемая схема показана на рис. 1. Статический коэффициент передачи тока определяется как отношение тока коллектора I_K к току базы I_B :

$$\beta_{DC} = \frac{I_K}{I_B}$$

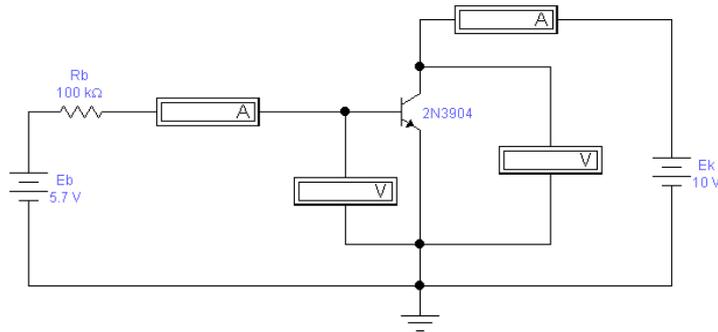


Рис. 1

Коэффициент передачи тока β_{AC} определяется отношением приращения ΔI_K коллекторного тока к вызывающему его приращению ΔI_B базового тока:

$$\beta_{AC} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}$$

Дифференциальное входное сопротивление r_{BX} транзистора в схеме с общим эмиттером (ОЭ) определяется при фиксированном значении напряжения коллектор эмиттер. Оно может быть найдено как отношение приращения напряжения база-эмиттер к вызванному им приращению ΔI_B тока базы:

$$r_{BX} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} = \frac{U_{БЭ2} - U_{БЭ1}}{I_{Б2} - I_{Б1}}$$

Дифференциальное входное сопротивление r_{BX} транзистора в схеме с ОЭ через параметры транзистора определяется следующим выражением:

$$r_{BX} = r_B + \beta_{AC} \times r_{Э},$$

где r_B - распределенное сопротивление базой области полупроводника, $r_{Э}$ - дифференциальное сопротивление перехода база-эмиттер, определяемое из выражения:

$$r_{Э} = \frac{25}{I_{Э}}, \text{ где } I_{Э} - \text{ постоянный ток эмиттера в миллиамперах.}$$

Первое слагаемое r_B в выражении много меньше второго, поэтому им

можно пренебречь:

$$r_{BX} = \beta_{AC} \cdot r_{\text{Э}}.$$

Дифференциальное сопротивление $r_{\text{Э}}$ перехода база-эмиттер для биполярного транзистора сравнимо с дифференциальным входным сопротивлением $r_{\text{ВХОБ}}$ транзистора в схеме с общей базой, которое определяется при фиксированном значении напряжения база-коллектор. Оно может быть найдено как отношение приращения $\Delta U_{\text{БЭ}}$ к вызванному им приращению $\Delta I_{\text{Э}}$ тока эмиттера:

$$r_{\text{ВХОБ}} = \frac{\Delta U_{\text{БЭ}}}{\Delta I_{\text{Э}}} = \frac{U_{\text{БЭ2}} - U_{\text{БЭ1}}}{I_{\text{Э2}} - I_{\text{Э1}}}.$$

Через параметры транзистора это сопротивление определяется выражением:

$$r_{\text{ВХОБ}} = \frac{r_{\text{Б}}}{\beta_{AC}} + r_{\text{Э}}.$$

Первым слагаемым в выражении можно пренебречь, поэтому можно считать, что дифференциальное сопротивление перехода база-эмиттер приблизительно равно: $r_{\text{ВХОБ}} \approx r_{\text{Э}}$.

Порядок проведения экспериментов

Эксперимент 1. Определение статистического коэффициента передачи тока транзистора.

1. Создать файл по схеме, изображенной на рис. 1. Включить схему. Записать результаты измерения тока коллектора, тока базы и напряжения коллектор-эмиттер. По полученным результатам подсчитать статический коэффициент передачи транзистора β_{DC} .
2. Изменить номинал источника ЭДС $E_{\text{Б}}$ до 2,68 В. Включить схему. Записать результаты измерения тока коллектора, тока базы и напряжения коллектор-эмиттер. По полученным результатам подсчитать коэффициент β_{DC} .

3. Изменить номинал источника ЭДС E_K до 5 В. Запустить схему. Записать результаты измерения тока коллектора, тока базы и напряжения коллектор-эмиттер. По полученным результатам подсчитать коэффициент передачи транзистора β_{DC} . Затем установить номинал E_K равным 10 В.

Эксперимент 2. Измерение обратного тока коллектора.

На схеме рис. 1 изменить номинал источника ЭДС E_B до 0 В. Включить схему. Записать результаты измерения тока базы и напряжения коллектор-эмиттер.

Эксперимент 3. Получение выходной характеристики транзистора в схеме с ОЭ.

1. В схеме (рис. 1) провести измерение тока коллектора I_K для каждого значения $E_K=0,1; 0,5; 1; 5; 20$ В и $E_B=1,66; 2,68; 3,68; 4,68; 5,7$ В, результаты занести в таблицу. По данным таблицы построить график зависимости I_K от E_K .

2. Создать файл по схеме, изображенной на рис. 2. Включить схему. Зарисовать осциллограмму выходной характеристики, соблюдая масштаб. Повторить измерения для каждого значения E_B . Осциллограммы входных характеристик для разных токов базы зарисовать на одном графике.

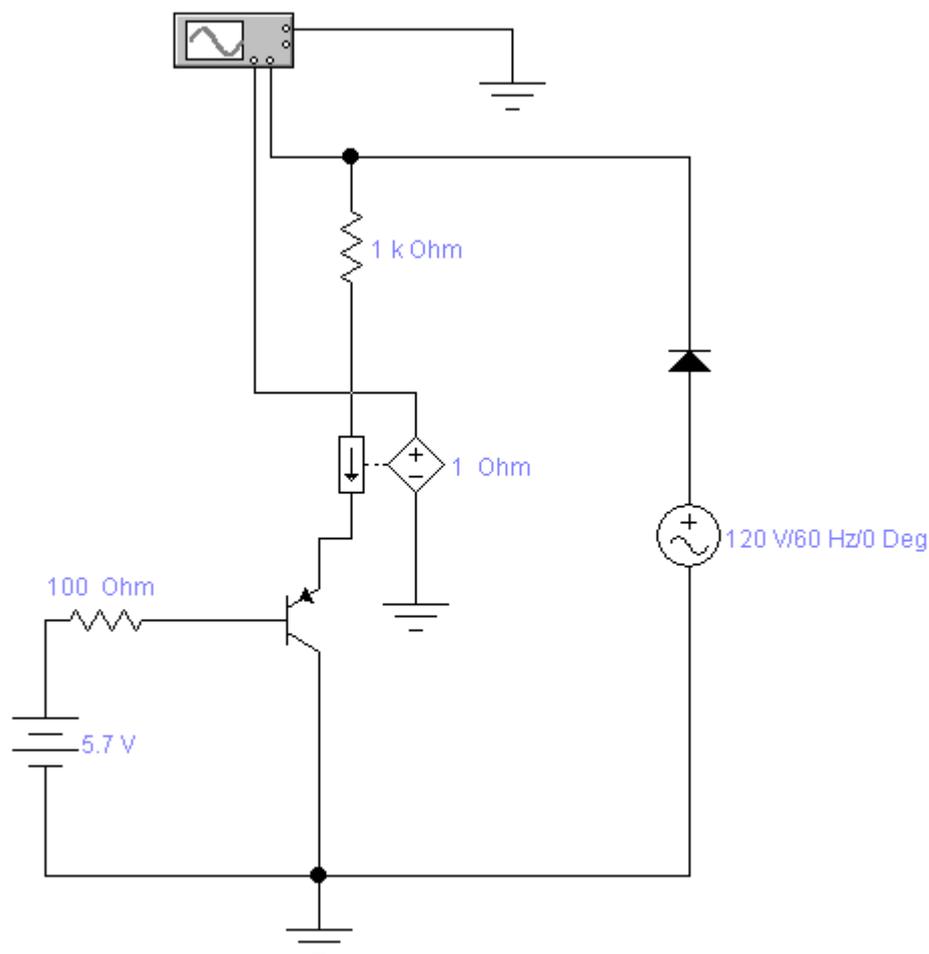


Рис. 2

3. По выходной характеристике найти коэффициент передачи тока β_{AC} при изменении базового тока с $10 \mu\text{A}$ до $30 \mu\text{A}$, $E_K = 10 \text{ V}$.

Эксперимент 4. Получение входной характеристики транзистора в схеме с ОЭ.

1. Создать файл по схеме, изображенной на рис. 1. Установить значение напряжения источника E_K равным 10 V и провести измерение тока базы I_B , напряжения база-эмиттер $U_{BЭ}$, тока эмиттера $I_Э$ для различных значений напряжения источника E_B . Обратите внимание, что коллекторный ток примерно

равен току в цепи эмиттера.

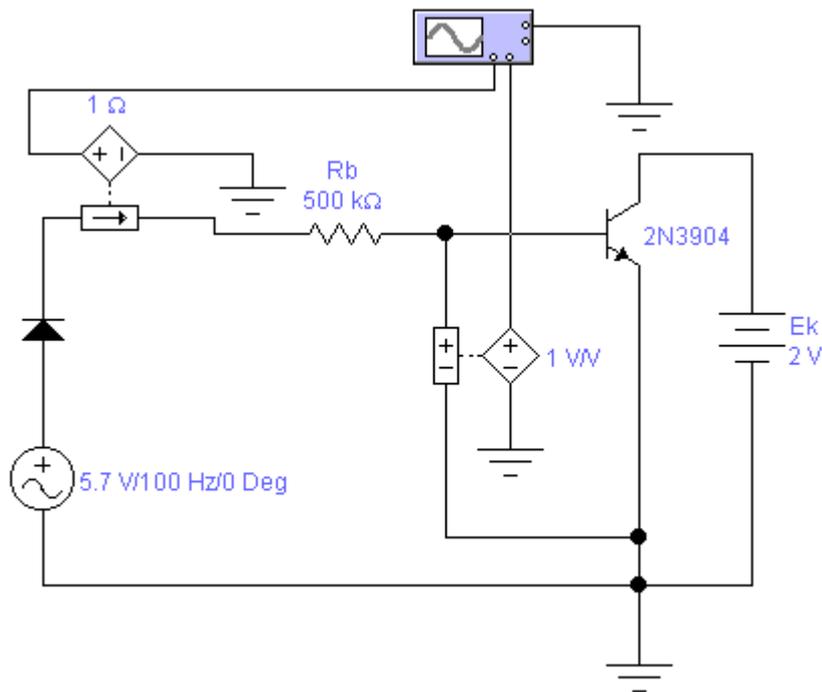


Рис. 3

2. Построить график зависимости тока базы от напряжения база-эмиттер.
3. Создать файл по схеме, изображенной на рис. 3. Включить схему. Зарисовать входную характеристику транзистора, соблюдая масштаб.

Эксперимент 5. Получение входной характеристики транзистора в схеме с общей базой.

1. По данным, полученным в эксперименте 4.1, построить график зависимости тока эмиттера от напряжения база-эмиттер.
2. Создать файл по схеме, изображенной на рис. 4. Включить схему. Зарисовать осциллограмму полученной характеристики.
3. По полученной характеристике найти сопротивление $r_{э}$ при изменении базового тока с 10 μA до 30 μA .

4. Найти сопротивление r_{ε} по формуле $r_{\varepsilon} = 25mV/I_{\varepsilon}$, используя значения I_{ε} из эксперимента 4.1 при $I_B = 20 \mu A$.

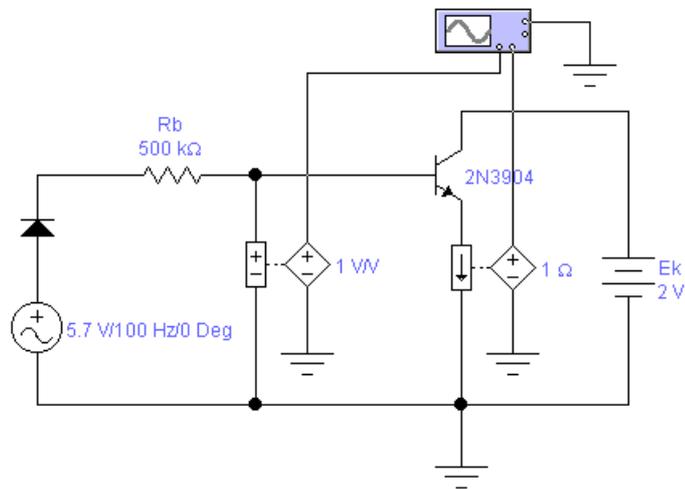


Рис. 4

Вопросы

1. От чего зависит ток коллектора транзистора?
2. Зависит ли коэффициент β_{DC} от тока коллектора? Если да, то в какой степени? Обосновать ответ.
3. Что такое токи утечки транзистора в режиме отсечки?
4. Что можно сказать по выходным характеристикам о зависимости тока коллектора от тока базы и напряжения коллектор-эмиттер?
5. Что можно сказать по входной характеристике о различии между базо-эмиттерным переходом и диодом, смещенным в прямом направлении?
6. Одинаково ли значение r_{BX} в любой точке характеристики?
7. Одинаково ли значение r_{ε} при любом значении тока эмиттера?
8. Как отличается практическое значение сопротивления r_{ε} от вычисленного по формуле?

Лабораторная работа № 2. Задание рабочей точки в транзисторном каскаде

Рассматриваются различные способы задания рабочей точки транзисторного каскада с общим эмиттером.

Цель

1. Построение нагрузочной линии транзисторного каскада.
2. Задание рабочей точки транзисторного каскада.
3. Исследование параметров рабочей точки транзистора.
4. Исследование условий для перевода транзистора в режим насыщения и отсечки.
5. Определение статического коэффициента передачи транзистора по экспериментальным данным.

Приборы и элементы:

- биполярный транзистор 2N3904;
- биполярный транзистор 2N3906;
- источники постоянной ЭДС;
- резисторы;
- амперметры;
- вольтметры.

Краткие сведения из теории

1. Задание тока базы с помощью одного резистора.

Схема транзисторного каскада с общим эмиттером представлена на рис. 5. Режим, в котором работает каскад, можно определить, построив его нагрузочную линию на выходной характеристике транзистора. Данный способ позволяет описать поведение транзистора в режимах насыщения, усиления и отсечки.

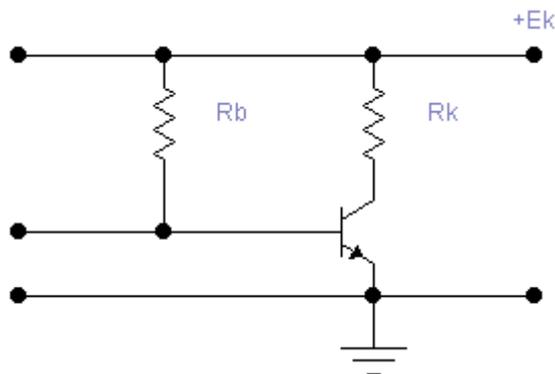


Рис. 5

Режим насыщения определяется следующим условием: ток коллектора не управляется током базы.

$$\beta_{DC} I_B > I_K \approx I_{KH},$$

где I_{KH} - ток коллектора насыщения, определяется сопротивлением R_K в цепи коллектора и напряжением источника питания E_K :

$$I_{KH} \approx \frac{E_K}{R_K}.$$

Этот режим характеризуется низким падением напряжения коллектор-эмиттер (порядка 0,1 В). Для перевода транзистора в этот режим необходимо в базу транзистора подать ток, больший, чем ток насыщения базы I_{BH} :

$$I_{BH} = \frac{I_{KH}}{\beta_{DC}}.$$

Ток насыщения базы задается с помощью резистора R_{BH} с сопротивлением, равным:

$$R_{BH} = \frac{E_K - U_{BЭ0}}{I_{BH}} \approx \frac{E_K}{I_{BH}},$$

где $U_{BЭ0}$ - пороговое напряжение перехода база-эмиттер. Для кремниевых транзисторов $U_{BЭ0} = 0,7$ В.

В режиме усиления ток коллектора меньше тока I_{KH} и описывается уравнением нагрузочной прямой:

$$I_K = \frac{E_K - U_{KЭ}}{R_K}.$$

Рабочая точка в статическом режиме задается током базы и напряжением на коллекторе. Она определяется точкой пересечения нагрузочной прямой и выходной характеристики транзистора. Базовый ток транзистора определяется как ток через сопротивление в цепи базы R_B (см. рис. 5):

$$I_B = \frac{E_R - U_{BЭ0}}{R_B}.$$

Ток коллектора вычисляется по формуле:

$$I_K = \beta_{DC} \cdot I_{BH}.$$

Напряжение коллектор-эмиттер определяется из уравнения нагрузочной прямой:

$$U_{KЭ} = E_K - I_K \cdot R_K.$$

В режиме отсечки ток коллектора равен нулю и не создает на резисторе R_K падения напряжения. Следовательно, напряжение $U_{KЭ}$ максимально и равно напряжению источника питания E_K . Ток коллектора с учетом тепловых токов определяется из следующего выражения:

$I_K = I_{KЭ0} + \beta_{DC} \cdot I_B = (\beta_{BC} + 1) \cdot I_{KB0} + \beta_{DC} \cdot I_B \approx \beta_{DC} \cdot (I_{KB0} + I_B)$, где $I_{KЭ0}$, I_{KB0} - обратные токи переходов коллектор-эмиттер и коллектор-база соответственно. Коэффициент нестабильности тока коллектора (S) из-за влияния тепловых токов в схеме определяется как:

$$S = \frac{dI_K}{dI_{KB0}} = 1 + \beta_{DC} \approx \beta_{DC}.$$

Как следует из этого выражения, при рассматриваемом способе задания тока базы коэффициент неустойчивости зависит от статического коэффициента передачи, который для транзисторов одного и того же типа может сильно различаться.

2. Задание тока базы с помощью делителя напряжения

2.1. NPN-транзистор

Схема задания тока базы NPN-транзистора с помощью делителя напряжения в каскаде с общим эмиттером представлена на рис. 6.

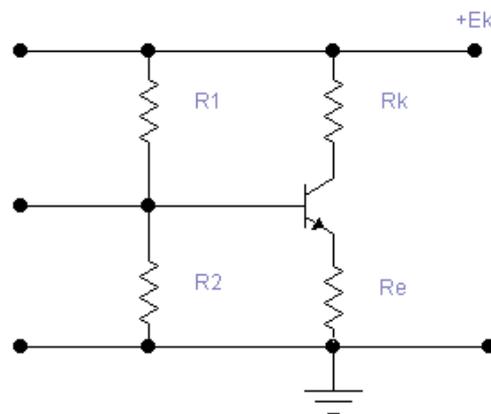


Рис. 6

Аналогично пункту 1 рассмотрим режимы насыщения, усиления и отсечки. Ток коллектора в режиме насыщения описывается следующим выражением:

$$I_{KH} = \frac{E_K}{R_K - R_E}.$$

Независимо от сопротивления резисторов R_1 и R_2 делителя напряжения ток насыщения базы определяется из выражения:

$$I_{BH} = \frac{I_{KH}}{\beta_{DC}},$$

а напряжение U_B на базе равно:

$$U_B = E_K \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_1} + U_{BЭ0}.$$

Это же напряжение задается делителем напряжения. Зная E_K и U_B , можно определить отношение сопротивлений плеч делителя:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{E_K - U_B}{U_B}.$$

Суммарное сопротивление делителя обычно выбирается так, чтобы ток, протекающий через него, был примерно в 10 раз меньше тока коллектора. Составив систему уравнений и решив ее, можно найти сопротивления R_1 и R_2 плеч делителя, которые обеспечивают ток базы, необходимый для перевода транзистора в режим насыщения. Аналогичным образом каскад рассчитывается и в усилительном режиме, но с учетом следующих выражений.

Ток коллектора в усилительном режиме описывается уравнением нагрузочной прямой:

$$I_K = \frac{E_R - U_{КЭ} - U_Э}{R_K},$$

где $U_Э = I_Э \cdot R_Э$, $I_Э$ - ток эмиттера.

Ток базы определяется из выражения:

$$I_B = \frac{I_K}{\beta_{DC}}.$$

Ток коллектора связан с током эмиттера следующим выражением:

$$I_K = I_Э - I_B.$$

Напряжение на базе транзистора равно:

$$U_B = I_Э \cdot R_Э + U_{BЭ0}.$$

Далее рассчитываются сопротивления R_1 и R_2 делителя напряжения. Суммарное сопротивление делителя должно обеспечивать больший по сравнению с током базы ток делителя (обычно ток делителя берут в 10 раз меньше тока коллектора).

Рабочая точка определяется точкой пересечения нагрузочной прямой и

выходной характеристики транзистора. При известных значениях сопротивлений R_1 и R_2 ток базы транзистора равен:

$$I_B = \frac{U_B - U_{БЭ0}}{R_{ЭКБ}},$$

где U_B - напряжение на базе транзистора. Если $\beta R_3 \gg R_2$, то:

$$U_B = E_K \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad R_{ЭКБ} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

Ток эмиттера определяется по падению напряжения на сопротивлении R_3 в цепи эмиттера и вычисляется как разность потенциалов U_B и $U_{БЭ0}$:

$$I_3 = \frac{U_B - U_{БЭ0}}{R_3}.$$

Значение напряжения коллектор-эмиттер $U_{КЭ}$ вычисляется по закону Кирхгофа:

$$U_{КЭ} = E_K - I_K \cdot R_K - I_3 \cdot R_3.$$

Коэффициент неустойчивости тока коллектора (S) из-за влияния тепловых токов в схеме при условии, что $U_3 > U_{БЭ0}$, определяется как:

$$S = \frac{dI_K}{dI_{КБ0}} = \frac{1 + \beta_{DC}}{1 + \frac{\beta_{DC} \cdot R_3}{(R_3 + R_B)}} \approx 1 + \frac{R_B}{R_3},$$

где $R_B = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$.

Как следует из этого выражения, при данном способе задания тока базы коэффициент неустойчивости определяется элементами схемы и практически не зависит от характеристики транзистора, что улучшает стабильность рабочей точки.

2.2. PNP-транзистор

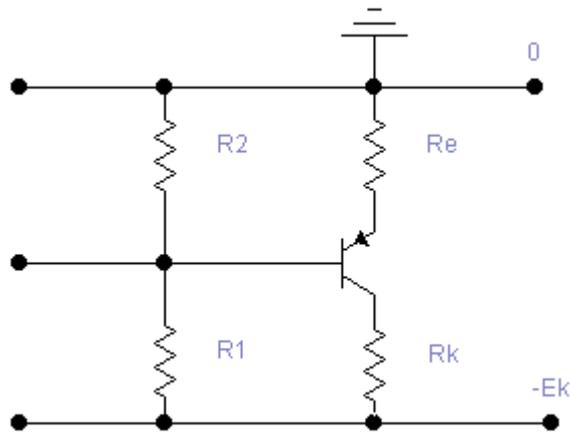


Рис. 7

Схема задания тока базы с помощью делителя напряжения в каскаде с общим эмиттером на PNP-транзисторе представлена на рис. 7. Для данной схемы справедливы выражения, приведенные в предыдущем пункте для схемы с NPN-транзистором, со следующей поправкой: полярности напряжений и направления токов нужно поменять на обратные.

3. Задание тока базы с помощью дополнительного источника в цепи эмиттера.

Схема задания тока базы с помощью дополнительного источника в цепи эмиттера в каскаде с общим эмиттером на NPN-транзисторе представлена на рис. 8.

