

Ворсин Н.Н.



«Основы радиоэлектроники»  
(лабораторный практикум)

---

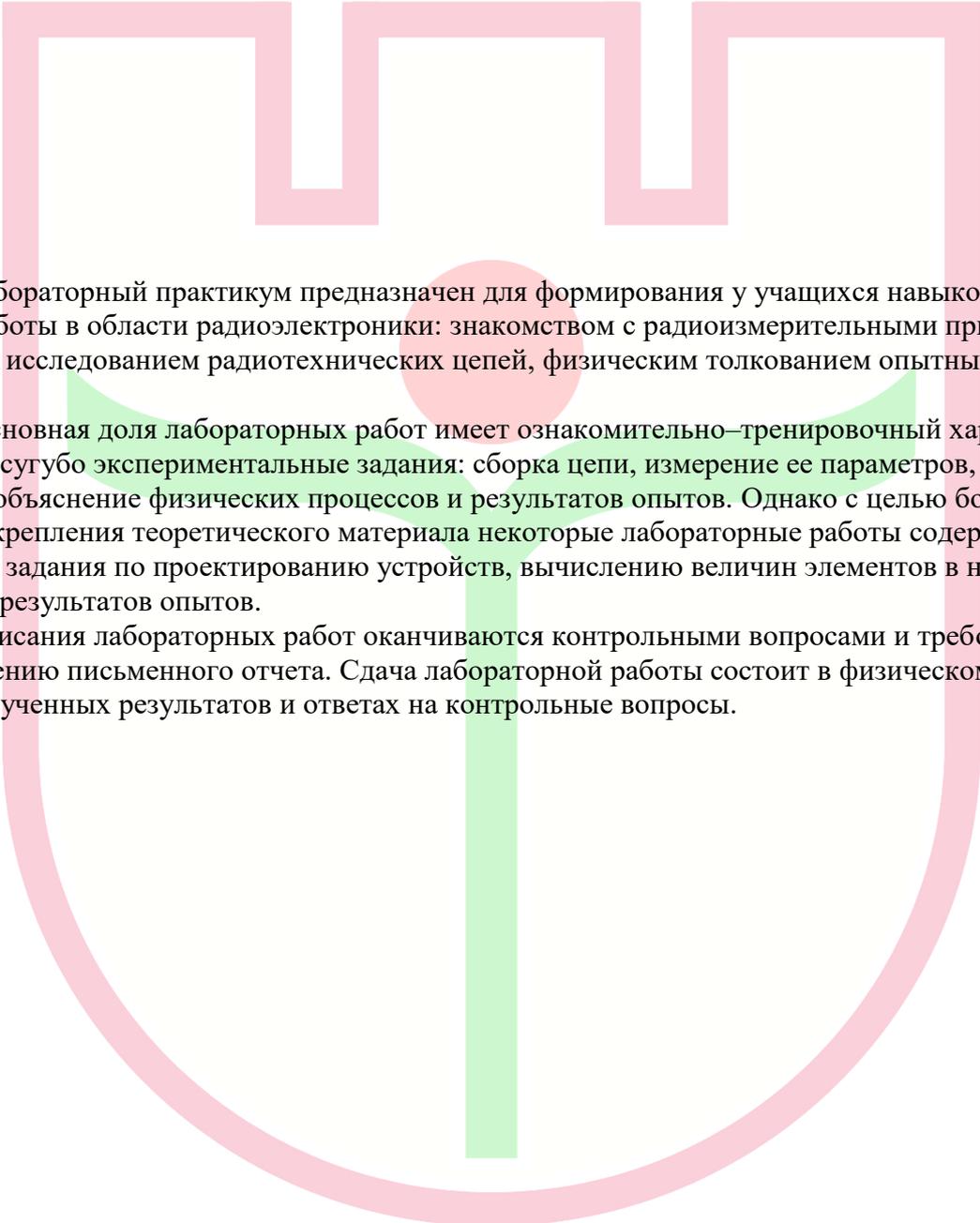
*Рекомендовано кафедрой методики преподавания физики и ОТД  
в качестве учебного электронного учебного пособия  
для студентов физического факультета БрГУ*

Брест

Учреждение образования Брестский государственный университет им. А.С.Пушкина  
2009 г.

УДК 621.396 1  
ББК 32.841

Рецензент: д-р физико-математических наук, проф., декан физического факультета БрГУ им. А.С.Пушкина Плетюхов В.А.



Лабораторный практикум предназначен для формирования у учащихся навыков практической работы в области радиоэлектроники: знакомством с радиоизмерительными приборами, сборкой и исследованием радиотехнических цепей, физическим толкованием опытных результатов.

Основная доля лабораторных работ имеет ознакомительно–тренировочный характер и содержит сугубо экспериментальные задания: сборка цепи, измерение ее параметров, качественное объяснение физических процессов и результатов опытов. Однако с целью более глубокого закрепления теоретического материала некоторые лабораторные работы содержат инженерные задания по проектированию устройств, вычислению величин элементов в них, предсказанию результатов опытов.

Описания лабораторных работ оканчиваются контрольными вопросами и требованиями к оформлению письменного отчета. Сдача лабораторной работы состоит в физическом толковании полученных результатов и ответах на контрольные вопросы.

## Оглавление

Лабораторная работа №1 Знакомство с радиоизмерительными приборами, изучение полупроводниковых диодов. ....	4
Лабораторная работа №2. Изучение транзисторов. ....	10
Лабораторная работа №3. "Изучение принципа построения усилительных каскадов.....	16
Лабораторная работа №4. "Расчет сборки и исследование транзисторного усилительного каскада сигналов переменного напряжения. ....	21
Лабораторная работа №5. Изучение Эмиттерных повторителей .....	26
Лабораторная работа №6. Построение и исследование усилителя мощности сигналов звуковых частот .....	29
Лабораторная работа № 7 Изучение операционного усилителя.....	33
Лабораторная работа № 8.Построение усилительных устройств на основе операционного усилителя.....	35
Лабораторная работы № 9.Генерирование электрических колебаний(RC-автогенераторы) ...	37
Лабораторная работа № 10.Генерирование электрических колебаний (LC-автогенераторы) .	42
Лабораторная работа № 11. Изучение частотных фильтров .....	48
Лабораторная работа № 12. Изучение принципа работы и применений двухбалансных перемножителей сигнальных напряжений .....	54

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 ЗНАКОМСТВО С РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ПРИБОРАМИ, ИЗУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ.

*Цель работы:* Ознакомление с радиоизмерительными приборами на примере исследования вольтамперных характеристик (ВАХ) полупроводниковых диодов; изучение конструктивных оформлений п/п диодов, физическое толкование полученных ВАХ, приобретение первичных навыков сборки и исследования радиотехнических цепей.

*Приборы и оборудование:* двухлучевой осциллограф С1-96, генератор низкочастотных колебаний ГЗ-112 (ГЗ-118), макетная панель, набор диодов (вентильный, стабилитрон, туннельный, светодиод, фотодиод), источник света (настольная лампа), паяльник, соединительные провода.

### Введение

Радиотехнические цепи осуществляют преобразования электрических сигналов. Для исследования свойств таких цепей необходимы приборы, моделирующие электрические сигналы и приборы, позволяющие измерять параметры сигналов. Для моделирования сигналов созданы различные генераторы сигналов. На рабочем месте установлен один из таких приборов – генератор синусоидального сигнала низкой частоты ГЗ-112 или ГЗ-118. Первый из них (ГЗ-112) вырабатывает синусоидальный сигнал с частотой, которую можно выбрать в диапазоне 10 Гц – 10 МГц. Вторым (ГЗ-118) является низкочастотным и вырабатывает синусоидальный сигнал в диапазоне частот от 0.1 Гц до 200 КГц. Синусоидальные сигналы характеризуются двумя основными параметрами: частотой и амплитудой.

Частота сигнала генератора ГЗ-112 устанавливается двумя регуляторами: переключате-



лем диапазона «множитель», который имеет значения 1, 10, 100,  $10^3$ ,  $10^4$ ,  $10^5$ , и плавным регу-

лятором от 10 до 100. Если плавный регулятор установлен в положение 53, а множитель – в положение 100, то частота вырабатываемого сигнала равна 5300 Гц.

Частота сигнала, вырабатываемого генератором ГЗ-118, набирается тремя декадными переключателями. Запятая отделяет целую часть значения частоты от дробной на первом диапазоне (множитель =1). Если переключатель «множитель» находится в положении 10, 100, 1000, то запятую в числе, выражающем значение частоты необходимо мысленно передвинуть вправо на соответствующее число разрядов. Если, к примеру, набрано 53,7 и множитель находится в положении 10, то частота вырабатываемого сигнала равна 537 Гц.

Амплитуда сигнала, вырабатываемого обоими генераторами, регулируется двумя регуляторами: плавным и ступенчатым. Ввиду того, что индикатора амплитуды выходного сигнала генераторы не имеют, плавный регулятор обычно устанавливают в крайнее правое положение, соответствующее максимуму амплитуды. При этом амплитуда выходного сигнала в положении максимума ступенчатого регулятора (0 дБ) будет равна 15 В. От данной величины можно ступенчато уменьшать амплитуду на 10, 20 и т.д. децибел. Увеличение на 10 дБ затухания, вносимого ступенчатым регулятором, уменьшает амплитуду выходного сигнала в  $\sqrt{10} \approx 3.16$  раза, соответственно 20-ти децибельное затухание означает уменьшение амплитуды в 10 раз и т.д. Таким образом, можно получить ряд известных значений амплитуды выходного сигнала генератора 15, 4.7, 1.5, 0.47, 0.15, 0.047, 0.015, 0.0047, 0.0015 В. Если плавный регулятор амплитуды находится не в максимальном положении, то точная величина амплитуды выходного сигнала неизвестна.

Сигнал, вырабатываемый генератором, выдается им стандартный на выходной разъем, находящийся в правой нижней стороне лицевой панели. Для подключения к этому разъему имеется стандартный кабель. Генератор ГЗ-118 имеет два выходных разъема, из которых разъем с отметкой  $5\Omega$  отключен от ступенчатого регулятора амплитуды и нами использоваться не будет.

***Рассмотрите имеющийся на рабочем месте генератор сигналов. Включите вилку питания в сеть и тумблер питания в положение «вкл». Потренируйтесь выставлять органами управления заданные значения частоты и амплитуды вырабатываемого сигнала.***

Очень удобным и важным прибором визуализации электрических сигналов является осциллограф. Он позволяет получить на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) различные сигнальные графики. Наиболее важным является график зависимости сигнального напряжения от времени, называемый осциллограммой сигнала. На рабочем месте установлен двулучевой осциллограф С1-96, с которым необходимо доскональное знакомство.

Электронный пучок (луч) в ЭЛТ создает на ее экране светящееся пятнышко, которое является окончанием электронного луча и зачастую называется «луч». Воздействуя на электронный пучок электрическим полем отклоняющих пластин, которые входят в ЭЛТ, можно перемещать луч по экрану. Ввиду того, что электронный луч, практически безинерционен, эти перемещения можно осуществлять с огромной скоростью и благодаря послесвечению люминофора экрана видеть траекторию перемещения луча.

ЭЛТ имеет две пары отклоняющих пластин. Одна пара Х-пластины отклоняет электронный луч по горизонтали, другая пара Y-пластины отклоняет по вертикали. Для получения графика зависимости от времени сигнального напряжения его прикладывают к Y-пластинам, а на X-пластины подают напряжение, линейно изменяющееся во времени. При этом луч на экране ЭЛТ будет равномерно перемещаться по горизонтали, совершая одновременно перемещения по вертикали под действием сигнального напряжения. В результате на экране прорисовывается график зависимости сигнального напряжения от времени на интервале перемещения луча от левой границы экрана до правой. В дальнейшем необходимо повторять цикл изображения графика на экране, причем для исследования периодических сигналов необходимо обеспечить совпадение графиков всех циклов. При этом на экране будет изображена четкая неподвижная осциллограмма сигнала.

Процесс равномерного перемещения луча на экране ЭЛТ по горизонтали называют разверткой осциллограмм. Если в ходе развертки в направлении оси Y не действует сигнальное напряжение, на экране прорисовывается горизонтальная линия, называемая линией развертки.



**Включите вилку питания осциллографа в сеть. Нажмите кнопку включения осциллографа, которая находится в левом нижнем углу лицевой панели. Через некоторое время, необходимое для разогрева катода ЭЛТ, на экране появятся две светящиеся горизонтальные линии развертки.**

Наличие двух линий обусловлено тем, что используемые осциллографы имеют двулучевые ЭЛТ, которые позволяют строить на экране одновременно две осциллограммы при общей развертке. Органы управления электронными пучками в ЭЛТ позволяют регулировать яркость осциллограмм и качество фокусировки лучей на экране (регуляторы «фокус» и «астигматизм»). Данные регуляторы (6 шт.) расположены слева от экрана и образуют вертикальный ряд регуляторов под названием «Луч». **Манипулируя ими, установите удобную яркость линий развертки и минимальную их толщину.**

В правой верхней части лицевой панели находятся регуляторы под названием «Развертка» и «Синхронизация». Основным регулятором развертки – поворотный переключатель «Время/дел», который определяет скорость движения луча по экрану при развертке осциллограмм. Как видно из надписей на шкале данного регулятора, можно задавать скорость развертки в очень широких пределах: от 50 ms/дел до 0.01 mks/дел. (Деление – это большая сантиметровая клетка на экране). **Переключите регулятор скорости на минимум - 50 ms/дел и посмотрите, как движутся по экрану светящиеся точки, затем увеличивайте скорость развертки, наблюдая, как сливается в линии движение светящихся точек.** Поверх переключателя скорости развертки имеется плавный регулятор скорости, который используется очень редко. Рабочее положение этого регулятора – крайнее по часовой стрелке. Данное положение фиксируется легкой защелкой.

Слева от регулятора скорости развертки имеется кнопочный переключатель типа развертки. Мы будем использовать автоматическую развертку «Авт», соответствующая кнопка должна быть нажата.

Справа от регулятора скорости установлена кнопка «растяжка», совмещенная с плавным регулятором положения осциллограмм по горизонтали. Основное положение этой кнопки – нажатое. В данном положении скорость развертки соответствует делениям на шкале регулятора скорости. Если кнопка «растяжка» находится в отжатом состоянии, то скорость развертки увеличивается в 5 раз. Регулятор положения осциллограммы по горизонтали позволяет совмещать нужный участок осциллограммы с сеткой на экране и упрощать измерения параметров иссле-

дуемых сигналов. **Поворачивая данный регулятор, проследите, как перемещаются по экрану линии развертки.**

Получение на экране четких неподвижных осциллограмм невозможно без синхронизации развертки исследуемым сигналом. Процесс синхронизации организуется следующим образом. После каждого цикла развертки электронный луч на экране возвращается в крайнее левое положение и останавливается там, ожидая синхросигнала. Новый цикл развертки начинается только при получении синхросигнала от узла синхронизации. Данный узел имеет два регулятора: плавный регулятор «Уровень» и переключатель источника синхронизации. В качестве источника синхронизации может быть выбран исследуемый сигнал, поданный на вход Y1 или Y2 или внешний сигнал, поданный на клемму внешней синхронизации. Регулятор «Уровень» определяет уровень напряжения, при переходе через который изменяющегося сигнального напряжения узел синхронизации вырабатывается синхросигнал, запускающий цикл развертки.

В правой нижней части лицевой панели расположены органы управления усилителями исследуемых сигналов и входные разъемы для них. Каждый из усилителей сигнала вертикального отклонения имеет регулятор смещения осциллограммы по вертикали, переключатель входа « $\approx \perp \sim$ » и регулятор коэффициента отклонения по вертикали. Переключатель входа передает на усилитель вертикального отклонения либо весь сигнал, поданный на входной разъем -  $\approx$ , либо только переменную составляющую этого сигнала -  $\sim$ , либо ничего не передает, отключая усилитель от входного разъема -  $\perp$ . Мы, как правило, будем работать с полной передачей сигнала, соответствующей положению  $\approx$ .

**Проверьте, как действует регулятор смещения осциллограмм по вертикали. Обратите внимание на то, что оба регулятора смещения осциллограмм (по горизонтали и вертикали) позволяют увести электронный луч с экрана, что может привести к потере осциллограммы и необходимости поиска ее данными регуляторами.**

Регулятор коэффициента отклонения по вертикали состоит из двух частей – переключателя и плавного регулятора. Плавный регулятор используется очень редко и должен находиться в положении максимума, где он фиксируется защелкой. В этом случае коэффициент отклонения будет соответствовать установленному ступенчатому регулятором по его шкале «Вольт/дел». Имеется в виду большое сантиметровое деление на экране.

При подключении к Y-входам осциллографа соединительных кабелей бывает необходимо определить, какой из противоположных выводов кабеля является сигнальным, а какой общим. Это можно сделать, берясь рукой за один из выводов кабеля. Касание к сигнальному выводу приводит к увеличению (через ваше тело) емкостной связи входа Y с сетевыми проводами и вызовет значительное расширение по вертикали изображения на экране, а касание к выводу общего провода – напротив – к сужению изображения. **Проделайте этот опыт с кабелями, подключенными к входам Y1 и Y2.**

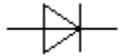
**Подайте на какой-либо вход осциллографа от генератора сигнал с произвольной частотой и амплитудой. Получите на экране четкую неподвижную осциллограмму этого сигнала. Используя известные скорость развертки и коэффициент отклонения по вертикали, определите по осциллограмме период и амплитуду сигнала. Сравните полученные значения с установками генератора, различия не должны быть большими.**

Помимо режима осциллографирования, дающего графики временной зависимости сигнальных напряжений, осциллограф С1-96 может обеспечивать режим графопостроителя, дающий график зависимости одного сигнального напряжения от другого. Этот режим также будет часто использоваться нами. В частности, сегодня при изучении полупроводниковых диодов для получения графиков их вольтамперных характеристик (ВАХ). **В режиме графопостроителя один из входов Y осциллографа переключается и выполняет функцию входа X. Выбор данного входа осуществляется кнопкой Y1 или Y2 на панели «Синхронизация». Соответствующий луч должен быть погашен регулировкой его яркости. Для перевода осциллографа в режим графопостроителя необходимо нажать кнопку «Усил. X» на панели «Синхрониза-**

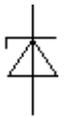
ция, отжать кнопку «Растяжка» и регулятором смещения по горизонтали вывести луч на экран.

Диодами называют электронные приборы, имеющие два вывода для подключения к электрической цепи. Полупроводниковые диоды часто представляют собой р-п- переход, заключенный в корпус с двумя выводами. Принципиальная и конструктивная одинаковость п/п диодов не препятствует многообразию их свойств и способов применения. В настоящей работе рассматриваются следующие п/п диоды:

1. **Выпрямительные диоды (вентили)** используются для преобразования переменного напряжения (тока) в постоянное. Это преобразование называют выпрямлением напряжения (тока). Выпрямительные диоды должны обладать, возможно, большей величиной пробивного напряжения и допускать большой прямой ток (ток в направлении пропускания). Для увеличения пробивного напряжения концентрация примесей в р или п областях делается небольшой, что приводит к большой толщине р-п-перехода. Достижению больших значений прямого тока способствует увеличение площади перехода, изготавливаемого путем диффузии примеси в исходный кристалл-базу. Корпуса маломощных выпрямительных диодов делаются из пластика, а мощных - из металла с возможностью крепления их на теплоотвод. Условное обозначение имеет вид



2. **Стабилитроны и стабилсторы** - это п/п диоды, предназначенные для стабилизации напряжения. Стабилитроны работают в области электрического пробоя р-п-перехода, стабилсторы - при прямом токе через них. В обоих случаях используется тот факт, что напряжение на диоде изменяется слабо при сильном изменении тока через него. Низкое напряжение пробоя стабилитронов достигается уменьшением толщины перехода за счет увеличения концентрации примесей (в сравнение с выпрямительными диодами).



3. **Туннельные диоды** имеют настолько высокую концентрацию примесей в р и п областях и как следствие настолько узкий р-п-переход, что становится существенным ток, обусловленный туннельным прохождением носителей через переход. ВАХ туннельного диода имеет "падающий" участок на прямой ветви, что позволяет использовать его как элемент с отрицательным дифференциальным сопротивлением.



4. **Фотодиод и полупроводниковый фотоэлемент** использует внутренний фотоэффект - перевод электронов из валентной зоны в зону проводимости под действием света. При этом В АХ диода смещается "вниз" на величину тока, образованного фотоэлектронами.



5. **Светодиод.** Протекание через р-п-переход прямого тока сопровождается переходом свободных электронов, прошедших через переход, в валентную зону. При этом выделяется разность энергий свободного и валентного электронов. В некоторых случаях эта энергия выделяется в виде светового кванта. Подбором полупроводниковых материалов удается добиться видимого излучения с хорошим КПД.



#### Задания для эксперимента:

В ходе опытов с предложенными диодами необходимо получить на экране осциллографа график ВАХ диодов, перенести ее в отчет и, пользуясь ВАХ, определить заданные параметры

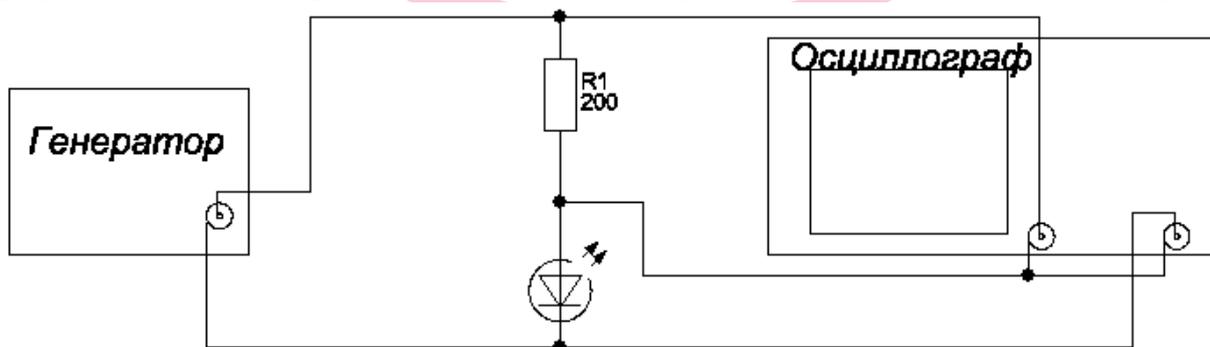


Рис.1.1

диодов. Для получения осциллограммы ВАХ исследуемый диод подключается последовательно с добавочным резистором к источнику переменного напряжения. Под действием переменного напряжения в цепи протекает изменяющийся ток. Напряжение, выделяемое на резисторе и пропорциональное току, подается на вход Y осциллографа, а напряжение с диода - на вход X (рис.1.1). Таким образом, отклонение луча осциллографа по оси X оказывается пропорциональным напряжению на исследуемом диоде, а отклонение по оси Y - току через диод. На экране вычерчивается график ВАХ диода. Необходимо только иметь в виду, что при данном способе ) осциллографирования ось X будет перевернутой (положительное направление - влево) и изменить направление X при перечерчивании ВАХ.

***С помощью паяльника установите на макетной панели резистор R1 и исследуемый диод. Припаяйте выводы кабелей от генератора и осциллографа. Установите амплитуду сигнала генератора  $\approx 4$  В.. Манипулируя органами регулировок осциллографа, получите на экране изображение графика ВАХ.***

Для определения количественных параметров полученных ВАХ необходимо проградуировать оси координат на экране осциллографа, т.е. определить цену деления каждой оси и положение начала координат.

***Точка начала координат определится при нулевой амплитуде переменного напряжения, подаваемого на макет с генератора. Регуляторами перемещения луча осциллографа по вертикали и горизонтали точку начала координат можно установить в любое место экрана.***

Калибровка вертикальной оси (оси тока) не требует дополнительных измерений. Достаточно разделить установленный коэффициент отклонения луча по вертикали на величину добавочного резистора R. Например, если переключатель коэффициента отклонения находится в положении 1 В/деление, то масштаб вертикальной оси будет равен  $(1 \text{ В/дел}) / (200 \text{ Ом}) = 0,005 \text{ А/дел} = 5 \text{ мА/дел}$ .

Горизонтальная ось также не требует калибровки. Если кнопка «Растяжка» отжата, коэффициент отклонения по горизонтали будет соответствовать установленному на переключателе того входа, который используется в роли входа X.

***1. Исследование выпрямительного диода. Установите на измерительную панель выпрямительный диод и, изменяя положение начала координат и амплитуду напряжения генератора, получите на экране удобное для наблюдения изображение ВАХ. Пользуясь графиком ВАХ, определите величину прямого напряжения на диоде, которая условно соответствует прямому току 10 мА, и величину обратного тока - при обратном напряжении - 10 В.***

***2. Исследование стабилитрона. Установите на измерительную панель стабилитрон КС133 или КС433, получите на экране изображение ВАХ, определите величину пробивного напряжения, соответствующего обратному току 1 мА, и дифференциальное сопротивление диода при обратном токе 1 мА и 5 мА.***

***3. Исследование туннельного диода. Установите на измеритель туннельный диод АИ301 и снимите его ВАХ. Используя ВАХ, определите координаты максимума и минимума S-образного участка ВАХ.***

***4. Исследование фотодиода. Получите на экране ВАХ фотодиода ФДЗ. Осветив его с помощью настольной лампы, проследите за изменением ВАХ и опишите это изменение.***

***5. Исследование светодиода. Получите ВАХ светодиода АЛ 103 и отметьте ее отличие от ВАХ выпрямительных диодов.***

### ***Оформление отчета***

Отчет должен содержать название работы, перечень оборудования, схему измерительной цепи и описание ее работы, ВАХ исследуемых диодов и рисунки их конструктивного ис-

полнения, результаты вычисления параметров диодов. **При перерисовывании графиков с экрана осциллографа обязательна градуировка координатных осей на рисунках в тетради.**

### Контрольные вопросы

1. Для чего предназначен лабораторный генератор синусоидальных сигналов. Как установить заданные значения частоты и амплитуды его выходного сигнала?
2. Поясните назначение осциллографа. В чем отличие двухлучевого осциллографа от однолучевого? Как осуществляется построение осциллограмм на экране ЭЛТ? Каким образом с помощью осциллографа можно измерить частоту и амплитуду периодического сигнала? Для чего необходима синхронизация развертки и как она осуществляется?
3. Сформулируйте причину отличия электрических свойств полупроводников от свойств металлов и диэлектриков. Что такое собственная и примесная электропроводность полупроводников, основные и неосновные носители заряда?
4. Опишите процессы в p-n-переходе, выведите формулу ВАХ (формулу Шокли).
5. Какие факторы определяют толщину p-n-перехода (толщину области объемного заряда)? Выведите соответствующую формулу.
6. Какое явление называют пробоем p-n-перехода? Перечислите и опишите известные виды пробоя. В каких диодах используется явление пробоя.
7. Опишите фотоэлектрические явления в p-n-переходе, работу полупроводникового фотоэлемента, фотодиода, светодиода.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. ИЗУЧЕНИЕ ТРАНЗИСТОРОВ.

**Цель работы:** Знакомство с полупроводниковыми приборами – транзисторами, получение и исследование их вольтамперных характеристик (ВАХ), развитие навыков работы с радиоизмерительными приборами.

**Оборудование:** генератор синусоидальных сигналов звуковых частот, осциллограф С1-96, источник питания постоянного напряжения, лабораторный макет для измерения ВАХ, паяльник, соединительные провода, биполярный транзистор p-n-p типа, n-канальный полевой транзистор с затвором в виде p-n перехода.

