

Л.И. Шарыгина

**СХЕМОТЕХНИКА
АНАЛОГОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ
УСТРОЙСТВ**

Лабораторный практикум

**Издательство Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники**

Томск, 2012

Л.И. Шарыгина. Схемотехника аналоговых электронных устройств. Лабораторный практикум. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 63 с.

Аналоговые электронные устройства, наряду с устройствами цифровой схемотехники, составляют основу современных радиоэлектронных систем и устройств промышленной и бытовой электроники. Подготовка специалистов по разработке и эксплуатации электронной аппаратуры предполагает обязательную практическую работу с приборами и устройствами в исследовательских и учебных лабораториях. Современные тенденции обучения включают широкое использование моделирования работы реальной аппаратуры с применением ЭВМ. Предлагаемый компьютерный лабораторный практикум позволяет создать «виртуальную» лабораторию для такого моделирования с применением программных средств Electronics Workbench канадской фирмы Interactive Image Technologies.

Практикум содержит описание программы Electronics Workbench, в среде которой выполняются лабораторные работы, описания семи лабораторных работ, из которых пять являются обязательными для выполнения в пределах 16 часов аудиторных занятий. Выполнение дополнительных лабораторных работ может потребоваться при курсовом проектировании.

Практикум предназначен для студентов высших и средних специальных учебных заведений, а также для самообразования. Поскольку работы могут выполняться на любом персональном компьютере, данное руководство может быть использовано при обучении с использованием дистанционной технологии.

Содержание

Описание пакета Electronics Workbench	6
Лабораторная работа № 1. Исследование характеристик и параметров биполярного транзистора	20
Лабораторная работа № 2. Исследование каскада на биполярном транзисторе - нижние частоты	26
Лабораторная работа № 3. Исследование каскада на биполярном транзисторе на переменном токе - верхние частоты	35
Лабораторная работа № 4. Исследование пассивных схем плавной регулировки усиления	43
Лабораторная работа № 5. Исследование активных схем плавной регулировки усиления	47
Лабораторная работа № 6. Определение высокочастотных параметров биполярных транзисторов	53
Лабораторная работа № 7. Исследование схем фазоинверсных каскадов	58

Введение

Компьютерный лабораторный практикум представляет собой руководство для выполнения лабораторных работ в виртуальной среде, с использованием персонального компьютера и программного обеспечения Electronics Workbench фирмы Interactive Image Technologies (Канада).

Данный лабораторный практикум предназначен для студентов радиотехнических специальностей, изучающих схемотехнику аналоговых электронных устройств. То обстоятельство, что лабораторные работы выполняются не на реальных макетах, а в виртуальной среде, имеет как недостатки, так и преимущества.

Основной недостаток состоит в том, что студент, выполняющий лабораторную работу, не имеет дела с реальными схемами и приборами, не ощущает дозволённых границ токов и напряжений, превышение которых приводит к необратимым процессам. Студент не получает инженерных навыков работы с реальной аппаратурой, на второй план отходят вопросы техники безопасности, нет необходимости проявлять инженерную изобретательность и смекалку при сборке макета в условиях недостаточного приборного и материального обеспечения.

Однако, если основной задачей лабораторного практикума является усвоение и закрепление материала изучаемой дисциплины с помощью анализа, эксперимента и исследования, эти недостатки не являются определяющими.

Преимуществом виртуальной компьютерной лаборатории является большая свобода в выборе схем и их элементов для исследования – схема «собирается» на экране компьютера и параметры ее можно легко и многократно изменять. Кроме того, «неограниченное» число амперметров и вольтметров позволяет одновременно измерять напряжения и токи в различных точках схемы, как на постоянном, так и на переменном токе (в реальных схемах такая свобода ограничена возможностями макета). За время, отведенное для выполнения лабораторной работы, студент имеет возможность исследовать значительно больше вариантов схем и устройств, чем в случае использования реального макета.

Настоящее руководство может быть использовано при работе со студентами как очного, так и заочного обучения, в том числе обучающимися с использованием дистанционной технологии. «Виртуальная лаборатория» может быть создана в любом месте, где есть персональный компьютер. В случае использования дистанционной технологии обучения преподаватель имеет возможность воспроизвести на своем компьютере все действия студента, проверить результаты его работы, переслать электронным путем необходимые советы, рекомендации и указания.

Большим достоинством компьютерных лабораторных работ является то, что студент не отвлекается и не тратит время на действия, не связанные с существом исследования: поиск необходимых деталей, проводников и

пр., обнаружение неисправностей аппаратуры, ремонт вышедших из строя или плохо работающих приборов и так далее. Лабораторные работы безопасны для студента, его неправильные действия не могут привести к поломкам, авариям и материальному ущербу.

Лабораторная работа легко может быть повторена, весь процесс исследования схем и его результаты наглядны, легко и просто документируются и оформляются.

Учебное пособие состоит из двух основных частей. Первая часть содержит описание пакета программ Electronics Workbench, пользовательского интерфейса и методики работы с пакетом. Использование пакета Electronics Workbench возможно как в сети дисплейного класса, так и на отдельном персональном компьютере.

Вторую часть пособия занимают описания отдельных лабораторных работ. Эти работы отражают основные разделы изучаемой дисциплины.

Описание пакета ELECTRONICS WORKBENCH (версия 4.1с)

Общие сведения

Пакет Electronics Workbench (версия 4.1с) работает в среде Windows и требует 580 Кбайт оперативной памяти и примерно 2,8 Мбайт внешней памяти.

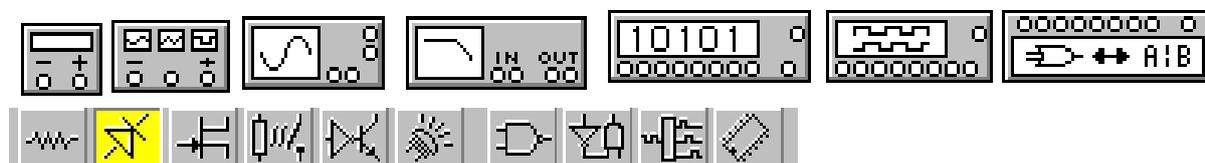
Пакет Electronics Workbench предназначен для исследования аналоговых и цифровых электронных схем. Настоящее описание относится только к аналоговой части пакета.

Electronics Workbench позволяет:

- собрать (вычертить) на экране монитора электрическую схему, содержащую биполярные и полевые транзисторы, диоды, операционные усилители, резисторы, конденсаторы, индуктивности, трансформаторы, источники питания, генератор сигналов, измерительные приборы и некоторые другие элементы;
- запустить собранную схему в работу;
- изучить работу схемы, используя показания приборов;
- записать собранную схему в файл или выдать на печать;
- распечатать показания измерительных приборов, параметры активных приборов и элементов схемы;
- скопировать схему или любой ее участок, переднюю панель любого измерительного прибора или экран прибора и перенести скопированную информацию для обработки в другую программу (Word, Paintbrush).

Для выполнения этих операций используется графический редактор и управляющие команды, объединенные в меню.

Стандартный экран Electronics Workbench состоит из рабочей области, используемой для компоновки (вычерчивания) схем.



В верхней части экрана расположена «полка» с приборами для исследования схем (слева-направо: мультиметр, многофункциональный генератор напряжения, осциллограф, графопостроитель и т.д.) и «закрома» с кнопками выбора элементов, из которых строятся схемы (пассивные элементы - резисторы, конденсаторы, узлы и пр., активные элементы - биполярные и полевые транзисторы, операционные усилители, диоды и пр., индикаторные приборы - амперметры, вольтметры и пр.). В верхней же части экрана находится меню команд (*File, Edit, Circuit, Window, Help*).

Для перемещения любого элемента на рабочее поле необходимо открыть соответствующий «закром», подвести с помощью «мыши» указатель к элементу, нажать левую кнопку «мыши» и, не отпуская ее, переместить элемент в нужную точку поля.

Для запуска аналогового модуля необходимо набрать команду *EWBA.EXE* в DOS. Если у компьютера дисплей VGA, для запуска лучше набрать команду *EWBA\display=VGA*. При входе в Electronics Workbench через Windows достаточно двойного щелчка на ярлыке программы.

Графический редактор Electronics Workbench. Компоновка схем

Графический редактор предназначен для формирования схем в рабочем пространстве.

Для формирования схемы необходимо:

- выбрать и разместить на рабочем поле все требующиеся элементы;
- соединить выбранные элементы между собой;
- установить номиналы значений элементов и при необходимости ввести их обозначения;
- присоединить измерительные приборы.

Элементы, из которых собираются схемы, размещены в «закромах». Для того чтобы вывести тот или иной элемент на рабочее поле, необходимо: выбрать нужный «закром», подвести курсор к элементу, нажать левую кнопку «мыши» и, не отпуская кнопку, переместить элемент в любую область экрана.

Для возвращения любого элемента в «закром» операции выполняются в обратном порядке.

Кроме элементов, в «закроме» также находятся «узлы», представляющие собой точку присоединения нескольких проводов (максимум четырех), которые используются при компоновке схем. Использование «узлов» при создании схемы весьма полезно, поскольку они позволяют в дальнейшем - при запуске схемы в работу - подключать измерительные приборы к ее различным точкам.

Соединительные провода рисуются следующим образом: с помощью «мыши» курсор подводится к выводу какого-либо соединяемого элемента схемы (при этом вывод элемента высвечивается), при нажатой левой кнопке «мыши» курсор перемещается к выводу другого соединяемого элемента и кнопка отпускается. Electronics Workbench сам оптимально разместит провод между элементами. Если «мышь», ведущая провод от элемента, останавливается возле какого-либо провода, в месте соединения образуется узел.

Следует иметь в виду, что положение того или иного элемента в схеме определяет его место в матрице, с помощью которой вычисляются токи и напряжения при запуске схемы в работу. Затруднительными являются решения, при которых вычитаются либо близкие величины, либо величины, различающиеся во много раз. Иногда решение можно сделать

более быстрым и точным путем простого изменения местоположения какого-либо элемента.

Если в процессе построения схемы появилась необходимость переместить какой-либо элемент по рабочему полю (для этого необходимо с помощью «мыши» активировать этот элемент и переместить в нужное положение, используя левую кнопку «мыши»), Electronics Workbench автоматически соединит провода с этим элементом в новой позиции. При возвращении элемента из рабочей области в «закром» либо сам элемент и провода, идущие к нему, исчезают из схемы, либо элемент уходит, а провода соединяются между собой. Для удаления какого-либо провода нужно подвести курсор к одной из точек его присоединения, нажать левую кнопку «мыши» и отвести курсор в любую свободную точку поля - провод исчезнет.

При желании провода могут быть окрашены одним из выбранных цветов. Для этого соответствующий провод «активируется» (стрелка курсора указывает на провод в любой его точке, и нажимается левая кнопка «мыши»). Активированный провод изображается линией двойной толщины. После активации провода следует в меню *Circuit* войти в режим *Wire color* (можно использовать двойной щелчок левой кнопкой) и после появления на экране нескольких квадратов, окрашенных в различные цвета, щелкнуть левой кнопкой «мыши» на выбранном цвете. Использование цветных проводов особенно полезно при изображении двух сигналов на экране двухлучевого осциллографа: луч на экране осциллографа окрашивается в цвет подводящего провода.

Для удобства «вычерчивания» схем предусмотрена возможность нанесения сетки на экран, для чего следует войти в меню *Circuit* и выбрать раздел *Preferences* (или нажать одновременно клавиши *Ctrl+E*), в котором выбирается подраздел *Grid*. Сетка включается последовательным набором команды *Yes (да)* в подразделе *Show grid* (показать сетку) и команды *Accept*. После завершения построения схемы или в любой момент её построения сетку можно отменить повторением тех же операций, что и при её включении, заменой команды *Yes* на *No* в подразделе *Show grid*. Введению команды *Yes* соответствует наличие знака в поле рамки, команды *No* - отсутствие этого знака.

Разрешается активировать соединительные провода (изображать их линиями двойной толщины) и любой элемент схемы (активированный элемент окрашивается в красный цвет). Для активации курсор подводится к элементу или к одному из концов подсоединения соответствующего провода и нажимается правая или левая кнопка «мыши», Для отмены активации можно щелкнуть «мышью» на свободном поле.

С активированными элементами или проводами можно производить:

- удаление;
- копирование;
- перемещение;

- запись в макрос;
- установку значений и меток;
- окрашивание проводов (если окрашенный провод присоединен к входам *A* или *B* осциллографа, «картинка» соответствующего канала будет иметь тот же цвет, что и подводящий провод).

Для того, чтобы схема стала работоспособной, следует указать значения номиналов её элементов (сопротивление резисторов, емкость конденсаторов и т.д.). Значения устанавливаются после активации соответствующего элемента и входа в раздел меню *Circuit*, подменю *Value*. После выбора номинала фиксируется команда *Accept* либо нажимается кнопка *Enter*. Последовательное обращение к меню и подменю можно заменить одновременным нажатием клавиш *Ctrl+U* или двойным щелчком левой кнопки «мыши» на активированном элементе. Активированные элементы по умолчанию являются «идеальными». При желании их можно заменить элементами с выбранными или заданными параметрами.

Многофункциональный генератор и измерительные приборы с помощью «мыши» снимаются с «полки» в левой верхней части экрана и включаются в схему так же, как и ее элементы. Разница состоит лишь в том, что на полке имеется только один экземпляр каждого прибора, а элемент из «закрома» может использоваться многократно.

После окончания компоновки схемы можно приступить к её исследованию, нажав кнопку запуска в верхней правой части экрана.

Меню Electronics Workbench

Как уже было указано, слева в верхней строке экрана находится меню, каждая позиция которого имеет подменю.

Меню Electronics Workbench

Строка меню	File	Edit	Circuit
Подменю	New <i>Ctrl+N</i>	Cut <i>Ctrl+X</i>	Activate <i>Ctrl+G</i>
	Open <i>Ctrl + O</i>	Copy <i>Ctrl+C</i>	Stop <i>Ctrl+T</i>
	Save <i>Ctrl+S</i>	Paste <i>Ctrl+V</i>	Pause <i>F9</i>
	Save as	Delete <i>Del</i>	Label <i>Ctrl+L</i>
	Print <i>Ctrl+P</i>	Select all <i>Ctrl+A</i>	Value <i>Ctrl+U</i>
	Print setup		Model <i>Ctrl+M</i>
	Exit <i>Alt+F4</i>		Zoom <i>Ctrl+Z</i>
			Rotate <i>Ctrl+R</i>
			Wire color <i>Ctrl+E</i>
			Subcircuit <i>Ctrl+B</i>
			Preference <i>Ctrl+E</i>
			Analysis Option; <i>Ctrl+Y</i>

В режиме *File* можно записывать схему, нарисованную на экране, в файл (команды *Save* и *Save as*), открывать новый файл (команда *Open*) или начинать чертить новую схему (команда *New*). В двух последних случаях экран очищается и либо вычерчивается новая схема из файла, либо дается возможность начать чертить новую схему. Если при этом на экране уже была какая-то схема, программа предлагает записать ее в файл.

Будьте осторожны. Не записывайте новый файл с уже существующим в «закроме» или на диске именем.

В режиме *File* выполняются также операции настройки печати (*Print setup*) и печать (*Print*) файлов (схемы, приборы, номиналы элементов и пр.), а также выход из программы (*Exit*).

Для более быстрого обращения к командам подменю используются сочетания клавиш (например, для команды *New* используется сочетание *Ctrl+N*, для команды *Open* сочетание *Ctrl + O* и так далее – см. таблицу).

Команда *Revert to Saved* осуществляет стирание всех изменений схемы в данном сеансе.

Команда *Print* служит для выбора данных для вывода на принтер (*Schematic* - схема, *Description* - описание к схеме. *Part list* - перечень документов; *Label list* - список обозначений элементов схемы; *Model list* - список компонентов, *Subcircuits* - подсхемы, модули; *Analysis options* - перечень режимов моделирования; *Instruments* – список приборов); В этой же позиции можно выбрать опции печати (*Setup*) и отправить материал на печать (*Print*).

Режим редактирования (*Edit*) имеет дело целиком с файлом или выделенной его частью: может скопировать его в буфер (*Copy*) или вырезать (*Cut*) с тем, чтобы в дальнейшем при необходимости вставить в выбранную часть поля (*Paste*). Команда *Select all* позволяет одновременно активировать все элементы схемы для выполнения групповых операций над ними. Так же, как и в режиме *File*, имеется возможность быстрого вхождения в подменю нажатием соответствующих клавиш.

Команда *Copybits* позволяет выбрать и скопировать часть поля экрана для переноса информации в буфер и дальнейшего использования ее другими редакторами (*Word, Paint*).

Режим *Circuit* позволяет осуществлять операции со схемами и их элементами. Для этого используется ряд команд.

Команда активации (*Activate*) *Ctrl+G* активирует элемент или провод, на который указывает курсор. Можно активировать только один элемент, так как при активации другого активация первого отменяется.

Вращение (*Rotate*): *Ctrl+R*. Операция осуществляет вращение одного или нескольких активированных элементов на 90 градусов по часовой стрелке при каждом обращении. Если эти элементы соединены с другими, связь не нарушается. *Элемент «земля» не вращается.*

Команды *Label* (метка) и *Value* (номинал) позволяют устанавливать обозначение и величину активированного элемента (сопротивление резистора, емкость конденсатора и т.д.).

Команда *Model* (модель) осуществляет выбор активного элемента и его параметров. При этом для любого активного элемента (биполярного и полевого транзистора, операционного усилителя) возможен выбор идеализированной модели. После выбора элемента его название указывается рядом с ним, а параметры могут быть распечатаны.

