

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
“Брестский государственный технический университет”

Кафедра автоматизации технологических процессов и производств

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к лабораторным работам  
по дисциплине «Электроника и микропроцессорная техника»  
для студентов специальностей 36 01 01, 36 01 03

**АНАЛОГОВЫЕ УСТРОЙСТВА**

Брест 2006

УДК 621.382 (075.8)

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Электроника и микропроцессорная техника» для студентов специальностей 36 01 01, 36 01 03: Аналоговые устройства. – Брест.: БГТУ, 2006. – 54 с.

Представлен цикл из шести лабораторных работ, в которых изучаются характеристики основных электронных приборов и принципы построения наиболее широко используемых аналоговых электронных устройств на их основе. Лабораторные работы выполняются с использованием системы схемотехнического моделирования *Electronics Workbench*. Материалы по каждой работе содержат краткие теоретические сведения, порядок выполнения работы и контрольные вопросы.

Лабораторные работы соответствуют программе дисциплины «Электроника и микропроцессорная техника» для студентов специальностей 36 01 01 – «Технология машиностроения» и 36 01 03 – «Технологическое оборудование машиностроительного производства».

Рекомендовано кафедрой АТПИП 26 января 2006 г.  
Протокол № 6.

Составители: О.Н. Прокопеня, к.т.н., доцент;  
А.С. Смаль, старший преподаватель.

Рецензент: Л.М. Лыньков, заведующий кафедрой защиты информации БГУИР,  
д.т.н., профессор.

## Введение

В настоящее время средства электроники широко применяются во всех отраслях промышленности, а также в быту. Поэтому современный инженер должен обладать навыками практической работы с электронными устройствами. Он должен уметь осуществлять анализ работы электронных схем и их настройку, производить необходимые измерения и выявлять возможные неисправности.

Появление программ схемотехнического моделирования, таких как *Electronics Workbench*, *MicroCap*, *Multisim* и др. позволило существенно повысить эффективность анализа за счёт применения средств вычислительной техники. Указанные средства позволяют не только воспроизвести работу конкретного устройства, но и выполнять измерения величины и формы сигналов одновременно для большого числа точек, чего нельзя обеспечить во многих случаях практическими методами. Лёгкость замены компонентов и изменения параметров отдельных элементов схемы позволяет выполнять анализ их влияния на работу и характеристики устройства. Таким образом, данные программы не только облегчают процесс поиска неисправностей и настройки схемы, но и обеспечивают более глубокое понимание принципов ее построения и функционирования.

Данный курс базируется на использовании программы *Electronics Workbench*, наиболее простой в освоении и обладающей достаточными для учебных целей возможностями. С её помощью исследуется работа наиболее распространённых электронных схем, изучаются их характеристики и способы настройки. Однако, поскольку любая схема реализуется в конкретном устройстве, с которым сталкивается специалист в повседневной практике, электронное моделирование должно сочетаться с практической работой на лабораторных стендах. Поэтому каждая лабораторная работа содержит практическую часть, выполнение которой позволяет сопоставить результаты моделирования с экспериментом и выработать навыки практической работы с оборудованием.

## Общие требования к выполнению работ и оформлению отчёта

Лабораторные работы выполняются студентами в порядке нумерации. Поскольку использование компьютеров позволяет выполнять работы фронтальным методом, каждая работа выполняется после прочтения соответствующего материала на лекциях. Это даёт возможность использовать конспект лекций при подготовке к лабораторным работам.

К очередной работе студент должен готовиться самостоятельно и заблаговременно, используя методические указания, рекомендуемую литературу и конспект лекций. В начале каждого занятия преподаватель опрашивает студентов, проверяя их подготовку.

При подготовке к работе следует сформировать структуру отчёта, т.е. записать наименование и цель работы, а также выполняемые задания по пунктам. Если в заданиях предусмотрены предварительные расчеты, необходимые для последующего моделирования или эксперимента, их следует выполнить заранее. В заданиях, предусматривающих построение характеристик устройств или других функциональных зависимостей, необходимо нарисовать заготовки таблиц и оставить место для построения графиков.

По литературе [1,2] необходимо освоить работу с программой *Electronics Workbench*:

- изучить панели инструментов и их назначение;
- научиться выбирать электронные компоненты из библиотек, формировать схемы и подключать необходимые измерительные приборы.

Краткое описание интерфейса программы *Electronics Workbench* и примеры построения и анализа электрических цепей приведены в **Приложении**.

Типы компонентов для исследования и построения схем назначаются преподавателем индивидуально каждому студенту.

Задания по экспериментальной проверке полученных результатов на лабораторном стенде также выдаются индивидуально.

Отчет по лабораторной работе может быть выполнен либо как электронный документ с представлением в распечатанном виде, либо в рукописном оформлении на листах формата А4. Он должен иметь титульный лист и соответствовать принятым в университете стандартам. При рукописном оформлении все построения выполняются с помощью чертёжных инструментов. Условные обозначения компонентов на схемах должны соответствовать требованиям ГОСТ.

Отчёт должен содержать:

- наименование и цель работы;
- принципиальные схемы исследуемых устройств;
- основные определения, касающиеся исследуемых компонентов и схем;
- основные характеристики, назначение и области применения исследуемых устройств;
- таблицы с результатами измерений;
- графики, выполненные на миллиметровой бумаге либо в распечатанном виде с обязательным нанесением координатной сетки;
- результаты расчётов и формулы, по которым они выполнялись, с необходимыми пояснениями;
- выводы.

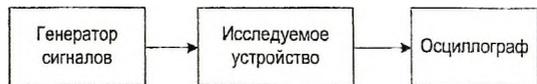
Работа должна быть защищена студентом после ее написания и оформления отчёта. При подготовке к защите следует использовать электронные ресурсы:

## Изучение средств измерений в электронике. Определение характеристик электронных устройств

**Цель работы** – изучение методики применения генератора сигналов и осциллографа для проведения измерений; освоение методики определения характеристик электронных устройств.

### 1.1. Краткие теоретические сведения

Работа большинства электронных устройств (ЭУ) связана с передачей и возможным преобразованием электрических сигналов. На вход устройства поступает сигнал с определёнными параметрами, а с выхода снимается сигнал, параметры которого обычно отличаются от входного. При этом взаимосвязь между параметрами входного и выходного сигналов определяется функциональным назначением устройства и поэтому, как правило, известна. Следовательно, проверить правильность функционирования устройства можно путем подачи на вход сигнала с требуемыми параметрами и измерения параметров выходного сигнала.



Указанный метод анализа является весьма распространённым.

Для его реализации требуется генератор сигналов и осциллограф.

Рис.1.1 Функциональная схема для оценки правильности передачи сигнала исследуемым устройством

Схема подключения данных приборов к исследуемому устройству показана на рис.1.1.

При выполнении измерений необходимо обратить внимание на следующее. Каждое устройство рассчитано на работу с определённым уровнем сигналов, значительное превышение которого в отдельных случаях может привести к повреждению устройства. Следовательно, предварительно необходимо хотя бы приблизительно оценить допустимую амплитуду входного сигнала для исследуемого устройства и начать измерение с меньших значений.

Для исключения влияния измерительных приборов на работу устройства их входные и выходные сопротивления должны быть согласованы, т.е. входное сопротивление последующего устройства в направлении прохождения сигнала должно быть на порядок больше выходного сопротивления предыдущего устройства. Следовательно, для схемы, представленной на рис.1.1., выходное сопротивление генератора должно быть по возможности меньшим, а входное сопротивление осциллографа по возможности большим.

Следует также отметить, что подключение к выходу исследуемого устройства нагрузки с сопротивлением меньше допустимого может привести к перегрузке и повреждению устройства. Поэтому подключение приборов в процессе измерения следует выполнять аккуратно, не допуская коротких замыканий выхода.

Осциллограф является весьма универсальным прибором, позволяющим определить не только форму сигнала, но и его количественные параметры: амплитуду ( $U_m$ ), период ( $T$ ), частоту ( $f = 1/T$ ) и т.п. На рис. 1.2

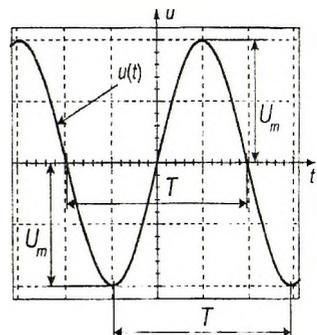


Рис.1.2 Определение амплитуды ( $U_m$ ) и периода ( $T$ ) колебаний переменного напряжения

представлена осциллограмма синусоидального сигнала  $u(t)$ . Для определения по осциллограмме амплитудного значения напряжения  $U_m$  необходимо с помощью вертикальной шкалы (рис.1.2) измерить амплитуду сигнала в единицах шкалы (сантиметрах), а затем умножить полученное значение на соответствующий масштабный множитель. Аналогично определяются и временные параметры сигнала, только в этом случае измерения проводятся с помощью горизонтальной шкалы (рис.1.2) (см. Техническое описание и инструкцию по эксплуатации осциллографа). Двухлучевой осциллограф даёт возможность одновременного исследования двух сигналов и определения их взаимного расположения на временной оси. С помощью такого осциллографа можно получать и *частотные* характеристики исследуемых устройств.

К основным техническим показателям и характеристикам электронных устройств относят *входное* и *выходное* сопротивления; *коэффициент передачи*, *амплитудно-* и *фаза-частотные характеристики*.

В общем случае электронное устройство можно представить в виде четырёхполюсника, одна из возможных эквивалентных схем которого представлена на рис. 1.3. К входным зажимам (1–1') ЭУ подключается источник входного сигнала в виде генератора напряжения с ЭДС  $\dot{E}_T$ , имеющего внутреннее сопротивление  $Z_T$ , а к выходным зажимам (2–2') подключена нагрузка сопротивлением  $Z_H$ .

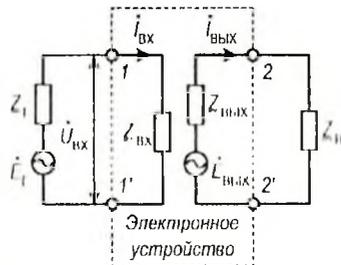


Рис.1.3 Представление ЭУ в виде четырёхполюсника

*Входное* сопротивление ЭУ представляет собой сопротивление  $Z_{ВХ}$  между зажимами 1–1' (рис.1.3) и определяется выражением

$$Z_{ВХ} = \frac{\dot{U}_{ВХ}}{\dot{i}_{ВХ}}. \quad (1.1)$$

*Выходное* сопротивление  $Z_{ВЫХ}$  определяют между выходными зажимами (2–2') ЭУ при отключённом сопротивлении нагрузки  $Z_H$ :

$$Z_{ВЫХ} = \frac{\dot{U}_{ХХ}}{\dot{i}_{КЗ}}, \quad (1.2)$$

где  $\dot{U}_{ХХ}$  – напряжение «холостого хода» ( $\dot{U}_{ВЫХ}$ ), а  $\dot{i}_{КЗ}$  – ток «короткого замыкания» на выходе ЭУ.

*Коэффициент передачи* ЭУ (по напряжению, току либо мощности) определяется как отношение выходного значения сигнала к соответствующему входному значению. Например, коэффициент передачи по напряжению

$$K = \frac{\dot{U}_{ВЫХ}}{\dot{U}_{ВХ}}. \quad (1.3)$$

В общем случае коэффициент передачи зависит от частоты электрического сигнала  $\omega = 2\pi f$  и является комплексной величиной:  $K = K(j\omega)$ . Его можно представить в виде

$$K(j\omega) = K(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (1.4)$$

где  $K(\omega) = |K(j\omega)|$  – зависимость модуля комплексного коэффициента передачи от

частоты называют *амплитудно-частотной характеристикой* (АЧХ), а  $\varphi(\omega) = \arg(K(j\omega))$  – зависимость разности фаз между входным и выходным напряжениями от частоты называют *фазо-частотной характеристикой* (ФЧХ) электронного устройства. АЧХ и ФЧХ дают полное представление о свойствах исследуемых электронных устройств и широко используются при проектировании различных ЭУ.

**Измерение входного сопротивления.**

Один из способов измерения входного сопротивления показан на рис.1.4. Резистор с известным сопротивлением  $R$  включают между генератором и входом исследуемой схемы. Затем с помощью осциллографа или вольтметра переменного напряжения с высокоомным входом измеряются напряжения  $U_1$  и  $U_2$  по обе стороны резистора  $R$ .

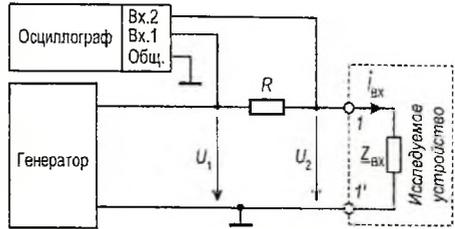


Рис.1.4 Измерение входного сопротивления

Если  $I_{вх}$  – входной ток, то, согласно закону Ома, на резисторе  $R$  падает напряжение, равное  $U_1 - U_2 = I_{вх}R$ . Поэтому  $I_{вх} = \frac{U_1 - U_2}{R}$ , а так как  $R_{вх} = \frac{U_2}{I_{вх}}$  (см. (1.1)), то

$$R_{вх} = \frac{RU_2}{U_1 - U_2} = \frac{R}{U_1/U_2 - 1}. \tag{1.5}$$

Если исследуемая схема является усилителем, то часто удобнее всего определять  $U_1$  и  $U_2$ , выполняя измерения на выходе усилителя:  $U_1$  измеряется при непосредственном подключении генератора к входу, а  $U_2$  – при последовательном включении с входом резистора  $R$ . Поскольку в выражении для  $R_{вх}$  присутствует только отношение  $U_1/U_2$ , коэффициент усиления не играет никакой роли. Предполагается, что при выполнении этих измерений напряжение на выходе генератора остаётся неизменным.

**Измерение выходного сопротивления.**

Практический способ измерения выходного сопротивления показан на рис.1.5. Здесь напряжение холостого хода измеряется вольтметром или осциллографом с высокоомным входом, а затем выходные зажимы (2–2') шунтируются нагрузкой с известным сопротивлением  $R$ . Уменьшенное выходное напряжение при подключенной нагрузке непосредственно определяется тем же измерительным прибором. Значение  $R_{вых}$  можно вычислить как отношение величины, на которую упало напряжение, к выходному току.

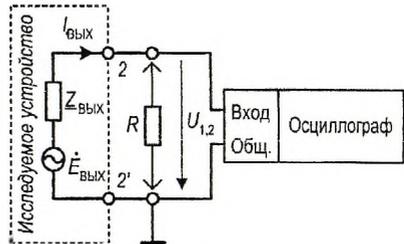


Рис.1.5 Измерение выходного сопротивления ЭУ

Пусть  $U_1$  – напряжение, измеренное на выходных клеммах в отсутствие шунтирующего резистора, а  $U_2$  – выходное напряжение на резисторе  $R$ .

Тогда  $R_{вых} = \frac{U_1 - U_2}{I_{вых}}$ ,  $I_{вых} = \frac{U_2}{R}$ . Отсюда

$$R_{вых} = \frac{R(U_1 - U_2)}{U_2} = R \left( \frac{U_1}{U_2} - 1 \right). \tag{1.6}$$

## Получение амплитудно- и фазо-частотных характеристик .

На рис.1.6 показано подключение приборов к исследуемому устройству для получе-

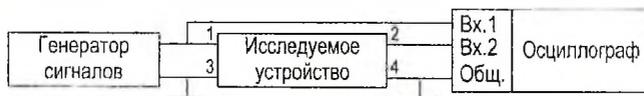


Рис.1.6 Схема измерения АЧХ и ФЧХ исследуемого устройства

ния частотных характеристик. На один вход осциллографа подаётся сигнал непосредственно с генератора (с входа исследуемого устройства), а на другой – с выхода исследуемого устройства. По полученным осциллограммам определяются амплитуды обоих сигналов и соотношение между ними, а также смещение сигналов во времени  $\Delta t$ . На

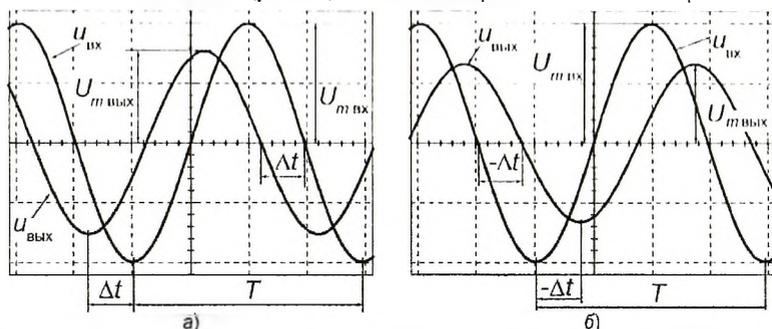


Рис.1.7 Осциллограммы входного  $u_{вх}$  и выходного  $u_{вых}$  сигналов: а – выходной сигнал опережает входной сигнал; б – выходной сигнал отстает от входного

рисунке 1.7 представлены примерные осциллограммы для двух случаев:

- выходной сигнал опережает ( $\Delta t > 0$ , рис.1.7а) и
- запаздывает ( $\Delta t < 0$ , рис.1.7б) по фазе относительно входного сигнала.

Сдвиг фаз при этом можно вычислить по формуле

$$\varphi = 2\pi f \Delta t, \quad (1.7)$$

где  $f$  – частота сигнала. Разность фаз удобно также определять по формуле

$$\varphi = 2\pi \Delta t / T, \quad (1.8)$$

при этом значения  $T$  и  $\Delta t$  можно подставлять в единицах шкалы временной оси (в мм). Обычно при построении ФЧХ значения разности фаз откладывают в градусах ( $\pi = 180^\circ$ )

На практике обычно используют *логарифмические амплитудно- и фазо-частотные характеристики (ЛАЧХ и ЛФЧХ)*. При построении ЛАЧХ ординаты откладывают в децибелах (дБ), вычисляя их по формуле

$$K(f) = 20 \lg(K_U(f)), \quad (1.9)$$

где  $K_U(f) = U_{m\text{вых}} / U_{m\text{вх}}$ .

Обе характеристики строят в логарифмическом масштабе частот. При двукратном изменении частоты считается, что она изменяется на *октаву*, а при десятикратном изменении – на *декаду*. Каждая декада занимает на оси частот одинаковый отрезок. Если принять его равным 100 мм, то разметка оси в пределах декады производится следующим образом:

$\bar{r}$ , Гц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d$ , мм	0	30	48	60	70	78	84,5	90	95,5	100

По виду ЛАЧХ и ЛФЧХ (либо АЧХ и ФЧХ) можно определить, чем является исследуемое ЭУ, и в отдельных случаях восстановить его схему. В данной лабораторной работе исследуемыми электронными устройствами являются пассивные RC-фильтры. На рис.1.8 представлены АЧХ (а), ЛАЧХ (б) и ЛФЧХ (в) четырёх типов таких фильтров.

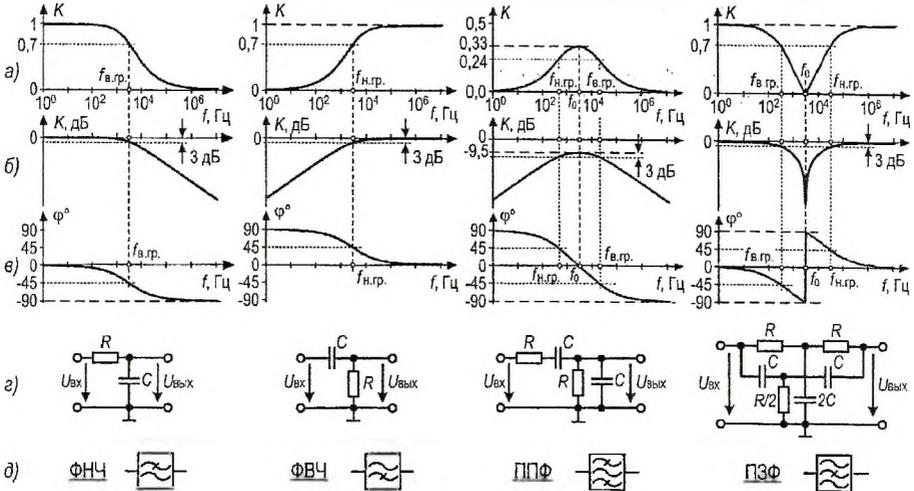


Рис.1.8 АЧХ (а), ЛАЧХ (б), ЛФЧХ (в), электрические схемы (г), названия и условные обозначения (д) соответствующих исследуемых устройств

Анализируя приведённые частотные характеристики (слева направо), можно сделать следующие выводы. В первом случае коэффициент передачи  $K(f)$  снижается с ростом частоты, следовательно, соответствующее устройство является *фильтром низких частот* (ФНЧ). Во втором случае с ростом частоты коэффициент передачи увеличивается, поэтому, данное устройство является *фильтром высоких частот* (ФВЧ). В третьем случае коэффициент передачи сначала возрастает, достигая максимального значения на частоте  $f_0$ , а затем убывает, такая характеристика соответствует *полосовому пропускающему фильтру* (ППФ). В последнем случае коэффициент передачи сначала убывает, затем возрастает, принимая минимальное значение на частоте  $f_0$ ; соответствующее устройство называют *режекторным фильтром*, или *полосовым заграждающим фильтром* (ПЗФ). С помощью АЧХ можно определить *частоты среза* (верхнюю и/или нижнюю граничные частоты соответственно  $f_{в.гр.}$ ,  $f_{н.гр.}$ ), на которых коэффициент передачи меньше в  $\sqrt{2}$  раз максимального значения ( $1/\sqrt{2} \approx 0,7$ ), см. рис.1.8а. В случае ЛАЧХ коэффициент передачи на частоте среза меньше максимального значения на 3 дБ ( $20 \lg(1/\sqrt{2}) \approx -3$ ), см. рис.1.8б. Следует также отметить, что для рассмотренных устройств (фильтров), сдвиг фазы на верхней граничной частоте составляет  $-45^\circ$ , а на нижней граничной частоте равен  $45^\circ$  (рис.1.8в). На рис.1.8г приведены электрические принципиальные схемы фильтров (при построении частотных характеристик для всех

типов фильтров принималось  $R = 1,6 \text{ кОм}$ ,  $C = 33 \text{ нФ}$ ;  $f_0 = 1/(2\pi RC)$ ). На рис.1.8д показаны соответственно условные обозначения фильтров на функциональных схемах.

## 1.2. Порядок выполнения работы

**Задание 1:** Изучение измерительных приборов и методов выполнения измерений

- а) изучить техническое описание и инструкцию по эксплуатации осциллографа двухлучевого С1-69 и генератора сигналов ГЗ-118;
- б) включить приборы в сеть и подготовить их к работе.