### Введение

Транзисторы – это полупроводниковые приборы, электропроводность которых можно изменять с помощью электрического сигнала. Как правило, транзисторы являются триодами. Они имеют три электрода, из которых два включаются в цепь, где за счет изменения электропроводности регулируется ток, а оставшийся является

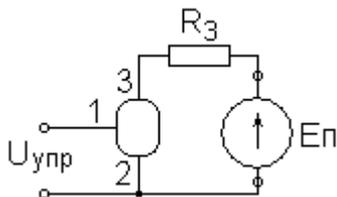


Рис.2.1

управляющим. На рис.2.1 показано обычное включение транзистора в цепь, где  $E_{п}$  - ЭДС источника питания, отдающего электроэнергию потребителю  $R_з$ . Для регулирования тока последовательно с  $R_з$  включен транзистор. Электропроводность транзистора регулируется управляющим напряжением  $U_{упр}$ , которое прикладывается между электродами 1 и 2. Изменяя  $U_{упр}$ , можно изменять ток в цепи источника питания, протекающий через  $R_з$ . Как видно из рисунка 2.1, одна клемма источника питания, клемма источника управляющего напряжения соединяются между собой и с электродом 2 транзистора. Данное соединение образует т.н. общий узел цепи. Соответственно **электрод 2 транзистора называется общим**. Естественно, что **электрод 1 называется управляющим, а электрод 3 – выходным**. Рассмотрим принципы работы некоторых транзисторов.

**Полевой транзистор с затвором в виде p-n-перехода** представляет собой кристалл полупроводника, в котором узкая полоска с электронной проводимостью - канал заключена между областями с дырочной электропроводностью - затвор (рис.2.2). От противоположных сторон канала сле-

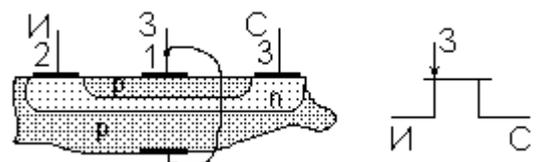
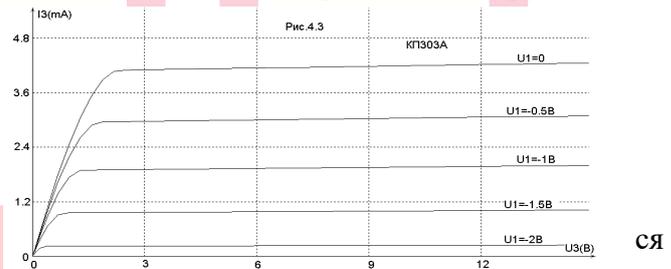


Рис. 2.2

ланы выводы, называемые «исток» и «сток». Регулирование электропроводности канала осуществляется за счет изменения площади его поперечного сечения. При увеличении отрицательного напряжения на затворе по отношению к каналу увеличиваются толщины р-п-переходов затвор-канал, вследствие чего уменьшается толщина канала и его электропроводность. При достаточно большом отрицательном напряжении на затворе происходит смыкание затворных р-п-переходов и полное перекрытие канала. Его электропроводность становится нулевой, что обозначается термином «запирание транзистора».

Вольтамперная характеристика транзистора – это зависимость тока какого-либо электрода от напряжения на этом электроде. Для отсчета напряжений второй электродов объявляется общим. Потенциал общего электрода принимается нулевым, а напряжения на других электродах отсчитываются от него. В данном случае общим электродом принимается исток, а ВВАХ представляет собой зависимость тока стока (электрод 3) от напряжения на нем. Однако ток стока зависит также и от напряжения на затворе (электроде 1):  $I_3=f(U_3, U_1)$ . Поэтому измерение ВАХ осуществляется



при фиксированном значении  $U_1$ :  $I_3=f(U_3)|_{U_1=const}$ . На графике изображается несколько ВАХ, соответствующих разным напряжениям  $U_1$ . На рис.2.3 показаны ВАХ полевого транзистора КП303А. Каждая из кривых ВАХ имеет начальный участок, соответствующий малыми величинам  $U_3$ , и активный участок, когда график идет почти горизонтально. Наличие активного участка обусловлено тем, что напряжение между каналом и затвором вблизи стокового вывода оказывается достаточно большим и вызывает

**Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует. Рис. 2.3**

смыкание затворных р-п-переходов вблизи стокового вывода. Следовательно, появляется зона перекрытого канала, не позволяющая далее увеличиваться стоковому току при возрастании стокового напряжения.

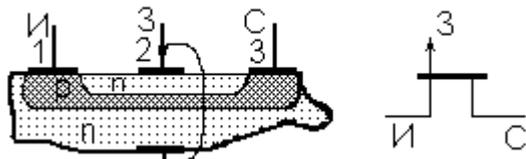


Рис.2.4

транзисторы, структура и условное обозначение которых показано на рис.2.4. Направление стрелки на обозначении затворного р-п-перехода, как обычно, показывает направление пропускания тока переходом. Транзисторы работают при обратном напряжении на затворном переходе, когда он не пропускает ток.

**Полевые транзисторы с изолированным затвором (МОП-транзисторы).** Основой полевого МОП транзистора, структура которого показана на рисунке 2.5, является кристалл кремния с примесной проводимостью р-типа, называемый подложкой. В подложке путем введения избыточного количества донорной примеси созданы две области с высокой проводимостью п-типа. Одна из этих областей называется истоком, другая - стоком. В промежутке между выводами стока и истока на поверхности кристалла располагается слой изолятора (окись кремния), а на нем металлическая пленка, называемая затвором.

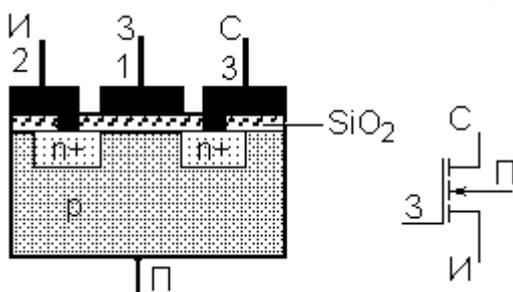


Рис.2.5

Название - МОП транзистор представляет собой перечисление слоев в структуре транзистора: Металл (затвор), окисел (изоляционная пленка), полупроводник. Часто вместо МОП используется буквосочетание МДП, которое расшифровывается как ме-

талл - диэлектрик - полупроводник. Акронимы МОП и МДП сохранились, несмотря на то, что затворы современных транзисторов изготавливаются из полупроводника.

Если выводы истока и стока подключить к источнику питания ( $U_3$ ) так, как это показано на рисунке 2.6, то ток в цепи источника ( $I_3$ ) будет, практически, равен нулю.

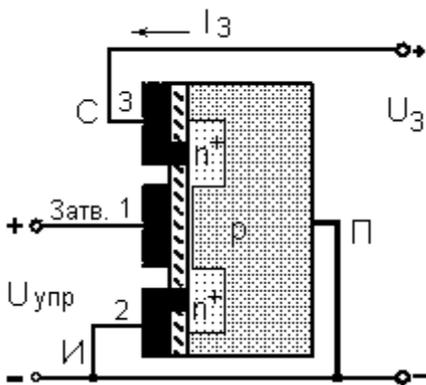


Рис.2.6

При небольших  $U_{упр}$  количество переведенных в подзатворную область электронов невелико, они нейтрализуют часть дырок там и уменьшают проводимость подзатворного слоя. Однако с увеличением  $U_{упр}$  количество свободных электронов в подзатворной области возрастает и это приведет к инверсии типа электропроводности, которая из дырочной превратится в электронную. В результате между областями стока и истока образуется проводящий канал n-типа. Следовательно, в цепи источника питания потечет ток  $I_3$ . Величина управляющего напряжения, при которой в транзисторе начинает появляться проводящий канал, называется пороговым напряжением открывания транзистора. Дальнейшее увеличение  $U_{упр}$  будет приводить к расширению проводящего канала, улучшению его проводимости и увеличению тока  $I_3$ .

Таким образом, проводимость канала сток-исток и величина тока в нем может регулироваться управляющим напряжением  $U_{упр}$ .

В рассмотренном МДП транзисторе электрическое поле затвора индуцирует проводящий канал n-типа. Поэтому такие транзисторы называются n-канальными. Однако, по такому же принципу могут быть сделаны p-канальные транзисторы, структура которых и полярность подключения к источникам питания и управления показаны на рисунке 2.7.

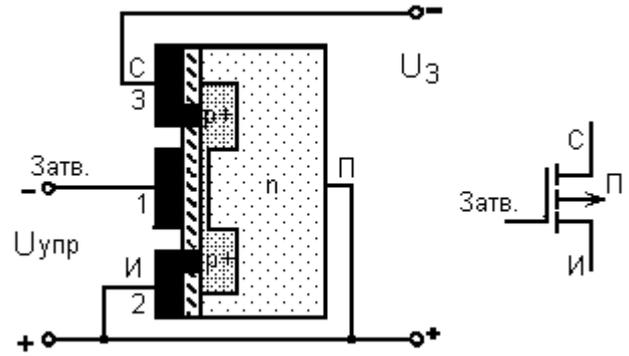


Рис.2.7

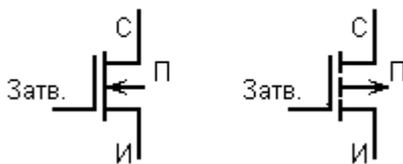


Рис. 2.8

Если при изготовлении МОП транзистора легировать подзатворную область подложки противоположной примесью, получается транзистор с исходно существующим каналом между областями стока и истока. Такие транзисторы называются МОП транзисторами со встроенным каналом. Управляющее напряжение между затвором и подложкой изменяет толщину этого канала и его электропроводность. Условное обозначение транзисторов со встроенным каналом отличается

Если при изготовлении МОП транзистора легировать

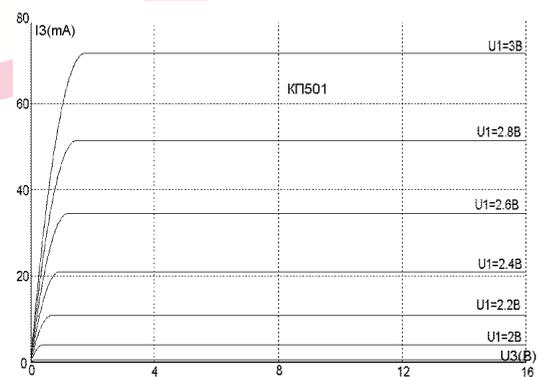


Рис.2.9

от обозначений транзисторов с индуцируемым каналом только сплошной линией, обозначающей канал (Рис.2.8).

Несмотря на коренное отличие принципа работы МОП транзисторов от полевых транзисторов с затвором в виде р-п-перехода их ВАХ сходны по форме. Это объясняется сходством механизмов ограничения тока стока в обоих случаях: увеличение  $U_3$  приводит к сужению канала вблизи стокового вывода и ограничению тока  $I_3$ . На рис.2.9 показаны ВАХ полевого транзистора с изолированным каналом КП501.

**Биполярный транзистор** представляет собой кристалл полупроводника, в котором чередуются три области с различными типами проводимости. На рисунке 2.10 схематично показан разрез кристалла биполярного транзистора.

В зависимости от того, в какой последовательности чередуются области с электронной и дырочной проводимостью, различают n-p-n и p-n-p транзисторы. Крайние области транзистора имеют одинаковый тип проводимости, одна из них называется эмиттером, другая коллектором. Эмиттерная область имеет большую концентрацию примеси и, следовательно, свободных носителей, чем коллекторная. Средняя область обладает проводимостью, противоположной проводимости коллектора и эмиттера. Она называется базой транзистора. Базовая область делается очень тонкой и имеет низкую концентрацию примеси.

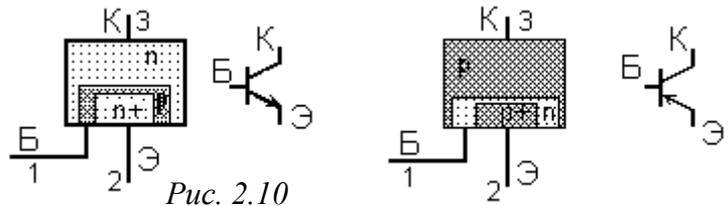


Рис. 2.10

На рисунке 2.11 показана упрощенная типичная схема включения n-p-n транзистора. Источник питания с напряжением  $U_3$  подключается между эмиттером и коллектором транзистора, причем положительная клемма источника подключается к коллектору. При этом базо-коллекторный р-п переход оказывается включенным в непроводящем направлении, а базо-эмиттерный - в проводящем.

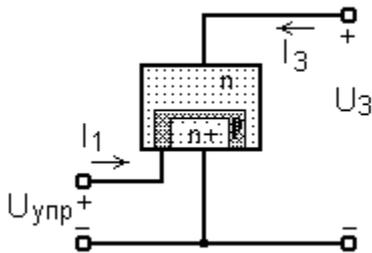


Рис. 2.11

Поскольку n-p переходы по отношению к источнику питания включены последовательно и при данной полярности  $U_{пит}$  проводимость эмиттерного перехода велика, а коллекторного - мала, ток в цепи источника питания -  $I_k$  определяется проводимостью коллекторного перехода. Последняя зависит от концентрации неосновных носителей в областях коллектора и базы. Неосновные носители базы - электроны могут быть доставлены в нее из эмиттера полем источника управляющего напряжения ( $U_{упр}$ ), что и определяет возможность регулирования проводимости коллекторного перехода с помощью электрического сигнала.

Если полярность  $U_{упр}$ , приложенного к эмиттерному переходу, соответствует прохождению через него тока, то из эмиттера в базу будет идти поток электронов. Так как база очень тонкая, этот поток, попадая под действие  $U_3$ , почти целиком уходит в коллекторный переход, создавая коллекторный ток транзистора.

Для характеристики эффективности передачи эмиттерного потока в коллектор служит коэффициент  $\alpha$ , представляющий собой отношение коллекторного тока к эмиттерному.

$$\alpha = I_3 / I_2 \quad (2.1)$$

У современных транзисторов этот коэффициент близок к единице ( $\alpha = 0,98 - 0,997$ ). Некоторая часть электронного потока из эмиттера все же уходит в базовый вывод транзистора, создавая базовый ток. Между токами эмиттера коллектора и базы существует очевидное соотношение:

$$I_2 = I_3 + I_1 \quad (2.2)$$

Заменив в (3.2)  $I_2$  формулой из (4.1), получим

$$I_3 = \alpha I_1 / (1 - \alpha) \quad (2.3)$$

Из (4.3) видно, что ток коллектора будет пропорционален току базы, причем коэффициент пропорциональности  $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ , называемый коэффициентом передачи тока базы, существенно больше единицы. Типичное значение  $\beta = 50 - 200$ . Удобство коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  обусловлено тем, что они слабо зависят от напряжения  $U_3$ , прикладываемого между эмиттером и коллектором транзистора. Практически  $\alpha$  и  $\beta = \text{const}$  при изменении  $U_{\text{пит}}$  от 0,5 В. до десятков вольт.

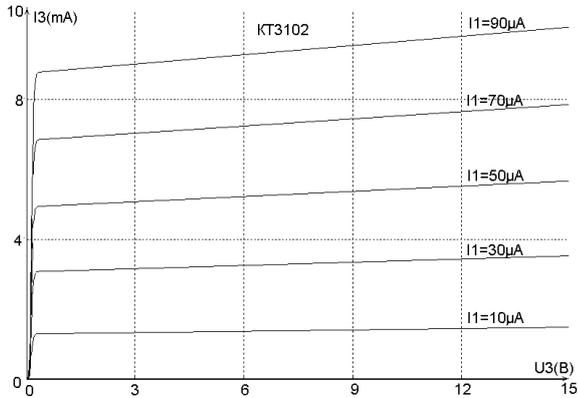


Рис. 2.12

янным, а  $I_3 = \beta I_1$ .

В отличие от полевых транзисторов, у которых ток управляющего электрода (затвора) равен нулю, биполярные работают с заметным током управляющего электрода (базы). Более того, именно ток базы принимается в качестве параметра при изображении вольтамперных характеристик по третьему электроду (коллектору). Типичное семейство таких ВАХ показано на рис.2.12. Каждая кривая состоит из короткого но крутого начального участка, на котором коэффициент  $\beta$  сильно зависит от  $U_3$ , и последующего почти горизонтального, на котором  $\beta$  можно считать постоянным.

### Экспериментальное задание.

В данной работе необходимо экспериментально получить вольтамперные характеристики биполярного транзистора и n-канального транзистора с затвором в виде p-n перехода (КТ 302). Используя полученные ВАХ, вычислить параметры дифференциальных проводимостей транзисторов.

Для упрощения процесса измерения используется осциллограф, на экране которого вычерчивается график ВАХ. Принцип получения графика ВАХ аналогичен используемому в предыдущей работе (См. Лаб. раб №1). Для упрощения подключений имеется специальный лабораторный макет, на котором выделены клеммы для подключения генератора, входа X, входа Y осциллографа, дополнительного источника постоянного напряжения (рис. 2.13). Имеются также контактные площадки для припаивания исследуемого транзистора.

Сохраняя основу метода получения на осциллографе графиков ВАХ из первой лабораторной работы, в данный лабораторный макет внесено дополнение. Оно позволяет получить на экране «чистой» график, с нормальным направлением обеих координатных осей. Дополнение представляет собой цепь, называемую «токовое зеркало». Токовое зеркало формирует в ветви

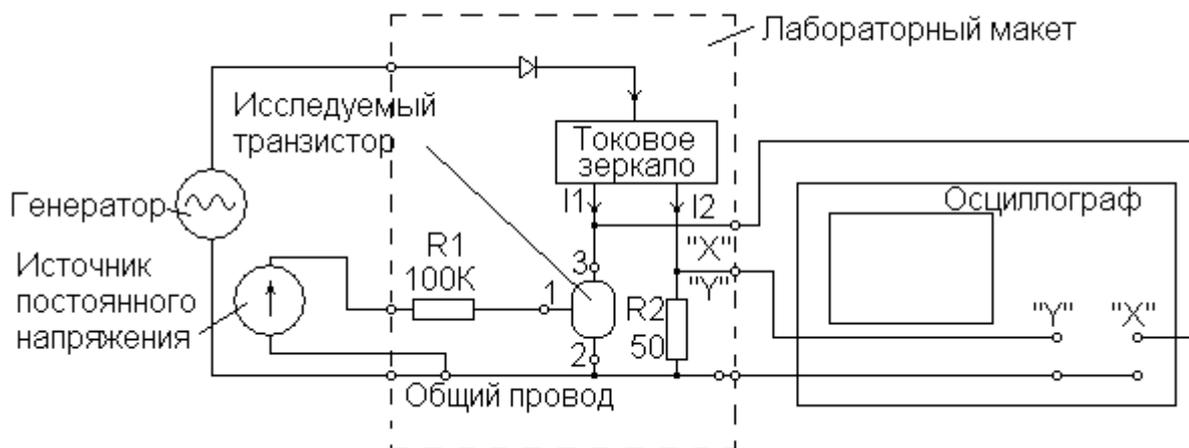


Рис. 2.13 Схема соединений приборов для осциллографирования ВАХ транзисторов

$I_2$  точно такой же ток, какой потребляется от нее в ветви  $I_1$  (см. рис.1). Благодаря этому на резисторе  $R_2$  будет выделяться напряжение, пропорциональное току третьего электрода исследуемого транзистора с положительным коэффициентом, равным  $R_2=50$  Ом.

#### *Порядок действий:*

1. Рассмотрите лабораторный макет;
2. Подключите к нему генератор синусоидального сигнала, источник постоянного напряжения и осциллограф.
3. Установите частоту сигнала генератора 50 – 100 Гц, амплитуду – 5 -10 В. (Величину амплитуды можно измерять осциллографом).
4. Подпаяйте исследуемый биполярный транзистор, эмиттер – к общему проводу, базу – к резистору  $R_1$ , коллектор к полосу выхода “Х”.
5. Отрегулируйте коэффициенты отклонения луча осциллографа по горизонтали и вертикали так, чтобы цена вертикального деления составила 1мА/дел, а горизонтального 1В/дел.
6. Установите величину постоянного напряжения на выходе источника около 5 В.. На экране должен прорисоваться график ВАХ - зависимости  $I_3=f(U_3)$ .
7. Перерисуйте в тетрадь 5 графиков ВАХ, соответствующих токам базы транзистора  $I_1=20, 40, 60, 80, 100$  мкА. Ток базы определяется напряжением источника постоянного напряжения  $U_1$  и вычисляется по формуле  $I_1=(U_1-0.7 \text{ В})/R_1$ . Над каждым из графиков поставьте величину базового тока, как на Рис 4.11, а в центре семейства графиков укажите тип исследуемого транзистора.
8. Измените полярность источника постоянного напряжения на противоположную и замените исследуемый транзистор, установив в макет полевой транзистор КП302. Получите на экране изображение его ВАХ.
9. Поскольку данный транзистор рассчитан на большие токи, установите цену деления токовой шкалы 2 мА/дел.
10. Перерисуйте в тетрадь графики 5 ВАХ для различных напряжений на затворе транзистора –  $U_1$ .

#### *ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ*

1. На полученных семействах выходных ВАХ выделите области, на которых ток коллектора или стока  $I_3$  слабо и относительно сильно зависит от напряжения  $U_3$ . Первая из них называется областью активного режима, вторая - областью насыщения.
2. В активном режиме транзистора ток выходного электрода ( $I_3$ ) слабо зависит от напряжения, приложенного к этому электроду ( $U_3$ ), а определяется главным образом током или напряжением первого электрода. Для оценки влияния первого электрода на ток третьего используются коэффициенты  
 $\beta = \Delta I_3 / \Delta I_1$  – для биполярного транзистора и  
 $g_{31} = \Delta I_3 / \Delta U_1$  – для полевого транзистора.  
Первый из них –  $\beta$  называется коэффициентом усиления тока, второй -  $g_{31}$  – прямой проходной проводимостью. Определите численные значения данных коэффициентов для исследуемых транзисторов в точке  $U_3=5\text{В}, I_3=3\text{мА}$ .
3. Напряжение на затворе полевого транзистора, при котором прекращается его стоковый ток, называют напряжением отсечки тока. Определите эту величину для исследуемого транзистора.

#### *Оформление отчета*

Отчет о работе должен содержать:

1. Название работы, цель, перечень используемого оборудования.

2. Рисунки внутренней структуры исследуемых транзисторов и краткое описание принципов их функционирования.
3. Подробную схему цепи лабораторной установки для измерения ВАХ и результаты измерения в виде графиков выходных ВАХ каждого из исследуемых транзисторов.
4. Результаты выполнения пунктов 1-3 обработки результатов экспериментов.

#### *Контрольные вопросы.*

1. Что такое собственная электропроводность полупроводников, почему она зависит от температуры?
2. Что такое примесная электропроводность? Каков механизм её образования? Какие носители заряда называются основными, а какие – неосновными?
3. Объясните процессы в р-n переходе и выведите формулу для ВАХ р-n перехода.
4. Объясните структуру биполярного транзистора и процесс управления током коллектора.
5. Объясните структуру и процессы управления током канала полевого МДП транзистора.
6. Объясните структуру и процесс управления током полевого транзистора с р-n переходом.
7. Укажите на полученных в ходе работы ВАХ режимы отсечки тока, активный и насыщения.

### **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. "ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ПОСТРОЕНИЯ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ"**

*Цель работы:* ознакомление со схемотехникой транзисторных усилительных каскадов и изучение процессов в них, развитие навыков исследования радиотехнических цепей, освоение радиоизмерительной техники.

*Приборы и оборудование:* генератор сигналов звукового диапазона, двулучевой осциллограф, макетная плата, биполярный и полевой транзисторы, авометр, паяльник, соединительные провода.

#### *Введение. Общий принцип построения усилительных каскадов.*

Увеличение мощности электрического сигнала возможно только за счет мощности какого-либо источника электроэнергии. Построение усилителя основано на использовании такого источника, называемого источником питания, и элемента, электропроводность которого управляется усиливаемым электрическим сигналом. Этот элемент, будучи включен в электрическую цепь с потребителем усиленного сигнала и источником питания, регулирует поступление электроэнергии к потребителю, что приводит к формированию на нем усиленного сигнала. В дальнейшем вместо слова потребитель используется более благозвучное «приемник». На рис. 3.1 показаны варианты схем электрической цепи усилительного каскада, при использовании транзистора в качестве управляемого элемента. Тип транзистора не имеет значения, поэтому он не обозначен на рисунке. Источник электроэнергии может быть в виде источника ЭДС, или источника тока. Приемник усиленного сигнала в виде сопротивления нагрузки  $R_n$  включается последовательно с транзистором (вариант а) или параллельно транзистору (вариант б, в). В любом случае усиливаемый сигнал, изменяющееся напряжение которого прикладывается к входным клеммам, воздействует на электропроводность транзистора, вызывая изменение тока через него, что, в свою очередь, приводит к изменению тока через  $R_n$  и появлению на нем изменяющегося напряжения усиленного сигнала.

Заметим, что во всех представленных вариантах соединения транзистора, источника электро-энергии и потребителя усиленного сигнала одна из клемм транзистора – вторая, одна из клемм источника усиливаемого сигнала и одна из клемм приемника усиленного сигнала соединяются

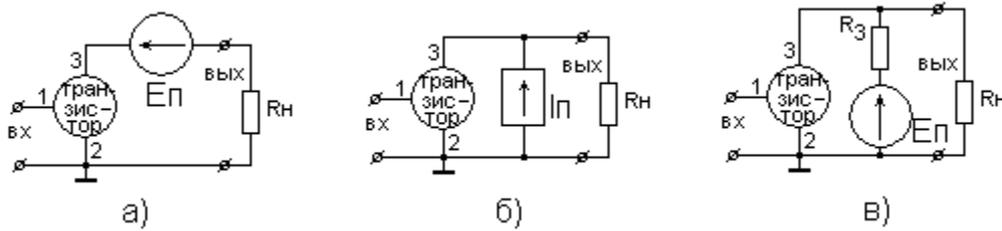


Рисунок 3.1. Три варианта построения усилителя: а) с использованием источника постоянной Э.Д.С. ( $E_{п}$ ) и последовательным соединением транзистора с  $R_{н}$ ; б) с использованием источника постоянного тока и параллельным соединением транзистора с  $R_{н}$ ; в) с использованием источника постоянной Э.Д.С., балластного резистора  $R_{з}$  и параллельным соединением транзистора с  $R_{н}$ .

между собой. Провод, осуществляющий это соединение, называется общим и имеет характерное графическое обозначение, показанное на рис.7.3. Потенциал общего провода принимается равным нулю. Относительно общего провода определяются и измеряются напряжения во всех других узлах цепи усилителя. При построении сложных усилительных и других устройств всегда соблюдается принцип единства общего провода отдельных частей устройства. Часто общий провод соединяется с электропроводным корпусом устройства, что привело к жаргонным названиям общего провода: «корпус» или – «земля».

### Взаимосвязь напряжений на входном и выходном электродах транзистора в цепи усилительного каскада. Графическое описание процессов в цепи усилителя.