В Electronics Workbench предусмотрена возможность создания собственных микромодулей с тем, чтобы в дальнейшем использовать их в качестве элементов сложных схем. Такой модуль может иметь любое число выводов, позволяющих присоединять к нему другие модули, элементы или измерительные приборы.

Для создания модуля следует изобразить его схему на рабочем поле. Выделить часть схемы, или с помощью команды *Select all* в меню *Edit* все элементы схемы. При этом нужно следить, чтобы в выделяемую подсхему не входили измерительные приборы. После этого в меню *Circuit* выбирается подменю *Subcircuit*. На экране появляется поле для диалога, и пользователю предоставляется возможность задать имя модуля и выбрать один из вариантов работы:

- скопировать компоненты в модуль и оставить их на месте на рабочем поле;
- отправить компоненты в модуль;
- заменить компоненты новым модулем, оставляя любое число выводов для присоединения других элементов.

В любом из этих случаев модулю присваивается указанное пользователем имя, и он размещается в закрывке *Custom*. Содержание модуля может быть закрыто командой *Hide subcircuits* в диалоговом поле. При этом модуль не может быть развернут на экране и используется только как «черный ящик».

При создании модуля провода, присоединенные к другим компонентам на экране, становятся выводами. Если пользователь хочет предусмотреть дополнительные выводы, необходимо указать курсором на точку схемы, нажать левую кнопку «мыши» и, не отпуская ее, переместить курсор к границе модуля.

Для редактирования модуля, находящегося на рабочем поле, необходимо дважды щелкнуть на нем левой кнопкой «мыши».

Изменение масштаба изображения (*Zoom*): *Ctrl+Z*. Операция работает только с макросами (модулями), приборами анализа, мультиметром и многофункциональным генератором. Операция увеличивает эти элементы в несколько раз, что позволяет установить на них необходимые значения и просматривать на экранах приборов результаты анализа схем. Существует более короткий путь входа в этот раздел меню – двойное нажатие левой кнопки «мыши».

Установки (*Preferences*): *Ctrl+E*. Подменю *Preferences* имеет свое подменю и используется для установки различных вариантов вывода схемы на экран. Пользователь может по желанию задать одну из команд (или любую группу команд): *Show grid* (покажи сетку), *Use grid* (используй сетку), *Show labels* (покажи метки), *Show models* (покажи модель — тип активного элемента), *Show values* (покажи номинал). Для задания любого из этих режимов следует войти в подменю *Preferences*, поставить указатель у соответствующей команды и нажать клавишу *Accept*. Отмена решения происходит после того, как пользователь уберет указатель у команды.

Analysis Options (*Ctrl+Y*) - установка режимов моделирования (*Transient* - расчет переходных процессов после включения источника питания с представлением результатов на экране осциллографа; *Steady-state* - расчет стационарного режима схемы по постоянному току; *Assume linear operation* - принять линейные модели активных компонентов при расчете переходных процессов; *Pause after each screen* - пауза после заполнения экрана осциллографа; *Store results for all nodes* - вывод результатов для всех контрольных узлов схемы; *tolerance* - погрешность моделирования. *Time...* – выбор количества отсчетов на периоде сигнала для осциллографа; *Bode...* – количество отсчетов для измерителя АЧХ и ФЧХ, *Temporary...* [Mb] – размер внешнего файла для хранения результатов моделирования).

Раздел меню *Analysis Options* позволяет управлять процессом вывода результатов анализа на экран. Можно задать два режима вывода информации на экран осциллографа:

TRANSIENT — анализ переходных процессов (останавливается, когда заполняется экран осциллографа);

STEADY STATE (SS) — анализ продолжается до появления устойчивого состояния (по мере заполнения экрана осциллографа он очищается, и данные продолжают выводиться).

Точность вычислений ***TOLERANCE***. Чем ниже заданная точность (больше допустимая погрешность), тем быстрее проходит анализ.

Assume linear operation – принять линейные модели активных компонентов при расчете переходных процессов;

Pause after each screen – пауза после заполнения экрана осциллографа;

Store results for all nodes – вывод результатов для всех контрольных узлов схемы;

Time... – выбор количества отсчетов на периоде сигнала для осциллографа;

Bode... – количество отсчетов для измерителя АЧХ и ФЧХ.

Кроме указанных, меню имеет еще два раздела: *Window* (окно информации о текущем состоянии) и *Help* (обращение за помощью). За помощью можно обращаться в любой момент работы. Если высвечен

(активирован) какой-либо элемент, информация дается по этому элементу. Если обращение за помощью не связано с каким-либо конкретным элементом, на экране появляется список разделов, к любому из которых можно обратиться в окне помощи. Возможен переход из одного окна помощи в другое. Все окна помощи закрываются клавишей так, как это принято в *Windows*.

Элементы схем в *Electronics Workbench*

Закром пассивных элементов (*Passive*) на экране обозначен 

В него входят:

- - узел – точка соединения, используется для соединения проводов;

 - «земля» – база для связи электрических уровней. В аналоговых схемах наличие заземленного общего провода обязательно для получения достоверных результатов испытаний. В случае трансформатора обе его обмотки должны иметь контакт с общим проводом. Измерительные приборы также должны иметь заземление;

 - резисторы постоянного и переменного сопротивления, конденсаторы постоянной и переменной емкости, катушки постоянной и переменной индуктивности, трансформатор с регулируемым включением в одну из обмоток;

 - батарея – источник постоянного напряжения с возможностью установления значения напряжения;



- источники постоянного и переменного тока – в первом случае имеется возможность устанавливать значение тока (двойной щелчок левой кнопки «мыши», выбор значения тока, команда *Accept*), во втором случае - значение тока, его частоту и фазу;



- источник переменного напряжения – устанавливается значение тока, его частота и фаза, напряжение может модулироваться по амплитуде (AM) или по фазе (FM), при этом имеется возможность устанавливать пиковое значение колебания, несущую и модулирующую частоты и индекс модуляции;

 - плавкий предохранитель – используется для предотвращения перегрузок в схеме.

Закром активных элементов (*Active*) на экране обозначен 

В закреме активных элементов находятся диоды, стабилитроны, светодиоды, биполярные транзисторы типа *p-n-p* и *n-p-n* диодные мосты и пара встречно включенных диодов, умножители и делители частоты, линии с потерями и без потерь, операционные усилители. Для установки параметров активных элементов следует выбрать команду *Model* в меню

Circuit (или двойным щелчком левой кнопки «мыши» на изображении соответствующего элемента в схеме). Существует возможность выбора идеальной модели (без потерь и паразитных емкостей) и реальной модели из списка (к сожалению, в списке приведены модели активных элементов иностранного производства). Значения параметров моделей можно просмотреть и распечатать, при желании задать свои параметры для выбранной модели. В связи с тем, что список параметров моделей можно просмотреть на экране монитора при работе, он в настоящем описании не приводится.

Закром полевых транзисторов (*FET*) на экране обозначен 

В этом закrome находятся полевые транзисторы различных видов.

Закром индикаторных приборов (*Indic*) на экране обозначен 

В нем находятся вольтметры и амперметры, а также индикаторная лампочка и зуммер. Electronics Workbench предоставляет возможность использовать любое число вольтметров и амперметров, работающих в режиме измерения постоянного или переменного тока по желанию пользователя.

Приборы для анализа схем

Для анализа схем используются следующие приборы.

Комбинированный прибор – мультиметр может работать в следующих режимах: A - амперметр, V - вольтметр, Ω - омметр, dB - измерение величин в децибелах (напряжение по отношению к 1 В, ток по отношению к 1 А, сопротивление по отношению к 1 Ом).

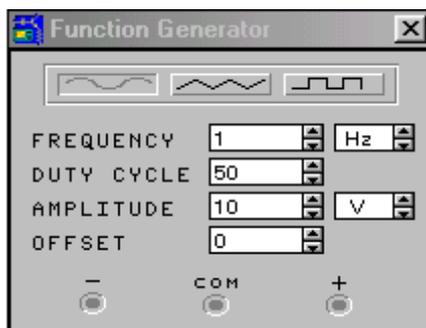


Предусмотрена возможность переключения для измерений на постоянном или переменном токе (*Settings*).

Для измерения напряжений и токов, помимо мультиметра, может быть использовано неограниченное число амперметров и вольтметров из закрома индикаторных приборов, настроенных на измерение либо постоянных, либо переменных составляющих измеряемых величин.

Многофункциональный генератор может выдавать сигналы трех видов: синусоидальный сигнал, пилообразный сигнал и прямоугольные

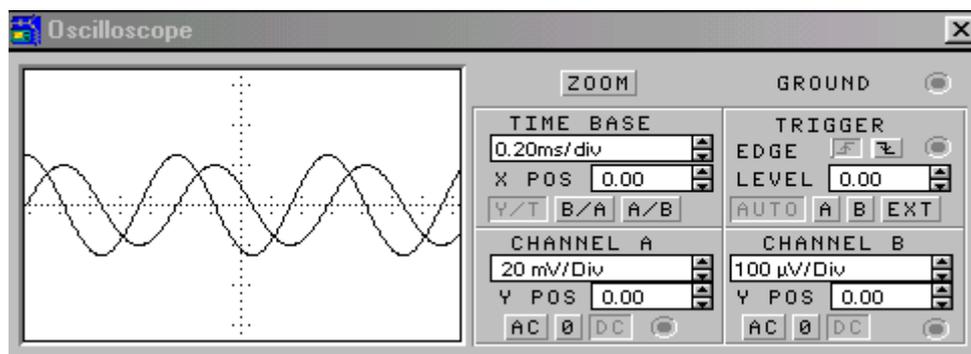
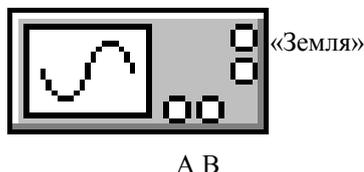
импульсы. Значение частоты изменяется в пределах от 0 до 999 МГц и устанавливается «ручками» на панели прибора.



Режим синхронизации (*DUTY CYCLE*) устанавливает скважность прямоугольных импульсов или отношение расстояний между фронтами и спадами пилообразных сигналов. Значение 50 % соответствует скважности 2, больше 50 % — скважности меньше двух, меньше 50 % — скважности больше двух. Для треугольных импульсов (пилообразный сигнал) значение 50 % соответствует равной крутизне переднего и заднего скатов, меньше 50 % — передний скат круче и короче заднего.

Режим *AMPLITUDE* устанавливает уровень выходного напряжения.

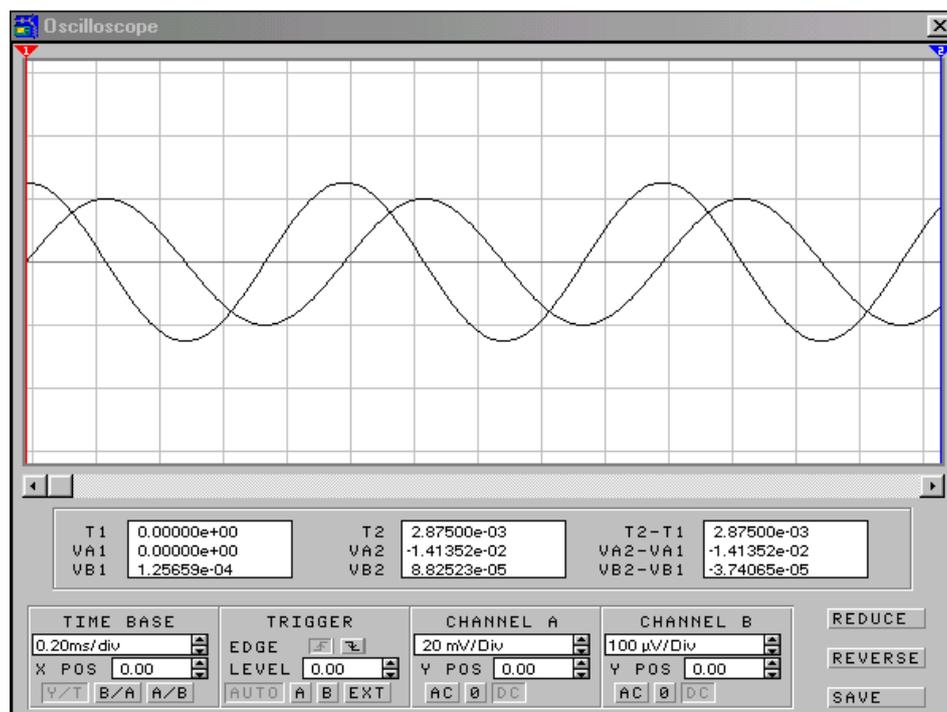
Осциллограф имеет два входных канала *A* и *B*, позволяя показывать два сигнала одновременно. Для нормальной работы осциллографа его следует заземлить: общий провод присоединяется к зажиму *GROUND*



На панели *TIME BASE* регулируется масштаб по оси абсцисс экрана осциллографа (время на одно деление) в соответствии с частотой сигнала. Диапазон изменений масштаба от 0,1 нс до 0,5 с на одно деление по горизонтали. Если желательно наблюдать один цикл колебания частоты 1 кГц, *Time base* устанавливается на 0,1 мс, один цикл частоты 10 кГц — на 0,01 мс. Значение *X POS* может использоваться для перемещения

вызывающей отметки по оси X . Значение $Y POS$ устанавливает смещение луча по оси Y .

В каналах A и B предусмотрена регулировка масштаба по оси Y дисплея осциллографа (вольты на одно деление).



TRIGGER (триггер, синхронизация) – управляет началом отображения сигнала на экране. Оно может начинаться с положительной или отрицательной полуволны или управляться внешним сигналом. Если Вы не видите на экране сигнала, когда по вашим представлениям он должен там быть, проверьте установку триггера. Триггер должен быть заземлен.

Установка режима измерения AC | O | DC:

AC — показывает переменную составляющую сигнала;

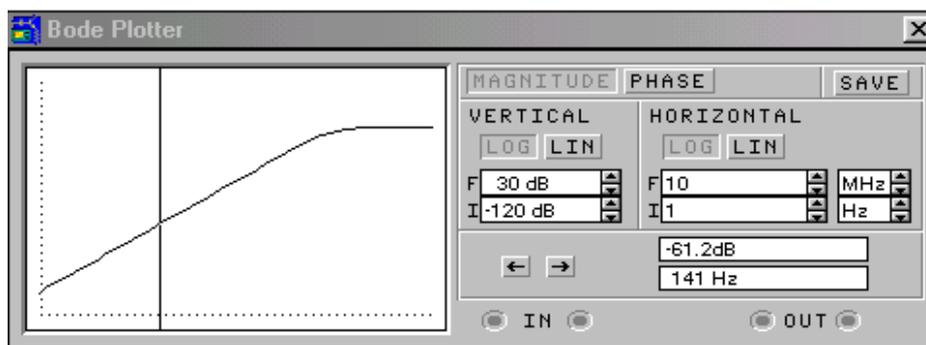
DC — показывает постоянную составляющую сигнала;

O — показывает уровень нуля.

Клавиша **ZOOM** на передней панели осциллографа увеличивает экран, дает возможность получить дополнительную информацию и смещать изображение на экране вправо или влево. Для возврата к прежнему размеру экрана осциллографа необходимо нажать клавишу **REDUCE**.

Графопостроитель предназначен для показа зависимости амплитуды от частоты в логарифмическом или линейном масштабе. Для работы необходимо установить начальные и конечные частоту и амплитуду.

Графопостроитель имеет маркер в виде вертикальной линии, перемещающийся по экрану в горизонтальном направлении с помощью «мыши» (или стрелок на панели прибора ) и использующийся для точного определения параметров выбранной точки.



Текущие параметры выбираемой точки (амплитуда и частота) указываются в окнах на панели прибора (на рисунке амплитуда -61,2 дБ, частота 141 Гц). Предусмотрена возможность установки линейного или логарифмического масштаба по обеим осям (*LOG* и *LIN* в позициях *VERTICAL* и *HORIZONTAL*), а также масштабирования по оси амплитуд (от -200 дБ до $+200$ дБ) или фаз (от -720° до $+720^\circ$) и по оси частот (от 1 МГц до 1 ГГц).

Порядок работы с Electronics Workbench

При входе в Electronics Workbench можно сразу рисовать новую схему в рабочем пространстве или загрузить уже заготовленную схему или часть ее (с помощью пункта меню *File*) для редактирования или анализа.

После того, как схема нарисована, в рабочее пространство устанавливаются приборы анализа, которые присоединяются проводами к точкам, где производятся измерения.

После проведения анализа схему и результаты измерений можно сохранить, используя пункт меню *File*, или, при необходимости, вывести на печать, используя пункт меню *Print*.

Для выхода из среды Electronics Workbench используется команда *Exit* в меню *File* или одновременное нажатие клавиш *AU+E4*.

Методические рекомендации по работе с пакетом ELECTRONICS WORKBENCH

В настоящем разделе приведены некоторые советы и указания, позволяющие более рационально проводить исследование схем и нагляднее представлять результаты такого исследования.

При работе с приборами в среде Electronics Workbench имеется возможность пользоваться «ручками настройки» так же, как и при работе с реальными приборами. Так, при работе с многофункциональным генератором можно менять частоту генератора — *FREQUENCY* — грубо (правое окно) и более точно (левое окно). *AMPLITUDE* задает действующее значение выходного напряжения также грубо (правое окно) и более точно (левое окно). При работе с прямоугольными импульсами и пилообразными сигналами *DUTY CYCLE* задает скважность: для

прямоугольных импульсов – их длительность в процентах от периода следования, а в случае пилообразных сигналов — долю переднего фронта пилы в процентах от периода. *OFFSET* позволяет при необходимости вводить в сигнал постоянную составляющую.