**Задание 2:** Измерение амплитуды, периода и частоты исследуемого сигнала (рис.1.2)

- а) выставить заданные преподавателем значения амплитуды сигнала и его частоты по шкале генератора;
- б) определить частоту сигнала  $f_{\text{ИЗМ}}$  с помощью осциллографа, сравнить с установленным значением  $f_{\text{УСТ}}$  и вычислить отклонение  $\delta = |f_{\text{УСТ}} - f_{\text{ИЗМ}}| / f_{\text{УСТ}} \times 100\%$ .

**Задание 3:** Определение входного и выходного сопротивлений ЭУ для разных частот

- а) определить входное сопротивление осциллографа (рис.1.4) по формуле (1.5);
- б) определить выходное сопротивление генератора (рис.1.5) по формуле (1.6);
- в) определить входное и выходное сопротивления пассивного четырёхполюсника.

**Задание 4:** Определение частотных характеристик пассивного четырёхполюсника

- а) собрать схему для измерения характеристик в соответствии с рис.1.6;
- б) задавая с помощью генератора фиксированные значения частоты ( $f = 10; 30; 100; 300; 1000; 3000; 10\ 000; 30\ 000; 100\ 000; 300\ 000 \text{ Гц}$ ), установив и поддерживая амплитуду входного сигнала равной 1 В, измерять амплитуду и период выходного сигнала, а также временной сдвиг сигналов  $\Delta t$ , при этом обязательно учитывать знак  $\Delta t$  (см. рис.1.7);
- в) занести результаты измерений в таблицу.
- г) рассчитать соответствующие значения коэффициента передачи  $K(f)$  (по формуле (1.9)) и сдвига фаз  $\varphi(f)$  (по формуле (1.7) или (1.8)); результаты свести в таблицу;
- д) построить ЛАЧХ и ЛФЧХ пассивного четырёхполюсника;
- е) по виду полученных характеристик определить тип исследованного четырёхполюсника, начертить его предполагаемую схему и определить частоты среза (см. рис.1.8).

## 1.3. Контрольные вопросы

1. Каким должно быть входное (выходное) сопротивление измерительного прибора и как его величина отражается на точности измерения?
2. Какими функциональными возможностями обладает генератор сигналов ГЗ-118?
3. Какие функции может выполнять осциллограф С1-69?
4. Как с помощью осциллографа определить амплитуду, частоту и сдвиг фаз для двух сигналов?
5. Как строятся логарифмические частотные характеристики и для чего они используются?
6. Как по АЧХ и ЛАЧХ определяются частоты среза?
7. Пояснить принцип действия пассивных RC-фильтров.
8. Получить аналитические выражения зависимостей  $K_{\text{вх}}(f)$  и  $\varphi(f)$  для различных типов пассивных RC-фильтров.

**Исследование статических характеристик полупроводниковых приборов**

Цель работы – изучение принципа действия полупроводниковых диодов, стабилитронов и биполярных транзисторов; освоение методов получения вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов и расчёта их основных параметров.

**2.1. Краткие теоретические сведения**

Принцип действия большинства полупроводниковых приборов основан на физических явлениях, происходящих в области контакта граничащих друг с другом областей полупроводника. При этом в основном используют структуры: полупроводник-полупроводник, металл-полупроводник, металл-диэлектрик- полупроводник. Носителями заряда в полупроводниках являются электроны и дырки. В чистом полупроводнике их концентрация одинакова. Такой полупроводник обладает *собственной электропроводимостью*.

Введением соответствующих примесей можно увеличить количество свободных электронов или дырок и получить полупроводник с электронной (*n*-типа) или дырочной (*p*-типа) проводимостью. Зоны указанных типов могут быть созданы в одном кристалле полупроводника. Граница между *p*- и *n*-зонами называется электронно-дырочным переходом или, кратко, *p-n*-переходом. Различные полупроводниковые приборы получают созданием в кристалле определённого числа *p-n*-переходов. При этом свойства и

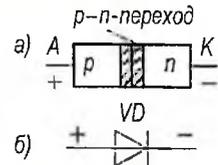


Рис.2.1 Структура и УГО диода

характеристики приборов зависят от количества, порядка чередования и размеров *p*- и *n*-зон, а также концентрации примесей в них.

**Полупроводниковый диод** – это полупроводниковый прибор с одним *p-n*-переходом, имеющий два вывода (рис.2.1). Вывод от *p*-зоны называется анодом, а вывод от *n*-зоны катодом. В процессе работы к диоду прикладывается напряжение как в прямом, так и в обратном направлении. При *прямом* включении внешнее напряжение прикладывается плюсом к аноду, при *обратном* – плюсом к катоду.



Рис.2.2 ВАХ полупроводникового диода

*Вольт-амперной характеристикой (ВАХ)* называют зависимость тока от напряжения  $I = f(U)$  (или зависимость напряжения от тока  $U = f(I)$ ). Типичная ВАХ обычного диода представлена на рисунке 2.2. Прямая и обратная ветви характеристики соответствуют прямому и обратному включению диода. Как видно из приведённой ВАХ, обратный ток диода  $I_{обр}$  мал, в то время как прямой ток  $I_{пр}$  резко возрастает при незначительном увеличении напряжения, т.е. диод проводит ток преимущественно в одном направлении. Напряжение на диоде при прямом включении  $U_{пр}$  для кремниевых диодов составляет ~ 1 В, для германиевых – 0,5 В. Низкая обратная проводимость сохраняется в широком диапазоне изменения обратного напряжения  $U_{обр}$ , который определяется типом диода. При некотором значении  $U_{обр} = U_{проб}$  происходит пробой *p-n*-перехода и он теряет свои запирающие свойства (участок обратной ветви характеристики, резко уходящий вниз). Рабочий участок обратной ветви ограничивается величиной  $U_{обр\max} \approx 0,8 U_{проб}$ .

Свойства полупроводниковых диодов оценивают рядом параметров. Различают общие параметры, которыми характеризуется любой полупроводниковый диод, и специальные параметры, присущие только отдельным типам диодов.

К общим параметрам диодов относятся:

- допустимая температура перехода  $T_{\text{ПЕР max}}$  (максимальная температура, при которой не возникнет тепловой пробой  $p$ - $n$ -перехода);
- допустимая мощность, рассеиваемая диодом,  $P_{\text{доп max}}$  и допустимый прямой ток  $I_{\text{ПР max}}$ , (мощность и ток, при которых температура  $p$ - $n$ -перехода достигает значения  $T_{\text{ПЕР max}}$ );
- допустимое обратное напряжение  $U_{\text{ОБР max}}$  (напряжение, при котором исключается возможность теплового пробоя  $p$ - $n$ -перехода);
- прямое сопротивление диода постоянному току (статическое)

$$R_{\text{ПР}} = \frac{U_{\text{ПР}}}{I_{\text{ПР}}}, \quad (2.1)$$

- прямое дифференциальное сопротивление (сопротивление переменному току)

$$r_{\text{ПР}} = \left. \frac{dU_{\text{ПР}}}{dI_{\text{ПР}}} \right|_{I_{\text{ПР-задан}}} \approx \left. \frac{\Delta U_{\text{ПР}}}{\Delta I_{\text{ПР}}} \right|_{I_{\text{ПР-задан}}}, \quad (2.2)$$

- обратные статическое  $R_{\text{ОБР}}$  и дифференциальное  $r_{\text{ОБР}}$  сопротивления.

Приближённые значения  $R_{\text{ПР}}$  и  $r_{\text{ПР}}$  можно определить графоаналитическим методом по ВАХ следующим образом (см. рис.2.3). В заданной точке ВАХ, например т.А ( $U_{\text{ПР}} = 700$  мВ;  $I_{\text{ПР}} = 6$  мА), проводят касательную  $BB'$ , и определяют значения  $\Delta U$  и  $\Delta I$  (соответственно  $BC$  и  $B'C$ ). Можно считать, что точка пересечения касательной с осью напряжений (т.В) примерно соответствует напряжению открытия диода  $U_{\text{до}}$ . По формулам (2.1) и (2.2) соответственно получают:

$$R_{\text{ПР}} = \frac{U_{\text{ПР}}}{I_{\text{ПР}}} = \frac{700 \text{ мВ}}{6 \text{ мА}} \approx 117 \text{ Ом}; \quad r_{\text{ПР}} \approx \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{BC}{B'C} = \frac{(725 - 665) \text{ мВ}}{(10,4 - 0) \text{ мА}} \approx 6 \text{ Ом}.$$

Аналогично для обратной ветви ВАХ можно определить значения  $R_{\text{ОБР}}$  и  $r_{\text{ОБР}}$ .

Классификация полупроводниковых диодов осуществляется по ряду признаков, важнейшими из которых являются вид исходного полупроводникового материала и назначение. В зависимости от типа исходного материала различают германиевые, кремниевые, селеновые диоды и другие. По назначению диоды делятся на *выпрямительные*, *высокочастотные* и *сверхвысокочастотные* (ВЧ и СВЧ диоды), *импульсные*, *стабилитроны*, *туннельные*, *варикапы* и другие.

Выпрямительные диоды (рис.2.16) предназначены для преобразования переменного тока в постоянный в ограниченном диапазоне частот. Выбор данных диодов осуществляется по *среднему прямому току*  $I_{\text{ПР ср}}$  и *обратному напряжению*  $U_{\text{обр}}$ .

Полупроводниковые стабилитроны (диоды Зенера) (рис. 2.4) используются для стабилизации уровней напряжений в различных схемах (отсюда второе название

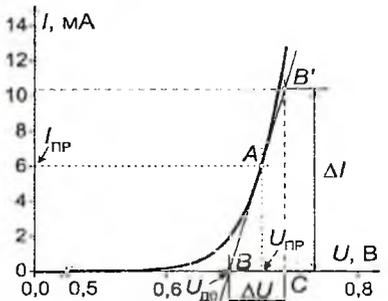


Рис.2.3 К определению статического и динамического сопротивлений диода

стабилитронов – *опорные диоды*). Работа стабилитрона осуществляется в режиме пробоя  $p-n$ -перехода при обратном включении. Соответствующий участок обратной ветви ВАХ отличается малым  $r_{обр}$ , т.е. слабой зависимостью напряжения от тока. При ограничении обратного тока состояние пробоя в стабилитроне может поддерживаться неограниченно долго.

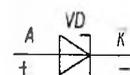


Рис.2.4 УГО стабилитрона

Стабилизацию низковольтного напряжения в пределах 0,3...1 В можно получить при использовании прямой ветви ВАХ диодов, называемых *стабисторами*.

Основные электрические параметры стабилитронов: *напряжение стабилизации  $U_{ст}$ ; максимальный и минимальный токи стабилизации:  $I_{ст max}$ ,  $I_{ст min}$ ; максимальная допустимая мощность рассеяния  $P_{доп max}$ .*

**Транзистор** – электропреобразовательный полупроводниковый прибор с одним или несколькими электрическими переходами, пригодный для усиления мощности и имеющий три или более выводов. Действие транзисторов основано на управлении движением носителей электрических зарядов в полупроводниковом кристалле.

Транзисторы классифицируют по характеру переноса носителей, числу и порядку чередования областей  $p-n$ -переходов, мощности и т.д.

По характеру переноса носителей заряда различают транзисторы *биполярные* и *полевые (униполярные)*. В биполярных транзисторах физические процессы определяются движением носителей заряда обоих знаков, которые для отдельных областей могут являться неосновными, а в полевых (униполярных) транзисторах – движением носителей одного знака (основных носителей).

Биполярный транзистор – полупроводниковый прибор, содержащий три полупроводниковые области с чередующимися типами проводимости, разделённые двумя взаимодействующими  $p-n$ -переходами. В зависимости от порядка чередования областей различают транзисторы  $p-n-p$ - и  $n-p-n$ -типов. Структура кристалла и УГО данных типов транзисторов представлены на рис. 2.5.

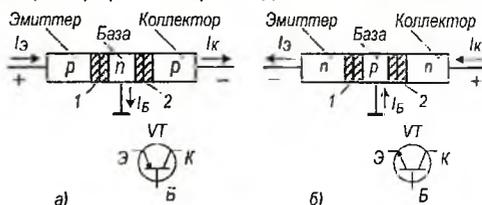


Рис.2.5 Структура биполярных транзисторов и их УГО (внизу): а)  $p-n-p$ -типа; б)  $n-p-n$ -типа;

1– эмиттерный переход; 2– коллекторный переход. Среднюю область кристалла называют *базой* (Б), одну крайнюю область – *эмиттером* (Э), а другую *коллектором* (К). Соответственно один переход называется *эмиттерным* (1) другой – *коллекторным* (2). Часть базы, находящаяся между запирающими слоями переходов называется активной.

В большинстве выпускаемых биполярных транзисторов площадь коллекторного перехода больше площади эмиттерного, концентрация основных носителей в эмиттере значительно превышает концентрацию основных носителей в базе. Ширина активной области базы выполняется меньшей диффузионной длины неосновных носителей в базе, чтобы они могли диффундировать через базу из эмиттера в коллектор.

Принцип действия обоих типов транзисторов одинаков. Однако, вследствие того, что порядок чередования зон отличается, и основные носители в зонах имеют противоположные знаки, полярность внешних источников напряжения также должна иметь противоположные знаки (рис.2.5).

Поскольку транзистор включают во входную и выходную цепи с помощью трёх выво-

дов (электродов), то один электрод должен быть общим для обеих цепей. Соответственно различают схемы с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ), с общим коллектором (ОК), которые приведены на рис. 2.6.

В зависимости от полярности и величины напряжений во входной и выходной цепях возможны следующие режимы работы транзистора:

*отсечки* – напряжения на обоих переходах обратные (транзистор закрыт);

*насыщения* – напряжения на обоих переходах прямые (транзистор открыт);

*активный* – напряжение на эмиттерном переходе прямое, а на коллекторном – обратное (транзистор открыт);

*инверсный* – напряжение на коллекторном переходе прямое, а на эмиттерном – обратное (транзистор открыт).

На рисунке 2.6 полярность электродов указана для активного режима.

Рассмотрим принцип работы транзистора *p-n-p*-типа в активном режиме. Под действием внешних напряжений эмиттерный переход смещён в прямом направлении, а коллекторный – в обратном. При этом в цепи эмиттера возникает ток – дырки инжектируются в базовую область. Поскольку ширина базы мала, а концентрация электронов в ней намного меньше количества инжектируемых дырок, то большая часть дырок путем диффузии попадает в область коллектора. В результате в цепи коллектора возникает ток. Небольшая часть дырок в области базы рекомбинирует с электронами. Восполнение рекомбинировавших электронов происходит за счёт тока в цепи базы. Увеличение напряжения и тока входной цепи приводит к увеличению инжекции дырок в базу и соответственно – выходного тока. Таким образом, с помощью входной цепи можно управлять током выходной цепи, обеспечивая функцию усиления сигнала.

Работа транзистора *n-p-n*-типа происходит аналогичным образом.

Статические характеристики биполярного транзистора – это графические зависимости между напряжениями и токами. Для построения характеристик из четырех переменных две выражают как функции оставшихся. Это можно сделать шестью способами. Соответственно существует шесть систем функциональной связи (характеристик). Наиболее часто используется *H-система*, в которой принято

$$\begin{cases} U_{\text{вх}} = f_1(I_{\text{вх}}, U_{\text{вых}}), \\ I_{\text{вых}} = f_2(I_{\text{вх}}, U_{\text{вых}}). \end{cases} \quad (2.3)$$

Из (2.3) в статическом режиме можно получить четыре семейства характеристик. Из них на практике обычно используются *входная* ( $U_{\text{вх}} = f(I_{\text{вх}})$  при  $U_{\text{вых}} = \text{const}$ ) и *выходная* ( $I_{\text{вых}} = f(U_{\text{вых}})$  при  $I_{\text{вх}} = \text{const}$ ) вольт-амперные характеристики, которые однозначно определяют взаимосвязь между напряжениями и токами транзистора. Внешний вид характеристик зависит от схемы включения транзистора.

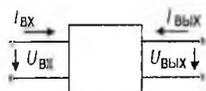


Рис.2.7 Четырёхполюсник

При малых сигналах их можно считать линейными. В этом случае (2.3) преобразуется к системе линейных уравнений, описывающих изменения

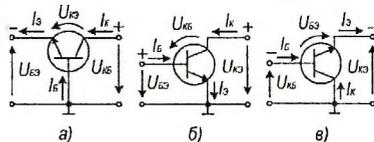


Рис.2.6 Схемы включения биполярного транзистора: а) ОБ; б) ОЭ; в) ОК

напряжений и токов транзистора

$$\begin{cases} \Delta U_{\text{ВХ}} = h_{11} \Delta I_{\text{ВХ}} + h_{12} \Delta U_{\text{ВЫХ}}; \\ \Delta I_{\text{ВЫХ}} = h_{21} \Delta I_{\text{ВХ}} + h_{22} \Delta U_{\text{ВЫХ}}, \end{cases} \quad (2.4)$$

где

$$h_{11} \approx \left. \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}} \right|_{U_{\text{ВЫХ}} = \text{const}} \quad - \text{ дифференциальное входное сопротивление}; \quad (2.4)а$$

$$h_{12} \approx \left. \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta U_{\text{ВЫХ}}} \right|_{I_{\text{ВХ}} = \text{const}} \quad - \text{ коэффициент обратной передачи (связи) по напряжению}; \quad (2.4)б$$

$$h_{21} \approx \left. \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}} \right|_{U_{\text{ВЫХ}} = \text{const}} \quad - \text{ коэффициент прямой передачи тока (усиление по току)}; \quad (2.4)в$$

$$h_{22} \approx \left. \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВЫХ}}} \right|_{I_{\text{ВХ}} = \text{const}} \quad - \text{ дифференциальная выходная проводимость}. \quad (2.4)г$$

Значения  $h$ -параметров приводятся в справочниках, их также можно приближённо определить графоаналитическим методом по статическим характеристикам транзисторов. Для определения всех  $h$ -параметров необходимо иметь не менее двух характеристик каждого семейства (входных и выходных). Параметры рассчитываются по конечным приращениям вблизи рабочей точки транзистора.  $h$ -параметры для различных схем включения обозначаются соответствующими буквами: «б» – для схемы с ОБ, «э» – с ОЭ, «к» – с ОК.

В качестве примера рассмотрим определение  $h$ -параметров для транзистора, включённого по схеме с ОЭ с помощью представленных на рис. 2.8 соответствующих входных (а) и выходных (б) вольт-амперных характеристик.

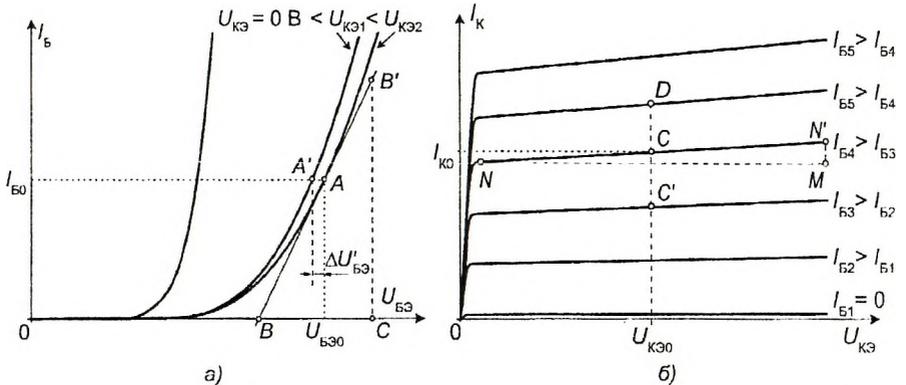


Рис.2.8 Статические характеристики биполярного транзистора: а – входные, б – выходные

Для определения параметров  $h_{11}$  и  $h_{22}$  на семействе входных характеристик (рис.2.8а) задаются рабочей точкой А ( $I_{\text{бэ}0}$ ;  $U_{\text{бэ}0}$ ), через которую проводят касательную BB'. После этого строят треугольник BB'C, и в соответствии с (2.4)а, б находят:

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{\text{бэ}}}{\Delta I_{\text{бэ}}} = \frac{BC}{B'C}; \quad h_{22} = \frac{\Delta U'_{\text{бэ}}}{\Delta U_{\text{кэ}}} = \frac{AA'}{U_{\text{кэ}2} - U_{\text{кэ}1}}. \quad (2.5)$$

Следует отметить, что ввиду малости  $\Delta U'_{эб}$  ( $< 1$  мВ) определить его значение по входным ВАХ достаточно сложно, поэтому при практических расчётах параметр  $h_{12э}$  обычно во внимание не принимают.

Семейство выходных ВАХ (рис.2.8б) используют для определения параметров  $h_{21э}$  и  $h_{22э}$ . Задавшись значениями тока  $I_{k0}$  и напряжения  $U_{кэ0}$  (рабочая точка С), проводят касательную  $NN'$  (на рис.2.8б она совпадает с прямолинейным участком ВАХ, соответствующей входному току  $I_{вх} = I_{б4}$ ), строят треугольник  $MNN'$ , и находят (2.4)в, г:

$$h_{21э} = \frac{\Delta I_{к}}{\Delta I_{б}} = \frac{C'D}{I_{б5} - I_{б4}}; \quad h_{22э} = \frac{\Delta I'_{к}}{\Delta U_{кэ}} = \frac{N'M}{MN}. \quad (2.6)$$

Рабочая точка на всех характеристиках должна соответствовать одним и тем же выбранным значениям тока и напряжения. В соответствии с этим требованием необходимо, чтобы  $U_{кэ2} = U_{кэ0}$ ;  $I_{б4} = I_{б0}$ .

Аналогично определяются  $h$ -параметры для схем с ОБ и ОК.

## 2.2. Порядок выполнения работы

- ① Лабораторная работа выполняется на компьютере с использованием программы *Electronics Workbench*.

### Задание 1: Получение прямой ветви вольт-амперной характеристики диода

а) собрать схему измерения в соответствии с рис.2.9а (задан тип исследуемого диода по указанию преподавателя).

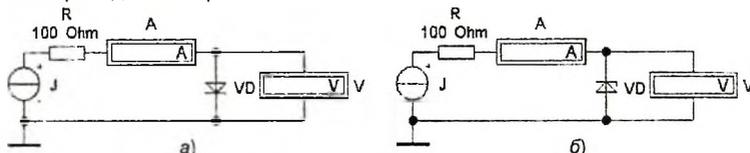


Рис.2.9 Схемы для получения прямой ветви ВАХ диода (а) и обратной ветви ВАХ стабилитрона (б)

Необходимо соблюдать полярность подключения вольтметра V и амперметра A, отрицательные клеммы которых обозначены более широкой чёрной полосой и могут находиться на любой грани изображения компонента при его вращении!