Согласно общим схемам усилительного каскада, показанным на рис.3.1, один из электродов транзистора – второй является общим. По принятой нумерации электродов это либо эмиттер биполярного, либо исток полевого транзистора. Первый электрод – база биполярного или затвор полевого, согласно рис.3.1, является входным. На него подается напряжение усиливаемого сигнала. Наконец, третий электрод – коллектор биполярного или сток полевого транзистора соединяется с потребителем усиленного сигнала -  $R_{н}$ , т.е. с выходной клеммой усилителя. Таким

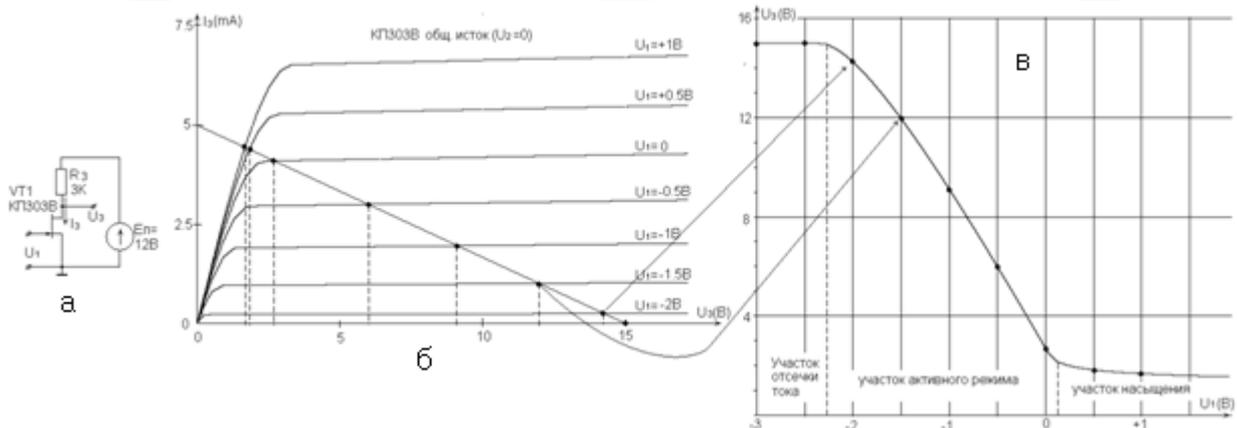


Рисунок 3.2. Определение зависимости  $U_3=f(U_1)$ . а - схема цепи усилителя; б - графическое решение системы уравнений цепи; в - полученный график зависимости  $U_3=f(U_1)$ .

образом, электроды транзистора в цепи усилителя получают функциональные названия: общий, входной и выходной.

Приняв потенциал общего электрода, равным нулю и условившись отсчитывать потенциалы всех точек цепи усилителя от потенциала общего провода, обозначим напряжение на входном электроде через  $u_1$ , а на выходном –  $u_3$ . Очевидно, что эффект усиления сигнала, поступающего на входной электрод, обусловлен влиянием напряжения  $u_1$  на величину напряжения  $u_3$ . Для определения этого влияния необходимо конкретизировать вариант цепи усилителя и экземпляр транзистора.

Выберем для определенности цепь с балластным резистором, показанную на рис.3.1в. , положив для простоты  $R_n = \infty$ . Схема исследуемой цепи показана на рис.3.2а, где для большей определенности взят транзистор КП303В и балластный резистор  $R_3 = 3\text{К}$ . Применяя второе правило Кирхгофа к контуру  $E_n - R_3 - VT1$  и закон Ома, получим первое уравнение для  $U_3$ :

$$I_3 R_3 + U_3 = E_n. \quad (3.1)$$

Где  $I_3$ -ток выходного электрода транзистора, который протекает по  $R_3$ . Зависимость  $U_3$  от  $U_1$  обусловлена тем, что от  $U_1$  зависит  $I_3$ . Данная зависимость выражается ВАХ транзистора –  $I_3 = f(U_1, U_3)$ , которая совместно с (3.1) образует систему уравнений, определяющую искомую зависимость  $U_3$  от  $U_1$ .

Ввиду того, что ВАХ транзистора задается в виде графика, решение данной системы уравнений выполняется графически. Для этого строятся в одних осях графики уравнения (3.1) и ВАХ, а совместное решение определится в виде точки пересечения этих графиков. На рис. 3.2б показано такое решение. График уравнения (3.1) представляет прямую линию, которую легко построить по двум характерным точкам:  $(0, E_n/R_3)$  и  $(E_n, 0)$ . Поскольку ВАХ транзистора представлена семейством графиков зависимости  $I_3 = f(U_3)$  для различных величин  $U_1$ , получается множество точек пересечения, каждая из которых определяет величины  $I_3, U_3$  для данного значения  $U_1$ . Перенося эти точки на график зависимости  $U_3$  от  $U_1$ , получим график искомой зависимости, показанный на рис.3.2в. Аналогичная форма графика зависимости  $U_3 = f(U_1)$  получается при любом используемом транзисторе и схеме построения усилителя.

Обратившись к рис.3.2, заметим, что на графике  $U_3 = f(U_1)$  можно выделить три характерных участка.: верхний горизонтальный, наклонный и нижний почти горизонтальный. Верхний горизонтальный участок соответствует отсутствию тока через транзистор и выражает режим отсечки тока транзистора. Для этого участка  $U_3 = E_n$ . Следующий наклонный участок называется участком активного режима транзистора. В активном режиме существует сильная зависимость  $U_3$  от  $U_1$ , что позволяет получить усиление электрического сигнала, подаваемого на входной электрод транзистора. Нижний почти горизонтальный участок графика образуется вследствие понижения напряжения на транзисторе -  $U_3$  до величин, при которых ток  $I_3$  перестает существенно зависеть от  $U_1$ . Данный участок называется участком насыщения транзистора. Остаточное напряжение на транзисторе в режиме насыщения зависит от типа транзистора, величины тока через него и составляет величину от десятых долей вольта до нескольких вольт.

Удобным приемом для описания процессов в усилительных цепях является **понятие рабочей точки**, которая определяется как точка на графике или диаграмме, соответствующая существующим в данный момент величинам напряжений и токов в цепи. Например, для рассматриваемой цепи – рис.5.4а  $E_n = 15\text{ В}$ ,  $U_1 = -1.5\text{ В}$  рабочая точка будет находиться в координатах  $U_3 = 12\text{ В}$ ,  $I_3 = 1\text{ мА}$  – на графике рис.3.2.б, или в координатах  $U_1 = -1.5\text{ В}$ ,  $U_3 = 12\text{ В}$  уна графике рис.3.2в. Если величина напряжения на входном электроде –  $U_1$  не изменяется во времени, рабочая точка на графиках также не изменяет своего положения. Однако, при усилении сигнала, напряжение которого изменяется во времени, происходит изменение  $U_1$ , вызывающее движение рабочей точки по линии графика. Если это график зависимости  $U_3$  от  $U_1$  (Рис.3.2в), то движение рабочей точки по горизонтали будет соответствовать изменениям  $U_1$ , а по вертикали – изменениям  $U_3$ .

В зависимости от участка графика  $U_3 = f(U_1)$ , покрываемого рабочей точкой в процессе усиления сигнала, выделяется несколько т.н. **классов усиления, называемы также режимами работы** усилительного каскада.

**Класс А** – режим линейного усиления реализуется тогда, когда рабочая точка в процессе усиления сигнала не выходит за пределы участка активного режима. Если напряжение  $-U_1$  на входе усилителя класса А изменяется по синусоидальному закону, то напряжение на выходном электроде транзистора –  $U_3$  будет изменяться по почти синусоидальному закону. Это обуслов-

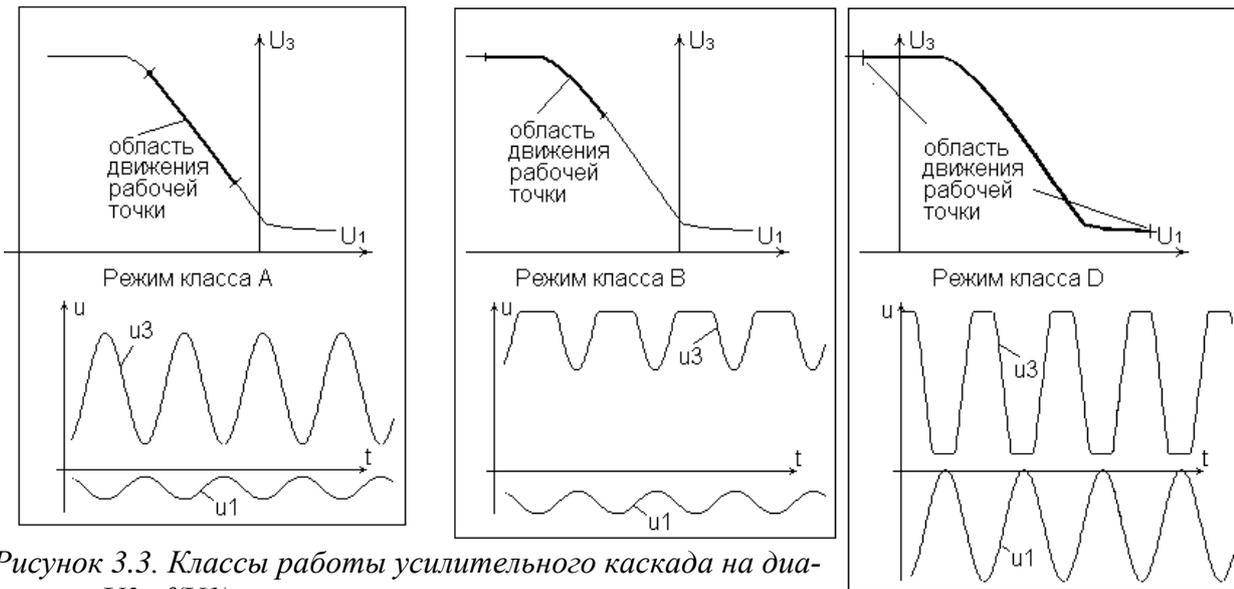


Рисунок 3.3. Классы работы усилительного каскада на диаграмме  $U_3=f(U_1)$

лено почти линейным характером зависимости  $U_3=f(U_1)$  в пределах участка активного режима (см. рис.3.3).

**Класс В** – представляет собой режим, при котором рабочая точка движется в пределах участков отсечки тока и активного режима, заходя в них одинаково по горизонтали. Поскольку одинаковость горизонтальных составляющих участков активного режима и отсечки тока на практике обеспечить невозможно, чистый режим класса В трудно реализуем.

**Класс С** отличается от класса В тем, что при усилении сигнала рабочая точка заходит в область отсечки тока (по горизонтали) больше чем в область активного режима.

**Класс D** характеризуется тем, что при усилении сигнала рабочая точка проходит все участки графика  $U_3=f(U_1)$  – отсечки тока, активного режима и насыщения транзистора (см. рис.3.3)

В нижней части рис.3.3 показаны осциллограммы напряжений  $u_1$  и  $u_3$  при усилении синусоидального сигнала. Только режим класса А обеспечивает неизменность формы усиливаемого сигнала, однако изменения сигнальных напряжений  $u_1$  и  $u_3$  происходят в противофазе. Это обусловлено отрицательным коэффициентом наклона графика зависимости  $U_3=f(U_1)$ . В других режимах усиление сигнала сопровождается изменением его формы, что в некоторых случаях допустимо и даже желательно.

#### Экспериментальное задание.

В данной работе необходимо

1. экспериментально получить график зависимости напряжения выходного электрода транзистора ( $U_3$ ) от напряжения, подаваемого на входной электрод ( $U_1$ ), в усилительном каскаде с балластным резистором ( $R_3$ ) (см. рис. 3.1в).
2. Рассчитать координаты некоторых точек данной зависимости, используя графики ВАХ транзистора из предыдущей работы, и нанести их на полученный график, сопоставив результаты теории и эксперимента.

- Исследовать работу каскада при различных режимах его работы (режимах классов А, В, D)

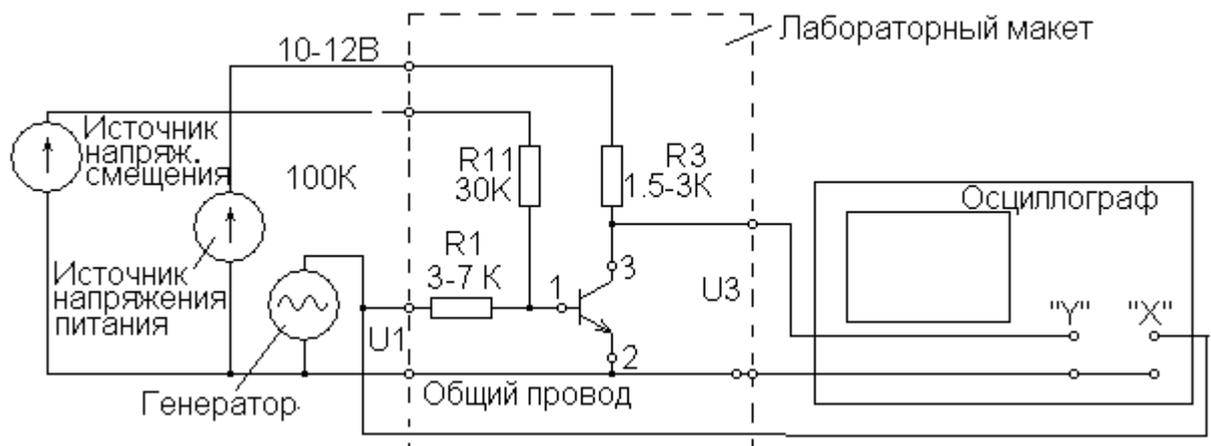


Рис.3.4

Порядок действий.

- Соберите цепь согласно Рис.3.4. Резистор R11 и источник напряжения смещения на первом этапе можно не подключать. Как видно из схемы включения, отклонение луча осциллографа по осям X и Y будут пропорциональны соответственно напряжениям  $U_1$  и  $U_3$ . Следовательно, при изменении напряжения  $U_1$  на экране осциллографа прорисовывается график зависимости  $U_3=f(U_1)$ . Перерисуйте этот график в тетрадь, проградировав координатные оси.
- Используя материал раздела «**Взаимосвязь напряжений на входном и выходном электродах транзистора в цепи усилительного каскада. Графическое описание процессов в цепи усилителя**» и графики ВАХ из предыдущей лабораторной работы, рассчитайте положение некоторых точек графика  $U_3=f(U_1)$  и нанесите их на рисунок графика. Данные точки должны располагаться вблизи линии графика.
- Переведите осциллограф в режим «развертки». На экране появятся осциллограммы напряжений сигнала генератора и выходного сигнала усилителя, который работает в режиме класса D. Перерисуйте эти осциллограммы на один рисунок, тщательно проградировав оси сигнальных напряжений.
- Подключите в цепь резистор R11 и источник напряжения смещения, которое должно регулироваться в пределах 0 – 15 В. Регулируя напряжение смещения и амплитуду сигнала генератора, добейтесь работы каскада в режиме класса А. Перерисуйте полученные осциллограммы  $u_1$  и  $u_3$  в тетрадь с обязательной градуировкой координатных осей.
- Изменив напряжение смещения и амплитуду сигнала генератора, получите режим работы класса В.

#### Оформление отчета

Отчет о работе должен содержать:

- Название работы, цель, перечень используемого оборудования.
- Краткое описание принципа построения усилительного каскада применительно к используемой схеме с балластным резистором.
- Схему цепи для снятия графика зависимости  $U_3=f(U_1)$  и полученный график с проградированными координатными осями и выделенными участками отсечки тока, активного режима, насыщения транзистора.

4. Графическое решение уравнений цепи и полученные в результате его точки зависимости  $U_3=f(U_1)$ . (Можно использовать графики ВАХ из предыдущей работы, не перерисовывая их).

5. Полученные экспериментально осциллограммы сигнальных напряжений для трех режимов работы усилителя – D, А, В классов. Для каждого из классов работы усилителя укажите диапазон перемещения рабочей точки транзистора на графике  $U_3=f(U_1)$ .

#### Контрольные вопросы.

1. В чем состоит общий принцип построения усилительного каскада. Какова роль транзистора, источника питания. Можно ли создать усилитель без источника питания.
2. Изобразите упрощенные схемы транзисторных усилительных каскадов с питанием от источника стабильного тока, источника постоянного напряжения.
3. Выведите соотношение 5.1.
4. Изобразите график зависимости  $U_3=f(U_1)$ , полученный в работе, поясните его форму и отдельные участки.
5. Что такое рабочая точка транзистора в усилителе?
6. Перечислите используемые режимы работы усилительных каскадов и поясните способы их реализации, примененные в работе.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. "РАСЧЕТ СБОРКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА СИГНАЛОВ ПЕРЕМЕННОГО НАПЯЖЕНИЯ.

*Цель работы:* ознакомление со схемотехникой линейных усилительных каскадов, приобретение умений анализа и расчета цепи усилительного каскада, знакомство с компьютерным моделированием радиотехнических цепи на примере Micro-cap-7, развитие навыков сборки и исследования радиотехнических цепей, освоение радиоизмерительной техники.

*Приборы и оборудование:* генератор сигналов звукового диапазона, двулучевой осциллограф, макетная плата, биполярный транзисторы, авометр, паяльник, соединительные провода, компьютер с программой Micro-cap-7.

#### Введение.

##### Разделительные конденсаторы в усилителях переменного напряжения.

Сигналами переменного напряжения называются сигналы, спектр которых не содержит нулевой гармоники и гармоник с очень низкими частотами. Это позволяет включать в цепь передачи таких сигналов последовательный конденсатор, который будет пропускать через себя переменный сигнальный ток всех спектральных компонент сигнала. На рис. 4.1 показана схема усилительного каскада сигналов переменного напряжения, содержащая два последовательных конденсатора  $C_1$  и  $C_3$ . Через конденсатор  $C_1$  усиливаемый сигнал поступает на управляющий электрод транзистора, где суммируется с

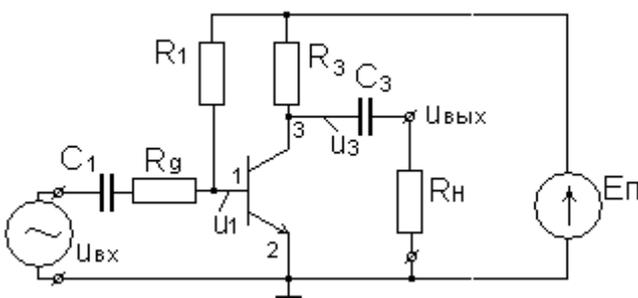


Рис. 4.1

напряжением смещения рабочей точки транзистора. Усиленный сигнал также через конденсатор  $C_3$  передается с выходного электрода в приемник усиленного сигнала  $R_H$ . При этом постоянные напряжения через данные конденсаторы не передаются, что является основанием для их названия «разделительные конденсаторы».

Величина емкости любого разделительного конденсатора выбирается из условия малости его сопротивления в сравнении с активным сопротивлением ветви, в которую включается

данный конденсатор:  $1/(\omega C) < R_{ветви}$ . Поскольку сопротивление конденсатора частотно зависимо данное условие стремятся выполнить на частоте наименьшей гармоники сигнала. При этом на более высоких гармониках оно будет выполняться с большим запасом.

**Начальное положение рабочей точки** – это положение, соответствующее нулевому напряжению усиливаемого сигнала ( $u_{вх}=0$ ). Напряжения на электродах транзистора и токи электродов, соответствующие начальному положению рабочей точки, обозначаются нулевыми индексами:  $U_{10}, I_{10}, U_{30}, I_{30}$  и характеризуют т.н. режим транзистора по постоянному току.

Параметры режима транзистора по постоянному току легко измеряются с помощью простейшего измерительного прибора – вольтметра постоянного напряжения. Обычно измерение тока  $I_{30}$  осуществляется измерением падения напряжения на балластном резисторе ( $R_3$ ) и делением измеренного значения на величину  $R_3$ .

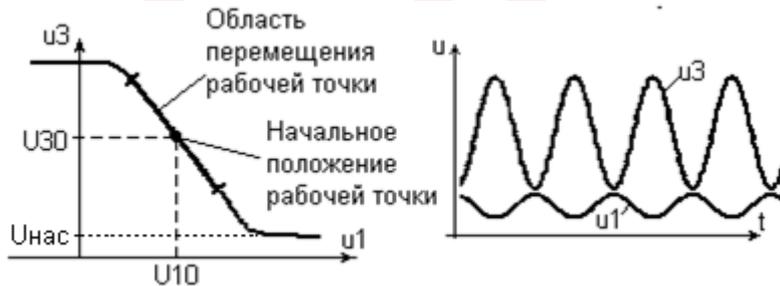


Рис. 4.2. График зависимости напряжений на электродах транзистора  $u_3=f(u_1)$  в усилительном каскаде и сигнальные графики при линейном усилении

**Построение линейных усилителей.** Для линейного усиления (класса А) необходимо обеспечить активный режим транзистора во всем диапазоне изменений напряжения выходного сигнала усилителя. Это обеспечивается соответствующим выбором величин режи-

ма по постоянному току –  $U_{30}, I_{30}$ . Для расчета  $U_{30}, I_{30}$  должны быть заданы максимальные амплитуды напряжения и тока выходного сигнала

усилителя –  $U_{твых}, I_{твых}$ . При известном сопротивлении приемника усиленного сигнала –  $R_n$  связь между этими величинами очевидна:  $U_{твых}=I_{твых} \cdot R_n$ .

Определение необходимых величин  $U_{30}, I_{30}$  вытекает из рис. 4.2. Для того, чтобы рабочая точка не заходила в область насыщения транзистора и в область отсечки тока должны выполняться два условия:

$$U_{30} > U_{твых} + U_{нас}, \quad (4.1)$$

$$I_{30} > I_{твых} + I_{тR3} = U_{твых}/R_n + U_{твых}/R_3 \quad (4.2)$$

Где  $I_{тR3} = U_{твых}/R_3$  – амплитуда сигнального тока через балластный резистор. Вместе с данными неравенствами всегда выполняется соотношение:

$$I_{30}R_3 + U_{30} = E_n, \quad (4.3)$$

которое является третьим уравнением системы условий.

Заметим, что перечисленные три условия не позволяют однозначно определить четыре неизвестные величины:  $E_n, R_3, U_{30}, I_{30}$ . Одна из них:  $E_n$  или  $R_3$  определяется другим условием.

**Пример 1.** Определить требуемое начальное положение рабочей точки –  $U_{30}, I_{30}$ , транзистора в линейном усилителе сигнала приемной ТВ антенны, а также величину балластного резистора –  $R_3$ . Исходные данные: сопротивление нагрузки усилителя  $R_n=50$  Ом (ТВ кабель), амплитуда напряжения выходного сигнала  $U_{твых}$  – до 3 В, напряжение питания  $E_n=12$  В. Используется биполярный транзистор КТ607, напряжение насыщения которого не превышает 1 В.

Условие не вхождения в режим насыщения транзистора -  $U_{30} > U_{твых} + U_{нас}$  сразу дает  $U_{30} > 3 \text{ В} + 1 \text{ В} = 4 \text{ В}$ . Возьмем  $U_{30}=5 \text{ В}$ .

Из уравнения  $I_{30}R_3 + U_{30} = E_n$  выразим  $R_3$  и подставим в условие не вхождения транзистора в режим отсечки тока:  $R_3 = (E_n - U_{30})/I_{30}$ ;

$I_{30} > U_{твых}/R_n + I_{30} \cdot U_{твых}/(E_n - U_{30})$ , после этого получим:

$I_{30} > (U_{твых}/R_n) \cdot (E_n - U_{30}) / (E_n - U_{30} - U_{твых}) = 0.105 \text{ А}$ . Возьмем  $I_{30}=120 \text{ мА}$ .

После определения  $U_{30}, I_{30}$  и заданном  $E_n$  легко находится величина  $R_3$ :  $R_3 = (E_n - U_{30})/I_{30} = 58.3 \text{ Ом}$ .

После того как определены параметры режима транзистора по постоянному току –  $U_{30},$

$I_{30}$ , а также  $R_3$  и  $E_{п}$ , вычисляются величины элементов цепи, обеспечивающие эти параметры. Для схемы каскада, показанной на рис.1, - это сопротивление резистора  $R_1$ , который определяет постоянный ток базы транзистора –

$$I_{10}=(E_{п}-0.7В)/R_1.$$

Требуемая величина этого тока равна  $I_{10}=I_{30}/\beta$ , где  $\beta \approx 50$  – коэффициент усиления тока биполярным транзистором.

Когда параметры режима транзистора по постоянному току ( $U_{30}$ ,  $I_{30}$ ) вычислены, необходимо определить дифференциальные проводимости транзистора в данной рабочей точке. Если используется биполярный транзистор, то сделать это очень просто по следующим приближенным формулам:

$$g_{11} \approx I_{30}/(U_T \beta); \quad g_{31} \approx I_{30}/U_T; \quad g_{13} \approx 0; \quad g_{33} \approx 0 \quad (4.4)$$

в которых  $U_T$  – температурный потенциал, равный 26мВ. Знание дифференциальных проводимостей транзистора позволяет определить рабочие характеристики усилителя: входную проводимость  $g_{вх} \approx g_{11}$  (входное сопротивление  $r_{вх}=1/g_{вх}$ ) и коэффициент усиления амплитуды напряжения –

$$k_u = U_{мввых}/U_{мввх} = g_{31}/(1/R_{н}+1/R_3) \quad (4.5)$$

Для ослабления нелинейности входной цепи усилительного каскада на биполярном транзисторе устанавливается дополнительный резистор  $R_g$  (см. рис. 4.1). Величина его выбирается в 2-3 раза большей  $r_{вх}$ . Наличие  $R_g$  приводит к уменьшению коэффициента усиления  $k_u$  соответственно в 3 – 4 раза так как знаменатель (6.5) умножается на величину  $(1+R_g/r_{вх})$ .

**Пример2.** Определить рабочие характеристики линейного усилителя для сигнала приемной ТВ антенны, рассмотренного в примере 1.

По найденному  $I_{30}=120 \text{ мА}$  вычислим  $g_{31}=I_{30}/U_T=4.61 \text{ А/В}$  и  $g_{11}=g_{31}/\beta=4.61/50=0.0922 \text{ А/В}$ .

Входное сопротивление каскада будет равно  $1/g_{11}=10.84 \text{ Ом}$ . Увеличим входное сопротивление, включив последовательное сопротивление  $R_g=33 \text{ Ом}$ . Тогда получим  $r_{вх}=33+10.84=43.84 \text{ Ом}$ . Коэффициент усиления амплитуды напряжения определим по формуле (4.5) с учетом поправки, обусловленной включением  $R_g$ .  $K_u=4.61/((1/58.3+1/50)4)=31$

Емкости разделительных конденсаторов  $C_1$  и  $C_3$  вычисляются на основании условия  $1/(\omega_{\min}C) < R_{ветви}$ , где в качестве  $R_{ветви}$  берется: для  $C_1$  –  $r_{вх}+R_g$ , а для  $C_3$  –  $R_{н}$ .

### Экспериментальное задание.

#### В данной работе необходимо

4. Рассчитать элементы цепи усилительного каскада, показанного на рис.4.1, ( $R_3$ ,  $R_1$ ,  $R_g$ ,  $C_1$ ,  $C_3$ ) на основе заданных преподавателем требований (максимальной амплитуды напряжения выходного сигнала -  $U_m$ , сопротивления нагрузки -  $R_n$ , наименьшей частоты гармоник усиливаемого сигнала -  $\nu_{\min}$ ).
5. Вычислить рабочие характеристики усилителя – входное сопротивление и коэффициент усиления амплитуды напряжения.
6. Проверить рассчитанный каскад с помощью компьютерной модели в программе Micro-cap-7. Корректируя величины элементов модели, добиться приемлемой ее работы – усиления синусоидального сигнала с минимумом искажений его формы.
7. Собрать каскад на модельной плате и добиться его приемлемого функционирования. Сопоставить расчетные и экспериментально полученные величины:  $U_{30}$ ,  $I_{30}$ ,  $k_u$ .

#### Порядок действий.

6. Получите у преподавателя исходные данные для проектирования усилительного каскада:  $U_m$ ,  $R_n$ ,  $\nu_{\min}$ . Используя формулы (6.1 – 6.3) и примеры расчета, определите режимные параметры каскада –  $E_{п}$ ,  $U_{30}$ ,  $I_{30}$ ,  $R_3$ ,  $R_1$ , а также рабочие характеристики усилителя –  $k_u$ ,  $r_{вх}$ .
7. Определите требуемые величины емкостей разделительных конденсаторов  $C_1$ ,  $C_3$ . Изобразите схему усилителя с указанием номиналов всех элементов.