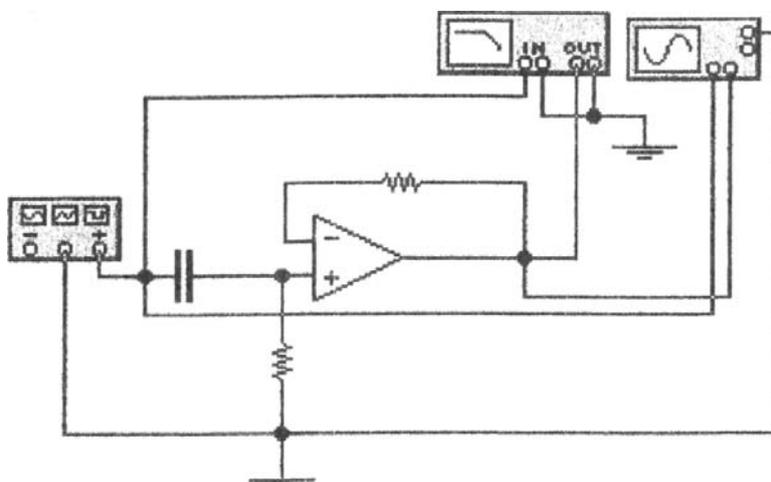
При работе с осциллографом регулировки *CHANNEL A* и *CHANNEL B* задают коэффициент усиления сигнала для вертикального отклонения осциллографа по каждому из каналов (масштаб по вертикальной оси), а *TIME BASE* меняет частоту развертки по горизонтальной оси.

Electronics Workbench дает возможность установки линейного или логарифмического масштаба по обеим осям (кнопки *LOG* и *LIN*). Можно также наблюдать амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики изучаемого объекта (кнопки *MAGNITUDE* и *PHASE*). Для удобства измерений левое окно задает максимальное (*F*) и минимальное (*I*) значения по вертикальной оси. Аналогично, правое окно задает максимальное (*F*) и минимальное (*I*) значения по оси частот.

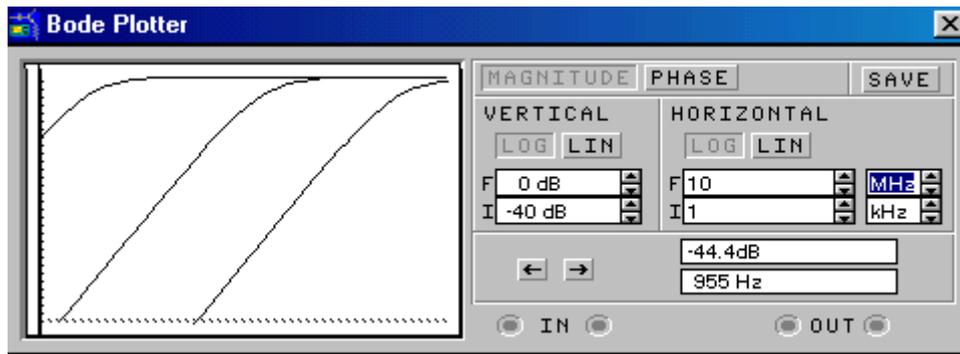
Перемещение маркера выполняется либо с помощью «мыши», либо стрелками, расположенными на панели прибора:



Графопостроитель работает только при наличии генератора, соединенного с испытываемым объектом и с входными зажимами графопостроителя (*IN*). Ниже на рисунке показан пример подключения осциллографа и графопостроителя.



Значительный интерес представляет возможность сравнения частотных характеристик или формы сигнала при различных значениях параметров схемы. Разумеется, эта задача может быть решена путем сравнения, допустим, значений нижней граничной частоты при различных значениях емкости разделительных конденсаторов или значений верхней граничной частоты при различных значениях емкости нагрузки и т.п. Однако сравнение было бы более наглядным, если бы несколько частотных характеристик можно было сосредоточить на одном экране (как показано ниже).



Electronics Workbench непосредственно не предусматривает выполнение такой операции. Решить эту задачу можно при совместном использовании Electronics Workbench, Paintbrush и Word. Для этого следует проделать следующие операции.

- Собрать исследуемую схему и установить нужные параметры.
- Включить схему в работу и получить частотную характеристику на экране плоттера (целесообразно выбрать разумные шкалы по осям плоттера, поскольку это позволит сделать картинку более наглядной и даст дополнительную информацию на рисунке).
- В режиме *Edit* выбрать команду *Copybits*; на экране появится управляемый «мышью» маркер (крест); используя маркер, выделить необходимое для копирования поле (всю переднюю панель прибора или только его экран; первую операцию целесообразно выполнить при первом обращении, вторую — при последующих). При выполнении этой операции выделенная картинка сохраняется в буфере.
- Войти в Paintbrush и командой *Copy* вставить файл из буфера.
- Вернуться в Electronics Workbench, изменить параметры схемы и получить новую картинку на экране плоттера; повторить операцию копирования в буфер в режиме *Edit* с помощью команды *Copybits*.
- Вернуться в Paintbrush и скопировать на экран содержимое буфера.
- С помощью «мыши» переместить вновь полученное изображение в нужный участок поля экрана и совместить с предыдущим (поле Paintbrush прозрачно, и новая картинка не закроет предыдущую).
- Повторить операцию нужное число раз.

Если требуется нанести на полученное изображение надписи, их также лучше делать в Paintbrush, поскольку, если изображение перенести в Word и делать надписи в нем, картинка получится двухслойная, неудобная для дальнейших перемещений и копирования. Текст надписей выполняется либо непосредственно в Paintbrush, либо набирается в Word'e и копируется в Paintbrush, а затем размещается в нужном месте рисунка. При желании можно изменить размер рисунка в любом измерении на любой стадии его подготовки в соответствии с правилами редакторов. Готовый рисунок может быть распечатан или скопирован и перенесен, допустим, в текст отчета, созданного в программе Word.

Лабораторная работа № 1

Исследование характеристик и параметров биполярного транзистора

Цель работы: первичное знакомство с пакетом Electronics Workbench, в процессе которого студентам следует научиться строить схемы на экране монитора, подключать измерительные приборы, изменять параметры элементов и запускать схему в работу.

Исследование характеристик и параметров биполярного транзистора подразумевает снятие статических характеристик транзистора и вычисление с их помощью параметров транзистора. Эти характеристики и параметры потребуются в дальнейших лабораторных работах.

Порядок выполнения работы

1. Изучите описание Electronics Workbench.

2. Научитесь "собирать" схемы на экране монитора. Для этого "соберите" схему каскада на биполярном транзисторе при питании фиксированным током базы, подключите измерительные приборы (амперметры и вольтметры) с целью измерения режима транзистора. При использовании приборов из закрома Indis убедитесь, что они настроены на измерения на постоянном токе (для этого щелкните два раза левой кнопкой «мыши», указывая курсором на соответствующий прибор). Для выполнения этого пункта задания можно взять идеальный транзистор.

3. *Ознакомьтесь с параметрами моделей биполярных транзисторов (идеального и реальных), выберите транзистор для дальнейшего исследования и использования (выбор целесообразно сделать сознательно, поскольку снятые в этой работе статические характеристики транзисторов будут использоваться при дальнейшем исследовании схем на этих транзисторах).*

При выборе транзистора можно принять во внимание:

- частотные свойства выбираемого транзистора; ориентиром при этом может служить задаваемая моделью «время прямого пролета» - *Forward transit time* - t_F (чем оно больше, тем хуже частотные свойства транзистора);
- граничная частота усиления транзистора при его включении по схеме с общим эмиттером (f_T) вычисляется как

$$f_T = \frac{h_{21}}{(h_{21} + 1)t_F},$$

где h_{21} - статический коэффициент передачи тока базы транзистора (*Forward current gain coefficient*);

- дополнительную информацию о частотных свойствах транзистора дает значение емкости коллекторного перехода (C_c) - чем она меньше, тем лучше частотные свойства транзистора;
- «мощностные» свойства транзистора – чем выше «*Forward Beta High-Current Knee-Point*» модели, тем мощнее транзистор.

4. Снимите входную $I_{\text{б}} = f(U_{\text{б}})$ и проходную $I_{\text{к}} = f(U_{\text{б}})$ статические характеристики выбранного биполярного транзистора. Для этого целесообразно использовать отдельные источники питания для коллектора и базы (еще удобнее для питания базовой цепи пользоваться источником тока – см. рис. 1.1).

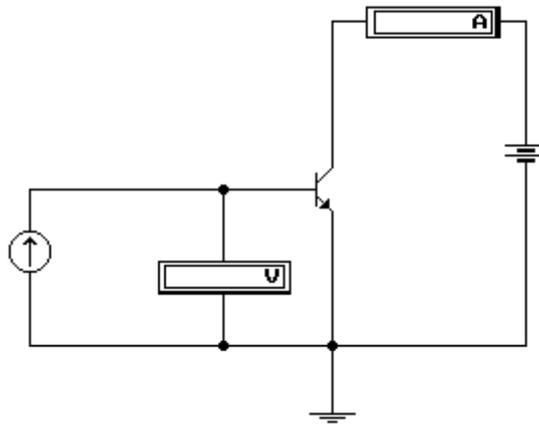


Рис. 1.1. Схема снятия статических характеристик

Характеристики снимите при фиксированном напряжении на коллекторе 5 В. Целесообразные значения тока коллектора 0,5-20 мА. С учетом этого выбираются значения тока источника в цепи базы.

Результаты измерений занесите в табл. 1.1:

Таблица 1.1. Статические характеристики транзистора

Условия измерения: $U_{\text{к}} = 5 \text{ В}$.

$I_{\text{б}}$, мкА									
$I_{\text{к}}$, мА									
$U_{\text{б}}$, В или мВ									

Постройте входную и проходную характеристики транзистора ($I_{\text{б}} = f(U_{\text{б}})$ и $I_{\text{к}} = f(U_{\text{б}})$) для дальнейшего использования.

5. (этот пункт выполняется по желанию студента или по рекомендации преподавателя). Подключите генератор переменного тока, поставив между генератором и входом усилителя разделительный конденсатор с емкостью 10-20 мкФ. Установите частоту генератора 1-5 кГц и его выходное напряжение порядка 1-5 мВ.

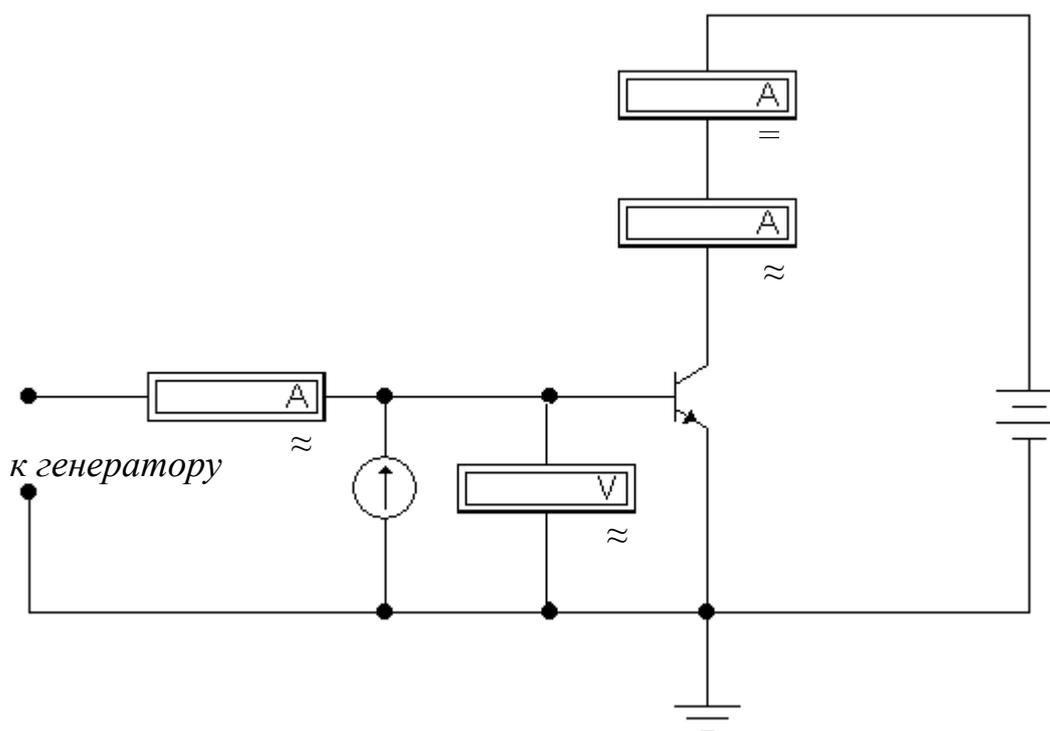


Рис. 1.2. Схема измерения для определения параметров транзистора на переменном токе

Переведите вольтметр в цепи базы в режим измерения переменного напряжения, в цепь базы включите амперметр для измерения переменной составляющей тока базы. Амперметр в цепи коллектора целесообразно оставить для контроля. Для измерения переменной составляющей коллекторного тока включается дополнительный амперметр последовательно с первым.

Для тех же значений тока смещения базы (I_b в табл. 1.1) измерьте переменные составляющие токов коллектора и базы и напряжения на базе. Результаты измерений занесите в табл. 1.2:

Если при выполнении данного эксперимента $R_{ген} = 0$ и, следовательно, $U_{б\approx}$ остается неизменным, его можно вынести из таблицы в «условия измерения».

Используя результаты измерений, вычислите

$$h_{21\approx} = I_{k\approx} / I_{б\approx}, \quad g_{\approx} = I_{б\approx} / U_{б\approx} \text{ или } R_{вх} = 1 / g_{\approx} \text{ и } S_{\approx} = I_{k\approx} / U_{б\approx}.$$

Результаты вычислений занесите в таблицу и постройте графики зависимостей $h_{21\approx}$, g_{\approx} или $R_{вх}$, S_{\approx} от постоянной составляющей тока коллектора.

Таблица 1.2. Параметры биполярного транзистора на переменном токе
 Условия измерения: $U_k = 5 \text{ В}$, $C_p = (10-20) \text{ мкФ}$, $f_{\text{ген}} = (1-5) \text{ кГц}$, $e_{\text{ген}} = (1-5) \text{ мВ}$

$I_{\text{б}}$, мкА									
$I_{\text{б}\approx}$, мкА									
$I_{\text{к}\approx}$, мА									
$U_{\text{б}\approx}$, мВ									
$h_{21\approx}$									
g_{\approx}									
S_{\approx}									
Параметры биполярного транзистора на переменном токе, измеренные в данном разделе, могут также быть вычислены по данным таблицы 1.1									

5. Выберите положение рабочей точки по входной характеристике и обеспечьте ее в схеме питания фиксированным током базы (рис. 1.3,а). Для того, чтобы напряжение на коллекторе осталось примерно тем же, следует обеспечить соответствующее увеличение напряжения питания:

$$E = U_{\text{к0}} + R_{\text{к}} I_{\text{к0}} \quad , \quad R_{\text{б}} = \frac{E - U_{\text{б0}}}{I_{\text{б0}}}$$

5. Перейдите к схеме коллекторной стабилизации (рис. 1.3,б) и обеспечьте тот же режим работы транзистора.

$$R_{\text{б}} = \frac{(E - I_{\text{к0}} R_{\text{к}}) - U_{\text{б0}}}{I_{\text{б0}}}$$

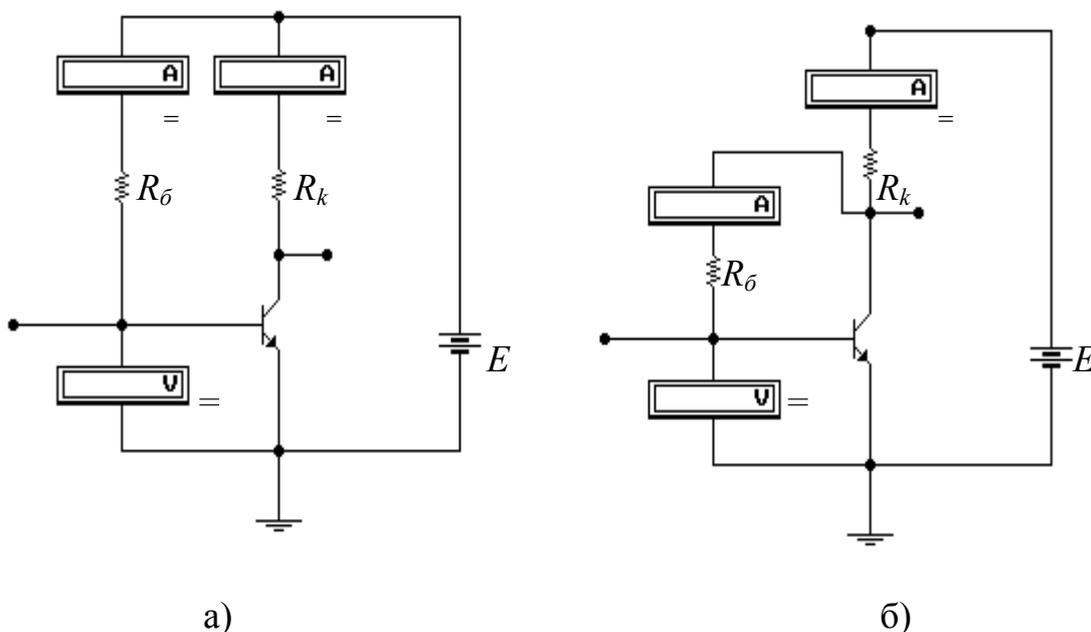


Рис. 1.3. Схема питания фиксированным током базы (а) и схема коллекторной стабилизации (б)

Поставьте в цепь эмиттера сопротивление (0,5-1 кОм) (рис. 1.4) и, задавшись током делителя, равным десятикратному току базы, обеспечьте тот же самый режим работы в схеме эмиттерной стабилизации. При этом не забудьте увеличить напряжение питания на величину, соответствующую падению напряжения на сопротивлении в цепи эмиттера.

