

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Белорусский государственный педагогический университет
имени Максима Танка»

***К.А. Саечников,
М.А. Вилькоцкий,
В.В. Юргульский***

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Лабораторный практикум

Рекомендовано
учебно-методическим объединением высших учебных заведений
Республики Беларусь по педагогическому образованию в качестве
практикума для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальностям:
1-02 05 02 Физика; 1-02 05 04 Физика. Дополнительная специальность

Минск 2012

УДК 537(075.8)
ББК 22.33я73
Ю669

Печатается по решению редакционно-издательского совета БГПУ

Автор:

К.А. Саечников, М.А. Вилькоцкий, В.В. Юргульский

Рецензенты:

Ю.В. Бладыко, кандидат технических наук, заведующий кафедрой электротехники и электроники БНТУ;

А.И. Корзун, кандидат технических наук, заведующий кафедрой радиосвязи и радиовещания ВГКС.

К.А. Саечников, М.А. Вилькоцкий, В.В. Юргульский

Ю669 Радиозлектроника: лабораторный практикум / *К.А. Саечников, М.А. Вилькоцкий, В.В. Юргульский*. – Минск: БГПУ, 2012. – 132 с.

ISBN 978-985-541-007-3

В лабораторном практикуме приведены описания 12 лабораторных работ, основные теоретические положения, общие методические рекомендации по их выполнению, список контрольных вопросов.

Адресуется студентам физических факультетов педагогических учебных заведений, изучающим курс «Физическая электроника». Может быть полезен обучающимся в технических учебных заведениях при изучении радиозлектроники.

УДК 537(075.8)
ББК 22.33я73

ISBN 978-985-541-007-3

© В.В. Юргульский, 2012
© БГПУ, 2012

Введение

Лабораторный практикум «Радиоэлектроника» предназначен для проведения лабораторных занятий по радиоэлектронике.

Данный лабораторный практикум написан с учетом результатов научно-методической работы по разработке и совершенствованию лабораторных работ по радиоэлектронике, проводимыми авторами на протяжении ряда лет.

Лабораторный практикум включает в себя 12 лабораторных работ. Описания лабораторных работ построены в предположении, что лекционный материал и содержание экспериментальных занятий, выполняемых в ходе лабораторных занятий, тесно связаны друг с другом.

Чтобы обеспечить студентам подготовку к лабораторным работам, в описание работ включена теоретическая часть с кратким изложением теории.

Работы построены в расчете на три часа занятия, фронтальным методом, предусмотрен довольно широкий круг заданий.

Лабораторная работа 1

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Цель работы: формирование навыков измерения напряжения с помощью электронного вольтметра, напряжения и частоты электрического колебания с помощью осциллографа; получение фигур Лиссажу и измерение по фигурам Лиссажу соотношения частот и неизвестной частоты.

Теоретические обоснования

Лабораторный стенд предназначен для выполнения тематических работ по радиоэлектронике. Стенд имеет два регулируемых независимых источника питания на напряжение 0...15 В, индикацию напряжения источников питания, гнезда для тематических вставок, клеммы, с помощью которых осуществляется переключение элементов на вставках. Схемы вставок и подключения их к стенду приводятся в инструкциях каждой работы.

Генератор Г4-221 применяется для исследования, настройки и испытаний систем и приборов, используемых в радиоэлектронике, автоматике, измерительной технике.

Генератор Г4-221 предназначен для:

- формирования немодулированных сигналов синусоидальной формы в диапазоне частот от 0,1 Гц до 17 МГц. Максимальное напряжение сигнала синусоидальной формы не менее 5 В при работе на согласованную нагрузку 50 Ом и не менее 10 В при работе на нагрузку более 100 кОм;
- формирования амплитудно-модулированных сигналов синусоидальной формы в диапазоне частот от 50 кГц до 17 МГц, модулированных внутренним синусоидальным сигналом частотой 1 кГц или внешним синусоидальным сигналом частотой от 0,03 до 10 кГц;
- формирования сигналов прямоугольной формы в диапазоне частот от 0,1 Гц до 1 МГц. Максимальный размах сигнала прямоугольной формы не менее 14 В при работе

на согласованную нагрузку 50 Ом и не менее 28 В при работе на нагрузку более 100 кОм;

- формирования сигналов прямоугольной формы уровня ТТЛ в диапазоне частот от 0,1 Гц до 1 МГц. Сигнал прямоугольной формы (уровень ТТЛ) при подключенной нагрузке имеет следующие параметры: а) значение напряжения высокого уровня 2,4 В, не менее; б) значение напряжения низкого уровня 0,4 В, не более;
- формирования сигналов синусоидальной и прямоугольной формы повышенной амплитуды в диапазоне частот от 0,1 Гц до 1 МГц. Максимальное напряжение сигнала синусоидальной формы повышенной амплитуды при нагрузке 1000 Ом не менее 30 В, а максимальный размах сигнала прямоугольной формы повышенной амплитуды при нагрузке 1000 Ом не менее 80 В.

Вольтметр универсальный цифровой В7-58/2 предназначен для измерения постоянного и переменного напряжения, сопротивления, постоянного тока.

Вольтметр обеспечивает измерение постоянного напряжения положительной и отрицательной полярностей в диапазоне от 200 мВ до 700 В, сопротивления постоянному току в диапазоне от 200 Ом до 20 МОм, постоянного тока в диапазоне от 200 мА до 10 А.

Входное сопротивление вольтметра при измерении постоянного напряжения составляет 10^7 Ом \pm 5 %, переменного напряжения на частоте 20 Гц не менее 10^6 Ом.

Тестер ТЛ-4А предназначен для измерения постоянного и переменного напряжения от 1 мВ до 1000 В, постоянного тока от 0,01 мА до 3 А, переменного тока от 0,1 до 3 А, сопротивления от 1 Ом до 1 МОм, а также для проверки работоспособности транзисторов.

Осциллограф является измерительным прибором, который предназначен для наблюдения изменения со временем электрического напряжения (электрического сигнала). По форме электрического сигнала можно провести ряд измерений его параметров, например, величины

напряжения, силы тока, частоты, смещения фазы, длины сигнала, полярности, отличие одного сигнала от другого, а при преобразовании неэлектрических величин в электрические провести измерения механических смещений, ускорений, давления и т. д.

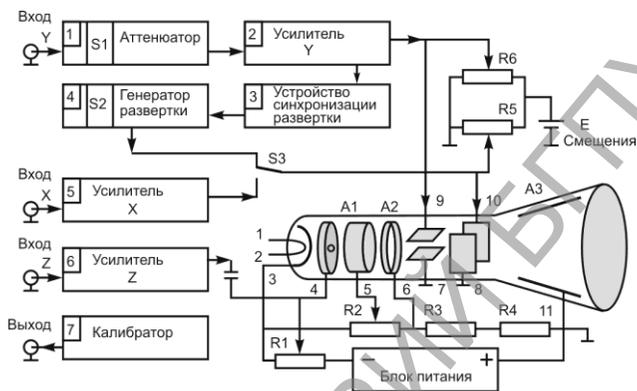


Рис. 1

Главная часть электронного осциллографа – это электронно-лучевая трубка, которая преобразует электрический сигнал в видимую форму (осциллограмма сигнала). Трубка представляет собой специальную стеклянную колбу, в которой есть нить накала (выводы 1, 2) для нагревания катода (3), который излучает электроны, модулятор (4) для регулировки яркости осциллограммы, который имеет маленькое отверстие для диафрагмирования электронного луча, аноды A1 (5) и A2 (6) для фокусировки осциллограммы и начинающего ускорения электронов, отклоняющие пластины электронного луча в вертикальном (7, 9) и горизонтальном (8, 10) направлении, основной ускоряющий электронный луч электрод-анод A3 (11) и люминесцентный экран, который высвечивает то место, куда попадает электронный луч.

Электронные блоки осциллографа предназначены для подачи необходимого напряжения на все электроды трубки.

Вход Y предназначен для подачи на осциллограф исследуемого электрического сигнала (сигнала Y). С этого

входа сигнал поступает на аттенюатор. Аттенюатор (блок 1) предназначен для ослабления сигнала Y до величины нормального входного напряжения $U_{вх}$ на входе усилителя канала Y . Степень ослабления выбирается переключателем $S1$. Минимальный сигнал на входе Y равен нормальному входному напряжению усилителя, при этом ослабление аттенюатора равно нулю. Максимальный входной сигнал Y зависит от максимальной степени ослабления аттенюатором.

Усилитель канала Y (2) предназначен для усиления $U_{вх}$ до нужной величины напряжения, необходимой на пластинах вертикального отклонения электронно-лучевой трубки.

Генератор развертки 4 предназначен для создания «пилообразного» напряжения, которое подается на пластины горизонтального отклонения электронного луча. Переключатель $S2$ генератора позволяет изменить длину «пилообразного» напряжения, что дает возможность получать осциллограммы разной временной продолжительности. Для получения на экране осциллографа устойчивой осциллограммы сигнал от усилителя Y через устройство синхронизации развертки 3 подается на генератор так, чтобы начало периода «пилообразного» напряжения совпадало с началом периода исследуемого сигнала.

На пластины горизонтального отклонения с входа X через усилитель 5 можно подать внешнее напряжение отклонения, при этом переключатель $S3$ нужно установить в соответствующее положение.

С входа Z через усилитель 6 можно подать электрический сигнал на модулятор электронно-лучевой трубки для изменения яркости осциллограммы за время периода исследуемого сигнала, что дает возможность провести временные измерения по осциллограмме.

Для проверки правильных измерений параметров осциллограммы схема осциллографа имеет электронный калибратор 7, который вырабатывает электрический сигнал с известными параметрами.

Этот сигнал при проверке подают на вход Y , по полученной при этом осциллограмме проводят контрольные измерения.

Потенциометр $R1$ предназначен для регулировки статической яркости, а $R2$ – для регулировки фокусировки осциллограммы. Необходимые напряжения на потенциометрах создаются от источника питания делителем $R1 - R4$.

Потенциометры $R5$ и $R6$ предназначены для смещения осциллограммы на экране по горизонтали и вертикали соответственно.

Выполнение работы

Упражнение 1.

1. Измерение цифровым вольтметром переменного напряжения.

1.1. Подайте на вход $\sim 700\text{ В}$ цифрового вольтметра переменное напряжение с клемм $X8$ и $X9$ лабораторного стенда.

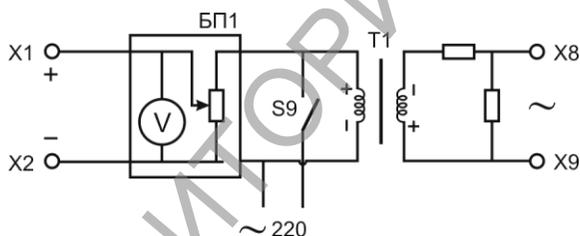


Рис. 2

1.2. Нарисуйте схему измерения переменного напряжения.
1.3. Произведите измерения с точностью до целых, десятых долей вольт.

2. Измерение цифровым вольтметром постоянного напряжения.

2.1. Подайте на вход 1000 В и 0 цифрового вольтметра напряжение с клемм $X1$ и $X2$ лабораторного стенда.

2.2. Нарисуйте схему измерения постоянного напряжения.

2.3. Произведите измерения постоянного напряжения.

Упражнение 2. Проверка калибровки коэффициента масштабности входного аттенюатора и шкалы длительности развертки.

1. Получение осциллограммы.

1.1. К входу осциллографа Y подключите входной кабель. Соедините вход осциллографа через кабель с гнездом выхода калиброванного напряжения, соблюдая полярность кабеля, длинный наконечник – «корпус» прибора – соединить с клеммой \perp .

1.2. Переключатель аттенюатора установите в положение 50 мВ/см. Ручку плавной подстройки аттенюатора установите в крайнее правое положение (до щелчка).

1.3. Ручку длительности развертки установите в положение 0,1 мс/см. Ручку плавной регулировки длительности развертки установите в крайнее правое положение (до щелчка).

1.4. Ручку синхронизации установите в положение *Внутр*.

1.5. Включите тумблер *Сеть*. С помощью ручки синхронизации *Уровень* добейтесь устойчивого положения осциллограммы.

2. Проверка калибровки коэффициента масштабности входного аттенюатора усилителя Y .

2.1. Рассчитайте коэффициент масштабности для данного положения аттенюатора усилителя Y :

$$K_y = \frac{U}{l_y},$$

где U – напряжение эталонного сигнала, l_y – измеряемый вертикальный участок осциллограммы.

2.2. Полученный результат сравните с показаниями аттенюатора усилителя Y .

3. Проверка калибровки шкалы длительности развертки.

3.1. Рассчитайте по наблюдаемой осциллограмме установленную длительность развертки:

$$\tau_p = \frac{Tn}{l_x},$$

где T – период калиброванного сигнала, n – число периодов на измеряемом участке осциллограммы, l_x – измеряемый горизонтальный участок осциллограммы.

3.2. Полученный результат сравните с установленной переключателем длительности развертки осциллографа.

Упражнение 3. Измерение осциллографом переменного напряжения.

1. Подключите осциллограф к клеммам X8 и X9 лабораторного стенда. Включите тумблер S9 лабораторного стенда.

2. Нарисуйте схему измерения переменного напряжения с помощью осциллографа.

3. С помощью ручки синхронизации *Уровень* осциллографа добейтесь устойчивого положения осциллограммы.

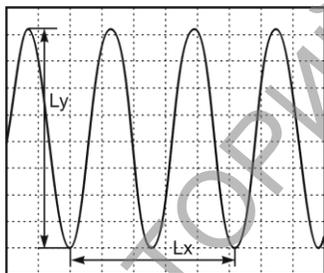


Рис. 3

4. Нарисуйте осциллограмму напряжения в тетрадь и определите величину напряжения:

$$U = \frac{k_y l_y}{2\sqrt{2}},$$

где k_y – показание по шкале усилителя осциллографа, l_y – длина вертикальной линии (в см).

5. Сделайте вывод.

Упражнение 4. Измерение частоты гармонического колебания методом фигур Лиссажу.

Для получения фигур Лиссажу необходимо на входы X и Y осциллографа подать гармонические сигналы.

1. На вход Y осциллографа с клемм X8 и X9 лабораторной вставки подайте сигнал известной частоты.

2. Отключите генератор развертки от пластин горизонтальной развертки.

3. На вход усилителя X подайте от звукового генератора Г4-221 синусоидальный сигнал. Частоту звукового сигнала установите 50 Гц, выходное напряжение – 1–2 В.

Замечание. При одинаковых частотах двух сигналов и разных фазах на экране осциллографа получаются фигуры: эллипс, окружность или наклонная прямая линия (рис. 4).

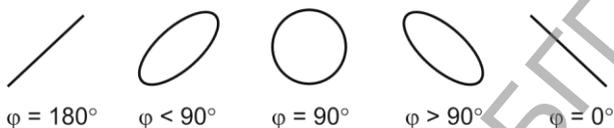


Рис. 4

4. Получите и зарисуйте фигуры Лиссажу при $f_x = 25$ Гц, $f_x = 100$ Гц, $f_x = 150$ Гц, $f_x = 200$ Гц.

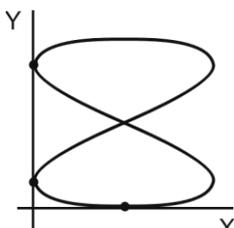


Рис. 5

По полученным осциллограммам определите частоты нескольких сигналов, которые подаются на вход X осциллографа.

При неравенстве частот на экране получается сложная фигура, причем отношение частот обратно соотношению точек касания фигуры до осей координат (рис. 5):

$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{N_x}{N_y}$$

5. Зарисуйте 3–4 фигуры Лиссажу при $f_y < f_x$ или $f_y > f_x$ и определите соотношения частот и частоту неизвестного сигнала.

Сделайте вывод по лабораторной работе:

- Какое напряжение определяет осциллограф?
- Как по фигурам Лиссажу определить неизвестную частоту?



Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы и устройства электронно-лучевой трубки.
2. Поясните назначения функциональных частей осциллографа.
3. Какие процессы происходят в осциллографе при управлении им ручками, расположенными на задней панели?
4. Какая развертка электронного луча в осциллографе называется ждущей? Когда ее применяют?
5. Каковы назначения ручек генератора низкой частоты?
6. Каково назначение лабораторного стенда?
7. Поясните принцип измерения частоты, напряжения посредством осциллографа.



Литература

1. Ворсин, Н.Н. Основы радиоэлектроники / Н.Н.Ворсин, М.Н.Ляшко. – 1992.
2. Гершензон, Е.М. Радиотехника: учеб. пособие для ст-в физ.-мат. фак. пед. ин-тов / Е.М. Гершензон, Г.Д. Полянина. – М.: Просвещение, 1986.

Лабораторная работа 2

ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК RC-ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

Цель работы: измерение амплитудно-частотных характеристик RC-цепей; вывод формул расчета амплитудно-частотных характеристик RC- и RL-цепей методом комплексных амплитуд.

Теоретические обоснования

Во многих случаях электрическую цепь или ее часть представляют в виде абстрактного устройства с двумя входными и двумя выходными зажимами. Такое устройство называют *четыреполюсником*. Предполагается, что к входным зажимам подводится напряжение $U_1 t$ и в результате на выходе четырехполюсника появляется напряжение $U_2 t$ (рис. 1).

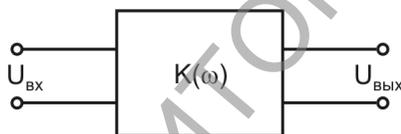


Рис. 1

Подводимое к входным зажимам линейного четырехполюсника гармоническое напряжение $U_1 = U_{1m} \sin \omega t + \varphi_1$ приводит к появлению гармонических токов в его элементах и гармонического напряжения $U_2 = U_{2m} \sin \omega t + \varphi_2$ на его выходе. Передаточные свойства линейного четырехполюсника при гармонических напряжениях характеризуются комплексным коэффициентом передачи, являющимся отношением комплексных амплитуд выходного и входного напряжений:

$$\dot{K}_U \omega = \frac{\dot{U}_{2m}}{\dot{U}_{1m}}. \quad (1)$$

Определим комплексный коэффициент передачи четырехполюсника в общем виде. Пусть мы имеем схему четырехполюсника, изображенную на рис. 2.

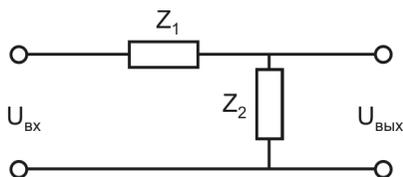


Рис. 2

По закону Ома

$$\dot{U}_{\text{ВХ}} = i Z_1 + Z_2 = iZ_1 + iZ_2 \quad (2)$$

Но $iZ_2 = \dot{U}_{\text{ВЫХ}}$, откуда

$$i = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{Z_2}.$$

Подставляя значение тока в формулу (2), имеем:

$$\dot{U}_{\text{ВХ}} = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{Z_2} Z_1 + Z_2. \quad (3)$$

Исходя из уравнения (1),

$$K = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}. \quad (4)$$

В общем случае величина $K_U \omega$ зависит от частоты напряжения ω . Частотную зависимость $K_U \omega$ выражает амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) четырехполюсника. Эта зависимость представляется обычно графически.

Полосу частот входного напряжения, в пределах которой на выход четырехполюсника передается не менее половины подводимой к нему мощности, называют *полосой пропускания четырехполюсника*. Так как мощность пропорциональна квадрату амплитуды напряжения, в пределах полосы пропускания коэффициент передачи четырехполюсника по

напряжению $K_U \omega$ должен иметь значение не менее $1/\sqrt{2} \approx 0,707$ от своего максимального значения:

$$K_U \omega \geq \frac{1}{\sqrt{2}} K_{U_{\max}} \omega . \quad (5)$$

Частота $\omega_{гр}$, при которой $K_U \omega_{гр} \geq \frac{1}{\sqrt{2}} K_{U_{\max}} \omega$, называется *граничной частотой полосы пропускания*.

RC-фильтр нижних частот. Условное обозначение этого фильтра представлено на рис. 3.



Рис. 3

Схема фильтра изображена на рис. 4.

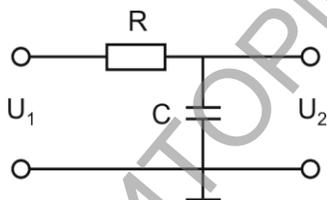


Рис. 4

Комплексный коэффициент передачи рассматриваемого четырехполюсника

$$\dot{K}_U \omega = \frac{\dot{U}_{2m}}{\dot{U}_{1m}} = \frac{\dot{i}_m Z_2}{\dot{i}_m R + Z_2} = \frac{Z_2}{R + Z_2}, \quad (6)$$

где $Z_2 = -j \frac{1}{C\omega}$. Подставив в исходное выражение соотношение для Z_2 , получим:

$$\dot{K}_U \omega = \frac{-j \frac{1}{C\omega}}{R + \left(-j \frac{1}{C\omega}\right)}. \quad (7)$$

Числитель и знаменатель формулы (7) разделим на $\left(-j \frac{1}{C\omega}\right)$. Тогда

$$\dot{K}_U \omega = \frac{1}{\frac{R}{-j \frac{1}{C\omega}} + 1} = \frac{1}{jRC\omega + 1}. \quad (8)$$

Модуль комплексного коэффициента передачи равен:

$$K_U \omega = \frac{1}{\sqrt{1 + RC\omega^2}}. \quad (9)$$

Эту зависимость можно представить графически (рис. 5).

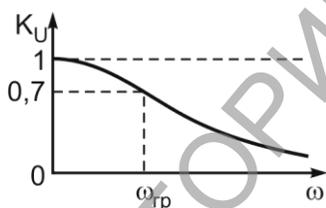


Рис. 5

На частоте $\omega = 0$ $K_U \omega = 1$, а при $\omega \rightarrow \infty$ $K_U \omega \rightarrow 0$, т. е. по мере возрастания частоты входного напряжения амплитуда напряжения на выходе уменьшается. Цепь, обладающую такими свойствами, называют *фильтром нижних частот (ФНЧ)*. Полоса пропускания ФНЧ от $\omega_1 = 0$ до $\omega_2 = \omega_{гр}$.

Найдем граничную частоту фильтра. В соответствии с определением граничной частоты запишем:

$$\frac{K_U \omega_{гр}}{K_{Umax} \omega} = \frac{1}{\sqrt{1 + RC\omega^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}. \quad (10)$$

Данное равенство имеет место при $\omega_{гр} = \frac{1}{RC}$.

Выходное напряжение ФНЧ отстает по фазе относительно входного на угол φ . Это видно из векторной диаграммы, изображенной на рис. 6.

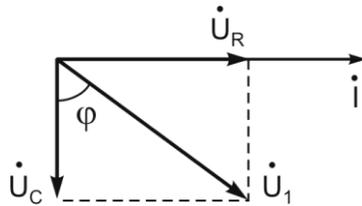


Рис. 6

RL-фильтр нижних частот. Такой фильтр может быть создан в виде устройства с последовательно включенным резистором R и катушкой L (рис. 7).

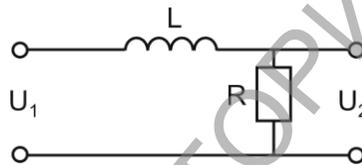


Рис. 7

Комплексный коэффициент передачи четырехполюсника запишется в виде:

$$K_U \omega = \frac{R}{R + j\omega L}. \quad (11)$$

Отсюда модуль комплексного коэффициента передачи

$$K_U \omega = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R}\right)^2}}. \quad (12)$$

Очевидно, что амплитудно-частотные характеристики RC-фильтра и RL-фильтра идентичны.

При $\omega = \omega_{гр}$

$$K_U \omega_{гр} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_{гр} L}{R}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (13)$$

поэтому

$$\omega_{гр} = \frac{R}{L}. \quad (14)$$

RC-фильтр верхних частот. Условное обозначение RC-фильтра верхних частот изображено на рис. 8.



Рис. 8

Схема его представлена на рис. 9.

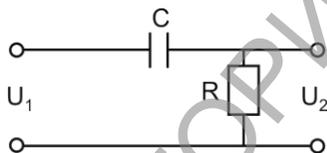


Рис. 9

Комплексный коэффициент передачи для цепи

$$\dot{K}_U \omega = \frac{U_{2m}}{U_{1m}} = \frac{R}{R + Z_2} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}}. \quad (15)$$

Выражение для модуля коэффициента передачи имеет вид:

$$K_U \omega = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{R\omega C}\right)^2}}. \quad (16)$$

С увеличением частоты входного напряжения емкостное сопротивление конденсатора $\left(-j\frac{1}{C\omega}\right)$ уменьшается, что приведет к увеличению падения напряжения на резисторе R .

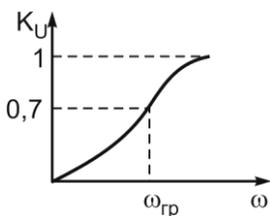


Рис. 10

АЧХ фильтра верхних частот см. на рис. 10.

Граничная частота этого фильтра определяется по формуле, аналогичной уравнению для нахождения ω_{gp} фильтра нижних частот:

$$\omega_{gp} = \frac{1}{RC}.$$

Напряжение для фильтра верхних частот U_2 опережает напряжение U_1 .

RL-фильтр верхних частот. Схема фильтра изображена на рис. 11.

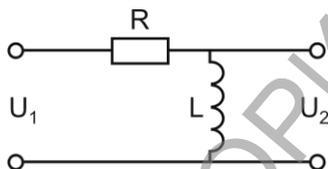


Рис. 11

Модуль комплексного коэффициента передачи RL -фильтра

$$K_U \omega = \frac{1}{\sqrt{1 + R\omega L^2}}. \quad (17)$$

Граничная частота

$$\omega_{gp} = \frac{R}{L}.$$

Полосовые пропускающие фильтры. Условное обозначение фильтров представлено на рис. 12.