б) снять зависимость  $I_{пр}(U_{пр})$  для прямой ветви характеристики, последовательно устанавливая значения тока источника 0; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2; 5; 10 мА и измеряя соответствующие значения напряжения  $U_{пр}$  (результаты свести в таблицу);

в) построить вольт-амперную характеристику диода  $I = I(U)$ ;

г) рассчитать прямые статическое  $R_{пр}$  и дифференциальное  $r_{пр}$  сопротивления диода в произвольных точках характеристики (формулы (2.1) и (2.2) соответственно).

### Задание 2: Получение обратной ветви вольт-амперной характеристики стабилитрона

а) собрать схему измерения в соответствии с рис.2.9б (задан тип исследуемого стабилитрона по указанию преподавателя);

б) снять зависимость  $I_{обр}(U_{обр})$  для обратной ветви ВАХ, последовательно устанавливая значения тока источника 0; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2; 5; 10; 20 мА и измеряя соответствующие значения напряжения  $U_{обр}$  (результаты свести в таблицу);

в) построить вольт-амперную характеристику стабилитрона  $I = I(U)$ ;

г) рассчитать обратные дифференциальное  $r_{обр}$  и статическое  $R_{обр}$  сопротивления на участке пробоя (аналогично пункту г) из Задания 1).

**Задание 3:** Получение входных и выходных вольт-амперных характеристик для различных схем включения биполярного транзистора

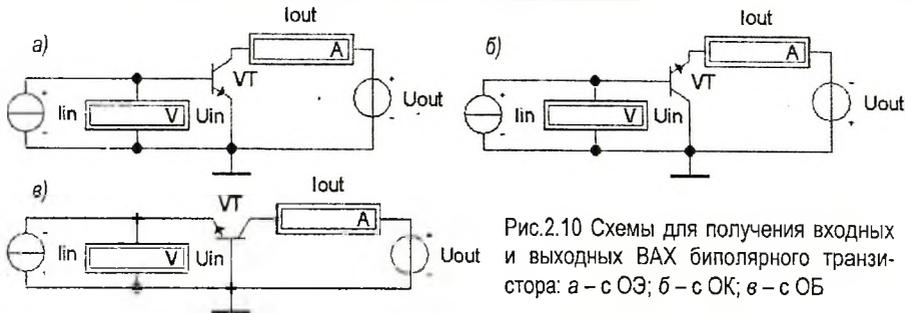


Рис.2.10 Схемы для получения входных и выходных ВАХ биполярного транзистора: а – с ОЭ; б – с ОК; в – с ОБ

а) собрать указанную преподавателем схему для получения ВАХ биполярного транзистора (см. рис. 2.10) и задать тип исследуемого транзистора.

Обращайте внимание на полярность подключения источников тока ( $I_{in}$ ) и напряжения ( $U_{out}$ ), а также вольтметра и амперметра!

б) снять зависимости  $U_{Bx}(I_{Bx})$ , изменяя входной ток  $I_{Bx}$  ( $I_{in}$ ) и измеряя соответствующие значения входного напряжения  $U_{Bx}$  ( $U_{in}$ ), для трёх значений выходного напряжения ( $U_{out}$ )  $U_{Byx} = 0; 5; 15$  В (результаты свести в таблицу);

Указание:  $U_{Byx}$  следует поддерживать постоянным, а  $I_{Bx}$  увеличивать до достижения значения выходного тока  $I_{Byx} = 30$  мА. Получить несколько точек для участка, на котором  $U_{Bx} < 0,7$  В.

в) построить входные характеристики транзистора  $I_{Bx} = I_{Bx}(U_{Bx})$ ;

г) снять зависимости  $I_{Byx}(U_{Byx})$ , изменяя значения выходного напряжения  $U_{Byx}$  ( $U_{out}$ ) (диапазон изменения напряжения согласовать с преподавателем) и измеряя соответствующие значения  $I_{Byx}$  ( $I_{out}$ ) (результаты свести в таблицу);

Указание: зависимости  $I_{Byx}(U_{Byx})$  получить для  $I_{Bx}=0$ , а также для значений  $I_{Bx}$ , при которых  $I_{Byx}$  составляет примерно 10; 20 и 30 мА. В процессе измерения поддерживать  $I_{Bx}$  постоянным;

д) построить выходные характеристики транзистора  $I_{Byx} = I_{Byx}(U_{Byx})$ ;

е) используя построенные входные и выходные ВАХ исследуемого биполярного транзистора, рассчитайте  $h$ -параметры в произвольно выбранной рабочей точке.

### 2.3. Контрольные вопросы

1. Что такое  $p-n$ -переход и какими основными свойствами он обладает?
2. Что такое диод, стабилитрон и каковы их основные параметры?
3. Приведите примеры использования диодов и стабилитронов.
4. Что такое биполярный транзистор и каков его принцип действия?
5. Чем различаются режимы работы биполярного транзистора?
6. Перечислите схемы включения биполярного транзистора, укажите особенности использования этих схем.
7. Что собой представляют статические характеристики биполярных транзисторов?
8. Какой физический смысл имеют  $h$ -параметры биполярных транзисторов и как они определяются по вольт-амперным характеристикам?
9. Какие эквивалентные схемы биполярных транзисторов Вам известны?

## Лабораторная работа № 3

### **Исследование нестабилизированных источников напряжения**

Цель работы – изучение принципа работы и исследование характеристик нестабилизированных источников вторичного электропитания.

#### **3.1. Краткие теоретические сведения**

Все источники электропитания можно разделить на первичные и вторичные. Первичные источники преобразуют неэлектрическую энергию в электрическую, обеспечивая на выходе напряжение постоянного или переменного тока. К ним относятся электромеханические генераторы, электрохимические источники (аккумуляторы или гальванические элементы), фотоэлектрические элементы и др. Выходное напряжение первичных источников в большинстве случаев не может быть непосредственно использовано для питания электронных устройств.

Обычно для питания электронной аппаратуры требуется постоянное стабилизированное напряжение с низким уровнем пульсаций. Поэтому практически любое электронное устройство содержит источник вторичного электропитания (ИВЭП). Основной задачей ИВЭП является преобразование энергии первичного источника в выходное напряжение с заданными параметрами.

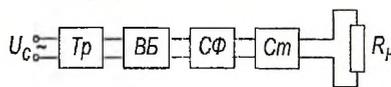


Рис.3.1 Структурная схема источника вторичного электропитания.

Чаще всего в качестве первичного используется напряжение однофазной или трёхфазной сети переменного тока. В этом случае ИВЭП имеет структуру, показанную на рисунке 3.1. Он состоит из силового трансформатора  $Tr$ , выпрямительного блока  $ВБ$  (выпрямителя), сглаживающего фильтра  $СФ$  и стабилизатора  $Ст$ .

Силовой трансформатор преобразует напряжение сети  $U_c$  в выходное переменное напряжение необходимой величины и обеспечивает гальваническую развязку от сети. Выпрямительный блок обеспечивает однонаправленное протекание тока в нагрузку (выпрямляет переменное напряжение). Сглаживающий фильтр уменьшает пульсации выпрямленного напряжения до требуемого уровня. Стабилизатор поддерживает неизменным напряжение на нагрузочном устройстве при изменениях напряжения сети или сопротивления нагрузки  $R_n$ .

Кроме основных узлов, в состав ИВЭП могут входить различные вспомогательные элементы, выполняющие функции контроля, защиты и др.

В зависимости от условий работы и требований, предъявляемых к ИВЭП, отдельные узлы их могут отсутствовать. В частности, в некоторых случаях применяются ИВЭП, не содержащие стабилизатор. Именно такие источники рассматриваются в данной работе.

Тип трансформатора и выпрямителя определяется видом используемой сети (одно- или трёхфазная). Чаще всего трёхфазная сеть используется для ИВЭП большой мощности, питающих промышленное оборудование. Трансформатор выбирается на первичное напряжение, соответствующее напряжению сети. При этом желательно применять унифицированные трансформаторы со стандартными значениями вторичного напряжения.

Выпрямители, как однофазные, так и трёхфазные, могут быть *однополупериодными* и *двухполупериодными*.

Схема однополупериодного выпрямителя приведена на рис.3.2а. Диод  $VD1$  включен

последовательно с нагрузочным устройством (резистором  $R_H$ ) и вторичной обмоткой трансформатора  $Tr$ . На рис.3.2б изображены временные диаграммы напряжений и токов однополупериодного выпрямителя. В течение первого полупериода напряжения  $u_2$  вторичной обмотки трансформатора, когда потенциал точки  $a$  положителен по отношению к потенциалу точки  $b$ , диод открыт, и через нагрузочный резистор протекает ток  $i_H = i_a$ . Если пренебречь падением напряжения на диоде в прямом направлении (обычно оно не превышает 1 В), то можно считать  $u_H = u_2$ .

Во втором полупериоде напряжение  $u_2$  прикладывается к диоду в обратном направлении (потенциал точки  $a$  становится отрицательным по отношению к потенциалу точки  $b$ ). Пренебрегая обратным током диода, который, как правило, незначителен, можно считать, что ток в нагрузке отсутствует и  $i_H = 0$ . При этом всё напряжение вторичной обмотки трансформатора приложено к закрытому диоду, т.е.  $u_a = u_2$ . Для данной схемы максимальное значение прикладываемого к диоду обратного напряжения  $U_{обр\ max} = U_{2m}$ , т.е. равно амплитудному значению напряжения  $u_2$  ( $U_{2m} = \sqrt{2}u_2$ ).

Из временных диаграмм видно, что ток в нагрузке  $i_H$  и напряжение  $u_H$  имеют пульсирующий характер. Коэффициент пульсаций  $K_{\Pi}$  обычно определяется отношением амплитуды первой (основной) гармоники  $U_{осн.\ m}$  при разложении  $u_H$  в ряд Фурье к среднему выпрямленному напряжению  $U_{H\ ср.}$ :  $K_{\Pi} = U_{осн.\ m} / U_{H\ ср.}$ . Для однофазного однополупериодного выпрямителя  $U_{H\ ср.} = U_{2m} / \pi$ ,  $K_{\Pi} = 1,57$ , а частота пульсаций  $f_H$  напряжения на нагрузке равна частоте сети ( $f_{сет}$ ).

К двухполупериодным относятся выпрямитель с отводом от средней точки и мостовой выпрямитель, схемы которых приведены на рисунке 3.3.

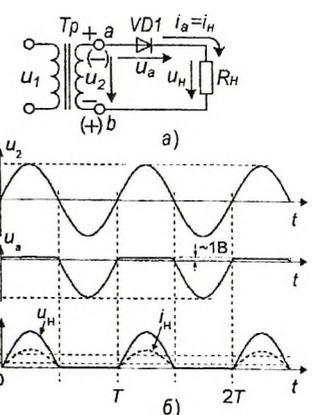


Рис.3.2 Схема однополупериодного выпрямителя (а) и временные диаграммы (б) его работы

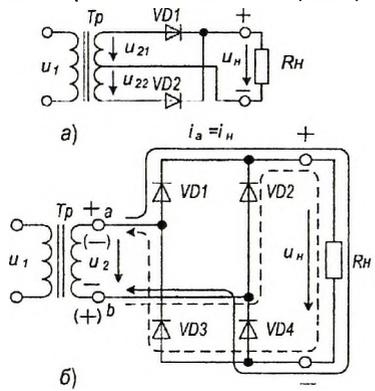


Рис.3.3 Схемы двухполупериодных выпрямителей – с отводом от средней точки (а), мостовой (б) и временные диаграммы (в) работы мостового выпрямителя

В выпрямителе с отводом от средней точки (рис.3.3а) схема соединения вторичных обмоток трансформатора такова, что одинаковые по величине напряжения ( $u_{21}$  и  $u_{22}$ ) на выводах вторичных обмоток относительно средней (нулевой) точки сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ , поэтому эту схему иногда называют *двухфазным* выпрямителем. Вторичные обмотки трансформатора подключены к анодам диодов  $VD1$  и  $VD2$ . Выходное напряжение  $u_H$  снимается между средней точкой трансформатора и общей точкой соединения катодов обоих диодов.

В выпрямителе, показанном на рисунке 3.3б, диоды  $VD1$ – $VD4$  включены по мостовой схеме. Временные диаграммы его работы приведены на рисунке 3.3в. В одном из полупериодов напряжение  $u_2$  вторичной обмотки трансформатора прикладывается в прямом направлении к последовательно соединённым диодам  $VD1, VD4$ , а в другом – к диодам  $VD2, VD3$ . Таким образом, две пары диодов пропускают ток поочередно, и через нагрузку он протекает в одном направлении во все полупериоды (направления протекания тока в обоих полупериодах показаны соответственно сплошной и штриховой линиями).

Среднее напряжение на нагрузке для данных выпрямителей вдвое выше, чем в однополупериодном:  $U_{H\text{ ср}} = (2/\pi)U_{2\text{ м}}$ ,  $K_n = 0,67$ ,  $f_H = 2f_{\text{сети}}$ .

Одним из основных недостатков выпрямителя с отводом от средней точки является то, что во время протекания тока через один из диодов обратное напряжение на другом (закрытом) диоде в пике достигает удвоенного максимального входного напряжения  $U_{\text{ОБР макс}} = 2U_{2\text{ м}}$  (в мостовом –  $U_{\text{ОБР макс}} = U_{2\text{ м}}$ ).

Недостатками мостового выпрямителя являются применение четырех диодов, удвоенное прямое падение напряжения на вентильном блоке.

В настоящее время в мостовых выпрямителях часто применяются кремниевые диффузионные блоки КЦ402–КЦ405 (от А до И), которые рассчитаны на токи  $I_{\text{пр ср}}$  от 0,6 до 1 А и напряжение  $U_{\text{ОБР макс}}$  от 100 до 600 В.

На рисунке 3.4 приведены схемы трёхфазных выпрямителей.

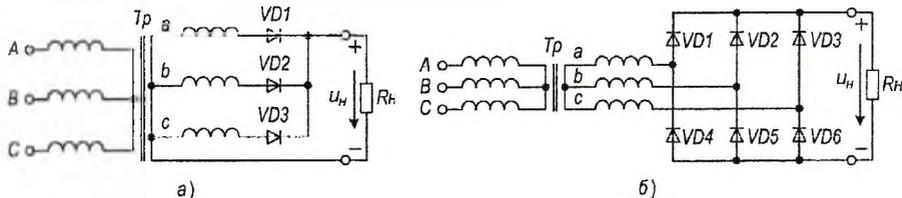


Рис.3.4 Схемы трёхфазных выпрямителей – с отводом от нулевой точки (а); мостовая (б)

*Трёхфазная нулевая (с отводом от нулевой точки)* схема выпрямителя (рис.3.4а) является однополупериодной. Каждая фаза выпрямителя работает аналогично схеме (рис.3.2), а входные напряжения фаз частично перекрываются, т.к. смещены друг относительно друга на  $120^\circ$ , поэтому три диода  $VD1$ – $VD3$  выпрямителя открываются по очереди в течение одной трети периода колебаний входного напряжения каждый. В результате частота пульсаций на выходе  $f_H = 3f_{\text{сети}}$ ,  $K_n = 0,25$  (меньше, чем в однофазных схемах),  $U_{H\text{ ср}} = (3\sqrt{3}/2\pi)U_{2\text{ ф макс}}$ ,  $U_{\text{ОБР макс}} = \sqrt{3}U_{2\text{ ф макс}} \approx 2,1U_{H\text{ ср}}$ , где  $U_{2\text{ ф макс}}$  – амплитуда фазного напряжения во вторичной обмотке.

*Трёхфазная мостовая схема* (т.н. *схема Ларионова*) (рис.3.4б), являясь двух-

полупериодной, обеспечивает на выходе практически постоянное напряжение  $U_{н.ср} = (3/\pi)U_{2\phi \max}$  (при частоте пульсаций  $f_{п} = 6f_{сети}$  и  $K_{п} = 0,057$ ), максимальное обратное напряжение на каждом диоде в 2 раза меньше, чем в трёхфазной нулевой схеме,  $-U_{обр \max} = \sqrt{3} U_{2\phi \max} \approx 1,05U_{н.ср}$ . Это позволяет применять схему в широком диапазоне выпрямленных напряжений и мощностей и часто даже без использования фильтра.

В целом можно отметить, что недостатком однополупериодных схем является подмагничивание трансформатора постоянной составляющей тока и как следствие, низкий коэффициент использования мощности. Поэтому данные схемы обычно используют в маломощных источниках.

Двухполупериодные схемы обеспечивают более низкий уровень пульсаций, но требуют большее число диодов. В мостовых схемах падение напряжения на диодах в два раза выше, что необходимо учитывать при расчёте ИВЭП с низким выходным напряжением.

Для получения высоких напряжений при небольших токах нагрузки используются схемы с умножением.

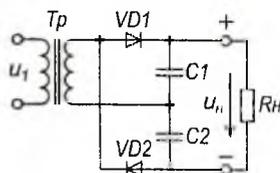


Рис.3.5 Схема выпрямителя с удвоением напряжения

Симметричная схема выпрямителя с удвоением напряжения показана на рисунке 3.5. Она представляет собой последовательное соединение двух однополупериодных выпрямителей с конденсаторами на выходе и обеспечивает напряжение до 1...2 кВ. Если  $C1 = C2 = C$ , коэффициент пульсаций может быть приблизительно рассчитан по формуле  $K_{п} = 6400/(R_{н}C)$ .

Для работы выпрямителя принципиальное значение имеет характер нагрузки. Поэтому его расчёт следует выполнять с учётом типа и параметров сглаживающего фильтра.

Сглаживающие фильтры могут быть выполнены на пассивных элементах (резисторах, конденсаторах, катушках индуктивности), либо с применением активных компонентов (транзисторов, операционных усилителей и т.д.). Основным параметром фильтра является коэффициент сглаживания, равный отношению коэффициентов пульсации  $K_{п}$  на входе и выходе фильтра  $q = K_{п \text{ вх.}} / K_{п \text{ вых.}}$ .

Основные схемы фильтров на пассивных элементах приведены на рисунке 3.6.

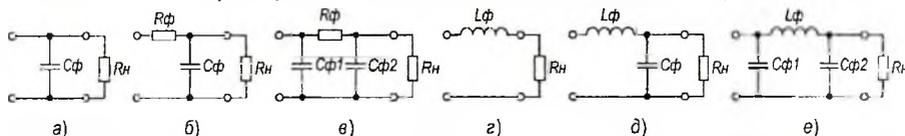


Рис.3.6 Схемы пассивных сглаживающих фильтров: а – ёмкостного; б – резистивно-ёмкостного (RC-фильтра); в – П-образного резистивно-ёмкостного; г – индуктивного; д – Г-образного индуктивно-ёмкостного; е – П-образного индуктивно-ёмкостного

Ёмкостный фильтр (рис.3.6а) представляет собой конденсатор, подключённый к выходу выпрямителя параллельно нагрузке. Данный тип фильтра используется очень широко. Кроме того, во многих более сложных фильтрах первым элементом является конденсатор. Поэтому понимание принципа работы данного фильтра совместно с выпрямителем является достаточно важным.

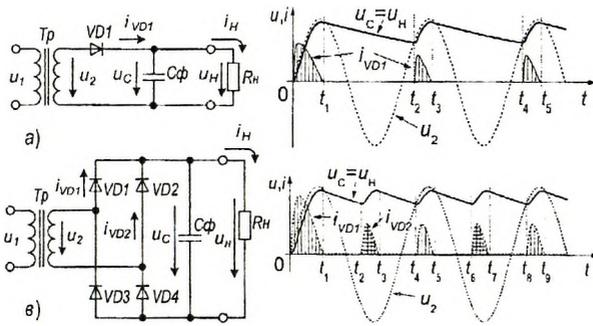


Рис.3.7 Схемы и временные диаграммы токов и напряжений однополупериодного (а, б) и мостового выпрямителей с ёмкостным фильтром (в, г).

Принцип работы выпрямителей на ёмкостную нагрузку поясняется рисунком 3.7. На интервале времени  $t_2-t_3$  напряжение  $u_2 > u_C$ , конденсатор  $C_{\phi}$  заряжается через выпрямитель, и напряжение на нём возрастает. На интервале  $t_3-t_4$  напряжение  $u_C > u_2$  (диоды выпрямителя находятся в закрытом состоянии), конденсатор разряжается через нагрузку  $R_H$ , и напряжение на нём снижается. Скорость разряда конденсатора определяется постоянной времени  $\tau_{разр.} = C_{\phi}R_H$ . Чем меньше ёмкость  $C_{\phi}$  и сопротивление  $R_H$ , тем быстрее происходит разряд. Чем больше время разряда, тем сильнее изменяется напряжение. Поэтому уровень пульсаций снижается при уменьшении тока нагрузки и увеличении ёмкости  $C_{\phi}$ , а для однополупериодной схемы он будет выше, чем для двухполупериодной. Соответственно, при заданной схеме выпрямителя и сопротивлении нагрузки коэффициент сглаживания можно повысить за счёт увеличения ёмкости  $C_{\phi}$ .

Как следует из диаграмм (см. рис.3.7 б,г), через выпрямитель ток протекает только в периоды заряда конденсатора, т.е. является пульсирующим. С увеличением ёмкости  $C_{\phi}$  длительность импульсов сокращается, а амплитуда возрастает. Аналогичный характер имеет изменение тока и в обмотках трансформатора, что снижает коэффициент использования по мощности. В конечном счёте, увеличивается требуемая мощность трансформатора, и может потребоваться выбор диодов с большим допустимым током.

По указанным причинам не следует выбирать ёмкость  $C_{\phi}$  чрезмерно большой и, при необходимости, использовать другие типы фильтров. Выбор  $C_{\phi}$  можно выполнять, исходя из условия  $\tau_{разр.} = C_{\phi}R_H \gg 5T$ , где  $T = 1/f_{осн.}$  – период основной гармоники.

При ёмкостной нагрузке возрастает также обратное напряжение на диодах выпрямителя. Оно может достигать удвоенной амплитуды напряжения вторичной обмотки  $U_{2m}$ .

Ёмкостные фильтры используются в широком диапазоне выпрямленных напряжений и мощностей (до нескольких десятков ватт).

**Индуктивные фильтры** (рис.3.6г) применяются в широком диапазоне выпрямленных напряжений при мощностях от десятков ватт до нескольких киловатт и при токах свыше 1 А. Принцип их работы основан на том, что индуктивное сопротивление переменному току  $X_L = \omega L$  катушки индуктивности намного больше активного сопротивления, поэтому падение постоянной составляющей напряжения незначительно по сравнению с падением переменной составляющей. В результате напряжение на нагрузке имеет незначительные пульсации и равно среднему значению выпрямленного напряжения. При этом ток, как в нагрузке, так и на остальных участках цепи, поддерживается близким к постоянному, что благоприятно сказывается на работе диодов и трансформатора. Следствием является меньшее внутреннее сопротивление ИВЭП по сравнению с ИВЭП, у

которых выпрямитель работает на ёмкостную нагрузку, что уменьшает зависимость выпрямленного напряжения от тока нагрузки.