Можно задаться некоторым падением напряжения на сопротивлении в цепи эмиттера и рассчитать это сопротивление.

$$R_3 = U_3 / (I_{к0} + I_{б0}), \quad R_{б1} = \frac{E - (U_3 + U_{б0})}{I_{дел} + I_{б0}}, \quad R_{б2} = \frac{(U_3 + U_{б0})}{I_{дел}}.$$

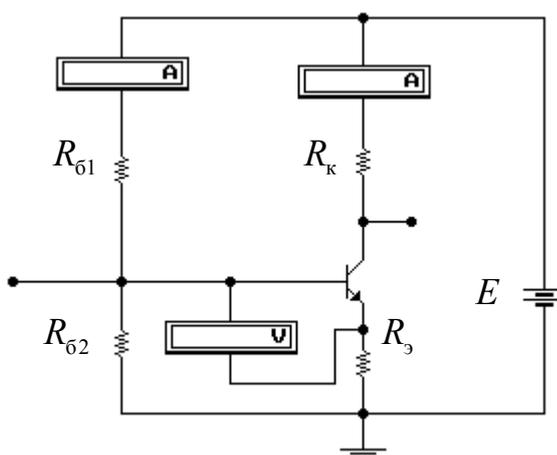


Рис. 1.4. Схема эмиттерной стабилизации

Все схемы записывайте в файл на диск, результаты измерений фиксируйте в тетради. Сделайте выводы по результатам проделанной работы.

Содержание отчета

- Цель проводимого исследования.
- Методика проведения экспериментов и структурные схемы измерений.
- Принципиальные электрические схемы каскада на выбранном биполярном транзисторе с указанием приборов и мест их подключения при проведении эксперимента (может быть использована распечатка схемы, которую следует снабдить комментариями).
- Таблицы с результатами измерений.
- Графики измеренных зависимостей.
- Выводы, замечания и комментарии по выполненной работе.

Вопросы для самоконтроля в процессе подготовки

(если перед началом эксперимента ясны ответы не на все вопросы, попробуйте найти их в процессе проведения лабораторной работы)

1. Что называется входной характеристикой биполярного транзистора?

2. Как зависит входная проводимость (входное сопротивление) биполярного транзистора от режима его работы, который характеризуется, например, постоянной составляющей тока коллектора?

3. В какой из схем (питание фиксированным током базы или коллекторной стабилизации) сопротивление в цепи базы будет больше, если напряжение источника питания и режим транзистора одинаковы?

4. Каково назначение делителя в цепи базы биполярного транзистора, и какие соображения принимаются во внимание при выборе его элементов?

5. Каким следует выбрать напряжение питания в схеме питания фиксированным током базы, если ток коллектора в точке покоя равен 5 мА, напряжение на коллекторе 4 В и сопротивление в цепи коллектора 1 кОм? Как изменится напряжение питания, если добавить в цепь эмиттера сопротивление, на котором будет падать напряжение 3 В?

6. Как изменится напряжение на коллекторе по отношению к эмиттеру, если при неизменном напряжении питания в схеме с питанием фиксированным током базы сопротивление в цепи коллектора увеличить вдвое?

Лабораторная работа № 2

Исследование каскада на биполярном транзисторе на переменном токе (средние и нижние частоты)

Цель работы: исследование влияния изменения параметров реостатного каскада на биполярном транзисторе на его коэффициент усиления, частотные и фазовые характеристики в области нижних частот.

Исследование каскада на биполярном транзисторе на переменном токе включает измерение коэффициента усиления, исследование частотной и фазовой характеристик и определение по ним нижней граничной частоты на заданном уровне. Дополнительный эксперимент включает исследование искажений прямоугольных импульсов и установление связи между этими искажениями и формой частотной характеристики.

Порядок выполнения работы

1. Продолжите изучение описания математического обеспечения Electronics Workbench. Научитесь работать с генератором сигналов, осциллографом и испытателем частотных характеристик (плоттером Боде).

2. Вызовите схему, которая исследовалась в лабораторной работе № 1 (рис.1.3а), и измерьте ток покоя коллектора. Подключите ко входу генератор переменного напряжения и посмотрите, как изменится ток покоя коллектора. Убедитесь, что после подключения разделительной емкости между генератором переменного напряжения и входом каскада ток покоя коллектора вернется к исходному значению.

Объясните полученный результат.

3. Подключите к коллектору сопротивление нагрузки и посмотрите, как изменится ток покоя коллектора. Убедитесь, что после подключения разделительной емкости между коллектором и нагрузкой ток покоя коллектора вернется к исходному значению.

Объясните полученный результат. Рассчитайте, каким должно быть изменение тока и сравните с измеренным.

4. Измерьте входное сопротивление транзистора на переменном токе в выбранном режиме (изобразите блок-схему измерения). *Значение входного сопротивления в выбранной рабочей точке можно также взять из материалов лабораторной работы № 1.*

Возможный вариант схемы для первоначального исследования изображен на рис. 2.1.

При выполнении измерений подключите последовательно с выходом генератора сопротивление, имитирующее его внутреннее сопротивление (допустим, 100 Ом).

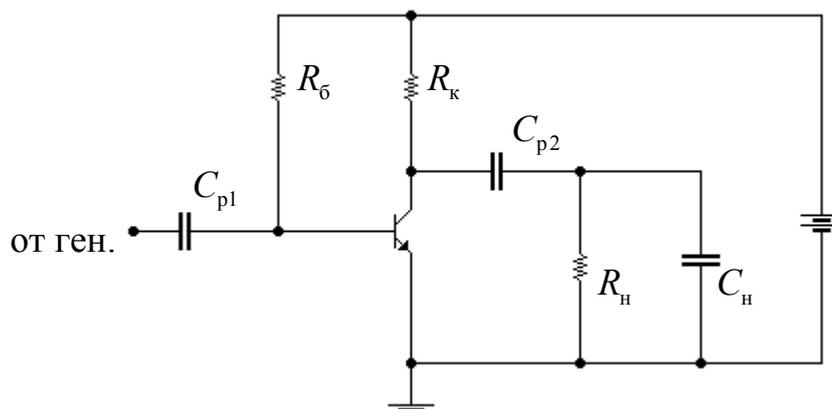


Рис. 2.1. Усилитель на сопротивлениях на биполярном транзисторе

5. Выберите $R_k = R_n = 1$ кОм и R_b таким образом, чтобы обеспечить необходимый режим транзистора так, как это делалось при выполнении лабораторной работы № 1. Обеспечьте ток покоя транзистора ($5 \div 10$) мА (для контроля тока покоя в цепь коллектора необходимо включить амперметр). Емкость нагрузки C_n выберите равной 10-20 пФ (при выполнении настоящей лабораторной работы можно C_n и не подключать, поскольку она оказывает влияние на верхних частотах, а исследование относится к области нижних частот).

Емкость разделительных конденсаторов $C_{p1} = C_{p2} = 10$ мкФ. Выберите частоту генератора равной 1-5 кГц и напряжение генератора 2-5 мВ.

Можно предварительно рассчитать ориентировочное значение частоты генератора с учетом выбранного значения емкости разделительных конденсаторов:

$$F_{ген} = 1/2\pi C_{p2}(R_k + R_n).$$

Частоту следует выбрать в (20-50) раз больше рассчитанной.

Подключите осциллограф к входу и выходу и убедитесь в противофазности входного и выходного напряжений. Подключите плоттер и измерьте модуль коэффициента передачи (в децибелах и относительных единицах (линейный режим)) и фазовый сдвиг на частоте генератора.

Уменьшите емкость одного из разделительных конденсаторов (можно и двух сразу) в 100-500 раз и убедитесь с помощью осциллографа, что между входным и выходным напряжениями появился фазовый сдвиг, отличный от первоначального, равного -180° . Обратите внимание, каков (на ваш взгляд) этот фазовый сдвиг – положительный или отрицательный. Проверьте себя с помощью плоттера – для этого измерьте фазовый сдвиг на частоте сигнала генератора и сравните его с первоначальным.

Обратите внимание на изменение амплитуды выходного напряжения и дайте ему объяснение.

6. Рассчитайте, какой должна быть нижняя граничная частота на уровне 0,7 (-3 дБ), если искажения создает разделительная емкость C_{p2} (емкость разделительного конденсатора C_{p1} сделайте равной 10 Ф):

$$f_H = \frac{1}{2\pi \cdot C_{p2} (R_k + R_H)}. \quad (2.1)$$

Измерьте нижнюю граничную частоту и фазовый сдвиг на этой частоте и сравните с результатом вычислений.

7. Повторите эксперимент по пункту 6 для емкости C_{p1} , сделав C_{p2} равной 10 Ф и C_{p1} 10 мкФ и рассчитав нижнюю граничную частоту с учетом влияния C_{p1} :

$$f_H = \frac{1}{2\pi \cdot C_{p1} (R_{ген} + R_{\sigma} \parallel R_{вх})}, \quad (2.2)$$

где $R_{ген}$ – внутреннее сопротивление источника сигнала и $R_{вх}$ – входное сопротивление транзистора переменному току в рабочей точке.

8. Верните значения разделительных емкостей к исходным значениям $C_{p1} = C_{p2} = 10$ мкФ, вновь измерьте с помощью плоттера нижнюю граничную частоту и фазовый сдвиг на этой частоте и сравните с результатами измерений по пунктам 6 и 7.

7. Установите $C_{p1} = 1$ Ф (чтобы исключить ее влияние на АЧХ) и $C_{p2} = 10$ мкФ. Для нескольких значений R_k и R_H измерьте коэффициент усиления, нижнюю граничную частоту на уровне 0,7 (-3 дБ) и фазовый сдвиг на этой частоте. При этом рассмотрите варианты: $R_k > R_H$ и $R_k \gg R_H$, R_k соизмеримо с R_H , $R_k < R_H$ и $R_k \ll R_H$. Результаты измерений занесите в таблицы 2.1 и 2.2.

При изменении сопротивления в цепи коллектора следует выполнять пересчет элементов, обеспечивающих режим работы транзистора:

$$E = U_{к0} + R_k I_{к0},$$

где $U_{к0}$ - напряжение на коллекторе по отношению к эмиттеру в выбранной рабочей точке, $I_{к0}$ - ток коллектора в рабочей точке.

$$R_{\sigma} = \frac{E - U_{\delta0}}{I_{\delta0}},$$

где $U_{\delta0}$ - напряжение на базе по отношению к эмиттеру в выбранной рабочей точке, $I_{\delta0}$ - ток базы в рабочей точке.

Коэффициент усиления можно вычислять как отношение $U_{\text{вых}}$ к $U_{\text{вх}}$. Для измерения этих величин следует включить вольтметры, либо произвести измерение с помощью плоттера.

При использовании для измерений вольтметров не следует забывать, что они производят измерения на частоте генератора.

Выполняя эксперимент, обратите внимание на то, что фазовые сдвиги, измеренные на граничных частотах, остаются неизменными. Объясните полученный результат. В последующих экспериментах фазовые сдвиги можно не измерять и при необходимости лишь контролировать.

Таблица 2.1. Влияние изменения сопротивления нагрузки

Условия: $e_{\text{ген}} = \dots, U_{\text{вх}} = \dots, C_{p1} = \dots, C_{p2} = \dots, R_{\text{к}} = \dots, C_{\text{н}} = \dots, R_{\text{ген}} = \dots$ и т.д.

$R_{\text{н}}$	$10 R_{\text{к}}$	$5 R_{\text{к}}$	$2 R_{\text{к}}$	$R_{\text{н}}$	$0,5 R_{\text{к}}$	$0,2 R_{\text{к}}$	$0,1 R_{\text{к}}$
$U_{\text{вых}}, \text{ мВ}$							
K_0							
$f_{\text{н}}$							
$\varphi_{\text{н}}$							

Таблица 2.2. Влияние изменения сопротивления в цепи коллектора

Условия эксперимента: $e_{\text{ген}} = \dots, U_{\text{вх}} = \dots, R_{\text{н}} = \dots, C_{p1} = \dots, C_{p2} = \dots, C_{\text{н}} = \dots, R_{\text{ген}} = \dots$ и так далее.

$R_{\text{к}}$	$10 R_{\text{н}}$	$5 R_{\text{н}}$	$2 R_{\text{н}}$	$R_{\text{н}}$	$0,5 R_{\text{н}}$	$0,2 R_{\text{н}}$	$0,1 R_{\text{н}}$
$U_{\text{вых}}, \text{ мВ}$							
K_0							
$f_{\text{н}}$							
$\varphi_{\text{н}}$							
$E, \text{ В}$							
$R_{\text{с}}, \text{ кОм}$							

Постройте зависимость коэффициента усиления и $f_{\text{н}}$ от сопротивления нагрузки (или от $R_{\text{к}}$ - вы убедитесь, что эти зависимости аналогичны).

8. Исследуйте влияние изменения емкости разделительных конденсаторов на входе и на выходе на полосу пропускания каскада. В каждом эксперименте изменяется только одна из разделительных емкостей, вторая при этом остается неизменной (при выполнении этого эксперимента целесообразно подключить плоттер к выходу источника сигнала и к нагрузке – при исследовании влияния C_{p1} выбрать C_{p2}

большой, чтобы исключить ее влияние на полосу пропускания, при исследовании влияния C_{p2} большой выбирается C_{p1}).

Таблица 2.3

Условия эксперимента: $E=...$, $R_n=...$, $R_k=...$, $C_{p2}=1 \text{ Ф}$, $C_n=...$, $R_{ген}=...$ и так далее.

C_{p1}	20 мкФ	10 мкФ	5 мкФ	1 мкФ	0,5мкФ	0,1 мкФ
f_n						
φ_n						

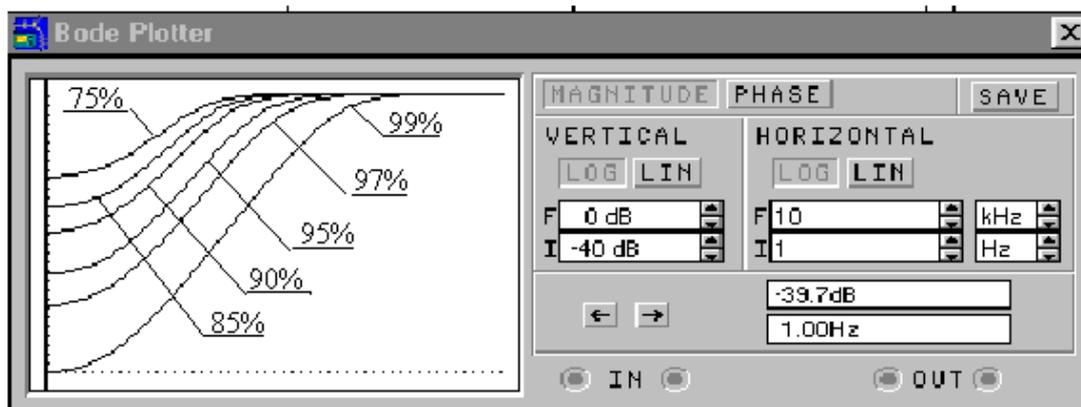
Таблица 2.4

Условия эксперимента: $E=...$, $R_n=...$, $R_k=...$, $C_{p1}=1 \text{ Ф}$, $C_n=...$, $R_{ген}=...$ и так далее.

C_{p2}	20 мкФ	10 мкФ	5 мкФ	1 мкФ	0,5мкФ	0,1 мкФ
f_n						
φ_n						

Постройте графики зависимости f_n от C_{p2} , объясните, почему C_{p1} и C_{p2} количественно различно влияют на f_n . Чем объяснить отсутствие заметных изменений фазового сдвига?

Для большей наглядности совместите несколько частотных и, отдельно, фазовых характеристик.



9. Соберите схему каскада с эмиттерной стабилизацией (схема рис. 1.4 в лабораторной работе № 1, она же показана на рис. 2.2).

Рассчитайте значение емкости, шунтирующей R_3 :

$$C_3 \geq \frac{\sqrt{(1 + S_0 R_3) \left(\frac{K_0}{K}\right)^2 - 1}}{2\pi f_n \sqrt{\left(\frac{K_0}{K}\right)^2 - 1}} \approx \frac{S_0}{2\pi f_n}. \quad (2.3)$$

Применив рассчитанное значение C_3 , измерьте нижнюю граничную частоту и фазовый сдвиг на уровне 0,7 (-3 дБ) (при этом емкости разделительных конденсаторов выберите равными 1 Ф, чтобы исключить их влияние на результирующие характеристики).

Исследуйте зависимость нижней граничной частоты каскада от изменений C_3 .

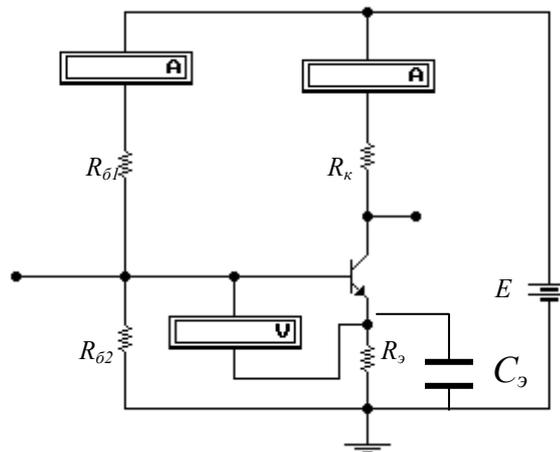


Рис. 2.2

Обратите внимание на форму фазовой характеристики и сравните ее с той, которая создается разделительными емкостями.