Рис. 12

Они предназначены для выделения определенной полосы частот спектра и подавления мешающих сигналов вне этой полосы и состоят из двух последовательно соединенных фильтров верхних и нижних частот.

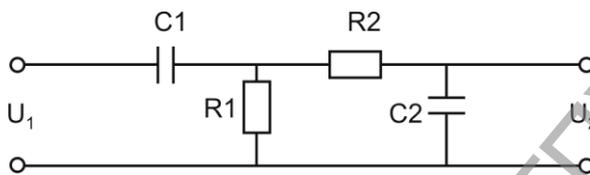


Рис. 13

Модуль коэффициента передачи полосового фильтра $K = K_1 K_2$. Такие фильтры имеют две граничные частоты $\omega_{гр1}$ и $\omega_{гр2}$, между которыми лежит полоса пропускания (рис. 14).

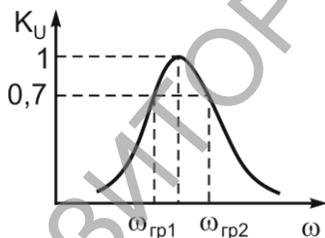


Рис. 14

Выполнение работы

Измерение амплитудно-частотных характеристик RC-цепей (см. рис. 15, на котором 1 – источник сигнала (генератор низкой частоты), 2 – исследуемый четырехполюсник, 3 – измерительный прибор (вольтметр)).



Рис. 15

Схема общей вставки изображена на рис. 16.

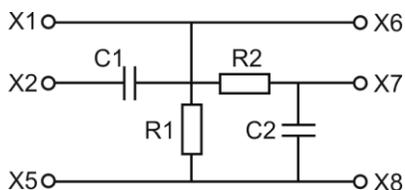


Рис.16

Упражнение 1. Вывод расчетных формул четырехполюсника методом комплексных амплитуд.

1. Зарисуйте схему фильтра RC и RL низких частот.
2. Сделайте вывод формул коэффициента передачи методом комплексных амплитуд.
3. Проведите устный анализ каждой схемы.

Упражнение 2. Измерения амплитудно-частотной характеристики фильтра высоких частот.

1. Исходя из схемы общей вставки, зарисуйте принципиальную схему фильтра высоких частот.
2. На схеме общей вставки определите параметры элементов. По параметрам элементов определите граничную частоту.
3. Соберите схему измерения.
4. Установите напряжение генератора сигналов Г4-221 1 В.
5. Изменяя частоту генератора согласно таблице 1, снимите показания $U_{\text{вых}}$ по вольтметру.

Таблица 1

f (Гц)	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000	15000	20000
$\lg f$	1.3	1.7	2	2.3	2.7	3	3.3	3.7	4	4.17	4.3
1											
2											
3											

6. Постройте график зависимости $U_{\text{вых}} = F \lg f$.

7. По графику определите граничную частоту и полосу пропускания, сравните с расчетной.

Упражнение 3. Измерение амплитудно-частотной характеристики фильтра низких частот.

Повторите измерения согласно пунктам 1–7 упражнения 2.

Упражнение 4. Измерение амплитудно-частотной характеристики полосового фильтра.

Повторите измерения согласно пунктам 1–7 упражнения 2.

Сделайте вывод по лабораторной работе:

- Как зависит граничная частота от параметров элементов?
- Зависимость полосы пропускания от граничной частоты.



Контрольные вопросы

1. Какие цепи называют четырехполюсниками?
2. Какими параметрами характеризуются четырехполюсники?
3. Для чего предназначаются электрические фильтры?
4. Запишите формулу коэффициента передачи фильтра низких частот.
5. Нарисуйте амплитудно-частотную характеристику фильтра высоких частот.
6. Что называется граничной частотой?



Литература

1. Ворсин, Н.Н. Основы радиоэлектроники / Н.Н. Ворсин, М.Н. Ляшко. – 1992.
2. Гершензон, Е.М. Радиотехника: учеб. пособие для ст-в физ.-мат. фак. пед. ин-тов / Е.М. Гершензон, Г.Д. Полянина. – М.: Просвещение, 1986.

Лабораторная работа 3

ФИЛЬТРУЮЩИЕ СВОЙСТВА КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ КОНТУРОВ

Цель работы: изучить работу параллельного и последовательного контуров при вынужденных колебаниях; научиться проводить измерение резонансных характеристик и определять с их помощью полосу пропускания и добротность.

Теоретические обоснования

В цепи создаваемые ток (рис. 1) падения напряжений $U_R = IR$, $U_L = IX_L$, $U_C = IX_C$ противодействуют напряжению источника U . Совместное противодействие U_L и U_C называют *реактивным напряжением* U_p . Из векторной диаграммы (рис. 2), на которой U_L опережает ток, а U_C отстает от тока по фазе на 90° , наглядно видно, что при последовательном соединении индуктивности и емкости напряжения на них находятся в противофазе.

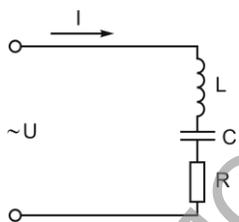


Рис. 1

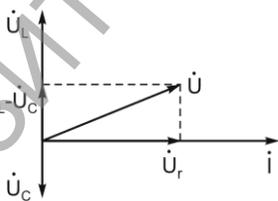


Рис. 2

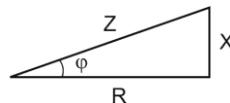


Рис. 3

Разделив стороны треугольника напряжений (выраженные в единицах напряжения) на ток, получаем треугольник сопротивлений (рис. 2), из которого $X = X_L - X_C$ и

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L - X_C^2}. \quad (1)$$

Почему же берется не сумма, а разность между реактивными сопротивлениями X_L и X_C и мощностями Q_L и Q_C ? Это можно объяснить тем, что между катушкой и конденсатором происходит обмен энергиями, при котором мгновенные значения ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_L катушки (обуславливающей X_L и Q_L) и напряжения конденсатора U_C (обуславливающего X_C и Q_C) в любой момент времени направлены навстречу друг другу. Так, в момент, когда конденсатор заряжается, возрастающее напряжение конденсатора U_C направлено противоположно току (мешая зарядке), и ток уменьшается (при полной зарядке конденсатора он станет равным нулю). Уменьшение тока вызывает ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_L в катушке, которая стремится по закону Ленца увеличить ток. В результате U_C и U_L направлены навстречу друг другу и энергия магнитного поля катушки посредством ЭДС \mathcal{E}_L преобразуется в энергию конденсатора. При разрядке конденсатора все происходит наоборот (рис. 4): уменьшающееся напряжение конденсатора U_C совпадает по направлению с током, увеличивая его, а возрастающий ток наводит \mathcal{E}_L , направленную по правилу Ленца противоположно току. В результате U_C и \mathcal{E}_L направлены навстречу друг другу и энергия конденсатора идет на создание магнитного поля катушки (рис. 4).

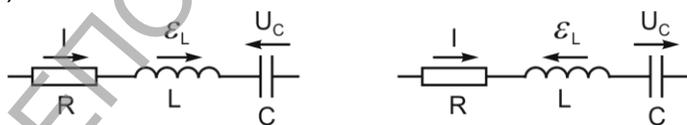


Рис. 4

Если бы в схеме не было емкости, напряжение на катушке было бы равно напряжению источника при токе

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}. \quad (2)$$

За счет емкости можно уменьшить реактивное сопротивление цепи $X = X_L - X_C$, что увеличит ток, а значит, и падение напряжения $U_L = IX_L$. Напряжение на катушке можно увеличить, подключив последовательно с ней конденсатор. Самое большое напряжение на катушке при $X_L = X_C$.

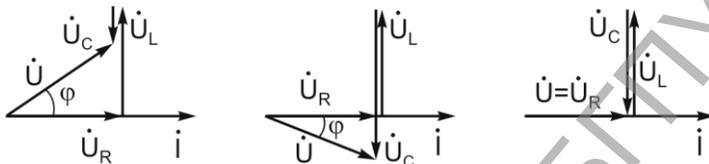


Рис.5

В зависимости от соотношения X_L и X_C возможны три режима работы цепи (рис. 5): а) напряжение цепи опережает ток по фазе на угол φ (который считают положительным), и цепь в целом имеет активно-индуктивный характер; б) напряжение цепи отстает по фазе от тока на угол φ (который считают отрицательным), и цепь в целом имеет активно-емкостный характер; в) напряжение и ток цепи совпадают по фазе, характер цепи в целом чисто активный.

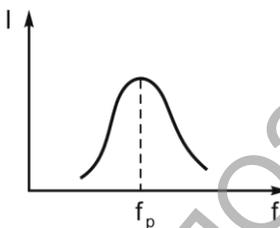


Рис. 6

Последний режим цепи называется *резонансом напряжений*, при котором $U_L = U_C$, $X_L = X_C$. Настроить цепь в резонанс напряжений можно путем изменения X_C или X_L , т. е. изменяя C , L или f .

Реактивное сопротивление цепи при резонансе напряжений $X = X_L - X_C = 0$, поэтому ток

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L - X_C^2}} = \frac{U}{R} \quad (3)$$

максимальный (рис. 6).

Так как при резонансе напряжений $X_L = X_C$, то частота, при которой наступает резонанс, равна:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (4)$$

Разветвленные цепи переменного тока. Сначала рассмотрим параллельное соединение индуктивности и емкости (рис. 7).

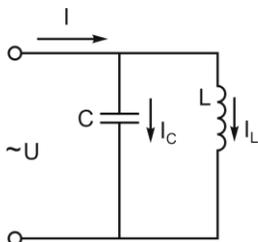


Рис. 7

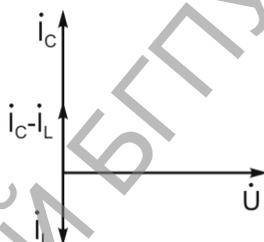


Рис. 8

Построим векторную диаграмму (рис. 8). Построение начинаем с вектора напряжения, так как при параллельном соединении элементов цепи напряжение на них одинаковое. Из диаграммы видно, что I_L и I_C находятся в противофазе, поэтому реактивный ток цепи равен разности индуктивного и емкостного токов. При этом катушка и конденсатор обмениваются реактивной мощностью. Тогда ток в общей цепи равен:

$$I_p = I_C - I_L. \quad (5)$$

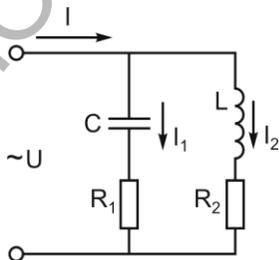


Рис. 9

Пусть мы имеем электрическую цепь (рис. 9). Построим для нее векторную диаграмму (рис. 10). К вектору напряжения

пристраиваем вектор тока I_1 , опережающий напряжения по фазе на угол φ . Так как характер тока I_2 активно-индуктивный, то он отстает от напряжения по фазе на угол φ_2 . Пристраиваем вектор тока I_2 к концу вектора I_1 , чтобы получить результирующий вектор тока цепи I . Треугольник токов I_1, I_2, I не прямоугольный, поэтому применить теорему Пифагора для него нельзя. Но вектор тока I можно разложить на две составляющие: I_R – активный ток, совпадающий по фазе с напряжением, и I_p – реактивный ток, сдвинутый по фазе относительно напряжения на 90° .

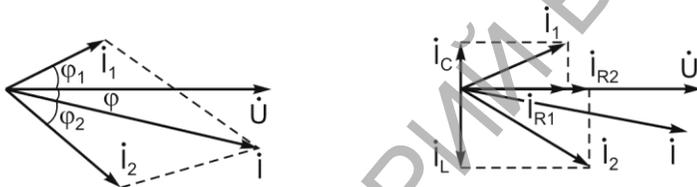


Рис. 10

Тогда для расчета тока цепи можно применить следующее выражение:

$$I_R = I_{R1} + I_{R2}; I_p = I_{p1} + I_{p2},$$

где $I_{R1} = I_1 \cos \varphi_1$, $I_{R2} = I_2 \cos \varphi_2$, $I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1$, $I_{p2} = I_2 \sin \varphi_2$.

Внимание! При расчетах реактивный ток индуктивного характера берется со знаком «+», а емкостного характера – со знаком «-», так как катушка и конденсатор обмениваются энергией.

Таким образом, результирующий ток цепи можно определить или графическим методом из векторной диаграммы, построенной в масштабе, или методом активных и реактивных токов.

Если емкость конденсатора подобрать так, чтобы $I_{p2} = I_{p1}$, то $I_p = I_{p1} - I_{p2} = 0$. В этом случае источник выдает в цепь

только активную мощность. Реактивную мощность катушка получит от конденсатора за счет обмена энергиями, и ток цепи совпадет по фазе с напряжением (рис. 11). Такой режим цепи называется *резонансом токов*.

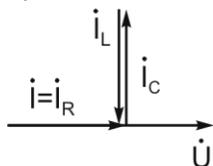


Рис. 11

Настроить цепь в резонанс токов можно изменением индуктивности, емкости или частоты. Из диаграммы (рис. 11) видно, что ток в цепи будет минимальным при резонансе токов. Таким образом, подключая конденсатор параллельно катушке, можно значительно уменьшить ток, потребляемый катушкой от источника.

Выполнение работы

Схема лабораторной вставки изображена на рис. 12.

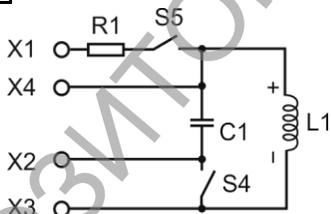


Рис. 12

Упражнение 1. Измерение резонансной характеристики параллельного контура.

1. Изучите и соберите электрическую схему, приведенную на рис. 13.

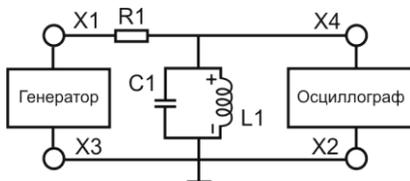


Рис. 13

2. Нарисуйте схему измерения в тетрадь.

3. Включите генератор и осциллограф в сеть.

Методика измерения резонансных характеристик:

А. Установите частоту генератора 150 кГц, выходное напряжение 0,5–1 В.

Б. Подготовьте осциллограф для измерения входного напряжения около 0,1 В.

В. Изменяя частоту генератора, найдите резонансную частоту (f_p) колебательно контура. Значение резонансной частоты запишите в тетрадь.

Г. Уменьшайте частоту генератора до тех пор, пока напряжение на колебательном контуре не уменьшится приблизительно в 4 раза от резонансного напряжения. Это будет начальная частота (f_n) для измерения.

Д. При измерении разность частот $f_p - f_n$ разделите на 5–10 частей для получения расчетного шага изменения частоты генератора. Расчетный шаг частоты округлите до кратной цены деления шкалы генератора. Это будет практическое шаговое изменение частоты генератора ($f_{\text{ш}}$).

Е. Измерение резонансной характеристики проводите через $f_{\text{ш}}$ от f_n к f_p и дальше, пока напряжение на выходе контура не станет приблизительно равным, как на частоте f_n .

Ж. Результаты измерений запишите в таблицу 1.

Таблица 1

f , кГц									
L_y , (см)									
U , (мВ)									

где L_y – длина осциллограммы по вертикали.

4. По данным таблицы постройте график резонансной характеристики параллельного контура $U = F f$.

5. По резонансной характеристике определите резонансную частоту (f_p), полосу пропускания (Π) и добротность контура (Q).

Упражнение 2. Измерение резонансной характеристики параллельного контура с нагрузкой.

Нагрузкой контура является всякое сопротивление, которое подключено параллельно элементам контура (шунт контура).

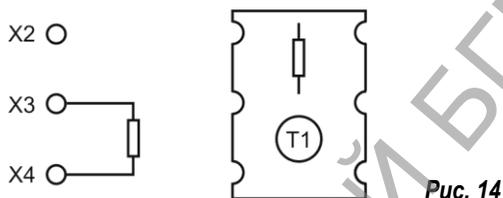


Рис. 14

1. К клеммам X2 и X4 подключите резистор. Для этого к клеммам X2, X3, X4 подключите дополнительную вставку так, как показано на рис. 14.

2. Зарисуйте схему измерения резонансной характеристики параллельного контура с нагрузкой.

3. Проведите измерение резонансной характеристики контура и результаты измерения запишите в таблицу 2.

Таблица 2

f , кГц								
L_y , см								
U , мВ								

4. По данным таблицы 2 постройте график резонансной характеристики контура и определите резонансную частоту, полосу пропускания и добротность контура. График постройте на первой резонансной характеристике контура.

5. Сравните результаты измерений характеристик контуров без нагрузки и с нагрузкой, сделайте общий вывод.

Упражнение 3. Измерение резонансной характеристики последовательного контура.

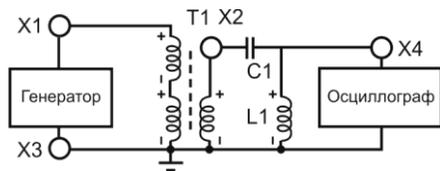


Рис. 15

1. Нарисуйте схему измерения.
2. Для получения схемы необходимо к клеммам X1, X2, X3 подключить дополнительную вставку (как показано на рис. 16) с согласующим трансформатором. Коэффициент трансформации $K = 0,1$.
3. Отключите тумблеры S4 и S5.
4. Подключите к соответствующим клеммам генератор и осциллограф.

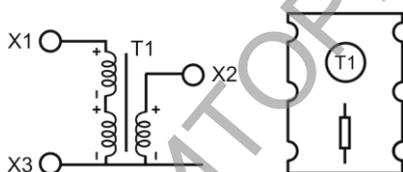


Рис. 16

5. Измерьте резонансную характеристику последовательного контура, результаты измерений запишите в таблицу 3.

Таблица 3

f , кГц									
L_y , см									
U , мВ									

6. По данным таблицы постройте резонансную характеристику последовательного контура и по ней определите

резонансную частоту, полосу пропускания и добротность контура.

7. Сравните резонансные характеристики параллельного (без нагрузки) и последовательно контура по резонансной частоте, полосе пропускания, добротности, сделайте общий вывод.

Сделайте вывод по лабораторной работе:

- Возможность получения резонанса напряжения и тока.
- Характер резонансных кривых.



Контрольные вопросы

1. Как изменяются индуктивное и емкостное сопротивления при увеличении частоты переменного тока?
2. Как рассчитывается полное сопротивление неразветвленной цепи?
3. Что такое резонанс напряжений? Какими признаками он характеризуется?
4. Как настроить цепь в резонанс напряжений?
5. В какой последовательности рассчитывается ток цепи при параллельном соединении катушки и конденсатора?
6. В какой последовательности строится векторная диаграмма в разветвленных цепях?
7. Укажите условия, при которых возникает резонанс токов.



Литература

1. Ворсин, Н.Н. Основы радиоэлектроники / Н.Н. Ворсин, М.Н. Ляшко. – 1992.
2. Гершензон, Е.М. Радиотехника: учеб. пособие для ст-в физ.-мат. фак. пед. ин-тов / Е.М. Гершензон, Г.Д. Полянина. – М.: Просвещение, 1986.

Лабораторная работа 4

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

Цель работы: познакомиться с программой компьютерного моделирования и анализа электрических схем Micro-Cap; проведение моделирования и анализа избирательных RC - и LC -цепей.

Теоретические обоснования

Создание и анализ электронных схем в компьютерной системе Micro-Cap. Запуск программы Micro-Cap производится из меню **Пуск** программы Windows по команде **МС** из программы. При этом по выбранной команде раскрывается основное рабочее окно МС, показанное на рис. 1.

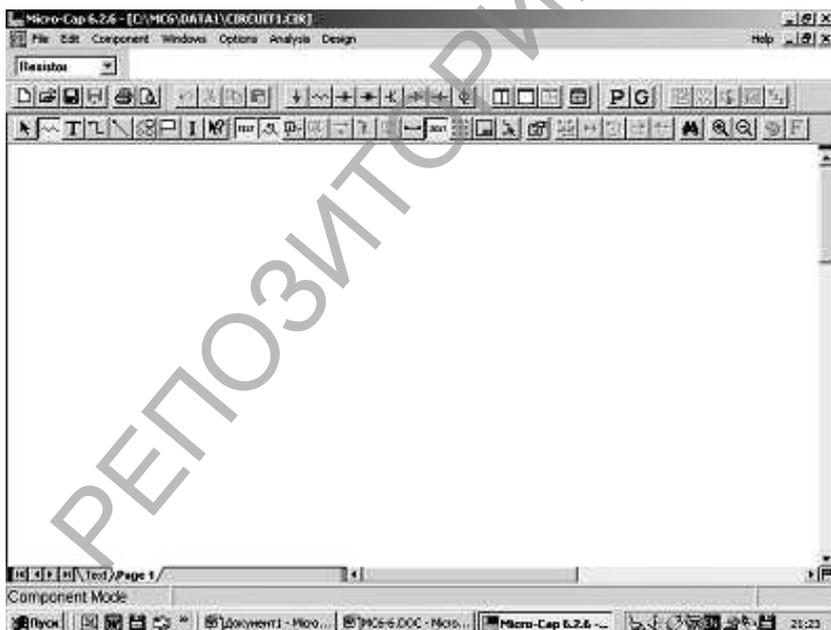


Рис. 1

Первая верхняя строка этого окна является строкой заголовка, в которой указано название программы и рабочего файла. Вторая строка – меню команд **File**, **Edit**, **Component**, **Windows**, **Options**, **Analysis**, **Design**, **Help** – для разворачивания соответствующих окон команд. Далее идут строки инструментов, в которых размещены пиктограммы наиболее употребительных команд, затем – рабочая зона окна, внизу – строка прокрутки окон рабочей зоны и строка комментария выбранной команды. Управление программой осуществляется с помощью мыши или клавиатуры. Подробное пояснение управления программой имеется в меню **Help**.

В системе МС используется многооконный интерфейс с ниспадающими и разворачивающимися меню.

Создание схемы анализа. После открытия основного окна выбирается команда **File** и открывается первое окно (рис. 2), в котором выбирается последующая команда **New** или **Open** для создания новой схемы или выбора схемы из списка схемных файлов.



Рис. 2

При создании новой схемы в первом окне выбирается команда **New**, по которой открывается дополнительное окно, изображенное на рис. 3. В этом окне указывается формат схемы.



Рис. 3

Далее по команде **Component** раскрывается меню библиотек элементов схем, из которого выбираются необходимые элементы.

На рис. 4 показано меню компонент, в котором из раздела **Analog Primitives** выбран **Passive Components – Resistor**.

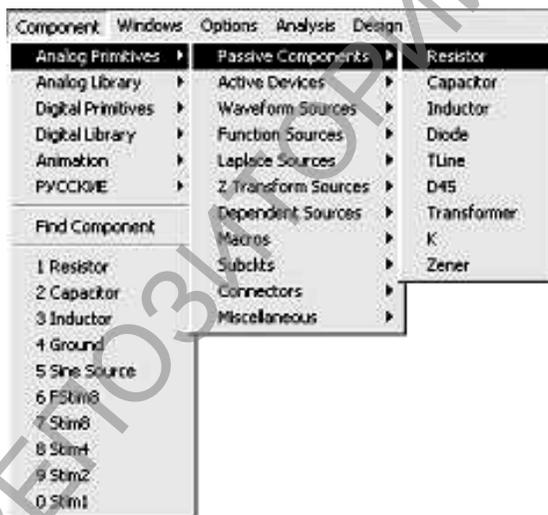


Рис. 4

После каждого выбора элемента схемы автоматически раскрывается окно для задания параметров элемента. На рис. 5 показано окно для задания параметра величины емкости схемы. В окне указана емкость в 1000 пикофарад.

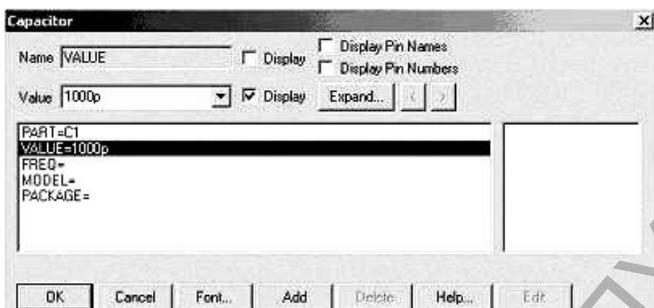


Рис. 5

После выбора всех необходимых элементов схемы и указания их параметров в главном окне программы с помощью выбора необходимых пиктограмм создается электрическая схема, приведенная на рис. 6, подходящего масштаба, цветности элементов, всех пояснительных текстов и номерованных узлов, между которыми анализируются выходные напряжения, токи и фазы сигнала.

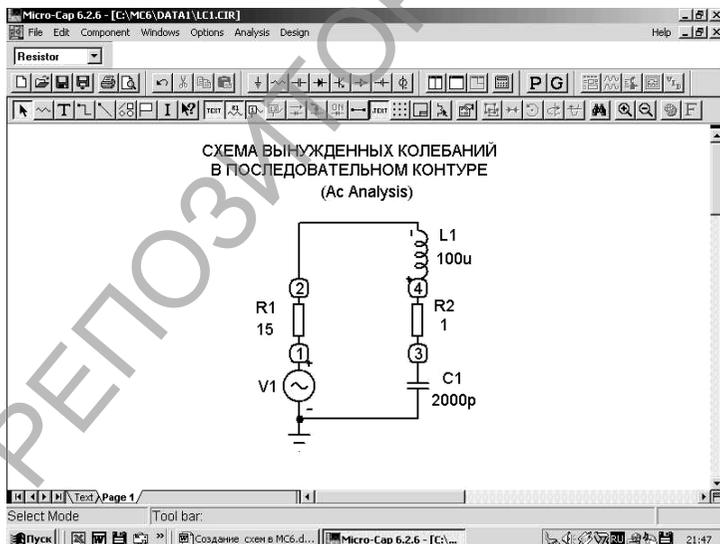


Рис. 6

Графический анализ работы схемы. После завершения формирования схемы по команде меню **Analysis** к схеме анализа раскрывается окно команд (рис. 7) для выбора режимов моделирования.