Недостатки ИВЭП с индуктивным фильтром:

- 1) перенапряжения, возникающие вследствие переходных процессов при включении и скачкообразных изменениях тока нагрузки, что представляет опасность для элементов ИВЭП и его нагрузки;
- 2) сравнительно большие размеры и вес (при низкой частоте первичного источника);
- 3) создание помех магнитным полем рассеяния катушки индуктивности;
- 4) возможность возникновения сложных переходных процессов, создающих помехи работе устройств (усилителя, передатчика и т.п.);
- 5) фильтр не устраняет медленных изменений питающих напряжений.

*Г-образный и П-образный индуктивно-ёмкостные фильтры* образуются путем последовательного соединения индуктивного и ёмкостного фильтров (рис.3.6 д,е). Они применяются, когда требуемый коэффициент сглаживания нельзя обеспечить более простыми фильтрами. В свою очередь указанные фильтры также можно соединять последовательно. Если произведение  $LC$  больше 200...250 Гн·мкФ, то фильтр следует делать двухзвенным. Общий коэффициент сглаживания многозвенного фильтра равен произведению коэффициентов сглаживания фильтров, из которых он состоит.

В маломощных выпрямительных устройствах (ток менее 15...20 мА), когда не требуется большой коэффициент сглаживания, но необходимо значительно уменьшить массу, габариты и стоимость фильтра, вместо индуктивной катушки обычно включают резистор  $R_\phi$  (рис.3.6 б,в). При  $X_{C\phi} \ll R_H$  падение переменной составляющей выпрямленного напряжения осуществляется преимущественно на  $R_\phi$ , а постоянной на  $X_{C\phi}$ .

Сопротивление  $R_\phi$  выбирается из условия допустимого падения выпрямленного напряжения на фильтре. Рекомендуемое соотношение

$$\frac{R_H}{R_H + R_\phi} = 0,5 \dots 0,9.$$

*Активные фильтры* обеспечивают более высокие качественные показатели. Один из вариантов электронного фильтра с транзистором показан на рисунке 3.8.

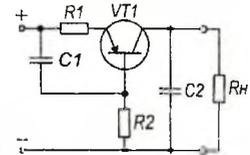


Рис.3.8 Электронный

фильтр  
 Принцип его действия основан на том, что для переменной составляющей пульсирующего тока транзистор представляет сравнительно большое сопротивление, а для постоянного тока его сопротивление намного меньше (подобно катушке индуктивности). Сглаживающее действие конденсатора  $C1$  и резистора  $R1$  происходит за счёт отрицательной обратной связи по току: напряжение пульсаций с резистора  $R1$  подаётся на вход транзистора  $VT1$ . Сопротивлением  $R2$  устанавливается режим транзистора по постоянному току. Транзистор выбирается так, чтобы ток нагрузки фильтра был не менее, чем в 2 раза меньше максимального допустимого тока коллектора. Наибольшее напряжение между коллектором и эмиттером, которое может возникнуть в момент включения выпрямителя, не должно превышать максимально допустимого напряжения на коллекторе. Мощность рассеяния на транзисторе также не должна превышать допустимой. Сопротивление резистора  $R1$  выбирается в пределах 80...100 Ом (увеличение сопротивления резистора  $R1$  ведёт к увеличению падения на нём напряжения постоянной составляющей, что приводит к уменьшению КПД и

коэффициента сглаживания фильтра),  $R_2$  – десятки кОм. Ёмкость конденсатора  $C_1 > 1/(2\pi f_{сетт} R_1)$ . Коэффициент сглаживания фильтра (рис.3.8)  $q = 50 \dots 200$ .

Внешняя характеристика ИВЭП отражает зависимость выходного напряжения от тока нагрузки

$$U_H = U_{XX} - (R_{гp} + R_{пp} + R_{\Phi}) I_H,$$

где  $U_{XX}$  – напряжение на нагрузочном устройстве при  $I_H = 0$ ;  $R_{гp}$  – активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора;  $R_{пp}$  – суммарное сопротивление открытых диодов;  $R_{\Phi}$  – сопротивление сглаживающего фильтра. Из этого соотношения следует, что с увеличением выпрямленного тока  $I_H$  в нагрузке напряжение на нагрузочном устройстве уменьшается. Поскольку сопротивление открытого диода зависит от тока, протекающего через него, зависимость  $U_H = f(I_H)$  является нелинейной.

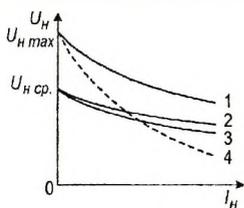


Рис.3.9 Внешние характеристики выпрямителя

На рисунке 3.9 приведены внешние характеристики ИВЭП при отсутствии (кривая 2) и наличии сглаживающих фильтров (1 – ёмкостный, 3 – индуктивный, 4 – Г-образный RC-фильтр).

Из приведённых характеристик видно, что при уменьшении тока нагрузки выходное напряжение ИВЭП с индуктивным фильтром стремится к среднему значению  $U_{H ср}$  выпрямленного напряжения, при использовании ёмкостных фильтров – к амплитудному значению  $U_{H max}$ . Уменьшение напряжения  $U_H$  выпрямителя с ёмкостным фильтром происходит более резко, чем без него. Это объясняется тем, что с увеличением тока  $I_H$  помимо причины, по которой уменьшалось напряжение  $U_H$  в выпрямителе без фильтра, накладывается снижение напряжения  $U_H$ , вызванное уменьшением постоянной времени разряда конденсатора  $C$  из-за уменьшения сопротивления  $R_H$ . Наклон внешней характеристики выпрямителя с Г-образным фильтром больше за счёт падения напряжения на резисторе  $R_{\Phi}$ .

### 3.2. Порядок выполнения работы

① Тип диодов для всех схем выпрямителей тот же, что и в Лабораторной работе №2.

#### Задание 1: Исследование однополупериодного выпрямителя

а) собрать принципиальную схему выпрямителя согласно рисунку 3.10;

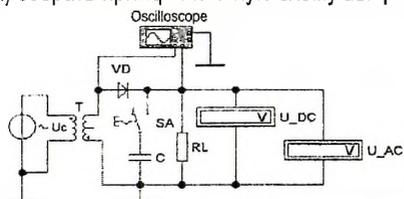


Рис.3.10 Схема для исследования однополупериодного выпрямителя

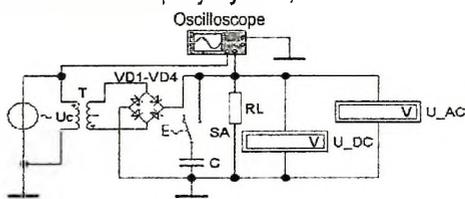


Рис.3.11 Схема для исследования однофазного мостового выпрямителя

**Указания:** в свойствах вольтметра выбрать режим (**Mode:**) и установить **AC** - для измерения действующего значения переменной составляющей выпрямленного напряжения  $U_{\sim}$  на нагрузке и **DC** - для измерения среднего значения  $U_{ср}$  (постоянной составляющей) выпрямленного напряжения; использовать источник переменного напряжения ( $U_c = 180$  В,  $f = 50$  Гц) и трансформатор с коэффициентом трансформации  $n = 5$  (библиотека – **misc**, модель – **ideal**).

б) получить с помощью осциллографа (**Oscilloscope**) осциллограммы входного и выход-

ного напряжений и записать показания вольтметров для значений сопротивления нагрузки  $RL = 1 \text{ кОм}$  и  $10 \text{ кОм}$  при отключённом и включённом ёмкостном фильтре при значениях ёмкости конденсатора  $C = 1 \text{ мкФ}$  и  $5 \text{ мкФ}$ ;

е) отметить на осциллограммах амплитуду  $U_{\text{max}}$  и действующее значение  $U_2$  напряжения вторичной обмотки, а также  $U_{\text{ср}}$  выпрямленного напряжения,

**Задание 2:** Исследование однофазного мостового выпрямителя

а) собрать принципиальную схему выпрямителя (рис.3.11);

б) выполнить исследование аналогично заданию 1.

Указание: использовать те же параметры источника напряжения и трансформатора, что и в предыдущем задании.

**Задание 3:** Исследование ИВЭП с удвоением напряжения

а) собрать принципиальную схему (рис.3.12);

б) выполнить исследование аналогично заданию 1.

Указание: использовать источник переменного напряжения ( $U_C = 36 \text{ В}$ ,  $f = 50 \text{ Гц}$ ). Принять  $C1 = C2 = C$ .

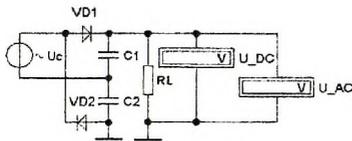


Рис.3.12 Схема для исследования удвоителя напряжения

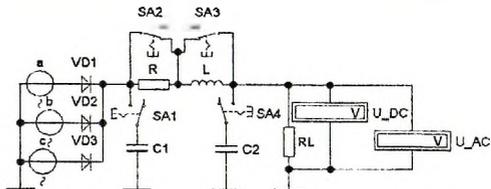


Рис.3.13 Схема для исследования однополупериодного трёхфазного выпрямителя

**Задание 4:** Исследование трёхфазного однополупериодного выпрямителя

а) собрать принципиальную схему выпрямителя (рис.3.13);

б) записать показания вольтметров при подключении ёмкостного, индуктивного, резистивно-ёмкостного и индуктивно-ёмкостного фильтров;

в) оценить коэффициенты сглаживания фильтров по формуле  $q = U_{\text{вх-}} / U_{\text{вых-}}$ , где  $U_{\text{вх-}}$  – действующее значение переменной составляющей до фильтра,  $U_{\text{вых-}}$  – действующее значение переменной составляющей после фильтра.

Указание. использовать источник переменного напряжения ( $U_C = 36 \text{ В}$ ,  $f = 50 \text{ Гц}$ ).

**Задание 5:** Исследование трёхфазного мостового выпрямителя

а) собрать принципиальную схему выпрямителя (рис.3.14);

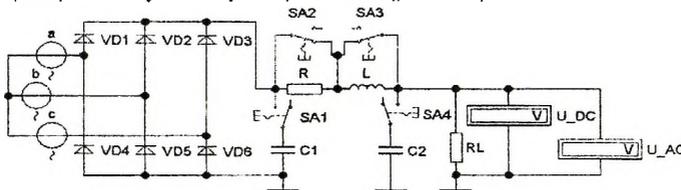


Рис.3.14 Схема для исследования трёхфазного мостового выпрямителя

б) провести исследование трёхфазного мостового выпрямителя аналогично заданию 4.

### 3.3. Контрольные вопросы

1. Принцип действия рассмотренных выпрямителей, их достоинства и недостатки.

2. Почему выходное напряжение двухполупериодного выпрямителя больше чем однополупериодного при одинаковом входном напряжении?
3. Принцип действия различных типов фильтров, их достоинства и недостатки.
4. Почему напряжение холостого хода выпрямителя с ёмкостным фильтром превышает среднее значение входного напряжения?
5. Как отражается на выборе диодов ёмкостный и индуктивный характер нагрузки выпрямителей?
6. Как изменяется выходное напряжение выпрямителя при увеличении нагрузки и чем обусловлено это изменение?

## Лабораторная работа № 4

### Исследование стабилизаторов напряжения и тока

Цель работы – изучение принципа работы, освоение методики расчёта, исследование характеристик стабилизаторов напряжения и тока.

#### 4.1. Краткие теоретические сведения

**Стабилизатор напряжения** – это устройство, поддерживающее в заданных пределах значение выходного напряжения при изменении входного напряжения и выходного тока (сопротивления нагрузки). Он является выходным звеном в стабилизированных источниках вторичного электропитания (ИВЭП). По принципу работы стабилизаторы делят на – *параметрические* (ПСН), осуществляющие стабилизацию напряжения на нагрузке за счёт изменения параметров (например, проводимости) электронных приборов; – *компенсационные* (КСН), представляющие собой замкнутые системы автоматического регулирования напряжения на нагрузке. Эффект стабилизации достигается за счёт изменения параметров управляемого прибора, называемого *регулирующим элементом*, при воздействии на него сигнала, поступающего от *устройства сравнения*, в котором сравнивается выходное напряжение с опорным. В результате выходное напряжение поддерживается равным или пропорциональным стабильному *опорному напряжению*, которое обычно задаётся одним из типов параметрических стабилизаторов.

К основным параметрам стабилизаторов напряжения относят:

- *коэффициент стабилизации напряжения*  $K_{ст\ U}$ , определяемый как отношение относительного изменения входного напряжения  $\Delta U_{вх}$  к относительному изменению выходного напряжения  $\Delta U_{вых}$

$$K_{ст\ U} = \frac{\Delta U_{вх} / U_{вх\ ном.}}{\Delta U_{вых} / U_{вых\ ном.}}; \quad (4.1)$$

- *выходное сопротивление*  $R_{вых}$ , характеризующее изменение выходного напряжения  $\Delta U_{вых}$  при изменении тока нагрузки  $\Delta I_{вых}$

$$R_{вых} = \Delta U_{вых} / \Delta I_{вых}, \quad (4.2)$$

для стабилизатора напряжения должно выполняться условие  $R_{вых} \ll R_n$ ;

- *коэффициент полезного действия* (КПД)

$$\eta = U_{вых\ ном.} I_{вых\ ном.} / (U_{вх\ ном.} I_{вх\ ном.}), \quad (4.3)$$

где  $U_{вх\ ном.}$ ,  $U_{вых\ ном.}$ ,  $I_{вх\ ном.}$ ,  $I_{вых\ ном.}$  – соответственно номинальные значения входных и выходных напряжений и токов стабилизатора.

Параметрические стабилизаторы напряжения (ПСН) используются в маломощных ИВЭП с выходным током до 15...20 мА, а также в качестве источников опорного напряжения в компенсационных стабилизаторах и контрольно-измерительной аппаратуре.

Для стабилизации постоянного напряжения в них применяются элементы с нелинейной вольтамперной характеристикой – полупроводниковые стабилитроны, стабилитроны, транзисторы. На рабочем участке вольтамперной характеристики данных элементов напряжение мало зависит от протекающего через них тока (см. Лабораторную работу № 2). В зависимости от включения нелинейного регулирующего элемента и нагрузки различают стабилизаторы *параллельного* и *последовательного* типов, *однокаскадные*, *многокаскадные*, *мостовые*.

Схема простейшего *однокаскадного ПСН параллельного типа* приведена на рисунке 4.1. При изменении входного напряжения  $U_{ВХ}$  ток через резистор  $R_1$  и стабилитрон  $VD1$  изменяется при незначительном изменении напряжения на стабилитроне  $U_{VD1}$ , а следовательно, и на нагрузке. Поэтому изменение падения напряжения на резисторе  $R_1$  практически полностью компенсирует изменение входного напряжения, а так как стабилитрон включён параллельно нагрузке, то напряжение  $U_{ВЫХ} = U_{VD1}$  на нагрузке остаётся практически постоянным.

Коэффициент стабилизации такого ПСН определяется по приближённой формуле

$$K_{ст U} \approx \frac{U_{ВЫХ ном}}{U_{ВХ ном}} \frac{R_1}{r_{VD1} \parallel R_1 \parallel R_H} \approx \frac{U_{ВЫХ ном}}{U_{ВХ ном}} \frac{R_1}{r_{VD1}} \quad (\text{если } r_{VD1} \ll R_1, R_H), \quad (4.4)$$

где  $r_{VD1}$  – дифференциального сопротивления стабилитрона  $VD1$ .

Внутреннее сопротивление стабилизатора, определяемое в основном дифференциальным сопротивлением стабилитрона, можно приближённо рассчитать по формуле

$$R_{ВЫХ} \approx r_{VD1} \parallel R_1 \approx r_{VD1} \quad (\text{при } r_{VD1} \ll R_1). \quad (4.5)$$

Если требуется повышенная стабильность выходного напряжения, то применяются многокаскадные либо мостовые схемы стабилизаторов, приведённые на рисунке 4.2.

В двухкаскадном ПСН (рис.4.2а) общий коэффициент стабилизации равен произведению коэффициентов стабилизации отдельных каскадов

$$K_{ст U} = K_{ст1} K_{ст2} \approx \frac{U_{ВЫХ ном}}{U_{ВХ ном}} \frac{R_1 R_2}{r_{VD1} r_{VD2}},$$

где  $r_{VD1}$  и  $r_{VD2}$  – дифференциальные сопротивления стабилитронов  $VD1, VD2$  соответственно. Очевидно, что в данном случае должно выполняться условие  $U_{VD1} > U_{VD2}$ , где  $U_{VD1}$  и  $U_{VD2}$  – напряжения стабилизации соответствующих стабилитронов. Однако дальнейшее увеличение числа каскадов приводит к существенному снижению КПД.

В мостовой схеме (рис.4.2б) стабилизация при изменениях входного напряжения  $U_{ВХ}$  достигается за счёт изменения напряжения на резисторе  $R_2$ , компенсирующего изменение напряжения на резисторе  $R_3$ .

Коэффициент стабилизации при  $R_H \gg R_1, R_2, R_3, r_{VD1}$

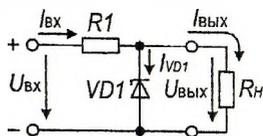


Рис.4.1 Однокаскадный ПСН параллельного типа

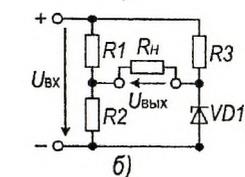
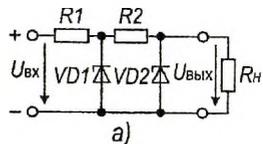


Рис.4.2 Двухкаскадный (а) и мостовой (б) ПСН

$$K_{ст U} \approx \frac{U_{ВЫХ\text{ ном.}}}{U_{ВХ\text{ ном.}}} \frac{1}{\frac{r_{VD1}}{r_{VD1} + R_3} - \frac{R_2}{R_1 + R_2}}$$

Следует отметить, что увеличение коэффициента стабилизации в таких ПСН (рис.4.2) достигается за счёт значительного ухудшения КПД по сравнению со схемой на рис.4.1.

Максимальная мощность рассмотренных ПСН ограничивается предельными значениями тока стабилизации и рассеиваемой мощностью стабилизатора. Увеличить мощность, отдаваемую в нагрузку без ухудшения КПД, можно за счёт применения транзистора  $VT1$ , работающего в режиме эмиттерного повторителя, со стабилизатором  $VD1$  в цепи базы (рис.4.3). За счёт отрицательной обратной связи (ООС) по напряжению выходное напряжение данного *параметрического стабилизатора последовательного типа* устанавливается равным величине

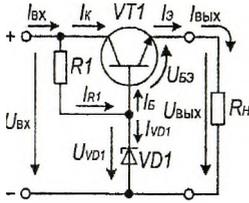


Рис.4.3 ПСН последовательного типа

$$U_{ВЫХ\text{ ном.}} = U_{VD1} - U_{БЭ}, \quad (4.6)$$

где  $U_{VD1}$  – напряжение стабилизации стабилизатора  $VD1$ ;  $U_{БЭ}$  – напряжение между базой и эмиттером транзистора  $VT1$  (см. рис.4.3).

Колебания выходного напряжения сглаживаются благодаря малому дифференциальному сопротивлению стабилизатора  $r_{VD1}$ . Коэффициент стабилизации данной схемы

$$K_{ст U} \approx \frac{U_{ВЫХ\text{ ном.}}}{U_{ВХ\text{ ном.}}} \frac{R_1}{\mu R_1 + r_{VD1}} \approx \frac{U_{ВЫХ\text{ ном.}}}{U_{ВХ\text{ ном.}}} \frac{R_1}{r_{VD1}}, \quad (4.7)$$

а внутреннее сопротивление

$$R_{ВЫХ} \approx \frac{h_{113} + r_{VD1} + R_1}{h_{213}(1 + \mu)} \approx \frac{h_{113} + r_{VD1} + R_1}{h_{213}}, \quad (4.8)$$

где  $\mu = (r_{VD1} + h_{113}) \frac{h_{213}}{1 + h_{213}}$ ;  $h_{113}, h_{213}, h_{223}$  –  $h$ -параметры транзистора  $VT1$ , соответствующие схеме с ОЭ (см. Лабораторную работу №2).

Следует отметить, что при использовании ПСН последовательного типа (рис.4.3) нельзя допускать короткого замыкания на выходе, так как в этом случае ток, протекающий через транзистор значительно возрастает, что может вывести транзистор из строя.

К недостаткам параметрических стабилизаторов напряжения относят низкий КПД и сравнительно невысокий коэффициент стабилизации, а также невозможность плавной регулировки и точной установки номинального значения выходного напряжения.

Достоинство таких схем – простота исполнения и малое количество элементов.

Линейные компенсационные стабилизаторы напряжения (КСН) содержат регулирующий элемент (обычно это транзистор) и обладают более высокими качественными параметрами, чем ПСН. Управление регулирующим элементом осуществляется сигналом с выхода устройства, сравнивающего выходное напряжение стабилизатора с опорным напряжением. По отношению к нагрузке регулирующий элемент может подключаться последовательно или параллельно.

На рис.4.4 приведена схема компенсационного стабилизатора на транзисторах последовательного типа с непрерывным регулированием. В качестве источника опорного напряжения используется параметрический стабилизатор на элементах  $VD1, R2$ . Тран-

зистор  $VT2$  выполняет роль устройства сравнения. Изменение  $U_{ВХ}$  приводит к изменению  $U_{ВЫХ}$ , что вызывает изменение потенциала базы  $VT2$ , а поскольку стабилитрон  $VD1$  поддерживает потенциал эмиттера  $VT2$  постоянным, то изменяется  $U_{БЭ2}$  и  $I_{К2}$ . Изменение  $I_{К2}$  транзистора  $VT2$  вызывает противоположное изменение  $I_{Б1}$  транзистора  $VT1$ , который выполняет функцию регулирующего элемента. Таким образом, при увеличении  $U_{ВХ}$  транзистор  $VT1$  подзакрывается, а при уменьшении  $U_{ВХ}$  открывается ещё больше, что приводит к стабилизации выходного напряжения, т.к.  $U_{ВЫХ} = U_{ВХ} - U_{КЭ1}$ , где  $U_{КЭ1}$  – напряжение между коллектором и эмиттером транзистора  $VT1$ .

Для данной схемы

$$K_{\sigma U} \approx \frac{U_{ВЫХ \text{ ном.}}}{U_{ВХ \text{ ном.}}} \frac{R_1 R_4}{R_3 + R_4} \frac{h_{213}^{VT2}}{h_{113}^{VT2} + R_1}; \quad (4.9)$$

$$R_{ВЫХ} \approx \frac{h_{113}^{VT2} R_4}{h_{213}^{VT2} (R_3 + R_4)}, \quad (4.10)$$

где  $h_{113}^{VT2}$ ,  $h_{213}^{VT2}$  –  $h$ -параметры транзистора  $VT2$ .