10. Верните для C_3 значение, рассчитанное по формуле (2.3), измерьте фазовый сдвиг на f_n . Установите емкость разделительных конденсаторов по 10 мкФ и измерьте суммарный фазовый сдвиг, создаваемый тремя цепями на f_n . При этом вы сможете убедиться, что фазовые сдвиги, создаваемые емкостями, суммируются.

11. (факультатив) Переведите генератор в режим генерации прямоугольных импульсов и повторите исследования по пунктам 6-9 настоящей работы. При работе с прямоугольными импульсами не предполагается точное измерение локальных параметров (спада плоской вершины импульса), достаточно качественно оценить характер влияния изменения элементов схемы на эти параметры и сопоставить результаты наблюдений с результатами измерений в пунктах 6-9.

Все схемы записывайте в файл на диск, результаты измерений фиксируйте в тетради. Сделайте выводы по результатам проделанной работы.

Содержание отчета

- Цель проводимого исследования.
- Методика проведения экспериментов и структурные схемы измерений.
- Принципиальная электрическая схема каскада на выбранном биполярном транзисторе с указанием приборов и мест их подключения (может быть использована распечатка схемы, которую следует снабдить комментариями).
- Таблицы с результатами измерений и результатами вычислений на основании проведенных измерений.
- Графики исследуемых зависимостей.
- Выводы, замечания и комментарии по выполненной работе.

Дополнительный материал

Для лучшего понимания изучаемого материала целесообразно выполнить дополнительный эксперимент с целью измерения токов в исследуемых цепях (рис. 2.3).

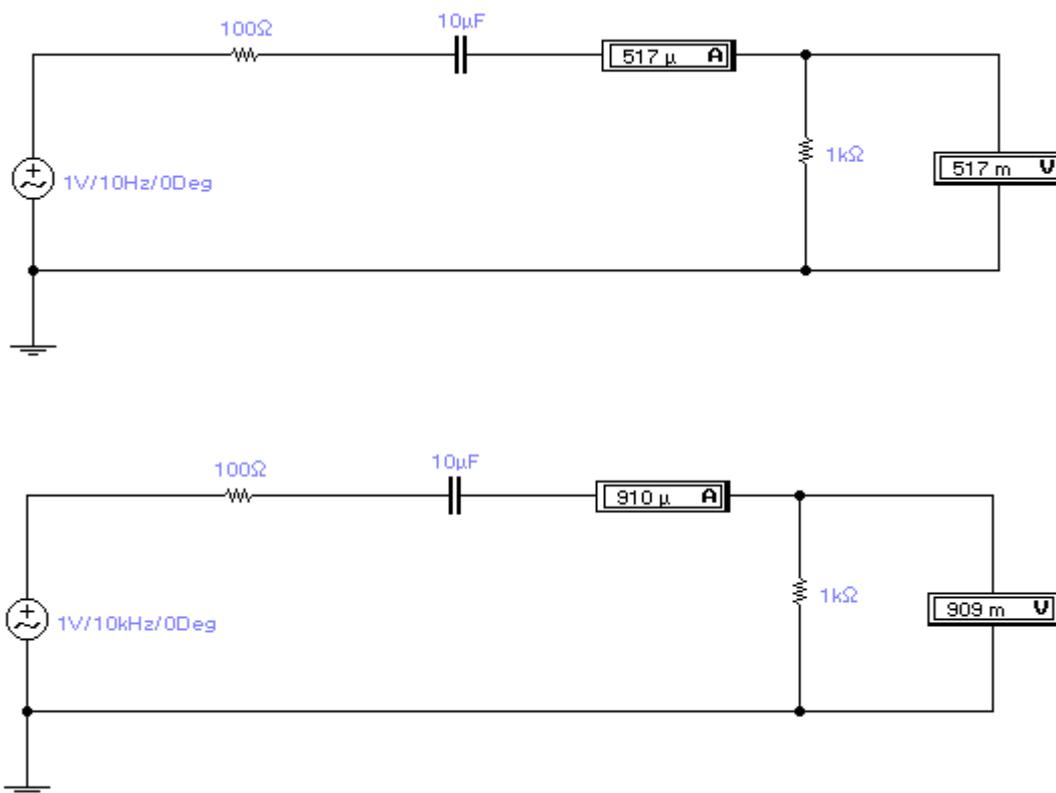


Рис. 2.3

Для двух-трех частот измерьте переменный ток через нагрузку и переменное напряжение на ней.

Вы увидите, что изменение тока свидетельствует об изменении сопротивления цепи, нагружающей генератор, следствием чего и является изменение напряжения на нагрузке при изменении частоты - рис. 2.4 (амперметр и вольтметр выполняют измерения на частоте генератора).

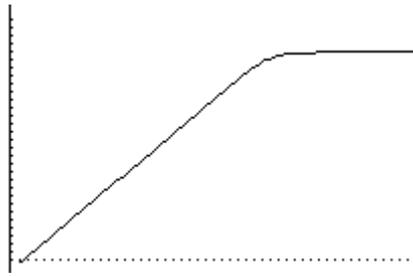


Рис. 2.4 Зависимость напряжения на нагрузке от частоты

Если при неизменной частоте генератора изменить емкость разделительного конденсатора (допустим, уменьшить), сопротивление емкости возрастет, ток через нагрузку станет меньше, следствием чего также будет изменение напряжения (рис. 2.5 а), что будет справедливо и на других частотах (рис. 2.5 б) и приведет к изменению полосы пропускания.

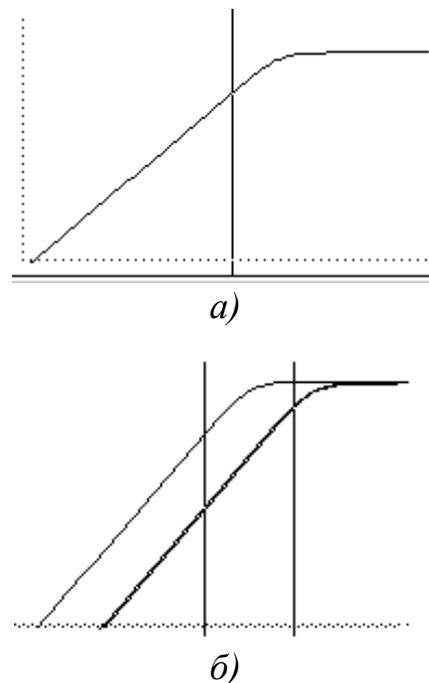


Рис. 2.5 Зависимость напряжения на нагрузке от частоты

Вопросы для самоконтроля в процессе подготовки

1. Каковы физические причины появления линейных искажений в каскаде на биполярном транзисторе?
2. Изобразите эквивалентную схему каскада, изображенного на рис. 2.1, для средних и нижних частот.
3. Как рассчитать искажения, создаваемые разделительной емкостью на входе?
4. Как рассчитать искажения, создаваемые разделительной емкостью на выходе?

5. Какая из разделительных емкостей создает большие линейные искажения (стоящая на входе или на выходе), если внутреннее сопротивление источника сигнала 100 Ом, входное сопротивление каскада 1 кОм, сопротивление в цепи коллектора 1 кОм и нагрузка чисто емкостная – емкость нагрузки 100 пФ?

6. Как изменяется сквозной коэффициент усиления каскада на биполярном транзисторе при изменении внутреннего сопротивления источника сигнала?

7. Как связаны между собой модуль коэффициента передачи на некоторой частоте и фазовый сдвиг на этой же частоте?

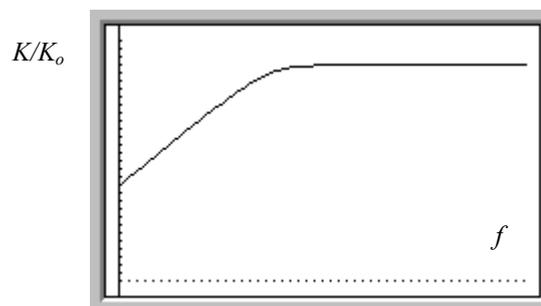
8. Каковы физические причины появления линейных искажений за счет емкости, шунтирующей сопротивление в цепи эмиттера?

9. Как изменяется нижняя граничная частота каскада при изменении емкостей разделительных конденсаторов и емкости конденсатора, шунтирующего сопротивление в цепи эмиттера?

10. Какие искажения прямоугольного импульса возникают за счет разделительных емкостей? Поясните механизм возникновения этих искажений.

11. Какие искажения прямоугольного импульса возникают за счет емкости, шунтирующей сопротивление в цепи эмиттера (рис. 2.2)? Поясните механизм возникновения этих искажений.

12. Изобразите форму искаженного прямоугольного импульса, прошедшего через усилитель, имеющий приведенную ниже частотную характеристику:



Лабораторная работа № 3

Исследование каскада на биполярном транзисторе на переменном токе - верхние частоты

Цель работы: исследовать влияние изменения параметров реостатного каскада на биполярном (полевом) транзисторе на его характеристики.

Исследование каскада на биполярном (полевом) транзисторе на переменном токе включает измерение коэффициента усиления, исследование частотной и фазовой характеристик и определение по ним верхней граничной частоты на заданном уровне.

Исследования могут быть выполнены как для каскада на полевом транзисторе, так и для каскада на биполярном. Ниже дан вариант исследования для биполярного транзистора. Заменяв транзистор на полевой и обеспечив режим его работы, можно точно так же исследовать влияние емкости и сопротивления нагрузки на характеристики каскада.

Порядок выполнения работы

1. Вызовите схему, которая исследовалась в лабораторной работе № 1, подключите генератор сигналов (используйте разделительный конденсатор, чтобы не изменить режим работы транзистора при подключении генератора). Возможный вариант схемы для первоначального исследования тот же, что и в работе № 2 – см. рис. 3.1.

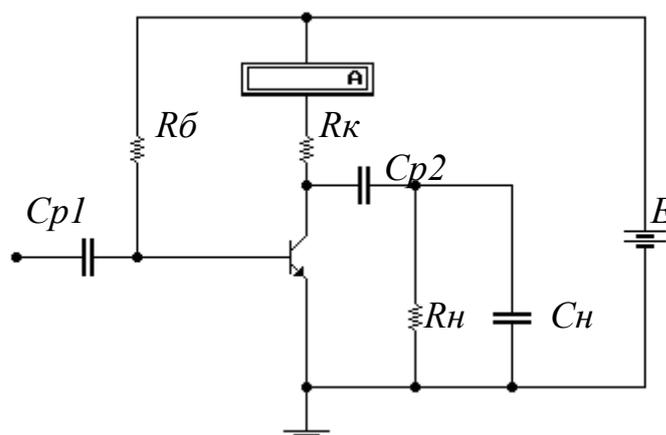


Рис. 3.1. Усилитель на сопротивлениях на биполярном транзисторе

При дальнейших измерениях, когда это будет необходимо и целесообразно, подключите последовательно с выходом генератора сопротивление 100 Ом, имитирующее его выходное сопротивление.

2. Выберите $R_k = R_n = 1$ кОм и R_0 таким образом, чтобы обеспечить необходимый режим транзистора (обеспечьте ток покоя транзистора $(5 \div 10)$ мА - для контроля тока покоя включите амперметр в цепь коллектора). Измерьте входное сопротивление транзистора на переменном токе в выбранном режиме. *Значение входного сопротивления в выбранной рабочей точке можно также взять из материалов лабораторной работы № 1.*

C_n выберите равной 10-20 пФ, емкость разделительных конденсаторов $C_{p1} = C_{p2} = 20$ мкФ.

С помощью плоттера определите частоту, на которой модуль коэффициента передачи начинает уменьшаться. Установите частоту генератора в 2-4 раз меньше определенной выше и напряжение генератора 2-5 мВ. С помощью осциллографа убедитесь, что входное и выходное напряжения противофазны. Измерьте с помощью плоттера фазовый сдвиг выходного напряжения по отношению к входному на частоте сигнала генератора.

3. Увеличьте C_n в 50-100 раз и убедитесь с помощью осциллографа, что между входным и выходным напряжениями появился фазовый сдвиг, отличный от первоначального. Обратите внимание, каков, на ваш взгляд, этот фазовый сдвиг – положительный или отрицательный. Проверьте себя с помощью плоттера – для этого измерьте фазовый сдвиг на частоте сигнала генератора и сравните его с первоначальным.

4. Для различных значений R_k и R_n измерьте коэффициент усиления, верхнюю граничную частоту на уровне 0,7 (-3 дБ) и фазовый сдвиг на этой частоте. Рассмотрите варианты: $R_k > R_n$ и $R_k \gg R_n$, R_k соизмеримо с R_n , $R_k < R_n$ и $R_k \ll R_n$.

Вначале проделайте эксперимент для фиксированного значения R_k и изменяющегося R_n . Результаты измерений занесите в таблицу 3.1.

Таблица 3.1. Влияние изменения сопротивления нагрузки

Условия: $e_{ген} = \dots$, $U_{вх} = \dots$, $R_k = \dots$, $C_{p1} = C_{p2} = \dots$, $C_n = \dots$, $R_{ген} = \dots$ и т.д.

R_n	$10 R_k$	$5 R_k$	$2 R_k$	R_k	$0,5 R_k$	$0,2 R_k$	$0,1 R_k$
$U_{вых}$, мВ							
K_0							
f_B							
$\Pi = K_0 * f_B$							
φ_B							

Постройте график зависимости коэффициента усиления и f_B от R_H (если $K_0=f(R_H)$ уже был построен при выполнении работы №2, повторно его можно не строить).

Повторите измерения еще для двух значений R_K . Убедитесь, что R_H и R_K одинаково влияют на параметры каскада.

Таблица 3.2. Влияние изменения сопротивления в цепи коллектора
Условия: $e_{ген} = \dots$, $U_{вх} = \dots$, $R_H = \dots$, $C_{p1} = C_{p2} = \dots$, $C_H = \dots$, $R_{ген} = \dots$ и так далее.

R_K	$U_{вых}$, мВ	K_0	f_B	$\Pi = K_0 * f_B$	φ_B	$E, В$	$R_б$, кОм
$R_K = 5 R_H$							
$R_K = R_H$							
$R_K = 0,2 R_H$							

При изменении сопротивления в цепи коллектора следует пересчитать элементы, обеспечивающие режим работы транзистора:

$$E = U_{к0} + R_K I_{к0},$$

где $U_{к0}$ - напряжение на коллекторе по отношению к эмиттеру в выбранной рабочей точке, $I_{к0}$ - ток коллектора в рабочей точке;

$$R_б = \frac{E - U_{б0}}{I_{б0}},$$

где $U_{б0}$ - напряжение на базе по отношению к эмиттеру в выбранной рабочей точке, $I_{б0}$ - ток базы в рабочей точке.

Коэффициент усиления можно вычислять как отношение $U_{вых}$ к $U_{вх}$, для измерения которых в этом случае следует включить вольтметры, либо определять их с помощью плоттера.

Выполняя эксперимент, обратите внимание на то, что фазовые сдвиги, измеренные на граничных частотах, остаются неизменными. Объясните полученный результат.

5. Исследуйте влияние изменения $R_{ген}$ на сквозной коэффициент усиления. Для этого при $R_K = 1$ кОм измерьте $K_{скв} = U_{вых} / e_{ген}$ при нескольких значениях $R_{ген}$ (допустим, $R_{ген} = 100$ Ом, 200 Ом, 500 Ом и 1 кОм). Постройте зависимость $K_{скв}$ от $R_{ген}$.

Таблица 3.3. Влияние $R_{ген}$ на сквозной коэффициент усиления

Условия: $e_{ген} = \dots$, $R_i = \dots$, $R_k = \dots$, $C_{p1} = C_{p2} = \dots$, $C_n = \dots$, \dots и так далее.

$R_{ген}$								
$U_{вых}$, мВ								
$K_{скв}$								

6. Исследуйте влияние изменения емкости нагрузки на полосу пропускания каскада. При этом измеряйте коэффициент усиления, верхнюю граничную частоту на уровне 0,7 (-3 дБ) и вычисляйте площадь усиления.

Таблица 3.4. Влияние изменения емкости нагрузки

Условия: $e_{ген} = \dots$, $U_{вх} = \dots$, $R_k = \dots$, $R_n = \dots$, $C_{p1} = C_{p2} = \dots$, \dots , $R_{ген} = \dots$ и так далее.

C_n								
$U_{вых}$, мВ								
f_B								
$\Pi = K_0 * f_B$								
φ_B								

Постройте зависимость f_B и площади усиления от C_n .

7. Включите последовательно два одинаковых каскада. Изменяйте сопротивление нагрузки второго каскада, а коэффициент усиления и верхнюю граничную частоту измеряйте на выходе первого. Одновременно измеряйте коэффициент усиления второго каскада. Выбирайте R_n второго каскада меньшим, равным и большим R_k . Результаты занесите в табл. 3.5.

Таблица 3.5. Влияние сопротивления нагрузки второго каскада

Условия эксперимента: $U_{вх} = \dots$, $R_{k1} = \dots$, $C_{p1} = C_{p2} = \dots$, $R_{k2} = \dots$ и т.д.