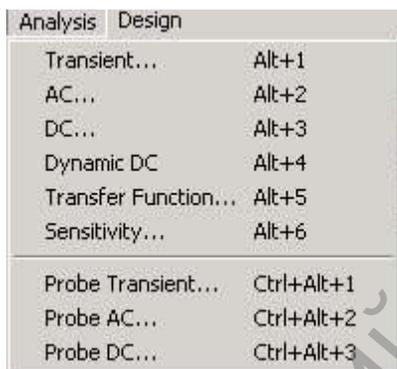


Рис. 7

Таблица команд окна меню Analysis

Команда	Назначение
Transient	Анализ переходных процессов
AC	Анализ частотных характеристик
DC	Анализ передаточных функций по постоянному току
Dynamic DC	Анализ схемы по постоянному току
Transfer Function	Расчет передаточных функций
Sensitivity	Расчет чувствительности
Probe Transient	Анализ переходных процессов и отображение их результатов в режиме Probe
Probe AC	Анализ частотных характеристик и отображение их результатов в режиме Probe
Probe DC	Анализ передаточных функций и отображение их результатов в режиме Probe

После выбора команды анализа автоматически раскрывается окно графических параметров построения характеристик для анализа работы схемы, изображенное на рис. 8.

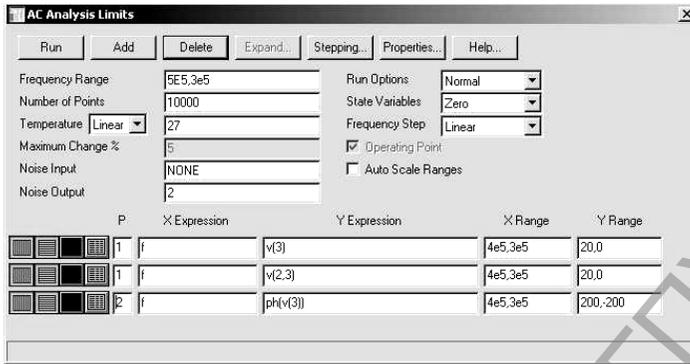


Рис. 8

В этом окне указывается частотная область компьютерного анализа схемы, число точек анализа, выбирается линейный или логарифмический масштаб осей графиков, цвет графиков, функциональная зависимость измеряемого параметра и размерности осей выводимых графиков. После выбора команды **Run** выводятся графики, представленные на рис. 9, по которым проводятся различные измерения.

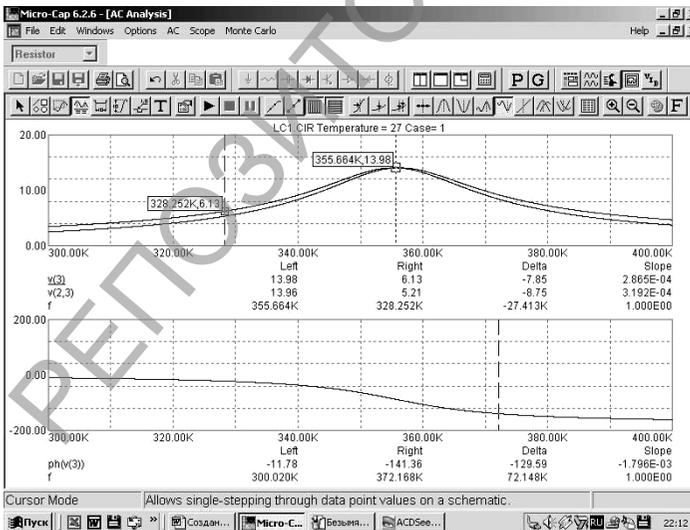


Рис. 9

Выполнение работы

Упражнение 1. Моделирование схемы *RC*-фильтра нижних частот и ее амплитудно-частотный и фазовый анализ.

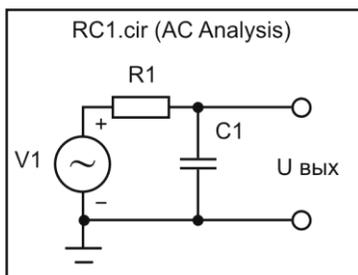


Рис. 10

1. Создайте схему *RC*-фильтра нижних частот и зарисуйте ее в тетрадь.
2. Войдите в окно **AC Analysis** и ознакомьтесь с ним.
3. Получите амплитудно-частотную характеристику, зарисуйте ее в тетрадь и по ней определите граничную частоту.
4. Изменяйте параметры схемы, приведите анализ зависимости граничной частоты.
5. Получите фазовую характеристику фильтра и по ней вычислите фазу выходного напряжения относительно входного напряжения на граничной частоте.

Упражнение 2. Моделирование схемы *RC*-фильтра высоких частот и ее амплитудно-частотный и фазовый анализ.

Повторите моделирование согласно пунктам 1–5 упражнения 1.

Упражнение 3. Моделирование схемы полосового *RC*-фильтра и ее амплитудно-частотный и фазовый анализ.

1. Создайте схему полосового *RC*-фильтра.
2. Получите амплитудно-частотную характеристику и по ней вычислите граничные частоты, полосу пропускания. Зарисуйте схему и график в тетрадь.
3. Получите фазовую характеристику и по ней вычислите фазу выходного напряжения на граничных частотах.

Упражнение 4. Создание схемы параллельного контура для анализа резонансной характеристики.

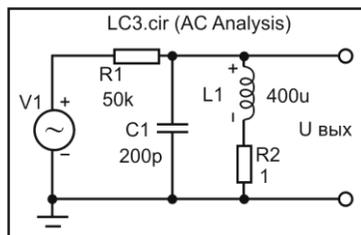


Рис. 11

1. Создайте схему параллельного контура, зарисуйте ее в тетрадь.
2. В режиме **AC Analysis** получите резонансную характеристику.
3. По резонансной характеристике вычислите резонансную частоту, полосу пропускания, добротность контура.
4. Изменяя сопротивление потерь R_2 , L и C , проведите анализ на изменение резонансной характеристики.

Сделайте вывод по лабораторной работе:

- Как изменяется резонансная характеристика от параметров контура?
- Зависимость добротности контура от полосы пропускания.



Контрольные вопросы

1. Какими буквами обозначаются приставки в программе Micro-Cap?



Литература

1. Ворсин, Н.Н. Основы радиоэлектроники / Н.Н. Ворсин, М.Н. Ляшко. – 1992.
2. Гершензон, Е.М. Радиотехника: учеб. пособие для ст-в физ.-мат. фак. пед. ин-ов / Е.М. Гершензон, Г.Д. Полянина. – М.: Просвещение, 1986.

Лабораторная работа 5

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА

Цель работы: познакомиться с принципом работы биполярных и полевых транзисторов; научиться снимать статистические входные и выходные характеристики транзисторов; научиться определять по характеристикам основные параметры транзисторов.

Теоретические обоснования

Структура биполярного транзистора. Полупроводниковые приборы с двумя $p-n$ -переходами называются *биполярными транзисторами*. Название происходит от сочетания английских слов *transfer* (*переносить*) и *resistor* (*сопротивление*). Обычно для создания транзисторов используют германий и кремний. Транзисторы бывают двух типов: $p-n-p$ -транзисторы и $n-p-n$ -транзисторы. Например, германиевый транзистор $p-n-p$ -типа представляет собой небольшую пластинку из германия с донорной примесью, т. е. из полупроводника n -типа. В этой пластинке создаются две области с акцепторной примесью, т. е. области с дырочной проводимостью (рис. 1). В транзисторе $n-p-n$ -типа основная германиевая пластинка обладает проводимостью p -типа, а созданные на ней две области – проводимостью n -типа (рис. 2).

Пластинку транзистора называют *базой (Б)*, одну из областей с противоположным типом проводимости – *коллектором (К)*, а вторую – *эмиттером (Э)*. Обычно объем коллектора превышает объем эмиттера. В условных обозначениях разных структур стрелка эмиттера показывает направление тока через транзистор.

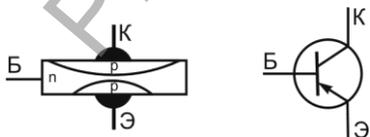


Рис. 1

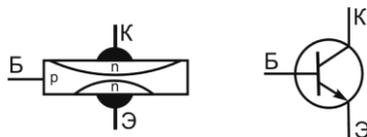


Рис. 2

Работа биполярного транзистора $p-n-p$ -транзистора. Оба $p-n$ -перехода транзистора соединяются с двумя источниками тока. На рис. 3 показано включение в цепь транзистора $p-n-p$ -структуры. Переход эмиттер – база включается в прямом (пропускном) направлении (цепь эмиттера), а переход коллектор – база – в запирающем направлении (цепь коллектора).

Пока цепь эмиттера разомкнута, ток в цепи коллектора очень мал, так как для основных носителей свободного заряда – электронов в базе и дырок в коллекторе – переход заперт.

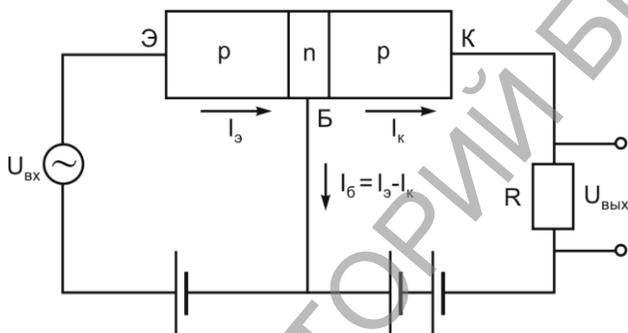


Рис. 3

При замыкании цепи эмиттера дырки – основные носители заряда в эмиттере – переходят из него в базу, создавая в этой цепи ток $I_э$. Но для дырок, попавших в базу из эмиттера, $p-n$ -переход в цепи коллектора открыт. Большая часть дырок захватывается полем этого перехода и проникает в коллектор, создавая ток $I_к$. Для того чтобы ток коллектора был практически равен току эмиттера, базу транзистора делают в виде очень тонкого слоя. При изменении тока в цепи эмиттера изменяется сила тока и в цепи коллектора.

Полевой транзистор с изолированным $p-n$ -переходом. На рис. 4 показан принцип устройства полевых транзисторов и их условное графическое обозначение. Основой транзистора является полупроводниковый канал с n - (рис. 4, а) или p -проводимостью (рис. 4, б), у которого имеется

два электрода: *исток* и *сток*. Сечение канала примерно в 20–50 раз больше глубины объемного заряда $p-n$ -перехода и составляет 2–5 мкм.

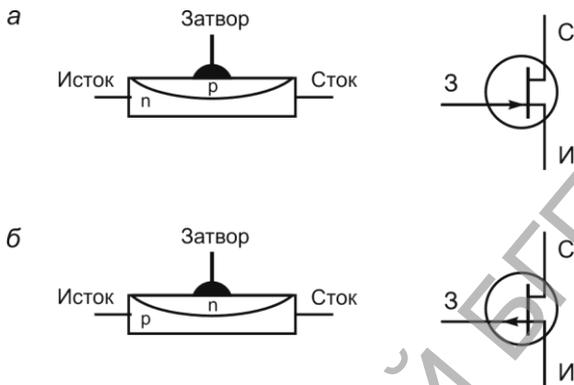


Рис. 4

На электроды канала подается напряжение, которое в несколько раз превышает напряжение (U_H), создающее ток насыщения канала (I_H). По длине канала наносится слой полупроводника с противоположной полупроводниковой проводимостью. Электрод от этого полупроводника называется *затвором*. Вдоль канала образуется $p-n$ -переход.

При подаче на затвор относительно любого вывода от канала обратного напряжения для $p-n$ -перехода увеличивается глубина объемного заряда $p-n$ -перехода. Основные носители заряда проводимости канала не могут войти в зону объемного заряда $p-n$ -перехода, поскольку на них действует отталкивающее поле $p-n$ -перехода. Это приводит к уменьшению сечения канала и соответственному уменьшению тока насыщения канала, как на рис. 4.

Обратное напряжение на затворе в несколько вольт может увеличить глубину объемного заряда на все сечение канала, что приведет к полному отсутствию его проводимости. Таким образом, при нулевом напряжении на затворе проводимость канала максимальна, а при увеличении запирающего напряжения проводимость канала уменьшается.

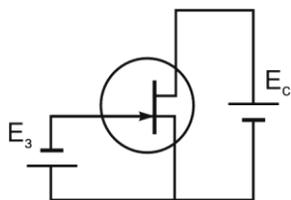


Рис. 5

На рис. 5 показана схема подачи напряжений на электроды полевого транзистора с n -каналом. В этой схеме напряжение на затвор и сток подается относительно истока. Для полевых транзисторов с n -каналом принято на сток подавать положительную полярность напряжения. Для полевых транзисторов с p -каналом принято на сток подавать отрицательную полярность напряжения.

Рассмотренные полевые транзисторы называются *полевыми транзисторами с управляющим $p-n$ -переходом*. Недостатком этих транзисторов является наличие входного тока затвора, по величине равного обратному току $p-n$ -перехода. Это обуславливает величину входного сопротивления транзисторов в несколько сот КОм.

Для увеличения входного сопротивления транзисторов до сотен МОм проводимость канала управляется электрическим полем затвора, который отделяется от полупроводникового канала тонкой диэлектрической пленкой или прослойкой двуокиси кремния SiO_2 . Такие полевые транзисторы называются соответственно *МДП-* (металл – диэлектрик – полупроводник) и *МОП-* (металл – окись – полупроводник) *транзисторами* или *транзисторами с изолированным затвором*.

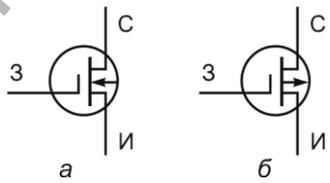


Рис. 6

На рис. 6 показано условное графическое обозначение полевых транзисторов с изолированным затвором.

Выполнение работы

Упражнение 1. Измерение входной характеристики биполярного транзистора $p-n-p$ -типа, включенного по схеме с общим эмиттером. $I_{\text{б}} = F U_{\text{бэ}}$ при $U_{\text{к}} = \text{const}$.

Схема лабораторной вставки изображена на рис. 7.

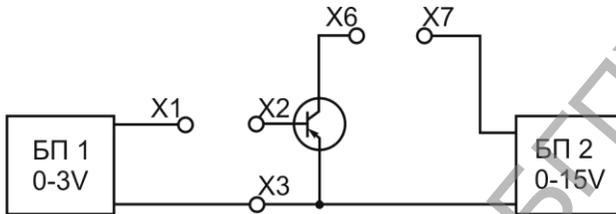


Рис. 7

1. Вставьте в панельку стенда биполярный транзистор (запишите маркировку).
2. К клеммам X2 и X3 подключите цифровой вольтметр В7-58/2.
3. К клеммам X1 и X2 подключите миллиамперметр В7-58/2 на 1 мА
4. Соедините клеммы X6 и X7.
5. Тумблеры S1 и S2 установите в положение «-».
6. Регуляторы напряжения БП1 и БП2 установите в крайнее левое положение.
7. Нарисуйте принципиальную схему измерения.
8. Включите тумблер сети S9 лабораторного стенда.
9. Изменяйте входным напряжением ток базы через 100 мкА до 500 мкА.
10. Результаты измерений занесите в таблицу 1.

Таблица 1

$I_{\text{б}}$, мкА	100	200	300	400	500
$U_{\text{бэ}}$, мВ					

11. По полученным данным постройте входную характеристику и определите входное сопротивление при $I_6 = 150 \text{ мкА}$ и 450 мкА .

Упражнение 2. Измерение семейства выходных характеристик биполярного транзистора. $I_k = F U_k$ при $I_6 = \text{const}$.

1. Зарисуйте в тетрадь схему измерения выходных характеристик биполярного транзистора.

2. В соответствии со схемой подключите измерительные приборы (ток базы измерьте В7-58/2 с границей измерения 1 мА, ток коллектора – прибором В7-58/2, с границей измерения 100 мА).

3. Измерение характеристик проведите при $I_6 = 100 \text{ мкА}$, $I_6 = 200 \text{ мкА}$, $I_6 = 300 \text{ мкА}$, изменяя U_k от 1 до 10 В через 1 В.

4. Результаты измерений занесите в таблицу 2.

Таблица 2

$U_k, \text{В}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$I_k, \text{мА}$												$I_6 = 100 \text{ мкА}$
$I_k, \text{мА}$												$I_6 = 200 \text{ мкА}$
$I_k, \text{мА}$												$I_6 = 300 \text{ мкА}$

5. Поставьте регулятор напряжения БП1 и БП2 в крайнее левое положение, выключите стенд и достаньте исследуемый транзистор из панельки.

6. По полученным данным таблицы 2 постройте графики семейства выходных характеристик биполярного транзистора и определите α , β и $R_{\text{вых}}$.

Упражнение 3. Измерение семейства стоко-затворных характеристик полевого транзистора с каналом p-типа. $I_c = F U_3$ при $U_c = \text{const}$.

1. Вставьте в панельку полевой транзистор.

2. Тумблер $S1$ установите в положение «+», а тумблер $S2$ – в положение «-».

3. Соедините клеммы $X1$ и $X2$.

4. К клеммам $X6$ и $X7$ подключите вольтметр В7-58/2 с пределом измерения 10 мА.

5. Нарисуйте в тетрадь принципиальную схему исследования.

6. Снимите стоко-затворную характеристику полевого транзистора при $U_c = 5$ В, изменяя U_3 от 0 В до напряжения запираения через 0,1 В.

7. Результаты измерений занесите в таблицу 3.

Таблица 3

U_3						$U_c = 5$ В
I_c						

Упражнение 4. Измерение семейства выходных характеристик полевого транзистора с каналом p -типа.

$I_c = F U_c$ при $U_3 = \text{const}$.

1. Тумблер $S1$ установите в положение «+», а тумблер $S2$ – в положение «-».

2. Соедините клеммы $X1$ и $X2$.

3. К клеммам $X6$ и $X7$ подключите вольтметр В7-58/2 с пределом измерения 10 мА.

4. Нарисуйте принципиальную схему исследования.

5. Измерьте семейство выходных характеристик полевого транзистора при $U_{31} = 0,1$ В, $U_{32} = 0,2$ В, $U_{33} = 0,3$, изменяя напряжение U_c от 0 до 12 В через 1 В.

6. Результаты измерений занесите в таблицу 4.

Таблица 4

U_c						U_3
I_c						

Сделайте вывод по лабораторной работе:

- Определение параметров транзистора по их характеристикам.
- О принципе получения входных и выходных характеристик транзистора.



Контрольные вопросы

1. Какие виды проводимости имеют место в полупроводниках?
2. Опишите устройство и принцип работы транзистора.
3. Каким образом маркируются транзисторы?
4. Каким образом создается $p-n$ -переход в полупроводниках, каковы его свойства?
5. Какие характеристики транзистора называют входными, выходными?



Литература

1. Ворсин, Н.Н. Основы радиоэлектроники / Н.Н. Ворсин, М.Н. Ляшко. – 1992.
2. Гершензон, Е.М. Радиотехника: учеб. пособие для ст-в физ.-мат. фак. пед. ин-тов / Е.М. Гершензон, Г.Д. Полянина. – М.: Просвещение, 1986.

Лабораторная работа 6

УСИЛИТЕЛЬ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

Цель работы: научиться проводить расчет элементов режима каскада усилителя низкой частоты; изучить влияние элементов межкаскадной связи на амплитудно-частотную характеристику усилителя.

Теоретические обоснования

Электронный усилитель – устройство, преобразующее маломощный электрический сигнал на входе в сигнал большей мощности на выходе с минимальными искажениями формы.

По функциональному назначению электронные усилители делятся на: усилители постоянного тока, переменного тока, звуковой частоты (20–20000 Гц), высокой частоты (100 кГц – 50 МГц), видеочастоты (50 Гц – 6 МГц).

Усиление мощности сигнала осуществляется за счет потребления усилителем энергии от дополнительного источника, называемого *источником питания*. Таким образом, усилитель – устройство, входной сигнал которого управляет преобразованием энергии источника питания в энергию выходного сигнала. Выходной электрический сигнал усилителя поступает на устройство, называемое *потребителем* или *нагрузкой*.

Структурную схему любого усилителя можно представить в виде двух последовательно соединенных элементов: *линейного (ЛЭ)* и *нелинейного (НЭ)*, включенных в цепь источника питания $E_{\text{ип}}$.

Нелинейные элементы – это элементы, у которых сопротивление зависит от тока и напряжения (транзисторы).

Рассмотрим принцип действия усилителя (рис. 1, а).

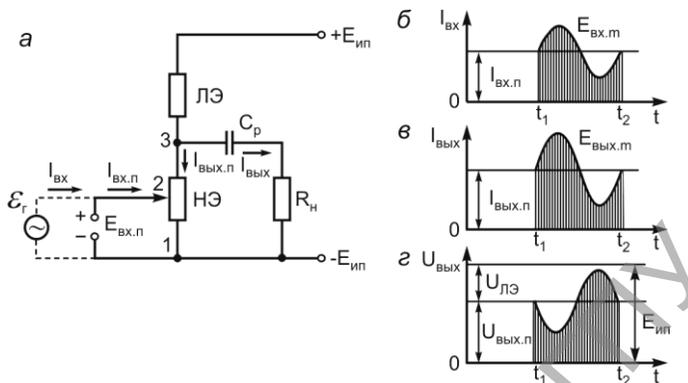


Рис. 1

Допустим, что к входным зажимам 1–2 НЭ (рис. 1, а) подключен источник постоянной ЭДС $E_{\text{вх.п}}$, который называют *источником начального смещения* или *покоя входной цепи*. Под действием $E_{\text{вх.п}}$ во входной цепи – $E_{\text{вх.п}}$, НЭ, $-E_{\text{вх.п}}$ – будет протекать постоянный ток $I_{\text{вх.п}}$, который называют *током начального смещения* или *покоя* (интервал времени $0 - t_1$ на рис. 1, б). Так как $E_{\text{вх.п}} = \text{const}$, то сопротивление НЭ будет постоянным.

Однако НЭ включен последовательно с ЛЭ и в цепь мощного источника питания $E_{\text{ип}}$, поэтому через ЛЭ и НЭ будет протекать постоянный ток $I_{\text{вых.п}}$, обусловленный источником $E_{\text{ип}}$ (рис. 1, в). Цепь $+E_{\text{ип}}$, ЛЭ, НЭ, $-E_{\text{ип}}$ называется *главной (выходной) цепью усилителя*.

Обычно $E_{\text{ип}} > E_{\text{вх.п}}$, поэтому $I_{\text{вых.п}} \gg I_{\text{вх.п}}$. При этом напряжение распределяется между ЛЭ и НЭ прямо пропорционально их сопротивлениям (рис. 1, г). Ток $I_{\text{вых.п}}$ и напряжение $U_{\text{вых.п}}$ (рис. 1, в, г) называются соответственно *током и напряжением начального смещения (или покоя) выходной цепи*.

Если подключить параллельно (можно и последовательно) источнику $E_{\text{вх.п}}$ источник переменной ЭДС \mathcal{E}_r (генератор

усиливаемого сигнала), то ток во входной цепи определяется суммарным действием $E_{\text{вх.п}}$ и \mathcal{E}_r . Во входной цепи возникает переменная составляющая тока. На рис. 1, б (интервал времени $t_1 - t_2$) показан характер изменения входного тока (заштрихованная площадь), когда \mathcal{E}_r изменяется по синусоидальному закону.

Переменное напряжение \mathcal{E}_r модулирует сопротивление НЭ, а следовательно, и ток в главной цепи усилителя, но его значение будет значительно больше тока входной цепи (рис. 1, в).

Наличие переменной составляющей тока в главной цепи приведет к перераспределению (во времени) напряжения источника $E_{\text{ип}}$ между ЛЭ и НЭ. Иначе говоря, в выходной цепи появляется переменная составляющая напряжения. На рис. 1, г показан график изменения напряжения на НЭ (заштрихованная площадь) при наличии во входной цепи ЭДС $E_{\text{вх.п}}$ и \mathcal{E}_r .

Если параллельно НЭ (зажимы 1–3) через конденсатор C_p подключить нагрузку R_n (приемник усиленного сигнала), то через R_n будет протекать только переменный ток, обусловленный переменной составляющей напряжения на НЭ.

Ток и напряжение в нагрузке R_n по величине могут значительно превышать переменные составляющие входного тока и напряжения, но имеют такую же форму, если соблюдаются условия:

$$I_{\text{вх.п}} > I_{\text{вх.т}}, I_{\text{вых.п}} > I_{\text{вых.т}}, U_{\text{вых.т}} > U_{\text{вых.п}}$$

Из рассмотренного можно сделать следующие выводы:

1. При воздействии входного сигнала на НЭ изменяется его параметр (сопротивление), в результате чего в главной цепи усилителя возникают переменные составляющие тока и напряжения. Усилительные свойства схемы проявляются тем больше, чем в больших пределах изменяется параметр НЭ.

2. Усиление сигнала осуществляется за счет энергии источника питания главной цепи $E_{\text{ип}}$.

3. Во входной цепи необходимо создать режим начального смещения.

Рассмотрим основные параметры усилителя.