8. Обычно разработанную радиотехническую цепь перед реализацией проверяют с помощью компьютерной модели. Это позволяет исправить ошибки расчетов до сборки цепи. Проверьте рассчитанный каскад с помощью модели в программе Micro-cap-7.
9. При удовлетворительном поведении компьютерной модели соберите усилительный каскад на лабораторном макете.
10. Используя генератор и осциллограф, измерьте все рассчитанные ранее параметры усилительного каскада. Для сопоставления результатов измерений и расчетов заполните следующую таблицу.

Параметр	$E_{п}$	$U_{30}$	$I_{30}$	$k_{ц}$	$r_{вх}$	$U_{тввых}$	$V_{min}$
Расчет							
Эксперимент							

$U_{тввых}$  – максимальная амплитуда напряжения выходного сигнала, при которой он сохраняет приемлемую синусоидальность.

### Оформление отчета

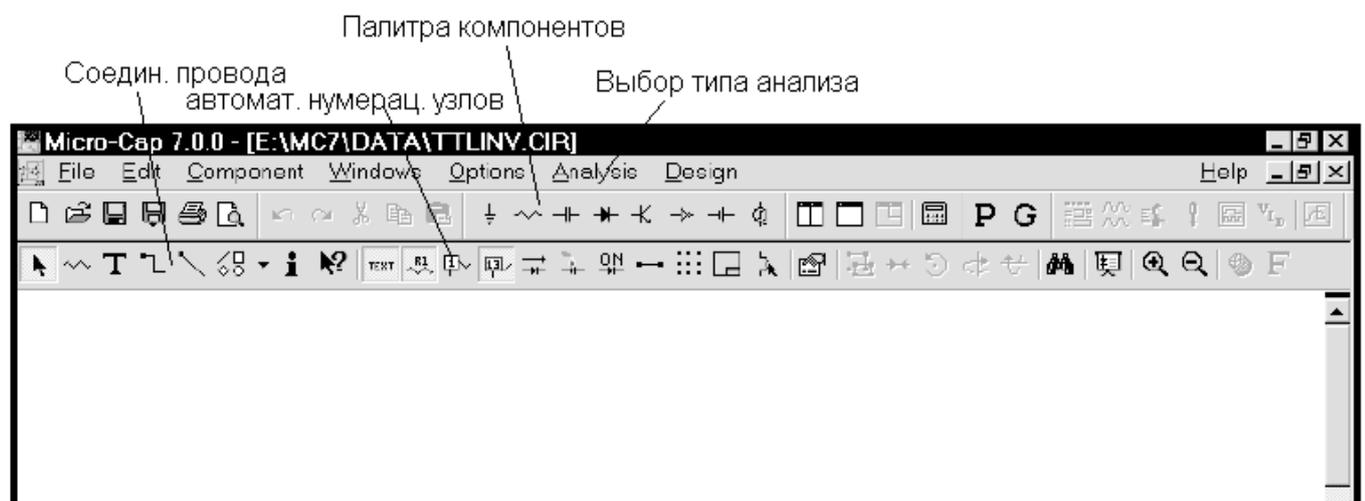
Отчет о работе должен содержать:

1. Название работы, цель, перечень используемого оборудования.
2. Исходные данные для построения усилительного каскада для сигнала переменного напряжения. Схему каскада и подробный расчет величин его элементов.
3. Описание способов измерений характеристик каскада, указанных в таблице и заполненную таблицу результатов.
4. Графическое решение уравнений цепи и полученные в результате его точки зависимости  $U_3=f(U_1)$ . (Можно использовать графики ВАХ из предыдущей работы, не перерисовывая их).
5. Полученные экспериментально осциллограммы сигнальных напряжений для трех режимов работы усилителя – D, A, B классов. Для каждого из классов работы усилителя укажите диапазон перемещения рабочей точки транзистора на графике  $U_3=f(U_1)$ .

### Контрольные вопросы.

1. Поясните назначение всех элементов цепи усилительного каскада переменного напряжения, показанную на рис. 1.
2. Как определяются параметры режима транзистора по постоянному току  $U_{30}$ ,  $I_{30}$ ?
3. Выведите формулы, выражающие  $U_{30}$ ,  $I_{30}$ ,  $R_3$  через заданные  $R_n$ ,  $U_{тввых}$ ,  $E_{п}$ .
4. Поясните назначение разделительных конденсаторов, как определяются необходимые их емкости.

**Приложение. Работа с Micro-Cap.** После запуска программы MC.EXE на экране появляется поле для изображения схемы анализируемой цепи. Необходимо поместить в рабочую часть поля все компоненты цепи и соединить их нужным образом. После этого модель цепи го-



Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует. Рис. 4.3. Инструментальная панель программы анализа электрических цепей micro cap

това к анализу.

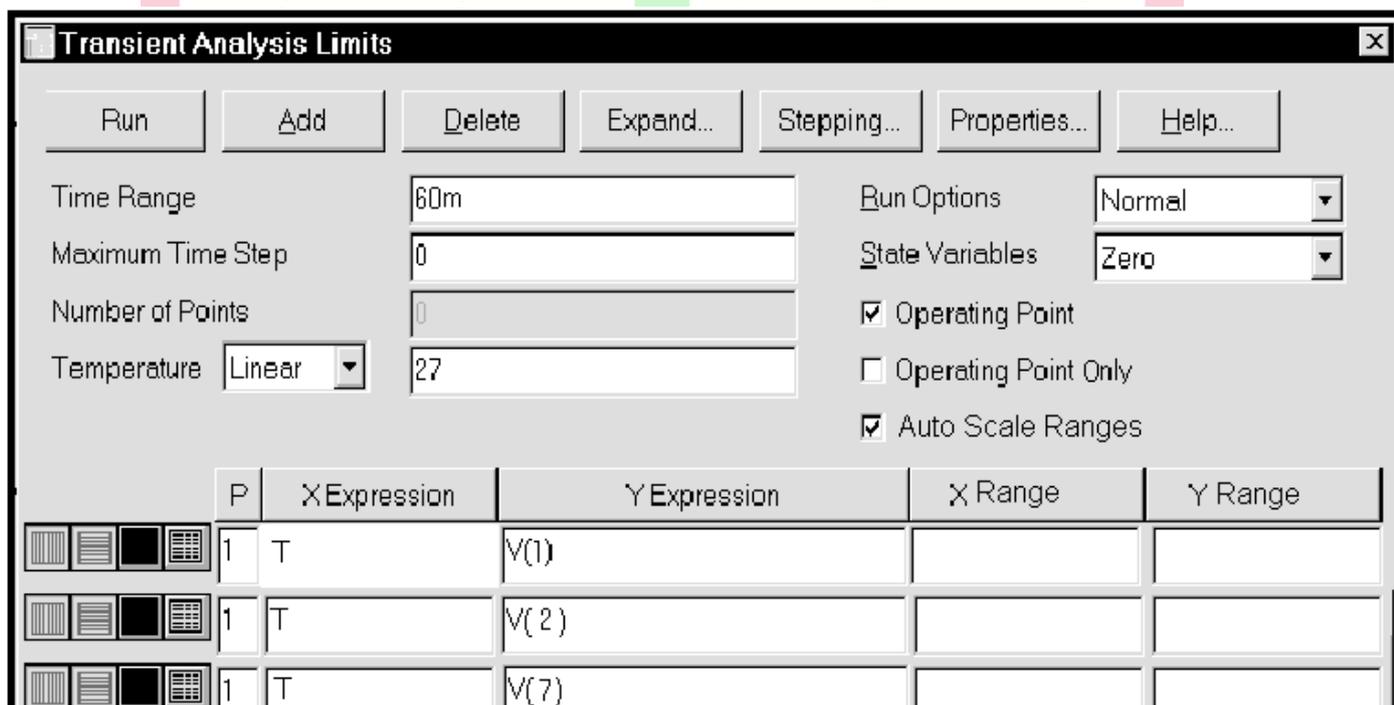
Для удобства имеется палитра компонентов (см. рис. 4.3). Для выбора компонента необходимо щелкнуть по его изображению левой кнопкой и перевести курсор на рабочее поле. Курсор примет вид изображения выбранного компонента. Подведя курсор к нужному месту, щелкаем левой кнопкой, что фиксирует компонент в выбранном месте. Для выделения уже размещенного компонента для его перемещения или удаления необходимо вернуть курсору форму стрелки, щелкнув по ее изображению в левой части области меню, после чего щелкнуть курсором-стрелкой по нужному компоненту, который при этом изменит цвет. После фиксации компонента Micro-Cap запрашивает его тип и параметры. Для резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности достаточно одного параметра – величины сопротивления, емкости или индуктивности. При этом можно избежать написания большого количества нулей, если использовать буквенные указатели степени р-пика( $10^{-12}$ ), u=микро( $10^{-6}$ ), m-милли, $(10^{-3})$ , k-кило( $10^3$ ). Для транзистора необходимо указать его тип. Можно выбрать любой тип из предложенного списка. Для источника постоянного напряжения достаточно указать величину напряжения, для источника синусоидального сигнала – частота и амплитуду сигнала.

Разместив нужные компоненты, соединим их линиями проводников. Можно использовать прямые или ломаные линии, сделав выбор из палитры проводов. Точки общего провода не нужно соединять проводами. Достаточно подключить к ним значок общего провода, имеющийся в палитре компонентов. После выполнения всех соединений модель готова к анализу. Для проведения анализа необходимо включить в схему и такие компоненты как источник сигнала, источник питания и пр.

Нумерация узлов моделируемой цепи осуществляется автоматически при изображении схемы. Для вывода номеров узлов необходимо щелкнуть левой кнопкой по изображению номера 1 (см. рис. 4.3). Повторный щелчок по этой кнопке уберет номера с изображения схемы. Номера узлов используются при анализе в качестве индексов узловых напряжений.

Micro-Cap может выполнять несколько видов анализа цепи. Для нас представляет интерес анализ во временной области (Transient Analysis), дающий графики временной зависимости напряжений и токов в цепи. Щелкаем по кнопке «Analysis» и в появившемся меню выбираем «Transient», после чего появится меню Transient анализа.

Необходимо установить временной диапазон (Time Range) около 10 периодов входного



**Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.** Рис. 4.4  
Панель меню transient анализа

сигнала. Если частота сигнала 1 КГц, то 10m. Поставить птичку в клетке Auto Scale Ranges (автоматический диапазон шкал). В клетках X-Expression поставить t (время), в клетках Y-Expression поставить V( ), указав в скобках номера узлов, напряжения в которых будут наблюдаться напряжения. Далее, нажимаем кнопку RUN и наблюдаем построчные осциллограммы указанных напряжений.

Для нашего случая исследования простейшего усилительного каскада достаточно наблюдать напряжения на коллекторе транзистора, которое должно изменяться по синусоидальному закону с заданной амплитудой и иметь постоянную составляющую, близкую к вычисленной величине  $U_{30}$ . Видимо потребуется подобрать амплитуду напряжения входного сигнала (источника синусоидального сигнала), а также сопротивления резисторов R1, R3. Для этого закрываем окно анализа и на схеме цепи делаем двойной щелчок на том элементе, который должен редактироваться. На появившемся меню элемента делаем необходимые изменения.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5. ИЗУЧЕНИЕ ЭМИТТЕРНЫХ ПОВТОРИТЕЛЕЙ

**Цель работы:** Знакомство со схемотехникой усилителей сигнального тока, развитие умений сборки и исследования радиоцепей.

**Оборудование:** генератор синусоидальных сигналов звуковых частот, осциллограф С1-96, двухполярный источник питания постоянного напряжения, лабораторный макет, паяльник, соединительные провода.

### Введение.

Повторителями называются усилители, обеспечивающие близость, в идеале - идентичность, напряжений входного и выходного сигналов. При этом увеличение мощности сигнала - усиление сводится к усилению сигнального тока, т.е. сигнальный ток, выдаваемый повторителем в нагрузку, превышает ток, потребляемый им от источника сигнала.

Простейший эмиттерный повторитель сигналов положительной полярности состоит из одного транзистора (Рис.5.1). Если  $u_{вх} > 0$ , то база-эмиттерный переход транзистора проводит ток и  $u_{вых}$  отличается от  $u_{вх}$  на величину прямого падения напряжения на р-п-переходе - около 0.7 В. При изменении  $u_{вх}$ , с условием, что  $u_{вх} > 0.7$  В,  $u_{вых}$  повторит эти изменения. Ток, потребляемый от источника сигнала, -  $i_{вх}$  - это базовый ток транзистора. Ток, который протекает по  $R_H$ , - выходной ток  $i_{вых}$  - это эмиттерный ток транзистора, который в  $(1+\beta)$  раз больше базового. Таким образом, коэффициент усиления тока равен

$$k_i = \frac{i_{вых}}{i_{вх}} = 1 + \beta \quad (5.1)$$

В зависимости от типа и экземпляра транзистора он составляет величину от 50 до 200.

График зависимости  $u_{вых}$  от  $u_{вх}$  имеет вид ломаной линии (рис.5.1)

Аналогично, используя транзистор р-п-р, строится повторитель сигналов отрицательной полярности (рис. 5.2). В данном случае требуется источник питания отрицательной полярности.

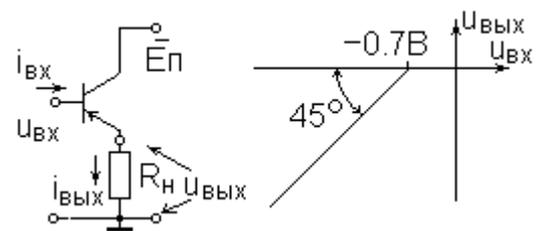
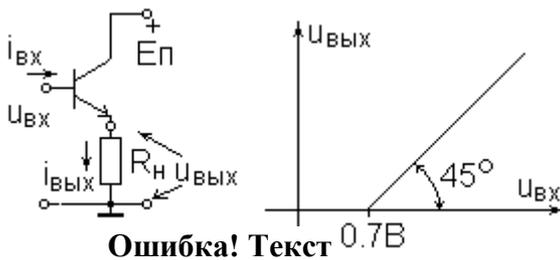


Рис. 5.2

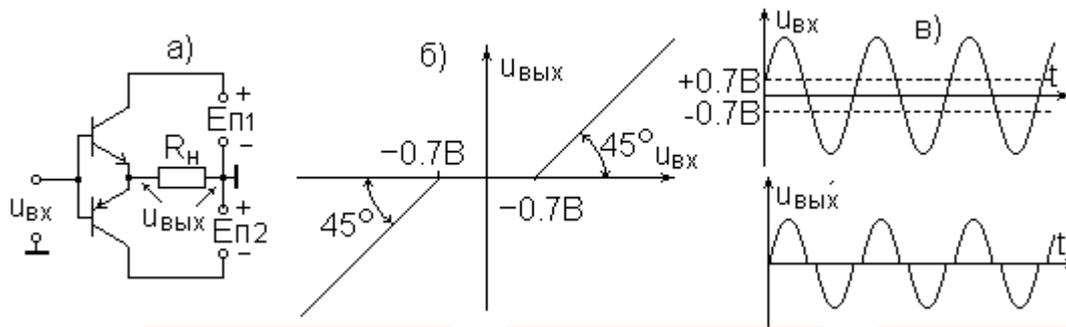


Рис. 5.3

Объединяя схемы повторителей положительной и отрицательной полярностей, получим двухполярный повторитель, показанный на рис. 5.3а.

Заметим, что для построения двухполярного повторителя необходимы два источника питания  $E_{п1}$  и  $E_{п2}$ . Если напряжение входного сигнала превышает  $+0.7\text{ В}$ , то ток через  $R_{н}$  обеспечивает верхний по рис. 5.3а транзистор n-p-n типа. Когда  $u_{вх} < -0.7\text{ В}$ , усиление осуществляет нижний транзистор p-n-p типа. Однако, когда  $u_{вх}$  находится в интервале от  $-0.7\text{ В}$  до  $+0.7\text{ В}$ , оба транзистора обесточены,  $i_{вых}$  и  $u_{вых}$  равны нулю. На рис. 5.3б. показан график зависимости напряжения выходного сигнала от напряжения входного для двухполярного повторителя, а на рис. 5.3в – осциллограммы входного и выходного сигналов при усилении синусоидального сигнала.

Нелинейная зависимость  $u_{вых}$  от  $u_{вх}$  обуславливает искажение формы сигнала при усилении. Для подавления этих искажений необходимо к сигнальным напряжениям, подаваемым на базы транзисторов добавить постоянные напряжения смещения:  $+0.7\text{ В}$  – для n-p-n транзистора и  $-0.7\text{ В}$  – для p-n-p транзистора. С этой целью повторитель дополняется цепью смещения рабочих точек транзисторов. Схема такого повторителя показана на рис. 5.4.

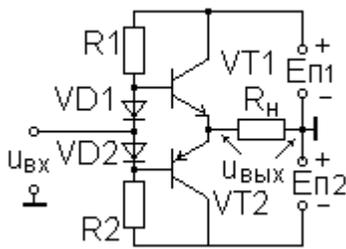


Рис. 5.4

Для нормальной работы цепи смещения двухполярного повторителя необходимо чтобы оба диода цепи смещения ( $VD1, VD2$ ) были всегда под прямым током через них. Ток диодов складывается из постоянного тока, который определяют  $R1$  и  $R2$  и сигнального

тока, определяемого  $u_{вх}$ . Амплитуду сигнального тока можно определить, если заданы максимальная амплитуда сигнального напряжения на выходе повторителя  $U_{m\max}$  и  $R_{н}$ . Тогда  $I_{m\text{вых}} = U_{m\max} / R_{н}$ . Амплитуда базового тока транзисторов будет равна

$$I_{m\text{бба}} = \frac{I_{m\text{вых}}}{1 + \beta} = \frac{U_{m\max}}{R_{н}(1 + \beta)}$$

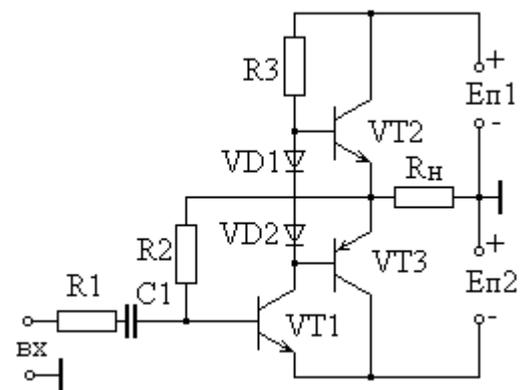
Условие незапирания диодов цепи смещения имеет вид  $I_{см} > I_{мбаз}$ , где  $I_{см}$  – ток смещения, определяемый  $R1, R2$ :

$$I_{см} = \frac{E_{п1} - U_{m\max} - U_{\text{бэ}}}{R_1}$$

$$R_1 < \frac{E_{п1} - U_{m\max} - 0.7\text{ В}}{U_{m\max}} (1 + \beta) R_{н} \quad (5.2)$$

Такую же величину должен иметь резистор  $R2$ . Заметим, что резисторы цепочки смещения шунтируют вход повторителя, уменьшая его входное сопротивление в несколько раз.

Часто один из резисторов цепи смещения заменяется транзистором, осуществляющим дополнительное усиление сигнала. При этом второй оставшийся резистор выполняет функцию балластного резистора в получающемся усилитель-



**Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.** Рис. 5.5. Двухполярный эмиттерный повторитель с дополнительным усилительным каскадом

ном каскаде. Схема повторителя с добавочным усилительным каскадом показана на рис.5.5. Величина резистора  $R_3$  определяется по формуле (5.2).

Начальное положение рабочей точки транзистора VT1 должно обеспечивать нулевое напряжение на выходе повторителя (на  $R_H$ ) в отсутствии сигнала. Для этого токовая координата рабочей точки должна иметь следующее значение  $I_{30} = E_{п1} / R_3$ . Отсюда  $I_{10vt1} = E_{п1} / (\beta R_3)$ . При известной величине  $I_{10}$  определяется резистор цепи смещения рабочей точки  $R_2 = (E_{п2} - 0.7V) / I_{10vt1}$ .

**Составные транзисторы в эмиттерных повторителях.** Главный параметр повторителя – коэффициент усиления тока определяется коэффициентом передачи тока транзистора:  $k_i = (1 + \beta)$ . Как отмечалось, коэффициент  $\beta$  биполярных транзисторов находится в интервале 50 – 150, что бывает недостаточно для получения нужного коэффициента усиления тока.

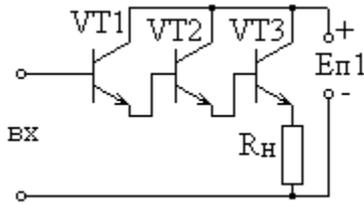


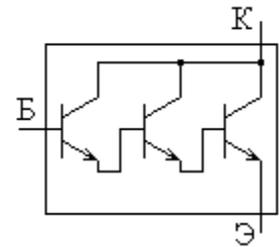
Рис. 5.6

Существенного увеличения :  $k_i$  можно добиться путем каскадирования нескольких эмиттерных повторителей. На рис.5.6 показан трехкаскадный повторитель сигналов положительной полярности. Коэффициент усиления тока равен произведению :  $k_i$  каждого из каскадов :  $k_i = (1 + \beta_1)(1 + \beta_2)(1 + \beta_3)$ . Оказалось удобно рассматривать данную и подобные цепи не в виде многокаскадного устройства, а в виде однокаскадного повторителя с эквивалентным транзистором, у которого  $\beta = (1 + \beta_1)(1 + \beta_2)(1 + \beta_3) - 1$ .

Комбинацию нескольких транзисторов назвали составным транзистором. Подобно обычному транзистору она имеет три электрода (база, эмиттер, коллектор) и показана на рис.5.7.

Обычно составной транзистор составляется из двух транзисторов, но в некоторых случаях это количество доходит до 3-4.

По аналогии с рис.5.7 легко изобразить схему составного р-п-р транзистора Дарлингтона. Составные транзисторы этого типа имеют очевидный недостаток, заключающийся в том, что последовательно включенные базо-эмиттерные переходы транзисторов имеют в несколько раз большую величину прямого напряжения на базо-эмиттерном переходе составного транзистора в сравнении с одиночным. Можно составлять транзисторы, получая те же эквивалентные коэффициенты  $\beta$ , но имеющий только один р-п – переход на участке от базы до эмиттера. Схемы таких составных транзисторов показаны на рис.5.8. Как видно из рисунка, между выводами базы и эмиттера такого составного транзистора находится только один р-п-переход, и прямое напряжение на нем составит 0.7 В. Эквивалентный коэффициент передачи тока базы таких и других составных транзисторов приблизительно равен произведению коэффициентов передачи входящих в его состав транзисторов.



**Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.** Рис. 5.7. Составной транзистор Дарлингтона

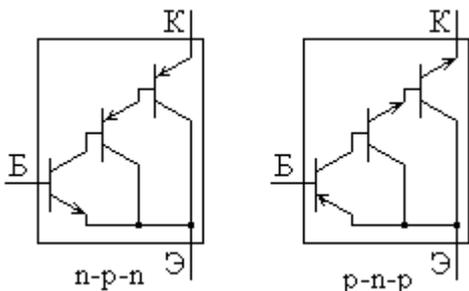


Рис. 5.8. Составные транзисторы разнотипного состава

Эквивалентный коэффициент передачи тока базы таких и других составных транзисторов приблизительно равен произведению коэффициентов передачи входящих в его состав транзисторов.

### Экспериментальное задание.

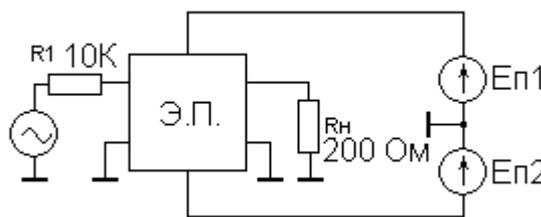
Сопоставьте макет со схемой двухтактного эмиттерного повторителя (рис.5.4).

1. Путем необходимых соединений на макете соберите простейший эмиттерный повторитель сначала по схеме, изображенной на рис.5.1, а затем по схеме, изображенной на рис. 5.2. В обоих случаях:

а) получите на экране осциллографа график зависимости  $u_{вых} = f(u_{вх})$  и перенесите эти графики в тетрадь вместе со схемой повторителя и схемой лабораторной установки, позволяющий полу-

читать данные графики. (Для получения на экране графика необходимо сигнал – аргумент подать на вход «X», а сигнал – функцию - на вход «Y» осциллографа. Сигнал – аргумент взять от генератора синусоидальных сигналов.)

б) определите коэффициент усиления тока -  $K = i_{\text{вых}} / i_{\text{вх}}$ . Амплитуды входного и выходного токов определяются с помощью закона Ома по измеренным амплитудам напряжений на добавочном



входном резисторе –  $R_1$  и сопротивлении нагрузки -  $R_n$  (см. рис. 5.9).

**Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.** Рис. 5.9.

Структура цепи для измерений коэффициента усиления тока

2. Постройте двухтактный повторитель по схеме рис. 5.3. Для его питания потребуется два источника постоянного напряжения  $E_{п1}$ ,  $E_{п2}$ . Используйте источники прибора «СУРА».

Получите на осциллографе графики и осциллограммы, аналогичные показанным на рис. 5.3.

3. Дополните двухтактный повторитель резистивно-диодной цепочкой смещения рабочих точек транзисторов, что должно устранить искажения выходного сигнала. Попробуйте замкнуть один из диодов данной цепочки, опишите вызванные этим изменения в работе повторителя.

4. Определите коэффициент усиления тока получившегося повторителя.

#### Оформление отчета.

Отчет о работе должен содержать:

1. Название работы, цель, перечень используемого оборудования.
2. Схемы исследуемых эмиттерных повторителей, экспериментально полученные графики зависимостей напряжения выходного сигнала от напряжения входного.
3. Осциллограммы напряжений выходных сигналов при синусоидальном входном сигнале.
4. Экспериментальные данные снятые для определения коэффициента усиления по току и формулу, по которой осуществлялось вычисление.

#### Контрольные вопросы

1. Какие усилители называют повторителями? В чем заключается усилительный эффект повторителя?
2. Изобразите схемы простейших однотактных и двухтактных повторителей на биполярных транзисторах и графики их зависимости напряжения выходного сигнала от напряжения входного сигнала.
3. Чему равен коэффициент усиления тока простейших повторителей?
4. В чем состоит эффект искажений сигнала "ступенька" в двухтактном повторителе, и как ослабляется данный тип искажений?
5. Изобразите схемы двухкаскадных эмиттерных повторителей на однотипных и разнотипных транзисторах с цепочками подавления искажений "ступенька".
6. Дайте объяснения осциллограммам выходного напряжения повторителя, исследуемого в работе, без диода VD2 и с ним.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6. ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ СИГНАЛОВ ЗВУКОВЫХ ЧАСТОТ

**Цель работы:** Закрепление знаний усилительных устройств на примере создания усилителя мощности для компьютерных звуковых колонок. Развитие навыков монтажа и исследования радиоэлектронных цепей.

**Оборудование:** генератор синусоидальных сигналов звуковых частот, осциллограф С1-96, источник питания постоянного напряжения, лабораторный макет, паяльник, соединительные провода.



Рис. 6.1

резистивной нагрузке усилителя мощность выходного сигнала равна

$$P_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{твых}} \cdot I_{\text{твых}}}{2} \quad (6.1)$$

Из данной формулы видно, что для получения заданной мощности необходимо обеспечить определенные амплитуды напряжения и тока выходного сигнала усилителя. Обычно эта задача решается в разных каскадах усилителя. Первые каскады усиливают амплитуду сигнального напряжения до заданного уровня  $U_{\text{твых}}$ , а последний каскад – эмиттерный повторитель усиливает амплитуду сигнального тока до нужной величины  $I_{\text{твых}}$ . Данный порядок действий определяет структуру усилителя мощности, показанную на рис.6.1.