R_{n2}	$10 R_{k2}$	$5 R_{k2}$	$2 R_{k2}$	R_{k2}	$0,5 R_{k2}$	$0,2 R_{k2}$	$0,1 R_{k2}$
$U_{вых1}$, мВ							
$U_{вых2}$, мВ							
K_{01}							
f_B							
K_{02}							

8. Напишите отчет о проделанной работе. Отчет должен содержать

- Титульный лист
- Цель работы
- Принципиальные схемы исследуемых звеньев
- Таблицы с результатами измерений

- Графики исследуемых зависимостей
- Выводы по проделанной работе. Структура каждого вывода: *наблюдается то-то и то-то; это происходит потому, что*

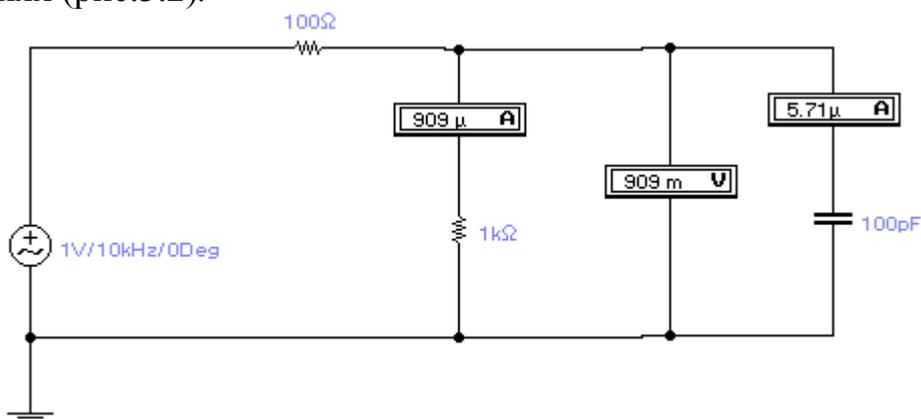
Вопросы для самоконтроля в процессе подготовки

(если перед началом эксперимента ясны ответы не на все вопросы, попробуйте найти их в процессе проведения лабораторной работы)

1. Каковы физические причины появления линейных искажений в каскаде на биполярном (полевом) транзисторе?
2. Как изменятся искажения на верхних частотах, если при неизменных остальных параметрах увеличить сопротивление нагрузки?
3. Каким образом и почему изменяются линейные искажения каскада на биполярном (полевом) транзисторе, если меняется сопротивление нагрузки следующего за ним каскада?
4. Как изменится коэффициент усиления каскада на биполярном (полевом) транзисторе, если меняется сопротивление нагрузки следующего за ним каскада?
5. Как изменяется коэффициент усиления и сквозной коэффициент усиления каскада на биполярном транзисторе при изменении внутреннего сопротивления источника сигнала?
6. Как связаны между собой модуль коэффициента передачи на некоторой частоте и фазовый сдвиг на этой же частоте?
7. Чем определяются входная и выходная динамическая емкости биполярного (полевого) транзистора? Каково физическое содержание каждой из них?
8. Как изменяется фазовый сдвиг на верхней граничной частоте, измеренной на уровне -3 дБ, при изменении емкости нагрузки.

Дополнительный материал

Для лучшего понимания изучаемого материала целесообразно выполнить дополнительный эксперимент с целью измерения токов в исследуемых цепях (рис.3.2).



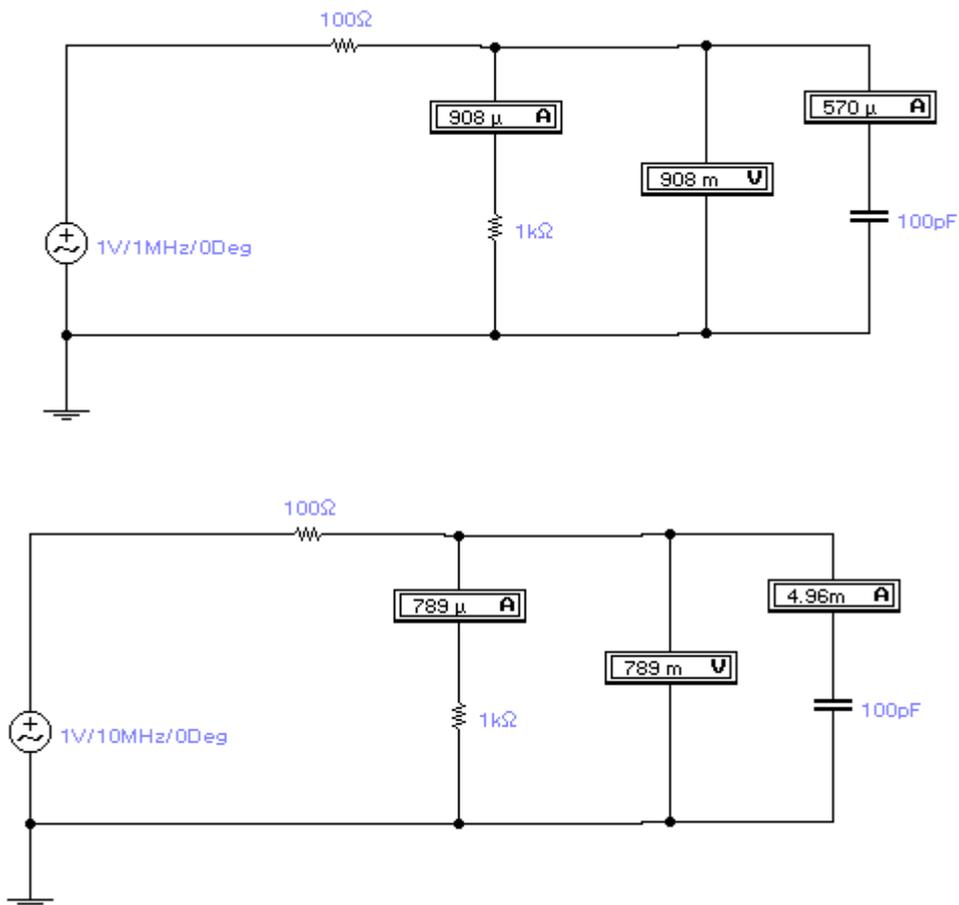
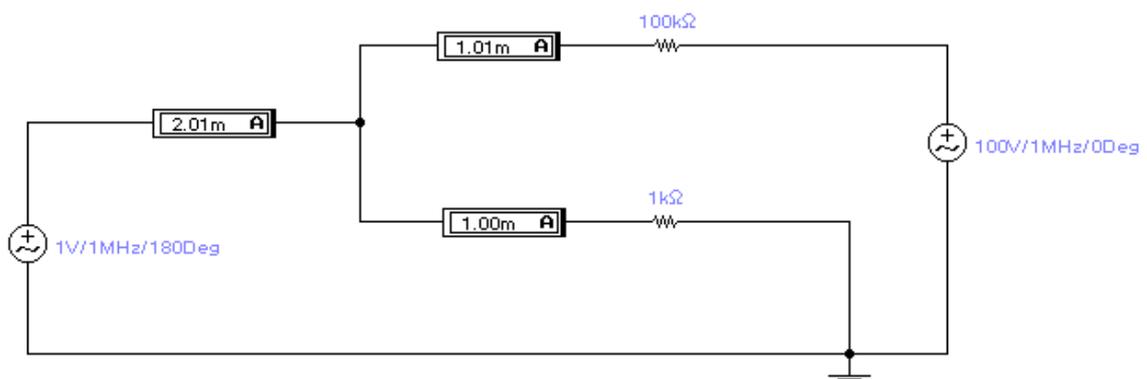
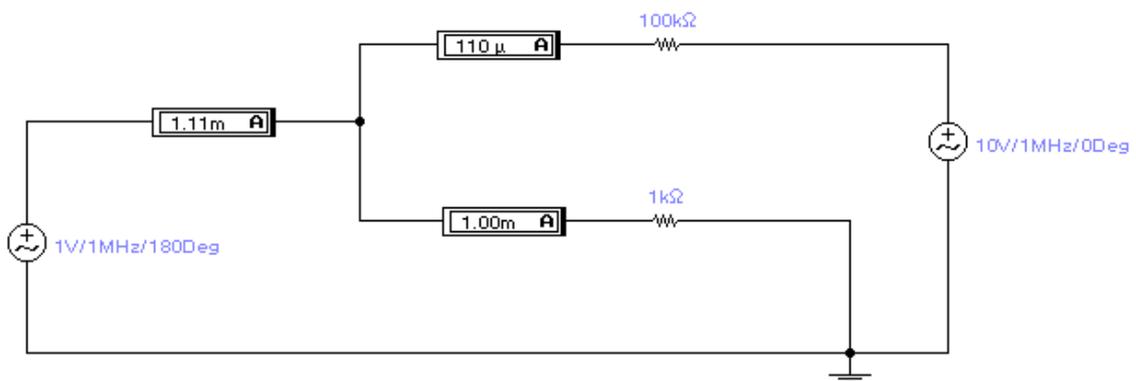
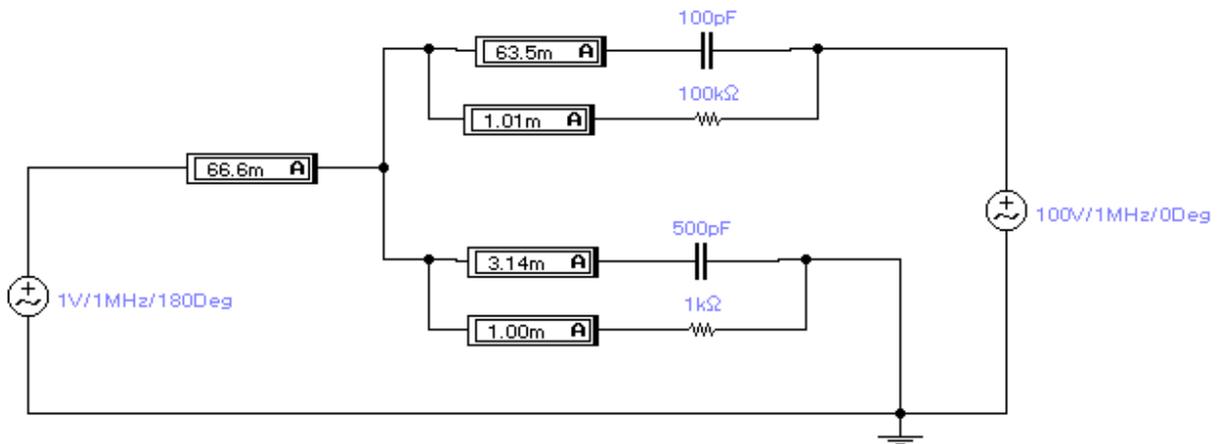
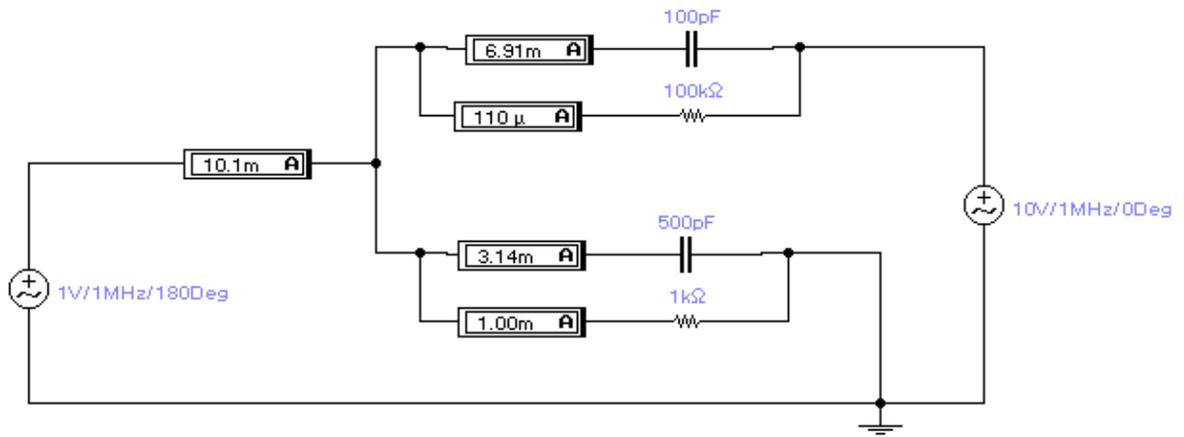
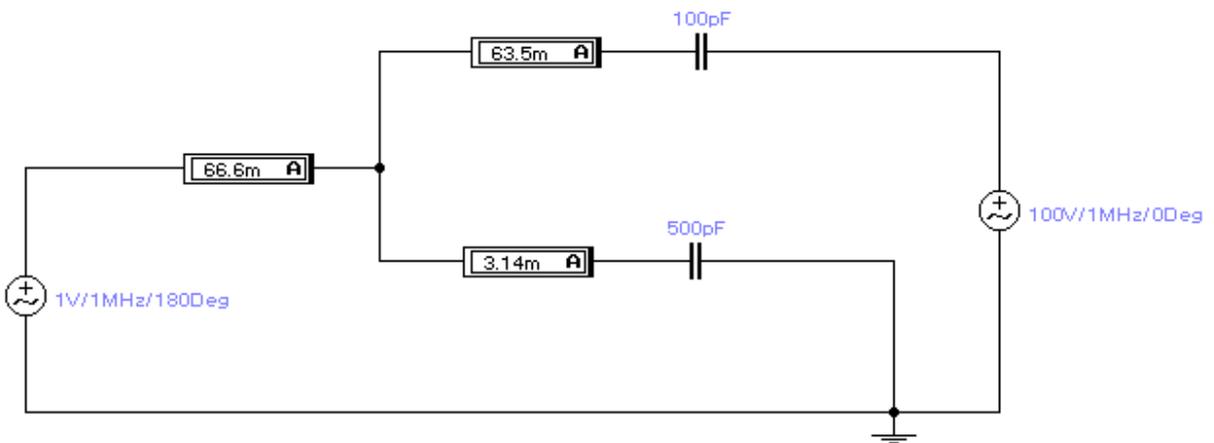
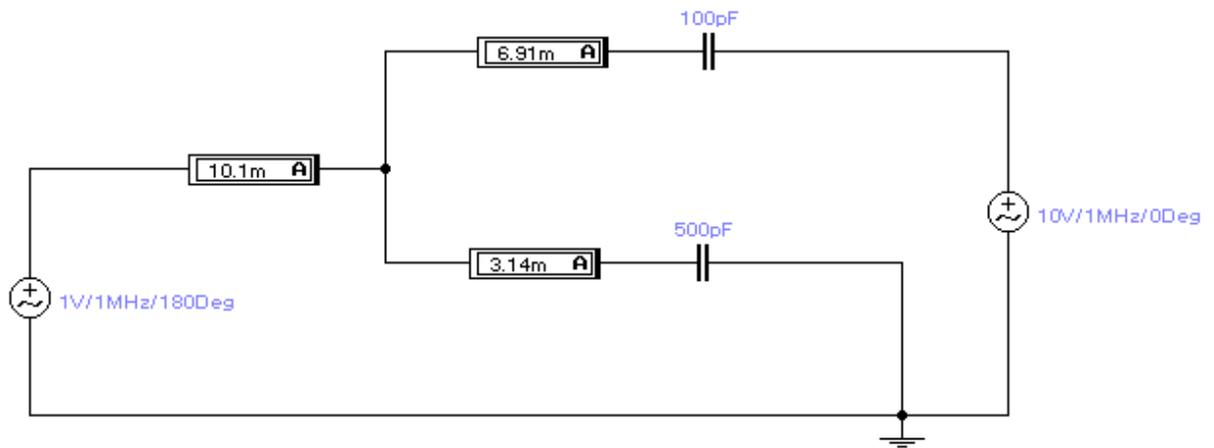


Рис.3.2

Для двух-трех частот измерьте переменный ток через нагрузку и переменное напряжение на ней. Вы увидите, что происходит изменение перераспределения токов между сопротивлением и емкостью нагрузки, следствием чего и является изменение напряжения на нагрузке при изменении частоты (не забывайте, что *амперметр и вольтметр выполняют измерения на частоте генератора*).

Схемы на рис.3.3 эквивалентно описывают параллельно включенные эмиттер-базовый (1 кОм, 500 пФ) и коллектор-базовый (100 кОм, 100 пФ) переходы. Изменение напряжения генератора справа иллюстрирует изменение напряжения на выходе (допустим, за счет изменения сопротивления нагрузки). Отдельно показанные активные и реактивные эквиваленты переходов демонстрируют значительно большее изменение тока через «емкость коллектор-база» по сравнению с изменением тока через активное сопротивление этого перехода, что иллюстрирует изменение входной динамической емкости при значительно меньшем изменении активной составляющей входного сопротивления.





Puc.3.3

Лабораторная работа № 4

Исследование пассивных схем плавной регулировки усиления

Цель работы: сравнительное исследование регулировочных характеристик и частотных свойств различных способов регулировки усиления с помощью пассивных цепей.

Порядок выполнения работы

1. Соберите схемы пассивной регулировки усиления (рис. 4.1). Выберите величину регулировочного сопротивления $R_{\text{рег}}$ таким образом, чтобы в худшем случае верхняя граничная частота на уровне 0,7 для каждой из схем составляла не менее заданной преподавателем (или выбранной студентом) величины (внутреннее сопротивление источника сигнала $R_{\text{ген}}$ примите равным 50-100 Ом, сопротивление нагрузки $R_{\text{вх}} = 5$ кОм (входное сопротивление усилителя, на входе которого стоит регулятор усиления) и емкость нагрузки $C_{\text{вх}} = 100$ пФ (расчетные формулы даны в приложении в конце описания данной работы).