Коэффициентом усиления усилителя называют отношение выходной величины к входной. Для усилителя принято определять три коэффициента усиления: по напряжению K_U , по току K_I , по мощности K_P . Значения K_U и K_I определяют по отношению приращений или амплитуд выходных и входных величин, т. е.

$$K_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ.м}}}{\Delta U_{\text{ВХ.м}}}, K_I = \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}} = \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ.м}}}{\Delta I_{\text{ВХ.м}}}. \quad (1)$$

Значение K_P определяется как отношение переменной мощности, выделяющейся в нагрузке, к мощности входного сигнала:

$$K_P = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = \frac{I_{\text{ВЫХ}} U_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}} U_{\text{ВХ}}} = K_I K_U. \quad (2)$$

Из трех коэффициентов усиления всегда $K_P > 1$, так как при $K_P < 1$ сигнал не усиливается. Из этого следует, что два других коэффициента (K_U и K_I) должны принимать значения $K_U > 1, K_I > 1$, или $K_U > 1, K_I < 1$, или $K_U < 1, K_I > 1$.

В зависимости от того, какой из коэффициентов (K_U или K_I) больше единицы, говорят об усилении напряжения или тока. В справочниках чаще всего дается значение K_U .

Установлено, что между звуковой энергией и громкостью звука, воспринимаемого человеческим ухом, существует логарифмическая зависимость. Поэтому часто коэффициент усиления выражают в логарифмических единицах – децибелах. Коэффициент усиления мощности в децибелах

$$K_{\text{РДБ}} = 10 \lg \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}. \quad (3)$$

Поскольку мощность пропорциональна квадрату напряжения,

$$K_{\text{УдБ}} = 20 \lg K_U. \quad (4)$$

Амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) усилителя называется зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты. Параметры элементов усилителя зависят от частоты, поэтому величина выходного сигнала будет постоянной только в определенном диапазоне частот, называемом *полосой пропускания*. За пределами полосы пропускания усиление может быть ничтожно малым.

Фазочастотной характеристикой (ФЧХ) усилителя называется зависимость фазы выходного сигнала от частоты. Причина появления фазовых сдвигов та же, что и в предыдущем случае.

Нестабильность коэффициента усиления и фазовый сдвиг определяют так называемые линейные искажения. Они не вызывают искажений формы синусоидального входного сигнала.

Амплитудная характеристика (АХ) усилителя представляет собой зависимость $U_{\text{Вых}} = F U_{\text{Вх}}$. В силу нелинейных свойств транзисторов и ламп эта характеристика имеет явно выраженный участок насыщения. Нелинейный характер АХ является причиной искажений формы выходного сигнала, которые называются *нелинейными*. По АХ можно определить рабочий участок, где будет минимальное искажение формы выходного сигнала.

Коэффициентом полезного действия (КПД) усилителя называется отношение мощности, выделяющейся в нагрузку, $P_{\text{Вых}}$, к мощности, потребляемой от источника питания, P_0 , т. е.

$$\eta = \frac{P_{\text{Вых}}}{P_0}.$$

КПД показывает, какая часть мощности источника питания преобразуется в переменный сигнал. Значение η существенно зависит от выбора начального смещения.

Входным $R_{\text{вх}}$ и выходным $R_{\text{вых}}$ сопротивлением усилителя называют соответственно сопротивление со стороны входных и выходных зажимов.

Искажения, вносимые усилителем. Качество усилителя определяется главным образом тем, в какой мере он удовлетворяет требованию неискаженного усиления передаваемых сигналов. Если форма кривой напряжения на выходе $U_{\text{вых}}$ повторяет форму кривой напряжения на входе $U_{\text{вх}}$, то усилитель не вносит искажений.

При осуществлении передачи от естественных источников звука $U_{\text{вх}}$ является сложным колебанием. Оно состоит из смеси звуков различной частоты и амплитуды. Графически такое колебание можно изобразить в виде спектральной диаграммы (рис. 2, б). На этой диаграмме составляющие разных частот показаны в виде спектра из ряда линий с частотами f_1, f_2, f_3, \dots и амплитудами a_1, a_2, a_3, \dots . Для сравнения на рис. 2, а изображена спектральная диаграмма простого (гармонического) колебания, состоящая из одной линии с частотой f_1 и амплитудой a_1 .

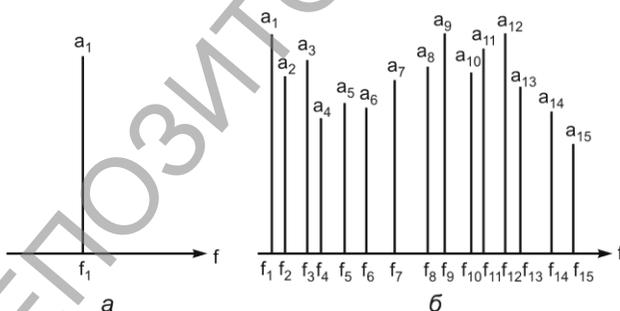


Рис. 2

Искажения, вносимые усилителем, могут быть следствием ряда причин. Соответственно различают следующие виды искажений: частотные, фазовые и нелинейные.

Частотными искажениями принято называть искажения, вызванные неодинаковым усилением составляющих разных

частот спектра. Вследствие этого нарушается соотношение между амплитудами различных частот, входящих в сложный звук. Эти искажения заметны для слуха. При более слабом усилении составляющих более высоких частот спектра звук становится глухим, басящим; при меньшем усилении составляющих низких частот звук становится металлическим, звенящим, лишенным сочности.

Для определения частотных искажений пользуются частотной характеристикой, которая представляет собой зависимость коэффициента усиления от частоты усиливаемых колебаний. На рис. 3, а прямая 1, параллельная оси абсцисс, изображает частотную характеристику идеального усилителя, который не вносит частотных искажений; кривая 2 – частотную характеристику реального усилителя. K_0 – коэффициент усиления на средней частоте.

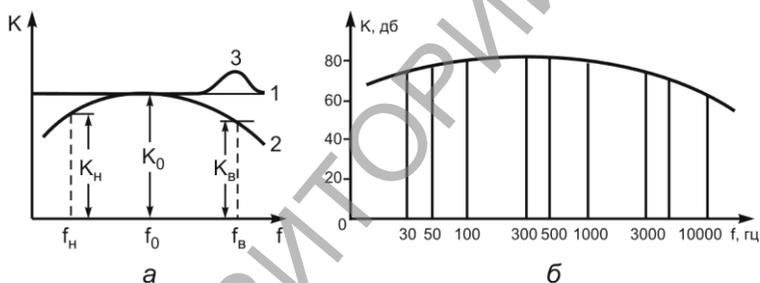


Рис. 3

В реальном усилителе из-за влияния реактивных элементов схемы (индуктивности и емкости) коэффициенты усиления в области нижних и верхних частот диапазона K_H и K_B меньше коэффициента усиления на средней частоте. В отдельных случаях частотная характеристика имеет подъем в некоторой области частот (кривая 3).

На рис. 3, б показана частотная характеристика в логарифмической системе координат, в которой коэффициент усиления по оси ординат отложен в децибелах, а частота – в логарифмическом масштабе.

Частотные искажения незаметны для человеческого уха, если на крайних частотах диапазона они не превышают 25–30 %. Это соответствует изменению коэффициента усиления на 2–3 дБ.

Фазовые искажения являются результатом фазовых сдвигов, вносимых усилителем, для составляющих разных частот сложного сигнала. При усилении напряжения начальные фазы отдельных его составляющих изменяются из-за влияния реактивных элементов схемы. В результате этого форма напряжения на выходе усилителя отличается от формы напряжения на его входе.

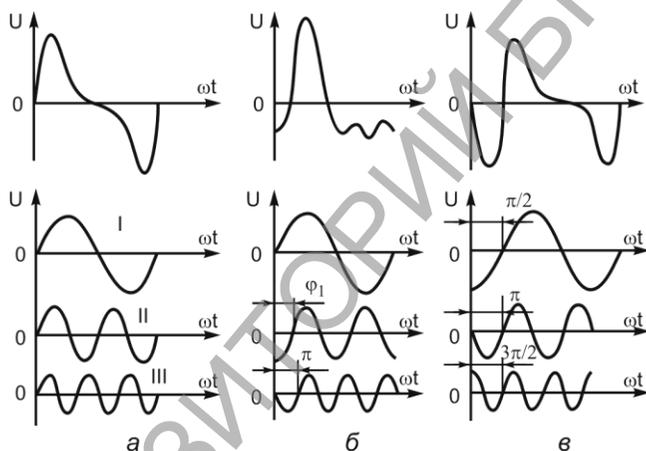


Рис. 4

На рис. 4, а показано сложное напряжение, состоящее из первой, второй и третьей гармоник. Изменение начальной фазы второй гармоники на угол φ_1 , а третьей гармоники на угол π (рис. 4, б) приводит к искажению формы напряжения.

Если начальные фазы отдельных составляющих напряжения не изменяются, фазовые искажения отсутствуют. Фазовые искажения также отсутствуют, когда угол сдвига фаз пропорционален частоте передаваемого сигнала. Действительно, если все составляющие напряжения сдвинуты по фазе пропорционально их частоте (вторая гармоника

сдвинута на угол, в два раза больший, чем первая гармоника, третья гармоника – на угол, в три раза больший, и т. д.), взаимное расположение составляющих напряжения не меняется и поэтому не меняется форма результирующего напряжения. На рис. 4, в все гармоники сдвинуты на угол, равный номеру гармоники, умноженному на $\frac{\pi}{2}$.

Идеальная фазовая характеристика имеет вид прямой линии, проходящей через начало координат (прямая 1). В реальных условиях фазовая характеристика криволинейна (кривая 2).

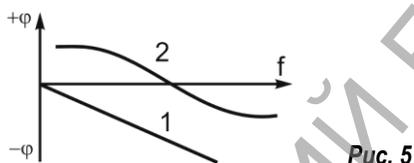


Рис. 5

В усилителях низкой частоты фазовые искажения не играют большой роли, так как ухо не реагирует на фазовые сдвиги между отдельными составляющими сложного сигнала. В усилителях телевизионных сигналов фазовые искажения имеют большое значение, так как они приводят к искажению изображения. Большое значение имеют фазовые искажения и в импульсных усилителях.

Выполнение работы

Схема лабораторной вставки изображена на рис. 6.

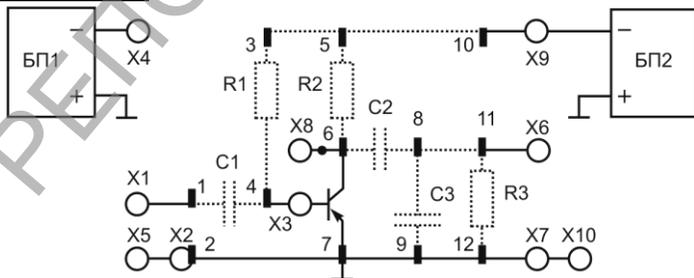


Рис. 6

Упражнение 1. Расчет параметров точки покоя.

1. Нарисуйте в тетрадь полную схему усилительного каскада.

2. По табличным данным (или самостоятельным измерениям) постройте входную характеристику, а также семейство выходных характеристик транзистора.

3. Рассчитайте $I_6 = E_k/R_1$ и на входной характеристике определите напряжение U_6 точки покоя при $R_1 = 51 \text{ кОм}$.

4. Проведите нагрузочную линию на семействе выходных характеристик для $E_k = -10 \text{ В}$ и $R_2 = 560 \text{ Ом}$.

5. Отметьте положение точки покоя на нагрузочной линии и определите I_k , U_k и мощность рассеивания транзистора P для точки покоя.

6. Запишите в тетрадь параметры точки покоя.

Упражнение 2. Монтаж элементов режима и измерение параметров точки покоя.

1. Включите паяльник и проведите монтаж элементов усилительного каскада согласно схеме.

2. По окончании монтажа включите стенд и установите на БП2 напряжение питания $E_k = -10 \text{ В}$.

3. Вольтметром В7-58/2 измерьте напряжение E_k , U_k и U_6 .

4. Сравните рассчитанное и измеренное U_k и U_6 .

Упражнение 3. Монтаж элементов межкаскадной связи и измерение амплитудно-частотных характеристик усилителя.

1. Выключите стенд и проведите монтаж элементов межкаскадной связи согласно варианту 1 таблицы 1.

Таблица 1

Варианты	C1	C2	C3	R3
1	C1	C2	–	R3
2	C1	C2	C3	R3
3	C1	C2	–	R3

2. Значения $C1$, $C2$, $C3$ и $R3$ уточните у преподавателя и запишите в тетрадь.

3. К входу усилителя подключите выход генератора Г4-221/1. Установите на частоте 1000 Гц выходное напряжение генератора примерно 20 мВ.

4. К выходу усилителя подключите вольтметр В7-58/2 на переменное напряжение с пределом измерения 3 В.

5. Проведите измерение амплитудно-частотной характеристики $U_{\text{вых}} = F f$ при $U_{\text{вх}} = \text{const}$, результаты измерений занести в таблицу 2.

Таблица 2

f (Гц)	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000	15000	20000
$\lg f$	1.3	1.7	2	2.3	2.7	3	3.3	3.7	4	4.17	4.3

6. Сделайте монтаж элементов связи к вариантам 2 и 3 таблицы 1 и проведите измерение соответствующих амплитудно-частотных характеристик усилителя.

7. Постройте амплитудно-частотные характеристики усилителя $U_{\text{вых}} = F f$ при $U_{\text{вх}} = \text{const}$ для всех вариантов. Сделайте вывод.

8. Рассчитайте коэффициент усиления K по напряжению на частоте 100 Гц и 1000 Гц для первого и третьего вариантов.

9. Переведите K усиления в децибелы.

10. Рассчитайте коэффициент частотных искажений на частоте 100 Гц для первого варианта.

11. Запишите результаты в тетрадь.

Сделайте вывод по лабораторной работе:

- На основе каких рассуждений ведется расчет параметров деталей усилителя?
- О принципах, лежащих в основе выбора режима работы транзистора.



Контрольные вопросы

1. Нарисуйте схему и поясните принцип действия работы апериодического усилителя напряжения с общим эмиттером.
2. Дайте определения основных параметров усилителя.
3. Назовите основные режимы усилителей. По каким признакам они определяются?
4. Нарисуйте известные вам схемы цепей для подачи напряжения смещения на базу транзистора и поясните, каким образом устанавливается необходимое напряжение усилителя.
5. Покажите на схеме усилителя цепи постоянного и переменного токов.
6. Нарисуйте и поясните эквивалентную схему усилителя.
7. Поясните, каким образом по эквивалентной схеме усилителя можно рассчитать его входное сопротивление, выходное сопротивление и коэффициент усиления по напряжению.



Литература

1. Ворсин, Н.Н. Основы радиоэлектроники / Н.Н. Ворсин, М.Н. Ляшко. – 1992.
2. Гершензон, Е.М. Радиотехника: учеб. пособие для ст-в физ.-мат. фак. пед. ин-тов / Е.М. Гершензон, Г.Д. Полянина. – М.: Просвещение, 1986.

Лабораторная работа 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Цель работы: изучить работу операционного усилителя на микросхеме К140УД1А; научиться балансировать микросхему; провести измерение амплитудной и амплитудно-частотной характеристики усилителя.

Теоретические обоснования

Общие сведения. Широкие функциональные возможности дифференциальных усилителей позволили создать на их основе интегральные схемы высококачественных усилителей, обладающих большими коэффициентами усиления дифференциального сигнала, с широкой полосой пропускания, большим входным и малым выходным сопротивлениями, низким уровнем линейных и нелинейных искажений. Такие интегральные усилители получили название *операционных*, так как с их помощью путем введения линейных и нелинейных элементов отрицательной обратной связи можно производить с большой точностью математические операции – суммирование, вычитание, интегрирование, дифференцирование, логарифмирование и т.д. Операционные усилители (ОУ) можно использовать не только для выполнения математических операций, но и для усиления, генерирования, формирования, преобразования и детектирования сигналов. Можно с уверенностью сказать, что ОУ являются одними из самых универсальных элементов радиоэлектроники.

Большинство операционных усилителей изготавливаются в монолитном исполнении по полупроводниковой интегральной технологии, обеспечивающей хорошую повторяемость характеристик в партии, низкую стоимость, высокую надежность. В гибридном исполнении выпускаются ОУ специального назначения, которые нельзя по различным соображениям реализовать в монолитной форме.

Условное обозначение операционного усилителя как функционального элемента приведено на рис. 1. Операционный усилитель имеет два входа: инвертирующий и неинвертирующий.

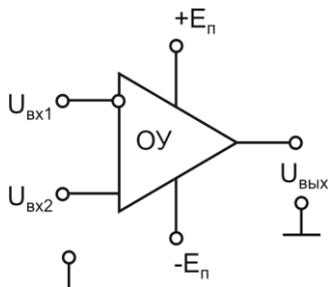


Рис. 1

Если при подключении источника сигнала к входу потенциал инвертирующего входа выше, чем неинвертирующего, то выходное напряжение сдвинуто на 180° относительно входного. В случае, когда потенциал неинвертирующего входа выше, чем инвертирующего, выходное и входное напряжения совпадают по фазе.

Благодаря использованию двух разнополярных источников питания выходное напряжение может изменяться при поступлении дифференциального входного сигнала как в положительную, так и в отрицательную сторону относительно нулевой общей точки схемы, которая обычно заземляется (балансировка усилителя).

Основные параметры ОУ. Независимо от сложности принципиальной схемы структурная схема ОУ содержит следующие основные функциональные узлы: входной каскад, промежуточный каскад – усилитель напряжения, схему сдвига потенциального уровня и выходной каскад – усилитель мощности (рис. 2).



Рис. 2

Входной каскад представляет собой дифференциальный усилитель, свойства которого определяют входные параметры всего операционного усилителя. К входным параметрам ОУ относится дифференциальное входное сопротивление $R_{вх}$, измеренное между входами ОУ. Для повышения $R_{вх}$ во входном каскаде используют полевые транзисторы или биполярные транзисторы со сверхвысоким коэффициентом усиления тока базы $h_{21э}$ в микроамперном диапазоне рабочих токов.

К входным параметрам ОУ также относятся входное напряжение смещения $U_{вх.см}$ и разность базовых токов смещения $I_{б.01}$ и $I_{б.02}$. Эти параметры отражают факт появления напряжения ошибки на выходе ОУ при его замкнутых входах.

Напряжение ошибки $U_{вых.ош}$ определяется двумя составляющими: $U'_{вых.ош}$ и $U''_{вых.ош}$. Первая составляющая $U_{вых.ош}$ обусловлена разбалансом внутри входного каскада. Несимметрия входного дифференциального усилителя, в частности неидентичность напряжений $U_{бэ0}$ транзисторов, приводит к разным коллекторным токам и, как следствие, к появлению напряжения разбаланса на выходе каскада даже при одинаковых потенциалах на его входах, т. е. при нулевом дифференциальном входном напряжении. Напряжение разбаланса, усиливаясь последующими каскадами ОУ, вызывает появление на выходе ОУ составляющей напряжения ошибки $U'_{вых.ош}$. Значение $U'_{вых.ош}$ определяется по входному напряжению смещения $U_{вх.см} = U'_{вых.ош} / K_U$, которое является справочной величиной, задаваемой разработчиками для каждого типа ОУ (K_U – коэффициент усиления дифференциального сигнала операционного усилителя). Входное напряжение смещения $U_{вх.см}$ основных типов ОУ лежит обычно в пределах $\pm(1-10)$ мВ и показывает, какое

напряжение следует приложить к входам ОУ для приведения напряжения ошибки $U''_{\text{ВЫХ.ОШ}}$ на выходе ОУ к нулю.

Вторая составляющая выходного напряжения ошибки $U''_{\text{ВЫХ.ОШ}}$ обусловлена разностью входных токов дифференциального усилителя ОУ.

При неидентичности параметров транзисторов дифференциального каскада ОУ базовые токи смещения $I_{\text{б.01}}$ и $I_{\text{б.02}}$ по значению будут отличаться друг от друга. Вследствие неравенства базовых токов напряжения на входах 1 и 2 относительно «земли» также будут различны, что приведет к возникновению дифференциального входного напряжения. Усиливаясь, это напряжение вызывает появление второй составляющей выходного напряжения ошибки $U''_{\text{ВЫХ.ОШ}}$. Для основных типов ОУ значения лежат в пределах 0,02–3 мкА.

Казалось бы, составляющую $U''_{\text{ВЫХ.ОШ}}$ можно исключить, обеспечив нулевые значения базовых токов $I_{\text{б.01}}$ и $I_{\text{б.02}}$. К сожалению, этого нельзя сделать, так как при нулевых значениях базовых токов транзисторы дифференциального каскада были бы закрыты. Задавая определенное значение базового тока, обеспечивают номинальный режим работы транзистора.

Для установки нулевого уровня выходного напряжения ОУ используют цепь регулировки нуля, состоящую из системы резисторов, подключенных к одному из входов ОУ.

Промежуточный каскад – дифференциальный усилитель с несимметричным выходом – обеспечивает необходимое усиление по напряжению всего операционного усилителя.

Схема сдвига потенциального уровня осуществляет изменение уровня постоянного напряжения на выходе промежуточного каскада до нулевого уровня, если дифференциальный сигнал на входах ОУ отсутствует.

Выходным каскадом ОУ является усилитель мощности, выполненный по схеме двухтактного эмиттерного повторителя, работающего в режиме АВ.

Свойства выходного каскада определяют выходные параметры операционного усилителя: выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$, максимальный выходной ток $I_{\text{вых.макс}}$, измеряемый при максимальном выходном напряжении $U_{\text{вых.макс}}$. При двухполярном питании ОУ имеются два уровня ограничения: положительный и отрицательный. Для большинства типов ОУ имеем $U_{\text{вых.макс}} = \pm 10$ В.

Стандартные операционные усилители, выпускаемые промышленностью, имеют выходную мощность не более 50 мВт. Однако сейчас разработаны и мощные ОУ с выходной мощностью от единиц до нескольких десятков ватт. К важным параметрам операционного усилителя, определяемым структурой и элементной базой ОУ, также относятся:

- коэффициент усиления по напряжению дифференциального сигнала K_U , большинство операционных усилителей имеет K_U до сотен тысяч;
- частота единичного усиления f_T , т. е. частота, при которой схема теряет свои усилительные свойства ($K_U = 1$);
- ток потребления ОУ.

Масштабирующий усилитель. Масштабирующие усилители применяются в вычислительной технике, когда необходимо изменить сигнал в определенном соотношении. На рис. 3 приведена схема такого усилителя с инвертированием входного сигнала. Сигнал $U_{\text{вх}}$ через резистор R_1 подается на инвертирующий вход, который охвачен отрицательной ОС с помощью резистора $R_{\text{ос}}$. Неинвертирующий вход соединен с общей точкой (заземляется).

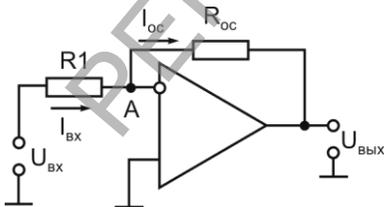


Рис. 3

Учитывая свойство ОУ, что $R_{вх} \rightarrow \infty$, током, протекающим через вход усилителя, можно пренебречь и потенциал точки А (рис. 3) считать равным потенциалу заземленного инвертирующего входа. Тогда для токов схемы можно записать равенство $I_{вх} = I_{ос}$. Определив токи через напряжения и сопротивления, получим:

$$\frac{U_{вх}}{R_1} = -\frac{U_{ввых}}{R_{ос}}. \quad (1)$$

Знак «-» в последнем выражении означает, что $U_{ввых}$ сдвинуто относительно $U_{вх}$ на 180° .

Из последнего выражения получим:

$$K_U = -\frac{U_{ввых}}{U_{вх}} = -\frac{R_{ос}}{R_1}. \quad (2)$$

Откуда видно, что соотношение между напряжениями $U_{ввых}$ и $U_{вх}$ зависит только от параметров резисторов $R_{ос}$ и R_1 .

Схема масштабирующего ОУ без инвертирования сигнала приведена на рис. 4. От схемы на рис. 3 она отличается тем, что входной сигнал подается на инвертирующий вход, а инвертирующий – заземляется через резистор R_1 .

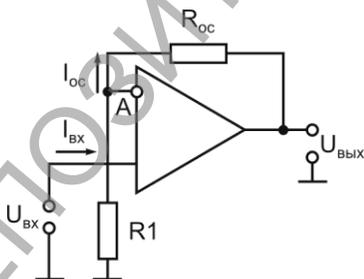


Рис. 4

На основании тех же свойств ОУ для схемы (рис. 4) можно показать, что масштабирующий коэффициент определяется выражением

$$K_U = -\frac{U_{ввых}}{U_{вх}} = 1 + \frac{R_{ос}}{R_1}. \quad (3)$$

Суммирующий усилитель. На рис. 5 представлена схема включения ОУ для суммирования двух сигналов с изменением фазы входного напряжения (инвертирующий сумматор).

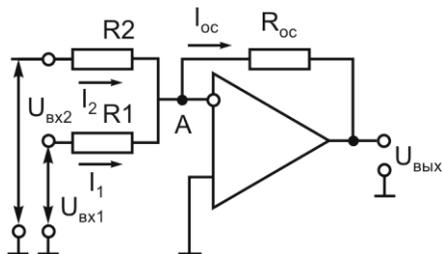


Рис. 5

От схемы на рис. 3 она отличается тем, что каждый источник сигнала подключен к инвертирующему входу через свой резистор. Входных сигналов может быть и более двух. При $R_{вх} \rightarrow \infty$ уравнение для токов схемы имеет следующий вид:

$$\frac{U_{ВХ1}}{R_1} + \frac{U_{ВХ2}}{R_2} = -\frac{U_{ВЫХ}}{R_{ОС}}. \quad (4)$$

Если принять $R_1 = R_2 = R_{ОС}$, то получим:

$$U_{ВЫХ} = -U_{ВХ1} + U_{ВХ2}. \quad (5)$$

Неинвертирующий сумматор приведен на рис. 6.