При построении эмиттерного повторителя усилителя мощности целесообразно использовать двухтактный повторитель, изученный в предыдущей работе. Заменяв один из резисторов цепочки подавления искажений на транзистор, получим входной усилительный каскад – усилитель амплитуды напряжения. На рис. 6.2 показана получающаяся при этом схема усилителя мощности. Добавленный усилительный каскад состоит из транзистора  $VT_1$ , балластного резистора  $R_3$ , резистора смещения рабочей точки транзистора  $R_2$ , разделительного конденсатора  $C_1$  и добавочного резистора  $R_1$ , который улучшает линейность входной цепи усилителя и уменьшает его усиление.

Требуемая величина сопротивления  $R_3$  и постоянной составляющей коллекторного тока –  $I_{30}$  определяются условием линейности работы данного каскада, рассмотренного в 4 лабораторной работе:

$I_{30} > I_{\text{твых}} + I_{\text{м}R_3} = U_{\text{твых}}/R_{\text{нэкв}} + U_{\text{твых}}/R_3$ , где  $R_{\text{нэкв}} = R_{\text{н}} \cdot k_i$  ( $k_i$  – коэффициент усиления тока эмиттерным повторителем)

Кроме того, необходимо обеспечить нулевую величину напряжения на выходе усилителя в отсутствии сигнала, т.е. падение напряжения на  $R_3$  и  $VD_1$ , создаваемое током  $I_{30}$ , должно равняться  $E_{п1}$ :

$$I_{30} R_3 + U_{VD1} = E_{п1}$$

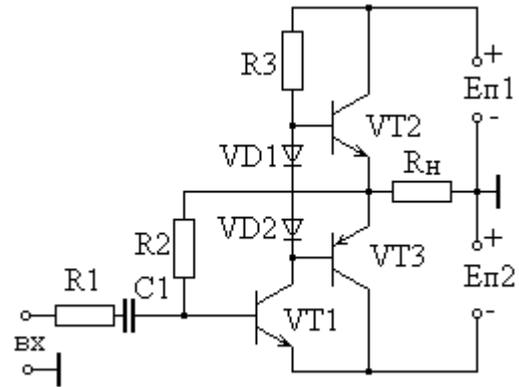
Совместное решение этих соотношений дает требуемые величины  $R_3$  и  $I_{30}$ :

$$R_3 < \left( \frac{E_{п1} - U_{VD1}}{U_{\text{твых}}} - 1 \right) R_{\text{нэкв}} \quad I_{30} = \frac{E_{п1} - U_{VD1}}{R_3} \quad (6.1)$$

### Введение.

Любой усилитель по своему определению увеличивает мощность усиливаемого сигнала и, следовательно, является усилителем мощности. Однако термин «Усилитель мощности» служит для обозначения таких усилителей, для которых мощность выходного сигнала является основным рабочим параметром.

При усилении синусоидальных сигналов и



**Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.** Рис. 6.2.

Усилитель мощности в виде двухтактного эмиттерного повторителя с дополнительным усилительным каскадом

Оптимизация построения усилителя мощности требует уменьшения напряжений источников питания  $E_{п1}=E_{п2}$  и минимизации тока  $I_{30}$ . Однако полученные формулы для  $R_3$  и  $I_{30}$  ограничивают возможности этого, поскольку для положительности  $R_3$  необходимо  $E_{п1} > U_{мввых} + U_{VD1}$ . Чем слабее обеспечивается данное неравенство, тем меньше будет величина  $R_3$  и больше  $I_{30}$ . Компромиссным решением будет  $E_{п1}=E_{п2}= U_{мввых} + 4В$ . С целью уменьшения  $I_{30}$  необходимо возможно большая величина  $R_3$ , что требует, возможно, большую величину  $R_{нэкв}$ . При заданном  $R_n$ , это означает возможно большую величину коэффициента усиления тока эмиттерным повторителем. Для увеличения коэффициента усиления тока в эмиттерном повторителе вместо одиночных транзисторов используются составные (см. описание ЛР №5). Пример определения основных параметров цепи усилителя мощности приведен в приложении.

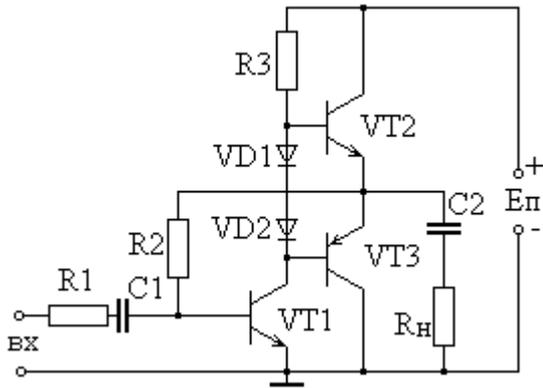


Рис. 6.3. Усилитель мощности с однополярным питанием

Применение двух источников питания усилителя мощности бывает не всегда удобно. Если допустимо применение разделительных конденсаторов на входе и выходе усилителя, можно заменить два источника питания одним с напряжением  $E_{п}=E_{п1}+E_{п2}$ . При этом клемма общего провода перенесется на отрицательную клемму  $E_{п}$  (См. рис.6.3).

**Экспериментальное задание.**  
В ходе настоящей лабораторной работы необходимо рассчитать собрать и испытать усилитель мощности

для компьютерной звуковой колонки.

1. Получите у преподавателя исходные данные для построения усилителя:  $R_{вых}$ ,  $R_n$ ,  $v_{min}$ .
2. Рассмотрите лабораторный макет, на котором VT1 - КТ815, VT2 - КТ815-КТ816, VT3 - КТ814-КТ817.
3. Изобразите подробную схему усилителя с обозначением всех элементов, включая транзисторы и источник питания.
4. Ориентируясь на использование в выходном эмиттерном повторителе составных транзисторов с усилением тока  $\beta \approx 1000$ , рассчитайте номиналы элементов усилителя мощности с однополярным питанием: R1, R2, R3, C1, C2,  $E_{п}$  (рис.8.6.)
5. Установите в макет рассчитанные элементы: R1, R2, R3,  $R_n$ .
6. Подключите усилитель к источнику питания, подайте на вход синусоидальный сигнал и с помощью осциллографа убедитесь в работоспособности усилителя. Определите основные характеристики усилителя на частоте сигнала 1 КГц: максимальную мощность выходного сигнала, коэффициент усиления мощности, коэффициент усиления амплитуды напряжения, входное сопротивление.
7. Подключите вместо резистора  $R_n$  звуковую колонку и на слух оцените качество звука.

### Оформление отчета

Отчет должен содержать название работы, перечень оборудования, схему создаваемого усилителя мощности, подробный расчет цепи усилителя с выводом недостающих в описании формул, заполненную таблицу следующего вида.

Параметр	$E_{п}$	$R_{вых}$	$k_u$	$k_p$	$r_{вх}$	$U_{мввых}$	$v_{min}$
Расчет							
Эксперимент							

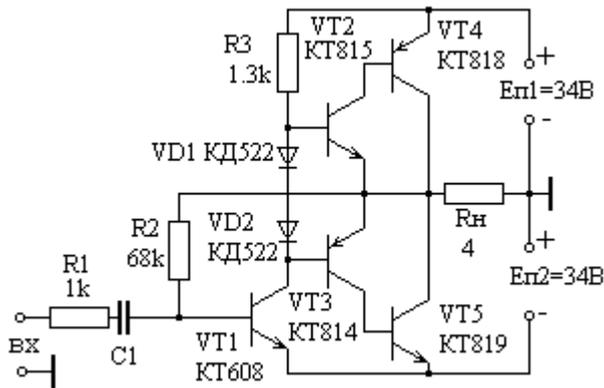
### Контрольные вопросы

1. Какие усилители называют усилителями мощности?

2. Изобразите наиболее употребительную структуру усилителя мощности.
3. Изобразите схему усилителя мощности, полученную из схемы двухполярного повторителя путем модификации цепи подавления искажений типа «ступенька».
4. На основе каких условий определяются номиналы элементов данной цепи. Выведите соответствующие формулы.
5. Как определяются емкости разделительных конденсаторов в цепи вашего усилителя?

**Приложение. Пример проектирования усилителя мощности.** Рассмотрим фрагмент проектирования усилителя мощности на примере. Пусть требуется построить усилитель с мощностью выходного сигнала  $P_{\text{вых}}=100$  Вт. При  $R_n=4$  Ом. Амплитуда напряжения выходного сигнала определится из очевидной формулы  $U_{\text{мвых}}=(2P_{\text{вых}}R_n)^{1/2}=28.3$ В. Амплитуда сигнального тока на выходе составит  $I_{\text{мвых}}=U_{\text{мвых}}/R_n=7.1$ А.

В качестве мощных транзисторов эмиттерного повторителя необходимо взять такие, у которых допустимое напряжение коллектор – эмиттер превышает  $U_{\text{мвых}}$  не менее чем в 3 раза, а допустимый ток коллектора больше  $I_{\text{мвых}}$  в 1.5 – 2 раза. Этим условиям удовлетворяют транзистор КТ819 – n-p-n типа и КТ818 – p-n-p типа. Выходной эмиттерный повторитель будет питаться от двух источников одинаковой ЭДС  $E_{п1}=E_{п2}$ , которая должна превосходить  $U_{\text{мвых}}$  не менее чем на 4-5 В. Возьмем  $E_{п1}=E_{п2}=34$  В.



**Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.** Рис. 6.4. Схема усилителя мощности

Возьмем  $R_3=1.3$ К. Постоянная составляющая коллекторного тока  $VT1$  ( $I_{30VT1}$ ), проходя по  $R_3$ , должна создать падение напряжения, равное  $E_{п1}$ . Это определяет необходимые величины  $I_{30VT1}=E_{п1}/R_3=26.15$  mA и  $I_{10VT3}=I_{30VT1}/\beta_{VT1}=0.52$  mA. Коэффициент передачи тока  $VT1$  ( $\beta_{VT1}$ ) взят равным 50. Реальный транзистор может имеет другое значение  $\beta$  и, следовательно, другое требуемое значение постоянной составляющей тока базы. Поэтому величина сопротивления  $R_2=E_{п2}/I_{10VT1}=65.4$ k может потребовать корректировки под конкретный экземпляр  $VT1$ . Ближайший к полученному значению стандартный номинал сопротивления равен 68К, он и обозначен на схеме усилителя (рис.6.4).

Определим важные рабочие параметры усилителя: входную проводимость ( $g_{вх}$ ) и коэффициент усиления амплитуды напряжения ( $k_u$ ). Входная дифференциальная проводимость транзистора  $VT$  в рабочей точке равна  $g_{11}=I_{30VT1}/(U_T(1+\beta_{VT1}))=0.02$ Сим ( $r_{11}=50$  Ом). Прямая проходная проводимость  $g_{31}=g_{11}\beta_{VT1}=1$ Сим. Можно положить  $g_{13}=0$ ,  $g_{33}=0$ , тогда  $g_{вх}=g_{11}$ ,  $|k_u|=g_{31}/(1/R_3+1/2000R_n)=1118$ .

В схеме усилителя мощности на рис.6.4 входная цепь содержит дополнительный резистор  $R_1$ , который должен ослабить нелинейность базо-эмиттерного перехода  $VT1$  и улучшить линейность усилителя. Дело в том, что  $VT1$  работает в режиме усиления большого сигнала. Переменная составляющая его коллекторного тока имеет амплитуду

Выбранные транзисторы имеют небольшие коэффициенты передачи тока  $\beta=50$  и не могут обеспечить достаточный коэффициент усиления тока. Поэтому образуем на выходе составные транзисторы разнотипного вида по рис.5.8. Кроме того, используем повторитель с дополнительным усилительным каскадом (рис.6.3). В результате получим схему усилителя мощности, показанную на рис.6.4.

Определим номиналы элементов цепи усилителя. Коэффициент усиления тока составными транзисторами  $\beta \approx \beta_1\beta_2=2000$ . С помощью (6.1) определим

$$R_3 < \frac{E_{п1} - U_{m\max} - 0.7B}{U_{m\max}} (1 + \beta) R_n = 1.4k$$

$I_{м3VT1} = U_{мввых}(1/R3 + 1/2000R_H) = 25$  мА. Это означает, что коллекторный ток изменяется от  $I_{30VT1} - I_{м3VT1} = 1$  мА до  $I_{30VT1} + I_{м3VT1} = 51$  мА. При этом дифференциальная входная проводимость также изменяется от  $8 \cdot 10^{-4}$  Сим до  $4 \cdot 10^{-2}$  Сим. Ясно, что синусоидальное напряжение входного сигнала при таких условиях будет создавать несинусоидальное изменение базового тока транзистора VT1. Для улучшения линейности входной цепи усилителя устанавливается добавочный резистор R1, сопротивление которого выбирается примерно равным входному сопротивлению транзистора при минимальном токе коллектора. В нашем случае это  $1/8 \cdot 10^{-4}$  Сим. Установим резистор  $R_1 = 1$  к.

Установка резистора R1 вместе с улучшением линейности усиления уменьшит коэффициент усиления амплитуды напряжения приблизительно в  $g_{вх}R_1 = 20$  раз. В результате получим  $|k_u| \approx 50$ ; для получения амплитуды выходного сигнала 28 В, требуется амплитуда входного сигнала, равная 0.56 В.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7 ИЗУЧЕНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

**Цель работы:** знакомство со схемотехникой и параметрами ОУ, закрепление навыков использования радиоизмерительных приборов.

**Приборы и оборудование:** лабораторный макет ОУ, двухполярный источник питания, генератор синусоидальных сигналов, электронный осциллограф, авометр

### Введение.

Первоначально операционный усилитель (ОУ) предназначались для выполнения линейных операций над электрическими сигналами:

умножение сигнала на постоянный коэффициент

$$u_{\text{ВЫХ}} = k u_{\text{ВХ}}, \quad (7.1)$$

суммирование сигнальных напряжений,

$$u_{\text{ВЫХ}} = k_1 u_{\text{ВХ1}} + k_2 u_{\text{ВХ2}} + k_3 u_{\text{ВХ3}} + \dots; \quad (7.2)$$

дифференцирование сигнала:

$$u_{\text{ВЫХ}} = \tau du_{\text{ВХ}}/dt, \quad (7.3)$$

интегрирование сигнала:

$$u_{\text{ВЫХ}} = (1/\tau) \int u_{\text{ВХ}} dt \quad (7.4)$$

Этот перечень операций может быть реализован, если ОУ будет двухвходовым и обладать пропорциональной зависимостью напряжения выходного сигнала от разности напряжений входных сигналов.

Условное обозначение операционного усилителя показано на рис. 7.1, где  $u_{11}$  и  $u_{12}$  – напряжения двух входных сигналов,  $u_{\text{ВЫХ}}$  – напряжение выходного сигнала. Взаимосвязь сигнальных напряжений для идеального ОУ выражается формулой прямой пропорциональности

$$u_{\text{ВЫХ}} = k(u_{11} - u_{12}), \quad (7.5)$$

Причем коэффициент усиления  $k$  должен иметь возможно большее, в идеале – бесконечно большое значение.

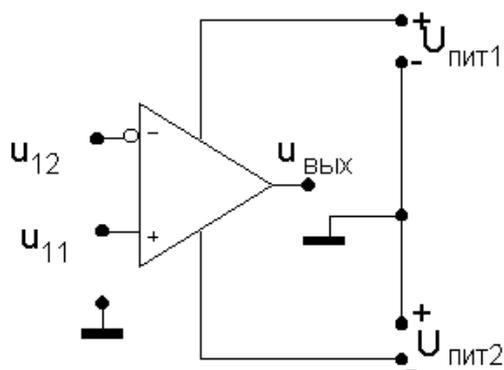


Рис. 7.1

Очевидно, что соотношение (7.5) может выполняться только в ограниченном диапазоне изменения  $u_{\text{ВЫХ}}$ , которое не может выйти за границы напряжений источников питания. Питание ОУ – двухполярное, осуществляется от двух источников  $+U_{\text{ПИТ1}}$  и  $-U_{\text{ПИТ2}}$ , как показано на рисунке 7.1. При этом зависимость между сигнальными напряжениями (7.5) будет справедливо только при  $+U_{\text{ПИТ1}} > u_{\text{ВЫХ}} > -U_{\text{ПИТ2}}$ , и в общем виде соответствует графику, показанному на рис. 7.2. В области активного режима ОУ напряжение выходного сигнала пропорционально разности

напряжений входных сигналов. В областях насыщения усилителя  $u_{\text{вых}} \approx +U_{\text{пит1}}$  или  $-U_{\text{пит2}}$ .

На практике и такую взаимозависимость сигнальных напряжений реализовать невозможно. В области активного режима напряжение выходного сигнала реального ОУ выражается следующей формулой:

$u_{\text{вых}} = k[u_{11} - u_{12} + U_{\text{сдв}} + (u_{11} + u_{12})/a]$ , (6) в которой параметр «k» является коэффициентом усиления напряжения, а параметр «a» называют коэффициентом ослабления синфазного сигнала. Третий параметр « $U_{\text{сдв}}$ » называется напряжением сдвига нулевого уровня.

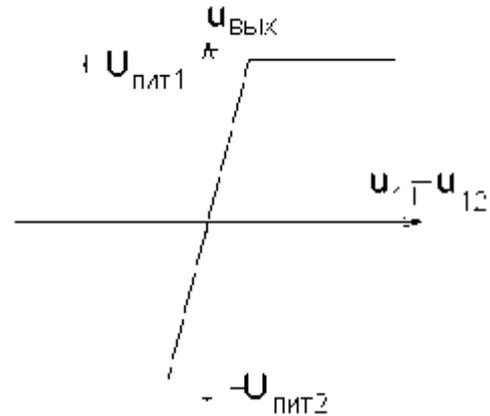
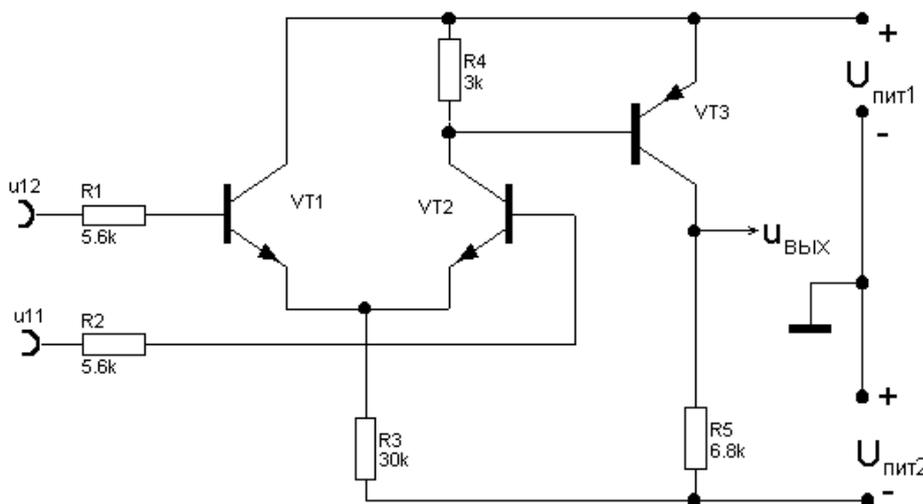
В лабораторной работе необходимо измерить эти параметры в лабораторном макете операционного усилителя.

**Описание лабораторного макета.** В лабораторном макете, показанном на рис. 7.3, реализован простейший ОУ, который содержит три транзистора и пять резисторов. Транзисторы VT1, VT2 совместно с резисторами R1-R4 образуют дифференциальный усилитель. Основным свойством этого усилителя является зависимость коллекторных токов транзисторов, главным образом, от разности напряжений входных сигналов  $u_{11} - u_{12}$ . Этим и объясняется название усилителя – дифференциальный. Выходной сигнал этого усилителя направляется для дальнейшего усиления на вход второго усилительного каскада, построенного на транзисторе VT3 и резисторе R5. Величины резисторов R1-R5 и напряжения источников питания подобраны так, чтобы при  $u_{11} = u_{12} = 0$  напряжение на выходе ОУ также было нулевым:  $u_{\text{вых}} = 0$ .

#### Задание на проведение экспериментов.

**Предварительная настройка макета ОУ.** Соедините оба входа ОУ с общим проводом, что обеспечит  $u_{11} = u_{12} = 0$ . Подключите макет к двухполярному источнику питания. К выходной клемме ОУ подключите вход Y одного из каналов осциллографа. После включения источника питания установите, с помощью авометра,  $+U_{\text{пит1}} = 10$  В. Изменяя величину напряжения  $-U_{\text{пит2}}$ , добейтесь нулевой величины напряжения выходного сигнала ОУ, которое контролируется осциллографом. Если это удалось сделать, макет ОУ можно считать настроенным.

**Измерение зависимостей  $u_{\text{вых}} = f_1(u_{11})$  и  $u_{\text{вых}} = f_2(u_{12})$ .** Данные зависимости необходимы для определения коэффициента усиления ОУ и величины «напряжения сдвига нуля». Один из входов ОУ необходимо отключить от общего провода и подать на него сигнал с генератора синусоидального сигнала. Этот же сигнал одновременно должен поступать на вход Y второго канала осциллографа. Для получения на экране графика искомой зависимости необходимо перевести осциллограф в режим графопостройки.



**Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует. Рис. 7.2**

отключить от общего провода и подать на него сигнал с генератора синусоидального сигнала. Этот же сигнал одновременно должен поступать на вход Y второго канала осциллографа. Для получения на экране графика искомой зависимости необходимо перевести осциллограф в режим графопостройки.

Рис. 7.3. Схема лабораторного макета операционного усилителя

теля, при котором отклонения луча по оси X пропорционально напряжению входного, а по оси Y – выходного сигнала ОУ. Получив на экране график, следует регулировкой амплитуды сигнала генератора и усиления каналов осциллографа добиться удобных для восприятия размеров и перерисовать его в тетрадь. Аналогичные действия проводятся со вторым входом ОУ, причем настройки осциллографа необходимо оставить прежними, а полученный график наложить на ранее нарисованный.

*Измерение реакции ОУ на синфазный сигнал.* При этом измерении сигнал от генератора подается одновременно на оба входа ОУ и на вход X осциллографа. Вновь получаем график зависимости напряжения выходного сигнала от напряжения синфазного входного сигнала. Этот график перенесем в тетрадь.

*Вычисление параметров макета ОУ.* Используя полученные графики зависимостей  $u_{\text{ВЫХ}}=f_1(u_{11})$ ,  $u_{\text{ВЫХ}}=f_2(u_{12})$ ,  $u_{\text{ВЫХ}}=f_3(u_{12}=u_{11})$  определите три параметра:  $k$ ,  $U_{\text{сдв}}$ , а в формуле (6), выражающей зависимость напряжения выходного сигнала от напряжений входных сигналов в реальном ОУ. Данная формула имеет следующий вид:

### Контрольные вопросы.

1. Назовите предполагаемые использования операционного усилителя.
2. Запишите формулу, выражающую график проходной характеристики ОУ в области активного режима и изобразите график этой характеристики в большом диапазоне напряжений входных сигналов.
3. Как определяются основные параметры реального ОУ: коэффициент усиления, коэффициент подавления синфазного сигнала, напряжение сдвига нулевого уровня.
4. Изобразите схему ОУ лабораторного макета. По данной схеме определите какой из входов является инвертирующим, а какой неинвертирующим.

**Оформление отчета.** Отчет должен содержать название работы, цель, список оборудования, схему лабораторного макета ОУ, схемы проведения опытов и их результаты в виде графиков.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8. ПОСТРОЕНИЕ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

**Приборы и оборудование:** лабораторный макет ОУ, двухполярный источник питания, генератор синусоидальных сигналов, электронный осциллограф, авометр

### Введение.

Собственный коэффициент усиления ОУ очень велик. Уменьшая его с помощью обратной связи можно получать усилители с любым заданным коэффициентом усиления амплитуды напряжения. Обратная связь, т.е. возвращение части выходного сигнала обратно на вход является необходимым атрибутом использования ОУ и единственным способом обеспечить активный режим его работы.

На рис.8.1 показаны схемы двух усилителей, построенных на основе ОУ. В обоих усилителях выходной сигнал ОУ ( $u_2$ ) возвращается на инвертирующий вход через резистивный делитель напряжения R1-R2. Усиливаемый сигнал в первом случае подается на неинвертирующий вход ОУ, а во втором – через R1 на инвертирующий.

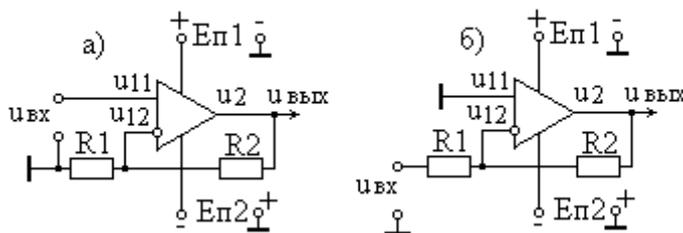


Рис. 8.1. Схемы усилителей на основе ОУ с заданным коэффициентом усиления

Усиливаемый сигнал в первом случае подается на неинвертирующий вход ОУ, а во втором – через R1 на инвертирующий.

Определим зависимость напряжения выходного сигнала  $u_{\text{ВЫХ}}$  от входного  $u_{\text{ВХ}}$ . Причем речь идет мгновенных величинах сигнальных напряжений. Способ вычислений очень простой: записываются

выражения для  $u_{11}$   $u_{12}$  и подставляются в уравнение ОУ

$$u_2 = k(u_{11} - u_{12}), \quad (8.1)$$

из которого выражается искомая величина.

Для схемы (а) рис.8.1

$$u_{11} = u_{вх}, \quad u_{12} = u_{вых} R_1 / (R_1 + R_2).$$

Подставив это в (8.1), получим

$$(u_{ex} - u_{вых} \frac{R_1}{R_1 + R_2})k = u_{вых} \quad \text{откуда получим } u_{вых} = u_{ex} \frac{R_1 + R_2}{R_1 + \frac{R_1 + R_2}{k}}$$

Ввиду того, что собственный коэффициент усиления ОУ –  $k$  очень велик вторым слагаемым в знаменателе можно пренебречь, т.е. считать, что  $(R_1 + R_2)/k \ll R_1$ . В этом случае

$$u_{вых} = u_{вх} (1 + R_2/R_1). \quad (8.2)$$

Таким образом, первый усилитель, показанный на рис.8.1, обладает безупречной линейностью и дает положительный коэффициент усиления сигнального напряжения, равный  $k_u = 1 + R_2/R_1$ . Его называют неинвертирующим усилителем.

Для схемы (б) рис.8.1 напряжения на входах ОУ запишутся в виде:

$$u_{11} = 0, \quad u_{12} = u_{вх} R_2 / (R_1 + R_2) + u_{вых} R_1 / (R_1 + R_2).$$

После подстановки в 8.1 и выражения  $u_{вых}$  получим

$$u_{вых} = -u_{ex} \frac{kR_2}{kR_1 + R_1 + R_2} \approx u_{ex} \left(-\frac{R_2}{R_1}\right). \quad (8.3)$$

Данный усилитель обеспечивает отрицательный коэффициент усиления, с модулем, равным  $R_2/R_1$ . Его называют инвертирующим усилителем.

Из рассмотрения простейших усилителей, построенных на основе ОУ, следует простой принцип описания подобных устройств. Обратная связь, создаваемая резистором  $R_2$ , при огромном собственном коэффициенте усиления ОУ заставляет напряжение на инвертирующем входе ОУ ( $u_{12}$ ) всегда быть почти равным напряжению неинвертирующего входа ( $u_{11}$ ). Это позволяет очень просто вычислить напряжение выходного сигнала, выразив через него  $u_{12}$  и приравняв его к  $u_{11}$ .