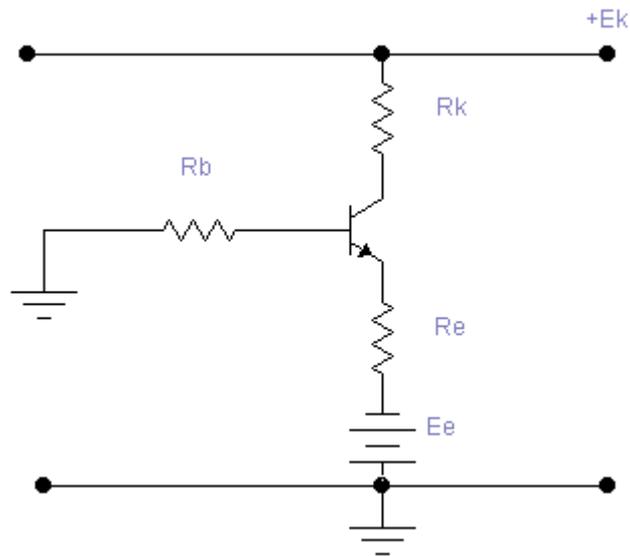


Рис. 8

Ток коллектора в режиме насыщения равен:

$$I_{KH} \approx \frac{E_K + E_{\mathcal{E}}}{R_K + R_{\mathcal{E}}}.$$

Ток коллектора в усилительном режиме описывается уравнением нагрузочной прямой:

$$I_K = \frac{E_K + E_{\mathcal{E}} - I_{\mathcal{E}} \cdot R_{\mathcal{E}}}{R_K}.$$

Напряжение на базе транзистора U_B определяется из следующего выражения:

$$U_B = I_{\mathcal{E}} \cdot R_{\mathcal{E}} - E_{\mathcal{E}} + U_{BЭ0}.$$

Это же напряжение равно падению напряжения на резисторе R_B :

$$U_B = -I_B \cdot R_B.$$

Ток эмиттера вычисляется по падению напряжения на сопротивлении $R_{\mathcal{E}}$:

$$I_{\mathcal{E}} = \frac{U_{\mathcal{E}} + E_{\mathcal{E}}}{R_{\mathcal{E}}} = \frac{U_B - U_{BЭ0} + E_{\mathcal{E}}}{R_{\mathcal{E}}}.$$

! U_B имеет отрицательное значение.

Ток коллектора связан с током эмиттера следующим выражением:

$$I_R = I_{\text{Э}} - I_B \approx I_{\text{Э}}.$$

Значение напряжения коллектор-эмиттер вычисляется из закона Кирхгофа для напряжений:

$$U_{\text{кЭ}} = E_K + E_{\text{Э}} - I_K \cdot R_K - I_{\text{Э}} \cdot R_{\text{Э}}.$$

Коэффициент неустойчивости тока коллектора (S) определяется как:

$$S = \frac{dI_K}{dI_{\text{кБ0}}} = \frac{1 + \beta_{\text{DC}}}{1 + \beta_{\text{DC}} \cdot R_{\text{Э}} / (R_{\text{Э}} + R_B)}.$$

Рассматриваемая схема характеризуется таким же коэффициентом неустойчивости, как и предыдущая.

4. Задание тока базы с помощью резистора в цепи база-коллектор.

Схема задания тока базы с помощью резистора в цепи база-коллектор в каскаде с общим эмиттером представлена на рис. 9.

Ток коллектора в усилительном режиме описывается уравнением:

$$I_K = \frac{E_K - U_{\text{БЭ}}}{R_K}.$$

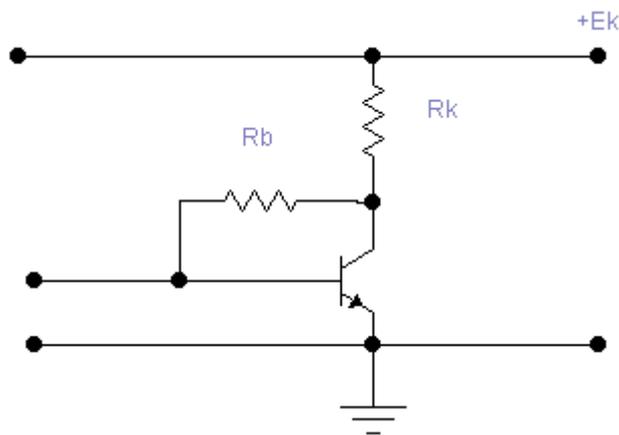


Рис. 9

Рабочая точка определяется точкой пересечения нагрузочной прямой и

выходной характеристики транзистора. Ток базы определяется из выражения:

$$I_B = \frac{U_{КЭ} - U_{БЭ0}}{R_B}.$$

Как видно из выражения, ток базы зависит от напряжения коллектор-эмиттер, что делает схему менее чувствительной к разбросу значений статического коэффициента передачи устанавливаемых в нее транзисторов.

Ток коллектора в схеме определяется по формуле:

$$I_K = \frac{E_K - U_{БЭ}}{R_K + R_B / \beta_{DC}}.$$

Значение напряжения коллектор-эмиттер вычисляется по закону Кирхгофа для напряжений:

$$U_{КЭ} = E_K - I_K \cdot R_K.$$

Статический коэффициент передачи тока β_{DC} определяется отношением тока коллектора к току базы:

$$\beta_{DC} = \frac{I_K}{I_B}.$$

Коэффициент нестабильности тока коллектора (S) из-за влияния тепловых токов в схеме с резистором в цепи база-коллектор определяется как:

$$S = \frac{dI_K}{dI_{КБ0}} = \frac{1 + \beta_{DC}}{1 + \beta_{DC} \cdot R_K / (R_B)} \approx \frac{R_B}{R_K}.$$

Как следует из выражения, коэффициент нестабильности этой схемы несколько выше, чем у схемы с сопротивлением $R_{Э}$ в цепи эмиттера.

Порядок проведения экспериментов

Эксперимент 1. Исследование параметров рабочей точки при задании тока базы с помощью одного резистора.

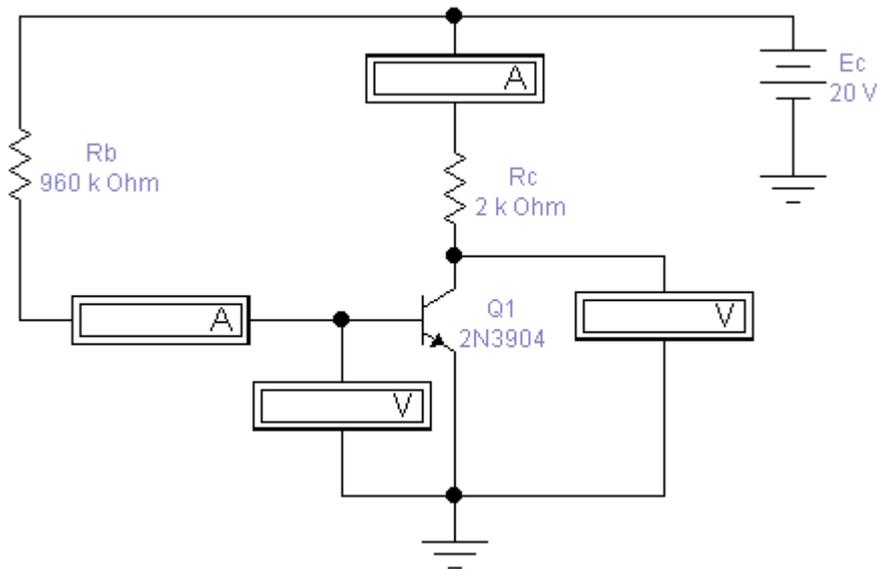


Рис. 10

1. Создать файл по схеме, изображенной на рис. 10. Включить схему. Записать результат измерений для тока базы, тока коллектора, напряжения коллектор-эмиттер и напряжения база-эмиттер.

2. Для схемы на рис. 10 по формулам из раздела «Краткие сведения из теории» вычислить базовый ток, напряжение коллектор-эмиттер. Ток коллектора вычислить, используя значения тока базы, полученные в п. 1 и значение β_{DC} , полученное в эксперименте 1.1 работы №1. Сравните результаты с экспериментальными данными.

3. Построить нагрузочную прямую по постоянному току на выходной характеристике транзистора 2N3904, полученного в эксперименте 3 работы №1. Используя значения токов и напряжений, полученных в пункте 1, определить рабочую точку (Q) на нагрузочной линии и отметить ее положение на графике.

4. Двойным щелчком на изображении транзистора открыть диалоговое окно выбора модели транзистора. Строка с наименованием транзистора 2N3904 будет подсвечена. Чтобы редактировать параметры модели транзистора, нажмите Edit. Измените коэффициент передачи по току (β_F) до 100, потом нажмите Ассерт. Нажмите Ассерт еще раз, чтобы вернуться к схеме. Изменение

коэффициента β позволяет убедиться, что замена транзисторов приводит к изменению тока коллектора. Включить схему. Записать результаты измерений для тока базы, тока коллектора и напряжения коллектор-эмиттер.

5. По новым значениям напряжения коллектор-эмиттер и тока коллектора определить новую рабочую точку на нагрузочной прямой, построенной в п. 3. Отметить ее положение на графике.

6. Восстановите прежние значения коэффициента передачи по постоянному току (β_F) транзистора 2N3904 (204).

7. Подсчитать сопротивление R_B , необходимое для перевода транзистора в режим насыщения. Подставить в схему значение сопротивления R_B , чуть меньшее подсчитанного. Включить схему. Записать результаты измерений для тока базы, тока коллектора и напряжения коллектор-эмиттер.

8. Уменьшить значение R_B на более значительную величину и снова активизировать схему. Если транзистор находится в режиме насыщения, то изменение тока коллектора очень мало даже при очень большом изменении тока базы.

Эксперимент 2. Исследование параметров рабочей точки при задании тока базы с помощью делителя напряжения (NPN-транзистор).

1. Создать файл по схеме, изображенной на рис. 11. Включить схему. Записать результаты измерений для тока базы, тока коллектора, тока эмиттера и напряжения. Вычислить коэффициент передачи β_{DC} .

2. Для схемы рис. 11 по формулам из раздела «Краткие сведения из теории» вычислить значение напряжения в точке U_B . Вычислить ток эмиттера и рассчитать ток коллектора по полученному значению тока эмиттера ($U_{BE0} \approx 0.7V$), вычислить значение напряжения коллектор-эмиттер по полученным ранее току коллектора и току эмиттера.

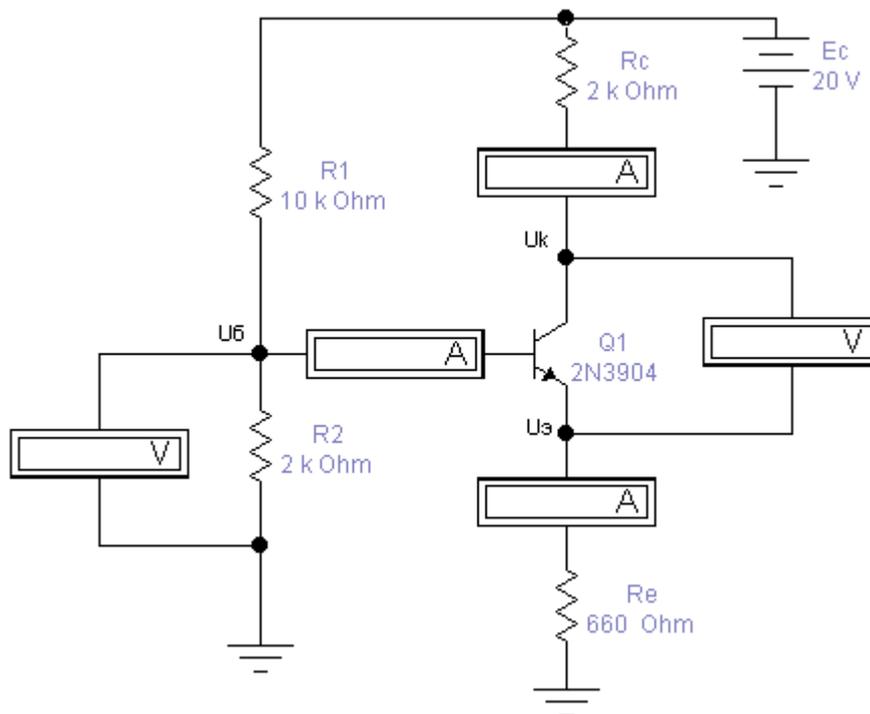


Рис. 11

3. Построить нагрузочную прямую по постоянному току по выходной характеристике транзистора 2N3904 из эксперимента 3 работы №1. Используя значения токов и напряжений, полученных в пункте 1, определить рабочую точку (Q) и отметить ее положение на графике.

4. Двойным щелчком на изображении транзистора открыть диалоговое окно выбора модели транзистора. Строка с наименованием транзистора 2N3904 будет подсвечена. Чтобы редактировать параметры модели транзистора, нажмите Edit. Измените коэффициент передачи по току (βF) до 100, потом нажмите Ассерт. Нажмите Ассерт еще раз, чтобы вернуться к схеме. Изменение коэффициента β позволяет убедиться, что замена транзисторов приводит к изменению тока коллектора. Включить схему. Записать результаты измерений для тока базы, тока коллектора и напряжения коллектор-эмиттер.

5. По новым значениям напряжения база-эмиттер и тока коллектора определить положение рабочей точки на нагрузочной прямой, построенной в

разделе 3 и отметить ее положение на графике.

6. Восстановите прежнее значение коэффициента передачи по постоянному току (β_F) транзистора 2N3904 (204).

7. Провести измерение параметров цепи базы, необходимые для перевода транзистора в режим насыщения. Записать результаты измерений для тока базы, тока коллектора, напряжения на базе и напряжения коллектор-эмиттер.

Эксперимент 3. Задание тока базы с помощью делителя напряжения (PNP-транзистор).

1. Создать файл по схеме, изображенной на рис. 12. Включить схему. Записать результаты измерений для тока базы, тока коллектора, тока эмиттера, напряжения коллектор-эмиттер и напряжения на базе. Вычислить статический коэффициент передачи β_{DC} .

2. Для схемы рис. 12 по формулам из раздела «Краткие сведения из теории» вычислить значение напряжения в точке U_B . Вычислить ток эмиттера и рассчитать ток коллектора по полученному значению тока эмиттера ($U_{BE0} \approx 0.7V$), вычислить значение напряжения коллектор-эмиттер по полученным ранее току коллектора и току эмиттера. Сравнить результаты с экспериментальными данными.

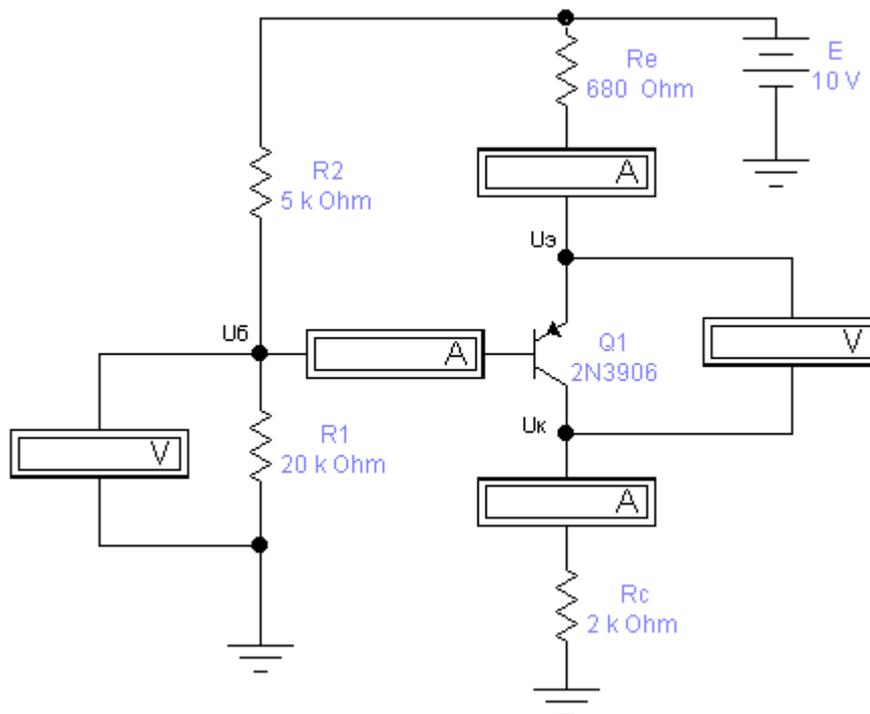


Рис. 12

3. Двойным щелчком на изображении транзистора открыть диалоговое окно выбора модели транзистора. Строка с наименованием транзистора 2N3906 будет подсвечена. Чтобы редактировать параметры модели транзистора, нажмите Edit. Измените коэффициент передачи по току (β_F) со 180 до 100, потом нажмите Ассепт. Нажмите Ассепт еще раз, чтобы вернуться к схеме. Изменение коэффициента β позволяет убедиться, что замена транзисторов приводит к изменению тока коллектора. Включить схему. Записать результаты измерений для тока базы, тока коллектора и напряжения коллектор-эмиттер.

4. Восстановите прежнее значение коэффициента передачи по постоянному току (β_F) транзистора 2N3906 (180).

Эксперимент 4. Исследование параметров рабочей точки при задании тока базы с помощью дополнительного источника в цепи эмиттера.

1. Создать файл по схеме, изображенной на рис. 13. Включить схему. Записать результаты измерений для тока базы, тока коллектора, тока эмиттера,

напряжения коллектор-эмиттер и напряжения на базе. Вычислить статический коэффициент передачи β_{DC} .

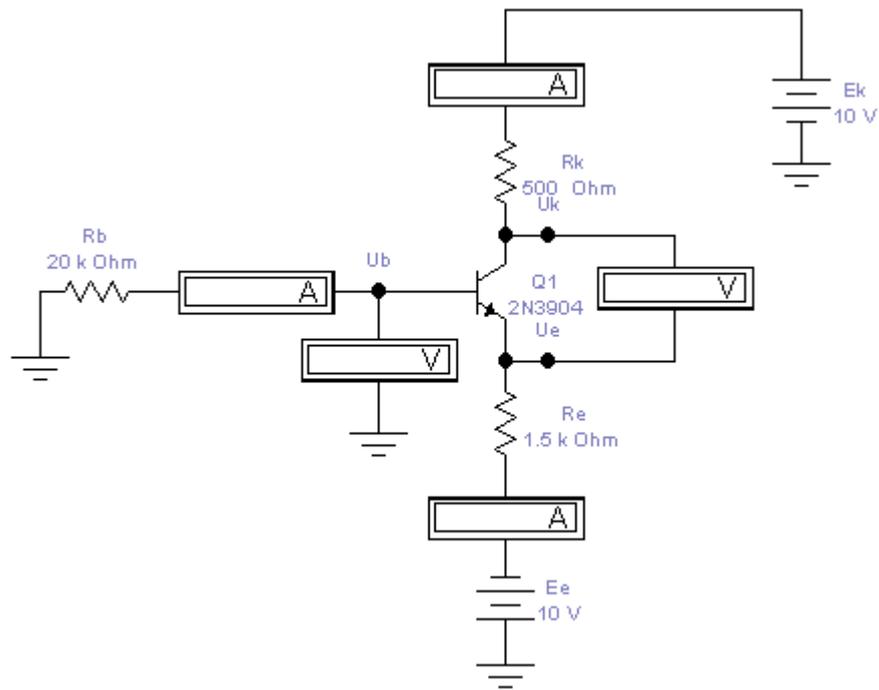


Рис. 13

2. Для схемы на рис. 13 по формулам из раздела «Краткие сведения из теории» вычислить напряжение в точке U_B по измеренному ранее значению тока базы, рассчитать ток эмиттера и вычислить ток коллектора по величине тока эмиттера ($U_{BE0} \approx 0.7V$). Вычислить значение напряжения коллектор-эмиттер по полученным значениям тока эмиттера и тока коллектора.

3. Для схемы рис. 13 построить нагрузочную прямую на выходной характеристике транзистора 2N3904 из эксперимента 3 предыдущей работы. По результатам, полученным в предыдущем пункте, определить рабочую точку (Q) и отметить ее положение на графике.

4. Двойным щелчком на изображении транзистора открыть диалоговое окно выбора модели транзистора. Строка с наименованием транзистора 2N3904 будет подсвечена. Чтобы редактировать параметры модели транзистора, нажмите

Edit. Измените коэффициент передачи по току (β_F) с 200 до 100, потом нажмите Ассерт. Нажмите Ассерт еще раз, чтобы вернуться к схеме. Изменение коэффициента β позволяет убедиться, что замена транзисторов приводит к изменению тока коллектора. Включить схему. Записать результаты измерений для тока базы, тока коллектора и напряжения коллектор-эмиттер.

5. По новым значениям напряжения база-эмиттер и тока коллектора определить положение рабочей точки на нагрузочной прямой, построенной в пункте 3, и отметить ее положение на графике.

6. Восстановить прежнее значение коэффициента передачи по постоянному току (β_F) транзистора 2N3904 (204).

Эксперимент 5. Исследование параметров рабочей точки при задании тока базы с помощью резистора в цепи база-коллектор.

1. Создать файл по схеме, изображенной на рис. 14. Включить схему. Записать результаты измерений для тока базы, тока коллектора, тока эмиттера, напряжения коллектор-эмиттер. Вычислить статический коэффициент передачи β_{DC} .

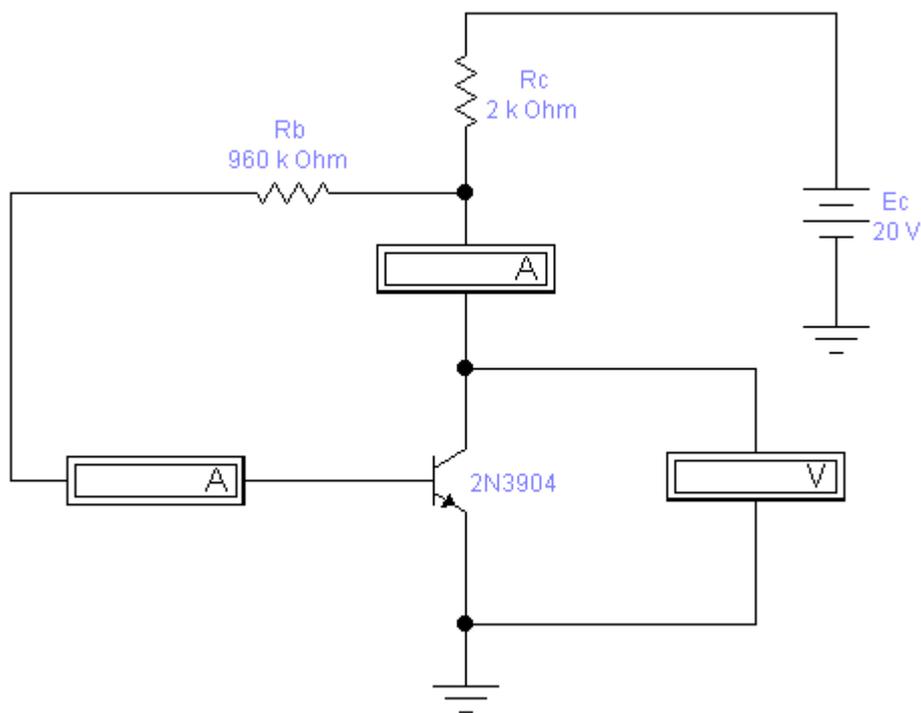


Рис. 14

2. По формулам из раздела «Краткие сведения из теории» вычислить ток коллектора, используя значения β_{DC} , вычисленное ранее. $U_{BE0} \approx 0.7V$. По полученному току коллектора вычислить значения напряжения коллектор-эмиттер.

3. Для схемы рис. 14 построить нагрузочную прямую по выходной характеристике транзистора 2N3904. По результатам, полученным в предыдущем пункте, определить рабочую точку (Q) и отметить ее положение на графике.