**Стабилизатор тока** – это устройство, поддерживающее выходной ток в заданных пределах при изменении сопротивления нагрузки.

К основным параметрам стабилизаторов тока относятся:

– коэффициент стабилизации тока  $K_{ст I}$  – отношение относительного изменения входного напряжения  $\Delta U_{ВХ}$  к относительному изменению выходного тока  $\Delta I_{ВЫХ}$

$$K_{ст I} = \frac{\Delta U_{ВХ} / U_{ВХ \text{ ном.}}}{\Delta I_{ВЫХ} / I_{ВЫХ \text{ ном.}}}; \quad (4.11)$$

– выходное сопротивление  $R_{ВЫХ}$ , определяемое по (4.2), причём, для стабилизаторов тока должно выполняться условие  $R_{ВЫХ} \gg R_H$ ;

– коэффициент полезного действия (КПД), определяемый по (4.3).

На рис.4.5 показана схема параметрического стабилизатора тока (ПСТ) последовательного типа. Эта схема отличается от ПСН (рис.4.3) использованием цепи ООС по току вместо ООС по напряжению. Для этого в эмиттерную цепь транзистора  $VT1$  включается резистор  $R1$ , напряжение на котором сравнивается с эталонным  $U_{VD1}$ . В качестве эталонного используется напряжение параметрического стабилизатора на стабилитроне  $VD1$  и резисторе  $R2$ . Поскольку в данной схеме разность потенциалов между точками  $a$  и  $b$  (рис.4.5) постоянна и равна напряжению  $U_{VD1}$ , любое изменение  $I_{ВХ}$  приводит к изменению напряжения на резисторе  $R1$  и соответственно –  $U_{БЭ}$ . В нагрузке  $R_H$  транзистора  $VT1$ , включённого по схеме с ОБ,

протекает выходной ток  $I_{ВЫХ} = \frac{U_{VD1} - U_{БЭ}}{R_1} \frac{h_{213}}{h_{213} + 1} \approx const.$

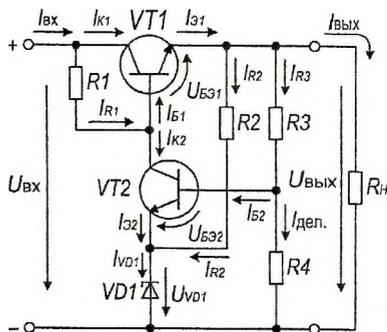


Рис.4.4 КСН последовательного типа

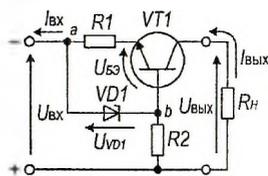


Рис.4.5 ПСТ последовательного типа

Коэффициент стабилизации тока

$$K_{ст, I} \approx \frac{I_{ВЫХ\text{ ном.}}}{U_{ВХ\text{ ном.}}} \frac{(h_{113}/h_{213}) + R_1}{(h_{223}h_{113}/h_{213}) + (r_{VD1}/R_2)} \quad (4.12)$$

Выходное сопротивление стабилизатора

$$R_{ВЫХ} \approx \frac{h_{113} + h_{213}R_1}{h_{113}h_{223}} \quad (4.13)$$

## 4.2. Порядок выполнения работы

① При расчёте всех изучаемых схем стабилизаторов напряжения и тока использовать ВАХ стабилитронов и транзисторов, полученные в Лабораторной работе №2.

### Задание 1: Исследование ПСН параллельного типа (рис.4.1)

а) собрать схему ПСН (рис.4.1) в соответствии со структурной схемой на рис.4.6;

б) установить номинальное значение входного напряжения  $U_{ВХ\text{ ном.}} = (1,2 \dots 1,4)U_{ВЫХ\text{ ном.}}$ ,

где  $U_{ВЫХ\text{ ном.}} = U_{VD1}$ ;  $U_{VD1}$  – напряжение стабилизации стабилитрона  $VD1$ ;

в) рассчитать номинальное значение сопротивления нагрузки  $R_{Н\text{ ном.}}$ , приняв значение выходного тока  $I_{ВЫХ\text{ ном.}} = 10 \dots 20$  мА, и сопротивление резистора  $R_1$  по формуле  $R_1 = \frac{U_{ВХ\text{ ном.}} - U_{ВЫХ\text{ ном.}}}{I_{VD1} + I_{ВЫХ\text{ ном.}}}$ ,

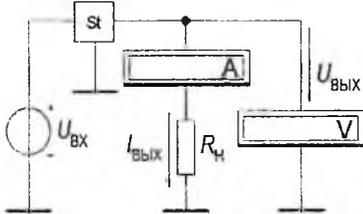


Рис.4.6 Структурная схема для измерения параметров стабилизаторов (St) напряжения и тока

напряжения  $U_{ВЫХ\text{ ном.}}$  и тока в нагрузке  $I_{ВЫХ\text{ ном.}}$  и рассчитать КПД по формуле (4.3);

д) устанавливая последовательно значения входного напряжения  $U_{ВХ1} = 0,95U_{ВХ\text{ ном.}}$  и  $U_{ВХ2} = 1,05U_{ВХ\text{ ном.}}$ , измерить и записать значения выходных напряжений  $U_{ВЫХ1}$  и  $U_{ВЫХ2}$ ;

е) рассчитать коэффициент стабилизации по напряжению  $K_{ст, U}$  по формуле (4.1), где  $\Delta U_{ВХ} = U_{ВХ2} - U_{ВХ1}$ ,  $\Delta U_{ВЫХ} = U_{ВЫХ2} - U_{ВЫХ1}$ ; сравнить полученное значение с теоретическим, определённым по формуле (4.4);

ж) установить значение  $U_{ВХ} = U_{ВХ\text{ ном.}}$ ; последовательно задавая сопротивление нагрузки  $R_{Н1} \approx 0,95R_{Н\text{ ном.}}$  и  $R_{Н2} \approx 1,05R_{Н\text{ ном.}}$ , измерить и записать соответствующие значения выходных напряжений  $U_{ВЫХ1}$ ,  $U_{ВЫХ2}$  и токов  $I_{ВЫХ1}$ ,  $I_{ВЫХ2}$ ;

з) найти величину выходного сопротивления стабилизатора  $R_{ВЫХ}$  по формуле (4.2), где  $\Delta U_{ВЫХ} = U_{ВЫХ2} - U_{ВЫХ1}$ ,  $\Delta I_{ВЫХ} = I_{ВЫХ1} - I_{ВЫХ2}$ , и сравнить с рассчитанным по (4.5).

### Задание 2: Исследование ПСН последовательного типа (рис.4.3)

а) собрать схему ПСН (рис.4.3) в соответствии со структурной схемой на рис.4.6;

б) задаваясь в соответствии с (4.6) значением выходного напряжения  $U_{ВЫХ\text{ ном.}}$ , установить номинальное значение входного напряжения  $U_{ВХ\text{ ном.}} = U_{ВЫХ\text{ ном.}} + (2 \dots 4) В$ ;

в) рассчитать номинальное значение сопротивления нагрузки  $R_{Н\text{ ном.}}$ , задавая выходной ток  $I_{ВЫХ\text{ ном.}} = 50 \dots 100$  мА, и сопротивление резистора  $R_1 = \frac{U_{ВХ\text{ ном.}} - U_{VD1}}{I_{VD1} + I_{ВЫХ\text{ ном.}} / (h_{213} + 1)}$ ,

выбирая ток  $I_{VD1} = 10 \dots 15$  мА;

г) выполнить пункты а) – з) Задания 1, при этом для теоретических расчётов  $K_{ст, U}$  и  $R_{ВЫХ}$

использовать соответственно формулы (4.7) и (4.8).

**Задание 3: Исследование КСН последовательного типа (рис.4.4)**

- а) собрать схему ПСН (рис.4.4) в соответствии со структурной схемой на рис.4.6;  
б) задаваясь значением выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ ном.}} = U_{\text{VD1}} + (2...4)$  В, установить номинальное значение входного напряжения  $U_{\text{ВХ ном.}} = U_{\text{ВЫХ ср}} + (5...8)$  В;

в) рассчитать номинальное значение сопротивления нагрузки  $R_{\text{Н ном.}}$ , значения сопротивлений  $R_1 = \frac{U_{\text{ВХ ном.}} - U_{\text{ВЫХ ном.}}}{I_{R1}}$  и  $R_2 = \frac{U_{\text{ВЫХ ном.}} - U_{\text{VD1}}}{I_{\text{VD1 min}}}$ , приняв значения токов

$I_{R1} = 3...5$  мА и  $I_{\text{VD1 min}} = 4...6$  мА, а также значения сопротивлений  $R_3$  и  $R_4$  делителя:

$$R_4 = \frac{U_{\text{VD1}} + U_{\text{БЭ2}}}{I_{\text{ДЕЛ}}} \text{ и } R_3 \approx \frac{U_{\text{ВМХ}} - (U_{\text{VD1}} + U_{\text{БЭ2}})}{I_{\text{ДЕЛ}}}, \text{ задаваясь значением } I_{\text{ДЕЛ}} = \frac{I_{\text{ВЫХ ном.}}}{10...50};$$

г) установив рассчитанные значения сопротивлений  $R_1, R_2, R_3, R_4$  и  $R_{\text{Н}} = R_{\text{Н ном.}}$ , провести измерения значений выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ ном.}}$  и тока в нагрузке  $I_{\text{ВЫХ ном.}}$  и рассчитать КПД по формуле (4.3);

д) выполнить пункты б) – з) Задания 1, при этом для теоретических расчётов  $K_{\text{ст } U}$  и  $R_{\text{ВЫХ}}$  использовать соответственно формулы (4.9) и (4.10).

**Задание 4: Исследование стабилизатора тока последовательного типа (рис.4.5)**

а) собрать схему ПСТ (рис.4.5) в соответствии со структурной схемой на рис.4.6;

б) задаваясь номинальным выходным током  $I_{\text{ВЫХ ном.}} = 5...20$  мА и номинальным сопротивлением нагрузки  $R_{\text{Н ном.}} = 100...500$  Ом, определить значение номинального выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ ном.}}$  и установить номинальное значение входного напряжения  $U_{\text{ВХ ном.}} = U_{\text{ВЫХ ном.}} + U_{\text{VD1}} + (2...4)$  В;

в) рассчитать значения сопротивлений  $R_1 = \frac{U_{\text{VD1}} - U_{\text{БЭ}}}{I_{\text{ВЫХ ном.}}}$  и  $R_2 = \frac{U_{\text{ВХ ном.}} - U_{\text{VD1}}}{I_{\text{VD1}}}$ , приняв

значение тока  $I_{\text{VD1}} = 5...15$  мА;

г) установив рассчитанные значения сопротивлений  $R_1, R_2, R_{\text{Н}} = R_{\text{Н ном.}}$ , измерить выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ ном.}}$  и ток в нагрузке  $I_{\text{ВЫХ ном.}}$  и рассчитать КПД по формуле (4.3);

д) устанавливая последовательно значения входного напряжения  $U_{\text{ВХ1}} = 0,8U_{\text{ВХ ном.}}$  и  $U_{\text{ВХ2}} = 1,2U_{\text{ВХ ном.}}$ , измерить и записать значения выходных токов  $I_{\text{ВЫХ1}}$  и  $I_{\text{ВЫХ2}}$ ;

е) рассчитать коэффициент стабилизации по току  $K_{\text{ст } I}$  (4.11), где  $\Delta I_{\text{ВХ}} = I_{\text{ВХ2}} - I_{\text{ВХ1}}$ ,  $\Delta U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ2}} - U_{\text{ВЫХ1}}$ ; сравнить полученное значение с теоретическим, определённым по формуле (4.12);

ж) установить значение  $U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ ном.}}$ ; последовательно задавая сопротивление нагрузки  $R_{\text{Н}} = 0,5R_{\text{Н ном.}}$  и  $R_{\text{Н}} \approx 1,2R_{\text{Н ном.}}$ , измерить и записать соответствующие значения выходных напряжений  $U_{\text{ВЫХ1}}, U_{\text{ВЫХ2}}$  и токов  $I_{\text{ВЫХ1}}, I_{\text{ВЫХ2}}$ ;

з) найти величину выходного сопротивления стабилизатора  $R_{\text{ВЫХ}}$  по формуле (4.2), где  $\Delta U_{\text{ВЫХ}} = |U_{\text{ВЫХ2}} - U_{\text{ВЫХ1}}|$ ,  $\Delta I_{\text{ВЫХ}} = |I_{\text{ВЫХ2}} - I_{\text{ВЫХ1}}|$ , и сравнить с рассчитанным по (4.13).

### 4.3. Контрольные вопросы

1. Каково назначение стабилизаторов напряжения и тока?
2. Объяснить принцип действия стабилизаторов напряжения.
3. Какое влияние оказывает сопротивление нагрузки на коэффициент стабилизации?
4. Какие достоинства и недостатки имеют рассмотренные стабилизаторы напряжения?
5. Объяснить принцип действия стабилизатора тока последовательного типа.

**Изучение усилительного каскада на биполярном транзисторе**

Цель работы – изучение схем построения усилительных каскадов на биполярном транзисторе по схеме с общим эмиттером; расчёт усилительного каскада и определение его параметров и характеристик.

**5.1. Краткие теоретические сведения**

В современной технике при решении многих инженерных задач возникает необходимость в усилении изменяющихся электрических сигналов (напряжения или тока), источниками которых могут быть, например, различного рода датчики, фотоприёмники и т.п. Для усиления таких сигналов используют электронные усилители.

**Электронным усилителем** называют устройство, преобразующее энергию источника питания в энергию выходного сигнала, который по форме аналогичен входному сигналу, но превосходит его по напряжению, току и (обязательно!) мощности. Другими словами, любой усилитель модулирует энергию внешнего источника питания входным управляющим сигналом. Этот процесс осуществляется при помощи управляемых нелинейных элементов.

Рассмотрим принцип построения и работы усилительного каскада на структурной схеме рис.5.1. Основными элементами являются нелинейный управляемый элемент УЭ и резистор  $R$ , которые совместно с источником питания  $U_n$  образуют выходную цепь каскада.

Под действием входного сигнала  $u_{вх}$  изменяется сопротивление УЭ и соответственно ток выходной цепи  $i_{ввых}$ . Изменение  $i_{ввых}$  вызывает соответствующее изменение падения напряжения на резисторе  $R$  и УЭ, которое является полезным выходным сигналом  $u_{ввых}$ . Таким образом  $u_{вх}$  преобразуется в пропорциональное значение  $u_{ввых}$  большей величины.

Усилительные свойства каскада зависят от степени влияния  $u_{вх}$  на ток управляемого элемента и величины  $R$ . Чем больше изменение тока и величина  $R$ , тем больше будет  $u_{ввых}$ . Очевидно, что рост амплитуды  $u_{ввых}$  требует соответствующего повышения  $U_n$ , а ток источника равен  $i_{ввых}$ . Поэтому повышение мощности выходного сигнала требует увеличения мощности источника.

**Необходимо помнить, что ни при каких условиях мощность выходного сигнала не может превысить мощность, потребляемую от источника питания!**

К основным параметрам и характеристикам усилителя относятся:

– коэффициент усиления усилителя по напряжению  $K_U$

$$K_U = \frac{\Delta U_{ввых}}{\Delta U_{вх}}$$

– амплитудная (передаточная) характеристика – зависимость амплитудных значений напряжения  $U_{ввых}$  на выходе усилителя от напряжения  $U_{вх}$  на его входе (рис.5.2а). Начальный участок характеристики (до  $U_{вх} = U_{вх, max}$ ) является линейным, и ему соответствует постоянный коэффициент уси-

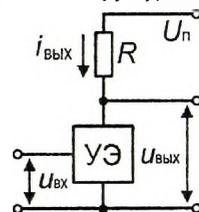


Рис.5.1 Структурная схема усилительного каскада

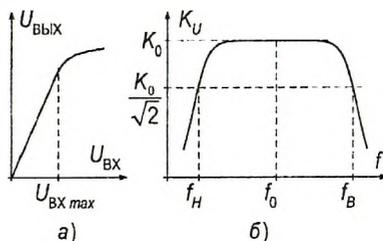


Рис.5.2 Характеристики усилителя: а – амплитудная; б – амплитудно-частотная

ления. При  $U_{вх} > U_{вх, \max}$  вследствие нелинейности характеристики форма  $u_{вых}$  не соответствует  $u_{вх}$ , появляются *нелинейные искажения*. Нелинейность амплитудной характеристики обусловлена переходом УЭ в режим насыщения. При работе УЭ с насыщением коэффициент усиления  $K_U$  уменьшается, что отображается уменьшением наклона характеристики;

-- амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) показывает зависимость модуля коэффициента усиления  $K_U$  от частоты усиливаемого сигнала (рис.5.2б). По амплитудно-частотной характеристике определяют *полосу пропускания усилителя* – диапазон частот

$$\Delta f = f_B - f_H, \quad (5.1)$$

в котором коэффициент усиления  $K_U > K_0 / \sqrt{2}$ , где  $K_0$  – максимальный коэффициент усиления на частоте

$$f_0 = \sqrt{f_H \cdot f_B}, \quad (5.2)$$

$f_H$  и  $f_B$  – соответственно низшая и высшая частоты, на которых  $K_U = K_0 / \sqrt{2}$ .

Вид АЧХ имеет важное значение при усилении несинусоидальных сигналов, имеющих высокочастотные гармонические составляющие. Если частота этих составляющих выше  $f_B$ , то форма  $u_{вых}$  не соответствует  $u_{вх}$ , появляются *частотные искажения*. Если частота усиливаемого сигнала меньше  $f_H$ , то снижается  $K_U$  и  $U_{вых}$  уменьшается. Уменьшение  $K_U$  на низких частотах обусловлено влиянием разделительных конденсаторов, используемых в усилителях переменного напряжения для связи между каскадами. С понижением частоты увеличиваются ёмкостные сопротивления  $X_C = 1/(\omega C)$  и возрастают падения напряжений на конденсаторах. В области высших частот усилительные свойства ухудшаются в результате проявления паразитных ёмкостей в самом управляемом элементе.

В настоящее время в каскадах электронных усилителей различного назначения в качестве управляемого элемента широко используются биполярные и полевые транзисторы, поэтому электронные усилители с такими элементами называют транзисторными.

#### Усилители на биполярных транзисторах.

Одним из наиболее распространенных усилителей на биполярных транзисторах (БТ) является усилитель с общим эмиттером (ОЭ). В этом усилителе эмиттер является общим электродом для входной и выходной цепей. На рис.5.3 представлена схема такого усилителя с фиксированным током базы, задаваемым с помощью резистора  $R_B$ . Входное напряжение  $u_{вх}$  от источника усиливаемого сигнала подаётся на усилительный каскад через конденсатор связи  $C_1$ . Резистор  $R_K$  совместно с транзистором  $VT$  образуют управляемый делитель напряжения. Конденсаторы связи  $C_1$  и  $C_2$  (иначе – разделительные) служат для предотвращения проникновения постоянной составляющей сигнала на базу транзистора и на выход усилительного каскада. В усилителе используются источник постоянного напряжения  $U_P$  (источник питания) и источник усиливаемого переменного напряжения  $e_{вх}$  с внутренним сопротивлением  $R_{вн}$ .

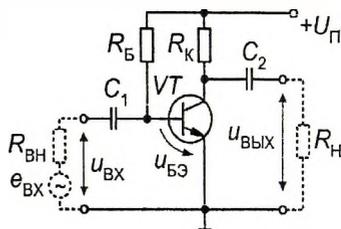


Рис. 5.3 Схема усилительного каскада с общим эмиттером

Усиленное выходное напряжение можно снимать как с резистора  $R_k$ , так и с транзистора  $VT$ , поскольку переменные составляющие этих напряжений равны (но противофазны). Сопротивление нагрузки  $R_n$  обычно подключают между коллектором и эмиттером транзистора, а поскольку эмиттер соединен с нулевым проводом, то вход и выход усилителя имеют общую точку.

Принцип преобразования сигнала переменного тока усилительным каскадом с ОЭ иллюстрируется рис. 5.4, на котором представлены передаточная характеристика, входная и семейство выходных ВАХ БТ, а также временные зависимости токов и напряжений.

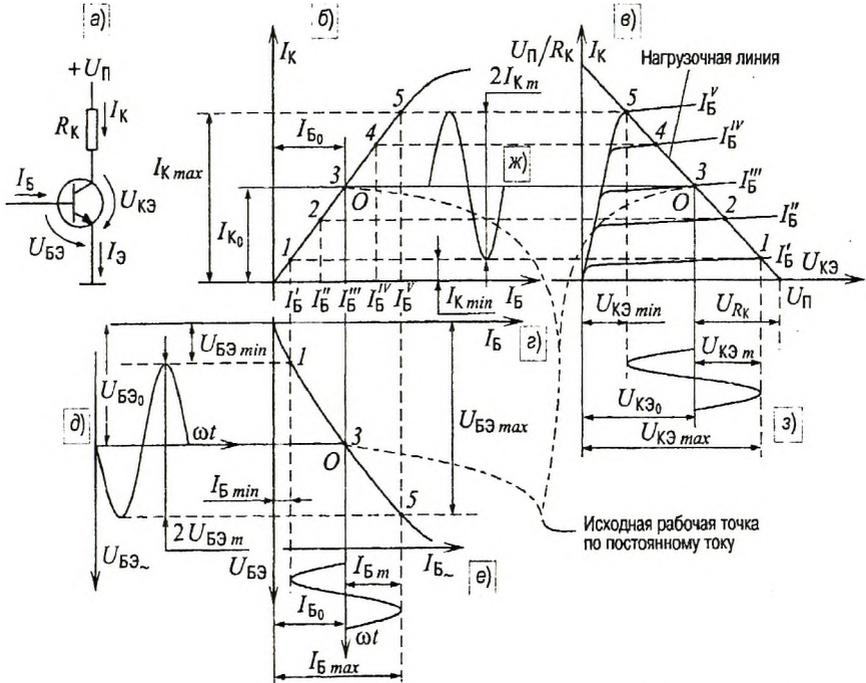


Рис.5.4 Графическая иллюстрация процессов изменения токов и напряжений в усилительном каскаде на БТ с ОЭ: а – упрощённая схема усилительного каскада; б – передаточная характеристика; в, г – соответственно семейство выходных ВАХ и входная ВАХ БТ; д, е, ж, з – временные зависимости входного напряжения, тока базы, тока коллектора и выходного напряжения соответственно

Для коллекторной цепи усилителя (рис.5.4а) в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно записать

$$U_k = U_{\Pi} - R_k I_k. \quad (5.3)$$

Графической интерпретацией решения этого уравнения является нагрузочная прямая (линия нагрузки), показанная на рис.5.4в. Она может быть построена по двум точкам, соответствующим режиму холостого хода ( $I_k = 0$ ;  $U_k = U_{\Pi}$ ) и короткого замыкания ( $U_k = 0$ ;  $I_k = U_{\Pi} / R_k$ ). Точки пересечения линии нагрузки с выходными характеристиками транзистора определяют ток  $I_k$  и напряжение на транзисторе  $U_{КЭ}$  при любом заданном

значении тока базы  $I_B$ .