Требуемая величина коэффициента усиления определяет только отношение сопротивлений ( $R_2/R_1$ ). Для однозначного их вычисления необходимо дополнительное условие. В качестве такового можно использовать требование малости напряжения, выделяемого входным током ОУ на эквивалентном резисторе, подключенном к инвертирующему входу. Малость напряжения означает, что оно должно быть не более напряжения сдвига нуля, которое в современных ОУ составляет единицы милливольт. Величина входного тока современных ОУ обычно составляет десятки наноампер. Если задаться падением напряжения 5мВ и входным током 50 нА, то получим

$$R_1 R_2 / (R_1 + R_2) \leq 10^5 \text{ Ом}. \quad (8.4)$$

### *Задание для экспериментов.*

Лабораторный макет содержит микросхему – операционный усилитель, используя который необходимо построить усилитель с заданным положительным коэффициентом усиления и усилитель с заданным отрицательным коэффициентом усиления напряжения.

Получите значения требуемых коэффициентов усиления. Рассмотрите лабораторный макет, определите места установки резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ , клеммы подключения источников питания, входные клеммы усилителя.

Изобразите в тетради схему усилителя с положительным коэффициентом усиления. Используя формулы (8.2-8.4), рассчитайте необходимые величины сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$  для данного усилителя. Установите резисторы в макет. Подключите макет к источнику питания, установив  $E_{п1} = E_{п2} = 10 \text{ В}$ . Используя в качестве входного сигнал НЧ генератора, определите с помо-

щью осциллографа величину и знак полученного коэффициента усиления. Увеличивая амплитуду входного сигнала, определите величину амплитуды выходного сигнала, при которой усилитель выходит из режима линейного усиления.

Проделайте все действия, предыдущего абзаца для усилителя с отрицательным коэффициентом усиления,

### Оформление отчета

Отчет должен содержать название работы, цель, перечень оборудования. Схемы исследуемых усилителей и схемы измерительных установок для измерения величины и знака коэффициента усиления. Результаты измерений.

### Контрольные вопросы.

1. Изобразите схему инвертирующего (неинвертирующего) усилителя сигнала переменного напряжения на основе ОУ и объясните назначение элементов, входящих в схему.
2. Дайте определение обратной связи в усилителе. В каком случае ОС называется положительной или отрицательной.
3. Что называется коэффициентом обратной связи?
4. Выведите формулы для коэффициента усиления усилителей на основе ОУ. Какие качества приобретает усилитель в результате действия отрицательной ОС?

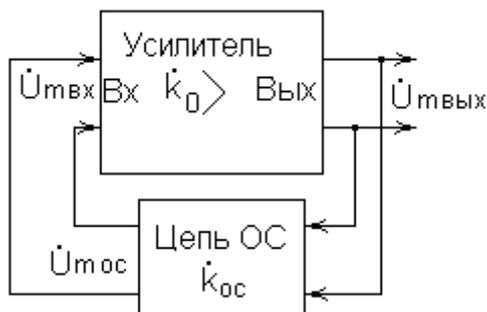
## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТЫ № 9. ГЕНЕРИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ (РС-АВТОГЕНЕРАТОРЫ)

**Цель работ:** знакомство с принципами генерирования электрических колебаний, закрепление навыков построения сложных электрических цепей и их исследования, развитие умений использования измерительных приборов.

**Приборы и оборудование:** лабораторный макет ОУ двухполярный источник питания, генератор синусоидальных сигналов, электронный осциллограф, авометр

### Введение.

Генерирование электрических колебаний - Это преобразование энергии источника питания в энергию изменяющегося тока (напряжения) Существует несколько подходов к рассмотрению процессов генерирования колебаний. Мы воспользуемся радиотехническим подходом, основанном на теории усилителей с ОС. Согласно этому подходу, генератор колебаний представляется в виде усилителя с положительной ОС (ПОС). Структурная схема такого генератора показана на рис. 9.1



**Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.** Рис. 9.1

В отличие от линейных усилителей, где используется свойство локальной линейности в окрестности равновесной точки, генератор колебаний является принципиально нелинейным устройством. Поэтому адекватное описание процессов в нем требует обязательного учета нелинейностей. Однако можно получить некоторые характеристики процесса, основываясь только на линейном приближении.

Обратимся к рис.9.1, где цепь генератора условно разбита на два четырехполюсника, образующих усилитель с ОС. Коэффициент усиления ее для малых амплитуд сигналов выражается известной формулой:

$$\dot{k} = \frac{\dot{k}_0}{1 - \dot{k}_0 \dot{k}_{oc}} \quad (9.1)$$

Причем коэффициент усиления  $k_0(\omega)$  и коэффициент обратной связи  $k_{oc}(\omega)$  являются комплексными и частотно зависимыми величинами. Их произведение, входящее в знаменатель формулы, называется петлевым коэффициентом передачи. Согласно (9.1), равенство единице петлевого коэффициента передачи приводит к тому, что общий коэффициент усиления обращается в бесконечность. Физически это означает, что амплитуда выходного сигнала усилителя будет иметь конечную величину при нулевой амплитуде входного сигнала, т.е. усилитель превращается в генератор колебаний. Рассмотрим эти явления подробнее.

Предположим, что на некоторой частоте -  $\omega_{пос}$  обратная связь положительна, т.е.  $k_0 k_{oc}$  – действительное положительное число. Однако,  $k_0 k_{oc} < 1$ . В этом случае колебания с частотой  $\omega_{пос}$  будут затухающими. В самом деле, если такое колебание, например на входных клеммах усилителя, будет иметь амплитуду  $U_{мвх}$ , то, пройдя по цепи усилителя и ОС, оно вернется обратно на входные клеммы с амплитудой  $U_{мвх} k_0 k_{oc}$ , меньшей, чем  $U_{мвх}$ . В ходе следующего цикла передачи колебания по цепям прямой и обратной связей амплитуда вновь уменьшится и т.д. до полного затухания колебаний. Таким образом, при  $k_0 k_{oc} < 1$  генерирование колебаний невозможно.

Предположим, что  $k_0 k_{oc} > 1$ . Тот же порядок рассуждений показывает, что за один цикл прохождения колебания по цепям усилителя и ОС амплитуда его увеличится. В следующем цикле рост амплитуды продолжится, т.е. колебания в системе будут нарастать по амплитуде. В конце концов, амплитуда увеличится настолько, что усилитель начнет входить в режим насыщения и линейное описание станет неверным. Однако, пользуясь этим описанием, мы установили, что для генерирования колебаний необходимо выполнение двух условий:

$$\arg(\dot{k}_0 \dot{k}_{oc}) = 0 \text{ – условие баланса фаз} \quad (9.2)$$

$$|\dot{k}_0 \dot{k}_{oc}| > 1 \text{ – условие избытка амплитуд} \quad (9.3)$$

Третий случай  $k_0 k_{oc} = 1$  соответствует т.н. балансу амплитуд, при котором каждый цикл прохождения колебания по усилителю и цепи ОС возвращает на вход усилителя исходную величину амплитуды. Следовательно, при балансе амплитуд в системе существуют колебания с неизменной амплитудой. Если при этом амплитуда недостаточна для насыщения усилителя, то колебания на выходе усилителя будут синусоидальными с частотой  $\omega_{пос}$ , на которой выполняется условие баланса фаз (9.2).

К сказанному необходимо добавить, что в цепях усилителя и ОС всегда существуют случайные колебания, обусловленные тепловым движением зарядов в проводниках. Амплитуда этих колебаний очень мала, а частотный спектр равномерно распределен по всему диапазону от 0 до сотен ГГц. Колебание любой из этих частот может быть развито до большой амплитуды усилителем с ОС, если на этой частоте выполняются условия баланса фаз и избытка амплитуд ( $k_0 k_{oc} > 1$ ).

### Резистивно-емкостные (RC) – генераторы.

Такие генераторы содержат в своей цепи резисторы и конденсаторы. Очень удобным усилительным элементом для RC-генераторов является операционный усилитель (ОУ). На рис.9.2 показана обобщенная схема генератора, использующего ОУ.

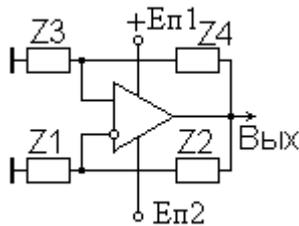


Рис. 9.2

Операционный усилитель охвачен двумя обратными связями: положительная ОС осуществляется комплексными сопротивлениями  $Z_4 - Z_3$  на неинвертирующий вход ОУ. Отрицательная ОС реализуется передачей выходного сигнала через  $Z_2, Z_1$  на инвертирующий вход. Комплексные сопротивления  $Z_1 - Z_4$  состоят из резисторов и конденсаторов. Их конфигурация на рис. 9.2 напоминает мостик Уинстона. В связи с этим такие генераторы иногда называют мостовыми.

ми.

Положительная и отрицательная ОС в мостовом генераторе образуют суммарную ОС с коэффициентом

$$\dot{k}_{oc} = \dot{k}_+ - \dot{k}_- = \frac{z_3}{z_3 + z_4} \quad (9.4)$$

Если собственный коэффициент усиления ОУ обозначить  $k_0$ , то петлевой коэффициент передачи будет равен

$$\dot{k}_0 \dot{k}_{oc} = \dot{k}_0 \left( \frac{z_3}{z_3 + z_4} - \frac{z_1}{z_1 + z_2} \right) \quad (9.5)$$

Подставив формулу петлевого коэффициента передачи в условия баланса фаз и избытка амплитуд, получим условия генерирования колебаний мостовым генератором:

$$\left. \begin{aligned} \arg(\dot{k}_0) + \arg(\dot{k}_{oc}) &= 0 \\ |\dot{k}_0(\omega_{noc}) \dot{k}_{oc}(\omega_{noc})| &> 1 \end{aligned} \right\} \quad (9.6)$$

Первое условие (9.6) определяет частоту положительной обратной связи  $-\omega_{noc}$ , на которой возможно генерирование колебаний. Второе – саму возможность генерирования. Если оба условия выполняются, в цепи генератора после включения питания начнут развиваться синусоидальные колебания. Амплитуда их быстро вырастет до насыщения ОУ, после чего синусоидальность нарушится, а частота изменится. Однако линейное приближение (9.6) все же позволяет определить саму возможность возникновения колебаний.

Для упрощения анализа мы положим  $\arg(k_0)=0$ ,  $k_0 \gg 1$ , тогда условия (9.6) примут простой вид:

$$\left. \begin{aligned} \arg(\dot{k}_0) &= 0 \\ |\dot{k}_0(\omega_{noc})| &> 1 \end{aligned} \right\} \quad (9.7)$$

На практике комплексные сопротивления  $Z_1 - Z_4$  выбирают максимально простыми.

На рис. 9.3 показана схема одного из простых вариантов генератора, называемого мультивибратором (или генератором с дифференцирующим мостом). В данном случае

$$Z_1=R_1, Z_2=R_2, Z_3=R_3, Z_4=1/j\omega C_4.$$

Коэффициент обратной связи, в соответствии с (9.4) равен

$$\dot{k}_{oc} = \frac{j\omega C_4 R_3}{1 + j\omega C_4 R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (9.8)$$

Согласно (9.7), условием генерирования колебаний является действительность и положительность  $k_{oc}$ . Это условие выполняется только при  $\omega=\infty$ . Т.е. в цепи могут возникнуть колебания с нулевым периодом. Этот нелепый результат имеет простой физический смысл: операционный усилитель будет находиться в активном режиме бесконечно малое время, мгновенно переходя из состояния нижнего насыщения в состояние верхнего насыщения и обратно.

Следовательно, генерируемые колебания будут представлять собой быстрые перескоки  $u_{вых}$  между двумя уровнями, близкими к  $+E_{п1}$  и  $-E_{п2}$  (рис.9.4).

Изобразив на графике  $u_{вых}(t)$ . Мы легко построим график  $u_{12}(t)$  – сигнала отрицательной ОС, он получается из  $u_{вых}(t)$  путем деления резистивным делителем  $R_1-R_2$ . Следовательно, имеет ту же форму, но меньшую амплитуду. После того, как  $u_{12}(t)$  построен, можно построить график  $u_{11}(t)$ . Благодаря связи с выходной клеммой через конденсатор ( $C_4$ ) напряжение  $u_{11}(t)$  будет в точности по-

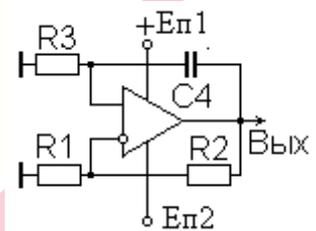
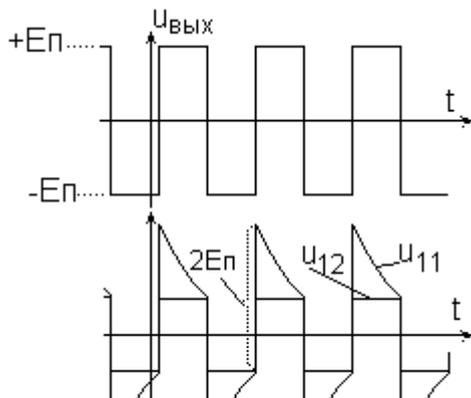


Рис. 9.3



Ошибка! Текст

указанного стиля в документе отсутствует. Рис. 9.4

вторять мгновенные скачки  $u_{\text{вых}}(t)$ , а затем во время неизменности  $u_{\text{вых}}(t)$  будет спадать к нулю по мере зарядки конденсатора  $C_4$ . Пока разность  $u_{11}(t) - u_{12}(t)$  далека от нуля, ОУ находится в режиме верхнего или нижнего насыщения. Однако в момент, когда  $u_{11}(t) - u_{12}(t) \approx 0$  ОУ входит в активный режим и мгновенно перескакивает в режим насыщения, противоположного предыдущему. Так происходит генерирование периодических колебаний.

Не составляет труда определить период этих колебаний. Положим для простоты  $E_{п1} = E_{п2} = E_n$ , и амплитуду  $u_{\text{вых}}(t)$  равной  $E_n$ . Во время положительного скачка напряжение на неинвертирующем входе  $-u_{11}$  изменится от  $-E_n R_1 / (R_1 + R_2)$  на величину  $2E_n$ , т.е. станет равным

$$2E_n - E_n R_1 / (R_1 + R_2) = E_n (R_1 + 2R_2) / (R_1 + R_2)$$

После этого  $u_{11}$  начнет уменьшаться по закону зарядки конденсатора

$$u_{11} = \frac{R_1 + 2R_2}{R_1 + R_2} E_n e^{-\frac{t}{R_3 C_4}}$$

Через полпериода ( $t = T/2$ )  $u_{11}$  сравняется с  $u_{12} = E_n R_1 / (R_1 + R_2)$ . Следовательно

$$\frac{R_1 + 2R_2}{R_1 + R_2} E_n e^{-\frac{T}{2R_3 C_4}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} E_n$$

Из этого равенства получим

$$T = 2R_3 C_4 \ln\left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)$$

(9.9)

Если  $R_1 = R_2$ , то  $\ln(3) \approx 1$  и получается упрощенная формула  $T = 2R_3 C_4$ .

Реальный мультивибратор строится на ОУ с конечной инерционностью. Следовательно, частота, соответствующая балансу фаз, будет конечной. Это означает, что время перескока ОУ между состояниями насыщения будет также конечным. Форма вырабатываемых колебаний оказывается не прямоугольной а трапецеидальной, и период колебаний несколько увеличится.

Другим популярным типом RC-генератора является генератор с интегрирующим мостом, показанный на рис.9.5. Действуя по прежней схеме, определим комплексный коэффициент обратной связи:

$$k_{oc} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{1 + j\omega C_1 R_2}$$

(9.10)

Коэффициент обратной связи (9.10) будет удовлетворять условиям баланса фаз и избытка амплитуд (т.е. будет действительным и положительным) только на бесконечно большой частоте ( $\omega_{\text{пос}} = \infty$ ). Следовательно форма колебаний будет такой же как у мультивибратора. Однако форма напряжений на входах ОУ ( $u_{11}$ ,  $u_{12}$ ) будет другой. На рис.9.6 показаны осциллограммы сигнальных напряжений. После того как построен график  $u_{\text{вых}}(t)$ , легко строится график  $u_{11}(t)$ , который повторяет  $u_{\text{вых}}(t)$ , с уменьшением амплитуды в за счет делителя  $R_3 - R_4$ . Затем строится график  $u_{12}(t)$ , представляющий собой  $u_{\text{вых}}(t)$ , проинтегрированный цепочкой  $R_2 - C_1$ . Перескок  $u_{\text{вых}}(t)$  происходит в тот момент, когда  $u_{12}$ , изменяясь становится равным  $u_{11}$ . Форму-

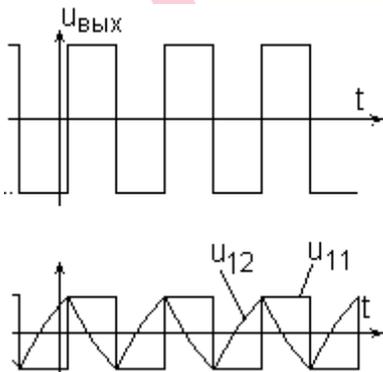
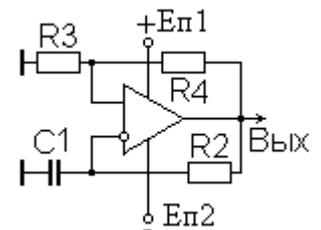


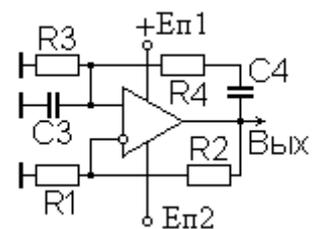
Рис. 9.6

$$T = 2R_2 C_1 \ln\left(1 + \frac{2R_3}{R_4}\right)$$

(9.11)



**Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.** Рис. 9.5



Генератор гармонических колебаний с мостом Вина является частным случаем мостовых генераторов. Его схема приведена на рис.9.7. Сравнивая рис.9.7 с обобщенной схемой (рис.9.2), видим, что  $Z_1=R_1$ ,  $Z_2=R_2$ ,  $Z_3=R_3/(1+j\omega C_3R_3)$ ,  $Z_4=R_4+1/(j\omega C_4)$ . Коэффициент обратной связи выразится подстановкой данных сопротивлений в (9.4):

$$\dot{k}_{oc} = \frac{R_2}{R_2 + R_4(1 + j\omega C_3 R_3 + \frac{1}{j\omega C_4 R_4})} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (9.12)$$

Условие баланса фаз означает равенство нулю мнимой части (9.12), откуда получим формулу для частоты положительной ОС:

$$j(\omega C_3 R_3 - \frac{1}{\omega C_4 R_4}) = 0 \quad (9.13)$$

Подставив найденное из (9.13) значение  $\omega_{noc}$  в (9.12), запишем условие избытка амплитуд:

$$\dot{k}_{oc}(\omega_{noc}) = \frac{R_3}{2R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} > 0 \quad (9.14)$$

При выполнении данного условия амплитуда колебаний в цепи генератора будет нарастать до насыщения усилителя. После этого форма генерируемых колебаний станет несинусоидальной.

Для получения синусоидальных колебаний генератор с помощью специальных мер удерживается в режиме баланса амплитуд при амплитуде колебаний, не насыщающей усилитель. Для этого один из резисторов в цепи ООС  $R_1$  или  $R_2$  делается амплитудно-зависимым. Простым способом реализации такой зависимости является установка терморезистора – резистора, сопротивление которого зависит от температуры. При возрастании амплитуды колебаний, увеличивается мощность, выделяемая на термисторе, что приводит к его нагреву и изменению сопротивления. Если используется термистор с отрицательным температурным коэффициентом (ТКР), то он устанавливается на место  $R_2$ . В этом случае колебания с малыми амплитудами слабо нагревают термистор  $R_2$ , сопротивление его велико и выполняется условие избытка амплитуд. По мере роста амплитуды колебаний нагрев  $R_2$  увеличивается, его сопротивление уменьшается. Это приводит к росту отрицательного слагаемого в (9.14) и приближению режима работы генератора к балансу амплитуд. Наконец амплитуда колебаний, температура термистора и его сопротивление устанавливаются такими, что неравенство (9.14) превращается в равенство, т.е. генератор входит в режим баланса амплитуд. В дальнейшем амплитуда колебаний не изменяется.

В данной лабораторной работе будет использоваться другой способ стабилизации амплитуды колебаний. В качестве резистора  $R_2$  будет применен нелинейный двухполосник, содержащий стабилитроны. При приближении амплитуды к напряжению пробоя стабилитронов сопротивление двухполосника уменьшается, что увеличивает отрицательное слагаемое в (9.14) и останавливает рост амплитуды.

### Задание на проведение экспериментов.

1. Исследование генератора с дифференцирующим мостом (мультивибратор). Схема генератора показана на рис.9.3.

Получите у преподавателя значение частоты колебаний, которые должен вырабатывать генератор.

Рассчитайте требуемые величины сопротивлений резисторов  $R_1$ - $R_3$  и емкости конденсатора.  $C_4$ .

Соберите цепь генератора, подключите его к источнику питания и снимите осциллограммы напряжений на входах и выходе ОУ. Изобразите эти осциллограммы на

**Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.** Рис. 9.7

одной временной оси, аналогично тому как это сделано на рис.9.4. Измерьте частоту колебаний, которая не должна существенно отличаться от заданной.

2. Исследование генератора с интегрирующим мостом (рис.9.5). Соберите цепь генератора, используя резисторы и конденсатор предыдущего опыта. Вычислите период вырабатываемых колебаний и сравните его с измеренной величиной. Изобразите на общей временной оси осциллограммы сигналов на входах и выходе ОУ.

3. Сборка и исследование генератора гармонических колебаний с мостом Вина (рис.9.7). Используя заданное преподавателем значение частоты генерируемых колебаний, определите величины емкостей конденсаторов и сопротивлений резисторов в мосте Вина. Можно положить  $R_2=R_3=R_4=10 - 30\text{К}$ ,  $C_3=C_4$ . После выбора  $R_2 - R_4$  и вычисления  $C_3, C_4$  определяется  $R_1$ . Составьте  $R_1$  из двух последовательно включенных сопротивлений. Одно из них должно быть вдвое меньше расчетной величины, а другое – переменный резистор с номиналом, приблизительно равным расчетной величине  $R_1$ . Таким образом, поворачивая ротор переменного резистора, можно регулировать сопротивление  $R_1$  в пределах от 0.5 до 1.5 расчетной величины. Данная регулировка потребуется для установления такой величины отрицательной ОС, при которой вырабатываемые колебания будут мало отличаться от синусоидальных.

После сборки цепи генератора и подключения его к источнику питания необходимо регулировкой  $R_1$  добиться синусоидальности вырабатываемых колебаний. Проверьте экспериментально возможно ли это.

Подключите параллельно  $R_2$  пару включенных встречно-последовательно стабилитронов КС147 и попробуйте регулировкой  $R_1$  установить синусоидальность колебаний.

#### *Контрольные вопросы.*

1. Какие устройства называются автогенераторами электрических колебаний?
2. В каком виде представляется структура генератора колебаний в радиотехнике?
3. При каких условиях в цепи генератора вырабатываются колебания?
4. Какие устройства называются RC-генераторами?
5. Изобразите структуру мостового генератора на основе ОУ и запишите условия генерирования колебаний.
6. Изобразите схему мультивибратора и осциллограммы напряжений на входах и выходе ОУ.
7. Изобразите схему генератора с интегрирующим мостом и осциллограммы напряжений на входах и выходе ОУ.
8. Изобразите схему генератора синусоидальных колебаний с мостом Вина. Чем определяется частота и амплитуда вырабатываемых колебаний.

#### *Требования к оформлению отчета.*

Отчет должен содержать название работы, цель, перечень оборудования. По каждому из типов изучаемых генераторов необходимо изобразить схему, записать расчетные формулы и результаты расчетов, перерисовать в тетрадь (с градуировкой осей) полученные осциллограммы и дать им словесное пояснение.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10. ГЕНЕРИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ (LC-АВТОГЕНЕРАТОРЫ)**

**Цель работы:** знакомство с принципами генерирования электрических колебаний, закрепление навыков построения сложных электрических цепей и их исследования, развитие умений использования измерительных приборов.

**Приборы и оборудование:** лабораторный макет резонаторного автогенератора, источник питания, генератор синусоидальных сигналов, электронный осциллограф, авометр, паяльник, соединительные провода.

**Введение.**

Резонатор – это устройство, в котором возможно собственное колебательное движение с определенной частотой. Если на резонатор действует внешняя периодическая сила, она вызывает колебание на своей частоте. При совпадении частоты внешней силы с частотой собственных колебаний наступает резонанс – постепенное нарастание амплитуды колебаний до равновесной величины, значительно большей, в сравнении с возбуждением резонатора на нерезонансных частотах. В зависимости от природы колебательного движения выделяют механические, акустические, электрические и др. резонаторы. Типичным электрическим резонатором является колебательный контур – электрическая цепочка из конденсатора и катушки индуктивности (LC-цепочка). Возможны два вида соединения катушки и конденсатора по отношению к внешнему источнику электрических колебаний: последовательное (рис.10.1а) и параллельное (рис.10.1б).

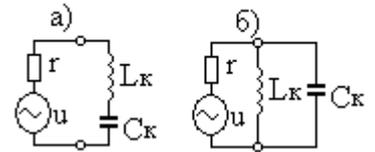


Рис. 10.1

При протекании по конденсатору и катушке индуктивности синусоидального тока с частотой  $\omega$  и с комплексной амплитудой  $I_m$  на них выделяется синусоидальное напряжение, комплексная амплитуда которого выражается следующими формулами.

$$\dot{U}_{mc} = I_m \frac{1}{j\omega C}$$

$$\dot{U}_{mL} = I_m j\omega L$$

Величины  $z_c = 1/j\omega C$  и  $z_L = j\omega L$  называют сопротивлениями конденсатора и катушки индуктивности. В случае последовательного контура его сопротивление равно  $z_k = j\omega L + 1/(j\omega C) = j(\omega L - 1/(\omega C))$ , а в случае параллельного контура суммируются проводимости ветвей:  $y_k = j\omega C + 1/(j\omega L) = j(\omega C - 1/(\omega L))$ . Частота  $\omega_p$ , на которой сопротивление последовательно или проводимость параллельного контура равны нулю, является частотой резонанса.

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_k C_k}}$$

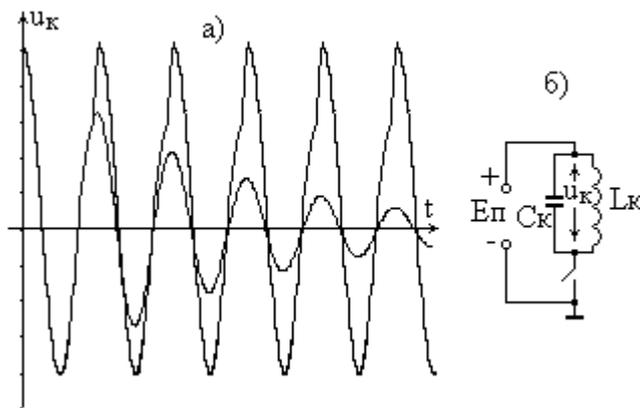


Рис. 10.2

Свободные колебания в любом резонаторе будут затухающими, вследствие неизбежных потерь энергии в его элементах. Однако, если подкачивать энергию в резонатор периодической внешней силой можно получить незатухающие колебания, практически синусоидальной формы. На рис.10.2б показана возможная схема подкачки энергии в колебательный контур. Энергия берется от источника постоянной ЭДС  $E_p$ . При кратковременном замыкании ключа Конденсатор  $C_k$  быстро подзарядится до напряжения  $E_p$ . Далее ключ размыкается и в контуре идет процесс собственных затухающих колебаний, показанных

на рис.10.2а затухающей кривой. Однако, если через время, близкое к периоду собственных колебаний, вновь кратковременно замкнуть ключ, то конденсатор вновь подзарядится до  $E_p$  и амплитуда колебаний вернется к величине  $E_p$ . Так периодически, замыкая ключ на короткое время можно поддерживать в контуре незатухающие колебания. Более того, часть энергии этих колебаний может забираться из контура для каких-либо целей.