4. Двойным щелчком на изображении транзистора открыть диалоговое окно выбора модели транзистора. Строка с наименованием транзистора 2N3904 будет подсвечена. Чтобы редактировать параметры модели транзистора, нажмите Edit. Измените коэффициент передачи по току (β_F) с 200 до 100, потом нажмите Ассерт. Нажмите Ассерт еще раз, чтобы вернуться к схеме. Изменение

коэффициента β позволяет убедиться, что замена транзисторов приводит к изменению тока коллектора. Включить схему. Записать результаты измерений для тока базы, тока коллектора и напряжения коллектор-эмиттер.

5. По новым значениям напряжения база-эмиттер и тока коллектора определить положение рабочей точки на нагрузочной прямой, построенной в пункте 3, и отметить ее положение на графике.

6. Восстановить прежнее значение коэффициента передачи по постоянному току (β_F) транзистора 2N3904 (204).

Вопросы

- Как сильно отличаются расчетные и экспериментальные данные?
- Изменится ли положение рабочей точки при изменении статического коэффициента передачи тока?
- Какие условия необходимо выполнить, чтобы перевести транзистор в режим отсечки?
- На сколько различаются напряжения на коллекторе на рис. 10 и 11?
- Чему равно напряжение коллектор-эмиттер в режиме насыщения?
- Какова связь между током коллектора и током эмиттера?
- В чем преимущество схемы со смещением в цепи базы над схемой со смещением в цепи эмиттера?
- В чем преимущество схемы с делителем напряжения в цепи базы над схемой со смещением в цепи эмиттера?
- Какую роль играет сопротивление R_E в цепи эмиттера для стабильности работы схемы? В чем она заключается?
- Какая из вышеописанных схем обладает большей стабильностью?

Лабораторная работа № 3. Работа транзисторного каскада в режиме малого сигнала

Цель

- Исследование коэффициента усиления по напряжению в усилителях с общим эмиттером и общим коллектором.
- Определение фазового сдвига сигналов в усилителях.
- Измерение входного сопротивления усилителей.
- Исследование влияния входного сопротивления усилителя на коэффициент усиления по напряжению.
- Измерение выходного сопротивления усилителей.
- Анализ влияния нагрузки усилителя на коэффициент усиления по напряжению.
- Исследование влияния разделительного конденсатора на усиление переменного сигнала.
- Анализ влияния сопротивления $R_{\text{Э}}$ в цепи эмиттера на коэффициент усиления по напряжению.

Приборы и элементы:

- осциллограф;
- функциональный генератор;
- биполярный транзистор 2N3904;
- источники постоянной ЭДС;
- источники переменной ЭДС;
- конденсаторы;
- резисторы.

Краткие сведения из теории

Коэффициент усиления по напряжению определяется отношением амплитуд выходного синусоидального напряжения ко входному:

$$K_v = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}.$$

1. Усилитель с общим эмиттером

Схема усилителя с общим эмиттером представлена на рис. 15.

Коэффициент усиления по напряжению усилителя с ОЭ приблизительно равен соотношению сопротивлений в цепи коллектора r_k к сопротивлению в цепи эмиттера $r_{\text{Э}}$:

$$K_v = r_k / r_{\text{Э}},$$

где r_k - сопротивление в цепи коллектора, которое определяется параллельным соединением сопротивления коллектора R_k и сопротивлением нагрузки R_H (не показанном на рис. 15), чью роль может играть, например, следующий усилительный каскад:

$$r_k = \frac{R_k \cdot R_H}{R_H + R_k},$$

$r_{\text{Э}}$ - дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода, равное $r_{\text{Э}} = 25\text{мВ} / I_{\text{Э}}$.

Для усилителя с сопротивлением $R_{\text{Э}}$ в цепи эмиттера коэффициент усиления равен:

$$K_v = \frac{r_k}{r_{\text{Э}} + R_{\text{Э}}}.$$

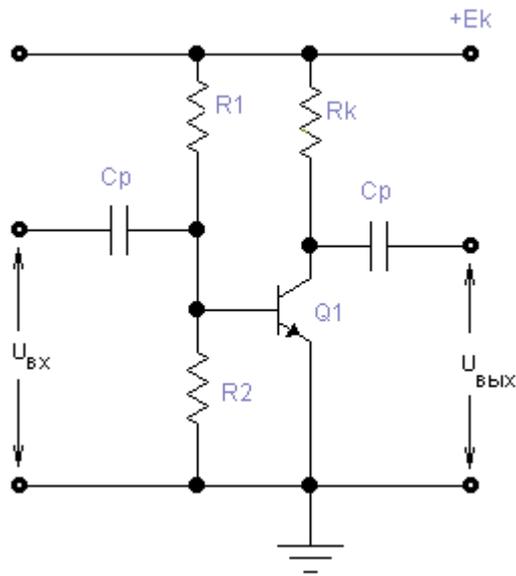


Рис. 15

Входное сопротивление усилителя по переменному току определяется как отношение амплитуд синусоидального входного напряжения U_{BX} и входного тока i_{BX} :

$$r_{BX} = \frac{U_{BX}}{i_{BX}} .$$

Входное сопротивление транзистора r_I определяется по формуле:

$$r_I = \beta \cdot r_{\epsilon} .$$

Входное сопротивление усилителя по переменному току r_{BX} вычисляется как параллельное соединение сопротивлений r_I , R_1 и R_2 :

$$\frac{1}{r_{BX}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{r_I} .$$

Значение дифференциального выходного сопротивления схемы находится по напряжению U_{XX} холостого хода на выходе усилителя, которое может быть измерено как падение напряжения на сопротивлении нагрузки, превышающем 200 кОм, и по напряжению $U_{ВЫХ}$, измеренного для данного сопротивления нагрузки R_H , из следующего уравнения, решаемого относительно $r_{ВЫХ}$:

$$\frac{u_{\text{ВЫХ}}}{u_{\text{ХХ}}} = \frac{R_H}{R_H + r_{\text{ВЫХ}}}.$$

! Сопротивление $R_H \geq 200$ кОм можно считать разрывом в цепи нагрузки.

2. Усилитель с общим коллектором

Схема усилителя с общим коллектором (или эмиттерного повторителя) представлена на рис. 16.

Коэффициент усиления по напряжению усилителя с ОК определяется из следующего выражения:

$$K_y = \frac{R_{\text{Э}}}{R_{\text{Э}} + r_{\text{Э}}}.$$

Как видно из выражения, коэффициент усиления каскада с общим коллектором приближенно равен 1, поскольку $r_{\text{Э}}$ обычно мало по сравнению с сопротивлением $R_{\text{Э}}$. Из-за этого свойства каскад называют эмиттерным повторителем. Входное сопротивление усилителя $r_{\text{ВХ}}$ по переменному току определяется как отношение синусоидального входного напряжения $u_{\text{ВХ}}$ и входного тока $i_{\text{ВХ}}$:

$$r_{\text{ВХ}} = \frac{u_{\text{ВХ}}}{i_{\text{ВХ}}}.$$

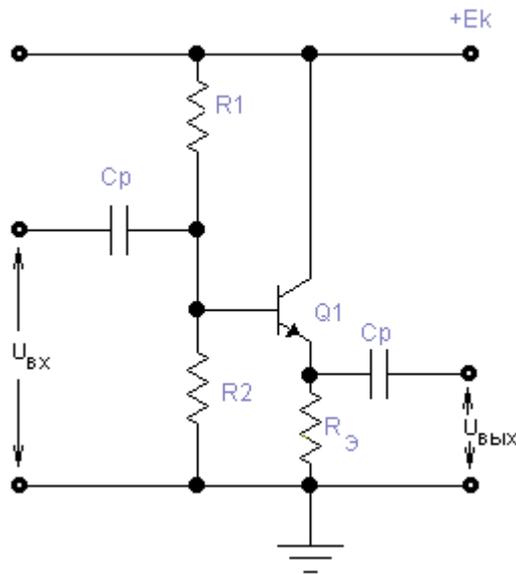


Рис. 16

Входное сопротивление эмиттерного повторителя по переменному току определяется следующим выражением:

$$r_{IЭ} = \beta \cdot (r_{э} + R_{э}).$$

В данном случае для определения входного сопротивления каскада нужно принять во внимание сопротивление резисторов R_1 и R_2 . С учетом сказанного получим:

$$\frac{1}{R_{BX}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{r_{IЭ}}.$$

Также при расчете схем необходимо учитывать сопротивление нагрузки, которое включается параллельно сопротивлению эмиттера $R_{э}$.

Из выражения для входного сопротивления видно, что эмиттерный повторитель обладает высоким входным сопротивлением по сравнению с каскадом с ОЭ.

В общем случае выходное сопротивление эмиттерного повторителя в $(\beta_{AC} + 1)$ раз меньше сопротивления $R_{ист}$ источника сигнала на входе эмиттерного повторителя:

$$r_{ВЫХ} = \frac{R_{ИСТ}}{\beta_{AC} + 1} + r_{Э} \approx \frac{R_{ИСТ}}{\beta_{AC}} + r_{Э}.$$

Если сопротивление $R_{ИСТ}$ источника сигнала на входе эмиттерного повторителя пренебрежимо мало, то выходное сопротивление эмиттерного повторителя будет равно дифференциальному сопротивлению перехода база-эмиттер:

$$r_{ВЫХ} = r_{Э}.$$

В случае, когда сопротивление $R_{ИСТ}$ источника сигналов на входе очень велико (сравнимо с $\beta_{AC} \cdot R_{Э}$), сопротивление $R_{Э}$ должно быть учтено как включенное параллельно найденному выходному сопротивлению эмиттерного повторителя.

Экспериментально выходное сопротивление каскада можно определить по результатам двух измерений: измерения напряжения холостого хода U_{XX} (на выход каскада подключается сопротивление порядка 200 кОм и измеряется падение напряжения на нем) и измерения выходного напряжения $U_{ВЫХ}$ при наличии нагрузки сопротивлением R_H . После измерения выходное сопротивление можно подсчитать по формуле:

$$r_{ВЫХ} = \frac{R_H \cdot (U_{XX} - U_{ВЫХ})}{U_{ВЫХ}}.$$

Благодаря высокому входному и низкому выходному сопротивлениям каскада с общим коллектором его очень часто используют в качестве согласующего между источником и нагрузкой.

Порядок проведения экспериментов

Эксперимент 1. Исследование каскада с общим эмиттером в области малого сигнала.

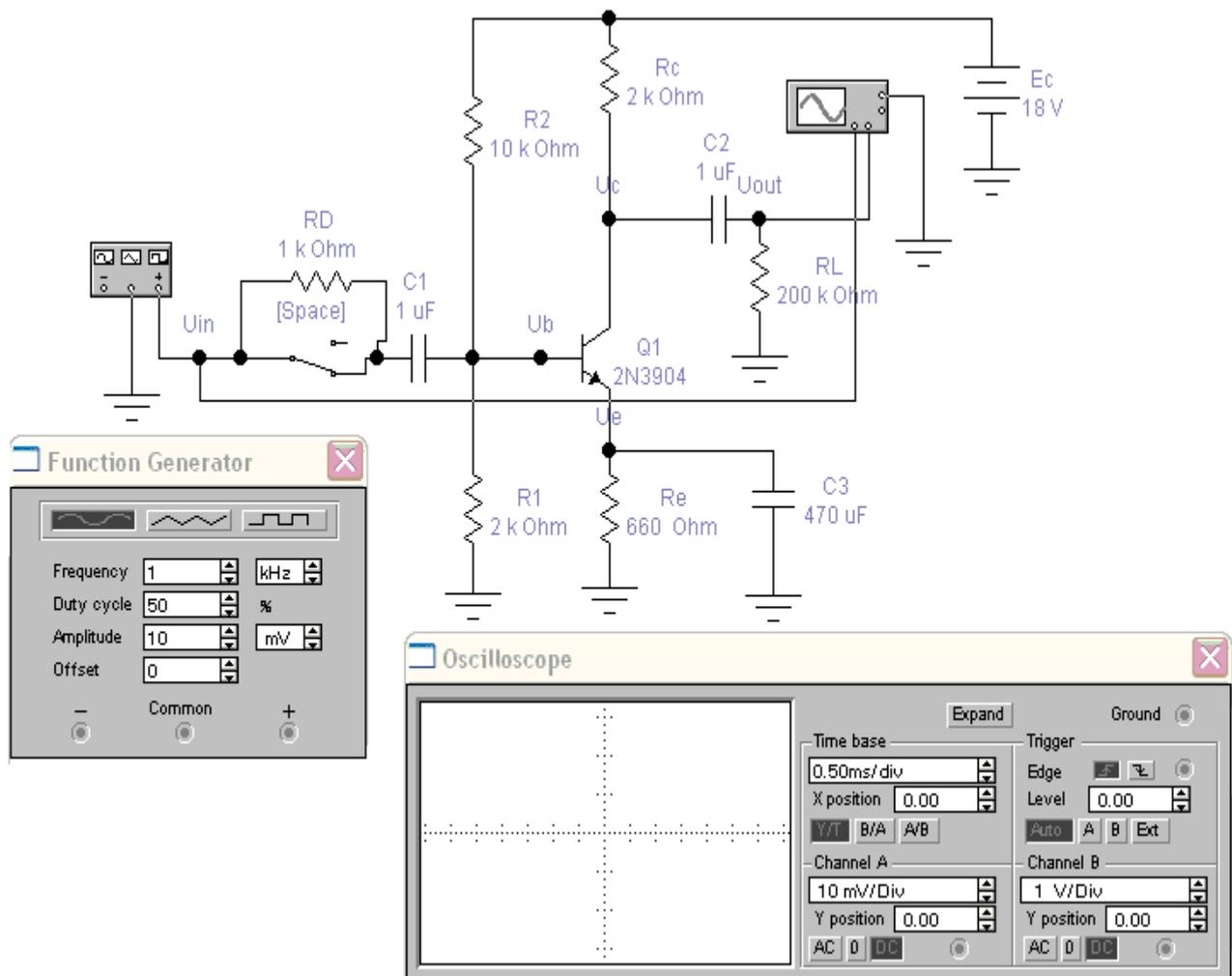


Рис. 17

1. Создать файл по схеме, изображенной на рис. 17. Установочные параметры приборов также должны соответствовать изображению.

2. Включить схему. Для установившегося режима записать результаты измерений амплитуд входного и выходного напряжений, разности фаз входного и выходного синусоидального сигнала (разность фаз можно определить при помощи бodeплоттера). По результатам измерений амплитуд входного и выходного синусоидальных напряжений вычислить коэффициент усиления усилителя по напряжению.

3. Для схемы на рисунке определить ток эмиттера. По его значению вычислить дифференциальное сопротивление $r_{\text{э}}$ эмиттерного перехода.

Используя найденное значение, вычислить коэффициент усиления каскада по напряжению.

4. Подключить резистор R_D между точкой U_{BX} и конденсатором C_1 , разомкнув ключ [Space]. Включить схему. Измерить амплитуды входного u_{BX} и выходного $u_{ВЫХ}$ напряжения. Вычислить новое значения коэффициента усиления по напряжению усилительного каскада. По результатам измерения амплитуд напряжения u_{BX} и u_B вычислить входной ток i_{BX} . По значению u_{BX} и i_{BX} вычислить входное сопротивление r_{BX} усилителя по переменному току.

5. По значению коэффициента усиления тока β , полученному в эксперименте 1 работы 1, и величине дифференциального эмиттерного сопротивления r_{ε} вычислить входное сопротивление транзистора r_I . Вычислить значения r_{BX} , используя значения сопротивлений R_1 , R_2 и r_I .

6. Замкнуть резистор R_D между узлом U_{BX} и конденсатором C_1 , замкнув ключ [Space]. Переместить щуп канала А осциллографа в узел U_{BX} . Установить номинал резистора R_L 2 кОм. Затем включить схему и измерить амплитуды входного и выходного синусоидального напряжения. Используя результаты измерений, вычислить новое значение коэффициента усиления по напряжению.

7. Используя результаты измерений амплитуды входного и выходного синусоидального напряжения в пункте 2 и пункте 6, значение сопротивления нагрузки в пункте 6, вычислить входное сопротивление усилителя.

8. Установить номинал резистора R_1 200 кОм. Переставить щуп канала В осциллографа в узел U_C и включить схему. Измерить постоянную составляющую выходного сигнала.

9. Вернуть щуп канала В осциллографа в узел U_{OUT} . На осциллографе установить масштаб для входа 10 мВ/дел. Убрать шунтирующий конденсатор C_3 и включить схему. Измерить амплитуды входного и выходного синусоидального напряжения. По результатам измерений вычислить значение коэффициента усиления каскада с ОЭ с сопротивлением в цепи эмиттера по

напряжению.

10. По величине сопротивления $r_{\text{э}}$ и значению сопротивления $R_{\text{э}}$ вычислить значение коэффициента усиления усилителя с ОЭ и сопротивление в цепи эмиттера по напряжению.

Эксперимент 2. Исследование каскада с общим коллектором в области малого сигнала.

1. Создать файл по схеме, изображенной на рис. 18. Установочные параметры приборов в схеме должны соответствовать установочным параметрам приборов на рисунке. Для удобства при проведении эксперимента оставьте увеличенным только изображение осциллографа и мультиметра. Мультиметр должен быть установлен для измерения постоянного напряжения.

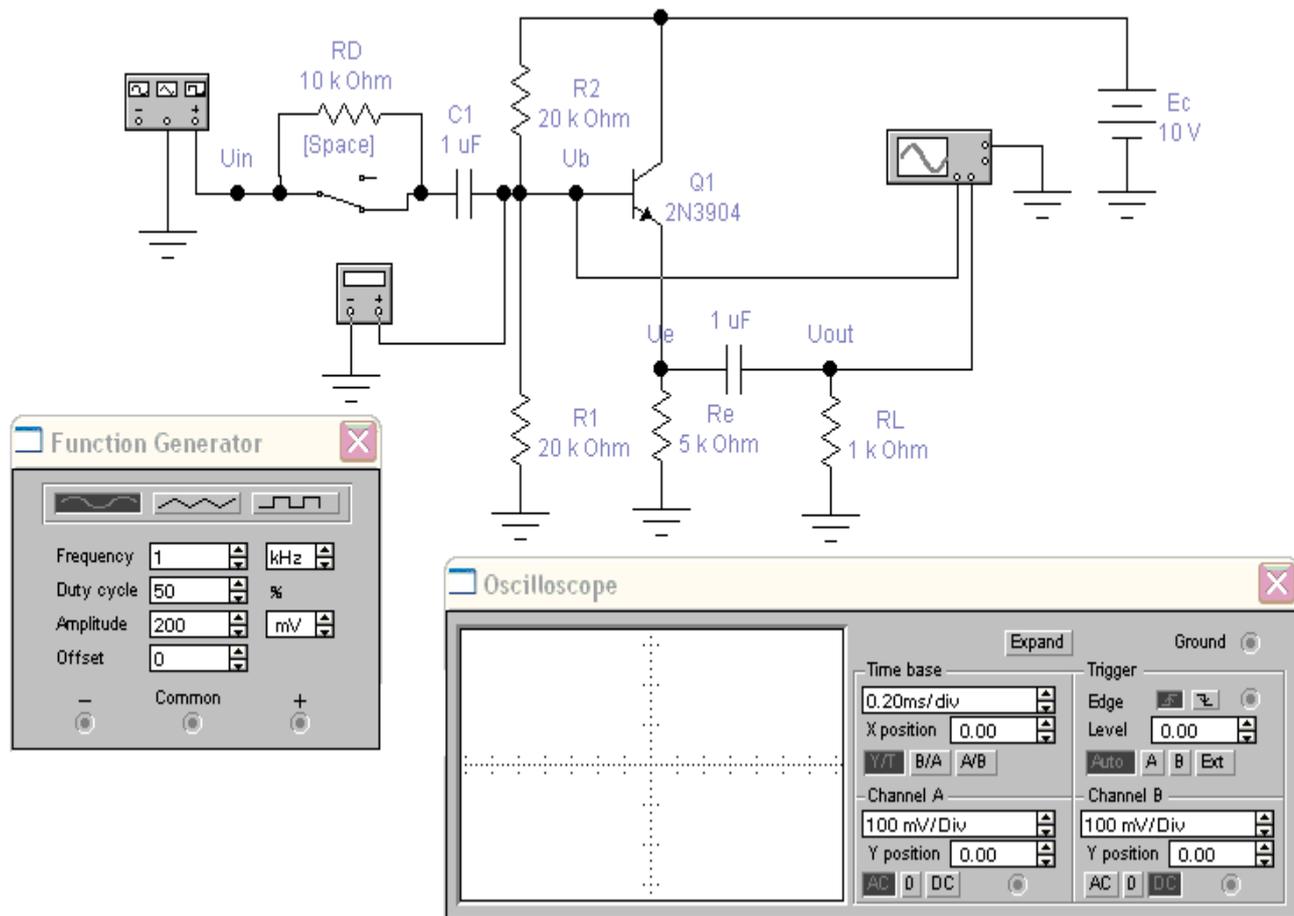


Рис. 18

2. Включить схему. Измерить постоянные составляющие напряжения в точках U_B и U_E . Вычислить постоянные составляющие напряжения в точках U_B , U_E и ток эмиттера, используя значения параметров компонентов схемы ($U_{BE} = 0,7 \text{ В}$).

3. Закрыть увеличенное изображение мультиметра, оставив увеличенным только изображение осциллографа. Включить схему. Измерить амплитуды входного и выходного напряжения. Определить разность фаз между входным и выходным напряжением (это можно сделать при помощи Боди-плоттера). По результатам измерений вычислить коэффициент усиления по напряжению.

Вычислить коэффициент усиления эмиттерного повторителя по напряжению, используя параметры схемы.

4. Подключить резистор между точкой U_{BX} и конденсатором C_1 , разомкнув ключ [Space]. Включить схему. Измерить амплитуды входного и выходного синусоидального сигнала, в этом и предыдущем пунктах вычислить входной ток. По величинам i_{BX} и u_{BX} вычислить дифференциальное входное сопротивление.

5. Используя значения параметров компонентов схемы, вычислить входное сопротивление каскада r_{BX} ($\beta=200$).

6. Закоротить резистор, замкнув ключ [Space]. Изменить номинал резистора RL до 200 кОм. Затем включить схему и записать результаты измерения выходного напряжения. Это напряжение приблизительно равно напряжению холостого хода, так как сопротивление 200 кОм можно считать разрывом цепи. Измерить амплитуду напряжения на нагрузке. Вычислить выходное сопротивление каскада по результатам измерений. Запишите значения напряжения холостого хода, напряжения на нагрузке и выходного сопротивления каскада.

Вопросы

1. Каково отличие практического и теоретического значений коэффициента усиления по напряжению?
2. Какова разность фаз между входным и выходным синусоидальными сигналами в усилителе с ОЭ, с ОК?
3. Как влияет входное сопротивление на коэффициент усиления по напряжению?
4. Какова связь между входным напряжением (узел U_{BX}) и напряжением на базе (узел U_B) при включении между ними сопротивления?

5. Каково отличие практического и теоретического значений входного сопротивления для усилителя по переменному току?
6. Каково отличие коэффициента усиления по напряжению, вычисленного в п. 9, от коэффициента усиления по напряжению из п. 3 эксперимента 1? Объяснить ответ.
7. Какое влияние оказывает понижение сопротивления нагрузки на коэффициент усиления по напряжению?
8. Какова связь между входным сопротивлением усилителя и сопротивлением в цепи коллектора R_K ?
9. Как влияет сопротивление $R_{Э}$ на коэффициент усиления по напряжению усилителя?
10. Каково отличие практического и теоретического значений напряжения U_B по постоянному току?
11. Каково отличие практического и теоретического значений напряжения $U_{Э}$ по постоянному току?
12. Каково отличие практического и теоретического значений коэффициента усиления по напряжению усилителя с ОК? Почему значение коэффициента усиления по напряжению меньше единицы?
13. Каково отличие практического и теоретического значений входного сопротивления по переменному току усилителя с ОК? Велико ли это значение?
14. Велико ли значение выходного сопротивления усилителя с ОК?
15. Какова разность фаз входного и выходного синусоидальных сигналов?
16. В чем заключено главное достоинство схемы усилителя с ОК? В чем главное назначение этой схемы?