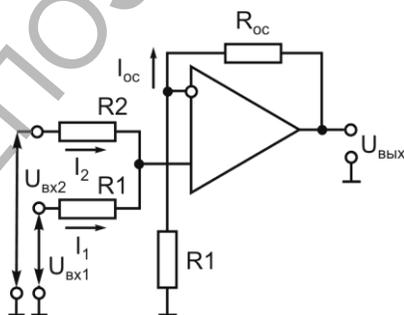


Рис. 6

Для этой схемы связь между входными и выходными напряжениями

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_1 + R_{\text{ОС}}}{nR_1} U_{\text{ВХ1}} + U_{\text{ВХ2}}, \quad (6)$$

где n – число входных сигналов, в данной схеме $n = 2$.

Интегрирующий усилитель. В интегрирующем усилителе напряжение на выходе постепенно достигает определенного значения (интегрирует входной сигнал). Приведенная на рис. 7 интегрирующая схема отличается от схемы рис. 3 тем, что в цепи ОС включен конденсатор. Связь между напряжениями определяется равенством

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1}{RC} \int U_{\text{ВХ}} dt. \quad (7)$$

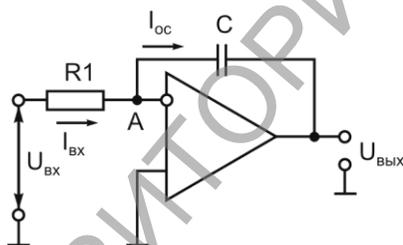


Рис. 7

Компаратор сигналов. Компаратором называется схема для сравнения двух напряжений (рис. 8).

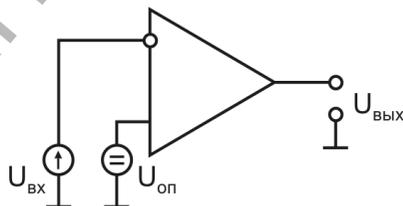


Рис. 8

На неинвертирующий вход усилителя подается неизменное по величине напряжение, называемое опорным $U_{оп}$. На инвертирующий вход подается изменяющееся во времени напряжение $U_{вх}$.

В схеме компаратора используется свойство усилителя изменять полярность (знак) выходного напряжения при изменении полярности напряжения на входах. Поясним это на примере временной диаграммы (рис. 9).

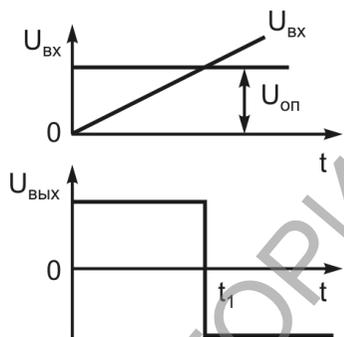


Рис. 9

В интервале времени $0 - t_1$ $U_{оп} > U_{вх}$, это значит, что потенциал неинвертирующего входа выше, чем инвертирующего. Следовательно, $U_{вых}$ совпадает по фазе с $U_{оп}$ ($U_{вых} > 0$). В момент времени $t > t_1$, когда $U_{вх} > U_{оп}$, потенциал инвертирующего входа выше неинвертирующего $U_{вых} < 0$, т. е. отстает по фазе на 180° . Изменения полярности выходного напряжения происходят в момент времени t_1 , когда $U_{вх} = U_{оп}$.

Такие схемы используются для преобразования формы сигнала, получения прямоугольных импульсов и т. п.

Выполнение работы

Схема лабораторной вставки изображена на рис. 10.

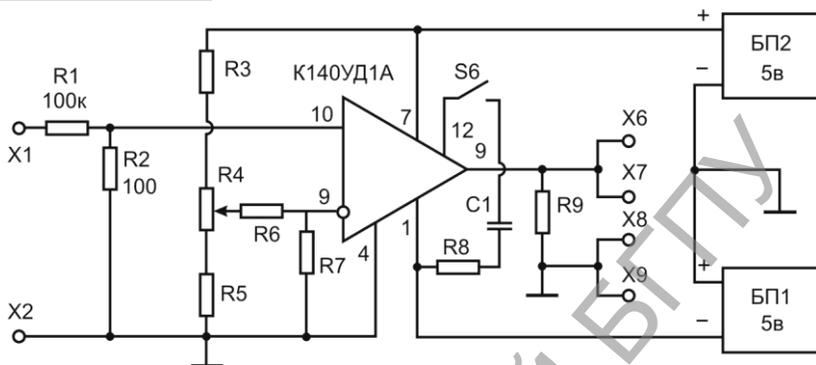


Рис. 10

Упражнение 1. Балансировка микросхемы.

1. Нарисуйте принципиальную схему установки.
2. Подключите вольтметр В7-58/2 с пределом измерения 1 В постоянного напряжения к выходу микросхемы.
3. Установите ручки регуляторов напряжения БП1 и БП2 в крайнее левое положение.
4. Переключите тумблер S1 блока БП1 в положение «-».
5. Переключите тумблер S2 блока БП2 в положение «+».
6. Включите лабораторный стенд и, вращая ручки БП1 и БП2, установите напряжение блока питания по 5 В.
7. Проведите балансировку микросхемы. Для этого отверткой установите регулятор потенциометра R4 в состояние, соответствующее нулевому напряжению на выходе микросхемы.

Упражнение 2. Измерение амплитудной характеристики усилителя.

1. К входу операционного усилителя (клеммы X1 и X2) подключите выход звукового генератора Г4-221/1. Установите частоту генератора 1000 Гц.

2. К выходу микросхемы подключите вольтметр В7-58/2 для измерения переменного напряжения.

3. Тумблер S6 переключите в нижнее положение.

4. Проведите измерение амплитудной характеристики исследуемой микросхемы при $f = 1000$ Гц, изменяя напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ генератора от 0 до 3 В через 0,2–0,3 В, результаты измерений занесите в таблицу 1.

Таблица 1

$U_{\text{ВЫХ}}$ генератора								
$U_{\text{ВХ}}$ микросхемы								
$U_{\text{ВЫХ}}$ микросхемы								

5. С учетом входного делителя напряжения R_1 и R_2 проведите перерасчет $U_{\text{ВЫХ}}$ генератора на $U_{\text{ВХ}}$ микросхемы и результаты запишите в таблицу 1:

$$U_{\text{ВХ.МИК}} = U_{\text{ВЫХ.ГЕН}} \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

6. Постройте амплитудную характеристику.

7. По графику на линейном участке характеристики определите коэффициент усиления K микросхемы.

Упражнение 3. Измерение амплитудно-частотной характеристики схемы усилителя.

1. Проведите измерение амплитудно-частотной характеристики усилителя в диапазоне частот 50 Гц – 20 кГц без цепи коррекции (тумблер S6 установите в нижнее положение).

2. Установите напряжение сигнала на входе микросхемы в пределах линейной амплитудной характеристики (около 1 мВ).

3. Изменяя частоту сигнала согласно таблице 2 на входе усилителя, проведите измерение выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ1}}$.

4. Результаты измерения занесите в таблицу 2.

Таблица 2

f (Гц)	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000	15000	20000
$\lg f$	1.3	1.7	2	2.3	2.7	3	3.3	3.7	4	4.17	4.3
$U_{\text{вых1}}$											
$U_{\text{вых2}}$											

5. Проведите измерение амплитудно-частотной характеристики усилителя с цепью коррекции (тумблер S6 установите в верхнее положение).

6. Результаты измерений $U_{\text{вых2}}$ занесите в таблицу 2.

7. По данным таблицы постройте графики $U_{\text{вых}} = F \lg f$ при $U_{\text{вх}} = \text{const}$.

Сделайте вывод по лабораторной работе:

- Зависимость напряжения выхода операционного усилителя от частоты.
- Как производятся измерения параметров интегральных микросхем?



Контрольные вопросы

- Какие усилители относятся к усилителям постоянного тока?
- Почему усилитель постоянного тока не может содержать реактивных элементов?
- Какое явление называют дрейфом нуля? Какими величинами характеризуют дрейф нуля?
- В чем причина нуля в усилителе постоянного тока и как его устраняют?
- Как предотвратить протекание токов через источник входного сигнала и нагрузку в усилителе постоянного тока в отсутствие входного сигнала?
- Какой усилитель называют дифференцированным?



Литература

1. Ворсин, Н.Н. Основы радиоэлектроники / Н.Н. Ворсин, М.Н. Ляшко. – Минск: Высшая школа, 1992.
2. Гершензон, Е.М. Радиотехника / Е.М. Гершензон, Г.Д. Полянина, Н.В. Соина. – М.: Просвещение, 1986.
3. Ляшко, М.Н. Радиотехника: лаб. практикум / М.Н. Ляшко. – Минск: Высшая школа, 1981. – Работа 10.
4. Манаев, Е.И. Основы радиоэлектроники / Е.И. Манаев. – М.: Просвещение, 1971.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

Лабораторная работа 8

РАСЧЕТ ОДНОТАКТНОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО ВЫХОДНОГО КАСКАДА УСИЛИТЕЛЯ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

Цель работы: приобретение навыков проведения графического расчета усилительного каскада на транзисторе.

Теоретические обоснования

Выходные каскады усилителей предназначены для обеспечения заданной выходной мощности сигнала (тока или напряжения сигнала) на известном сопротивлении нагрузки. В качестве нагрузки могут использоваться сопротивления громкоговорителя, реле, электронно-лучевой трубки, индикаторных элементов или других исполнительных устройств.

К расчету выходного каскада относятся: составление схемы выходного каскада, выбор усилительного элемента, расчет параметров и элементов схемы при заданном напряжении питания или выбор напряжения питания по результатам расчета.

Общая схема усилителя или выходного каскада приведена на рис. 1, в которой входное напряжение через усилительный элемент создает на нагрузке необходимое выходное напряжение, ток и мощность.

Усилительный элемент можно представить (рис. 2) источником сигнала с выходным напряжением $U_{\text{вых}} = KU_{\text{вх}}$, где K – коэффициент усиления каскада, и внутренним сопротивлением R_i .

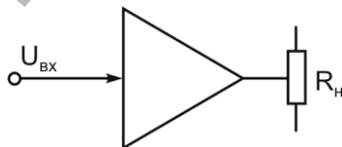


Рис. 1

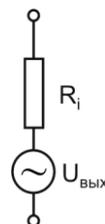


Рис. 2

Эквивалентная схема усилительного элемента с нагрузкой показана на рис. 3.

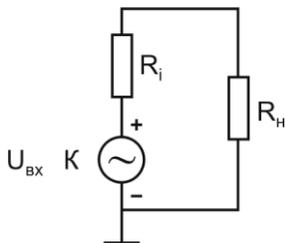


Рис. 3

Для обеспечения передачи максимальной выходной мощности от усилительного элемента к нагрузке необходимо, чтобы $R_i = R_H$. При неравенстве этих сопротивлений необходимо согласующее устройство (рис. 4).

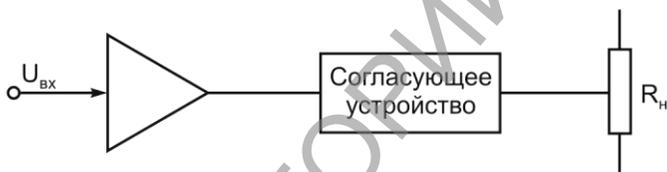


Рис. 4

В качестве согласующего устройства часто используют трансформатор (рис. 5).

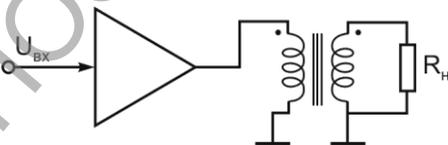


Рис. 5

Коэффициент трансформации без учета потерь в трансформаторе записывается: $n = \omega_1 / \omega_2$, где ω_1 – число витков первичной обмотки, ω_2 – число витков вторичной обмотки.

На рис. 6 показана оставленная принципиальная схема однотактного выходного усилительного каскада на $p-n-p$ -транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером.

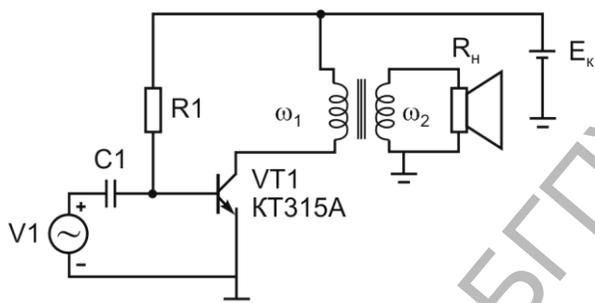


Рис. 6

В этой схеме напряжение выходного сигнала $U_{\text{вх}}$ через разделительный конденсатор $C1$ подается на эмиттерный переход транзистора, работающего в режиме А. Режим А определяется положением точки покоя, который задается сопротивлением смещения $R1$. Входное напряжение изменяет ток коллектора, который, протекая по первичной обмотке трансформатора, создает изменяющийся магнитный поток в сердечнике трансформатора, что приводит к возникновению во второй обмотке трансформатора ЭДС индукции, обуславливающей протекание тока по сопротивлению нагрузки, и выделению на нем колебательной мощности.

Выполнение работы

Расчет параметров и элементов схемы проводится при заданной выходной мощности $P_{\text{н}} = 0,2$ Вт и сопротивлении нагрузки

$$R_{\text{н}} = 8 \text{ Ом.}$$

1. Рассчитывается мощность рассеивания на коллекторе транзистора.

$$P_{\text{к}} \geq \frac{P_{\text{н}}}{n_1 n_2},$$

где n_1 – коэффициент полезного действия одноконтного выходного каскада (практическое значение $n_1 < 0,45$), n_2 – коэффициент полезного действия выходного трансформатора (практическое значение $n_2 < 0,7 - 0,9$).

Принимаем $n_1 = 0,4$; $n_2 = 0,82$.

$$P_{\kappa} = \frac{0,2 \text{ Вт}}{0,4 \cdot 0,82} = 0,61 \text{ Вт}.$$

2. Выбирается по справочнику транзистор $p-n-p$ -типа с допустимой мощностью рассеивания на коллекторе не менее 0,61 Вт.

Для примера расчета выбраны учебные характеристики транзистора с параметрами, указанными в таблице характеристик транзистора.

3. На выходных характеристиках транзистора проводится построение графика допустимой мощности рассеивания коллектора.

$$P_{\text{рас}} = I_{\kappa} U_{\kappa}.$$

При построении графика задается значение U_{κ} , определяется ток коллектора и отмечается на выходных характеристиках данная точка.

Например:

$$U_{\kappa} = 5 \text{ В}, I_{\kappa} = \frac{P_{\kappa, \text{доп}}}{U_{\kappa}} = \frac{1 \text{ Вт}}{5 \text{ В}} = 200 \text{ мА};$$

$$U_{\kappa} = 6 \text{ В}, I_{\kappa} = \frac{P_{\kappa, \text{доп}}}{U_{\kappa}} = 166 \text{ мА};$$

$$U_{\kappa} = 10 \text{ В}, I_{\kappa} = \frac{P_{\kappa, \text{доп}}}{U_{\kappa}} = 100 \text{ мА}.$$

По точкам пунктиром строится график.

4. На выходных характеристиках отмечается точка А, характеризующаяся максимальным током коллектора и минимальным напряжением на коллекторе, равным 1–2 В.

$$I_{\kappa \text{ А}} = 185 \text{ мА}, U_{\kappa \text{ А}} = 2 \text{ В}, I_{\text{б А}} = 2,5 \text{ мА}.$$

5. Через точку A проводится нагрузочная линия ниже касательной к графику допустимой мощности рассеивания на коллекторе.

6. По нагрузочной линии определяется сопротивление нагрузки коллектора (использовать метод параметрического треугольника):

$$R_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{13 \text{ В} - 6 \text{ В}}{140 \text{ мА} - 60 \text{ мА}} = 87,5 \text{ Ом}.$$

7. Определяется амплитуда тока коллектора при максимальной выходной мощности сигнала.

$$P_k = 0,5 I_{k,\text{max}}^2 \cdot R_k,$$
$$I_{k,\text{max}} = \sqrt{\frac{P_k}{0,5 R_k}} = \sqrt{\frac{P_H}{n_2 0,5 R_k}} = 75 \text{ мА}.$$

8. Рассчитываем ток коллектора точки покоя транзистора:

$$I_k = I_{kA} - I_{k,\text{max}} = 185 \text{ мА} - 75 \text{ мА} = 110 \text{ мА}.$$

9. На нагрузочной линии отмечается точка покоя и записываются ее параметры:

$$I_{k\Pi} = 110 \text{ мА}, U_{k\Pi} = 8,5 \text{ В}, I_{б\Pi} = 1400 \text{ мкА}.$$

10. На входную характеристику транзистора (для данного расчета выбрана характеристика $N1$) переносятся точки A и Π и определяются их параметры:

$$I_{бA} = 2,5 \text{ мА}, U_{бA} = 250 \text{ мВ},$$

$$I_{б\Pi} = 1400 \text{ мкА}, U_{б\Pi} = 200 \text{ мВ}.$$

11. Рассчитывается необходимая амплитуда входного сигнала:

$$U_{\text{вх.макс}} = U_{бA} - U_{б\Pi} = 250 \text{ мВ} - 200 \text{ мВ} = 50 \text{ мВ},$$

$$I_{\text{вх.макс}} = I_{бA} - I_{б\Pi} = 2,5 \text{ мА} - 1,4 \text{ мА} = 1,1 \text{ мА}.$$

12. Рассчитывается минимальное напряжение на базе транзистора и отмечается точка B .

$$U_{б.min} = U_{б.п} - U_{б.max} = 200 \text{ мВ} - 50 \text{ мВ} = 150 \text{ мВ}.$$

На входной характеристике отмечается точка B и записываются ее параметры:

$$U_{бB} = 150 \text{ мВ}, I_{бB} = 42 \text{ мА}.$$

13. Зная расчетную амплитуду напряжения и тока входного сигнала, находим действующее напряжение и ток:

$$U_{вх.эф} = \frac{U_{вх.max}}{\sqrt{2}} = \frac{50}{1,4} = 35,3 \text{ мВ},$$

$$I_{вх.эф} = \frac{I_{вх.max}}{\sqrt{2}} = \frac{1,1}{1,4} = 0,78 \text{ мА}.$$

14. Точка B переносится на выходные характеристики и записываются ее параметры:

$$U_{кB} = 14,5 \text{ В}, I_{кB} = 42 \text{ мА}.$$

15. Определяются амплитуды напряжений и токов положительного и отрицательного полупериодов выходного сигнала:

$$U_{+} \quad U_{к,max} = U_{к.п} - U_{кA} = 8,5 - 2 = 6,5 \text{ В};$$

$$I_{+} \quad I_{к,max} = I_{кA} - I_{к(п)} = 185 - 110 = 75 \text{ мА};$$

$$U_{-} \quad U_{к,max} = U_{кB} - U_{к.п} = 14,5 - 8,5 = 6 \text{ мВ};$$

$$I_{-} \quad I_{к,max} = I_{к.п} - I_{кB} = 110 - 42 = 68 \text{ мА}.$$

Как видно из расчета, амплитуды положительного и отрицательного полупериодов выходного сигнала не равны. Это обусловлено нелинейностью нижнего участка входной характеристики транзистора, что приводит к снижению выходной мощности и появлению нелинейных искажений.

В данном примере расчета колебательная мощность на коллекторе равна сумме мощностей в каждом полупериоде:

$$P_{к.рас} = P_{к+} + P_{к-} = 0,5 \cdot \frac{I_{к.маx}^+{}^2}{2} R_{к} + 0,5 \cdot \frac{I_{к.маx}^-{}^2}{2} R_{к} =$$

$$= 0,25 \cdot \left(75 \cdot 10^{-3}{}^2 + 68 \cdot 10^{-3}{}^2 \right) = 223 \text{ мВт} .$$

Определим необходимую колебательную мощность на коллекторе.

$$P_{к.маx} = \frac{P_{н}}{n_2} = \frac{200}{0,82} = 244 \text{ мВт} .$$

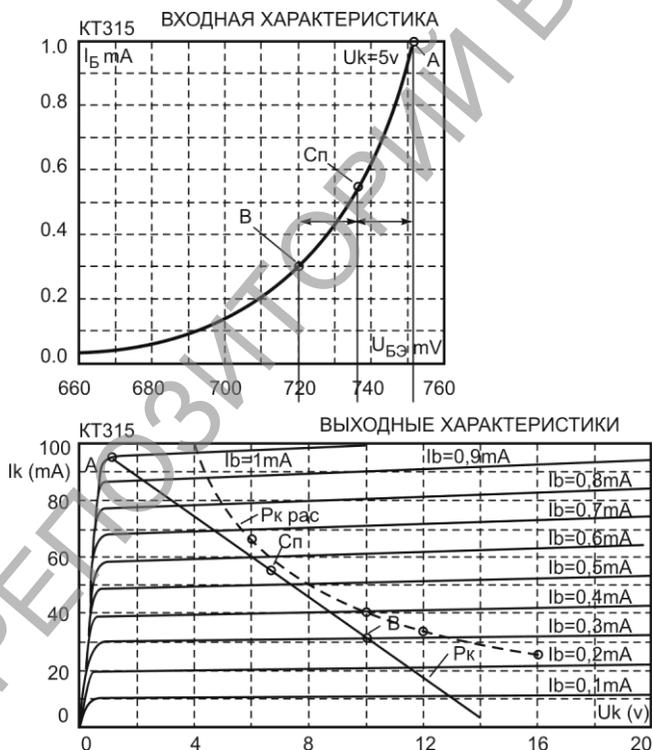


Рис. 7

Расчетная колебательная мощность при максимальном уровне входного сигнала меньше заданной на 21 мВт. На меньших уровнях сигнала будет использоваться более линейный участок входной характеристики, что приведет к меньшим искажениям сигнала.

Поскольку расчетная колебательная мощность меньше необходимой, то следует либо снизить заданную колебательную мощность, либо выбрать транзистор с большей допустимой мощностью рассеивания на коллекторе и, используя более линейный участок входной характеристики, получить заданную расчетную мощность на коллекторе.

16. Выбор напряжения источника питания проводится по положению точки покоя транзистора. Напряжение на коллекторе в точке покоя равно 8,5 В. С учетом падения напряжения на первичной обмотке трансформатора, равным 0,5–1,5 В, принимается $E_k = 9$ В.

17. Определяется мощность потребления каскадом от источника питания:

$$P_o = I_{кп} \cdot E_k = 110 \cdot 9 = 990 \text{ мВт}.$$

18. Определяется максимальная мощность сигнала на нагрузке.

$$P_{к.рас} = P_{н.рас} \eta_2 = 223 \cdot 0,82 = 182 \text{ мВт}.$$

19. Определяется КПД выходного сигнала:

$$\eta_1 = \frac{P_{н.рас}}{P_o} = \frac{182}{990} = 18\%.$$

Как видно из расчета, низкий КПД, равный 18 % вместо заданного 40 %, обусловлен частично нелинейностью входной характеристики и частично неоптимальным проведением нагрузочной линии. Точку А можно установить на меньший ток. Для повышения КПД необходимо выбрать новое расположение нагрузочной линии или выбрать другой транзистор с использованием линейного участка характеристики.

20. Рассчитывается коэффициент трансформации:

$$n = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \sqrt{\frac{R_H}{n_2 R_K}} = \sqrt{\frac{8}{0,82 \cdot 87,5}} = 0,33.$$

Число витков ω_1 и ω_2 рассчитывается по заданным частотным искажениям (в данном примере не определяется).

21. Расчет сопротивления смещения:

$$R_{CM} = \frac{E_K - U_{6\Pi}}{I_{6\Pi}} = \frac{9 - 0,2}{1400} = 6,2 \text{ кОм}.$$

22. Разделительная емкость рассчитывается по заданным частотным искажениям (в данном примере C_p не определяется).

23. Проводится расчет коэффициента усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{U_{K.маx}}{\sqrt{2} U_{ВХ}} = \frac{6,5}{1,4 \cdot 35,3 \cdot 10^{-3}} = 130.$$

24. Проводится расчет коэффициента усиления по мощности:

$$K_P = \frac{P_H}{P_{ВХ}} = \frac{P_H}{U_{ВХ} I_{ВХ}} = 6610.$$

25. По входной характеристике в точке покоя определяется входное сопротивление каскада, $R_{ВХ} = 45 \text{ Ом}$.

26. Все расчетные данные заносятся в таблицу 1.

Таблица 1

P_H (мВт)	R_H (Ом)	E_K (В)	$P_{H.рас}$ (мВт)	$U_{ВХ}$ (мВ)	$R_{ВХ}$ (Ом)	n (%)	K_U	K_P	E_{CM} (кОм)
200	8	9	192	35	45	18	130	6610	6.2

Сделайте вывод по лабораторной работе:

- Как определяются параметры усилителя мощности?
- О значении КПД выходного каскада.



Контрольные вопросы

- Какие требования предъявляются к выходным каскадам?
- В каком классе чаще всего работают выходные каскады?
- Поясните принцип действия усилителя мощности.
- Каковы недостатки выходных каскадов с трансформаторными связями?



Литература

1. Ворсин, Н.Н. Основы радиоэлектроники / Н.Н. Ворсин, М.Н. Ляшко. – Минск: Высшая школа, 1992.
2. Гершензон, Е.М. Радиотехника / Е.М. Гершензон, Г.Д. Полянина, Н.В. Соина. – М.: Просвещение, 1986.
3. Ляшко, М.Н. Радиотехника: лаб. практикум / М.Н. Ляшко. – Минск: Высшая школа, 1981. – Работа 10.
4. Манаев, Е.И. Основы радиоэлектроники / Е.И. Манаев. – М.: Просвещение, 1971.