Значение регулировочного сопротивления для схемы 4.1а можно также вычислить по приближенной формуле, приняв $R_{\text{ген}}$ равным нулю, а $R_{\text{вх}}$ равным бесконечности:

$$R_{\text{рег}} \approx \frac{1}{2\pi f_{\text{в}} C_{\text{вх}}} \quad (4.1)$$

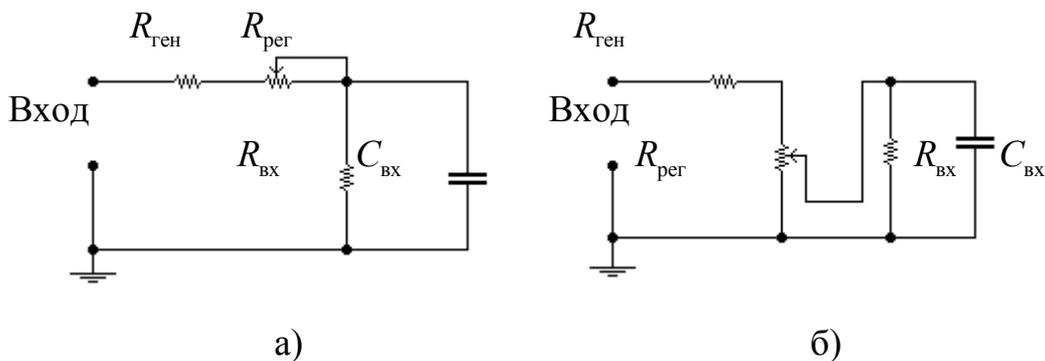


Рис. 4.1. Схемы пассивной регулировки усиления

Значение регулировочного сопротивления для схемы 4.1б можно вычислить по формулам, данным даны в приложении в конце описания данной работы, либо взять тем же, что было использовано в схеме 4.а. В последнем случае появится возможность сравнить две схемы регулировки усиления при одинаковых значениях регулировочных сопротивлений, тогда как в первом случае сравнение схем выполняется при одинаковой (худшей) полосе пропускания.

2. Для каждой из схем изменяйте значение регулировочного сопротивления от 0 до максимального значения и постройте

регулирующую характеристику (зависимость модуля коэффициента передачи на средних частотах от величины регулирующего сопротивления). Под регулирующим сопротивлением в схеме а) понимается незамкнутая часть $R_{\text{рег}}$, в схеме б) – сопротивление между точкой подключения движка и общим проводом (нижняя часть сопротивления $R_{\text{рег}}$ на схеме рис. 4.1,б).

Во всех точках измерьте верхнюю граничную частоту на уровне 0,7 и сопоставьте регулировочные характеристики (зависимость модуля коэффициента передачи цепи от величины регулирующего элемента) и частотную зависимость регулируемого усиления.

Результаты измерений занесите в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

Условия эксперимента: $R_{\text{ген}} = \dots, R_{\text{вх}} = \dots, C_{\text{вх}} = \dots, e_{\text{ген}} = \dots$

$R_{\text{рег}}$						
$U_{\text{вых}}$						
K_0						
$f_{\text{в}}$						

2. Исследуйте влияние изменения внутреннего сопротивления источника сигнала и входного сопротивления устройства на регулировочную характеристику и полосу пропускания. Для этого повторите измерения по пункту 2 еще дважды (изменив сопротивление источника сигнала (сделав его соизмеримым с $R_{\text{рег}}$), а затем - при прежнем значении сопротивления источника сигнала, изменив сопротивление нагрузки, имитирующее входное сопротивление усилителя, коэффициент усиления которого регулируется (сделав его также соизмеримым с $R_{\text{рег}}$).

Таблица 4.2

Условия эксперимента: $R_{\text{ген}} = \dots, R_{\text{вх}} = \dots, C_{\text{вх}} = \dots, e_{\text{ген}} = \dots$

$R_{\text{рег}}$						
$U_{\text{вых}}$						
K_0						
$f_{\text{в}}$						

Таблица 4.3

Условия эксперимента: $R_{ген} = \dots, R_{вх} = \dots, C_{вх} = \dots, e_{ген} = \dots$

$R_{рег}$						
$U_{вых}$						
K_0						
$f_{в}$						

3. Напишите отчет о проделанной работе. Отчет должен содержать

- Титульный лист
- Цель работы
- Принципиальные схемы исследуемых звеньев
- Расчетные соотношения
- Таблицы с результатами измерений
- Графики исследуемых зависимостей
- Выводы по проделанной работе. Структура каждого вывода: *наблюдается то-то и то-то; это происходит потому, что.....*

Вопросы для самоконтроля в процессе подготовки

(если перед началом эксперимента ясны ответы не на все вопросы, попробуйте найти их в процессе проведения лабораторной работы)

1. Каковы физические причины изменения $U_{вых}$ при изменении положения движка регулировочного сопротивления?
2. Какая из схем на рис. 4.1 обеспечивает большую глубину регулировки усиления при одинаковых значениях регулировочных сопротивлений?
3. Чем объяснить изменение верхней граничной частоты в схемах на рис. 5.1 при изменении коэффициента передачи на средних частотах?
4. Сравните полосы пропускания исследуемых схем при одинаковой глубине регулировки усиления.

Приложение

Расчетные соотношения для схем рис. 4.1

В случае $R_{ген} = 0$ и $R_{вх}$, стремящегося к бесконечности ($R_{вх} \gg R_{рег}$), для схемы рис. 4.1,а

$$R_{рег} = \frac{1}{2\pi f_{0,7} C_{вх}},$$

(отметим, что для этой схемы случай $R_{вх} \gg R_{рег}$ лишен смысла, так как регулировка усиления практически отсутствует).

Для схемы рис. 4.1,б:

$$R_{\text{рег}} = \frac{4}{2\pi f_{0,7} C_{\text{вх}}}.$$

В случае $R_{\text{ген}} > 0$ и $R_{\text{вх}}$, соизмеримого с $R_{\text{рег}}$, для схемы рис. 5.1,а

$$R_{\text{экв}} = \frac{1}{2\pi f_{0,7} C_{\text{вх}}}, \quad R_{\text{рег}} = \frac{R_{\text{экв}} R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}} - R_{\text{экв}}} - R_{\text{ген}},$$

Для схемы рис. 4.1,б верхняя граничная частота минимальна в случае равенства сопротивлений выше и ниже движка потенциометра:

$$R_{\text{ген}} + (1-m)R_{\text{рег}} = \frac{mR_{\text{рег}} R_{\text{вх}}}{mR_{\text{рег}} + R_{\text{вх}}},$$

а параллельное соединение этих сопротивлений дает $R_{\text{экв}}$, определяющее верхнюю граничную частоту, как и в схеме рис. 4.1,а:

$$R_{\text{экв}} = \frac{1}{2\pi f_{0,7} C_{\text{вх}}}.$$

Здесь m - доля сопротивления ниже движка регулировочного потенциометра.

В результате

$$R_{\text{рег}} = \frac{R_{\text{вх}}(4R_{\text{экв}} - R_{\text{ген}}) - 2R_{\text{экв}}(2R_{\text{экв}} - R_{\text{ген}})}{R_{\text{вх}} - 2R_{\text{экв}}},$$

при этом

$$m = \frac{2R_{\text{экв}} R_{\text{вх}}}{4R_{\text{экв}}(R_{\text{вх}} - R_{\text{экв}}) + R_{\text{ген}}(2R_{\text{экв}} - R_{\text{вх}})}.$$

Ориентировочно можно считать, что худшим по частоте случаем является ситуация, когда сопротивление выше точки подключения нагрузки и ниже ее равны.

Сравнивайте влияние сопротивлений, найденных расчетным путем, с измеренными величинами.

Лабораторная работа № 5

Исследование активных схем плавной регулировки усиления

Цель работы: сравнительное исследование регулировочных характеристик и частотных свойств различных способов плавной регулировки усиления.

Порядок выполнения работы

1. Исследуйте влияние изменения режима работы биполярного транзистора на коэффициент усиления каскада. Для этого соберите схему усилителя на сопротивлениях на биполярном транзисторе с питанием фиксированным током базы. Изменяйте и контролируйте режим транзистора (записывайте значение постоянного тока базы и постоянного тока коллектора), измеряйте при этом коэффициент усиления (сквозной и отношение выходного и входного напряжений) и верхнюю граничную частоту входной и выходной цепей на уровне 0,7 (внутреннее сопротивление источника сигнала возьмите равным 50-100 Ом). Форму сигнала контролируйте осциллографом.

Режим транзистора изменяйте, изменяя сопротивление R_{δ} . Целесообразные границы изменения тока коллектора – от 1 мА до (15-25) мА.

Следите, чтобы при изменении режима работы транзистора не попасть в нелинейную область характеристик.

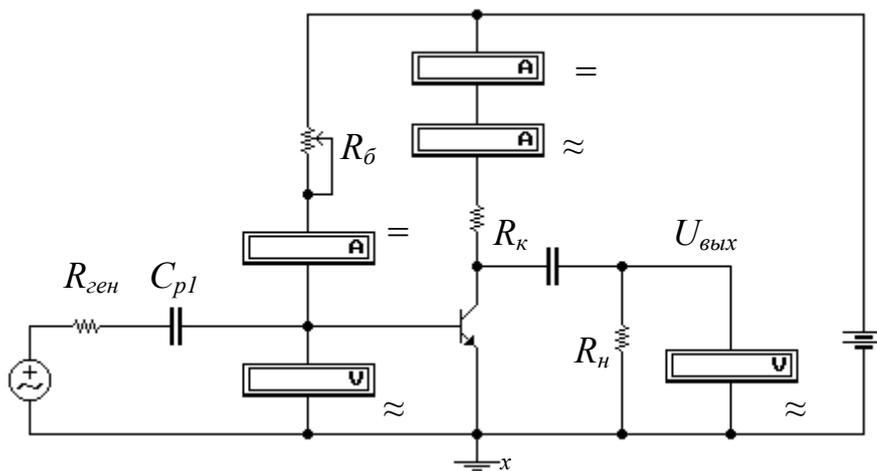


Рис. 5.1. Схема регулировки усиления изменением режима с помощью сопротивления в цепи базы

Постройте регулировочную характеристику (в данном случае - зависимость коэффициента усиления от режима работы транзистора, то есть от постоянной составляющей тока коллектора, поскольку изменение усиления происходит именно за счет изменения режима) и кривую

зависимости верхней граничной частоты входной и выходной цепей на уровне 0,7 от регулирующего параметра. Одновременно оцените зависимость коэффициента передачи входной цепи на частоте генератора от изменения режима. Результаты измерений занесите в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 Исследование влияния изменения режима на коэффициент усиления и полосу пропускания каскада

Условия эксперимента: $E = \dots, R_{ген} = \dots, f_{ген} = \dots, \dots$

$R_{\bar{o}}$, кОм								
$I_{k=}$, мА								
$I_{\bar{b}}$, мкА								
$I_{k\sim}$, мА								
$I_{\bar{b}\sim}$, мкА								
$U_{вх}$, мВ								
$U_{вых}$, мВ								
$K_{вх}$								
$K_{вых}$								
$f_{в\ вх}$								
$f_{в\ вых}$								
$f_{н\ вх}$								
$f_{н\ вых}$								
I_{k0}								
$I_{\bar{b}0}$								

2. (В зависимости от рекомендации преподавателя и желания студента этот пункт может быть опущен). Возможен другой способ изменения режима транзистора – изменением сопротивления в цепи эмиттера, зашунтированного конденсатором большой емкости, чтобы исключить появление отрицательной обратной связи, влияние которой на коэффициент усиления и полосу пропускания изучается отдельно.

Соберите схему эмиттерной стабилизации, выбрав R_3 таким образом, чтобы при максимальном токе коллектора (допустим, 15-20 мА) падение напряжения на нем было порядка 3 В. Ток делителя выберите равным (10-50) токам базы (схема на рис. 5.2). Напряжение на коллекторе и ток коллектора возьмите равными соответствующим значениям в средней точке измерений по пункту 1.

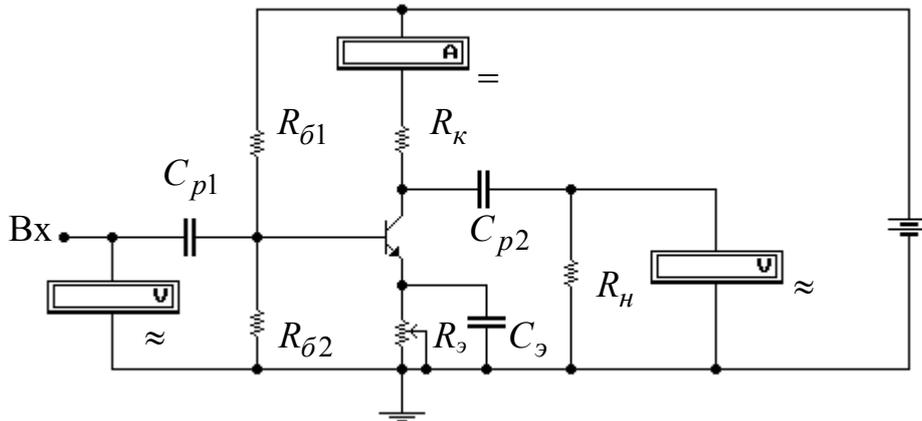


Рис. 5.2. Схема регулировки усиления изменением режима с помощью сопротивления в цепи эмиттера

Изменяйте режим работы транзистора, как и в пункте 1, но изменением сопротивления в цепи эмиттера ($R_э$), зашунтированного конденсатором емкостью 500 мкФ. Повторите измерения пункта 1 и сравните полученные результаты.

Для того, чтобы убедиться, что способ изменения режима не имеет существенного значения до тех пор, пока $R_б$ не станет соизмеримым с входным сопротивлением транзистора, нет смысла снимать много точек. Достаточно измерений в двух-трех точках.

3. Модернизируйте одну из выше приведенных схем таким образом, чтобы ток покоя коллектора был максимальным из фигурировавших в экспериментах 1 и 2 (например, вариант изменения схемы рис. 5.2 изображен на рис. 5.3). Сопротивление $R_э$ вновь зашунтируйте конденсатором емкостью 200-500 мкФ.

Добавьте в цепь эмиттера переменное сопротивление, включив его таким образом, чтобы при изменении сопротивления режим транзистора не менялся (рис. 5.3). Переменное сопротивление выберите так, чтобы оно позволяло изменять коэффициент усиления примерно во столько же раз, во сколько его изменяли в пункте 1.

Эксперимент выполняется для одного из вариантов схем – эмиттерной стабилизации или питания фиксированным током базы.

По измеренному в выбранной рабочей точке коэффициенту усиления оцените крутизну транзистора и выберите регулировочное сопротивление так, чтобы обеспечить изменение коэффициента усиления примерно в тех же пределах, что и в эксперименте по пункту 1.

$$S = \frac{K_o}{R_{\text{экв}}}, \quad R_{\text{экв}} = \frac{R_k R_H}{R_k + R_H}; \quad R_{\text{рег}} = \frac{A-1}{S},$$

где A - глубина регулировки усиления.

Изменяйте величину переменного сопротивления (старайтесь изменять коэффициент усиления примерно в тех же пределах, что и в пунктах 1, 2, и повторите измерения, необходимые для оценки зависимости коэффициента усиления, сквозного коэффициента усиления и верхней граничной частоты от величины регулирующего параметра (регулирующего сопротивления в цепи эмиттера). Результаты измерений занесите в таблицу 5.2, аналогичную таблице 5.1.

Сравните изменение верхних граничных частот при одних и тех же изменениях коэффициентов усиления в различных схемах регулировки.