Лабораторная работа №4. Выпрямители. Однополупериодные и двухполупериодные выпрямители.

Цель

1. Анализ процессов в схемах однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей.
2. Сравнение форм входного и выходного напряжения для однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей.
3. Определение среднего значения выходного напряжения (постоянной составляющей) в схемах однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей.
4. Определение частоты выходного сигнала в схемах однополупериодного выпрямителя и двухполупериодного выпрямителя с выводом средней точки трансформатора.
5. Сравнение максимальных значений выходного напряжения для схем двухполупериодного и однополупериодного выпрямителей.
6. Сравнение частот выходного сигнала для схем двухполупериодного и однополупериодного выпрямителей.
7. Анализ обратного напряжения $U_{\text{мах}}$ на диоде в схемах однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей.
8. Исследование работы трансформатора в схеме выпрямителя.

Приборы и элементы

Мультиметр;

Осциллограф;

Источник переменного напряжения;

Трансформаторы;

Кремниевые диоды 1N4001;

Резисторы.

Краткие сведения из теории

Среднее значение выходного напряжения U_d (постоянная составляющая) однополупериодного выпрямителя (рис. 1) вычисляется по формуле:

$$U_d = \frac{U_m}{\pi}.$$

(1)

Значение U_d двухполупериодного выпрямителя (рис. 2) вдвое больше:

$$U_d = \frac{2 \cdot U_m}{\pi}.$$

(2)

Частота выходного сигнала f для схемы с однополупериодным или двухполупериодным выпрямителем вычисляется как величина, обратная периоду выходного сигнала:

$$f = \frac{1}{T}.$$

(3)

При этом период сигнала на выходе однополупериодного выпрямителя в два раза больше, чем у двухполупериодного. Максимальное обратное напряжение U_{\max} на диоде однополупериодного выпрямителя равно максимуму входного напряжения. Максимальное обратное напряжение U_{\max} на каждом диоде двухполупериодного выпрямителя с отводом от средней точки трансформатора равно разности удвоенного максимального значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора U_{2m} и прямого падения напряжения на диоде УПР:

$$U_{\max} = U_{2m} - U_{\text{ПР}}.$$

(4)

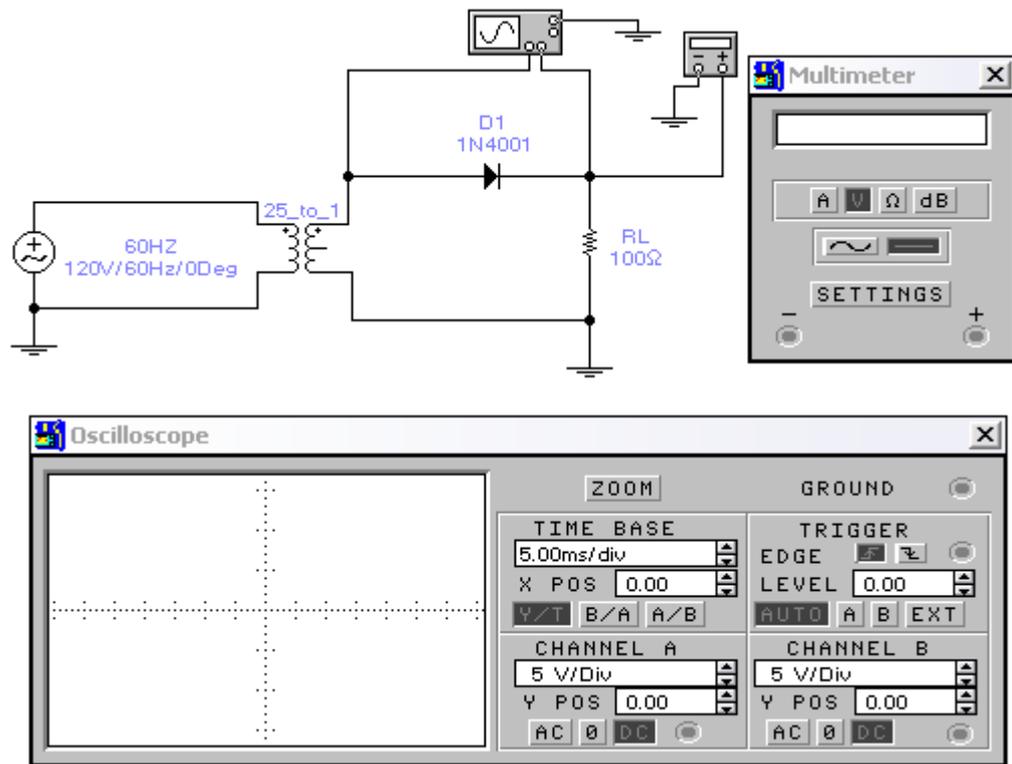


Рисунок 1.

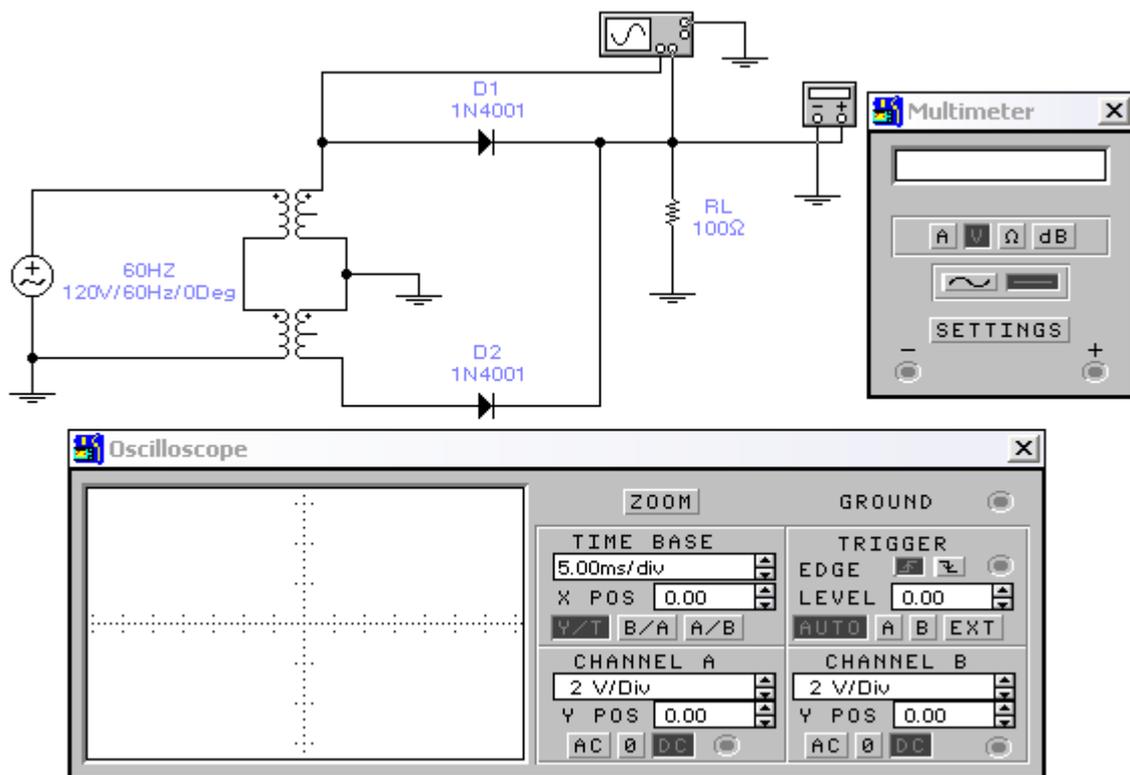


Рисунок 2.

Порядок проведения экспериментов

Эксперимент 1. Исследование входного и выходного напряжения однополупериодного выпрямителя.

1. Создать файл по схеме изображённой на рис. 1. Включить схему. На вход А осциллографа подается выходной сигнал, а на вход В - входной. Зарисовать осциллограммы. Измерить и записать максимальные входные и выходные

напряжения.

2. Измерить период T выходного напряжения по осциллограмме и записать результат. Вычислить частоту выходного сигнала.

3. По формуле (4) из раздела «Краткие сведения из теории» определить максимальное обратное напряжение $U_{\text{мах}}$ на диоде и записать результат.

4. Вычислить коэффициент трансформации как отношение амплитуд напряжений на первичной и вторичной обмотке трансформатора в режиме, близком к холостому ходу. Записать результат.

5. По формуле (1) из раздела «Краткие сведения из теории» вычислить среднее значение выходного напряжения U_d (постоянная составляющая). Записать постоянную составляющую напряжения на выходе, измеренную мультиметром.

Эксперимент 2. Исследование входного и выходного напряжений

двухполупериодного выпрямителя с отводом от средней точки трансформатора.

1. Создать файл по схеме изображённой на рис. 2. На вход А осциллографа подается выходной сигнал, а на вход В - входной. Зарисовать полученные осциллограммы. Измерить и записать максимальные входные и выходные напряжения.

2. Измерить период T по осциллограмме выходного напряжения и записать результат. Вычислить частоту выходного сигнала.

3. По осциллограмме выходного напряжения, определить максимальное обратное напряжение $U_{\text{мах}}$ на диоде. Записать результат.

4. По формуле (2) из раздела «Краткие сведения из теории» вычислить среднее значение U_d выходного напряжения (постоянная составляющая). Записать результат. Записать постоянную составляющую напряжения на выходе, измеренную мультиметром.

Вопросы

1. Каковы различия между входным и выходным сигналами однополупериодного выпрямителя?
2. Одинаковы ли вычисленное и измеренное мультиметром среднее значение выходного напряжения U_d ?
3. Одинаковы ли частоты входного и выходного сигналов в схемах одно- и двухполупериодного выпрямителей?
4. Как влияет падение напряжения на диоде на выходное напряжение выпрямителя?
5. Превышает ли максимальное отрицательное напряжение U_{\max} на диоде значение, предельно допустимое для диода 1N4001?
6. Зачем необходимы трансформаторы в схемах выпрямителей?
7. Каковы различия между сигналом на входе и на выходе при двухполупериодном выпрямлении?
8. Чем отличается выходное напряжение в схемах однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей?
9. Сравните максимальное обратное напряжение на диодах в однополупериодном и двухполупериодном выпрямителях.
10. Одинаковы ли частоты входного и выходного напряжения двухполупериодного выпрямителя?
Как они соотносятся с частотами входного и выходного напряжения для однополупериодного выпрямителя?

МОСТОВОЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ.

Цель

1. Анализ процессов в схеме выпрямительного диодного моста.
2. Исследование осциллограмм входного и выходного напряжения для выпрямительного моста.
3. Сравнение осциллограмм выходного напряжения выпрямительного моста и двухполупериодного выпрямителя с выводом средней точки трансформатора.
4. Измерение среднего значения выходного напряжения (постоянная составляющая) в схеме выпрямительного моста.
5. Сравнение максимального напряжения на диодах в мостовом и двухполупериодном выпрямителях.
6. Сравнение частот выходного напряжения в мостовом и двухполупериодном выпрямителях.
7. Вычисление максимального обратного напряжения $U_{\text{мах}}$ на диоде выпрямительного моста.

Краткие сведения из теории

Коэффициент трансформации определяется отношением числа витков первичной обмотки к числу витков вторичной обмотки трансформатора в схеме рис.3 составляет 20:1.

Среднее значение выходного напряжения U_d (постоянная составляющая) мостового выпрямителя (рис. 3) вычисляется по формуле:

$$U_d = \frac{2 \cdot U_{2m}}{\pi},$$

(5)

где максимум вторичного напряжения на полной обмотке трансформатора U_{2m}

вычисляется по формуле:

$$U_{2m} = U_{1m} (n_2 / n_1) = \frac{U_{1m}}{20},$$

(6)

U_{1m} - максимальное значение напряжения на первичной обмотке трансформатора.

Максимальное обратное напряжение $U_{мах}$ на каждом диоде для схемы с выпрямительным мостом равно напряжению на вторичной обмотке U_{2m} .

Частота выходного напряжения f для схемы с двухполупериодным мостовым выпрямителем вычисляется по формуле:

$$f = \frac{1}{T},$$

(7)

где T - период напряжения на выходе выпрямителя.

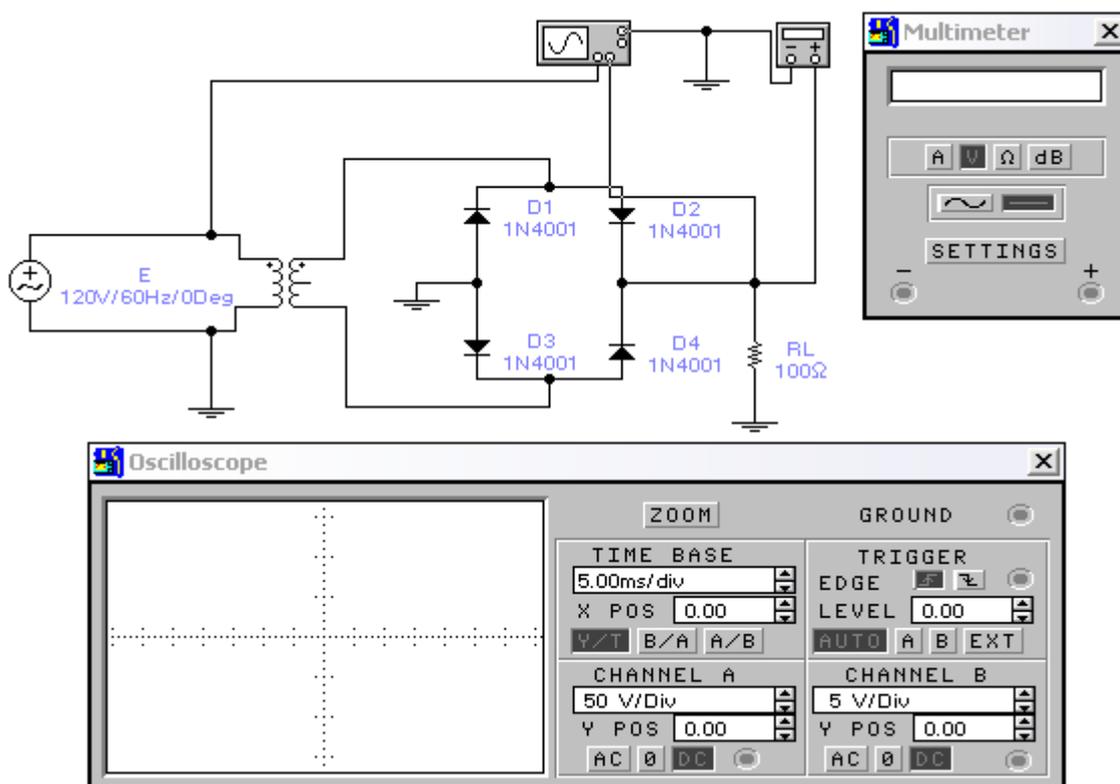


Рисунок 3.

Порядок проведения экспериментов

Эксперимент 1. Исследование входного и выходного напряжений мостового выпрямителя.

1. Создать файл по схеме изображённой на рис. 3. На вход А осциллографа подается выходной сигнал, а на вход В - входной. Зарисовать осциллограммы. Измерить максимальные входное и выходное напряжения.
2. Измерить период T по осциллограмме выходного напряжения и записать. Зная период, вычислить по формуле (7) из раздела «Краткие сведения из теории» частоту выходного сигнала.
3. Определить максимальное обратное напряжение $U_{\text{мах}}$ на диоде и записать результат.
4. Вычислить коэффициент трансформации как отношение амплитуд напряжений на первичной и вторичной обмотке трансформатора в режиме, близком к холостому ходу. Записать результат.
5. Вычислить среднее значение выходного напряжения U_d (постоянная составляющая) по формуле (5) из раздела «Краткие сведения из теории». Записать результат. Записать постоянную составляющую напряжения на выходе, измеренную мультиметром.

Вопросы

1. По осциллограммам выходного напряжения, определите, осуществляет ли выпрямительный мост однополупериодное или двухполупериодное выпрямление?
2. Как различаются переменные составляющие напряжений на входе и выходе

выпрямительного моста?

3. Чем отличаются выходные напряжения в схемах с выпрямительным мостом и двухполупериодным выпрямителем с отводом от средней точки трансформатора?
4. Сравните максимальные обратные напряжения на диодах для схем выпрямительного моста и двухполупериодного выпрямителя с отводом средней точки трансформатора.
5. Одинаковы ли среднее значение выходного напряжения U_d (постоянная составляющая) выпрямительного моста и двухполупериодного выпрямителя?
6. Одинаковы ли частоты входного и выходного напряжения выпрямительного моста? Как они соотносятся с частотами входного и выходного напряжений двухполупериодного выпрямителя?
7. Превышает ли максимальное обратное напряжение U_{max} на диоде мостового выпрямителя значение, предельно допустимое для диода 1N4001?
8. Одинаковы ли среднее значение выходного напряжения U_d в схеме выпрямительного моста, вычисленное по формуле и измеренное с помощью мультиметра?

ЕМКОСТНОЙ ФИЛЬТР НА ВЫХОДЕ ВЫПРЯМИТЕЛЯ.

Цель

1. Исследование влияния конденсатора на форму выходного напряжения однополупериодных и двухполупериодных выпрямителей.
2. Измерение частоты выходного напряжения выпрямителя с емкостным фильтром.
3. Исследование влияния величины емкости конденсатора фильтра на среднее значение выходного напряжения.
4. Сравнение среднего значения выходного напряжения для однополупериодных и двухполупериодных выпрямителей с емкостным фильтром.

Краткие сведения из теории

Если включить на выход любого из выпрямителей, рассмотренных в разделах 1 и 2, конденсатор, то переменная составляющая выходного напряжения будет ослаблена.

Среднее значение выходного напряжения U_d выпрямителя с емкостным фильтром может быть приближенно оценено из соотношения:

$$U_d = \frac{(U_{2\max} + U_{2\min})}{2} = U_{2\max} - \frac{\Delta U_2}{2}, \quad (8)$$

где $U_{2\max}$ и $U_{2\min}$ - максимум и минимум выходного напряжения,

$$\Delta U_2 = U_{2\max} - U_{2\min} \quad (9)$$

Для оценки качества фильтра обычно используют коэффициент пульсаций q выходного напряжения, который вычисляется из соотношения:

$$q = \left(\frac{\Delta U_2}{U_d} \right) \cdot 100\% \quad (10)$$

На рисунках 4 и 5 показаны соответственно однополупериодный и двухполупериодный выпрямители с емкостным фильтром на выходе.

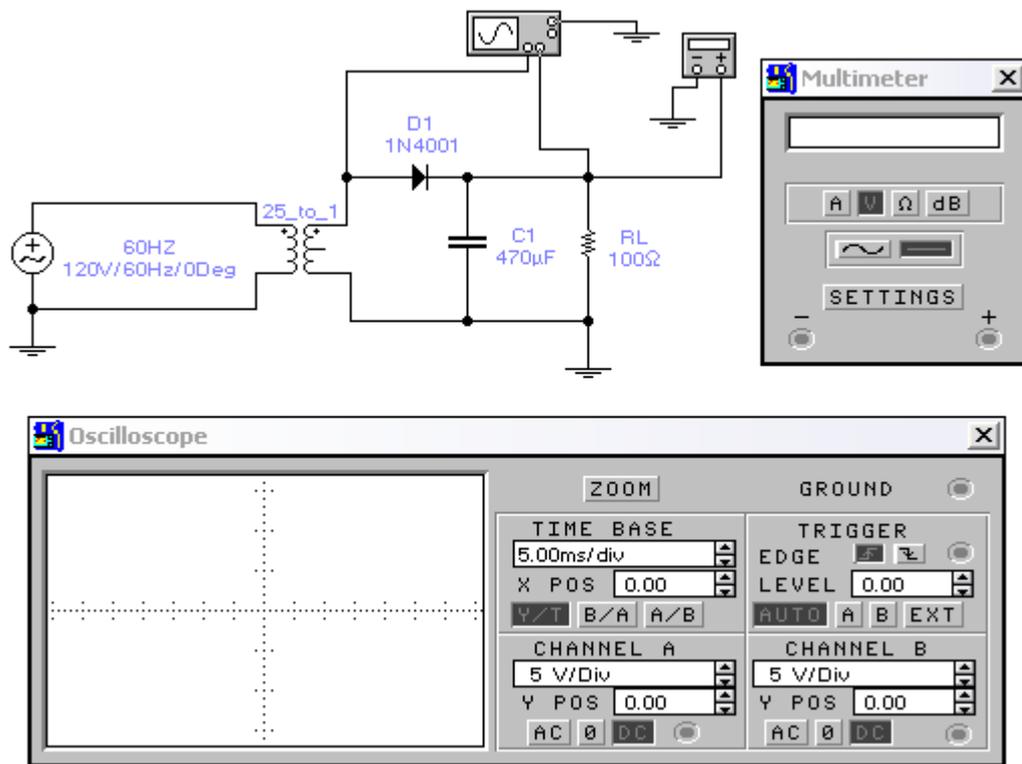


Рисунок 4.

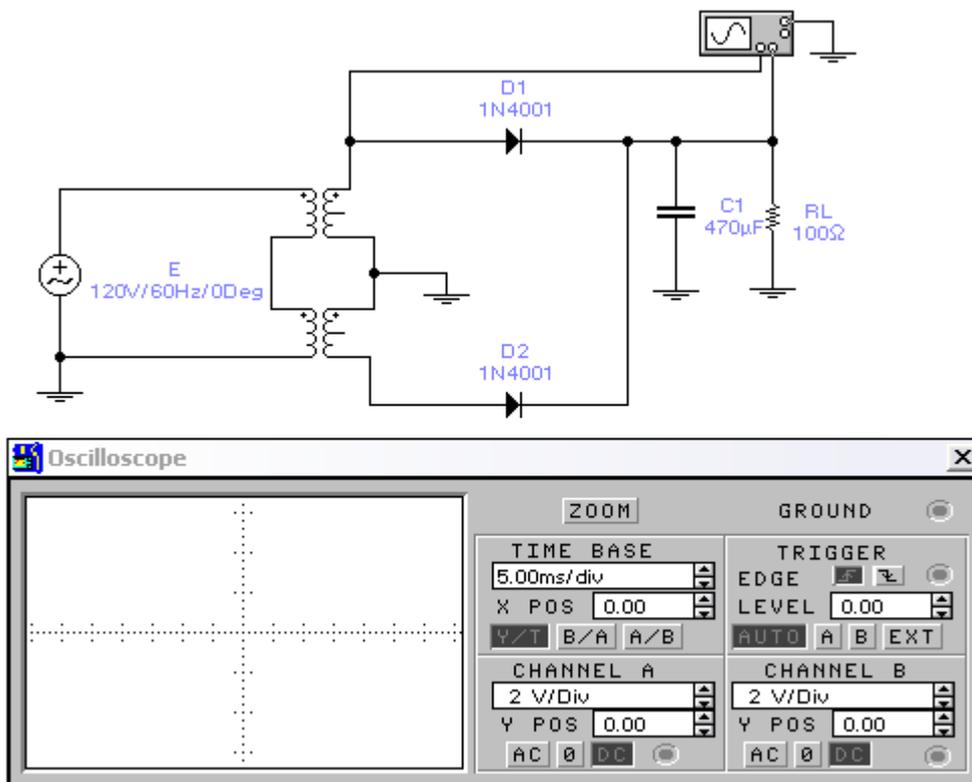


Рисунок 5.

Порядок проведения экспериментов

Эксперимент 1. Определение коэффициента пульсаций однополупериодного выпрямителя.