Лабораторная работа 9

ГЕНЕРАТОРЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: выучить работу LC - и RC -генераторов гармонических электрических колебаний на транзисторе; научиться различать частоту колебания LC -генератора по данным L и C , частоту колебания RC -генератора по данным R и C ; научиться измерять частоту колебания генератора с помощью осциллографа.

Теоретические обоснования

Виды генераторов. Как уже отмечалось, речь, музыка или изображения передаются на большие расстояния с помощью электромагнитных волн. Электромагнитные волны создаются переменным током высокой частоты, подводимым к передающей антенне, а для получения высокочастотного переменного тока используются электронные *генераторы*, входящие в состав радиопередатчика. Электронный генератор является основой и электромузыкальных инструментов (ЭМИ). Генераторы широко используются для настройки контуров радиоприемника, фильтров, телевизоров, отклонения луча в электронно-лучевых трубках осциллографов и телевизоров и т. д. Даже исходя из этих примеров, не охватывающих всех областей применения генераторов, можно считать, что после усилителя генератор – одно из самых распространенных устройств радиоэлектронной аппаратуры.

Напряжение на выходе генератора может иметь синусоидальную либо другую форму, например, прямоугольных или треугольных импульсов. Поэтому генератором называют электронное устройство, преобразующее напряжение питания (постоянное напряжение) в напряжение (или ток), изменяющееся во времени по определенному, свойственному этой схеме, закону.

Бывают генераторы с независимым, или внешним, возбуждением и с самовозбуждением. Генераторы с независимым возбуждением без внешнего источника создавать

электрические колебания не могут и служат для усиления мощности колебаний, подаваемых на их вход от других устройств. Такие генераторы часто называют усилителями мощности. Чтобы получить мощные усиленные колебания, необходимо иметь маломощный источник этих колебаний. Им и является генератор с самовозбуждением. Самовозбуждение означает, что для получения колебаний в таком генераторе не нужен дополнительный источник электрических колебаний, колебания тока и напряжения происходят в самом генераторе при подаче на него напряжения питания автоматически (отсюда второе название генератора с самовозбуждением – автогенератор).

Принципы построения генераторов. Колебания на выходе генератора можно получить, охватив обычный усилитель положительной обратной связью (рис. 1).

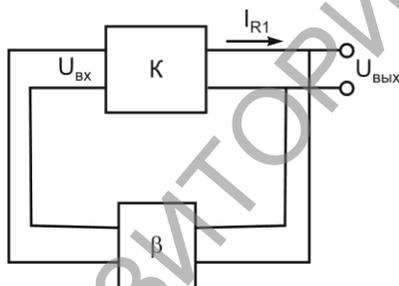


Рис. 1

При выполнении условий

$$K_U \beta = 1, \quad (1)$$

$$\varphi_K + \varphi_\beta = 0, \quad 2\pi k, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

в усилителе с положительной обратной связью возникают незатухающие колебания, так как первоначальное изменение напряжения на выходе схемы, возникшее за счет случайных колебаний (флуктуации) на входе усилителя, передается по цепи обратной связи снова на вход, усиливается и вызывает еще большее изменение выходного сигнала.

С нарастанием амплитуды выходных колебаний рабочая точка каскадов, составляющих усилитель, заходит в нелинейную область динамических характеристик транзисторов усилителя и коэффициент усиления K_U уменьшается до значения, при котором $K_U \beta = 1$; устанавливается стационарная амплитуда колебаний на выходе.

Равенство (1) показывает, что усилитель усиливает сигнал во столько раз, во сколько ослабляет его цепь обратной связи, и называется условием *баланса амплитуд*.

При балансе амплитуд энергия источника питания через цепь положительной обратной связи компенсирует потери энергии в схеме.

Равенство (2) называют *условием баланса фаз*.

LC-генератор с индуктивной обратной связью. Генераторы с колебательными контурами применяются для получения высокочастотных гармонических колебаний.

Автогенератор с индуктивной обратной связью (рис. 2) представляет собой резонансный усилитель с контуром $L_k C_k$ в цепи коллектора. К усилителю подключена цепь положительной обратной связи в виде катушки $L_{св}$ и конденсатор $C1$, соединяющий по переменному току базу транзистора с землей.

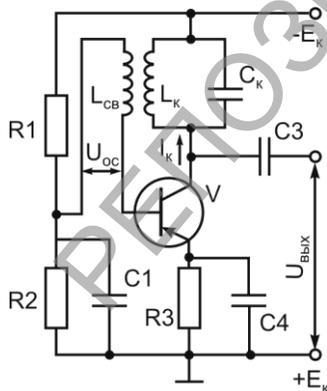


Рис. 2

В LC-генераторах гармонических колебаний обычно используется параллельный колебательный контур, который включается в коллекторную цепь транзистора. Как известно, если такому контуру сообщить энергию, например, путем зарядки конденсатора, в нем возникнут электрические колебания. Вследствие потерь энергии при прохождении тока в контуре эти колебания будут носить затухающий характер и через некоторое время исчезнут. Для поддержания

в контуре незатухающих колебаний необходимо пополнять потери энергии в нем периодической подзарядкой конденсатора от источника постоянного тока. Если подзарядку осуществлять в течение каждого периода колебаний, в контуре будут поддерживаться колебания с практически неизменной амплитудой. Именно этот принцип и положен в основу действия автогенераторов LC .

Рассмотрим работу такого генератора.

1-я четверть периода колебаний. При подключении источника напряжения транзистор открывается. Сопротивления $R1$ и $R2$ задают положение точки покоя. Ток коллектора стремится к точке покоя. Цепь тока I_k : $+E_k$ – эмиттер транзистора – коллектор – L_k – $-E_k$. Прохождение по катушке L_k нарастающего коллекторного тока I_k создает вокруг нее нарастающее магнитное поле. Магнитное поле пронизывает катушку обратной связи L_{cb} . Здесь возникает напряжение обратной связи U_β , которое через $C1$ прикладывается к эмиттерному переходу транзистора.

Полярность U_β такова, что на базе ($-$), на эмиттере ($+$). Это напряжение еще больше открывает транзистор. Ток коллектора возрастает выше точки покоя до $I_{k,max}$. Вся энергия находится в катушке L_k .

2-я четверть периода колебаний. Энергия магнитного поля катушки переходит в энергию конденсатора C_k . Направление тока I_k в катушке L_k в эту четверть совпадает с направлением I_k первой четверти. Ток коллектора уменьшается, U_β уменьшается, энергия конденсатора увеличивается. Полярность напряжения на конденсаторе C_k вверху ($+$), внизу ($-$). Когда конденсатор полностью зарядится, ток коллектора находится в точке покоя.

3-я четверть периода колебаний. Энергия конденсатора переходит в энергию катушки. Конденсатор C_k начинает

разряжаться. Направление возрастающего тока в катушке L_k сверху вниз. Напряжение U_β возрастает, но полярность его меняется, транзистор закрывается. Когда энергия конденсатора полностью перейдет в энергию катушки, транзистор полностью закрыт.

4-я четверть периода колебаний. Энергия катушки переходит в энергию конденсатора и перезаряжает его. Полярность напряжения на конденсаторе сверху (-), внизу (+). Направление тока в катушке L_k , как и в третьей четверти периода. Ток в катушке уменьшается, U_β также уменьшается. Транзистор приоткрывается, ток стремится к точке покоя.

5-я четверть периода колебаний. Энергия конденсатора переходит в энергию катушки. Ток в катушке возрастает, направление его совпадает с первой четвертью периода. U_β возрастает, транзистор открывается до $I_{k,max}$. Колебательный контур пополняется энергией, теряемой на активном сопротивлении катушки.

Таким образом, в контуре будут создаваться незатухающие колебания. Эта энергия пополняется за счет источника питания. Транзистор в этой схеме выполняет функцию нелинейного элемента.

Период колебаний в контуре определяется параметрами колебательного контура L_k и C_k .

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_k C_k}}. \quad (3)$$

Режимы работы автогенератора. В зависимости от величины обратной связи автогенератор может работать в следующих режимах:

1. *Критический* – это режим возникновения колебаний, амплитуда малая, $K_U\beta = 1$.

2. *Недонапряженный* – при увеличении обратной связи амплитуда напряжений возрастает, искажений нет.

3. *Нормальный* – увеличение обратной связи не приводит к увеличению амплитуды колебаний, при этом искажения формы тока незначительны.

4. *Перенапряженный* – возрастание амплитуды колебаний не происходит, а происходит искажение формы сигнала.

RC-генераторы гармонических колебаний. RC-генератор представляет собой аperiodический усилитель с избирательными цепями обратной связи или связи между каскадами, содержащими лишь резисторы и конденсаторы. Широкое распространение получили две разновидности генераторов этого типа: *генераторы с поворотом фазы напряжения на 180° в цепи обратной связи* (генераторы с фазосдвигающими цепочками) и *генераторы без поворота фазы напряжения в цепи обратной связи* (генераторы с мостом Вина).

Генератор с поворотом фазы напряжения на 180° (рис. 3) представляет собой однокаскадный резисторный усилитель с общим эмиттером, имеющим три или больше RC-звеньев в цепи обратной связи.

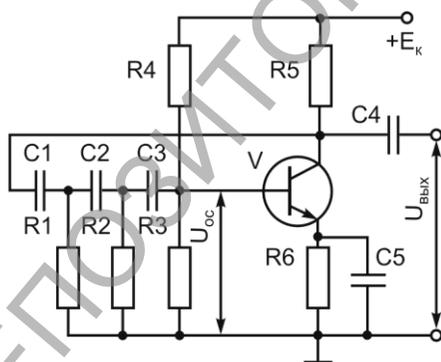


Рис. 3

Как известно, в однокаскадном усилителе с общим эмиттером создается фазовый сдвиг на 180° выходного напряжения относительно входного. Для выполнения условия баланса фаз в цепи обратной связи сдвиг фаз напряжений должен быть таким же. Это обеспечивается RC-звеньями.

Распространены два варианта соединений резисторов и конденсаторов в RC -звеньях, образующих цепь обратной связи (рис. 4).

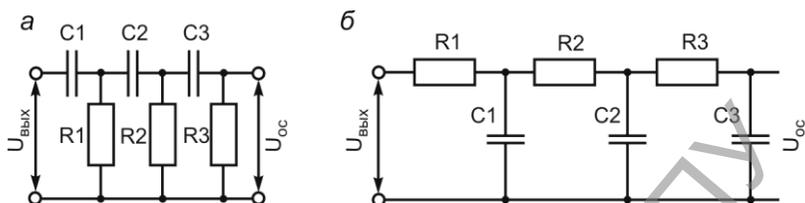


Рис. 4

От количества этих звеньев, способа соединения элементов и их параметров зависят значение коэффициента обратной связи β , частота, при которой цепь обратной связи обеспечивает фазовый сдвиг $+180^\circ$ или -180° , а следовательно, и частота генерируемых колебаний. Величина β определяет степень усиления, которое необходимо создать в каскаде, так как для возбуждения генератора необходимо выполнение условия

$$K_U \geq \frac{1}{\beta}. \quad (4)$$

Фазовращающие RC -цепи существенно уменьшают сигнал, поступающий на вход усилителя. Поэтому для обеспечения баланса амплитуд генератора и возникновения колебаний коэффициент усиления усилителя необходимо выбирать из условия $K_U \geq 1/\beta = 29$.

Частота ω для варианта R -параллель (рис. 4, а) вычисляется по формуле

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{6RC}}, \quad (5)$$

для варианта S -параллель (рис. 4, б) – по формуле

$$\omega = \frac{\sqrt{6}}{RC}. \quad (6)$$

Для нормальной работы генераторов необходим согласующий каскад – эмиттерный повторитель, выполненный на транзисторе $V2$. При отсутствии эмиттерного повторителя условия самовозбуждения в схеме генератора выполнить трудно, так как, во-первых, фазовращающая цепь обратной связи шунтирует резистор R_k и тем самым уменьшает коэффициент усиления K_U усилительного каскада; во-вторых, малое входное сопротивление каскада снижает коэффициент передачи β .

В генераторах без поворота фазы в цепи обратной связи (рис. 5) ставят двухкаскадный усилитель, который не вносит фазовых сдвигов.

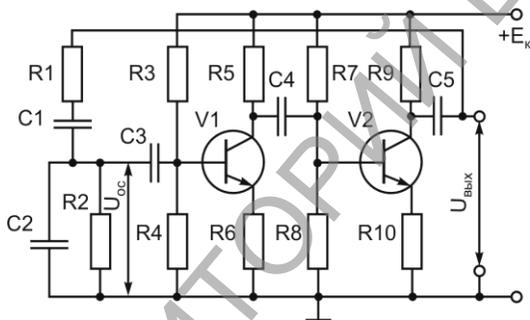


Рис. 5

Если выход усилителя соединить с его входом через цепь без реактивных элементов, условия самовозбуждения будут выполняться в широком диапазоне частот, генератор будет широкополосным. Генерация колебаний в узкой полосе достигается введением специальной избирательной цепи обратной связи, содержащей последовательно соединенные резистор $R1$, конденсатор $C1$ и параллельно включенные резистор $R2$, конденсатор $C2$. Подобную цепь называют *мостом Вина*.

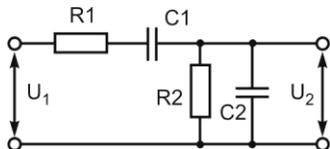


Рис. 6

RC-генератор с мостом Вина обеспечивает нулевой сдвиг между входным и выходным напряжениями на квазирезонансной частоте f_0 . На этой частоте выполняются условия самовозбуждения. На других частотах условия самовозбуждения не выполняются, поскольку усиливается затухание в RC-цепочке, т. е. уменьшается коэффициент ее передачи β . Поэтому генерируемые колебания будут иметь синусоидальную форму с частотой f_0 .

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}. \quad (7)$$

Обычно $R_1 = R_2 = R$, $C_1 = C_2 = C$. Тогда

$$f = \frac{1}{2\pi RC}, \quad \beta = \frac{1}{3}. \quad (8)$$

Коэффициент передачи K_U определяет величину коэффициента обратной связи в генераторе β и равен 3.

Двухкаскадный усилитель имеет значительный запас по усилению, и возбуждение колебаний в генераторе с мостом Вина происходит без осложнений.

Выполнение работы

Схема лабораторной вставки изображена на рис. 7.

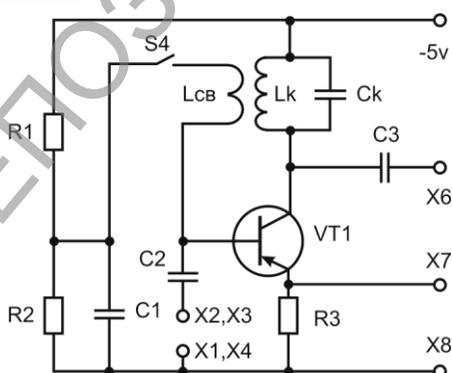


Рис. 7

Упражнение 1. Исследование работы LC-генератора.

1. По данным L_k - и C_k -контура рассчитайте резонансную частоту.

2. Отключите катушку связи, для чего тумблер $S4$ поставьте в нижнее положение.

3. Подключите к клеммам $X1$ и $X2$ выход генератора Г4-221/1, установите напряжение генератора 10–20 мВ.

4. Подключите вход осциллографа Y к клеммам $X6$ и $X8$.

5. Включите стенд, установите $E_k = -9$ В, включите генератор Г4-221/1 и осциллограф.

6. Измерьте резонансную частоту усилителя и сравните ее с расчетной.

7. Измерьте амплитуду напряжения на выходе усилителя, рассчитайте коэффициент усиления по формуле

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{ген}}}.$$

8. Рассчитайте минимальные значения коэффициента обратной связи, при котором усилитель начинает самовозбуждаться:

$$\beta = \frac{1}{K}.$$

9. Отключите генератор Г4-221/1, включите катушку обратной связи, для чего тумблер $S4$ поставьте в верхнее положение.

10. Изменяя величину обратной связи, добейтесь генерации, определите осциллографом частоту генератора, сравните с резонансной частотой усилителя.

Упражнение 2. Исследование режимов работы LC-генератора.

1. Подключите осциллограф к клеммам $X7$ и $X8$.

2. Регулируя величину обратной связи по изменению амплитуды и формы тока эмиттера транзистора, определите режимы работы LC-генератора: критический, недонапряженный, нормальный, перенапряженный.

3. Зарисуйте осциллограммы для всех режимов.
4. Установите критический режим.
5. Подключите осциллограф к клеммам X6 и X8 и измерьте амплитуду колебаний на выходе LC-генератора.
6. Цифровым вольтметром измерьте напряжение на базе транзистора.
7. Рассчитайте коэффициент обратной связи при критическом режиме $\beta_{\text{крит}}$.
8. Выключите стенд.

Упражнение 3. Исследование работы RC-генератора.

Схема лабораторной вставки представлена на рис. 8.

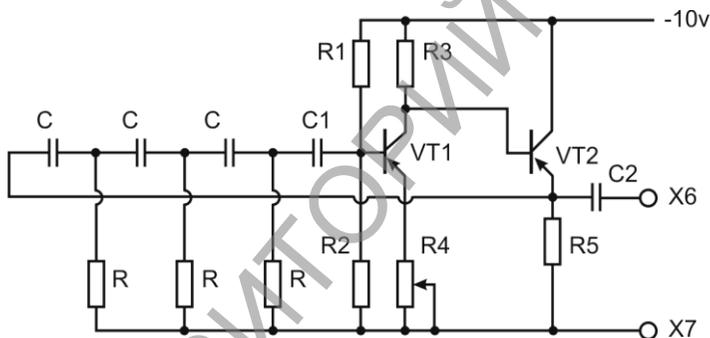


Рис. 8

1. Рассчитайте частоту генератора по заданным параметрам R и C .
2. Подключите осциллограф к выходу RC-генератора (клеммы X6 и X7).
3. Включите стенд, установите $E_{\text{к}} = 12$ В, потенциометром S4 добейтесь генерации.
4. С помощью осциллографа измерьте частоту RC-генератора и сравните ее с расчетной.

Сделайте вывод по лабораторной работе:

- О режимах работы LC -генератора.
- О назначении RC -звеньев в RC -генераторе.



Контрольные вопросы

1. Чем определяется условие баланса фаз и баланса амплитуд?
2. Для какой цели в схеме LC -генератора установлен резистор $R1$?
3. Каковы условия возбуждения усилителя?
4. Что называется критическим коэффициентом усиления?



Литература

1. Ворсин, Н.Н. Основы радиоэлектроники / Н.Н. Ворсин, М.Н. Ляшко. – Минск, 1992. – С. 144–154.
2. Ляшко, М.Н. Радиотехника: лаб. практикум / М.Н. Ляшко. – Минск, 1981. – Работа 13. – С. 156–170.

Лабораторная работа 10

АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ

Цель работы: изучить процесс амплитудной модуляции электрических колебаний; изучить процесс детектирования амплитудно-модулированных электрических колебаний.

Теоретические обоснования

Процесс управления колебаниями высокой частоты при передаче речи, музыки или телевизионных сигналов называется *модуляцией*.

Переменный ток высокой частоты, который протекает в антенне передатчика при отсутствии сигнала, называется *током несущей частоты*. Он характеризуется определенной амплитудой, частотой и фазой. Зависимость тока от времени может быть выражена уравнением

$$I = I_{m0} \sin \omega_0 t + \varphi_0, \quad (1)$$

где I_{m0} – амплитуда тока, ω_0 – частота тока, φ_0 – фаза тока.

Передаваемые сигналы могут воздействовать на одну из этих величин. В соответствии с этим различают амплитудную, частотную и фазовую модуляции. Радиоаппаратура в основном работает с амплитудной и частотной модуляцией.

Амплитудная модуляция (АМ). Она наиболее часто применяется при радиотелефонии, т. е. передаче сигналов звуковой частоты. Амплитуда тока высокой частоты изменяется в такт звуковым колебаниям (рис. 1). Действительное соотношение между звуковой и несущей частотой на графике показать невозможно: на одно колебание звуковой частоты приходится тысячи высокочастотных колебаний. Но из графика видно, что огибающая колебаний высокой частоты повторяет форму тока звукового сигнала I_{Ω} .

Глубина модуляции, т. е. степень изменения амплитуд высокочастотного колебания, в простейшем случае зависит от силы звука. Чем громче звук, тем больше глубина модуляции. Для количественной оценки служит *коэффициент модуляции*,

равный отношению прироста амплитуды тока несущей частоты к амплитуде тока до модуляции. Коэффициент модуляции обычно выражают в процентах:

$$m = \frac{\Delta I_m}{I_{m0}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где ΔI_m – прирост амплитуды тока при модуляции, I_{m0} – амплитуда тока до модуляции.

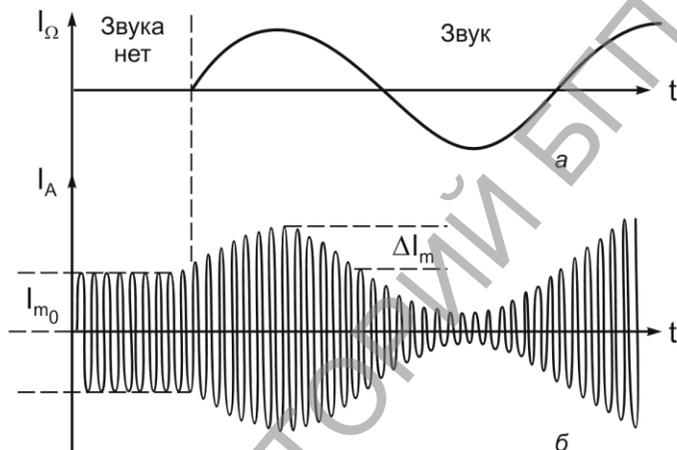


Рис. 1

При нормальной работе коэффициент модуляции имеет величину 30–80 %.

Процесс амплитудной модуляции не является процессом сложения колебаний высокой и низкой частоты. Это более сложный процесс.

Состав АМ-колебания. Теория и практика показывают, что модулированные колебания являются суммой нескольких высокочастотных колебаний с разными частотами и амплитудами. Примем, что высокочастотное колебание частотой $\omega = 2\pi f$ описывается выражением $U_\omega = U_{\omega m} \sin \omega t + \varphi_\omega$. Под действием управляющего низкочастотного сигнала $U_\Omega = U_{\Omega m} \sin \Omega t + \varphi_\Omega$ происходит пропорциональное ему

изменение амплитуды высокочастотного колебания $\Delta U_{\omega m} t = \Delta U_{\Omega m} \sin \Omega t + \varphi_{\Omega}$. Тогда высокочастотное колебание описывается соотношением

$$\begin{aligned}
 U_{\omega} &= U_{\omega m} \left[1 + m \sin \Omega t + \varphi_{\Omega} \right] \sin \omega t + \varphi_{\omega} = \\
 &= U_{\omega m} \sin \omega t + \varphi_{\omega} + \frac{1}{2} m U_{\omega m} \cos \omega - \Omega t + \varphi_{\omega} - \varphi_{\Omega} - \frac{1}{2} m U_{\omega m} \cos \omega + \Omega t + \varphi_{\omega} + \varphi_{\Omega}.
 \end{aligned} \quad (3)$$

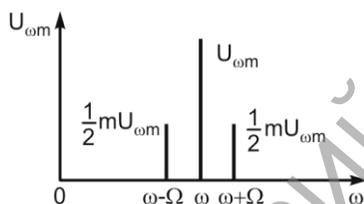


Рис. 2

Результаты показывают, что если модуляция осуществляется простым, т. е. синусоидальным звуком с частотой Ω , то модулированное колебание содержит три составляющие:

- колебание несущей частоты ω и амплитудой $U_{\omega m}$;
- колебание верхней боковой частоты $\omega + \Omega$ и амплитудой $\frac{1}{2} m U_{\omega m}$;
- колебание нижней боковой частоты $\omega - \Omega$ и амплитудой $\frac{1}{2} m U_{\omega m}$.

Амплитуды боковых колебаний одинаковы и всегда меньше половины амплитуды колебания несущей частоты. Например, если несущая частота 1 МГц, а звуковая 1 кГц, то верхняя боковая частота составляет 1001 кГц, а нижняя — 999 кГц.

Состав модулированного колебания можно показать при помощи так называемой спектральной диаграммы (рис. 2). На

горизонтальной оси откладывают частоты, вертикальные отрезки соответствуют амплитудам колебаний.

При модуляции сложным звуком, который состоит из нескольких синусоидальных колебаний, состав модулированного колебания более сложен. Каждый простой звук, т. е. каждый тон, даст свою пару боковых частот. В результате образуется верхняя и нижняя боковые полосы частот (рис. 3).

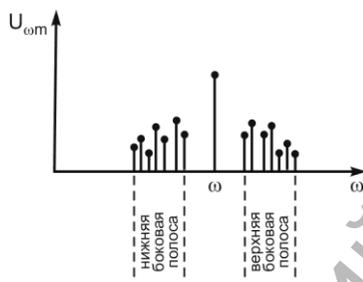


Рис. 3

Передатчик излучает целый спектр частот. Общая ширина спектра определяется теми составляющими, частоты которых наиболее отличаются от несущей. Эти составляющие возникают при воздействии звука самого высокого тона. Следовательно, ширина спектра зависит от наивысшей частоты модуляции. Она равна удвоенной верхней частоте модуляции 2Ω .