Если вместо ключа использовать транзистор, управляемый для

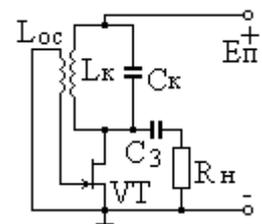


Рис. 10.3

синхронизации от того же контура, получим цепь, показанную на рис.10.3. Для своевременного замыкания транзисторного ключа имеется дополнительная катушка  $L_{oc}$ , связанная с контурной катушкой магнитной связью. Образованный этой парой катушек трансформатор передает в цепь вторичной катушки –  $L_{oc}$  напряжение контура, умноженное на коэффициент трансформации  $\pm n_{oc}/n_k$ , где  $n_{oc}$  и  $n_k$  количества витков соответствующих катушек. Знак плюс-минус соответствует двум возможным полярностям подключения  $L_{oc}$  к транзистору. Ниже будет показано, что для работы автогенератора полярность включения  $L_{oc}$  должна обеспечить знак минус.

При наличии колебаний в контуре трансформируемое в  $L_{oc}$  напряжение открывает транзистор в те интервалы времени, когда напряжение в контуре близко к максимуму (напряжение на выходном электроде –  $u_3$  близко к минимуму). Это как раз то, что нужно для подкачки энергии в контур.

Легко видеть, что схема рис.10.3 представляет собой схему усилительного каскада с обратной связью. Отличие от рассмотренных ранее схем усилительного каскада состоит в том, что балластный резистор –  $R_3$  заменен колебательным контуром. Следовательно, резонаторные генераторы (и все другие) могут рассматриваться как усилители с ОС, для которых мы располагаем некоторыми результатами линейного приближения. Используем эти результаты для определения условий возбуждения автоколебаний.

Для справедливости линейного приближения необходимо положить, что амплитуда колебаний в генераторе весьма мала, а транзистор находится в активном режиме. Активный режим реализуется при ненулевых величинах тока выходного электрода –  $I_{30}$  и напряжения на нем –  $U_{30}$ . Что касается последнего, то ввиду нулевого сопротивления контурной катушки падение постоянного напряжения на ней равно нулю, следовательно,  $U_{30} = E_p$ . Коэффициент усиления линейного усилителя и коэффициент обратной связи для цепи рис.10.3 определяются известными формулами:

$$\dot{k}_0 = \frac{-g_{31}}{j\omega C_k + \frac{1}{j\omega L_k} + \frac{1}{R_n} + g_{33}} \quad \dot{k}_{oc} = \pm \frac{n_{oc}}{n_k} \quad (10.1)$$

Петлевой коэффициент передачи  $k_0 k_{oc}$  будет действительным положительным при выполнении двух условий:

$$j\omega C_k + \frac{1}{j\omega L_k} = 0 \quad k_{oc} = -\frac{n_{oc}}{n_k},$$

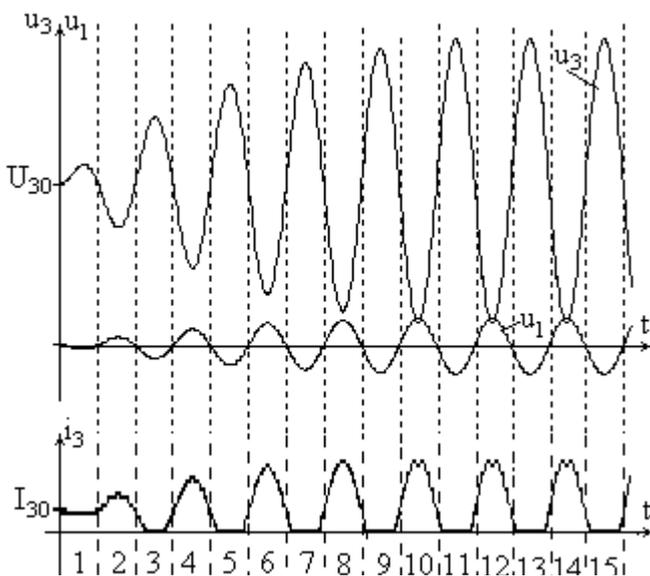
которые выражают условия баланса фаз. Из первого получим  $\omega_{пос} = 1/(L_k C_k)^{1/2}$ , т.е. частота генерируемых колебаний совпадает с резонансной частотой колебательного контура.

Условие избытка амплитуд на частоте  $\omega_{пос}$  примет следующий вид:

$$\frac{g_{31} n_{oc}}{n_k (1/R_n + g_{33})} > 1$$

Ввиду больших значений  $g_{31}$  выполнение данного условия не представляет трудностей. В цепи генератора (рис.10.3) будут развиваться колебания на частоте  $\omega_{пос}$  с увеличивающейся амплитудой.

По мере роста амплитуды будет увеличиваться влияние нелинейных явлений в транзисторе. Колеблущаяся рабочая точка его будет заходить в области насыщения транзистора и отсечки тока. Именно эти нелинейные эффекты определяют конечную равновесную амплитуду колебаний. Необходимо заметить, что, в отли-



Ошибка! Текст

указанного стиля в документе отсутствует. Рис. 10.4

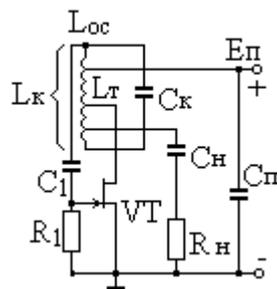
чие от RC-генераторов, нелинейные явления в резонаторных генераторах практически не нарушают гармоничности колебаний в резонаторе (в колебательном контуре). Когда транзистор входит в режим отсечки тока, т.е. отключается от резонатора, в последнем продолжается собственное гармоническое колебание. При насыщении транзистора происходит подкачка энергии в резонатор и на собственное его колебание накладывается небольшое возмущение, которое заметно не нарушает гармоничности. Это позволяет без существенной погрешности считать напряжение на колебательном контуре синусоидальным.

На рис.10.4 показаны графики временной зависимости напряжений на выходном ( $u_3$ ), входном ( $u_1$ ) электродах транзистора и тока выходного электрода. Для наглядности ось времени разбита на полупериоды колебания от 1 до 15.

В начальный момент времени ( $t=0$ ) колебаний еще нет. На выходном электроде транзистора имеется постоянное напряжение ( $U_{30}$ ) и ток ( $I_{30}$ ). Далее развиваются колебания. На первом и втором полупериодах транзистор работает в активном режиме (без отсечки тока и насыщения). Однако, начиная с третьего полупериода, амплитуда колебаний уже достаточна для захода рабочей точки транзистора в режим отсечки тока. Изменение тока транзистора теряет синусоидальность. Ток превращается в последовательность импульсов полусинусоидальной формы. Амплитуда колебаний продолжает увеличиваться.

Начиная с 10 полупериода напряжение на выходном электроде в минимуме ( $u_{\min}=U_{30}-U_m$ ) становится малым, и рабочая точка транзистора заходит в режим насыщения. При этом импульсы тока перестают увеличиваться, и на их вершинах появляется провал. Ввиду ограничения импульсов тока транзистора рост амплитуды колебаний прекращается. Генератор входит в стационарный режим работы, при котором амплитуда колебаний на выходном электроде транзистора приблизительно равна  $U_{30}=E_{\text{п}}$ .

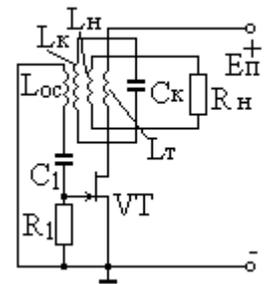
В описанном механизме установления колебаний в автогенераторе мы полагали, что постоянное напряжение на входном электроде транзистора ( $U_{10}$ ) неизменно. Это соответствует схеме генератора, показанной на рис.10.3, где  $U_{10}=0$ . На практике цепь входного электрода транзистора содержит дополнительные резисторы и конденсаторы, на которых происходит выделение и накопление напряжений за счет тока входного электрода. Нелинейность входной ВАХ транзистора при этом будет приводить к изменению  $U_{10}$  по мере увеличения амплитуды колебаний, что является дополнительным фактором установления стационарной амплитуды.



**Ошибка!**  
Текст указанного стиля в документе отсутствует. Рис. 10.6

конденсатор  $C_{\text{н}}$  и потребитель генерируемых колебаний  $R_{\text{н}}$ .

Кроме того, в такой многоотводной контурной катушке имеется точка подключения  $E_{\text{п}}$ , которая через блокировочный конденсатор  $C_{\text{п}}$  соединяется с общим проводом или с общим



**Ошибка!**  
Текст указанного стиля в документе отсутствует. Рис. 10.5

Построение резонаторных автогенераторов при заданных  $E_{\text{п}}$ ,  $R_{\text{н}}$ , параметрах резонатора  $L_{\text{к}}$ ,  $C_{\text{к}}$  требует дополнительного трансформирования при передаче энергии от  $E_{\text{п}}$  в контур и из контура в  $R_{\text{н}}$ . Этого можно добиться с помощью дополнительных катушек, связанных с контурной катушкой магнитной связью, наподобие  $L_{\text{ос}}$ . Рис.10.5 представляет схему такого генератора, в котором, кроме прочего, имеется и цепочка ( $R_1, C_1$ ) для формирования равновесного напряжения смещения -  $U_{10}$ .

Получить хорошую магнитную связь между несколькими катушками без ферромагнитного сердечника невозможно. В связи с этим и для упрощения конструкции контура используется автотрансформаторное включение контурной катушки, показанное на рис.10.6.

От витков единой контурной катушки делается несколько отводов, к которым подключаются соответствующие элементы цепи: выходной электрод транзистора, входной конденсатор  $C_1$ , разделительный

электродом транзистора (в данном случае – с истоком). Можно иначе взглянуть на схему рис.10.6 и сказать, что данная точка контура служит для подключения к ней (по переменному току) второго электрода транзистора. Теперь мы можем сформулировать весьма важное правило построения автогенераторов на основе многоотводного резонатора: **точка подключения эмиттера (истока) к резонатору должна находиться между точками подключения базы (затвора) и коллектора (стока)**. Имеется ввиду или непосредственное подключение или через конденсатор большой емкости (подключение по переменному току). На рис.10.6 сток транзистора подключен к контуру непосредственно, а затвор и исток через конденсаторы С1 и Сп.

Автогенераторы, в которых транзистор подключается к резонатору в соответствии с данным принципом в трех точках, называются трехточечными. Причем дроблению для подключения транзистора можно под-вергнуть как индуктивную, так и емкостную ветвь колебательного контура. При этом не имеет значения, какой из электродов транзистора объявляется общим, т.е. соединяется с общим проводом либо непосредственно, либо через конденсатор большой емкости (по переменному току). На рис.10.7 показаны схемы трехточечных автогенераторов на основе биполярного транзистора при различных вариантах общего электрода. В качестве общего провода взят провод от минусовой клеммы источника питания. При этом общий электрод транзистора либо соединен с общим проводом непосредственно (схема с ОЭ), либо через блокировочный конденсатор большой емкости (схемы с ОК и ОБ). В любом случае напряжение на общем электроде транзистора постоянно, не имеет переменной составляющей.

#### Задание на проведение экспериментов.

Лабораторный макет представляет собой резонансный усилитель на основе биполярного транзистора, в который может быть введена положительная обратная связь (см. рис. 10.8). Для осуществления обратной связи следует соединить перемычкой одну из точек отвода от катушки колебательного контура (А, В, С) с входной клеммой (Вх). Коэффициент трансформации, равный модулю коэффициента обратной связи (кос), для точки А составляет 1/8, для точки В – 3/8, для точки С – 3/5. Наличие резистора в цепи эмиттера – R2, практически, не влияет на работу усилителя, поскольку его сопротивление мало. Однако подключив к клемме Y2 вход осциллографа, можно наблюдать осциллограмму тока через транзистор.

#### 1. Измерение частотных характеристик резонансного усилителя.

Отключите обратную связь. На входную клемму подайте синусоидальный сигнал с амплитудой 50-500 мВ от низкочастотного генератора. Этот же сигнал подайте на один из входов осциллографа (Вход 2). Второй вход осциллографа (Вход 1) для контроля напряжения на выходном электроде транзистора подключите к клемме Y1. Подайте на макет напряжение питания (Eп=10В). Изменяя частоту сигнала генератора в пределах 150 – 200 КГц, найдите резонанс колебательного контура. Признаком резонанса является максимум амплитуды колебаний на контуре и выходном электроде транзистора (клемма Y1), в сравнении с амплитудой на других частотах. Находясь на резонансной частоте, уменьшите амплитуду сигнала на

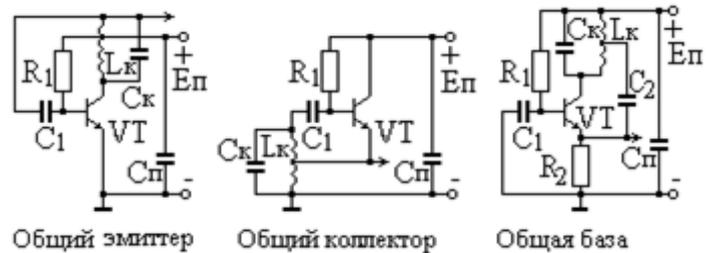
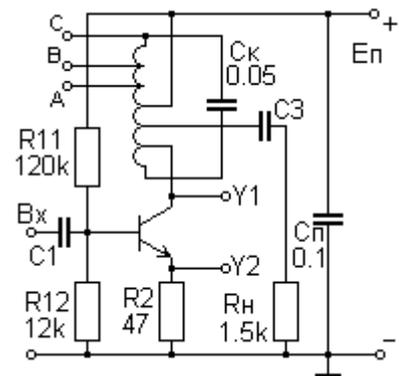


Рис. 10.7. Схемы трехточечных автогенераторов



**Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.**

Рис. 10.8. Схема лабораторного макета автогенератора

входе до такой величины, при которой усилитель работает в линейном режиме. Признаком линейного режима является выполнение неравенства  $U_{mY1} < E_{п}$ . Можно установить  $U_{mY1} = 5$  В. Отрегулируйте осциллограф таким образом, чтобы на экране были видны 2 – 4 периода колебаний напряжения на входе и выходе усилителя (клемма Y1). Дополнительным признаком резонанса является противофазность этих колебаний (разность фаз равна  $\pi$ ). Изменяя частоту входного сигнала, снимите частотные зависимости амплитуды колебаний на выходном электроде (клемма Y1) и разности фаз колебаний на входе и выходе от частоты. Представьте данные зависимости в виде двух, совмещенных по частотной оси, графиков – амплитудночастотной (АЧХ) и фазочастотной (ФЧХ) характеристик резонансного усилителя. **Согласуются ли полученные графики с формулой (10.1) для комплексного коэффициента  $k_0$ ? Чему равно значение  $k_0$  на резонансной частоте?**

2. **Измерение коэффициента обратной связи  $k_{oc}$ .** Установите резонансную частоту входного сигнала. Последовательно переключите тот вход осциллографа, которым контролировался входной сигнал (Вход 2), на точки сигнала обратной связи «А», «В», «С». Определите для каждой из точек модуль  $k_{oc}$  как отношение амплитуд  $U_{mА,В,С}$  к  $U_{mY1}$ , и знак  $k_{oc}$  по разности фаз.

3. Исследование зависимости формы тока транзистора от амплитуды входного сигнала усилителя на резонансной частоте. Подключите вход 2 осциллографа к эмиттеру транзистора (клемма Y2). Плавно увеличивая от нуля амплитуду входного сигнала наблюдайте изменение формы эмиттерного тока транзистора. Следует выделить и объяснить три характерные формы: синусоидальную – при малых амплитудах, полусинусоидальную с отсечкой снизу, полусинусоидальную с провалом вершины. **Изобразите три характернее осциллограммы и под каждой из них опишите причины обусловившие данную форму тока.**

4. **Измерение амплитудной характеристики усилителя на резонансной частоте.** Амплитудная характеристика - это зависимость амплитуды выходного сигнала усилителя от амплитуды входного сигнала, при условии синусоидальности обоих сигналов. Необходимо измерить амплитудную характеристику макета резонансного усилителя и построить график этой характеристики. ( Амплитуду входного сигнала изменять от нуля до 2-3 В).

5. **Включение ОС и исследование автогенератора.** Не изменяя подключение осциллографа, отключите генератор от входных клемм усилителя. Установите переключку между входной клеммой и одной из точек ОС (А, В или С). После установки переключки в цепи возникнут автоколебания. Роль входного сигнала, который в предыдущих опытах подавался от внешнего генератора, теперь играет сигнал обратной связи. Нанесите на график амплитудной характеристики точки, соответствующие амплитудам выходного сигнала и сигнала обратной связи для каждого из трех возможных положений переключки. Данные точки должны лечь на кривую графика амплитудной характеристики. Одновременно они удовлетворяют и уравнению обратной связи

$$U_{moc} = U_{mY1} * k_{oc}$$

Используя измеренное ранее значение  $k_{oc}$ , проверьте выполнение это равенства.

Постройте на графике амплитудной характеристики график уравнения обратной связи для каждого из положений переключки.

### **Контрольные вопросы.**

1. В чем состоит принцип поддержания незатухающих колебаний в колебательном контуре LC-автогенератора?

2. Изобразите схему и поясните принцип работы простейшего транзисторного LC-автогенератора. Для чего сигнал, управляющий проводимостью транзистора, снимается с контура, в котором генерируются колебания?

3. Представьте автогенератор в виде резонансного усилителя с положительной ОС. В чем заключаются условия баланса фаз и избытка амплитуд ?

4. Почему колебательный контур автогенератора связывается с транзистором и нагрузкой трансформаторной или автотрансформаторной связью ?

5. Каким образом по ФЧХ и амплитудной характеристике резонансного усилителя определить частоту и амплитуду колебаний, вырабатываемых им после замыкания петли ОС ?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11. ИЗУЧЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ФИЛЬТРОВ

**Цель работы:** знакомство с принципами построения частотных фильтров. Освоение нового измерительного прибора – измерителя частотных характеристик. Закрепление навыков построения сложных электрических цепей и их исследования, развитие умений использования измерительных приборов.

**Приборы и оборудование:** лабораторный макет для построения частотных фильтров, источник питания, измеритель амплитудно-частотных характеристик, паяльник, соединительные провода.

### Введение.

**Понятие частотных фильтров.** Частотным Фильтром называется четырехполюсник, предназначенный для преимущественного ослабления некоторой части спектральных компонент фильтруемого сигнала в сравнении другой частью его спектральных компонент.

Главными характеристиками частотного фильтра является его амплитудно-частотная (АЧХ) и фазо-частотная (ФЧХ) характеристики, т.е. зависимость от частоты модуля и аргумента комплексного коэффициента передачи фильтра. В общем случае требуемый вид АЧХ и ФЧХ фильтра определяется условиями задачи фильтрации. Однако очень часто задача фильтрации сводится к возможно более полному подавлению гармоник сигнала в какой-либо полосе частот и возможно меньшему ослаблению гармоник в другой частотной полосе. Фильтры, предназначенные для такой фильтрации, называются полосовыми.

Для полосового фильтра характерны две области (полосы) частот: полоса частот, в которой модуль его коэффициента передачи близок к 1, называется полосой пропускания (или прозрачности) фильтра и полоса частот, в которой модуль коэффициента передачи близок 0. Последняя называется полосой заграждения (заграждения) фильтра.

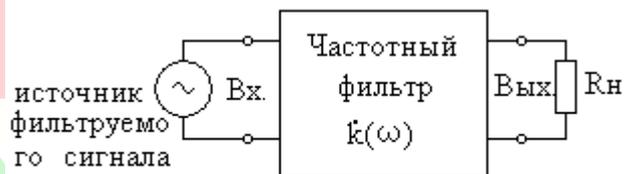


Рис. 11.1

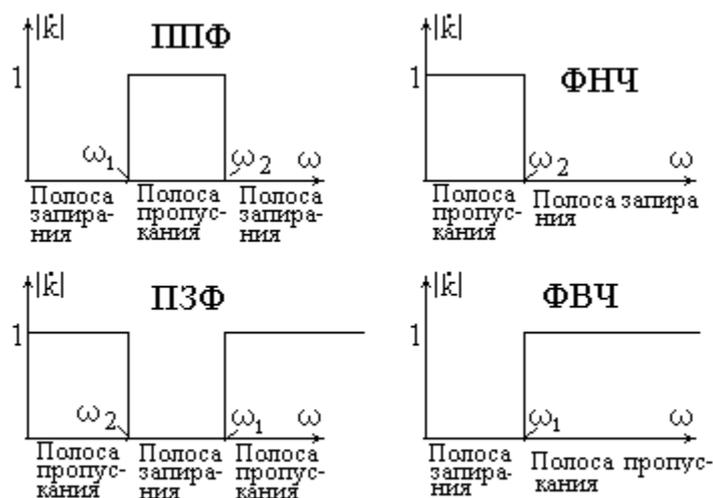


Рис. 11.2 АЧХ идеальных полосовых фильтров

Для идеальных полосовых фильтров граница между полосой пропускания и заграждения бесконечно резкая, т.е. график АЧХ идеальных полосовых фильтров является прямоугольным. На рис. 11.2 показаны АЧХ четырех видов идеальных полосовых фильтров: Полосно-пропускающего фильтра (ППФ), фильтра нижних частот (ФНЧ), полосно-запирающего фильтра (ПЗФ), фильтра верхних частот (ФВЧ).

Полосно-пропускающий фильтр пропускает без потерь мощности гармоники сигнала, частоты которых находятся в интервале полосы пропускания  $\omega_1 - \omega_2$ .

Гармоники с частотами вне этого интервала (полосы) в  $R_H$  не пропускаются, для них коэффициент передачи  $|k|=0$ .

Фильтр нижних частот является частным вариантом ППФ, у которого нижняя граница полосы пропускания  $\omega_1=0$ .

Полосно-запирающий фильтр беспрепятственно пропускает в  $R_H$  все гармоники, за исключением тех, у которых частоты попадают в интервал запираения от  $\omega_2$  до  $\omega_1$ . В полосе запираения коэффициент передачи ПЗФ  $|k|=0$ .

Фильтр верхних частот (ФВЧ) представляет собой частный вариант ПЗФ, у которого нижняя частота полосы запираения  $\omega_2=0$ .

Реальные полосовые фильтры не имеют четкой границы между полосой пропускания и запираения, а модуль коэффициента передачи и в полосе пропускания меньше 1, что обусловлено потерями мощности сигнала в реальных элементах фильтра.

Обычно границами полосы пропускания реального полосового фильтра считаются частоты, на которых модуль коэффициента передачи уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз, в сравнении с его максимальным значением (Рис 12.3). Аналогично определяется и полоса запираения, в пределах которой  $|k|$  не превосходит заданного уровня, например  $0.1|k_{max}|$  (Рис 11.3). При таких определениях между полосами пропускания и запираения остаются частотные интервалы, не входящие ни в полосу пропускания, ни в полосу запираения.

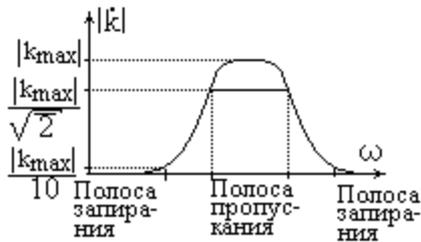


Рис. 11.3

**Реализация частотных фильтров.** Для построения частотных фильтров используются реактивные элементы: конденсаторы, катушки индуктивности, колебательные контуры (резонаторы), составленные из них. Как известно, в идеальных реактивных элементах не выделяется активной мощности, а их сопротивление является частотно-зависимым. Это позволяет создать электрическую цепь фильтра коэффициент передачи которой будет частотно-зависимым, а потери мощности сигнала в полосе пропускания – нулевыми.

Очень полезно наиболее общим реактивным элементом считать колебательный контур. При этом катушку индуктивности можно считать последовательным колебательным контуром с бесконечно большой емкостью конденсатора, т.е. с нулевой резонансной частотой. Аналогично, конденсатор может быть представлен как параллельный колебательный контур с бесконечно большой индуктивностью катушки, т.е. с нулевой резонансной частотой. При таком подходе элементами частотного фильтра являются колебательные контуры, последовательные и параллельные. Изменяя резонансные частоты этих контуров, можно сдвигать АЧХ фильтра по частотной оси.

Число колебательных контуров (резонаторов), входящих в состав фильтра, называется его порядком. Катушка индуктивности и конденсатор считаются резонатором с нулевой резонансной

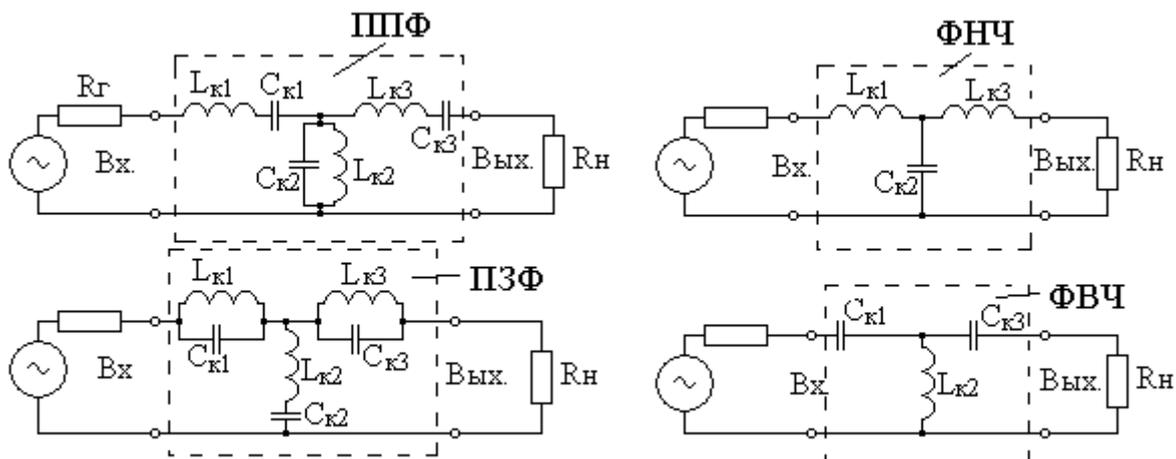


Рис. 11.4

частотой. Чем выше порядок фильтра, тем ближе может быть сделана его АЧХ к идеальной – прямоугольной.

Нетрудно представить себе схемы рассмотренных выше полосовых фильтров, которые показаны на рис. 11.4 для случая третьего порядка. В полосно-пропускающем фильтре последовательные контуры ( $L_{к1}-C_{к1}$ ,  $L_{к3}-C_{к3}$ ), сопротивление которых на резонансной частоте равно нулю, включены последовательно в цепь передачи сигнала. На частоте резонанса этих контуров сигнал от источника сигнала через нулевое сопротивление передается в  $R_n$ . Параллельный контур ( $L_{к2}-C_{к2}$ ) у которого проводимость на частоте резонанса равна нулю, включен параллельно в цепь передачи сигнала и не шунтирует ее на частоте резонанса. Таким образом, на частоте резонанса контуров, которая у них одинакова, и на близких к ней частотах сигнал передается от источника в  $R_n$  без потерь. На частотах, далеких от резонанса сказываются возросшие сопротивления последовательных контуров и шунтирующее действие параллельного контура. Вследствие этого коэффициент передачи фильтра сильно уменьшается.