1. Создать файл по схеме изображённой на рис. 4. На вход А осциллографа подается входное напряжение, а на вход В - выходное. Измерить максимум выходного напряжения U_{2max} и разность между максимумом и минимумом выходного напряжения ΔU_2 . Зарисовать осциллограммы.

2. По формуле (8) из раздела «Краткие сведения из теории» вычислить среднее значение выходного напряжения U_d по результатам измерений. Записать результат.

3. Записать постоянную составляющую выходного напряжения по показаниям мультиметра. Сравнить значения, полученные обоими методами.

4. Вычислить коэффициент пульсаций выходного сигнала по формуле (10) из раздела «Краткие сведения из теории».

Эксперимент 2. Определение коэффициента пульсаций однополупериодного выпрямителя при изменении емкости фильтра.

1. Отключить мультиметр в схеме на рис. 4. Установить емкость конденсатора равной 100 мкФ. Включить схему. Измерить максимум выходного напряжения и разность между максимумом и минимумом напряжений на выходе выпрямителя по показаниям осциллографа. Записать результат.

2. Вычислить среднее значение напряжения U_d по формуле (8) из раздела «Краткие сведения из теории». I

3. Вычислить коэффициент пульсаций выходного напряжения по формуле (10) из раздела «Краткие сведения из теории».

Эксперимент 3. Определение коэффициента пульсаций однополупериодного выпрямителя при изменении тока нагрузки.

1. Установите емкость конденсатора в схеме на рис. 4. равной 470 мкФ. Изменить сопротивление резистора нагрузки до 200 Ом. Включить схему. Измерить максимум выходного напряжения и разность между максимумом и минимумом напряжений на выходе выпрямителя по показаниям осциллографа. Записать результат.

2. Вычислить среднее значение напряжения U_d по формуле (8) из раздела «Краткие сведения из теории».

3. Вычислить коэффициент пульсаций выходного напряжения по формуле (10) из раздела «Краткие сведения из теории».

Эксперимент 4. Определение коэффициента пульсаций двухполупериодного выпрямителя.

1. Создать файл по схеме изображённой на рис. 5. На вход А осциллографа подается входное напряжение, а на вход В - выходное. Измерить максимум выходного напряжения U_{2max} и разность между максимумом и минимумом выходного напряжения ΔU_2 . Зарисовать осциллограммы.

2. Вычислить среднее значение напряжения U_d по формуле (8) из раздела «Краткие сведения из теории».

3. Вычислить коэффициент пульсаций выходного напряжения по формуле (10) из раздела «Краткие сведения из теории».

Вопросы

1. Выведите формулу для расчета среднего значения выходного напряжения выпрямителя с емкостным фильтром на выходе.

2. В каком диапазоне напряжений может изменяться среднее значение выходного напряжения выпрямителя с емкостным фильтром на выходе?

3. Какие факторы влияют на величину коэффициента пульсаций выпрямителя с емкостным фильтром на выходе?

4. Сравните средние значения выходного напряжения для схем однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей с емкостным фильтром на выходе при одинаковых нагрузках.

5. Сравните коэффициент пульсаций в однополупериодном и двухполупериодном выпрямителях с емкостным фильтром на выходе.

6. Будут ли отличаться средние значения выходного напряжения однополупериодной и двухполупериодной схем выпрямления с емкостным

фильтром, если сопротивление нагрузки равно бесконечности?

7. Будет ли влиять частота входного напряжения выпрямителя на среднее значение выходного напряжения и на коэффициент пульсаций при фиксированных значениях емкости фильтра и сопротивления нагрузки?

Лабораторная работа №5. Диодные ограничители и диодные формирователи.

Цель

1. Исследование работы последовательного ограничителя.
2. Исследование работы последовательного ограничителя со смещением.
3. Исследование работы шунтирующего ограничителя.
4. Исследование работы шунтирующего ограничителя со смещением.
5. Исследование работы шунтирующего ограничителя на стабилитроне.
6. Исследование работы симметричного шунтирующего ограничителя на стабилитронах.
7. Исследование работы положительного и отрицательного формирователей.
8. Измерение среднего значения сигнала (постоянной составляющей).
9. Исследование влияния амплитуды входного напряжения на выходное напряжение.
10. Исследование влияния напряжения на диоде на выходное напряжение формирователя.

Приборы и элементы:

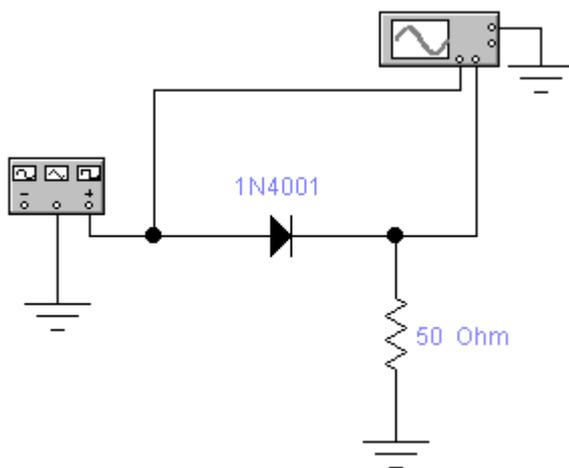
- генератор сигналов;
- осциллограф;
- мультиметр;
- источник постоянной ЭДС;
- диод 1N4001;
- стабилитроны 1N4773;
- резисторы;
- конденсатор.

Краткие сведения из теории

1. Диодные ограничители.

Основная функция положительных диодных ограничителей заключается в том, чтобы повторять входное напряжение, если оно не превышает заданный порог, а при превышении – поддерживать выходное напряжение на пороговом уровне. Отрицательные диодные ограничители работают аналогично: напряжение на выходе повторяет входное, если оно выше порогового уровня. Различные схемы ограничителей показаны на рисунках 1-3.

Схема для проведения измерений последовательного ограничителя, представлена на рисунке 4. Исследование ограничителей остальных типов проводится в аналогичных схемах.



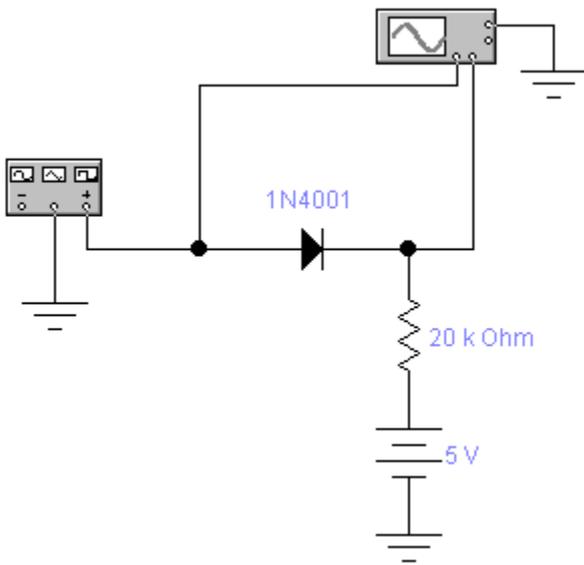
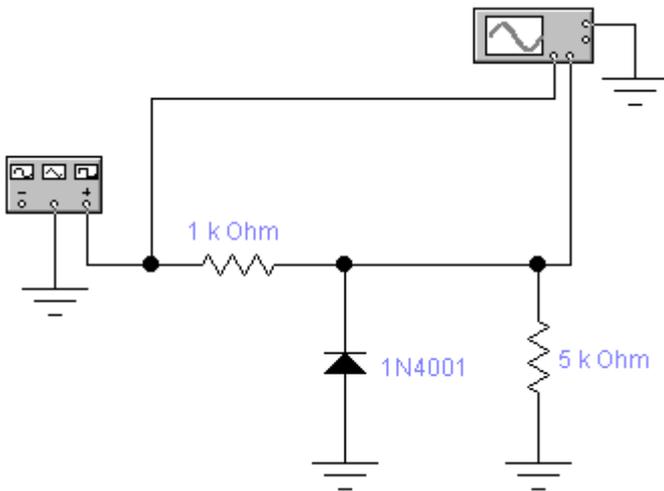


Рис. 1 Последовательный ограничитель и последовательный ограничитель со смещением.



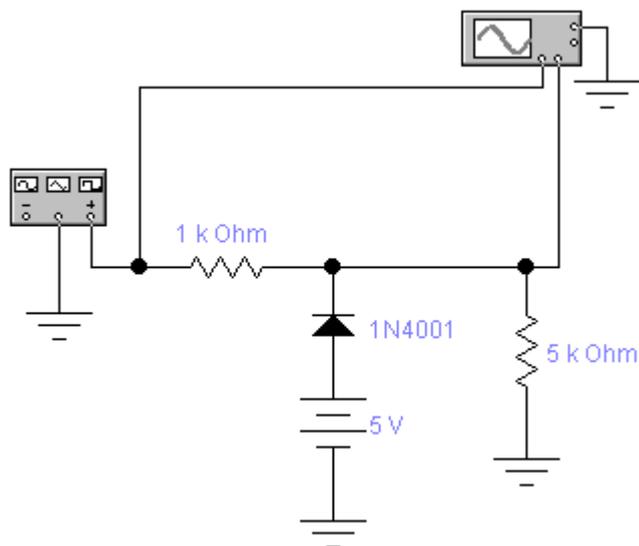
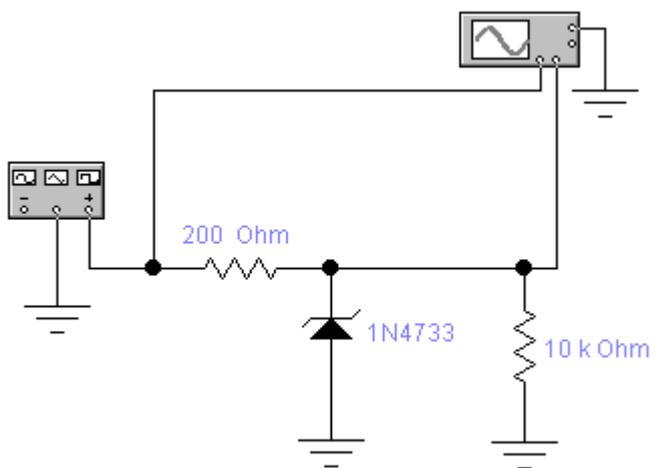


Рис. 2 Шунтирующий ограничитель и шунтирующий ограничитель со смещением.



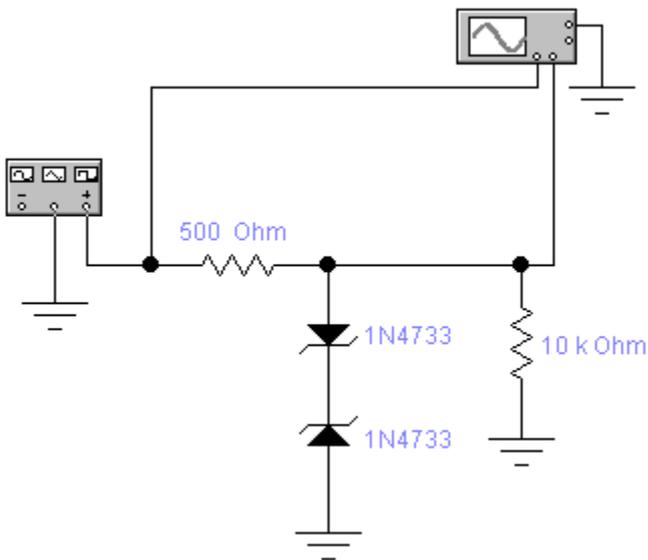


Рис. 3 Шунтирующий ограничитель на стабилитроне и симметричный шунтирующий ограничитель на стабилитронах.

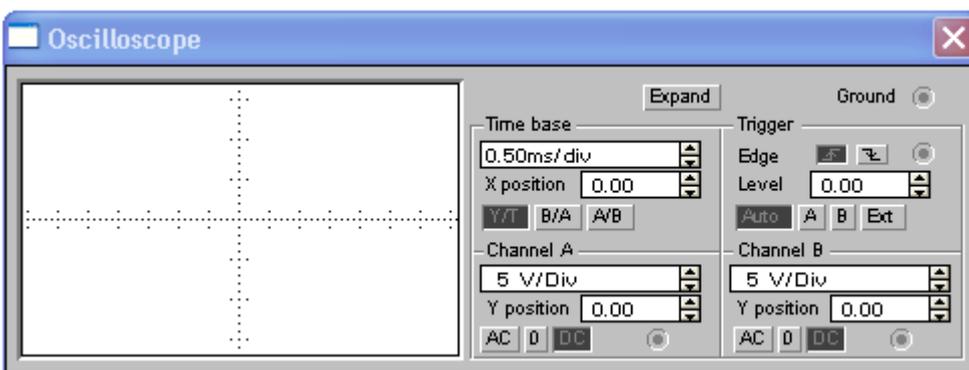
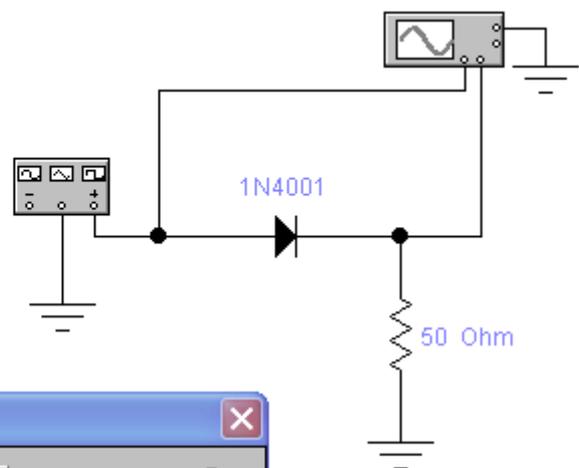
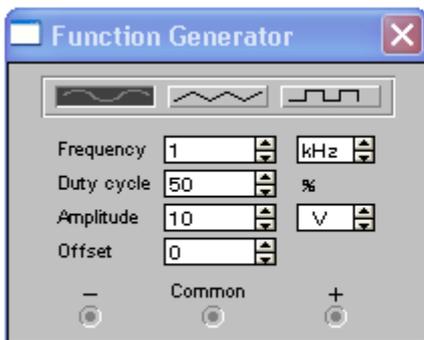


Рис. 4 Схема для проведения измерений последовательного ограничителя.

2. Диодные формирователи.

В диодных формирователях выходное напряжение представляет собой сумму входного напряжения и некоторой постоянной составляющей.

Положительный диодный формирователь добавляет положительную составляющую, отрицательный – составляющую другого знака. Положительный и отрицательный формирователи показаны на рисунках 5,6 соответственно.

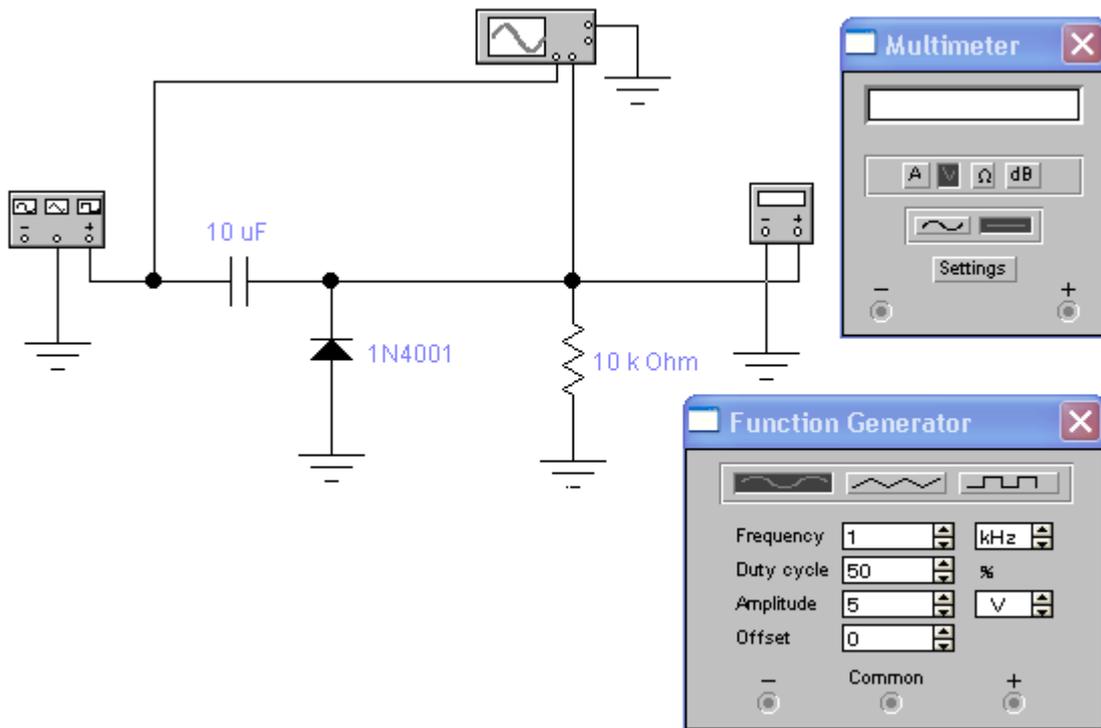


Рис. 5 Схема для проведения измерений положительного формирователя.

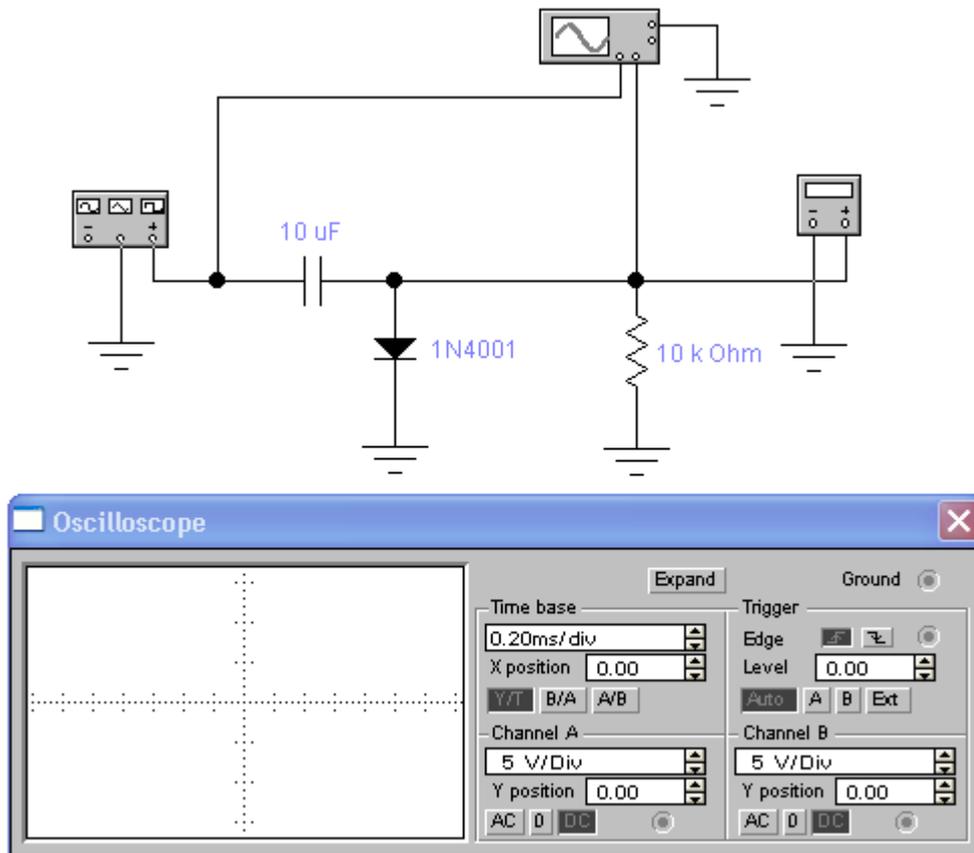


Рис. 6 Схема для проведения измерений отрицательного формирователя.

В формирователе на рисунке 5 на первой отрицательной полуволне входного напряжения через диод проходит ток. Конденсатор зарядится при этом до напряжения $U_{ВХ\ max} - 0.7\ В$, которое меньше амплитуды входного напряжения на величину прямого падения напряжения на диоде. На положительной полуволне входного напряжения диод заперт. За время, равное периоду, конденсатор разряжается очень мало и снова подзаряжается на отрицательной полуволне. В результате на конденсаторе появится постоянная составляющая. Она вместе с переменной составляющей и составит выходное напряжение. Для такой работы формирователя необходимо, чтобы постоянная времени RC-цепи значительно превышала период входного сигнала.

Порядок проведения экспериментов

Эксперимент 1. Измерение уровня ограничения последовательного

ограничителя.

1. Создать файл по схеме, изображенной на рис. 4. Установочные параметры приборов также должны соответствовать изображению.

2. Включить схему. Зарисуйте осциллограммы входного и выходного напряжения. Запишите максимум входного напряжения и уровень ограничения напряжения.

Эксперимент 2. Измерение уровня ограничения напряжения в последовательном ограничителе со смещением.

1. Создать файл по схеме, изображенной на рис. 1 (справа). Установочные параметры приборов должны соответствовать рис. 4.

2. Включить схему. Зарисуйте осциллограммы входного и выходного напряжения. Запишите минимумы входного и выходного напряжения и уровень ограничения напряжения.

3. Измените полярность включения источника питания 5 В. Включить схему. Зарисуйте осциллограммы входного и выходного напряжения. Запишите минимумы входного и выходного напряжения и уровень ограничения напряжения.

Эксперимент 3. Измерение уровня ограничения напряжения в шунтирующем ограничителе.

1. Создать файл по схеме, изображенной на рис. 2 (слева). Установочные параметры приборов должны соответствовать рис. 4.

2. Включить схему. Зарисуйте осциллограммы входного и выходного напряжения. Запишите максимум входного напряжения, минимум выходного и уровень ограничения напряжения.

Эксперимент 4. Измерение уровня ограничения напряжения в

шунтирующем ограничителе со смещением.

1. Создать файл по схеме, изображенной на рис. 2 (справа). Установочные параметры приборов должны соответствовать рис. 4.

2. Включить схему. Зарисуйте осциллограммы входного и выходного напряжения. Запишите минимумы входного и выходного напряжения и уровень ограничения напряжения.

3. Измените полярность включения источника питания 5 В. Включить схему. Зарисуйте осциллограммы входного и выходного напряжения. Запишите минимумы входного и выходного напряжения и уровень ограничения напряжения.

Эксперимент 5. Измерение уровня ограничения напряжения в шунтирующем ограничителе на стабилитроне.

1. Создать файл по схеме, изображенной на рис. 3 (слева). Установочные параметры приборов должны соответствовать рис. 4.

2. Включить схему. Зарисуйте осциллограммы входного и выходного напряжения. Запишите максимум входного напряжения, положительный и отрицательный уровни ограничения напряжения.

Эксперимент 6. Измерение уровня ограничения напряжения в симметричном шунтирующем ограничителе на стабилитронах.

1. Создать файл по схеме, изображенной на рис. 3 (справа). Установочные параметры приборов должны соответствовать рис. 4.

2. Включить схему. Зарисуйте осциллограммы входного и выходного напряжения. Запишите максимум входного напряжения, положительный и отрицательный уровни ограничения напряжения.

Эксперимент 7. Измерение постоянной составляющей выходного

напряжения положительного формирователя.

1. Создать файл по схеме, изображенной на рис. 5. Установочные параметры приборов должны соответствовать рис. 5 и рис. 6.

2. Включить схему. Зарисуйте осциллограммы входного и выходного напряжения. Измерьте амплитуды входного и выходного напряжения.

3. По показаниям осциллографа измерьте среднее значение (постоянную составляющую) выходного напряжения. Запишите показания мультиметра.

4. Установите амплитуду генератора в схеме рис. 5 равной 8 В. Включить схему. Зарисуйте осциллограммы входного и выходного напряжения. Измерьте максимумы входного и выходного напряжения.

5. По показаниям осциллографа измерьте среднее значение (постоянную составляющую) выходного напряжения. Запишите показания мультиметра.