Было показано, что для передачи речи достаточна полоса звуковых частот до 3000 Гц. Это соответствует ширине спектра частот передатчика 6 кГц. При высоком качестве передачи музыки верхняя звуковая частота составляет 15–20 кГц, что соответствует ширине спектра 30–40 кГц. На такую полосу частот и следовало бы проектировать радиоаппаратуру. Но практически полоса пропускания аппаратуры бывает меньше. При этом самые нижние и самые верхние боковые частоты не воспроизводятся и форма передаваемого сигнала несколько искажается.

Необходимость сужения спектра частот обусловливается рядом причин. Во-первых, обеспечить широкую полосу пропускания всего тракта радиосвязи или радиовещания

технически очень трудно. Аппаратура получается сложной. Во-вторых, при современном уровне развития техники одновременно работают много радиопередатчиков. Каждому из них должна быть отведена определенная полоса частот. В диапазоне средних и даже промежуточных волн имеется мало частот, и передатчикам в этих диапазонах «тесно». И, наконец, в-третьих, сужение полосы пропускания радиотелефонной аппаратуры до 9–10 кГц внесет вполне допустимые искажения.

Выполнение работы

Схема лабораторной вставки изображена на рис. 4.

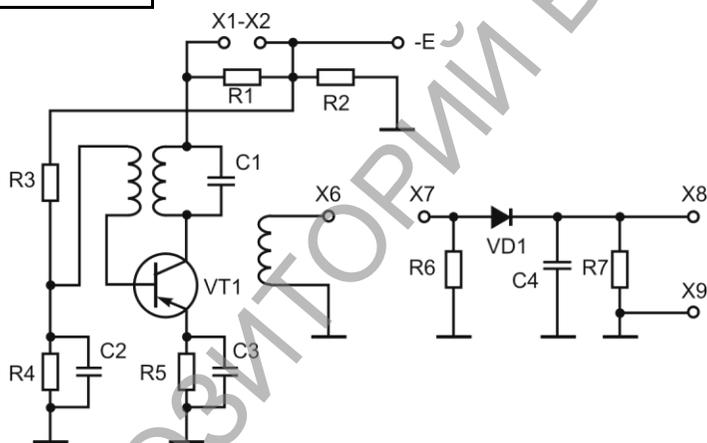


Рис. 4

Упражнение 1. Наблюдение немодулированных и модулированных колебаний на выходе генератора Г4-221/1.

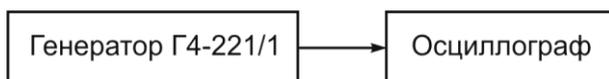


Рис. 5

1. Вход осциллографа подключите к выходу генератора Г4-221/1, $0,1 \div 1В$.

2. Установите аттенюатор осциллографа в положение 1 В/см.

3. Генератор Г4-221/1 установите на внутреннюю модуляцию 400 Гц.

4. Включите генератор и осциллограф.

5. Ручкой генератора $Уст.m \%$ получите и нарисуйте осциллограммы при $m = 0$, $m = 0,5$, $m = 1$, $m > 1$.

Упражнение 2. Получение немодулированных колебаний автогенератора.

1. Соберите и нарисуйте функциональную схему.



Рис. 6

2. Тумблер лабораторного стенда S2 установите в положение «←».

3. Вход осциллографа подключите к выходу схемы (клеммы X6 и X9).

4. Зарисуйте схему автогенератора.

5. Включите лабораторный стенд. Установите напряжение БП2, равное $-5 В$.

6. Получите и нарисуйте осциллограмму немодулированных колебаний, измерьте осциллографом напряжение и частоту.

7. Полученные результаты запишите в тетрадь.

Упражнение 3. Измерение и построение модулированной характеристики автогенератора.

Модулированная характеристика показывает зависимость амплитуды колебания генератора от величины управляющего напряжения. Функция модулированной характеристики записывается: $U_{ген} = F E_k$. В данной схеме выполняется коллекторная модуляция.

1. Изменяйте напряжение БП2 от -1 до -10 через $-1 В$.

2. Определите осциллографом напряжение на выходе схемы, результаты измерений занесите в таблицу.

3. На основе полученных измерений постройте модулированную характеристику, зависимость $L_y \text{ мм} = F E_k$.

4. Сделайте вывод.

Упражнение 4. Создание модулированных колебаний автогенератора на транзисторе.

1. Соберите и зарисуйте функциональную схему.

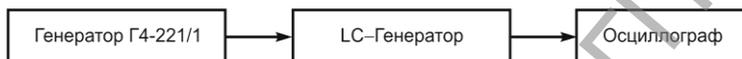


Рис. 7

2. Установите напряжение БП2, соответствующее середине модулированной характеристики.

3. На клеммы X1 и X2 подайте напряжение от генератора звуковых частот Г4-221/1, установите частоту 400–1000 Гц.

4. Изменяя напряжение генератора звуковых частот, получите модулированные колебания для $m = 0$, $m = 0,5$, $m = 1$, $m > 1$.

5. На модулированной характеристике отметьте участок изменения амплитуды высокочастотных колебаний для значения $m = 0,5$.

Упражнение 5. Получение осциллограмм при детектировании.

1. Соберите и нарисуйте функциональную схему.

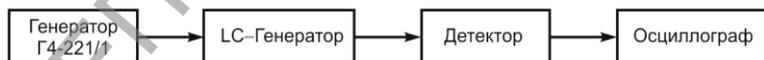


Рис. 8

2. Соедините вход осциллографа с выходом детектора.

3. Соедините выход LC-генератора с детектором, для этого соедините клеммы X6 и X7.

4. Выход генератора Г4-221/1 соедините с клеммами X1 и X2.

5. Включите лабораторный стенд. Установите напряжение БП2, равное -5 В.

5. Получите и нарисуйте осциллограммы сигнала на выходе детектора при выключенном и включенном конденсаторе фильтра С4 для $m = 0$, $m = 0,5$, $m = 1$, $m > 1$.

6. Сделайте выводы и запишите их в тетрадь.

Сделайте вывод по лабораторной работе:

- О составе амплитудно-модулированных колебаний.
- О работе диодного детектора.



Контрольные вопросы

1. Каков принцип работы амплитудного детектора?
2. Каким является спектральный состав амплитудно-модулированного сигнала?
3. Поясните принцип работы устройств амплитудной модуляции.



Литература

1. Ворсин, Н.Н. Основы радиоэлектроники / Н.Н. Ворсин, М.Н. Ляшко. – Минск, 1992. – С. 144–154.
2. Ляшко, М.Н. Радиотехника: лаб. практикум / М.Н. Ляшко. – Минск, 1981. – Работа 13. – С. 156–170.

Лабораторная работа 11

ПРИЕМНИК ПРЯМОГО УСИЛЕНИЯ НА ТРАНЗИСТОРАХ

Цель работы: изучить схему и работу приемника прямого усиления на транзисторах; научиться производить монтаж приемника; научиться определять частоты принимаемых станций, диапазон принимаемых приемником частот.

Теоретические обоснования

Основные параметры радиопередающих и радиоприемных устройств. Передача энергии с помощью радиосвязи широко используется при управлении автоматическими объектами. Структурная схема, иллюстрирующая принцип радиосвязи, приведена на рис. 1.

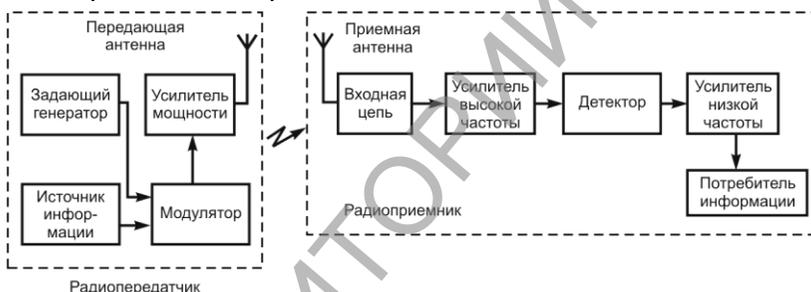


Рис. 1

Основными устройствами радиосвязи являются радиопередатчик и радиоприемник. Радиопередатчик предназначен для создания высокочастотного сигнала, некоторые параметры которого (частота, амплитуда или фаза) изменяются по закону, соответствующему передаваемой информации. Частота высокочастотного сигнала называется *несущей*.

Процесс воздействия на один или несколько параметров высокочастотного сигнала в соответствии с законом передаваемой информации называется *модуляцией*. Высокочастотный сигнал в радиопередатчике формируется задающим генератором. Элемент, с помощью которого осуществляется воздействие на колебания высокой частоты, называется

модулятором. Модулятор является неотъемлемой частью радиопередатчика, так как формирует сигнал информации, подлежащий передаче на расстояние. Модулированные высокочастотные колебания усиливают усилителем мощности и излучаются в окружающее пространство с помощью антенны.

Радиопередатчик характеризуется следующими параметрами:

1. Мощностью, отдаваемой выходным каскадом в антенну. Увеличение мощности передатчика повышает дальность и надежность радиосвязи.

2. Коэффициентом полезного действия, определяемым как отношение выходной мощности передатчика к мощности, потребляемой от всех источников питания. Особенно важен этот параметр для мощных передатчиков.

3. Диапазоном частот, в котором работает передатчик. При этом перестройка с одной частоты на другую должна осуществляться плавно и по возможности простыми способами.

4. Стабильностью частоты, от которой зависят надежность и помехоустойчивость радиосвязи.

Радиоприемное устройство предназначено для выделения из модулированного высокочастотного колебания, принятого от радиопередатчика, сигнала информации, обеспечивающего нормальную работу потребителя информации.

В качестве нагрузки радиоприемника могут быть использованы телефон, реле, записывающее устройство.

Полезный сигнал, принятый антенной радиоприемника, сопровождается помехами. Источниками помех являются искровые процессы в различных промышленных установках, работающих поблизости, грозовые разряды, космические излучения и т. д. Поэтому в радиоприемнике имеются специальные цепи для подавления помех.

Процесс непосредственного преобразования модулированных высокочастотных колебаний в информативный сигнал называется *детектированием*, а устройство, в котором оно

происходит, – *детектором*. Детектор является неотъемлемой частью любого радиоприемного устройства.

Так как мощность полезного сигнала, принимаемого антенной приемника, обычно мала, то в нем предусматриваются усилитель высокой частоты, нагрузкой которого является детектор, и усилитель низкой частоты, усиливающий после детектора сигнал информации.

Радиоприемник, выполненный по структурной схеме (рис. 1), называется *приемником прямого усиления*, так как частота принятого радиосигнала при его усилении и фильтрации остается неизменной.

Принципиальная схема приемника прямого усилителя дана на рис. 2.

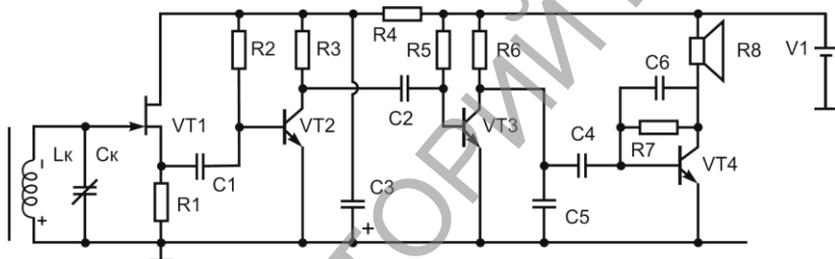


Рис. 2

Схема приемника состоит из антенного контура $L_k C_k$, двух каскадов усиления радиосигналов (транзисторы V_1 и V_2), детектора на транзисторе V_3 и каскада звуковой частоты на транзисторе V_4 . Это схема приемника прямого усиления $2 - V - 1$.

Антенный контур приемника предназначен для преобразования напряженности электромагнитного поля в электрический сигнал и состоит из катушки индуктивности L_k , намотанной на ферритовом стержне, и переменной емкости C_k , позволяющей настраивать контур на частоты принимаемых радиостанций.

Первый каскад приемника выполнен на полевом транзисторе V_1 по схеме истокового повторителя. Каскад усиливает

радиосигнал по мощности, создает большое (свыше 10 МОм) входное сопротивление усилителя высокой частоты и имеет малое выходное сопротивление, соизмеримое с сопротивлением резистора R_1 .

Большое входное сопротивление первого каскада позволяет подключить транзистор этого каскада непосредственно к антенному контуру и при этом сохранить высокую добротность контура. В данной схеме добротность около 100, что обеспечивает хорошую избирательность приемника. Если в первом каскаде применить биполярный транзистор и согласовать его через катушку связи с катушкой контура, то добротность контура не будет выше 20 и избирательность приемника намного уменьшится.

Через конденсатор C_1 сигнал от первого каскада поступает на второй каскад, выполненный на биполярном транзисторе V_2 по схеме с общим эмиттером. В данном каскаде нагрузкой является резистор R_3 , а не дроссель, как обычно в аperiodических усилителях радиосигналов. Это обусловлено тем, что высокая чувствительность данного приемника и открытый (не экранированный) монтаж при наличии индуктивности в выходной цепи транзистора V_2 приводят к самовозбуждению приемника.

Напряжение питания второго и первого каскадов приемника подается от общего источника питания через фильтр развязки, состоящий из резистора R_4 и конденсатора C_3 . Этот фильтр не пропускает переменную составляющую по цепям питания от последующих каскадов на входы первого и второго каскадов. Без данного фильтра приемник может самовозбуждаться.

От второго каскада сигнал через конденсатор C_3 поступает на детекторную ступень. Детекторная ступень выполнена по схеме коллекторного детектора на транзисторе V_3 . В схеме этого детектора коллектор по радиочастоте заземлен через конденсатор C_5 . Транзистор V_3 работает в режиме AB (почти B), это определяется величиной сопротивления смещения R_5 . Точка покоя транзистора

находится в самом начале входной характеристики. Транзистор в данном каскаде является нелинейным элементом. Роль фильтра на выходе нелинейного элемента выполняет сопротивление коллектора R_6 и емкость C_5 . В коллекторной цепи каскада происходит выделение низкочастотного сигнала из высокочастотного модулированного, поступающего на вход каскада.

Особенностью данной схемы детектора является то, что детектирование происходит с усилением сигнала. Звуковой сигнал с резистора R_6 через конденсатор C_4 подается на вход каскада усилителя звуковой частоты, выполненного на транзисторе V_4 . Нагрузкой каскада УНЧ является сопротивление головных телефонов.

Радиоприемное устройство характеризуется следующими параметрами:

1. Чувствительностью, т. е. способностью радиоприемника принимать слабые сигналы. Чувствительность оценивается минимальным значением сигнала в антенне, обеспечивающим заданную мощность выходного сигнала, и зависит от усилительных свойств усилителей, входящих в схему радиоприемника. Чем больше коэффициент усиления усилителей, тем выше чувствительность радиоприемника.

2. Избирательностью, т. е. способностью приемника выделять из суммы различных сигналов и помех сигналы нужной радиостанции. Чем выше избирательность приемника, тем меньше влияние на полезный сигнал помех и сигналов посторонних радиостанций.

Избирательность приемника зависит от числа каскадов в усилителе высокой частоты и качества резонансных фильтров в каждом каскаде. Повышение избирательности приемника связано с увеличением количества контуров и каскадов усиления в приемнике, что повышает его стоимость и усложняет настройку. Поэтому в зависимости от назначения приемника его избирательность имеет конкретное значение, которое задается при проектировании радиоприемника.

3. Выходной мощностью, т. е. мощностью, отдаваемой в нагрузку. Величина этой мощности зависит от назначения приемника и обычно задается при проектировании.

4. Качеством воспроизведения выходного сигнала, характеризующим различие между входным и выходным сигналами информации за счет линейных и нелинейных искажений.

Выполнение работы

Схема лабораторной вставки изображена на рис. 3.

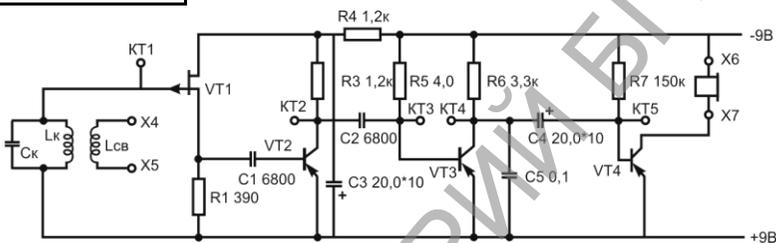


Рис. 3

Упражнение 1. Изучение схемы приемника прямого усиления.

Изучите схему приемника прямого усиления. Выясните назначение каждого элемента схемы.

Упражнение 2.

Подключите к приемнику источник питания и измерьте напряжения на электродах транзисторов относительно общей точки с помощью вольтметра согласно таблице 1.

Таблица 1

VT1		VT2		VT3		VT4	
З	И	Б	К	Б	К	Б	К

Упражнение 3.

1. Подключите к клеммам X4 и X5 генератор Г4-221/1 и катушку связи.

2. Подайте с генератора Г4-221/1 высокочастотный модулированный сигнал $U_{вхm} = 0,1 - 0,2 \text{ В}$ ($m = 50 \%$).

3. С помощью осциллографа получите осциллограммы напряжений в контрольных точках электрической цепи каждого каскада приемника прямого усиления.

4. Измерьте $U_{ср}$ напряжения каждого каскада и определите коэффициент усиления.

5. Измеренные данные запишите в тетрадь.

Упражнение 4.

Проведите прием передач радиовещательных станций на магнитную антенну.

Сделайте вывод по лабораторной работе:

- О назначении элементов схемы приемника прямого усиления.
- О процессах, происходящих в каждом каскаде приемника.



Контрольные вопросы

1. Какой приемник называется приемником прямого усиления?
2. Нарисуйте структурную схему приемника прямого усиления.
3. Дайте определения чувствительности, избирательности, номинальной и нормальной мощности приемника.
4. Укажите назначение элементов в каждом каскаде изученного приемника и опишите процессы, происходящие в каскадах.



Литература

1. Ворсин, Н.Н. Основы радиоэлектроники / Н.Н. Ворсин, М.Н. Ляшко. Минск, 1992. – С. 144–154.
2. Ляшко, М.Н. Радиотехника: лаб. практикум / М.Н. Ляшко. – Минск, 1981. – Работа 13. – С. 156–170.

Лабораторная работа 12

ИЗУЧЕНИЕ ТРАНСЛЯЦИОННЫХ УСТАНОВОК ТУ-100М И РУШ-1-30

Цель работы: изучить трансляционную установку ТУ-100М, трансляционную установку РУШ-1-30, а также их характеристики.

Теоретические обоснования

Трансляционные установки и радиоузлы предназначены для трансляции передач радиовещательных станций, воспроизведения грампластинок и магнитофонных записей, а также для передачи сообщений через микрофон.

В состав радиоузла должны входить:

- мощный усилитель низкой частоты;
- радиовещательный приемник;
- проигрыватель грампластинок;
- магнитофон;
- микрофон.

Количество громкоговорителей, которое можно подключать к узлу, зависит от мощности усилителя и потребляемой мощности громкоговорителей (нагрузки). Такой расчет производится по формуле

$$n = \frac{P_y}{P_r}, \quad (1)$$

где P_y – выходная мощность усилителя, P_r – потребляемая мощность громкоговорителя.

Трансляционная установка ТУ-100М. В комплект трансляционной установки ТУ-100М входит:

- усилитель с проигрывателем;
- приемник «Казахстан» с головными телефонами;
- линейный щиток;
- антенный щиток;
- два микрофона;
- нагрузка радиоузла (громкоговорители).

Функциональная схема трансляционной установки ТУ-100М показана на рис. 1.

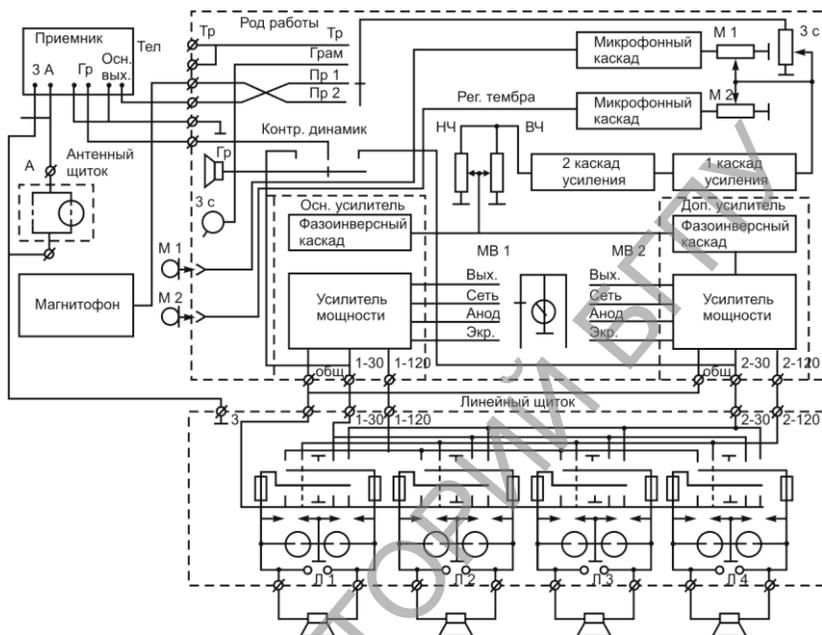


Рис. 1

- Усилитель трансляционной установки ТУ-100М состоит из:
- предварительного усилителя;
 - основного усилителя мощности;
 - дополнительного усилителя мощности;
 - проигрывателя грампластинок.

Схемы основного и дополнительного усилителей мощности одинаковы. Каждый усилитель состоит из двух каскадов: фазоинверсного и выходного каскада.

Выходная мощность каждого усилителя 50 Вт, напряжение на выходе 30 и 120 В. Основной усилитель обозначается МВ1, а дополнительный – МВ2. Общим звеном для обоих усилителей мощности является предварительный усилитель

(усилитель напряжения), состоящий из двух самостоятельных микрофонных каскадов и двух последовательных каскадов усилителей напряжения. Предварительный усилитель имеет три входа:

- а) переключаемый вход для подключения звукозаписывающего аппарата *Грам.*, два однозначных входа *Пр1* и *Пр2* для приемника и магнитофона, вход *Трасл.* для радиотрансляционной линии;
- б) вход для подключения первого микрофона;
- в) вход для подключения второго микрофона.

Регулировка громкости усилителя при работе со звукозаписывающим аппаратом, магнитофоном, приемником и трансляционной линией производится потенциометром *Зс*, стоящим на входе первого каскада предварительного усилителя.

Регулировка громкости микрофонов (ручки *М1* и *М2*) производится потенциометрами, стоящими на выходе микрофонных каскадов.

Регулировка тембра производится отдельно по высоким и низким частотам потенциометрами, стоящими на выходе предварительного усилителя. Усилитель имеет контрольную группу, состоящую:

- а) из контрольного громкоговорителя с переключателем;
- б) из прибора-индикатора с переключателем.

Контрольный громкоговоритель при помощи переключателя подключается к выходам основного или дополнительного усилителей, а также к отдельному выходу приемника «Казахстан». Контрольным громкоговорителем проверяется громкость выхода основного или дополнительного усилителей или громкость и настройка приемника «Казахстан».

Прибор-индикатор при помощи переключателя подключается к контрольным точкам напряжений основного или дополнительного усилителей.

Прибор-индикатор позволяет контролировать:

- а) напряжение выходов усилителей;
- б) напряжение питания сети усилителей;
- в) напряжение анода выходных ламп усилителей;
- г) напряжение экранных сеток выходных ламп усилителей.

Если при измерении *анод, сеть, экран* и *выход* прибором-индикатором стрелка находится в черном секторе шкалы прибора, то напряжение нормальное.

На верхней панели усилителя смонтирован проигрыватель, имеющий три скорости (78, 45 и 33 об/мин) с пьезоэлектрическим звуконосителем.

Приемник «Казахстан». Приемник супергетеродинного типа предназначен для радиоузлов проводного вещания и обеспечивает прием радиовещательных станций, работающих с амплитудной модуляцией в диапазонах длинных, средних и коротких волн, а также станций, работающих с частотной модуляцией в диапазоне УКВ.

Приемник имеет семь диапазонов: длинноволновой, средневолновой, четыре полурастянутых коротковолновых и УКВ. Шкала приемника проградуирована в частотах и длинах волн.

Приемник имеет три выхода:

а) основной – для подключения к входу предварительного усилителя.

б) отдельный – для подключения к контрольному громкоговорителю;

в) для подключения головных телефонов.

Линейный щиток. Линейный щиток рассчитан на 4 линии и предназначен для коммутации и выключения линий, а также для защиты усилителя от коротких замыканий на линиях, от попаданий посторонних напряжений со стороны линий и от грозовых разрядов на линиях.

Линейный щиток имеет 4 линейных переключателя на 6 фиксированных положений, которые предназначены для подключений линий к основному или дополнительному усилителям на 30 или 120 В, для выключения и заземления линий:

- в положении *Выкл.* линия заземляется;
- в положении *Изм.* линия отключается от выхода усилителя;
- в положении *1 – 30* линия подключается к 30-вольтовому выходу основного усилителя;

- в положении 1 – 120 линия подключается к 120-вольтовому выходу основного усилителя;
- в положении 2 – 30 линия подключается к 30-вольтовому выходу дополнительного усилителя;
- в положении 2 – 120 линия подключается к 120-вольтовому выходу дополнительного усилителя.

При эксплуатации радиоузла нагрузку необходимо распределять равномерно на оба усилителя. При общей мощности нагрузки менее 50 Вт все линии можно подключить к какому-либо одному усилителю.

Линейный щиток имеет 14 клемм, которые расположены на плате внутри кожуха щитка и предназначены для подключения линий и выходов обоих усилителей.

Систему защиты, имеющуюся в линейном щитке, можно разделить на три группы:

1-я группа – предохранители, защищающие усилитель от коротких замыканий в линиях;

2-я группа – грозозарядники, защищающие усилитель от грозовых разрядов на линиях;

3-я группа – газоразрядники, защищающие усилитель от посторонних напряжений в линиях.