Полосно-запирающий фильтр (ПЗФ) имеет параллельные колебательные контуры, включенные последовательно в цепь передачи сигнала, и последовательные контуры, включенные параллельно к этой цепи. На частоте резонанса проводимость параллельных контуров равна нулю и они разрывают цепь передачи сигнала в  $R_n$ . Кроме того, последовательный контур, имеющий нулевое сопротивление на частоте резонанса «закорачивает» эту цепь на общий провод. Это означает, что на резонансной частоте контуров и на близких частотах коэффициент передачи ПЗФ равен или близок к нулю. Если частота гармоники далека от резонансной частоты контуров ПЗФ, проводимость для нее параллельных контуров оказывается значительной, и такой сигнал проходит через них в  $R_n$  почти беспрепятственно.

Фильтр нижних частот (ФНЧ) и фильтр верхних частот (ФВЧ) являются частными случаями ППФ и ПЗФ, соответственно. Для их реализации достаточно перестроить колебательные контуры на нулевую резонансную частоту. Для этого в последовательных контурах устанавливается бесконечно большая емкость конденсатора, а в параллельных контурах бесконечно большая индуктивность катушки. Конденсатор бесконечно большой емкости – это перемычка с нулевым сопротивлением, а катушка с бесконечно большой индуктивностью – это разрыв цепи. Таким образом, для получения ФНЧ из ППФ или ФВЧ из ПЗФ необходимо убрать катушки индуктивности параллельных контуров и замкнуть конденсаторы в последовательных контурах. В результате получим схемы ФНЧ и ФВЧ, показанные на рис. 11.4. Замечательным является тот факт, что частный фильтр, полученный из общего путем описанной перестройки резонаторов на нулевую частоту, имеет такое же значение полосы пропускания или запирающего, какое было у исходного фильтра. Более того, форма части АЧХ исходного фильтра, находящейся справа от резонансной частоты контуров, повторится в получившемся частном фильтре. Рис. 11.5 иллюстрирует этот факт для ППФ.

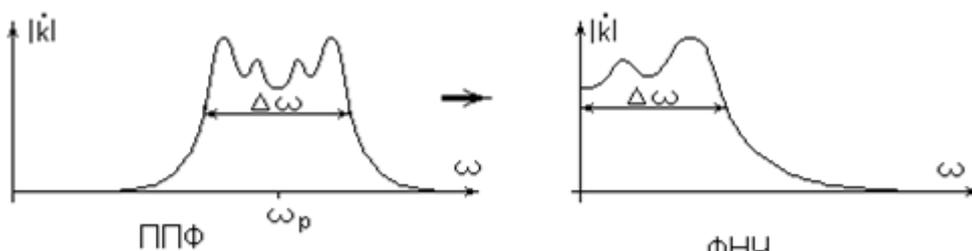


Рис. 11.5

стрирует этот факт для ППФ.

На практике возможность трансформации фильтров используется в обратном направлении. Для построения ППФ вначале разрабатывается ФНЧ с нуж-

ной полосой пропускания, называемый ФНЧ - прототипом. Затем путем добавления конденсаторов последовательно к катушкам и катушек параллельно конденсаторам ФНЧ перестраивается на заданную центральную частоту полосы пропускания.

Метод ФНЧ - прототипа оказывается применим и при построении ФВЧ или ПЗФ. Для трансформации ФНЧ в ФВЧ, согласно рис. 11.4, необходимо заменить катушки индуктивности конденсаторами, а конденсаторы – катушками индуктивности. Формулы для такой замены очень простые:

$$\Delta\omega L_{km} = \frac{1}{\Delta\omega C_{km}}$$

Здесь  $\Delta\omega$  – ширина полосы пропускания ФНЧ, которая переходит в полосу заграждения ФВЧ, индекс «к» означает контурный элемент, m – номер заменяемого элемента.

**Расчет элементов ФНЧ – прототипа.** Для получения близкой к прямоугольной формы АЧХ фильтра необходимо правильно выбрать величины элементов ФНЧ – прототипа. Наиболее простые результаты получаются при использовании т.н. максимально – плоской АЧХ. В этом случае сопротивление источника сигнала  $R_g$  должно быть равно сопротивлению нагрузки  $R_n$ :  $R_g = R_n = R$ . Для определения индуктивностей катушек и емкостей конденсаторов используются следующие формулы:

$$\Delta\omega L_{km} = 2R \sin\left(\frac{2m-1}{2n}\pi\right)$$

$$\Delta\omega C_{km} = \frac{2}{R} \sin\left(\frac{2m-1}{2n}\pi\right)$$

в которых m – номер реактивного элемента ФНЧ (нумерация начинается от входа), n-порядок фильтра (число реактивных элементов),  $\Delta\omega$  – ширина полосы пропускания ФНЧ. Если элементы ФНЧ вычислены по данным формулам, то его АЧХ выражается следующей формулой:

$$|k(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{R_g}{R_n}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\Delta\omega}\right)^{2n}}}$$

Частотно зависимый член в знаменателе данной формулы находится в степени 2n. Чем больше порядок фильтра – n, тем сильнее частотная зависимость |k| и тем ближе форма АЧХ к идеальной – прямоугольной, тем меньше будут интервалы частот неопределенного статуса между полосами пропускания и заграждения. Однако увеличение порядка фильтра всегда связано с усложнением его реализации. Поэтому на практике делаются фильтры минимально возможного порядка.

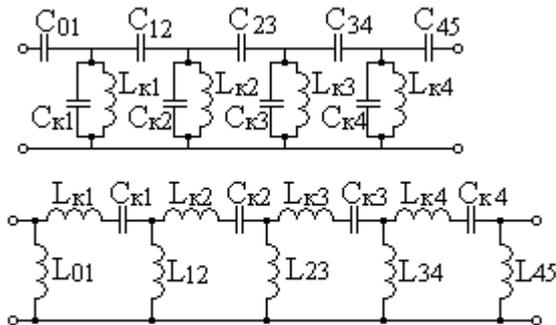


Рис. 11.6

контуров (рис. 11.6). Между контурами осуществляется связь посредством реактивных элементов. На верхней схеме рис.11.6 фильтр реализован на основе параллельных контуров с емкостной связью между ними а также с источником сигнала и нагрузкой. Нижняя схема рис.11.6 представляет фильтр на основе последовательных контуров с индуктивными связями.

Для расчета элементов связи широко применяется метод импедансного инвертора, суть которого состоит в следующем. Импедансным инвертором называется воображаемый четырехполюсник, с П-образной или Т-образной внутренней схемой, по-

### Построение ППФ на одинаковых резонаторах.

Если относительная полоса пропускания ППФ мала ( $\Delta\omega/\omega_p \ll 1$ ) его построение в классическом виде чередования параллельных и последовательных контуров становится невозможным. Причиной этого являются чрезмерно большие индуктивности последовательных контуров и очень малые индуктивности параллельных. В этом случае возможен более удобный способ построения ППФ на основе одинаковых резонаторов в виде только последовательных или только параллельных

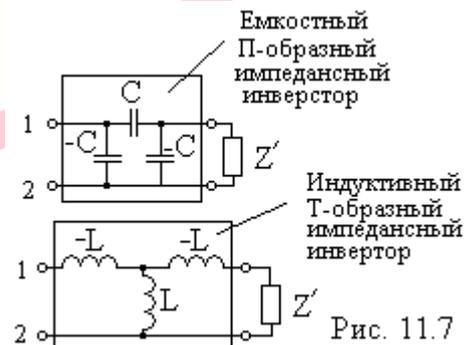


Рис. 11.7

казанной на рис. 11.7. Внутренняя схема состоит из трех реактивных элементов с одинаковым модулем сопротивления, однако величины крайних элементов полагаются отрицательными. На практике отрицательных емкостей или индуктивностей не существует, но это не имеет значения, поскольку импедансный инвертор – это не более. Чем расчетный прием.

Если к правой паре клемм импедансного инвертора подключить комплексное сопротивление  $Z'$  (как это показано на рис. 11.7), то сопротивление между клеммами 1-2 будет равно:

$$Z = \frac{1}{\omega^2 C^2} \frac{1}{Z'} \quad \text{или} \quad Z = \frac{\omega^2 L^2}{Z'}$$

Таким образом, сопротивление между входными клеммами импедансного инвертора пропорционально обратной величине сопротивления, подключенного к выходным клеммам. Это означает, что катушка индуктивности  $L$ , подключенная к выходу импедансного инвертора, и имеющая сопротивление  $j\omega L$ , создаст сопротивление между входными клеммами, пропорциональное  $1/(j\omega L)$ , присущее конденсатору. Аналогично конденсатор, подключенный к выходным клеммам импедансного инвертора, будет "виден" с входных клемм как катушка индуктивности. Легко показать, что сопротивление параллельного контура, подключенного к выходу импедансного инвертора, пересчитывается к входным клеммам в виде сопротивления последовательного контура с той же резонансной частотой, а сопротивление последовательного контура, преобразуется импедансным инвертором в сопротивление параллельного контура.

Если два резонатора в виде параллельных колебательных контуров (рис. 11,6) связаны конденсатором связи, то их можно изобразить в виде резонаторов, связанных через импедансный инвертор, как это показано на рис. 11.8. Конденсатор  $C_{св}$  остается на месте. Емкости контурных конденсаторов мысленно увеличиваются на величину  $C_{кк}$  и параллельно мысленно включаются конденсаторы с отрицательными емкостями  $-C_{св}$  входящие в состав импедансного



Рис. 11.8

инвертора. От такой мысленной переделки цепи ничего не изменяется. Однако выделение в ней импедансного инвертора позволяет иначе изобразить эквивалентную схему цепи. Действительно второй- параллельный контур пересчитывается через инвертор к клеммам первого в виде последовательного контура.

Применяя этот прием последовательно к цепочки связанных резонаторов (Рис. 11.6), можно привести схему этой цепочки к эквивалентной схеме, которая совпадает с классической схемой ППФ, показанной на рис. 11.4.

Таким образом, ППФ на связанных резонаторах (рис.11.6) и ППФ с чередующимися последовательными и параллельными контурами (Рис.4) будут, эквивалентны, если емкости связи  $C_{св}$  между резонаторами подобрать необходимым образом. Для расчета требуемых емкостей связи должны быть заданы емкости контурных, конденсаторов, центральная частота полосы пропускания фильтра, ширина полосы пропускания, порядок фильтра. При этом порядок расчета выглядит следующим образом.

- определяются величины реактивных элементов фНЧ-прототипа;
- фНЧ-прототип преобразуется в ППФ-прототип
- вычисляются емкости связи ППФ на связанных резонаторах, при которых он будет эквивалентен ППФ-прототипу.

**Исследование частотных фильтров.** Для экспериментального исследования частотных фильтров созданы специальные приборы: ИЗМЕРИТЕЛИ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК. ИАЧХ включает в себя осциллограф и т.н. генератор качающейся частоты (ГКЧ).

Последний вырабатывает квазигармонические колебания, частота которых изменяется (качается) синхронно с движением луча по экрану осциллографа. Выходной сигнал ГКЧ подается на вход исследуемого фильтра и пройдя через фильтр выпрямляется (преобразуется в постоянное напряжение величиной равной амплитуде выпрямляемого сигнала). В результате отклонение луча осциллографа по оси X будет пропорционально частоте сигнала ГКЧ, а отклонение по оси Y пропорционально амплитуде этого сигнала на выходе Фильтра. На экране осциллографа, рисуется кривая график АЧХ исследуемого фильтра.

**Задание на проведение экспериментов.**

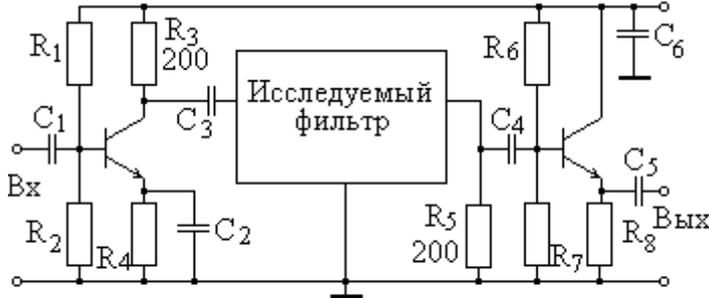


Рис. 11.9

В работе необходимо собрать и исследовать два фильтра: ФНЧ с полосой пропускания 6 МГц и ППФ с центральной частотой полосы пропускания 35 МГц и полосой пропускания 6 МГц. (Данный ППФ используется в телевизионном приемнике в качестве Фильтра сигналов ПЧ). Схема лабораторного макета показана на рис.11.9. Исследуемый фильтр включается между выходом транзисторного усилителя и входом эмиттерного повторителя. Благодаря этому выходное сопротивление ГКЧ и входное сопротивление выпрямительной головки ИАЧХ не влияют на характеристики исследуемого фильтра. Выходное сопротивление усилителя – R3 и нагрузочное сопротивление фильтра R5 имеют величины по 200 Ом.

1. Задавшись  $R_{г}=R_{н}=200$  Ом, определите величины реактивных элементов ФНЧ 3-его порядка с полосой пропускания 6 МГц.
2. Установите в лабораторный макет элементы ФНЧ, подключите вход макета к выходу ГКЧ, а выход макета – к детекторной головке ИАЧХ. Включив приборы, с помощью описания ИАЧХ (X1-50) получите на экране график АЧХ фильтра. По частотным меткам определите полосу пропускания построенного ФНЧ. Его схему и график АЧХ зарисуйте в тетраде.

Изобразите схему ППФ третьего порядка на основе одинаковых резонаторов в виде параллельных контуров с емкостной связью (см. рис. 11.6). Соберите данный фильтр на лабораторном макете, используя имеющиеся там катушки индуктивности и конденсаторы. Подключите макет к ИАЧХ и получите на экране его АЧХ. Наблюдая на экране амплитудно-частотную характеристику фильтра, подрегулируйте настройку его резонаторов для получения максимального коэффициента передачи на центральной частоте. Перерисуйте схему фильтра и форму АЧХ в тетрадь. Измерьте полосу пропускания ППФ.

**Контрольные вопросы:**

1. Какие устройства называются частотными фильтрами. Что такое АЧХ и ФЧХ фильтра.
2. Изобразите форму АЧХ известных вам полосовых фильтров. Как определяется полоса пропускания и запираания фильтров.
3. Изобразите схемы полосовых фильтров на LC элементах. Что такое ФНЧ прототип.
4. Изобразите схему ППФ, построенного на основе связанных резонаторов и докажете ее эквивалентность схеме ППФ с чередующимися последовательными и параллельными контурами.
5. Объясните принцип работы измерителя амплитудно-частотных характеристик и поясните методы измерения параметров фильтров в лабораторной работе.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12. ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ И ПРИМЕНЕНИЙ ДВУХБАЛАНСНЫХ ПЕРЕМНОЖИТЕЛЕЙ СИГНАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

**Цель работы:** знакомство с принципом работы двухбалансного перемножителя аналоговых сигналов, изучение параметрических операций над сигналами, использующих операцию умножения сигналов. Развитие умений использования измерительных приборов.

**Приборы и оборудование:** лабораторный макет для перемножителя аналоговых сигналов, генератор синусоидальных сигналов, генератор радиосигналов с амплитудной модуляцией, двухполярный источник питания, паяльник, соединительные провода.

*Введение.*

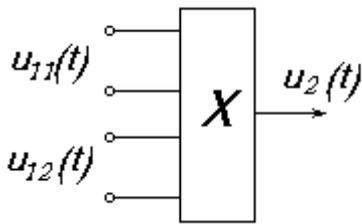


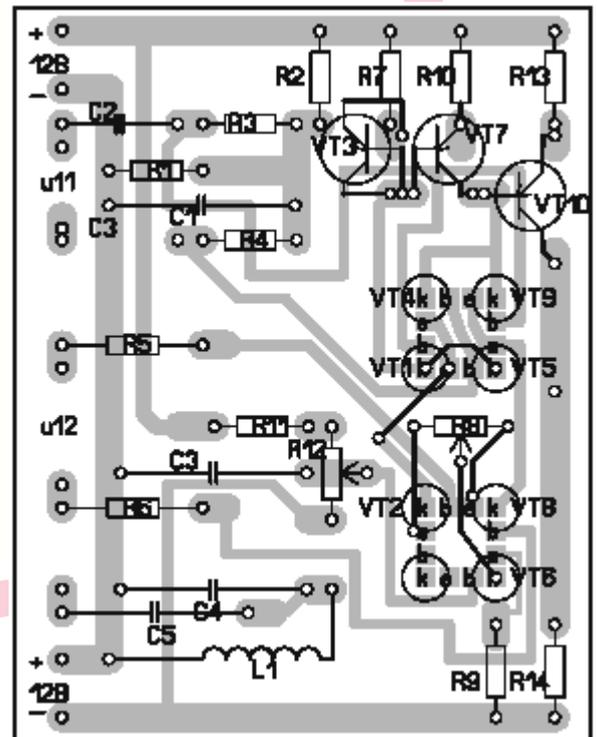
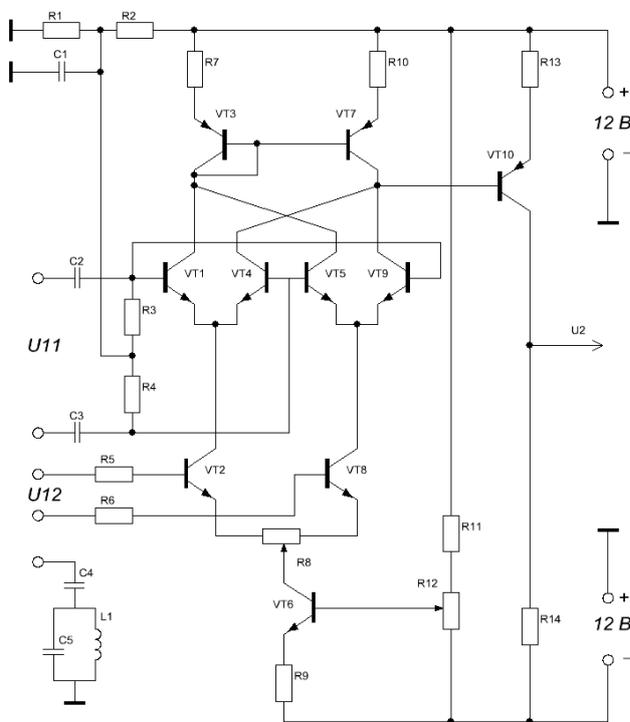
Рис. 12.1

Перемножители напряжений используются для формирования выходного сигнала, напряжение которого пропорционально произведению напряжений двух выходных сигналов (рис.12.1).

$$u_2(t) = k * u_{11}(t) * u_{12}(t) \quad (12.1)$$

Если напряжение выходного сигнала помимо составляющей, пропорциональной произведению напряжений входных сигналов, содержит один или оба эти сигнала, перемножитель называется соответственно однобалансным или простым. Формула (12.1) соответствует т.н. двухбалансному перемножителю, у которого выходной сигнал не содержит входных сигналов, а только их произведение.

Появление балансных перемножителей сигнальных напряжений позволило существенно улучшить качество таких операций как модуляция, демодуляция, преобразование частоты, которые прежде осуществлялись путем применения нелинейных элементов. По этой причине двухбалансные перемножители входят в состав многих микросхем, осуществляющих данные операции.



**Ошибка!** Текст указанного стиля в документе отсутствует. Рис. 12.2. Схема и печатная плата лабораторного макета двухбалансного перемножителя напряжений аналоговых сигналов

Схема лабораторного макета балансного перемножителя показана на рисунке 12.2, в со-

став перемножителя входят: генератор стабильного тока – VT6, "Нижний" дифференциальный усилитель – VT2, VT8 и два "верхних" дифференциальных усилителя VT1-VT4, VT5-VT9. Как видно из схемы, транзисторы "нижнего" ДУ являются источниками эмиттерных токов для транзисторов верхних ДУ, входы верхних ДУ, соединены параллельно, а их выходы - перекрестно-параллельно. Нагрузкой "верхних" ДУ является токовое зеркало, построенное на транзисторах VT3-VT7. Токовое зеркало формирует на своем выходе ток, равный

$$i = i_{3VT1} + i_{3VT5} - i_{3VT4} - i_{3VT9} \quad (12.2)$$

(см.рисунок 12.2). Этот разностный ток является входным для простого усилителя, построенного на VT10. Выходной сигнал снимается с коллектора VT10.

Можно показать, что при активном режиме всех транзисторов разностный ток (12.2) будет выражаться следующей формулой:

$$i = kI_0 \frac{u_{11}u_{12}}{U_T^2} + \frac{I_0}{\beta}, \quad (12.3)$$

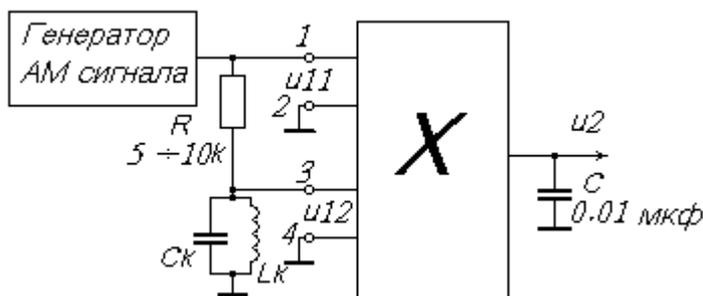
в которой  $k$  - безразмерный коэффициент,  $I_0$  - ток генератора стабильного тока на VT6,  $U_T$  - температурный потенциал, равный 26 мВ,  $\beta$  - коэффициент усиления тока транзисторами токового зеркала. Следовательно, напряжение выходного сигнала  $u_2$  будет пропорционально произведению напряжений входных сигналов:

$$u_2 = iR_{14} - E_{n2} = kI_0R_{14} \frac{\beta_{VT10}}{\beta} - E_{n2} + kI_0\beta_{VT10}R_{14} \frac{u_{11}u_{12}}{U_T^2} \quad (12.4)$$

Первые два слагаемых в данной формуле не зависят от напряжений входных сигналов и определяют постоянную составляющую напряжения выходного сигнала. Последнее слагаемое пропорциональное произведению напряжений входных сигналов является полезным выходным продуктом. В лабораторном макете предусмотрена возможность изменения  $I_0$  с помощью резистора  $R_{12}$ , что позволяет установить постоянную составляющую выходного напряжения, равной нулю.

#### Экспериментальное задание

1. Подключите макет перемножителя к источникам питания, соедините с общим проводом все входные клеммы и, включив питание, измерьте режимы транзисторов по постоянному току. Регулировкой  $R_{12}$  установите нулевое значение выходного напряжения. Клеммы 2 и 4 останутся соединенными с общим проводом во всех последующих экспериментах.
2. **Использование перемножителя в качестве усилителя с регулируемым усилением.** Подайте на клемму 1 сигнальное напряжение от генератора сигналов, на клемму 3 - постоянное напряжение  $u_{12}$  с делителя напряжений. Изменяя величину  $u_{12}$ , снимите зависимость коэффициента усиления от  $u_{12}$ . Результат представьте в виде графика.
3. **Используйте перемножителя для амплитудной модуляции сигнала.** Подав на клемму 1 синусоидальный сигнал с частотой  $\approx 100$  КГц, а на клемму 3 - другой сигнал, с частотой  $\approx 1000$  Гц, снимите осциллограмму выходного сигнала  $u_2$  и дайте объяснение форме выходного сигнала.
4. **Преобразование частоты.** Установите частоту изменения сигнального напряжения  $u_{11}$  равной  $\approx 100$  КГц. Данный сигнал возьмите с выхода генератора радиосигналов Г4-109. Сигнал  $u_{12}$  с частотой  $\approx 99$  КГц подайте от генератора синусоидальных колебаний Г3-112. Для подавления на выходе перемножителя высокочастотных сигналов установите параллельно  $R_{14}$  конденсатор емкостью 0.01 - 0.1 мкф. Наблюдая осциллограмму выходного сигнала, медленно изменяйте частоту сигнала одного из генераторов. Ответьте на вопрос, каким образом на выходе перемножителя возникло колебание с частотой равной разности частот входных сигналов.



Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует. Рис. 12.3

генератора синусоидальных колебаний Г3-112. Для подавления на выходе перемножителя высокочастотных сигналов установите параллельно  $R_{14}$  конденсатор емкостью 0.01 - 0.1 мкф. Наблюдая осциллограмму выходного сигнала, медленно изменяйте частоту сигнала одного из генераторов. Ответьте на вопрос, каким образом на выходе перемножителя возникло колебание с частотой равной разности частот входных сигналов.

5. **Детектирование амплитудно-модулированного сигнала.** На рис.3 показана схема демодулятора АМ сигнала на основе

перемножителя сигнальных напряжений. Для ее реализации подайте АМ сигнал от генератора на клемму 1 макета – непосредственно, а на клемму 3 – через добавочный резистор 5–10 К. К клемме 3 подключите также колебательный контур L1C5, имеющийся в макете. Изменяя частоту сигнала генератора и контролируя осциллографом амплитуду сигнала на клемме 3, найдите резонанс колебательного контура. Убедитесь, что при этом сигнал  $u_2$  на выходе перемножителя повторяет огибающую амплитуды высокочастотного сигнала  $u_1$ .

6. **Детектирование частотно-**

**модулированного сигнала.** На рис 4 показана схема соединения приборов для использования перемножителя сигнальных напряжений для демодуляции частотно-модулированных радиосигналов. Как видно из этой схемы, «перепрофилирование» АМ-детектора в ЧМ-детектор осу-

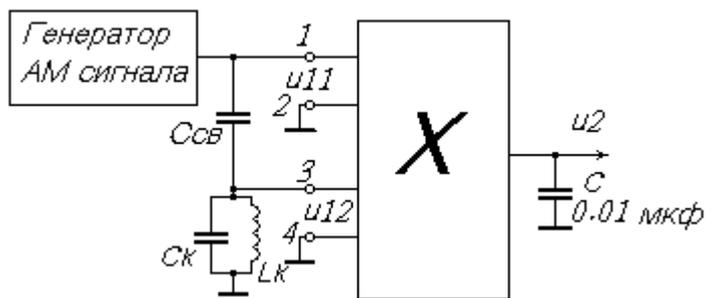


Рис. 12.4

ществляется простой заменой резистора R на конденсатор небольшой емкости  $C_{св}$ . Колебательный контур и конденсатор -  $C_{св}$  выполняют роль частотно-зависимого фазосдвигаателя. Если частота входного сигнала –  $u_{11}$  совпадает с резонансной частотой контура, разность фаз сигналов  $u_{11}$  и  $u_{12}$  близки к  $90^\circ$ , а напряжение выходного сигнала близко - 0. При отклонении частоты входного сигнала от резонансной частоты контура разность фаз напряжений  $u_{11}$  и  $u_{12}$  изменяется в ту или другую сторону, что приводит к изменению  $u_2$ . Соберите цепь частотного детектора и снимите зависимость  $u_2$  от частоты входного сигнала. Амплитуда входного сигнала должна быть постоянной. Результат представьте в виде графика.

**Контрольные вопросы**

1. Назначение перемножителей сигнальных напряжений.
2. Изобразите схему двухбалансного перемножителя, используемую в лабораторной работе, и поясните назначение его элементов.
3. Докажите, что выходное напряжение в используемом перемножителе пропорционально произведению напряжению входных сигналов.
4. Поясните использование балансного перемножителя в усилителе с регулируемым усилением, амплитудном модуляторе, преобразователе частоты, детекторах АМ и ЧМ радиосигналов.