Передачная характеристика усилителя  $I_C=f(I_B)$  построена по точкам пересечения линии нагрузки с выходными характеристиками транзистора (рис.5.4б) и является нелинейной, но имеет линейный участок 1-5. Входная ВАХ БТ также нелинейна, но на небольшом отрезке (1-5) её с достаточной степенью точности можно считать линейной.

Временные диаграммы (рис.5.4д-з) отображают последовательное преобразование входного сигнала напряжения в соответствующее изменение тока базы БТ, коллекторного тока и затем – в выходной сигнал напряжения.

Сигнал  $u_{вх}$  преобразуется в изменение тока базы БТ  $\Delta I_B$  в соответствии со входной ВАХ (рис.5.4е). Количественно соотношение между  $u_{вх}$  и  $\Delta I_B$  определяется входным сопротивлением БТ  $h_{113}$ . Изменение тока базы преобразуется в изменение тока коллектора в соответствии с передаточной характеристикой (рис.5.4б). Ее наклон определяется коэффициентом передачи тока БТ  $h_{213}$ . Поскольку  $h_{213} \gg 1$ , схема с ОЭ обеспечивает усиление сигнала по току. Нагрузочная линия (рис.5.4з) определяет изменение  $u_{вых}$  в соответствии с изменением тока коллектора. Для данной схемы  $u_{вых} \gg u_{вх}$ , т.е. усиление сигнала обеспечивается и по напряжению.

Как следует из рис. 5.4, изменение токов и напряжений в усилителе осуществляется относительно некоторых начальных значений (токов и напряжений покоя), которые характеризуют режим работы схемы по постоянному току. Он обеспечивается соответствующим выбором сопротивлений резисторов в цепях базы и коллектора.

Расчет усилителя состоит в первую очередь в правильном выборе и обеспечении режима работы по постоянному току.

Режим работы по постоянному току характеризуется положением рабочей точки О на линии нагрузки (рис.5.4з). При  $R_H \gg R_K$  рабочую точку можно располагать примерно на середине линии нагрузки. При этом можно принимать

$$U_{к0} = \frac{U_{п}}{2}; \quad I_{к0} = \frac{1}{R_K} \frac{U_{п}}{2}; \quad (5.4)$$

$$I_{Б0} = \frac{I_{к0}}{h_{213}}. \quad (5.5)$$

где  $U_{к0}$  – потенциал коллектора, соответствующий положению рабочей точки О;  $I_{к0}$  и  $I_{Б0}$  – соответствующие токи коллектора и базы транзистора.

Сопротивление резистора  $R_K$  выбирают таким, чтобы максимальный ток коллектора не превышал допустимого значения для используемого транзистора.

В большинстве случаев при работе на реальную нагрузку  $R_K$  соизмеримо с  $R_H$ . Для обеспечения минимальной потребляемой от источника мощности следует принимать

$$R_K = (1,5 \dots 2,0) R_H. \quad (5.6)$$

При этом значение  $U_{к0}$  снижается, а  $I_{к0}$  увеличивается относительно определяемых по (5.4) значений так, чтобы обеспечивалась наибольшая амплитуда неискаженного сигнала

$$U_{к0} = \frac{U_{п} R_H}{R_K + 2R_H} + U_{к0нас} + U_{Э0}; \quad (5.7)$$

$$I_{к0} = (U_{п1} - U_{к0}) / R_K. \quad (5.8)$$

Для обеспечения требуемой амплитуды напряжения  $U_{н.м}$  на нагрузке  $R_H$  напряжение

питания должно удовлетворять условию

$$U_{\Pi} \geq (R_K/R_H + 2) U_{H.m} + U_{KЭ \text{ нас}} + U_{Э0}. \quad (5.9)$$

В схеме с фиксированным током базы (рис.5.3)  $U_{Э0} = 0$  и при выполнении условия (5.6), требуемое напряжение питания  $U_{\Pi} \approx (3,5...4,0)U_{H.m}$ , а напряжение покоя коллектора для класса усиления А  $U_{K0} \approx (0,3...0,5)U_{\Pi}$ .

Выбор транзистора осуществляется по следующим условиям

$$U_{K \text{ max}} > U_{\Pi}; I_{K \text{ max}} > 2 I_{K0}; P_{K \text{ max}} > I_{K0} (U_{K0} - U_{Э0}).$$

Для выбранного транзистора по справочнику находят  $h_{21Э}$  и рассчитывают требуемое значение тока покоя базы  $I_{Б0} = I_{K0}/h_{21Э}$ . Такое значение тока обеспечивается резистором в цепи базы, сопротивление которого

$$R_{Б} = (U_{\Pi} - U_{Б0})/I_{Б0}. \quad (5.10)$$

При этом  $U_{Б0} = U_{БЭ0}$  определяется по входной ВАХ транзистора. Приблизительно  $U_{Б0}$  можно принимать равным 0,2...0,6 В для германиевых (Ge) и 0,6...1,1 В для кремниевых (Si) транзисторов (большие значения для мощных транзисторов). При настройке усилителя положение рабочей точки можно корректировать в некоторых пределах относительно расчетного значения, изменяя сопротивление  $R_{Б}$ .

Существенным недостатком транзисторов является зависимость их параметров от температуры. Изменение температуры вызывает изменение тока коллектора БТ (при неизменном токе базы) и соответственно, смещает положение рабочей точки усилителя, что приводит к уменьшению максимальной амплитуды неискаженного сигнала. Данное явление имеет место в схеме с фиксированным током базы (рис.5.3), поэтому данная схема может использоваться для усиления малых сигналов  $U_{H.m} \ll U_{\Pi}$ , а также в случаях, когда транзистор работает в условиях, обеспечивающих незначительное изменение его температуры. В противном случае необходимо принимать меры для температурной стабилизации рабочей точки.

На рис.5.5 представлена схема усилителя с ОЭ с эмиттерно-базовой температурной стабилизацией, в которой положение рабочей точки стабилизируется за счёт отрицательной обратной связи (ООС) по постоянному току. Она реализуется включением в эмиттерную цепь усилителя резистора  $R_{Э}$ . При этом напряжение с помощью делителя  $R_{Б1}-R_{Б2}$  поддерживается постоянное напряжение покоя на базе транзистора (при условии, что ток делителя  $I_{Д} \gg I_{Б0}$ )

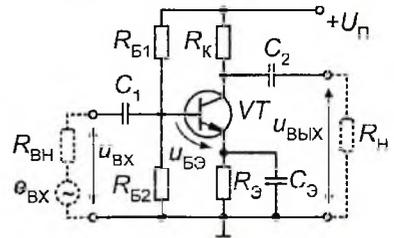


Рис. 5.5 Схема усилительного каскада с ОЭ с эмиттерно-базовой температурной стабилизацией

$$U_{Б0} \approx \frac{U_{\Pi} R_{Б2}}{R_{Б1} + R_{Б2}} \quad (5.11)$$

Напряжение покоя база-эмиттер

$$U_{БЭ0} = U_{Б0} - R_{Э} I_{Э0}. \quad (5.12)$$

Таким образом, при повышении температуры увеличивается ток  $I_{K0}$  и  $I_{Э0}$ , что в соответствии с (5.12) приводит к уменьшению  $U_{БЭ0}$ . Это вызывает уменьшение базового тока  $I_{Б0}$  и соответственно тока  $I_{K0}$  почти до первоначального значения, т.е. положение рабочей точки остается практически неизменным. Согласно (5.12) действие ООС усиливается с ростом  $R_{Э}$ , однако при этом снижается КПД усилителя. На практике  $R_{Э}$  при-

мают таким, чтобы выполнялось

$$U_{э0} = (0,1...0,3) U_{п}, \quad (5.13)$$

тогда

$$R_{э} = U_{э0} / I_{э0} \quad (5.14)$$

Для исключения влияния изменений тока базы на  $U_{Б0}$  принимают ток делителя  $I_{д} = (3...10) I_{Б0}$ . Соответственно, сопротивления делителя

$$R_{Б2} = U_{Б0} / I_{д}; \quad R_{Б1} = (U_{п} - U_{Б0}) / (I_{д} + I_{Б0}). \quad (5.15)$$

Действие ООС по переменной составляющей (полезному сигналу) приведет к снижению коэффициента усиления, что недопустимо. Поэтому для переменной составляющей напряжения обратная связь должна устраняться. Это достигается включением параллельно резистору  $R_{э}$  конденсатора  $C_{э}$ , сопротивление  $X_{Cэ}$  которого на низшей частоте усиливаемого сигнала должно быть на порядок меньше  $R_{э}$ , что обеспечивается при выборе ёмкости

$$C_{э} = (10...50) / (\omega_{н} R_{э}), \quad (5.16)$$

где  $\omega_{н} = 2\pi f_{н}$  – нижняя граничная частота усиливаемого сигнала.

Разделительные конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$ , предотвращая попадание на базу БТ и на выход усилителя постоянных составляющих напряжения, не должны существенно ослаблять переменную составляющую (полезный сигнал). С учетом указанного требования их ёмкости

$$C_1 = (10...50) / (\omega_{н} R_{ВХ}); \quad C_2 = (10...50) / (\omega_{н} R_{К} || R_{Н}), \quad (5.17)$$

где

$$R_{ВХ} = R_{Б} || h_{11э} \quad (5.18)$$

– входное сопротивление усилительного каскада. Для усилительного каскада, представленного на рис.5.5

$$R_{Б} = R_{Б1} || R_{Б2}. \quad (5.19)$$

Значение  $h_{11э}$  берётся из справочника или определяется по входной ВАХ транзистора.

Следует ещё раз обратить внимание на то, что напряжение на выходе усилительного каскада с ОЭ находится в противофазе с напряжением на его входе (происходит инвертирование сигнала). Действительно, согласно второму закону Кирхгофа (см. (5.3)) для выходной цепи усилительного каскада можно записать:

$$U_{п} = U_{к} + R_{к} I_{к} = (U_{к0} + U_{к-}) + R_{к}(I_{к0} + I_{к-}).$$

Так как  $U_{п} = \text{const}$  и режим по постоянному току не меняется, то из последнего соотношения видно, что с увеличением переменной составляющей тока  $I_{к-}$  переменная составляющая напряжения  $U_{к-}$  уменьшается, т.е. сдвинуто по фазе относительно входного напряжения на  $180^\circ$  (рис.5.4з).

Коэффициенты усиления усилителя по напряжению  $K_U$  и по току  $K_I$  с учётом сопротивления нагрузочного устройства  $R_{Н}$  определяют по формуле:

$$K_U = \frac{U_{н-}}{U_{ВХ-}} = \frac{h_{21э}}{h_{11э}} \frac{R_{к}}{1 + h_{22э} R_{к} + R_{к} / R_{Н}}, \quad (5.20)$$

$$K_I = \frac{I_{н-}}{I_{ВХ-}} = \frac{h_{21э}}{h_{11э}} \frac{R_{ВХ} R_{к}}{R_{Н} (1 + h_{22э} R_{к} + R_{к} / R_{Н})}, \quad (5.21)$$

входное сопротивление  $R_{ВХ}$  рассчитывается по формуле (5.18) с учётом (5.19),  $h_{22э}$  – выходная проводимость транзистора, которая берётся из справочника или определяется по выходной ВАХ транзистора.

## 5.2. Порядок выполнения работы

① Изучить устройство и принцип работы однокаскадного транзисторного усилителя с ОЭ (рис.5.3 и рис.5.5), проанализировать назначение всех его элементов.

**Задание 1:** Расчёт усилительного каскада с ОЭ с фиксированным током базы (рис.5.3)

- по заданным преподавателем параметрам  $R_B$ ,  $U_{H.m}$  и  $f_H$  определить  $R_K$  (5.6) и  $U_H$  (5.9) (значения  $R_K$  и  $U_H$  согласовать с преподавателем);
- рассчитать значения  $U_{K0}$  и  $I_{K0}$  ((5.7) и (5.8) соответственно);
- на полученных в Лабораторной работе № 2 выходных ВАХ транзистора отметить рабочую точку покоя и определить в этой точке его параметры  $h_{21э}$  и  $h_{22э}$ ;
- по формуле (5.5) рассчитать ток  $I_{Б0}$  покоя базы и отметить на входной ВАХ рабочую точку покоя, для которой определить напряжение  $U_{Б0}$  и параметр  $h_{11э}$ ;
- рассчитать величину сопротивления резистора  $R_B$  (5.10), обеспечивающего заданный режим покоя, а также значения ёмкостей конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  ((5.17) с учётом (5.18));
- рассчитать коэффициенты усиления усилителя по напряжению  $K_U$  и по току  $K_I$  соответственно (5.20) и (5.21).

**Задание 2:** Измерение характеристик и параметров усилительного каскада с ОЭ с фиксированным током базы (рис.5.3)

- собрать схему (рис.5.3), подключив измерительные приборы как показано на рис.5.6;
- установить заданные и рассчитанные значения номинальных сопротивлений и ёмкостей соответствующих элементов и напряжения питания;
- установить значение амплитуды входного сигнала, подаваемого с генератора (**Function Generator**),  $U_{m\text{вх}} = 0$  В, записать измеренные с помощью соответствующих измерительных приборов значения  $I_{K0}$ ,  $I_{Б0}$ ,  $U_{K0}$ ,  $U_{Б0}$ , сравнить с расчётными и сделать выводы;
- вызвать окно свойств транзистора (**Component Properties**), перейти в режим редактирования (нажать кнопку **Edit**), выбрать закладку **Sheet 5**, в строке **Parameter measurement temperature (TNOM)** установить рабочую температуру транзистора  $t_P = 100^\circ\text{C}$ ;
- выполнить пункт в), сделать выводы;
- в соответствии с пунктом в) установить первоначальную температуру ( $t_0 = 27^\circ\text{C}$ );
- установить на генераторе частоту входного сигнала  $f = 10$  кГц; изменяя амплитудное значение входного напряжения  $U_{m\text{вх}}$  от 0 до 100 мВ, измерить с помощью осциллографа амплитудные значения выходного напряжения  $U_{m\text{вых}}$ ; по результатам измерений построить передаточную характеристику усилителя  $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$  (рис.5.2а);
- на передаточной характеристике отметить определённое с помощью осциллографа значение входного напряжения  $U_{m\text{вх max}}$ , при котором наступает заметное искажение формы выходного напряжения  $U_{\text{вых}}(t)$ , зарисовать эту форму выходного сигнала  $U_{\text{вых}}(t)$ ;
- используя **Bode Plotter**, получить ЛАЧХ

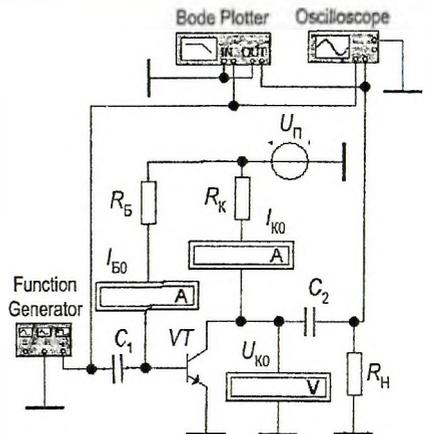


Рис.5.6 Схема для измерения характеристик и параметров усилительного каскада с ОЭ с фиксированным током базы

исследуемой схемы в диапазоне частот от 1 Гц до 1 ГГц определить нижнюю и верхнюю граничные частоты (см. рис.5.2б) и полосу пропускания  $\Delta f$  усилителя (5.1), определить коэффициент усиления  $K_0$  усилителя на частоте  $f_0$  (5.2) и сравнить с расчётным значением;

к) установить температуру транзистора  $t_p = 100^\circ\text{C}$  (см. пункт в)), выполнить пункт ж) при этом передаточную характеристику при этой температуре построить на одном графике с характеристикой при температуре  $t_0 = 27^\circ\text{C}$ , сделать выводы;

л) в соответствии с пунктом з) установить первоначальную температуру ( $t_0 = 27^\circ\text{C}$ ).

**Задание 3:** Расчёт усилительного каскада с ОЭ с эмиттерно-базовой стабилизацией (рис.5.5)

а) по заданным преподавателем параметрам  $R_H$ ,  $U_{H,m}$  и  $f_H$  определить  $R_K$  (5.6) и  $U_H$  (5.9) с учётом (5.13) (полученные значения  $R_K$  и  $U_H$  согласовать с преподавателем);

б) рассчитать значения  $U_{K0}$  и  $I_{K0}$  ((5.7) и (5.8) соответственно),  $U_{Э0}$  при этом определяется по формуле (5.13);

в) на полученных в Лабораторной работе № 2 выходных ВАХ транзистора отметить рабочую точку покоя и определить в этой точке его параметры  $h_{21э}$  и  $h_{22э}$ ;

г) по формуле (5.5) рассчитать ток  $I_{Б0}$  покоя базы и отметить на входной ВАХ рабочую точку покоя, для которой определить напряжение  $U_{БЭ0}$  и параметр  $h_{11э}$ ;

д) рассчитать величины сопротивлений резисторов  $R_э$ ,  $R_{Б1}$  и  $R_{Б2}$  по формулам (5.14) и (5.15);

е) рассчитать значения ёмкостей конденсаторов  $C_э$ ,  $C_1$  и  $C_2$  – по формулам (5.16) и (5.17) (с учётом (5.18) и (5.19));

ж) рассчитать коэффициенты усиления усилителя по напряжению  $K_U$  и по току  $K_I$  соответственно (5.20) и (5.21).

**Задание 4:** Измерение характеристик и параметров усилительного каскада с ОЭ с эмиттерно-базовой стабилизацией (рис.5.5)

а) собрать схему (рис.5.5), подключив измерительные приборы как показано на рис.5.6;

б) выполнить пункты а) – л) Задания 2.;

### 5.3. Контрольные вопросы

1. Что такое электронный усилитель?
2. Объяснить принцип действия транзисторного усилителя. Каково назначение транзистора в усилительном каскаде?
3. Какими параметрами характеризуется усилитель?
4. Какие характеристики транзисторов используются при расчёте усилителей?
5. Как определить полосу пропускания усилителя?
6. В чём причины появления нелинейных искажений выходного напряжения и спада амплитудно-частотной характеристики на низких и высоких частотах?
7. Как задаётся рабочий режим транзистора по постоянному току?
8. Какие достоинства и недостатки имеют схемы, представленные на рис.5.3 и 5.5?
9. Как осуществляется температурная стабилизация в усилителе?
10. Пояснить назначение резисторов и конденсаторов в схемах на рис.5.3 и рис.5.5.
11. Какое влияние оказывает сопротивление нагрузки на параметры усилителя?

## Лабораторная работа № 6

### Исследование схем на операционных усилителях

Цель работы – изучение принципа работы, основных параметров и характеристик операционного усилителя, исследование типовых схем на его основе.

#### 6.1. Краткие теоретические сведения

Операционный усилитель (ОУ) – многокаскадный усилитель постоянного тока (УПТ) с дифференциальным входом, обладающий большим коэффициентом усиления, высоким входным и малым выходным сопротивлениями.

ОУ выполняется в виде интегральной микросхемы и является одним из основных элементов аналоговой схемотехники, на основе которого можно создавать самые разнообразные электронные устройства: усилители, генераторы, сумматоры, интеграторы, дифференциаторы, активные фильтры и др. Реализация различных устройств на базе ОУ значительно проще, чем на отдельных транзисторах.

Операционные усилители имеют один выход и два входа: *инвертирующий* и *неинвертирующий*. В большинстве случаев сигнал подается на один из входов, а второй вход соединяется с нулевым проводом. При этом, если сигнал подается на инвертирующий вход, то помимо усиления осуществляется его инвертирование (изменение знака). Питание ОУ обычно осуществляется *двухполярным* (биполярным) напряжением, которое подводится к соответствующим выводам ( $+U_n$  и  $-U_n$ ). Кроме того, ОУ может иметь выводы *FC* для подключения цепей частотной коррекции и выводы *NC* – для подключения элементов начальной балансировки (установки нуля на выходе при нулевом входном сигнале).

Условное графическое обозначение ОУ на принципиальных схемах приведено на рис.6.1а. Его выполняют в виде прямоугольника с дополнительными полями, в которых указывают назначение выводов. Инвертирующий вход обозначается знаком «0» или «-».

При построении конкретного электронного устройства различаются только способы подключения входов и выхода ОУ. Поэтому на функциональных схемах используется упрощенное обозначение, содержащее только три указанных вывода (рис.6.1б,в). Подключение остальных выводов, как правило, соответствует типовой схеме включения, т.е. цепи коррекции и балансировки для конкретного ОУ являются типовыми и приводятся в справочниках. В качестве примера на рисунке 6.2 приведена одна из схем включения операционного усилителя К140УД6. Некоторые типы ОУ не требуют внешних цепей коррекции и балансировки.

Внутренняя структура ОУ обычно представлена тремя составными частями, имеющими определенное функциональное назначение. Входным каскадом является дифференциальный усилитель. Он обладает высоким входным сопротивлением, имеет большой коэффициент усиления по отношению к разности входных сигналов и низкий коэффициент усиления по отношению к

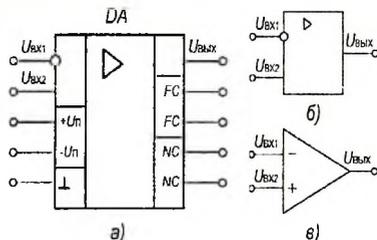


Рис.6.1 Условное графическое обозначение ОУ на схемах.

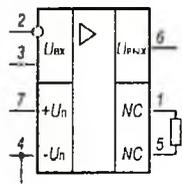


Рис.6.2 Схема включения ОУ К140УД6

одинаковым (синфазным) сигналам на входах. Он также в значительной степени ослабляет влияние изменений температуры и напряжения питания на выходной сигнал. *Промежуточные каскады* (один или несколько) обеспечивают необходимое усиление сигнала по току и напряжению, а также согласование выходного и входного сопротивлений предыдущего и последующего каскадов. *Выходной каскад*, который, как правило, выполняется по двухтактной схеме, обеспечивает требуемое усиление сигнала по мощности.

В зависимости от типа ОУ схемы построения каскадов могут иметь свои особенности, а число промежуточных каскадов может быть различным. Однако внутренняя структура ОУ и функциональное назначение отдельных каскадов при этом не изменяются. На рисунке 6.3 приведен один из типовых вариантов схемы ОУ.