6. Установите амплитуду генератора в схеме рис. 5 равной 2 В. Включить схему. Зарисуйте осциллограммы входного и выходного напряжения. Измерьте максимумы входного и выходного напряжения.

7. По показаниям осциллографа измерьте среднее значение (постоянную составляющую) выходного напряжения. Запишите показания мультиметра.

Эксперимент 8. Измерение постоянной составляющей выходного напряжения отрицательного формирователя.

1. Создать файл по схеме, изображенной на рис. 6. Установочные параметры приборов должны соответствовать рис. 5 и рис. 6.

2. Включить схему. Зарисуйте осциллограммы входного и выходного напряжения. Измерьте минимумы входного и выходного напряжения.

3. По показаниям осциллографа измерьте среднее значение (постоянную составляющую) выходного напряжения. Запишите показания мультиметра.

Вопросы

1. В чем отличие между уровнями ограничения в последовательных ограничителях без смещения и со смещением?
2. Что определяет уровень ограничения напряжения в ограничителе со смещением?
3. Почему в последовательном ограничителе на рис. 1 (слева) различаются минимумы входного и выходного напряжения?
4. В чем отличие между выходными напряжениями в последовательном и шунтирующем ограничителях на рис. 1 (слева) и 2 (слева)?
5. Чем определяется уровень ограничения напряжения в шунтирующем ограничителе со смещением?
6. Чем определяются положительный и отрицательный уровни ограничения напряжения в шунтирующем ограничителе на стабилизаторе?
7. В чем отличие между шунтирующим ограничителем на стабилизаторе и симметричным шунтирующим ограничителем на стабилизаторах?
8. Чем отличаются осциллограммы входного и выходного напряжения в положительном формирователе?
9. Каково среднее значение (постоянная составляющая) выходного напряжения положительного формирователя? Чем определяется эта величина?
10. Одинаковы ли среднее значение выходного напряжения для положительного формирователя, измеренное по осциллограмме и полученное по показаниям мультиметра?
11. Как изменится среднее значение напряжения на выходе положительного формирователя при увеличении амплитуды входного напряжения?
12. Как изменится среднее значение напряжения положительного формирователя при уменьшении амплитуды входного напряжения до очень низкого значения? Оцените влияние прямого падения напряжения на диоде.
13. Сравните влияние прямого падения напряжения на диоде для

положительного формирователя при низком и высоком напряжении на входе. В каком случае влияние прямого падения напряжения на диоде больше?

14. Сравните выходные напряжения отрицательного и положительного формирователей.

15. Сравните среднее значение выходного напряжения (постоянную составляющую) для отрицательного и положительного формирователей.

Лабораторная работа №6. Характеристики операционного усилителя.

Цель

- Измерение входных токов операционного усилителя (ОУ).
- Оценка величин среднего входного тока и разности входных токов ОУ.
- Измерение напряжения смещения ОУ.
- Измерение дифференциального входного сопротивления ОУ.
- Вычисление выходного сопротивления ОУ.
- Измерение скорости нарастания выходного напряжения ОУ.
- Измерение коэффициента усиления неинвертирующего усилителя на ОУ.
- Определение разности фаз между выходным и входным синусоидальным напряжением ОУ.
- Исследование влияния коэффициента усиления усилителя на постоянную составляющую выходного напряжения.
- Измерение коэффициента усиления инвертирующего усилителя на ОУ.
- Определение разности фаз между выходным и входным синусоидальным напряжением ОУ.
- Исследование влияния коэффициента усиления схемы на постоянную составляющую выходного напряжения.

Краткие сведения из теории

Интегральный операционный усилитель характеризуется рядом параметров, описывающих этот компонент с точки зрения качества выполнения им своих функций. Среди параметров, обычно приводимых в справочных данных, основными являются следующие.

Средний входной ток I_{BX} . В отсутствие сигнала на входах ОУ через его входные

выводы протекают токи, обусловленные базовыми токами входных биполярных транзисторов или токами утечки затворов для ОУ с полевыми транзисторами на входе. Входные токи, проходя через внутреннее сопротивление источника входного сигнала, создают падения напряжения на входе ОУ, которые могут вызвать появление напряжения на выходе в отсутствии сигнала на входе. Компенсация этого падения напряжения затруднена тем, что токи входов реальных ОУ могут отличаться друг от друга на 10...20%. Входные токи ОУ можно оценить по среднему входному току, вычисляемому как среднее арифметическое токов инвертирующего и неинвертирующего входов:

$$I_{BX} = \frac{I_1 + I_2}{2}.$$

где I_1 и I_2 соответственно токи инвертирующего и неинвертирующего входов.

Разность входных токов ΔI_{BX} определяется выражением:

$$\Delta I_{BX} = I_1 - I_2.$$

В справочниках указывают модуль этой величины.

Схема для измерения входных токов представлена на рис. 1.

Коэффициент усиления напряжения на постоянном токе K_0 - показатель ОУ, определяющий насколько хорошо выполняет ОУ основную функцию - усиление входных сигналов. У идеального усилителя коэффициент усиления должен стремиться к бесконечности.

Коэффициент усиления напряжения схемы усилителя на ОУ (рис. 2) вычисляется по формуле:

$$K_v = -\frac{R_2}{R_1}.$$

Напряжение смещения УСМ — значение напряжения, которое необходимо подать на вход ОУ, чтобы напряжение на его выходе было равно нулю.

Напряжение смещения УСМ можно вычислить, зная выходное напряжение $\Delta U_{ВЫХ}$ при отсутствии напряжения на входе и коэффициент усиления:

$$U_{CM} = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{K_y}.$$

Входное сопротивление $R_{вх}$. Различают две составляющие входного сопротивления: дифференциальное входное сопротивление и входное сопротивление по синфазному сигналу (сопротивление утечки между каждым входом и "землей"). Входное дифференциальное сопротивление для биполярных ОУ находится обычно в пределах 10 кОм...10 МОм. Входное сопротивление по синфазному сигналу определяется как отношение приращения входного синфазного напряжения $\Delta U_{ВХ.СФ}$ к вызванному приращению среднего входного тока $\Delta I_{ВХ.СР}$:

$$R_{ВХ.СФ} = \frac{\Delta U_{ВХ.СФ}}{\Delta I_{ВХ.СР}}.$$

Дифференциальное входное сопротивление наблюдается между входами ОУ и может быть определено по формуле:

$$R_{ВХ.ДИФ} = \frac{\Delta U_{ВХ.}}{\Delta I_{ВХ.}}$$

где $\Delta U_{ВХ}$ — изменение напряжения между входами ОУ, $\Delta I_{ВХ}$ — изменение входного тока.

Выходное сопротивление $R_{ВЫХ}$ в интегральных ОУ составляет 20...2000 Ом. Выходное сопротивление уменьшает амплитуду выходного сигнала, особенно при работе усилителя, на сравнимое с ним сопротивление нагрузки. Схема для измерения дифференциального входного сопротивления ОУ и выходного сопротивления приведена на рис. 3.

Скорость нарастания выходного напряжения $V_{УВЫХ}$ равна отношению изменения выходного напряжения ОУ ко времени его нарастания при подаче на вход скачка напряжения. Время нарастания определяется интервалом времени, в течении которого выходное напряжение ОУ изменяется от 10% до 90% от своих установившихся значений.

$$V_{UBBYX} = \frac{U_{BYX}}{t_{YCT}}.$$

Схема для измерения скорости нарастания выходного напряжения показана на рис. 4. Измерения проводятся при подаче импульса в виде ступени на вход ОУ, охваченного отрицательной обратной связью (ООС) с общим коэффициентом усиления от 1 до 10.

Коэффициент усиления схемы неинвертирующего усилителя на ОУ вычисляется по формуле:

$$K_y = 1 + \frac{R_1}{R_2}.$$

Схема включения неинвертирующего усилителя приведена на рис. 5.

Постоянная составляющая выходного напряжения усилителя U_{0BYX} определяется произведением напряжения смещения U_{CM} на коэффициент усиления схемы КУ:

$$U_{0BYX} = U_{CM} \cdot K_y.$$

Коэффициент усиления инвертирующего усилителя на ОУ с обратной связью (рис. 6.) вычисляется по формуле:

$$K_y = -\frac{R_f}{R_1}.$$

Знак "минус" в формуле означает, что выходное напряжение инвертирующего усилителя находится в противофазе с входным напряжением.

Порядок проведения экспериментов

Эксперимент 1. Измерение входных токов.

Откройте файл labfile1 со схемой, изображенной на рис.1. Номинал резисторов

на входе 100 Ом, на выходе – 10 кОм. Тип ОУ – LM741. Включите схему. Измерьте входные токи ОУ. По результатам измерений вычислите средний входной ток I_{BX} и разность ΔI_{BX} входных токов ОУ.

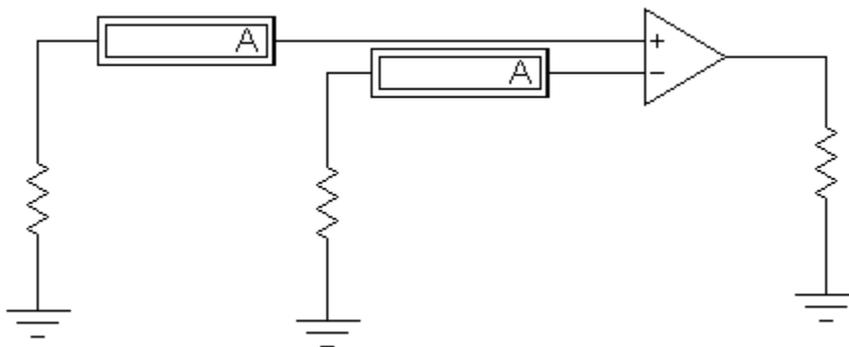


Рис. 1

Эксперимент 2. Измерение напряжения смещения.

Откройте файл labfile2 со схемой, изображенной на рис. 2. Включите схему. Запишите показания вольтметра в раздел "Результаты экспериментов". По результатам измерения, вычислите напряжение смещения U_{CM} , используя коэффициент усиления схемы на ОУ. Результаты вычислений также занесите в раздел "Результаты экспериментов".

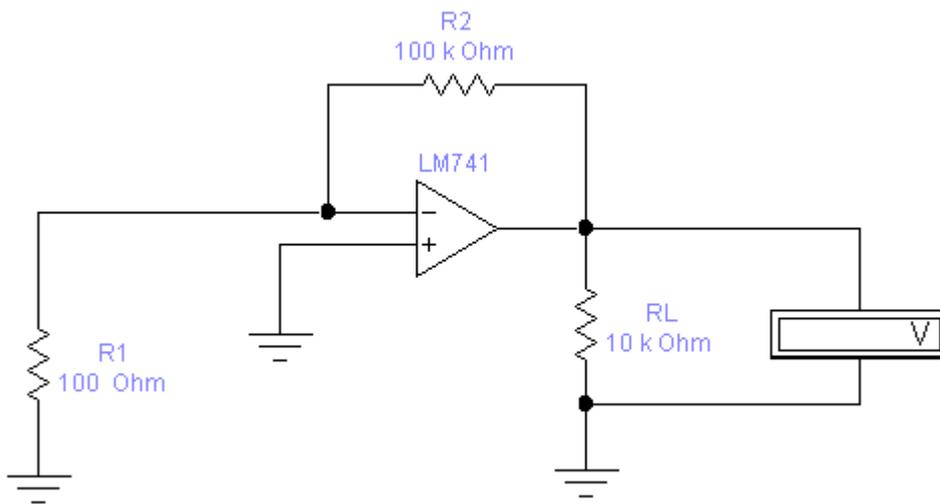
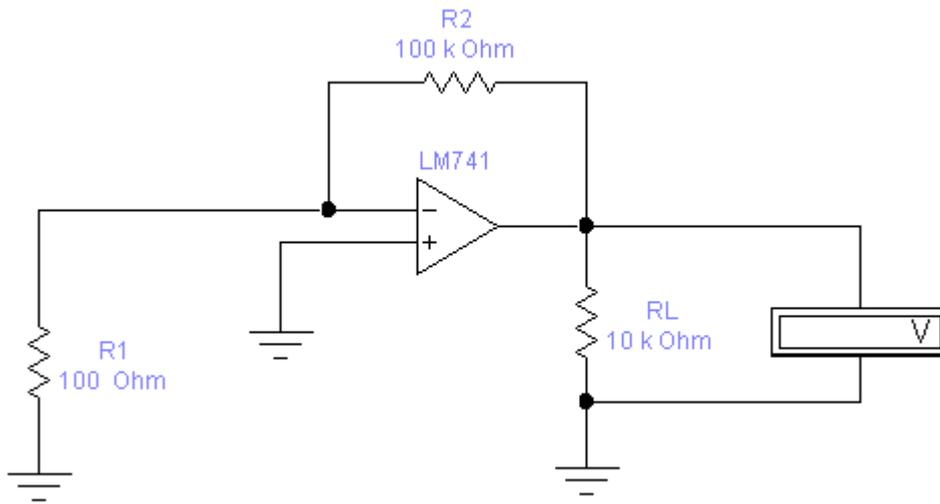
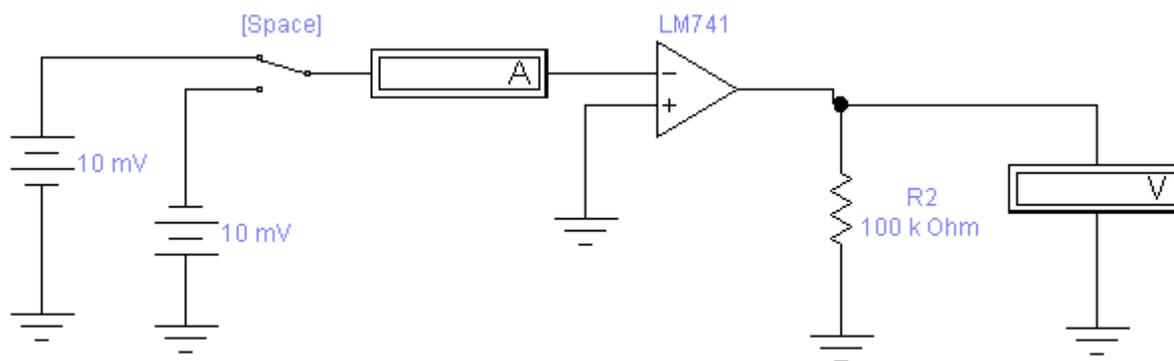


Рис. 2

Эксперимент 3. Измерение входного и выходного сопротивлений.

- а). Откройте файл labfile3 со схемой, изображенной на рис. 3. Включите схему. Измерьте входной ток $I_{ВХ}$ и выходное напряжение $U_{ВХ}$, запишите показания в раздел "Результаты экспериментов". Переключите ключ клавишей [Space]. Измерьте входной ток после переключения ключа. Рассчитайте изменения входного напряжения и тока. По полученным результатам вычислите дифференциальное входное сопротивление ОУ. Результаты занесите в раздел "Результаты экспериментов".
- б). Уменьшайте сопротивление нагрузочного резистора R_L до тех пор, пока выходное напряжение $U_{ВХ}$ не будет примерно равно половине значения полученного в п. а). Запишите значение сопротивления R_L , которое в этом случае приблизительно равно выходному сопротивлению $U_{ВХ} OY$, в раздел "Результаты экспериментов".

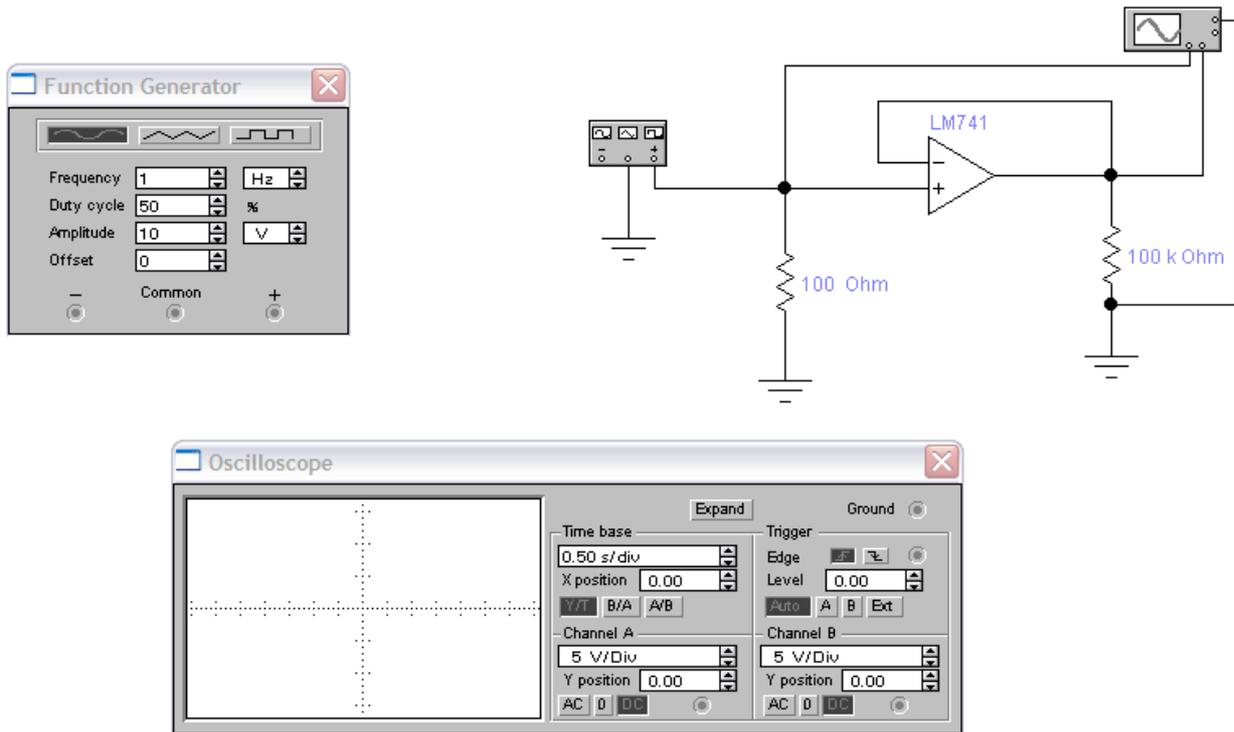


Р:

Эксперимент 4. Измерение времени нарастания выходного напряжения ОУ.

- Откройте файл labfile4 со схемой, изображенной на рис. 4. Включите схему. Зарисуйте осциллограмму выходного напряжения в раздел "Результаты экспериментов". По осциллограмме определите величину выходного напряжения, время его установления и вычислите скорость нарастания выходного напряжения в В/мкс. Запишите результат в раздел "Результаты

экспериментов".

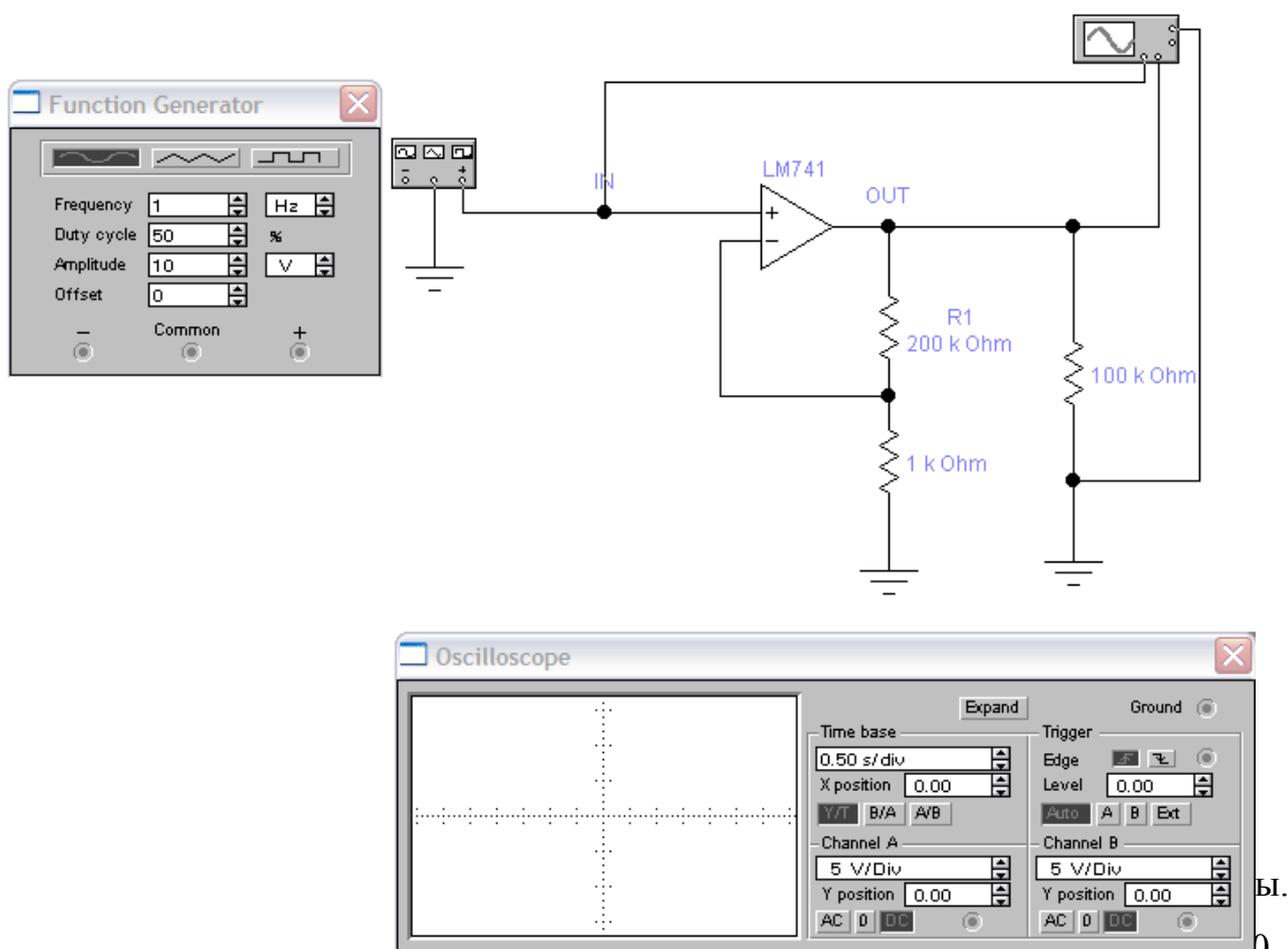


синусоидального напряжения.

Откройте файл labfile5 со схемой, изображенной на рис. 5. Рассчитайте коэффициент усиления напряжения K_U усилителя по заданным значениям параметров компонентов схемы. Включите схему. Измерьте амплитуды входного $U_{ВХ}$ и выходного $U_{ВЫХ}$ синусоидальных напряжений. Также измерьте постоянную составляющую выходного напряжения $U_{0ВЫХ}$ и разность фаз между входным и выходным напряжениями. По результатам измерений вычислите коэффициент усиления по напряжению K_U усилителя. Результаты занесите в раздел "Результаты экспериментов".

Используя значение напряжения смещения $U_{СМ}$, вычисленное в эксперименте 2, и вычисленное теоретическое значение коэффициента усиления, вычислите

постоянную составляющую выходного напряжения $U_{0ВЫХ}$. Результаты расчета также занесите в раздел "Результаты экспериментов".



В схеме, приведенной на рис. 3, уменьшите значение сопротивления R_1 с 100

кОм до

10 кОм, амплитуду синусоидального напряжения генератора увеличьте до 100 мВ. Установите масштаб напряжения на входе А осциллографа 100 мВ/div, а на канале

$V = 500 \text{ mV/div}$. Включите схему. Повторите все операции эксперимента 5 при новых параметрах компонентов. Результаты занесите в раздел "Результаты экспериментов".