Антенный щиток. Антенный щиток предназначен для подключения антенны и заземления к приемнику, для защиты входных цепей приемника (входные контуры) от грозовых разрядов и посторонних напряжений в антенне. Антенный щиток имеет грозозарядник, газоразрядник и клеммы для подключения антенны, заземления и приемника.

Нагрузка усилителя. Громкоговорители. Радиоузел в лаборатории имеет следующие нагрузки для подключения к линейному щитку:

а) четыре громкоговорителя по 0,5 Вт на 30 В, соединенные параллельно в одну линию;

б) звуковую колонку 15КЗ-1 10 Вт на 30 В;

в) звуковую колонку 15КЗ-1 15 Вт на 120 В;

г) выносной громкоговоритель типа «Колокольчик», который может быть скоммутирован под напряжением 30, 120,

240 В с мощностью 2,5 Вт, 5 Вт и 10 Вт. Переключение его осуществляется на плате, находящейся внутри задней крышки громкоговорителя.

Переключение «Колокольчика» и подключение нагрузки к усилителю производится согласно заданию преподавателя.

При включении радиоузла обязательно должна быть подключена нагрузка, так как без нагрузки могут выйти из строя выходные каскады усилителя.

Радиоузел сельских школ РУШ. Предназначается для озвучивания классных помещений и обеспечения двусторонней симплексной громкоговорящей связи между оператором радиоузла и абонентом. Радиоузел служит для смешивания и усиления, а также для контроля за прохождением сигналов, которые поступают на его вход от микрофонов, проигрывателя, магнитофона, радиоприемника или трансляционной сети, а также для выдачи программ во внешнюю линию связи с абонентом и приема сигналов (передач) абонента.

Радиоузел имеет три варианта исполнения в зависимости от числа обслуживаемых абонентов: РУШ-1-15, РУШ-1-30, РУШ-1-45.

В комплект радиоузла сельских школ РУШ-1-15 входят: пульт радиоузла ПУ-59; микрофоны типа МД-66А (2 шт.); соединительные кабели (2 шт.); распределительная коробка КР-19 для подключения 15 абонентских линий; акустические системы абонента 4АС-3 (15 шт.); абонентские пульта связи ПС-9 (15 шт.). Пульт радиоузла ПУ-59 составляет основу радиоузла. Он содержит усилитель мощностью 20 Вт, тракт связи и органы управления радиоузелом.

Комплект радиоузла модификации РУШ-1-30 (рис. 2) содержит те же блоки, что и радиоузел модификации РУШ-1-15, а также дополнительный блок П-60, который представляет собой усилитель мощностью 20 Вт, аналогичный установленному в пульте радиоузла ПУ-59. Число подключаемых абонентов может достигать 30.

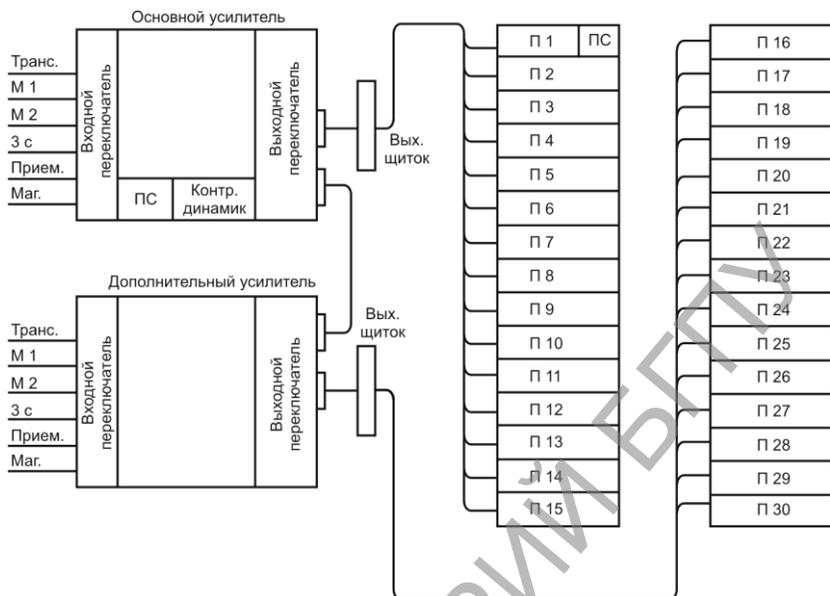


Рис. 2

В комплект радиоузла РУШ-1-45 входят два дополнительных блока П-60. Число присоединяемых абонентов может достигать 45.

Тракт связи радиоузла. Радиоузел РУШ-1 содержит тракт связи для осуществления двусторонней громкоговорящей связи между оператором радиоузла и любым абонентом. В тракт связи входят: усилитель У-51; усилитель контроля УЛ-19 с номинальной выходной мощностью 0,25 Вт; динамическая головка; сигнальные лампочки и электрический звонок, расположенные в пульте радиоузла; абонентский пульт связи, находящийся в пункте приема программ. В качестве микрофонов в тракте связи используются динамические головки.

При передаче информации от оператора к абоненту динамическая головка контроля программы через систему реле подключается к входу усилителя тракта связи, а абонентская линия связи – к выходу этого усилителя.

Когда передачу информации ведет абонент, к входу усилителя тракта связи через абонентскую линию подключается динамическая головка пульта связи абонента, а к выходу усилителя – динамическая головка пульта радиозула. Сигналом вызова оператора абонентом является загорание лампочки и включение звонка на пульте радиозула.

Технические характеристики. Пульт П-59 и каждый блок П-60 имеет шесть входов для подключения источников сигнала:

а) два микрофонных входа с номинальным входным напряжением $1 \pm 0,2$ мВ и $R_{вх.}$ не менее 1 кОм;

б) вход проигрывателя с номинальным входным напряжением 250 ± 50 мВ при $R_{вх.}$ не менее 500 кОм;

в) вход магнитофона с номинальным входным напряжением 250 ± 50 мВ при $R_{вх.}$ не менее 10 кОм;

г) вход радиоприемника с номинальным входным напряжением 250 ± 50 мВ при $R_{вх.}$ не менее 10 кОм;

д) вход трансляции с номинальным входным напряжением 10 ± 2 мВ при $R_{вх.}$ не менее 6 кОм.

Усилительный тракт пульта П-59 и блоков П-60 имеет два выхода: основной с номинальной выходной мощностью 20 Вт (30 В на нагрузке 45 Ом) и линейный выход с выходным напряжением 250 ± 50 мВ на нагрузке 10 кОм.

Тракт связи пульта П-59 имеет номинальную выходную мощность 0,25 Вт при нагрузке, равной 8 Ом.

Усилительный тракт имеет диапазон частот от 80 до 12500 Гц с неравномерностью частотной характеристики не более 6 дБ при нулевых положениях регуляторов тембра.

Тракт связи пульта П-59 имеет диапазон частот от 300 до 6000 Гц со спадом частотной характеристики 7 ± 3 дБ в начале диапазона.

Регуляторы тембров низких и высоких частот обеспечивают плавную регулировку частотной характеристики в пределах 16 дБ на частотах 100 Гц и 1000 Гц.

Глубина регулировки выходного уровня по отношению к номинальной мощности:

- по усилительному тракту не менее 30 дБ;
- по тракту связи не менее 12 дБ.

Коэффициент гармоник:

- по усилительному тракту не более 3 %;
- по тракту связи не более 5 % во всем диапазоне частот и номинальной мощности.

Напряжение помехи на выходе усилителя:

- по усилительному тракту не более 300 мВ;
- по тракту связи не более 14 мВ.

Радиоузел имеет звуковой контроль транслируемых программ.

Радиоузел имеет световую сигнализацию включения пульта П-59 в сеть переменного тока.

Радиоузел имеет световую и звуковую сигнализацию вызова абонентом оператора пульта П-59.

Радиоузел имеет выход *Магн. запись* для записи разговора оператора радиоузла с абонентом с выходным напряжением 250 ± 50 мВ при нагрузке, равной 10 кОм.

Питание радиоузла осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В частотой 50 Гц.

Устройство, назначение и работа радиоузла РУШ-1-30 и его составных частей. Радиоузел сельских школ РУШ-1-30 может выполнять следующие функции:

а) усиление речевых музыкальных программ, оповещение, музыкальное сопровождение уроков пения и т. д.;

б) переключение программ абонентов по внешним линиям;

в) обеспечение двухсторонней громкоговорящей связи между оператором радиоузла и абонентом.

Радиоузел конструктивно оформлен в виде настольного прибора и имеет блочную конструкцию.

Пульт П-59 и блоки П-60, установленные друг на друга, образуют единую конструкцию. Они имеют одинаковые кожухи, в которых есть вентиляционные отверстия, вкладыши,

позволяющие зафиксировать положение блоков П-60 и пульта П-59 между собой.

Пульт П-59 конструктивно отличается от блоков П-60 наличием в нем тракта связи и соответствующих ему органов управления.

Органы управления пульта П-59 и блоков П-60, несущие одни и те же функции, расположены одинаково на лицевых панелях. Все необходимые при работе с радиоузлом органы управления вынесены на передние панели пульта П-59 и блоков П-60.

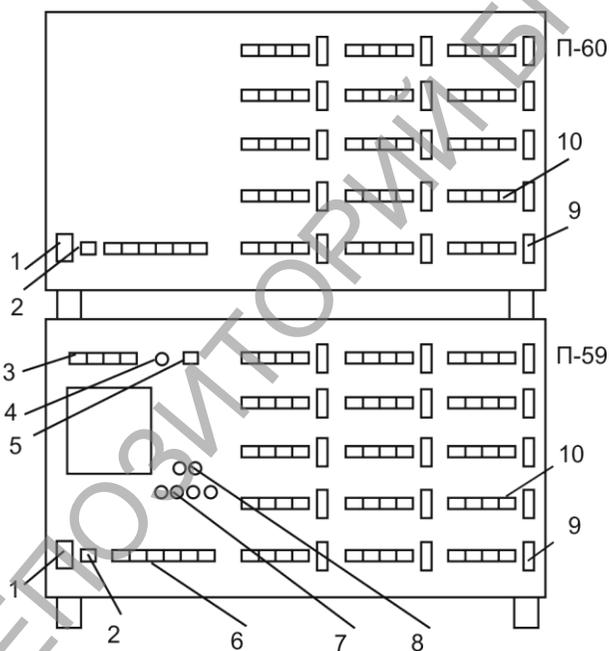


Рис. 3

На передней панели пульта П-59 (рис. 3) расположены:
а) переключатель контролируемых программ – для переключения контрольного громкоговорителя на контролируемую программу или громкоговорящую связь;

б) регулятор громкости контролируемой программы и связи;

в) кнопка *Связь* – для обеспечения превосходства оператора в связи;

г) регуляторы уровня – для регулировки напряжения сигнала в линиях;

д) регуляторы тембра низких и высоких частот;

е) переключатель входов – для подключения нужного источника сигнала к усилительному тракту пульта П-59;

ж) переключатель абонента – для подключения абонента на нужную программу или связь;

з) сигнальная лампочка абонента – для световой индикации вызова абонента оператором;

и) кнопка *Сеть* – для включения пульта П-59 в сеть переменного тока;

к) сигнальная лампочка *Сеть* – световая индикация включения пульта П-59.

На рис. 3 цифрами обозначены:

1 – сигнальная лампочка *Сеть*;

2 – кнопка *Сеть*;

3 – переключатель контролируемых программ;

4 – регулятор громкости связи и контролируемой программы;

5 – кнопка *Связь*;

6 – переключатель входов;

7 – регуляторы уровня;

8 – регуляторы тембра (НЧ и ВЧ);

9 – сигнальная лампочка абонента;

10 – переключатель абонента.

На задней панели пульта П-59 расположены:

а) гнездо *Программы* – выход для подключения линий к распределительному устройству;

б) гнездо *Связь* – выход для подключения абонентских линий связи к устройству распределительному;

в) гнездо *Ш12* – для подключения межблочного кабеля;

г) гнезда *Входы* – для подключения источников сигнала;

д) гнездо *Магн. запись* – для подключения магнитофона на запись сообщений по линии связи;

е) предохранитель *2А* – защита усилителя мощности;

ж) предохранитель *2А* – сетевой предохранитель;

з) гнездо *Лин. выход* – для подключения блока П-60;

и) клемма *Корпус* – для заземления прибора;

к) тумблер *Звонок* – для отключения звукового сигнала вызова.

На передних панелях блоков П-60 расположены:

а) регуляторы уровня;

б) регуляторы тембра низких и высоких частот;

в) переключатель входов – для подключения нужного источника сигнала к усилительному тракту блока П-60;

г) переключатели абонентов – для подключения абонента на нужную программу или связь;

д) сигнальные лампочки абонентов – для световой индикации вызова абонентом оператора;

е) кнопка *Сеть* – для включения блока П-60 в сеть переменного тока;

ж) сигнальная лампочка *Сеть* – световая индикация включения блока П-60.

На задней панели блока П-60 расположены:

а) гнездо *Программа* – выход для подключения линий к устройству распределительному;

б) гнездо *Связь* – выход для подключения абонентских линий связи к устройству распределительному;

в) гнездо *Ш12* – для подключения межблочного кабеля;

г) гнезда *Входы* – для подключения источников сигнала;

д) предохранитель *2А* – защита усилителя мощности;

е) предохранитель *2А* – сетевой предохранитель;

ж) клемма *Корпус* – для подключения блока П-60.

Расположение органов управления показано на рис. 1.

В пульте П-59 и блоке П-60 предусмотрена возможность установки индикатора микроамперметра (М476) для контроля уровня выходного напряжения.

Устройства распределительные (каждое устройство ЯГЗ. 393. 005 рассчитано на 15 абонентов) служат для подключения пульта П-59 и блоков П-60 к линиям абонентов. Конструктивно устройство распределительное выполнено в виде отдельного блока. Подсоединенные кабели устройства распределительного заканчиваются вилками РП14-16, предназначенными для подключения устройства к пульту П-59 или блоку П-60.

Система акустическая 4АС-3 выполнена в виде отдельного блока. Внутри корпуса системы расположены головка динамическая 4ГД-35 и согласующий трансформатор.

Устанавливается система акустическая 4АС-3 в классном помещении и соединяется с устройством распределительным двухпроводной линией согласно схеме электрической принципиальной (приложения 1, 2, 3).

Пульт ПС-9 предназначен для вызова абонентом оператора радиоузла и обеспечения двусторонней симплексной связи с ним.

Конструктивно пульт связи выполнен в виде отдельного блока. На передней панели пульта ПС-9 расположена кнопка вызова оператора радиоузла. Внутри пульта ПС-9 расположена головка динамическая 1ГД-50 с радиоэлементами схемы.

Пульты ПС-9 устанавливаются в классных помещениях и соединяются с устройством распределительным двухпроводной линией согласно электрической принципиальной схеме.

Выполнение работы

Упражнение 1. Изучение трансляционной установки ТУ-100М.

1. Изучите общую функциональную схему радиоузла.

2. Подготовьте радиоузел к работе, для чего выполните соответствующие соединения приемника, усилителя, антенного и линейного щитков, магнитофона, микрофона и нагрузки согласно функциональной схеме.

3. Проведите трансляцию радиопередачи с приемника через основной усилитель (на линейном щитке все линии подключите к основному усилителю согласно заданию):

- подключите вход предварительного усилителя к основному выходу приемника (переключатель *Род работы* установите в положение *ПР.1*);
- подключите контрольный громкоговоритель к выходу основного усилителя (переключатель *Контроль передачи* установите в положение *МБ1*);
- прибор-индикатор подключите к выходу основного усилителя (переключатель *Контроль* установите в положение *Вых. М*);
- включите приемник «Казахстан» (тумблеры *Сеть* и *Анод* установите в положение *Вкл.*);
- настройте приемник на станцию и отрегулируйте необходимую громкость приемника по контрольному громкоговорителю.

Для чего:

- подключите контрольный громкоговоритель к выходу приемника (переключатель *Контроль передачи* установите в положение *Приемник*);
- фиксатор приемника установите в верхнее положение, ручкой *Диапазоны* включите необходимый диапазон, после чего ручку фиксатора установите в нижнее положение;
- ручку *Громкость* установите в среднее положение;
- ручкой *Настройка* настройте приемник на станцию;
- ручкой *Громкость* отрегулируйте необходимую громкость приемника (громкость должна быть минимальной);
- подключите контрольный громкоговоритель к выходу основного усилителя (переключатель *Контроль передачи* установите в положение *МБ1*);
- включите сеть основного усилителя (тумблер *Сеть МБ1* установите в положение *Вкл.*);
- прибором-индикатором проверьте все напряжения основного усилителя (переключать *Контроль* поочередно установите в положения *МБ1 сеть, МБ1 анод, МБ1 экран*);

- отрегулируйте громкость и тембр усилителя (ручкой *Зс* отрегулируйте необходимую громкость, а ручками *Высокие* и *Низкие* отрегулируйте необходимый тембр).

4. Проведите трансляцию грамзаписи через дополнительный усилитель:

- на линейном щитке все линии подключите к дополнительному усилителю согласно заданию;
- подключите вход предварительного усилителя к звукоснимателю;
- подключите прибор-индикатор к выходу дополнительного усилителя;
- подключите контрольный громкоговоритель к выходу дополнительного усилителя;
- включите сеть дополнительного усилителя;
- проверьте прибором-индикатором все напряжения дополнительного усилителя;
- включите проигрыватель;
- отрегулируйте громкость и тембр звукового сигнала.

5. Проведите трансляцию с микрофона через основной и дополнительный усилители:

- на линейном щитке распределите нагрузку равномерно на оба усилителя согласно заданию;
- подключите прибор-индикатор к выходу основного усилителя;
- подключите контрольный громкоговоритель к выходу дополнительного усилителя;
- включите сеть обоих усилителей;
- прибором-индикатором проверьте все напряжения обоих усилителей;
- отрегулируйте громкость передачи с микрофона.

6. Проведите трансляцию с магнитофона через основной усилитель:

- на линейном щитке все линии подключите к основному усилителю согласно заданию;

- подключите вход предварительного усилителя к выходу магнитофона;
- подключите прибор-индикатор к выходу основного усилителя;
- подключите контрольный громкоговоритель к выходу основного усилителя;
- включите сеть основного усилителя;
- прибором-индикатором проверьте все напряжения основного усилителя;
- включите магнитофон и отрегулируйте его громкость;
- отрегулируйте громкость и тембр звукового сигнала.

7. Проведите комбинированную трансляцию грамзаписи с микрофона одновременно через основной и дополнительный усилители:

- на линейном щитке распределите нагрузку равномерно на оба усилителя согласно заданию;
- подключите вход предварительного усилителя к звукоснимателю;
- подключите прибор-индикатор к выходу дополнительного усилителя;
- подключите контрольный громкоговоритель к выходу основного усилителя;
- включите сеть обоих усилителей;
- проверьте прибором-индикатором все напряжения обоих усилителей;
- включите проигрыватель и отрегулируйте громкость грамзаписи;
- отрегулируйте громкость передачи с микрофона.

Упражнение 2.

1. Изучение радиоузла РУШ-1-30.

Радиоузел в зависимости от вариантов исполнения может обеспечивать:

- РУШ-1-15 – одной (первой) программой любого из 15-ти абонентов;

- РУШ-1-30 – первой или второй программой любого из 30-ти абонентов;
- РУШ-1-45 – первой, второй или третьей программой любого из 45-ти абонентов.

При этом количество абонентов, обслуживаемых одной программой, должно быть не более 15-ти. Первая программа в любом варианте исполнения обеспечивается пультом П-59, вторая – первым блоком П-60, третья – вторым блоком П-60.

2. Обеспечение абонентов первой программы.

2.1. Включите пульт П-59 в сеть.

2.2. Нажмите кнопку *Сеть*, при этом на пульте П-59 должна загореться сигнальная лампочка.

2.3. Нажмите соответствующие кнопки переключателя входов, подключив нужные источники сигнала к входу усилителя.

Усилительный тракт допускает работу от одного до четырех источников программы.

В этом случае все источники программ подключаются к соответствующим входам. Уровни передачи подбираются заранее или в самом начале работы и в дальнейшем остаются прежними. Если необходимо временно включить один из входов, то выводится его индивидуальный регулятор уровня. Если микрофоны установлены в помещении радиузла, то необходимо на время работы исключить звуковой сигнал вывода абонента. Для этого необходимо разорвать цепь питания звонка тумблера, установленного на задней панели пульта П-59.

2.4. Нажмите кнопку *1* на переключателе контроля программ, тем самым подключив контрольный громкоговоритель к первой программе.

2.5. Установите регулятор уровня *Контроль* в крайнее правое положение.

2.6. Установите регулятором уровня данного входа нужную громкость, ориентируясь по контрольному громкоговорителю.

2.7. Отрегулируйте тембр звучания при помощи регуляторов тембра.

2.8. Подключите абонентов к выходу оконечного усилителя. Для этого получите заявки от абонентов по переговорному устройству, затем нажмите кнопку 1 переключателя *Программа* соответствующего абонента. К линии должно быть подключено не более 15-ти абонентов с суммарной мощностью не более 20 Вт.

3. Обеспечение абонентов второй программы.

3.1. Повторите пункты 2.1–2.2 упражнения 2 для блока П-60.

3.2. Нажмите кнопку 2 на переключателе контроля программы пульта П-59, подключив тем самым контрольный громкоговоритель ко второй программе.

3.3. Повторите пункты 2.5–2.7 упражнения 2.

3.4. Подключите абонентов к выходу конечного усилителя. Для этого получите заявки от абонентов, затем нажмите кнопку 2 переключателя программ соответствующего абонента. К линии должно быть подключено не более 15-ти абонентов с суммарной мощностью не более 20 Вт.

4. Использование линейного выхода.

4.1. Подключите источник сигнала к пульту П-59.

4.2. Соедините гнездо *Лин. выход* пульта П-59 с входом *Приемн.* или *Магн.* блока П-60, если число абонентов равно 30-ти; если число абонентов равно 45-ти, соедините гнездо *Лин. выход* первого блока П-60 с входом *Приемн.* или *Магн.* второго блока П-60.

4.3. Нажмите кнопки соответствующих входов на пульте П-59 и блока П-60 и отрегулируйте уровень сигнала на выходе каждого блока. Порядок регулировки не отличается от порядка, изложенного выше. Подключите абонентов пульта П-59 нажатием кнопки 1 переключателя *Программа*, блоков П-60 соответственно нажатием кнопок 2 и 3 переключателя *Программа*.

Сделайте вывод по лабораторной работе:

- О назначении радиоузлов ТУ-100М и РУШ-30-1.



Контрольные вопросы

1. Для чего предназначены радиоузлы?
2. Нарисуйте функциональную схему радиоузла РУШ-30-1.
3. Каково назначение линейного щитка?
4. Сколько входов имеет усилитель мощности?



Литература

1. Ворсин, Н.Н. Основы радиоэлектроники / Н.Н. Ворсин, М.Н. Ляшко. – Минск, 1992. – С. 144–154.
2. Ляшко М.Н. Радиотехника: лаб. практикум / М.Н. Ляшко. – Минск, 1981. – Работа 13. – С. 156–170.

РЕПОЗИТОРИЙ ВГУ

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	3
Лабораторная работа 1	
РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ.....	4
⊖ Контрольные вопросы	12
📖 Литература.....	12
Лабораторная работа 2	
ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК RC-ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ	13
⊖ Контрольные вопросы	22
📖 Литература.....	22
Лабораторная работа 3	
ФИЛЬТРУЮЩИЕ СВОЙСТВА КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ КОНТУРОВ	23
⊖ Контрольные вопросы	32
📖 Литература.....	32
Лабораторная работа 4	
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА	33
⊖ Контрольные вопросы	40
📖 Литература.....	40
Лабораторная работа 5	
ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА	41
⊖ Контрольные вопросы	48
📖 Литература.....	48
Лабораторная работа 6	
УСИЛИТЕЛЬ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ.....	49
⊖ Контрольные вопросы	60
📖 Литература.....	60

Лабораторная работа 7	
ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ.....	61
⊖ Контрольные вопросы.....	72
📖 Литература.....	73
Лабораторная работа 8	
РАСЧЕТ ОДНОТАКТНОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО ВЫХОДНОГО КАСКАДА	
УСИЛИТЕЛЯ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ	74
⊖ Контрольные вопросы.....	83
📖 Литература.....	83
Лабораторная работа 9	
ГЕНЕРАТОРЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ	84
⊖ Контрольные вопросы.....	95
📖 Литература.....	95
Лабораторная работа 10	
АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ	96
⊖ Контрольные вопросы.....	103
📖 Литература.....	103
Лабораторная работа 11	
ПРИЕМНИК ПРЯМОГО УСИЛЕНИЯ НА ТРАНЗИСТОРАХ.....	104
⊖ Контрольные вопросы.....	110
📖 Литература.....	110
Лабораторная работа 12	
ИЗУЧЕНИЕ ТРАНСЛЯЦИОННЫХ УСТАНОВОК ТУ-100М И РУШ-1-30	111
⊖ Контрольные вопросы.....	129
📖 Литература.....	129

Учебное издание

Саечников Константин Алексеевич
Вилькоцкий Марат Антонович
Юргульский Владимир Викторович

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

Лабораторный практикум

Редактор ??????????????????

Оригинал-макет ????????????

Подписано в печать . .2011. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Гарнитура *Arial*. Печать Riso. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. .
Тираж экз. Заказ .

Учреждение образования «Белорусский государственный
педагогический университет имени Максима Танка»
Лицензия ЛП № 486 от 02.04.02.
220007, Минск, Могилевская, 37.