На транзисторах  $VT1, VT2$  выполнен дифференциальный усилитель. Для задания эмиттерного тока транзисторов  $VT1, VT2$  используется источник стабильного тока на транзисторах  $VT3$  и  $VT4$ , выполненный по схеме «токового зеркала». Резисторы  $R_{31}$  и  $R_{32}$  компенсируют различия входных характеристик транзисторов  $VT1, VT2$  и увеличивают входное сопротивление усилителя за счет местной последовательной ООС по току нагрузки каждого из транзисторов.

В качестве промежуточных каскадов используются дифференциальный усилитель на транзисторах  $VT5$  и  $VT6$  и усилитель, выполненный по схеме ОЭ на транзисторе  $VT7$ . Они обеспечивают дальнейшее усиление сигнала по току, а также усиление по напряжению до требуемого уровня. Температурная стабилизация тока  $VT7$  обеспечивается введением ООС по току нагрузки с помощью резистора  $R_{34}$ .

В выходном каскаде ОУ используется двухтактный усилитель мощности на транзисторах  $VT8$  и  $VT9$ , работающий в режиме класса усиления  $AB$ . Начальный ток транзисторов задается напряжением смещения диодов  $VD1$  и  $VD2$ . Эти же диоды обеспечивают и температурную стабилизацию тока покоя выходного усилителя. Резисторы  $R_{35}$  и  $R_{36}$  компенсируют влияние неидентичности параметров комплементарной пары транзисторов  $VT8, VT9$ .

Вывод  $U_{кор}$  используется для подключения элементов частотной коррекции.

Свойства ОУ определяются его статическими и динамическими характеристиками.

Статические передаточные характеристики ОУ представлены на рисунке 6.4. Они получены при подаче сигнала на один из входов и нулевом сигнале на другом входе. Характеристики имеют горизонтальный и наклонный участки.

Наклонный участок каждой кривой соответствует

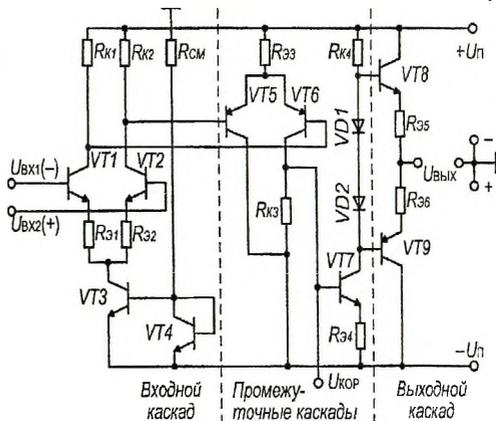


Рис.6.3 Упрощённая схема трехкаскадного ОУ

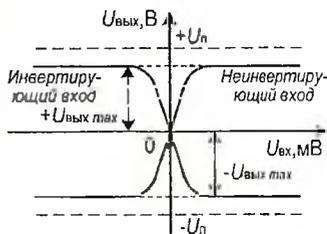


Рис.6.4 Передаточные характеристики ОУ

области линейного усиления сигнала. На этом участке выходное напряжение  $U_{\text{вых}} = K_{\text{УО}} \cdot U_{\text{вх}}$ , где  $K_{\text{УО}}$  – коэффициент усиления ОУ без обратной связи,  $U_{\text{вх}}$  – входное напряжение.

Горизонтальные участки кривых соответствуют области насыщения, в которой  $U_{\text{вых}}$  принимает одно из предельных значений  $+U_{\text{вых max}}$  либо  $-U_{\text{вых max}}$ . Этими значениями ограничивается амплитуда выходного сигнала. Режим насыщения достигается при  $K_{\text{УО}} \cdot U_{\text{вх}} > U_{\text{вых max}}$ . По абсолютному значению  $U_{\text{вых max}}$  обычно на 2...3 В меньше напряжений питания  $U_{\text{п}}$ . При  $U_{\text{п}} = \pm 15$  В диапазон изменения  $U_{\text{вых}}$  близок к  $\pm 12$  В. При расчёте обычно принимают  $U_{\text{вых max}} = 2/3 U_{\text{п}}$ , для того чтобы ОУ гарантированно работал в линейной области.

К динамическим относятся *переходные и частотные характеристики* ОУ.

На практике при выборе ОУ и расчёте построенных на их основе схем руководствуются основными параметрами, которые приводятся в справочниках. К ним относятся:

- коэффициент усиления по напряжению  $K_{\text{УО}}$  характеризует способность ОУ усиливать подаваемый на его входы дифференциальный сигнал (обычно  $10^3 \dots 10^6$ );
- входное сопротивление  $R_{\text{вх0}}$  – сопротивление ОУ по отношению к входному сигналу. Различают *дифференциальное входное сопротивление*  $R_{\text{вх, диф}}$ , т.е. сопротивление между двумя входными выводами, и *синфазное входное сопротивление*  $R_{\text{вх, синф}}$ , т.е. сопротивление между объединёнными входными выводами и «землёй». Обычно в справочниках приводится значение только дифференциального входного сопротивления, которое в 10...100 раз меньше синфазного и составляет  $10^4 \dots 10^{10}$  Ом;
- выходное сопротивление  $R_{\text{вых0}}$  – внутреннее сопротивление ОУ, рассматриваемого по отношению к нагрузке как эквивалентный источник ЭДС (для большинства ОУ 10...1000 Ом);
- входное напряжение смещения  $U_{\text{см}}$  характеризует разбаланс и несимметрию входного дифференциального каскада ОУ и численно равно постоянному напряжению, которое необходимо приложить к входу ОУ, чтобы его выходное напряжение стало равным нулю (как правило 1...10 мВ);
- входной ток  $I_{\text{вх}}$  (входной ток смещения) – ток на входах ОУ, необходимый для работы входного каскада (менее 10 мкА);
- разность входных токов  $\Delta I_{\text{вх}}$  (ток сдвига) – разность входных токов смещения, которая появляется вследствие неодинаковых коэффициентов передачи тока  $h_{21э}$  транзисторов входного каскада ОУ (менее 1 мкА);
- коэффициент ослабления синфазного сигнала ( $K_{\text{ос.сф.}}$ ) характеризует способность ослаблять синфазные (приложенные к двум входам одновременно) сигналы (обычно составляет 50...120 дБ).

Динамические свойства ОУ обычно характеризуются двумя параметрами:

- предельной частотой ( $F_{\text{max}}$ ), на которой модуль коэффициента усиления равен 1 или частотой единичного усиления ( $F_1$ ), что то же самое;
- максимальной скоростью нарастания выходного напряжения ( $V_{\text{Увых}}$ ), которая измеряется при подаче на вход ОУ напряжения ступенчатой формы амплитудой более 0,1 В (для большинства ОУ  $\sim 0,1 \dots 10$  В/мкс).

Применение ОУ весьма разнообразно. Однако следует отметить, что во всех случаях

ОУ используется с цепями отрицательной обратной связи (ООС), снижающими его коэффициент усиления. Без этого нормальная работа устройства невозможна. Цепи ООС могут быть построены на резисторах, либо с использованием реактивных элементов. В последнем случае ООС является частотно зависимой. Таким образом, использование соответствующих цепей ООС позволяет обеспечить требуемую функциональную зависимость между входным и выходным сигналами.

Если параметры цепи ООС выбрать так, чтобы проходящие по ней токи были на 1...2 порядка больше входных токов ОУ, то влияние параметров последнего на свойства устройства будет незначительно, т.е. функциональная зависимость между входным и выходным сигналами будет определяться главным образом цепью ООС. Выбор параметров цепей ООС при построении устройств на ОУ обычно осуществляют с учетом указанного условия. Для этого принимают сопротивление в цепи ООС

$$R_{OC} \leq \frac{2\delta \cdot U_{П.}}{3I_{ВХ}}, \quad (6.1)$$

где  $\delta$  – допустимая погрешность от влияния входного тока ОУ (обычно  $10^{-4} \dots 10^{-3}$ ).

Инвертирующий усилитель обеспечивает усиление сигнала по мощности с изменением знака (инвертированием). Его схема приведена на рисунке 6.5. В этой схеме входной сигнал подаётся на инвертирующий вход ОУ, а его неинвертирующий вход соединен с нулевым проводом. При выполнении условия (6.1) с достаточной точностью можно считать, что коэффициент усиления по напряжению

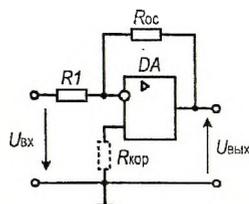


Рис.6.5 Инвертирующая схема включения ОУ

$$K_{U1} \approx -\frac{R_{OC}}{R_1}, \quad (6.2)$$

а выходное напряжение  $U_{ВЫХ} = K_U \cdot U_{ВХ}$ .

Включение резистора  $R_{КОР}$ , имеющего сопротивление

$$R_{КОР} = \frac{R_1 R_{OC}}{R_1 + R_{OC}}, \quad (6.3)$$

повышает точность работы схемы за счет компенсации влияния входных токов  $I_{ВХ}$  ОУ.

Входное сопротивление инвертирующего усилителя  $R_{ВХ} \approx R_1$ .

Если  $R_1 = R_{OC}$ , то  $K_U = -1$  и получаем схему инвертирующего повторителя напряжения (инвертора), у которого  $U_{ВЫХ} = -U_{ВХ}$ .

Неинвертирующий усилитель обеспечивает усиление сигнала без изменения знака (рис.6.6а). В этой схеме входной сигнал подаётся на неинвертирующий вход ОУ, а на его инвертирующий вход с помощью делителя напряжения выходного напряжения, выполненного на резисторах  $R_1$  и  $R_{OC}$ , подаётся напряжение ООС. Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя по

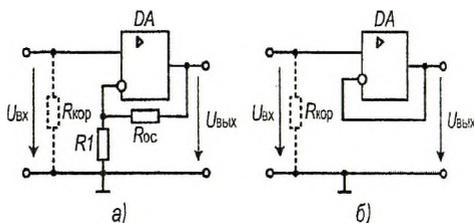


Рис.6.6 Неинвертирующие схемы включения ОУ:  
а – усилитель; б – повторитель

напряжению

$$K_U \approx 1 + \frac{R_{OC}}{R_1}, \quad (6.4)$$

при этом  $R_{OC}$  выбирается исходя из условия (6.1).

При выполнении условия  $R_{OC} = 0$  и  $R_1 \rightarrow \infty$  получаем схему неинвертирующего повторителя напряжения с  $K_U \approx 1$ , т.е.  $U_{ВЫХ} \approx U_{ВХ}$  (рис.8б). Входное сопротивление повторителя напряжения на ОУ может составлять  $10^7 \dots 10^{12}$  Ом, а выходное – доли Ом.

Для повышения точности работы ОУ включают резистор  $R_{КОР}$ , сопротивление которого определяется по формуле (6.3), однако включение этого резистора приводит к уменьшению входного сопротивления усилителя, т.к. в этом случае  $R_{ВХ} \approx R_{КОР}$ .

Инвертирующий сумматор может быть построен на основе инвертирующего усилителя (рис.6.7а) путем добавления соответствующего числа входов. При этом

$$U_{ВЫХ} = - \left( U_{ВХ1} \frac{R_{OC}}{R_1} + U_{ВХ2} \frac{R_{OC}}{R_2} + U_{ВХ3} \frac{R_{OC}}{R_3} \right), \quad (6.5)$$

если  $R_1 = R_2 = R_3 = R_{OC}$ , то  $U_{ВЫХ} = -(U_{ВХ1} + U_{ВХ2} + U_{ВХ3})$ .

Если ОУ работает в нелинейном режиме, то приведённые соотношения не справедливы.

Дифференциальный усилитель представляет собой сочетание инвертирующего и неинвертирующего включения ОУ (рис.6.7б). Входные напряжения  $U_{ВХ1}$  и  $U_{ВХ2}$  подаются соответственно на инвертирующий и неинвертирующий входы.

Выходное напряжение данной схемы

$$U_{ВЫХ} = -U_{ВХ1} \frac{R_{OC}}{R_1} + U_{ВХ2} \frac{R_3}{R_2 + R_3} \left( 1 + \frac{R_{OC}}{R_1} \right), \quad (6.6)$$

если  $R_{OC}/R_1 = R_3/R_2$ , то  $U_{ВЫХ} = (-U_{ВХ1} + U_{ВХ2}) \frac{R_{OC}}{R_1}$ .

Следовательно, выходное напряжение такого устройства прямо пропорционально разности входных напряжений.

В цепь ООС операционного усилителя можно включать не только активные (резисторы), но и реактивные элементы (например, конденсаторы). Это позволяет выполнять операции интегрирования и дифференцирования.

Интегратор получают, заменяя в схеме (рис.6.5) резистор  $R_{OC}$  конденсатором  $C$  (рис.6.8). В схеме инвертирующего идеального интегратора выходное напряжение равно интегралу по времени от входного напряжения, взятого с обратным знаком, т.е.

$$U_{ВЫХ}(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{ВХ}(t) dt = -\frac{1}{\tau} \int_0^t U_{ВХ}(t) dt, \quad (6.7)$$

где  $\tau = RC$  называется постоянной времени. При подаче на вход постоянного напряже-

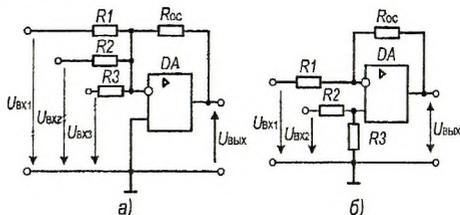


Рис.6.7 Инвертирующий сумматор (а) и дифференциальный усилитель (вычитатель) (б)

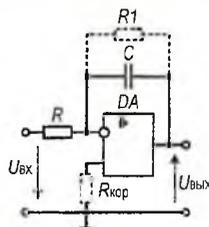


Рис.6.8 Интегратор

ния  $U_{ВХ}(t) = U_{ВХ}$  выходное напряжение будет изменяться по линейному закону:

$$U_{ВЫХ}(t) = -\frac{U_{ВХ}}{\tau} t, \quad (6.8)$$

если же на вход подавать сигнал прямоугольной формы, то форма выходного сигнала будет треугольной. Скорость изменения выходного сигнала при этом может быть рассчитана по формуле:

$$\frac{\Delta U_{ВЫХ}}{\Delta t} = -\frac{U_{ВХ}}{\tau} \quad (6.9)$$

В реальном интеграторе из-за наличия на входе ОУ дрейфовых составляющих ( $U_{СМ}$ ,  $I_{ВХ}$ ,  $\Delta I_{ВХ}$ ) выходное напряжение будет иметь линейно изменяющуюся составляющую, т.е.

$$U_{ВЫХ}(t) = -\frac{1}{\tau} \int_0^t U_{ВХ}(t) dt - A \cdot t, \quad (6.10)$$

где  $A = \frac{I_{ВХ} + \Delta I_{ВХ}}{C} + \frac{U_{СМ}}{\tau}$ . При малых временах  $t \ll \tau$  ввиду малости коэффициента

$A$  влияние этой составляющей проявляется незначительно. Однако, если до момента начала интегрирования интегратор находится в состоянии покоя ( $U_{ВХ} = 0$ ) в течение времени  $t_0$ , соизмеримого с  $\tau$ , то к моменту начала интегрирования напряжение на выходе достигнет величины  $U_{ВЫХ}(t_0) = A \cdot t_0 = \frac{U_{СМ}}{\tau} t_0 + \frac{I_{ВХ} + \Delta I_{ВХ}}{C} t_0$ . Поэтому, если

дрейфовые составляющие не скомпенсированы, выходное напряжение может возрасти вплоть до  $\pm U_{ВЫХ \max}$ . Для уменьшения влияния входных токов ОУ между неинвертирующим входом и общим проводом включают резистор  $R_{КОР}$ , рассчитываемый по (6.3). Для компенсации напряжения смещения используют цепи коррекции (см., например, рис.6.2). Однако полностью скомпенсировать дрейфовые составляющие невозможно, поэтому на практике конденсатор  $C$  перед началом интегрирования замыкают накоротко ( $U_{ВЫХ}(t_0) = 0$ ), либо параллельно ему включают резистор  $R_1$ , уменьшающий коэффициент усиления интегратора, предотвращая тем самым выход ОУ в режим насыщения. В последнем случае на низких частотах интегратор ведёт себя как усилитель, а интегрирующие свойства начинают проявляться с частоты

$$\omega_{инт} = \frac{1}{RC(K_U + 1)}, \quad (6.11)$$

где  $K_U = R_1/R$ . При выборе резистора  $R_1$ , с одной стороны, должно учитываться условие (6.1), с другой стороны, произведение  $R_1 C$  должно быть гораздо больше времени интегрирования входного сигнала.

Дифференциатор получают при замене резистора  $R_1$  в схеме (рис.6.5) конденсатором  $C$  (рис.6.9). При этом выполняется операция дифференцирования входного сигнала

$$U_{ВЫХ}(t) = -RC \frac{dU_{ВХ}(t)}{dt} = -\tau \frac{dU_{ВХ}(t)}{dt}, \quad (6.12)$$

т.е. выходной сигнал пропорционален скорости изменения входного сигнала

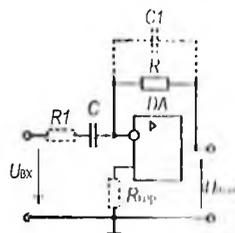


Рис.6.9 Дифференциатор

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\tau \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta t} \quad (6.13)$$

На практике функция (6.12) не может быть точно реализована из-за ограничения полосы пропускания ОУ. Для предотвращения неустойчивой работы дифференциатора (самовозбуждения) и уменьшения влияния помех (особенно импульсных) параллельно резистору  $R$  включают конденсатор  $C_1$ . Для увеличения входного сопротивления дифференциатора на высоких частотах и ограничения коэффициента усиления последовательно с конденсатором  $C$  включают резистор  $R_1$ . В результате такая схема дифференцирует входные сигналы от частоты  $\omega_{\text{диф}} = 1/(RC)$  до частоты  $\omega_1 = 1/(R_1C)$ , работает как усилитель переменного сигнала в диапазоне частот от  $\omega_1 = 1/(R_1C)$  до  $\omega_2 = 1/(RC_1)$  и является интегратором на частотах выше  $\omega_2 = 1/(RC_1)$ . Резистор  $R_{\text{КОР}}$ , рассчитываемый по (6.3), включают для уменьшения влияния входных токов ОУ.

## 6.2. Порядок выполнения работы

① Тип операционного усилителя задаётся преподавателем.

① Для всех исследуемых схем напряжение питания ОУ  $U_H = \pm 15$  В.

**Задание 1:** Исследование инвертирующего усилителя (рис.6.5)

а) собрать схему (рис.6.10);

б) установить сопротивление  $R_1 = 1$  кОм и сопротивление нагрузки  $R_H = 10$  кОм;

в) подать с выхода генератора на вход усилителя синусоидальный сигнал с амплитудным значением напряжения  $U_{\text{ВХ}} = 5$  мВ и частотой  $f = 10$  кГц;

г) задавая значения сопротивления  $R_{\text{ОС}} = 1; 2; 5; 10; 100$  и  $1000$  кОм, измерить с помощью осциллографа амплитудное значение выходного напряжения  $U_H$ ;

д) по результатам эксперимента вычислить коэффициент усиления по напряжению  $K_U$  и сравнить с теоретическим значением  $K_U$ , рассчитанным по формуле (6.2);

е) результаты измерений и расчётов свести в таблицу;

ж) построить расчётную и экспериментальную кривые  $K_U = f(R_{\text{ОС}})$  и объяснить возможные расхождения;

з) используя **Bode Plotter**, получить ЛАЧХ исследуемой схемы в диапазоне частот от 1 Гц до 10 МГц при  $R_{\text{ОС}} = 1000$  кОм и определить частоту единичного усиления  $F_1$  (частота, на которой модуль коэффициента усиления  $K_U = 1$ ).

**Задание 2:** Исследование неинвертирующего усилителя (рис. 6.6а)

а) внести необходимые изменения в схему исследования (рис.6.10) и выполнить измерения аналогично пунктам а) – г) Задания 1 при тех же значениях входного напряжения и сопротивлений  $R_{\text{ОС}}$ ;

б) по результатам эксперимента вычислить коэффициент усиления по напряжению  $K_U$  и

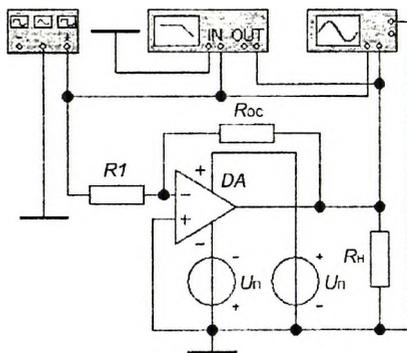


Рис.6.10 Схема исследования инвертирующего усилителя.

сравнить с теоретическим значением  $K_U$ , рассчитанным по формуле (6.4);

в) результаты измерений и расчётов свести в таблицу;

г) построить расчётную и экспериментальную кривые  $K_U = f(R_{OC})$  и объяснить возможные расхождения.

**Задание 3:** Исследование инвертирующего сумматора (рис. 6.7а)

а) собрать схему для выполнения операции  $U_{ВЫХ} = -K_{U1} U_{ВХ1} - K_{U2} U_{ВХ2} - K_{U3} U_{ВХ3}$ ;

б) рассчитать сопротивления резисторов для обеспечения заданных преподавателем  $K_{U1}$ ,  $K_{U2}$ ,  $K_{U3}$  (принять  $R_{OC} = 1 \text{ МОм}$ ), при этом номинальные значения сопротивлений резисторов выбирать из ряда Е24;

в) подключить ко входам источники э.д.с. с заданными преподавателем значениями напряжений  $U_{ВХ1}$ ,  $U_{ВХ2}$ ,  $U_{ВХ3}$  и с помощью подключенного к выходу вольтметра измерить значение выходного напряжения  $U_{ВЫХ}$ ;

г) для заданных значений  $U_{ВХ1}$ ,  $U_{ВХ2}$ ,  $U_{ВХ3}$  по формуле (6.5) рассчитать  $U_{ВЫХ}$  и сравнить с измеренным значением.

**Задание 4:** Исследование дифференциального усилителя (рис. 6.7б)

а) собрать схему дифференциального усилителя, подключить ко входам источники э.д.с. с заданными значениями  $U_{ВХ1}$  и  $U_{ВХ2}$ , а к выходу – вольтметр;

б) рассчитать по формуле (6.6) сопротивления резисторов для обеспечения заданного преподавателем  $K_{U1} = K_{U2}$  (принять  $R_{OC} = 1 \text{ МОм}$ );

в) с помощью вольтметра измерить выходное напряжение  $U_{ВЫХ}$  и сравнить с рассчитанным по формуле (6.6) значением.