Эксперимент 7. Работа усилителя в режиме усиления синусоидального напряжения.

Откройте файл labfile6 со схемой, изображенной на рис. 6. Рассчитайте коэффициент усиления напряжения K_U усилителя по значениям параметров компонентов схемы. Включите схему. Измерьте амплитуду входного $U_{ВХ}$ и выходного $U_{ВЫХ}$ синусоидального напряжения, постоянную составляющую выходного напряжения $U_{0ВЫХ}$ и разность фаз между входным и выходным напряжением. По результатам измерений вычислите коэффициент усиления по напряжению K_U усилителя. Результаты занесите в раздел "Результаты экспериментов".

Используя значение входного напряжения смещения $U_{СМ}$, полученное в эксперименте 2 и найденное значение коэффициента усиления, вычислите постоянную составляющую выходного напряжения $U_{0ВЫХ}$. Результаты вычислений также занесите в раздел "Результаты экспериментов".

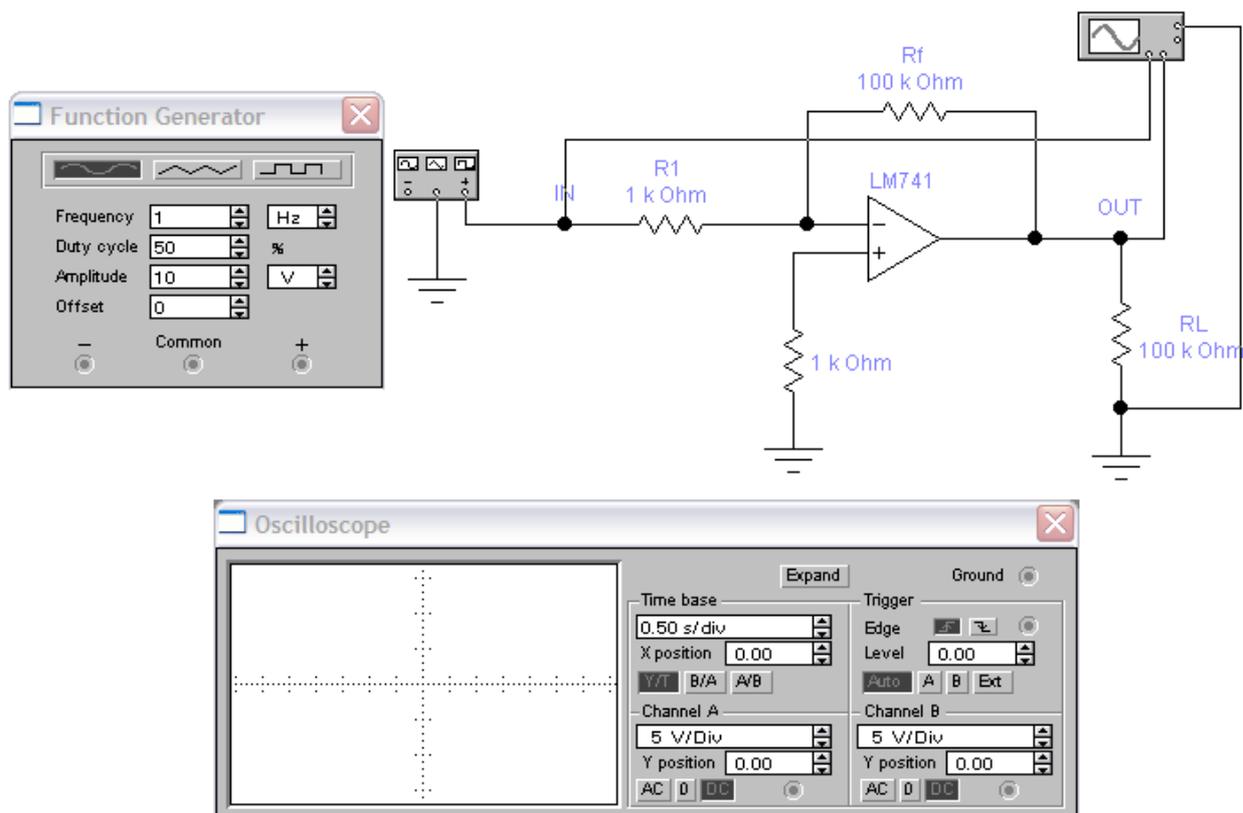


Рис. 6.

Эксперимент 8. Исследование влияния параметров схемы на режим её работы. Установите значение сопротивления R_1 равным 10 кОм, амплитуду синусоидального напряжения генератора - 100 мВ. Установите масштаб напряжения на входе А осциллографа 100 мV/del, а на канале В - 500 мV/del. Включите схему. Для новых параметров схемы повторите все измерения и вычисления эксперимента 7. Результаты занесите в раздел "Результаты экспериментов".

Вопросы

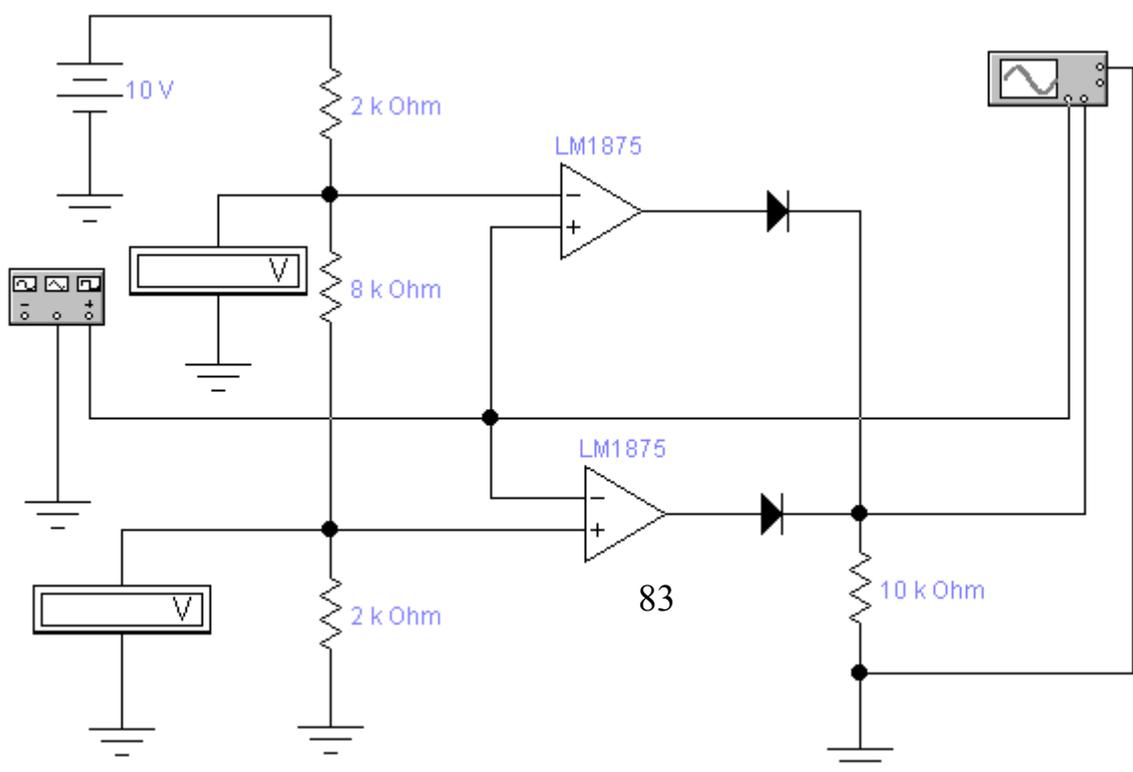
1. Отличается ли измеренное значение среднего входного тока I_{BX} от его номинального значения для ОУ LM741, взятого из паспортных данных?
2. Существенно ли отличие разности входных токов от номинального значения для ОУ LM741?
3. Совпадают ли измеренное значение напряжения смещения с номинальным значением для ОУ LM741?
4. Сравните величину измеренного входного сопротивления с паспортными данными на ОУ LM741.
5. Сравните величину измеренного выходного сопротивления с паспортными данными на ОУ LM741.
6. Сравните между собой величины входного и выходного сопротивлений ОУ. Какова схема замещения ОУ как элемента электрической цепи?
7. Отличается ли экспериментальное значение скорости нарастания выходного напряжения от номинального значения?
8. В чем причина возникновения входных токов ОУ и разности входных токов? К чему они приводят при работе схем на ОУ?
9. Из каких условий выводится выражение для коэффициента усиления

схемы на рис. 5?

10. Какова разность фаз между входным и выходным сигналами неинвертирующего усилителя на ОУ?
11. Существенно ли различие в значениях измеренной и вычисленной постоянной составляющей выходного напряжения схемы на рис. 5?
12. Чем определяется постоянная составляющая выходного напряжения схемы на рис. 5?
13. С помощью какого прибора Electronics Workbench можно экспериментально измерить коэффициент усиления схемы на ОУ?
14. Как рассчитать коэффициент усиления схемы на рис. 6?
15. Как измерить разность фаз между входным и выходным напряжением в схеме на рис. 6?
16. Оцените различия между измеренной и вычисленной постоянной составляющей выходного напряжения.
17. Сколько процентов от амплитуды выходного напряжения, измеренного в эксперименте 7, составляет постоянная составляющая в выходном напряжении?
18. Какие параметры схемы на рис. 6 влияют на ее коэффициент усиления?
19. Как влияет коэффициент усиления схемы рис. 6 на постоянную составляющую выходного напряжения?

!Примечание. Паспортные данные ОУ LM741:

1. средний входной ток ОУ 0,08 мкА;
2. разность входных токов ОУ 0,02 мкА;
3. напряжение смещения ОУ 1 мВ;
4. входное сопротивление ОУ 2 Мом;
5. выходное сопротивление ОУ 75 Ом;
6. скорость нарастания выходного напряжения ОУ 0,5 В/мкс.



Компараторы

Цель

1. Исследование схем детекторов нулевого уровня.

2. Исследование схем детекторов ненулевого уровня.

Приборы и элементы

Вольтметр

Амперметр

Осциллограф

Функциональный генератор

Источник постоянной ЭДС

Операционные усилители

Диоды

Стабилитрон 1N4733

Резисторы

Краткие сведения из теории

Функциональное назначение компаратора заключается в изменении состояния выхода при переходе входным напряжением некоторого порогового значения. В качестве компаратора может применяться ОУ. При этом ОУ работает преимущественно в области положительного или отрицательного ограничения выходного напряжения, проходя область усилительного режима только вблизи порога. В данном разделе исследуются основные схемы компараторов, построенных на базе операционных усилителей.

На рис. 1 и 2 приведены схемы и виды характеристик детекторов нулевого уровня, имеющих близкое к нулю пороговое напряжение. Схемы различаются способом подачи входного сигнала на вход ОУ. Использование разных входов ОУ для подачи входного сигнала позволяет реализовать фиксацию уровня входного напряжения положительным или отрицательным перепадом

напряжения на выходе компаратора.

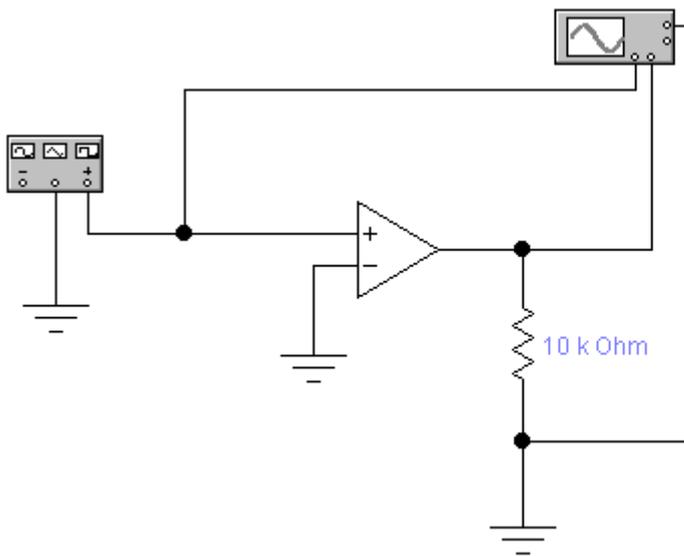


Рис. 1

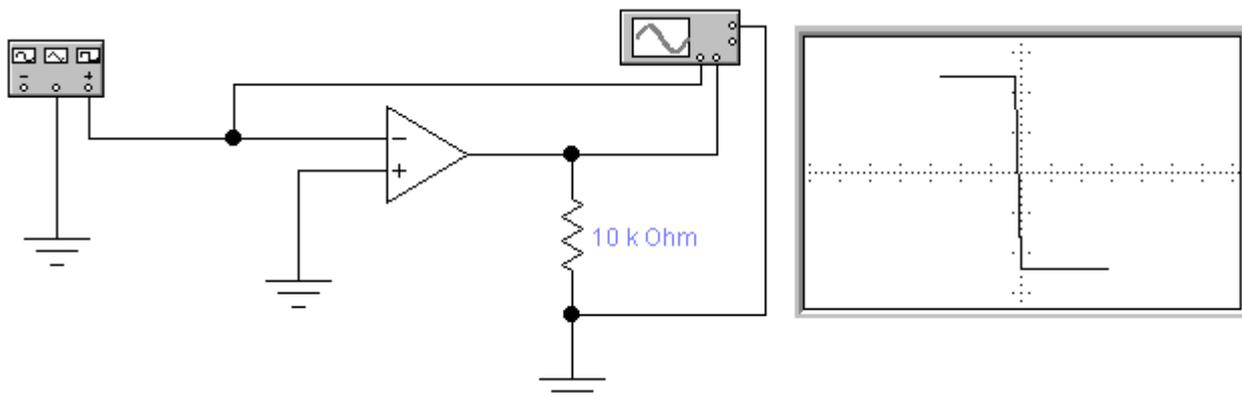


Рис. 2

На рисунках приводится вид характеристики "выход-вход". По вертикальной оси

откладывается выходное напряжение, по горизонтальной оси - входное. Наклон характеристик вызван конечной скоростью нарастания выходного напряжения. На рис. 3 и 4 приведены схемы и виды характеристик детекторов положительного и отрицательного уровней входного напряжения. Пороговый уровень входного напряжения в этих схемах задается величиной напряжения смещения, подаваемого на инвертирующий вход ОУ. Напряжение смещения может задаваться стабилитроном, как показано на рис. 5.

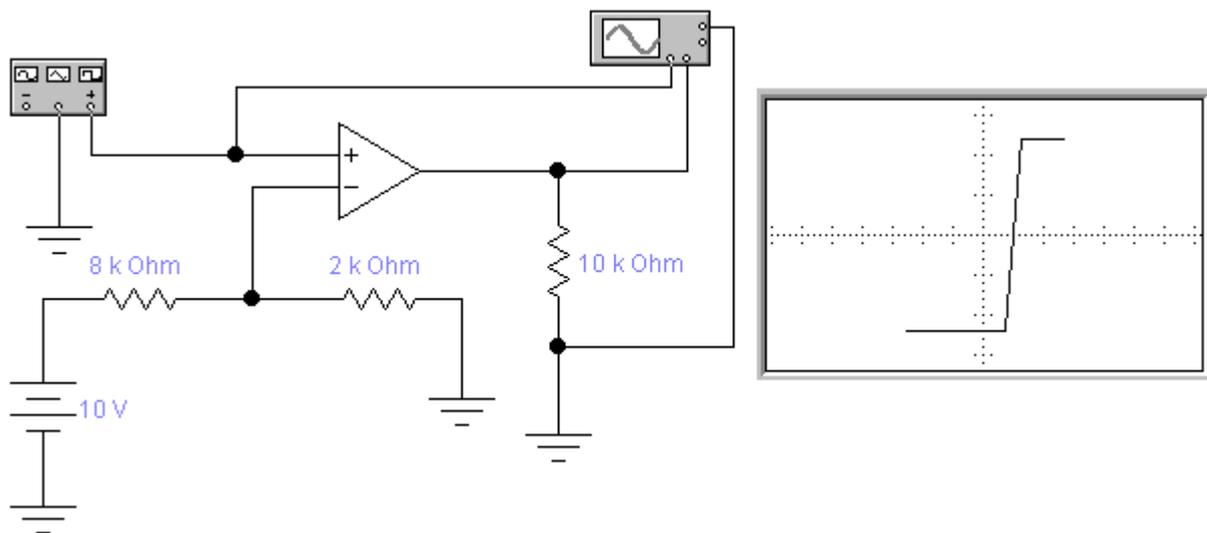


Рис. 3

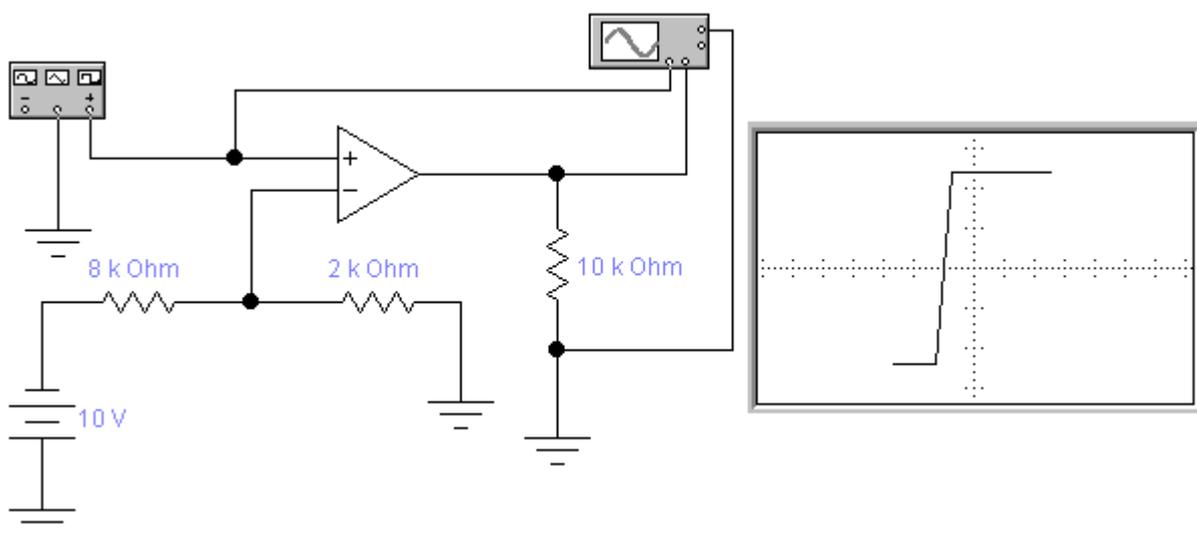


Рис. 4

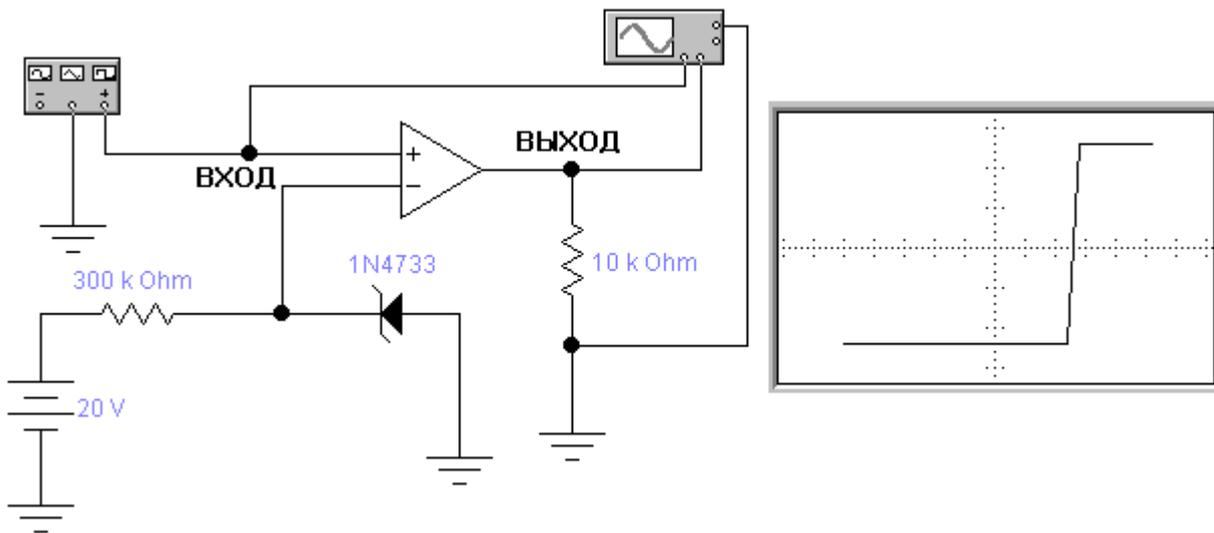


Рис. 5

Максимальное и минимальное значение выходного напряжения может задаваться при помощи внешних элементов. На рис. 6 приведена схема детектора нулевого напряжения с фиксацией уровней выходного напряжения при помощи стабилитрона.

Компаратор, показанный на рис. 7, позволяет фиксировать наличие входного напряжения в определенном диапазоне значений. Если входное напряжение изменяется в пределах пороговых значений, устанавливаемых внешними элементами, то выходное напряжение имеет низкий уровень. При выходе за установленные пределы пороговых значений выходное напряжение изменяется на высокий уровень.