**Задание 5:** Исследование интегратора (рис.6.8)

а) собрать схему интегратора (рис.6.8) с постоянной времени  $\tau$ , заданной преподавателем;

б) подать на вход интегратора сигнал прямоугольной формы с частотой  $f = (1...2)/(2\pi\tau)$ ; зарисовать полученные осциллограммы входного и выходного сигналов; объяснить взаимосвязь между этими сигналами; проверить выполнение формулы (6.9).

**Задание 6:** Исследование дифференциатора (рис.6.9)

а) собрать схему дифференциатора (рис.6.9) с постоянной времени  $\tau$ , заданной преподавателем;

б) подать на вход интегратора сигнал синусоидальной формы с частотой  $f = (1...2)/(2\pi\tau)$ ; зарисовать полученные осциллограммы входного и выходного сигналов; объяснить взаимосвязь между этими сигналами.

### 6.3. Контрольные вопросы

1. Из каких каскадов состоит операционный усилитель?
2. Какие выводы содержит ОУ и для чего они предназначены?
3. Какими основными параметрами характеризуется ОУ.
4. В чём причина возникновения напряжения смещения и входных токов в ОУ?
5. Чем ограничивается выходное напряжение ОУ?
6. Почему для работы ОУ необходимо наличие цепей ООС и в чем их назначение?
7. Как рассчитывается коэффициент усиления для различных схем включения ОУ?
8. Как можно реализовать схемы суммирования и вычитания входных сигналов?
9. В чём причина сложности практической реализации схем интегратора и дифференциатора?

## Литература

1. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение. – М.: Солон-Р, 1999.
2. Электроника и электротехника в экспериментах и упражнениях. Практикум на Electronics Workbench / Под ред. Д.И.Панфилова. – М. ДОДЭКА, 2000, т.1,2
3. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: ВШ, 1991.
4. Ткаченко Ф.А. Техническая электроника. – Мн.: Дизайн ПРО, 2002 .
5. Валенко В.С., Хандогин М.С. Электроника и микросхемотехника: Учебное пособие.– Мн.: Бестпринт, 2003.
6. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – М.: Высш. школа, 1982 .
7. Горбачев Г.Я., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника. – М.: Энергоатомиздат, 1988 .
8. Ворсин Н.Н., Ляшко М.Н. Основы радиоэлектроники. – Мн.: Вышэйшая школа, 1992 .
9. Прянишников В.А. Электроника: Курс лекций. – СПб.: КОРОНА принт, 1998 .
10. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника (полный курс): Учебник для вузов/Под ред. О.П.Глудкина. – М.: Горячая Линия – Телеком, 1999.
11. Ровдо А.А. Полупроводниковые диоды и схемы с диодами. – М.: Лайт Лтд., 2000.
12. Ровдо А.А. Схемотехника усилительных каскадов на биполярных транзисторах. – М.: Издательский дом «Додэка XXI», 2002.
13. Расчет электронных схем. Примеры и задачи: Учеб. пособие для вузов по спец. электрон. техники/Г.И. Изъюрова, Г.В. Королев, В.А. Терехов, М.А. Ожогин, В.Н. Серов. – М.: Высш. школа, 1987.
14. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. – М.: Мир, 1982 .
15. Джонс М.Х. Электроника – практический курс. – М.: Постмаркет, 1999.
16. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. – М.: Мир, 2001.

## Приложение

### Краткая инструкция по работе с программой *Electronics Workbench*

#### П.1. Графический интерфейс пользователя *Electronics Workbench*

Система схемотехнического моделирования *Electronics Workbench* представляет собой программное средство разработки и анализа методом имитационного моделирования электронных устройств и цепей.

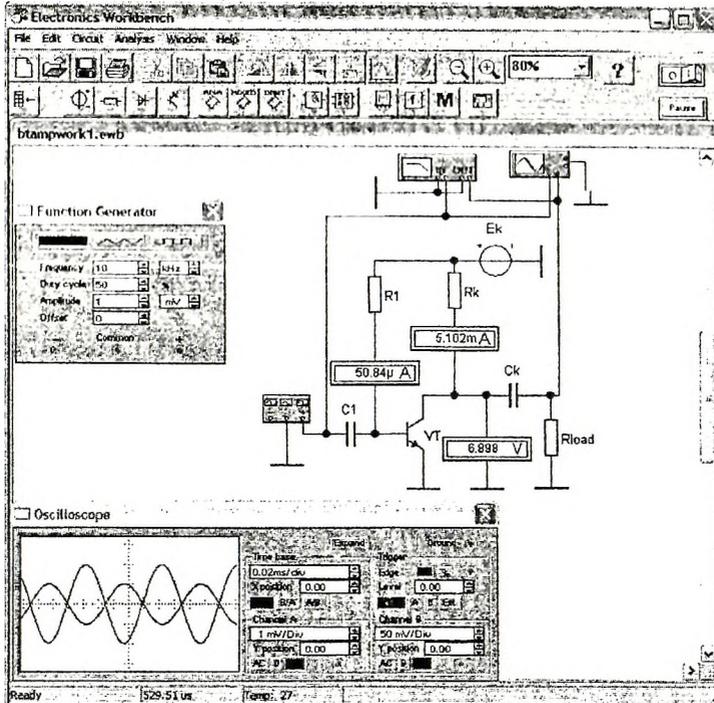


Рис.П.1 Внешний вид экрана компьютера при работе с программой EWB

Интерфейс пользователя состоит из полосы меню, панели инструментов и рабочей области (рис.П.1). Схема исследуемого устройства или цепи строится в рабочей области с использованием компонентов, выбираемых на панели инструментов, и может быть сохранена в отдельном файле. Открытие файла позволяет смоделировать работу данного устройства или цепи. При этом токи и напряжения могут отображаться на соответствующих индикаторах, а изменения сигналов – на виртуальном осциллографе. Таким образом программа позволяет воспроизвести на экране компьютера натурный эксперимент по исследованию соответствующего электронного устройства или цепи.

Полоса меню включает в себя подменю работы с файлами (*File*), редактирования (*Edit*), работы с цепями (*Circuit*), анализа схем (*Analysis*), работы с окнами (*Window*), работы с файлами справок (*Help*).

Панель инструментов состоит из “быстрых кнопок”, имеющих аналоги в меню, кнопок запуска и приостановки процесса моделирования, набора радиозлектронных аналоговых и цифровых компонентов, индикаторов, элементов управления и инструментов.

Меню **File** позволяет осуществлять следующие операции работы с файлами:

<b>File/New</b>	закрывает текущую модель и создает безымянное окно, которое может использоваться для создания новой модели
<b>File/Open...</b>	открытие уже существующего файла
<b>File/Save</b>	сохранение текущего файла на диске
<b>File/Save as...</b>	сохраняет текущую модель в новом файле (с новым именем)
<b>File/Revert to Saved...</b>	восстанавливает схему к исходному виду
<b>File/Print...</b>	распечатка схемы и/или приборов
<b>File/Print Setup...</b>	настройка принтера
<b>File/Exit</b>	завершение работы с пакетом <i>Electronics Workbench</i>

Меню **Edit** позволяет осуществить стандартные операции редактирования:

<b>Cut</b>	перемещение в буфер
<b>Copy</b>	копирование
<b>Paste</b>	вставка из буфера
<b>Delete</b>	удаление выделенных элементов
<b>Select All</b>	выделение всех элементов в активном окне
<b>Copy as Bitmap</b>	копирование растрового изображения элементов в буфер обмена
<b>Show Clipboard</b>	отображение содержимого буфера обмена

Меню **Circuit** позволяет осуществить операции с выделенными компонентами:

<b>Rotate</b>	поворот на 90 градусов
<b>Flip Horizontal</b>	зеркальное отображение по горизонтали
<b>Flip Vertical</b>	зеркальное отображение по вертикали
<b>Component Properties</b>	изменение параметров компонентов
<b>Create Subcircuit</b>	выделение всех элементов в активном окне
<b>Zoom In / Zoom Out</b>	увеличение / уменьшение масштаба изображения схемы
<b>Schematic Options</b>	определение параметров отображения схемы

Меню **Analysis** позволяет управлять процессом моделирования и выполнить анализ работы схемы в различных режимах:

<b>Activate</b>	запускается процесс моделирования
<b>Pause/Resume</b>	приостанавливается/продолжается моделирование
<b>Stop</b>	прекращается моделирование
<b>Analysis Options</b>	управление параметрами моделирования
<b>DC Operating Point</b>	расчёт режима работы схемы по постоянному току
<b>AC Frequency...</b>	расчёт частотных характеристик
<b>Transient...</b>	расчет переходных процессов
<b>Fourier...</b>	проведение Фурье-анализа (спектрального анализа)
<b>Monte Carlo...</b>	статистический анализ по методу Монте-Карло
<b>Display Graphs</b>	выводит на экран графики результатов моделирования

Меню **Window** позволяет осуществлять операции работы с окнами:

<b>Arrange</b>	упорядочение расположения окон
<b>Circuit</b>	вывод окна схемы на передний план
<b>Description</b>	открытие окна описания схемы

Меню **Help** вызывает файл справки.

## П.2. Порядок формирования модели

1. Для сохранения создаваемой модели необходимо открыть новый файл и присвоить ему соответствующее наименование. При этом на экране появляется чистая рабочая область.
2. Из соответствующих разделов на панели инструментов:

<b>Sources</b>	источники сигналов
<b>Basic</b>	пассивные компоненты и коммутационные устройства
<b>Diodes</b>	диоды
<b>Transistors</b>	транзисторы
<b>Analog Ics</b>	аналоговые микросхемы
<b>Mixed ICs</b>	микросхемы смешанного типа
<b>Digital ICs</b>	цифровые микросхемы
<b>Logic Gates</b>	логические цифровые микросхемы
<b>Digital</b>	цифровые микросхемы
<b>Indicators</b>	индикаторные устройства
<b>Controls</b>	аналоговые вычислительные устройства
<b>Miscellaneous</b>	компоненты смешанного типа
<b>Instruments</b>	контрольно-измерительные приборы

выбираются элементы, необходимые для построения схемы, и перетаскиваются мышью на рабочую область.

3. Выбранные элементы располагаются в требуемой для построения схемы последовательности. При необходимости отдельные элементы можно повернуть на 90 или 180 градусов.
4. Выполняются соединения между элементами схемы. Для этого необходимо щелкнуть по точке подключения одного элемента основной кнопкой мыши и, не отпуская клавишу, довести курсор до точки подключения второго элемента. В случае необходимости можно добавить дополнительные узлы (разветвления).
5. Задаются значения параметров и свойства каждого элемента. Для этого нужно дважды щелкнуть мышью на элементе и в появившемся окне ввести необходимые данные.
6. В зависимости от вида выполняемого анализа на панели инструментов выбираются необходимые приборы и подключаются к схеме.

На рисунке П.1 показано рабочее окно программы *Electronics Workbench* со схемой усилительного каскада на биполярном транзисторе. Ко входу схемы подключен функциональный генератор (*Function Generator*), к выходу осциллограф (*Oscilloscope*) и измеритель АЧХ и ФЧХ (*Bode Plotter*), в цепь базы и коллектора включены амперметры для измерения соответственно токов базы и коллектора, а также вольтметр для измерения напряжения на коллекторе транзистора.

Следует иметь в виду, что в схеме обязательно должно использоваться соединение с землей, или общим (нулевым) проводом, потенциал которого условно принимается равным нулю. В противном случае при запуске процесса моделирования будет выдаваться сообщение об ошибке. К нулевому проводу подключаются зажим «Common» функционального генератора, расположенный посередине, и зажим «Ground» осциллографа, расположенный справа вверху на панелях этих приборов.

### П.3. Анализ работы исследуемого устройства

После построения схемы исследуемого электронного устройства в рабочем окне *Electronics Workbench* можно приступить к его анализу. Можно также поместить в Рабочую область созданную ранее схему, открыв файл, в котором она хранится. Для начала процесса моделирования необходимо выбрать в меню команду **Analysis/Activate**, или перевести в положение "1" выключатель питания на панели инструментов, находящийся в правом верхнем углу окна (рис.П.1). При этом программа вычисляет значения переменных, характеризующих работу схемы (напряжений и токов), как функции независимой переменной (например, времени). Значение независимой переменной отображается в строке состояния в нижней части окна.

Следует отметить, что отображаемое значение независимой переменной в общем случае не соответствует реальному времени моделирования, поскольку реальный интервал времени работы устройства может воспроизводиться моделирующей программой быстрее или медленнее в зависимости от скорости ее работы и быстродействия компьютера. Таким образом моделирующая программа воспроизводит реальный процесс в некотором масштабе по времени.

При переводе выключателя питания в положение "0" процесс моделирования прекращается, а на приборах отображаются конечные значения (на момент остановки) измеряемых переменных. Приостановить процесс моделирования можно с помощью кнопки «Pause». Повторное нажатие кнопки приводит к продолжению процесса.

Основными инструментами анализа электронных устройств являются функциональный генератор и осциллограф. Во многих случаях данных устройств достаточно для решения поставленной задачи.

Работа с виртуальным осциллографом в целом аналогична работе с реальным осциллографом. Панель осциллографа раскрывается двойным щелчком на его пиктограмме. Параметры исследуемого сигнала (амплитуда, период) вычисляются

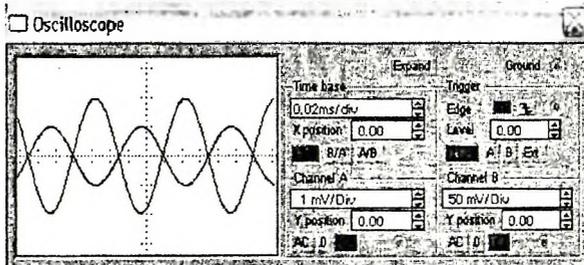


Рис.П.2 Вид панели осциллографа *Electronics Workbench*

через масштабные коэффициенты по вертикали и горизонтали, которые выставлены на соответствующих панелях (см. рис.П.2).

Отличие состоит в том, что вычисленные в процессе моделирования значения сигнала хранятся в памяти и отображаются на экране осциллографа. Поэтому при выключении питания схемы на экране сохраняется полученное к этому моменту изображение, с которым можно работать.

Нажатие на кнопку «Expand» приводит к раскрытию расширенной панели осциллографа (см. рис.П.3). Она позволяет просмотреть сигнал на всем интервале моделирования с помощью полос прокрутки. С помощью бегунков можно определить точные значения сигнала в двух точках, а также разность этих значений. Кнопка «Reduce» переводит панель к нормальному виду.

В процессе анализа работы устройства могут решаться различные задачи. Например

ходимо открыть панель измерителя АЧХ и ФЧХ, панель которого показана рис.П.5. С его помощью можно проанализировать амплитудно-частотную (при нажатой кнопке «Magnitude») и фазо-частотную (при нажатой кнопке «Phase») характеристики при логарифмической (кнопка «Log») или линейной (кнопка «Lin») шкале по осям Y (Vertical) и X (Horizontal). Настройка измерителя заключается в выборе пределов измерения коэффициента передачи и вариации частоты с помощью кнопок в окошках «F» – максимальное и «I» – минимальное значения. Значение частоты и соответствующее ей значение коэффициента передачи или фазы индицируется в окошках в правом нижнем углу измерителя.

Аналогичный результат можно получить, выбрав команду меню **Analysis/AC Frequency**. При этом будет выведено окно параметров анализа. При необходимости можно изменить некоторые из параметров: *Start frequency* (начальная частота), *End frequency* (конечная частота), *Sweep type* (масштаб по горизонтали: декадный (Decade), линейный (Linear) и октавный (Octave)), *Number of points* (количество точек анализа), *Vertical scale* (масштаб по вертикали: линейный (Linear), логарифмический (Log) и в децибелах (Decibel)), *Nodes in circuit* (список всех узлов цепи), *Nodes for analysis* (номеров узлов, для которых рассчитываются характеристики схемы, перечень таких узлов устанавливается нажатием кнопок Add → (добавить) и ← Remove (удалить)). *Simulate* — кнопка запуска моделирования. Результаты моделирования представлены на рис.П.6 в виде амплитудно-частотной (верхняя кривая) и фазо-частотной (нижняя кривая) характеристик.

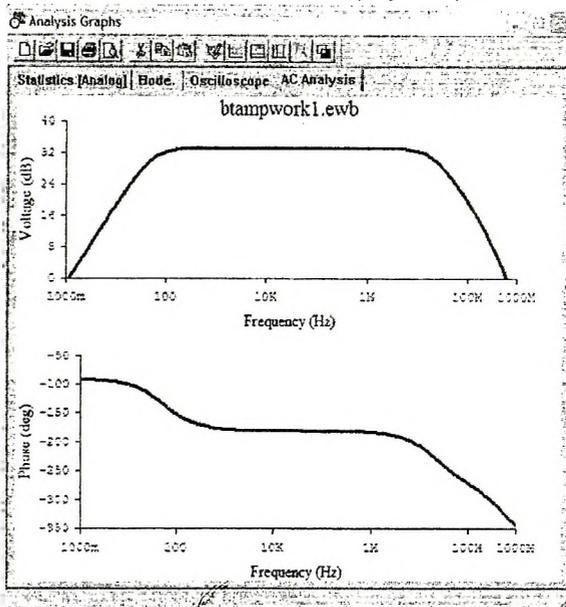


Рис.П.6 Результаты расчёта частотных характеристик усилительного каскада

Таким образом рассмотренная программа моделирования является удобным инструментом для анализа и наладки электронных устройств. Графический интерфейс, обеспечивающий взаимодействие с программой достаточно прост. В данном приложении рассмотрены лишь краткие сведения, необходимые для того, чтобы начать работу с программой. Впрочем они могут оказаться достаточными при использовании программы для анализа простейших устройств. В случае возникновения затруднений при решении более сложных задач следует обращаться к рекомендуемой литературе [1, 2].

можно подобрать параметры элементов схемы, обеспечивающие требуемый режим работы по постоянному току.

Можно исследовать, как изменяется форма сигнала при прохождении через устройство, а также оценить степень влияния параметров отдельных компонентов на это изменение и т.п. Во всех этих случаях требуется варьирование параметрами элементов схемы. Для изменения параметров какого либо компонента достаточно двойным щелчком мыши на его пиктограмме открыть окно параметров и задать в нем желаемые значения.

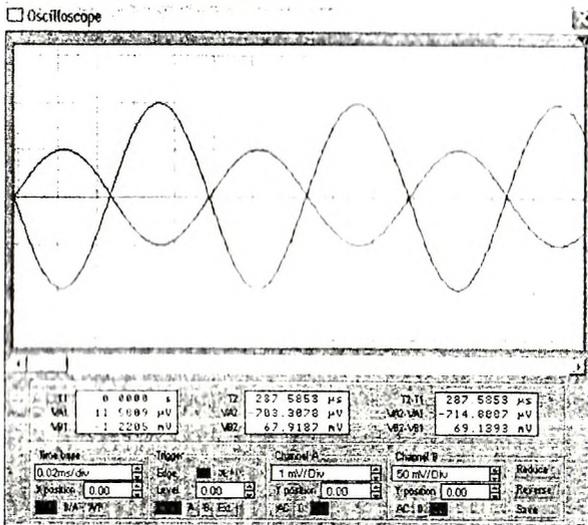


Рис.П.3 Расширенная панель осциллографа

Очевидно, что осуществить такое изменение на модели гораздо проще, чем в реальном устройстве.

Параметры элементов можно изменять в широких пределах. При этом нет проблемы поиска нужных компонентов или выхода устройства из строя при неверном задании параметров компонентов. В этом и состоит главное преимущество моделирующих программ.

Используемый в *Electronics Workbench* функциональный генератор позволяет формировать три вида сигналов: синусоидальный, пилообразный и прямоугольный. Двойным щелчком мыши на его пиктограмме открывается панель генератора (см. рис.П.4). Выбор формы сигнала осуществляется кнопками в верхней части панели.

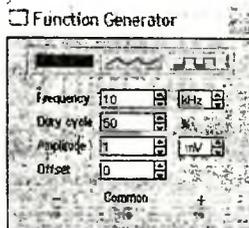


Рис.П.4 Панель функционального генератора

С помощью кнопок также задаются значения частоты и амплитуды сигнала. Сигналы, снимаемые с выходов «+» и «-» относительно общего вывода «Common» изменяются в противофазе. Перед изменением каких-либо параметров следует отключать источники питания схемы, иначе возможно получение неверных результатов.

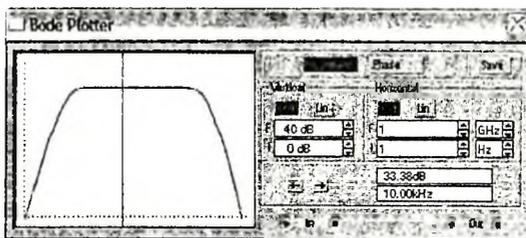


Рис.П.5 Панель измерителя АЧХ и ФЧХ (Bode Plotter)

Помимо прямого наблюдения за формой сигналов *Electronics Workbench* позволяет выполнить дополнительные виды анализа. В качестве примера можно рассмотреть получение АЧХ и ФЧХ, представленного на рис.П.1 усилительного каскада. Для этого необ-

## Содержание

Введение .....	3
Общие требования к выполнению работ и оформлению отчёта .....	4
Лабораторная работа № 1	
Изучение средств измерений в электронике. Определение характеристик электронных устройств .....	5
Лабораторная работа № 2	
Исследование статических характеристик полупроводниковых приборов.....	11
Лабораторная работа № 3	
Исследование нестабилизированных источников напряжения.....	18
Лабораторная работа № 4	
Исследование стабилизаторов напряжения и тока .....	26
Лабораторная работа № 5	
Изучение усилительного каскада на биполярном транзисторе.....	32
Лабораторная работа № 6	
Исследование схем на операционных усилителях.....	40
Литература .....	48
Приложение	
Краткая инструкция по работе с программой <i>Electronics Workbench</i> .....	49

Учебное издание

Составители: Прокопеня Олег Николаевич  
Смаль Александр Сергеевич

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к лабораторным работам  
по дисциплине «Электроника и микропроцессорная техника»  
для студентов специальностей 36 01 01, 36 01 03

### **АНАЛОГОВЫЕ УСТРОЙСТВА**

Ответственный за выпуск:  
Редактор: Строкач Т.В.  
Корректор: Никитчик Е.В.  
Технический редактор: Никитчик А.Д.

---

Подписано к печати 5.04.06 г.

Уч. изд. л. 3,5 . Усл. печ. л. 3,3. Тираж 120 экз. Заказ № 346. Отпечатано на ризографе  
учреждения образования «Брестский государственный технический университет».  
224017, г. Брест, ул. Московская, 267.