При работе с компараторами могут возникнуть неприятности, проявляющиеся в том, что вместо однократного изменения уровня выходного напряжения при достижении входным напряжением порогового значения, могут иметь место быстрые колебания между уровнями выходного напряжения, особенно в том случае, когда во входном сигнале присутствует значительный шум. При таком явлении может нарушиться нормальное функционирование некоторых типов схем. Можно избежать этого, если характеристика компаратора имеет

гистерезис. Одной из схем такого рода является триггер Шмитта. Схема и её характеристика представлена на рис. 8. Для идеального ОУ, имеющего одинаковые напряжения ограничения, положительное значение входного порогового напряжения может быть вычислено по формуле:

$$U_1 = \frac{E * R_2}{R_1 + R_2}$$

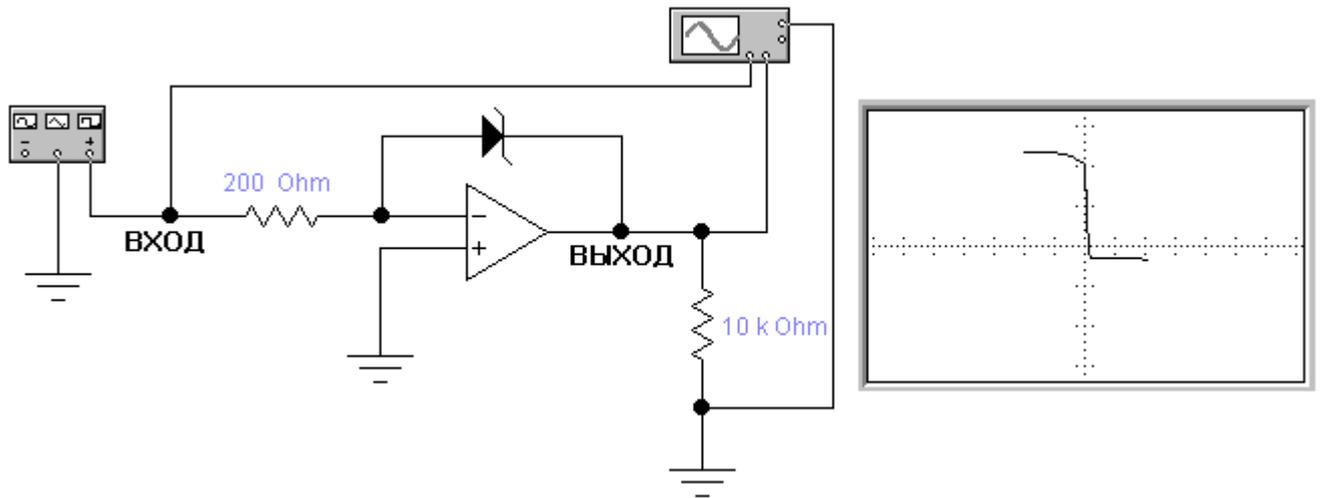


Рис. 6

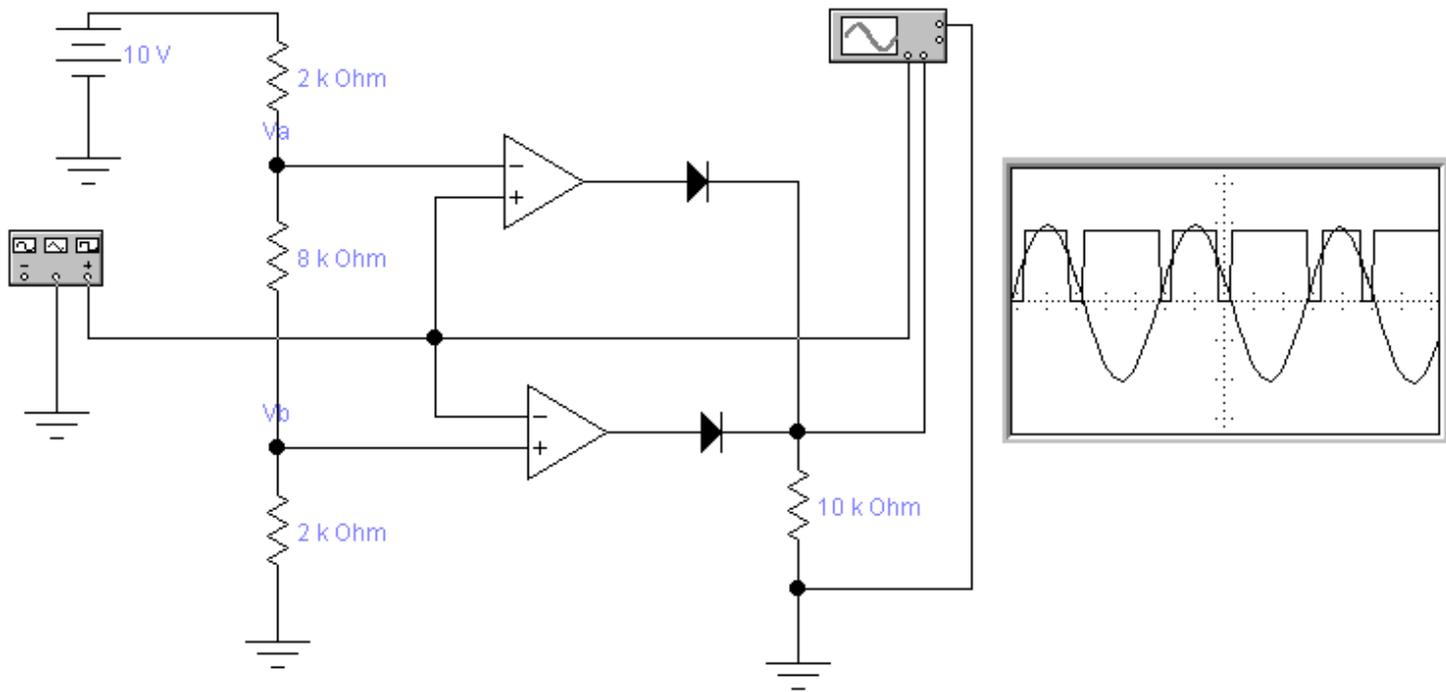


Рис. 7

Отрицательное значение входного порогового напряжения определяется выражением:

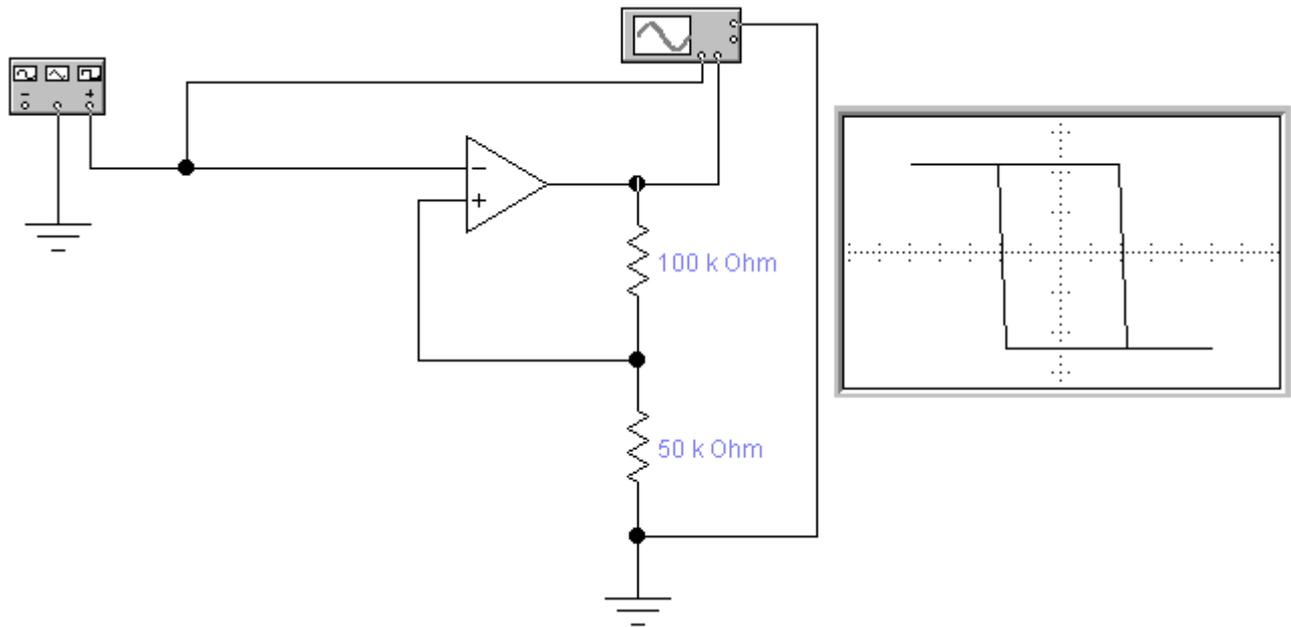
$$U_2 = -\frac{E * R_2}{R_1 + R_2} = -U_1$$

где E - напряжение ограничения ОУ.

Для всех рассмотренных схем анализ их работы можно осуществить по двум характеристикам. Первая из них представляет собой характеристику вход-выход и устанавливает соотношения между входным и выходным напряжением схемы в статическом режиме. Для наблюдения такой характеристики на экране осциллографа необходимо сигнал с канала, подключенного к выходу схемы, откладывать по вертикальной оси, а сигнал с канала, подключенного ко входу схемы, - по горизонтальной оси, на вход схемы подается синусоидальное напряжение.

Динамику переключения выходного напряжения схемы можно проследить по осциллограммам входного и выходного напряжения. При снятии этой характеристики на вход схемы подается синусоидальное напряжение и

двухлучевым осциллографом фиксируется входное и выходное напряжение.



Рису. 8

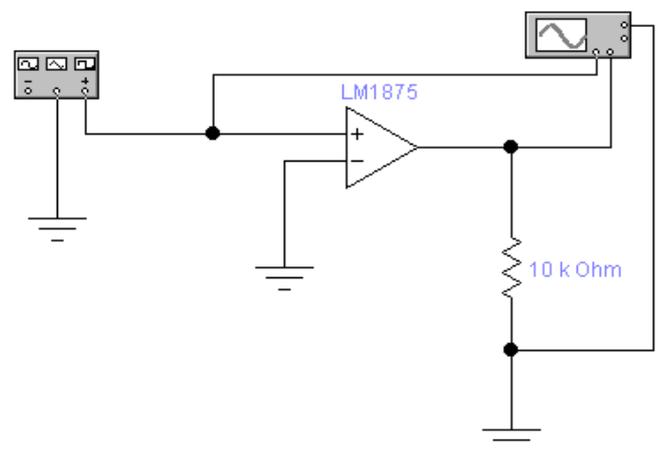
Порядок проведения экспериментов

Эксперимент 1. Исследование характеристик детектора нулевого уровня с подачей сигнала на неинвертирующий вход ОУ.

а). Характеристика выход-вход. Откройте файл circuit_1.ewb со схемой, изображенной на

рис. 9. Включите схему. В полученной на экране характеристике отклонение луча по оси Y

(канал B) определяется выходным напряжением UBbIX, а по оси X (канал A) - входным UBbX. Зарисуйте характеристику выход-вход в разделе "Результаты экспериментов" и по



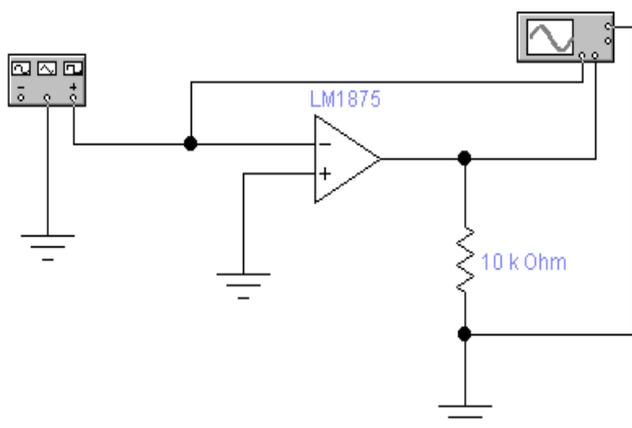
характеристике определите пороговое напряжение.

б). Осциллограммы входного и выходного напряжения. Переведите осциллограф в режим Y/T, установите масштаб напряжения на входе А 2 V/div. Включите схему. Зарисуйте полученные осциллограммы входного U_{BX} и выходного U_{BIX} напряжения в разделе "Результаты экспериментов". Определите пороговое значение входного напряжения U_{BX} и сравните его со значением, определенным в предыдущем пункте. Значение порогового напряжения запишите в раздел "Результаты экспериментов". Рис. 11.15

Рис. 9

Эксперимент 2. Исследование характеристик детектора нулевого уровня с подачей сигнала на инвертирующий вход ОУ.

а). Характеристика выход-вход. Откройте файл circuit_2.ewb со схемой, изображенной на рис. 10. Включите схему. Зарисуйте характеристику выход-вход в разделе "Результаты экспериментов" и по характеристике определите пороговое напряжение.



б). Осциллограммы входного и выходного напряжения. Переведите осциллограф в режим Y/T, установите масштаб напряжения на входе А 2 V/div. Включите схему. Зарисуйте полученные осциллограммы входного U_{BX} и выходного U_{BIX} напряжения в разделе "Результаты экспериментов". Определите пороговое значение входного напряжения U_{BX} и сравните его со значением, определенным в предыдущем пункте. Значение порогового напряжения запишите в раздел "Результаты экспериментов".

Р Рис. 10

Эксперимент 3. Исследование характеристик компаратора с положительным опорным напряжением.

а). Характеристика выход-вход. Откройте файл circuit_3.ewb со схемой, изображенной на рис. 11. Включите схему. Зарисуйте характеристику выход-вход в разделе "Результаты экспериментов" и по характеристике определите пороговое напряжение.

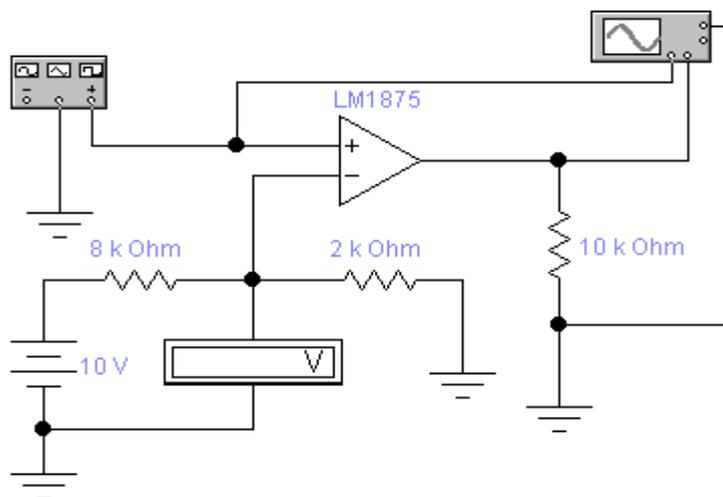


Рис. 11

б). Осциллограммы входного и выходного напряжения. Переведите осциллограф в режим Y/T, установите масштаб напряжения на входе А 2 V/div. Включите схему. Зарисуйте полученные осциллограммы входного U_{BX} и выходного

УВЫХ напряжения в разделе "Результаты экспериментов". Определите пороговое значение входного напряжения $U_{ВХ}$ и сравните его со значением, определенным в предыдущем пункте. Значение порогового напряжения запишите в раздел "Результаты экспериментов".

Рис

Эксперимент 4. Исследование характеристик компаратора с отрицательным опорным напряжением.

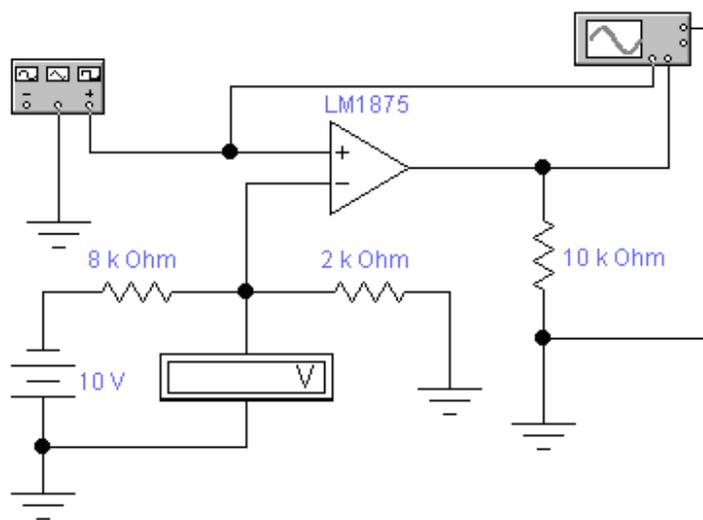


Рис. 12.

а). Характеристика выход-вход. Откройте файл circuit_4.ewb со схемой, изображенной на рис. 12. Включите схему. Зарисуйте характеристику выход-вход в разделе "Результаты экспериментов" и по характеристике определите пороговое напряжение.

б). Осциллограммы входного и выходного напряжений. Переведите осциллограф в режим Y/T, установите масштаб напряжения на входе А 2 V/div. Включите схему. Зарисуйте полученные осциллограммы входного $U_{ВХ}$ и выходного $U_{ВЫХ}$ напряжения в разделе "Результаты экспериментов". Определите пороговое значение входного напряжения $U_{ВХ}$ и сравните его со значением,

определенным в предыдущем пункте. Значение порогового напряжения запишите в раздел "Результаты экспериментов".

Эксперимент 5. Исследование характеристик компаратора с опорным напряжением, задаваемым стабилитроном.

а). Характеристика выход-вход. Откройте файл circuit_5.ewb со схемой, изображенной на рис. 13. Включите схему. Зарисуйте характеристику выход-вход в разделе "Результаты экспериментов" и по характеристике определите пороговое напряжение.

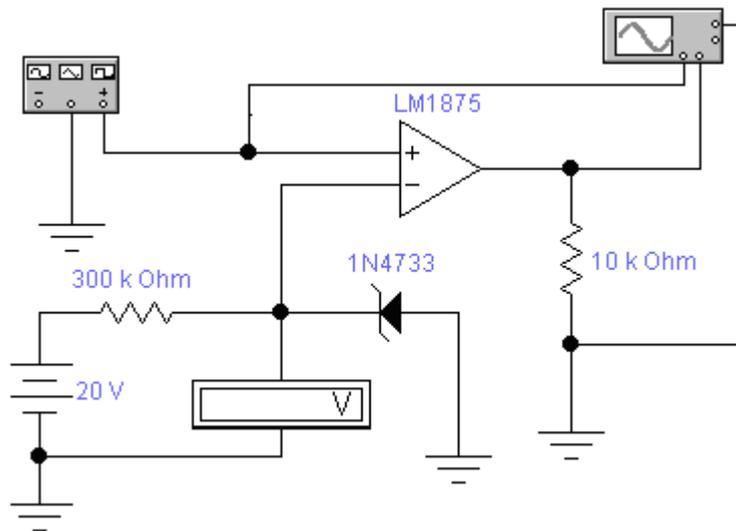


Рис. 13.

б). Осциллограммы входного и выходного напряжения. Переведите осциллограф в режим Y/T, установите масштаб напряжения на входе А 2 V/div. Включите схему. Зарисуйте полученные осциллограммы входного $U_{ВХ}$ и выходного $U_{ВЫХ}$ напряжения в разделе "Результаты экспериментов". Определите пороговое значение входного напряжения $U_{ВХ}$ и сравните его со значением, определенным в предыдущем пункте, а также с напряжением стабилизации стабилитрона. Значение порогового напряжения запишите в раздел "Результаты экспериментов".

Эксперимент 6. Исследование характеристик компаратора с фиксацией выходного напряжения.

а). Осциллограммы входного и выходного напряжения. Откройте файл circuit_6.ewb со схемой, изображенной на рис. 14. Включите схему. Зарисуйте полученные осциллограммы входного и выходного напряжения в разделе "Результаты экспериментов". По осциллограммам определите уровни выходного напряжения и пороговое напряжение.

б). Осциллограммы входного и выходного напряжения при обратном включении стабилитрона. В схеме рисунке 14 измените направление включения стабилитрона на обратное. Включите схему. Повторите операции пункта а) и занесите результаты в раздел "Результаты экспериментов".

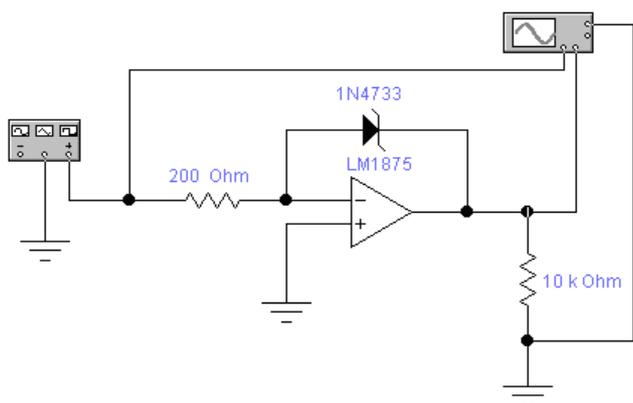
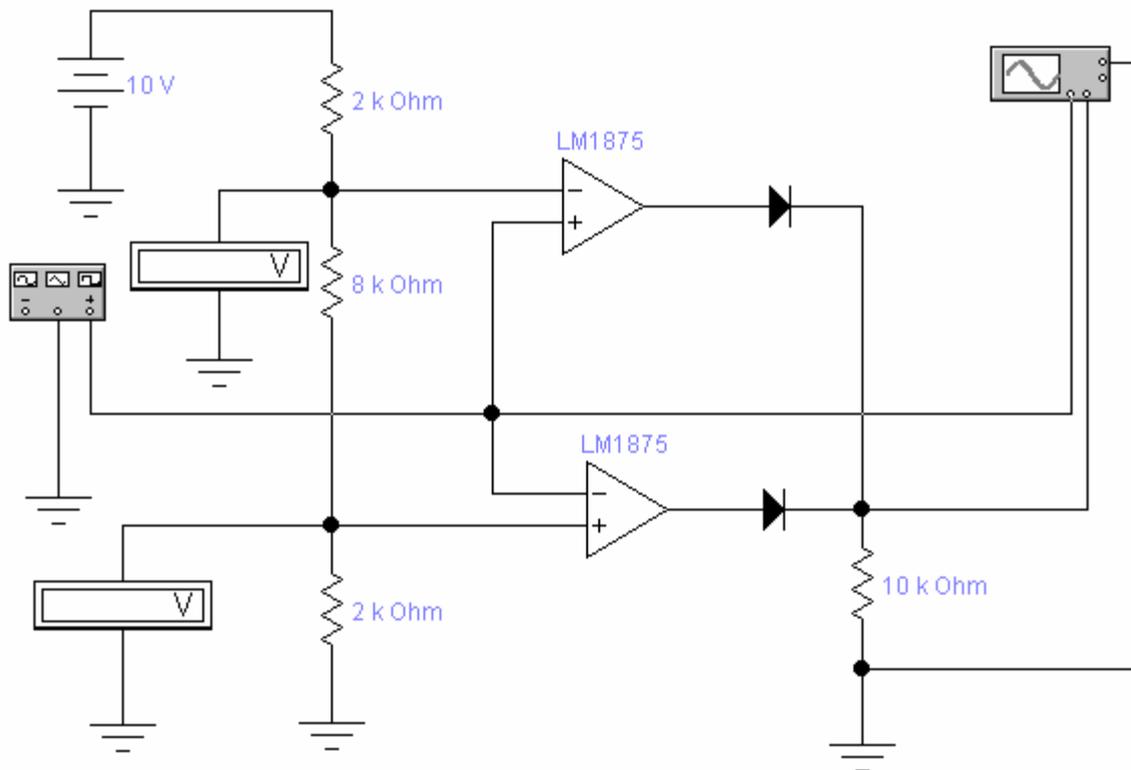


Рис. 14

Эксперимент 7. Исследование характеристик компаратора с фиксированной зоной входного напряжения.

а). Осциллограммы входного и выходного напряжения. Откройте файл circuit_7 со схемой, изображенной на рис. 15. Включите схему. Зарисуйте полученные осциллограммы входного U_{BX} и выходного U_{BIX} напряжения в разделе "Результаты экспериментов". Определите пороговые напряжения УНИЖН и УВЕРХН.

Рис. 15



Эксперимент 8. Исследование характеристик триггера Шмитта.

- а). Характеристика выход-вход. Откройте файл circuit_8 со схемой, изображенной на рис. 16. Включите схему. Зарисуйте характеристику выход-вход в разделе "Результаты экспериментов" и по характеристике определите верхнее и нижнее значение порогового напряжения.
- б). Осциллограммы входного и выходного напряжения. Переведите осциллограф в режим Y/T, установите масштаб напряжения на входе A 2 V/div. Включите схему. Зарисуйте полученные осциллограммы входного $U_{ВХ}$ и выходного $U_{ВЫХ}$ напряжения в разделе "Результаты экспериментов". По осциллограммам определите значения пороговых напряжений и сравните их со значениями, определенными в предыдущем пункте. Значения пороговых напряжений запишите в раздел "Результаты экспериментов".

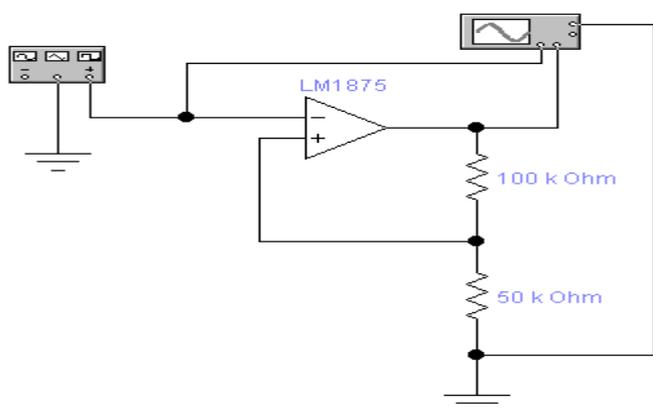


Рис. 16

Вопросы

1. Каковы особенности применения ОУ в схемах компараторов?
2. Перечислите способы построения схем детекторов положительного уровня входного напряжения.
3. Чем определяется точность задания порогов входного напряжения в схемах детекторов уровня на основе ОУ?
4. На чем основана работа компаратора с фиксированной зоной входного напряжения?
5. Можно ли в компараторе на основе триггера Шмитта сделать уровни порогов входного напряжения разными? Если да, то каким образом?