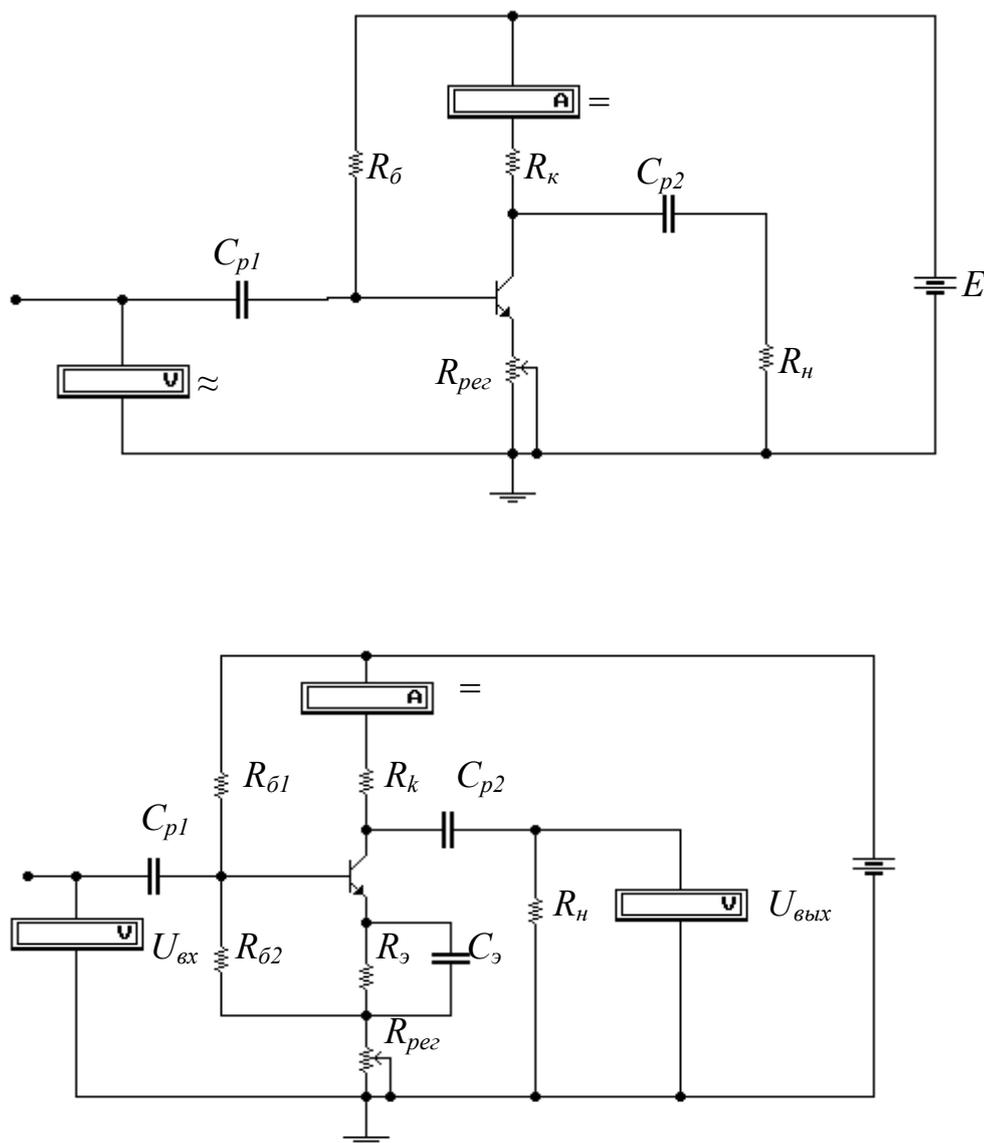


Рис. 5.3. Схемы регулировки усиления изменением глубины обратной связи

Таблица 5.2 Исследование влияния изменения режима на коэффициент усиления и полосу пропускания каскада

Условия эксперимента: $e_{ген} = \dots$, $R_{ген} = \dots$, $f_{ген} = \dots$, $I_{ко} = \dots$, \dots

$R_{рег}$, кОм								
$U_{вх}$, мВ								
$U_{вых}$, мВ								
$K_{вх}$								
$K_{вых}$								
$f_{в\ вх}$								
$f_{в\ вых}$								
$f_{н\ вх}$								
$f_{н\ вых}$								

Для удобства сравнения схем регулировки усиления целесообразно построить зависимости исследуемых параметров от значения коэффициента усиления. При этом более наглядными будут достоинства и недостатки исследуемых схем при одинаковой глубине регулировки усиления.

3. Напишите отчет о проделанной работе. Отчет должен содержать

- Титульный лист
- Цель работы
- Принципиальные схемы исследуемых звеньев
- Расчетные соотношения
- Таблицы с результатами измерений
- Графики исследуемых зависимостей
- Выводы по проделанной работе. Структура каждого вывода: *наблюдается то-то и то-то; это происходит потому, что.....*

Вопросы для самоконтроля в процессе подготовки

(если перед началом эксперимента ясны ответы не на все вопросы, попробуйте найти их в процессе проведения лабораторной работы)

1. Какова зависимость крутизны биполярного транзистора от режима его работы?
2. Как зависит коэффициент усиления каскада на биполярном транзисторе от его крутизны в рабочей точке?
3. Как и за счет чего изменяется верхняя граничная частота каскада при изменении режима работы транзистора?
4. Чем определяется коэффициент передачи входной цепи на средних частотах и чем вызвано его изменение при изменении режима работы транзистора?
5. Какими способами (схемами подключения к источнику питания) можно обеспечить режим работы биполярного транзистора?

6. Как зависит верхняя граничная частота входной цепи от коэффициента усиления каскада и почему?
7. С чем связаны изменения нижней граничной частоты входной цепи при изменении коэффициента усиления каскада (в каждом из способов регулировки усиления)?
8. Чем объяснить, что нижняя граничная частота выходной цепи практически не меняется при изменении коэффициента усиления каскада (в каждом из способов регулировки усиления)?

Лабораторная работа №6

Определение высокочастотных параметров биполярных транзисторов

Цель работы: Научиться определять высокочастотные параметры биполярных транзисторов (емкость коллекторного перехода $C_{бк}$ и постоянную времени транзистора τ) и на их основе входную динамическую емкость.

Искажения, создаваемые входной цепью каскада, описываются постоянной времени верхних частот входной цепи:

$$\tau_{ввх} = C_{вх_дин} \cdot \frac{R_{ген} \cdot R_{вх}}{R_{ген} + R_{вх}}, \quad (6.1)$$

$R_{ген}$ – выходное сопротивление источника сигнала,

$R_{вх}$ – входное сопротивление каскада,

$C_{вх_дин}$ – входная динамическая емкость каскада, определяемая суммой

$$C_{вх_дин} \approx \frac{\tau}{r_{б}} + C_{бк} \cdot (1 + K_0), \quad (6.2)$$

K_0 – коэффициент усиления каскада,

τ - постоянная времени транзистора,

$r_{б}$ – объёмное сопротивление базы,

$C_{бк}$ – емкость перехода база-коллектор.

Искажения, создаваемые выходной цепью каскада, определяются постоянной времени верхних частот выходной цепи:

$$\tau_{ввых} = \tau + C_{бк} \cdot (1 + S_0 r_{б}) \cdot R_{экв} + C_{н} \cdot R_{экв}, \quad (6.3)$$

где S_0 - крутизна транзистора в рабочей точке,

$R_{экв}$ - эквивалентное сопротивление нагрузки каскада, состоящее из параллельно включенных выходного сопротивления транзистора R_i , сопротивления коллектора R_k и сопротивления нагрузки R_H :

$$R_{экв} = R_i \parallel R_k \parallel R_H \approx \frac{R_k \cdot R_H}{R_k + R_H}. \quad (6.4)$$

Порядок выполнения работы

1. Выберите рабочую точку транзистора, высокочастотные параметры которого подлежат измерению. При выборе рабочей точки целесообразно пользоваться характеристиками транзистора, измеренными при выполнении лабораторной работы № 1. Желательно, чтобы рабочая точка

находилась на линейном участке входной (проходной) характеристики транзистора.

Для определения $C_{бк}$ и τ можно использовать соотношение (6.1). Для этого необходимо предварительно определить входное сопротивление и крутизну транзистора в рабочей точке. Для измерений может быть использована схема, изображенная на рис. 6.1 (здесь и далее для примера взят транзистор 2N2923).

При измерении $R_{вх}$ и S_0 частота генератора выбирается примерно равной 1-5 кГц, чтобы исключить влияние изменения этих параметров по мере увеличения частоты. Как видно из рис. 6.1, ёмкость разделительного конденсатора на входе выбрана равной 1 мкФ, также чтобы исключить влияние искажений, теперь уже на нижних частотах.

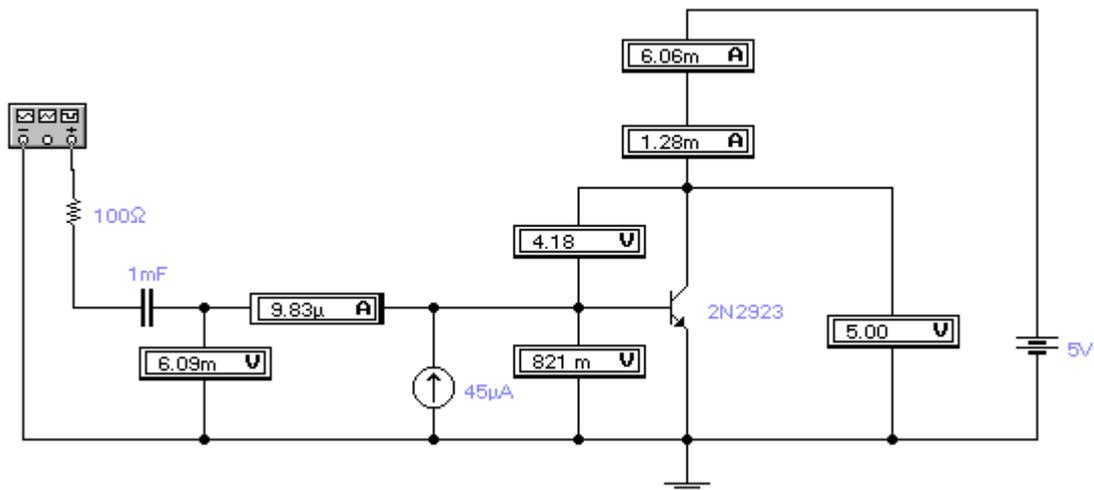


Рис. 6.1. Схема измерения параметров транзистора 2N2923 на переменном токе

В результате измерений для схемы рис. 6.1 $I_{б\approx} = 9,83$ мкА, $I_{к\approx} = 1,28$ мА, $U_{б\approx} = 6,09$ мВ. При этом $R_{вх} = U_{б\approx} / I_{б\approx} = 6,09 \cdot 10^{-3} / (9,83 \cdot 10^{-6}) = 620$ Ом, $S_0 = I_{к\approx} / U_{б\approx} = 1,28 \cdot 10^{-3} / (6,09 \cdot 10^{-3}) = 210$ мА/В.

При выполнении этого эксперимента для контроля можно определить $R_{вх}$ другим способом: вольтметр, измеряющий переменное напряжение, подключается непосредственно к выходным зажимам генератора переменного тока для измерения ЭДС источника сигнала e . Коэффициент передачи входной цепи определяется как

$$K_{вх} = \frac{R_{вх}}{R_{ген} + R_{вх}} = \frac{U_{б\approx}}{e}.$$

2. Для определения $\tau_{\text{ВВХ}}$ следует измерить верхнюю граничную частоту $f_{\text{ВВХ}}$ частотной характеристики входной цепи на уровне 0,7 (-3 дБ). В нашем примере $f_{\text{ВВХ}} = 15,1$ МГц. При этом $\tau_{\text{ВВХ}} = 1/2\pi f_{\text{ВВХ}}$ и $C_{\text{ВХдин}} = \frac{\tau}{r_{\text{б}}} + C_{\text{бк}}$, поскольку в схеме на рис. 6.1 отсутствует сопротивление в цепи коллектора и, следовательно, коэффициент усиления равен нулю.

Поскольку в формуле (6.2) две неизвестных величины, следует найти еще одно значение $C_{\text{ВХдин}}$, добавив сопротивление в цепь коллектора и изменив напряжение источника питания таким образом, чтобы рабочая точка транзистора осталась прежней:

$$E = U_{\text{k0}} + R_{\text{k}} \cdot I_{\text{k0}}.$$

В нашем примере $E = 5 \cdot 10^3 \cdot 6,06 \cdot 10^{-3} = 11$ В (рис. 6.2).

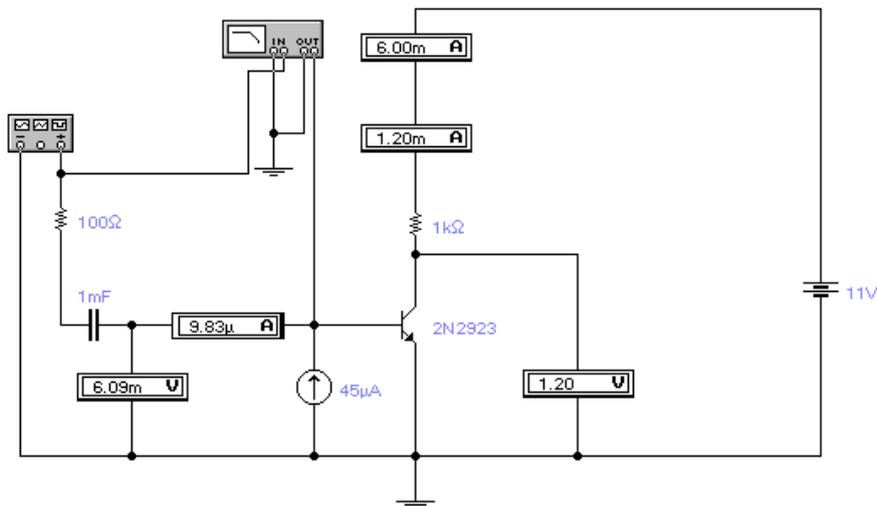


Рис.6.2. Схема измерения для случая $R_{\text{k}} \neq 0$

$$K_0 = U_{\text{k}\approx} / U_{\text{б}\approx} = 1,2 / (6,09 \cdot 10^{-3}) = 197, \quad f_{\text{ВВХ}} = 1,44 \text{ МГц.}$$

Искомые величины определяются решением системы уравнений:

$$C_{\text{ВХдин}} = \frac{\tau}{r_{\text{б}}} + C_{\text{бк}}, \quad \tau_{\text{ВВХ}} / R_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{2\pi f_{\text{ВВХ}}} \cdot \frac{R_{\text{ГЕН}} + R_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ГЕН}} \cdot R_{\text{ВХ}}},$$

$$C_{\text{ВХдин}} = \frac{\tau}{r_{\text{б}}} + C_{\text{бк}}(1 + K_0), \quad \tau_{\text{ВВХ}} / R_{\text{ЭКВ}} = \frac{1}{2\pi f_{\text{ВВХ1}}} \cdot \frac{R_{\text{ГЕН}} + R_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ГЕН}} \cdot R_{\text{ВХ}}}.$$

В рассматриваемом примере $C_{\text{бк}} = 5,8$ пФ, $\tau = 0,19$ нс ($r_{\text{б}} = 1,63$ Ом – из списка параметров транзистора).

Результаты определения высокочастотных параметров целесообразно проверить, используя их для расчета постоянной времени выходной цепи

3. Увеличьте напряжение питания с тем, чтобы постоянное напряжение между коллектором и базой увеличилось примерно вдвое ($I_{к0}$ сохраните примерно тем же, что и ранее). Вновь определите $C_{бк}$ и τ описанным выше способом и оцените влияние изменения напряжения между коллектором и базой (эксперимент можно выполнить два-три раза).

4. Верните напряжение питания к первоначальному значению. Увеличьте $I_{к0}$ примерно вдвое и оцените влияние изменения тока на $C_{бк}$ и τ .

В описании данной лабораторной работы предложен один из способов измерения высокочастотных параметров биполярных транзисторов. Предложите свой способ решения этой задачи, изобразите схему измерений, определите $C_{бк}$ своим методом и сравните с измеренным ранее.

Вопросы для самоконтроля в процессе подготовки и самопроверки результатов исследования

1. Как можно измерить входное сопротивление некоторого устройства (например, транзистора)?
2. Чем отличается входная емкость транзистора от его динамической емкости?
3. Как и почему изменяется емкость коллекторного перехода при изменении напряжения на переходе?
4. При отсутствии C_n постоянная времени какой цепи больше (входной или выходной), и почему?
5. Как изменяется полоса пропускания АЧХ входной цепи каскада при изменении его коэффициента усиления, и почему?

Лабораторная работа № 7

Исследование схем фазоинверсных каскадов

Цель работы: понять принцип получения двух напряжений, равных и противофазных (на примере одной или двух из возможных схем); исследовать свойства каскада и асимметрию на средних, верхних и нижних частотах.

Принципиальная схема фазоинверсного каскада с разделенной нагрузкой показана на рис. 7.1.

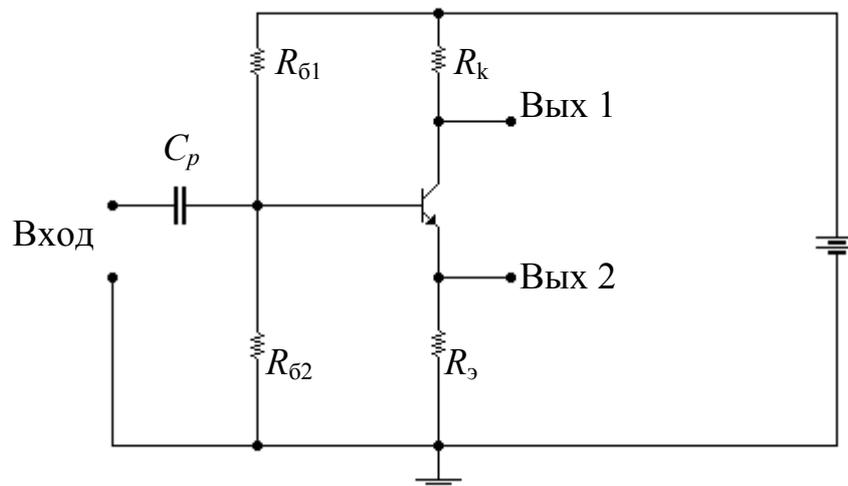


Рис. 7.1. Фазоинверсный каскад с разделенной нагрузкой

Порядок выполнения работы

1. Соберите схему фазоинверсного каскада с разделенной нагрузкой (рис. 7.1). Для того чтобы обеспечить равенство выходных напряжений на средних частотах, $R_к$ и $R_э$ следует выбрать одинаковыми. Делитель в цепи базы определяется выбранным режимом и током делителя $I_{дел}$ (обычно его выбирают в 2-10 раз больше тока базы в рабочей точке $I_{б0}$):

$$R_{б1} = \frac{E - I_{э0}R_э - U_{б0}}{I_{б0} + I_{дел}}, \quad R_{б2} = \frac{I_{э0}R_э + U_{б0}}{I_{дел}}.$$

Подключите к входу генератор переменного напряжения (выберите частоту генератора 1-5 кГц, а емкость разделительного конденсатора на входе C_p не меньше 20 мкФ, чтобы исключить в дальнейшем его влияние). Подключив осциллограф к выходам каскада (Вых 1 и Вых 2) убедитесь в противофазности выходных напряжений. Сравните амплитуды выходных напряжений, подключив к выходам вольтметры, измеряющие переменную составляющую (как, например, на рис. 7.2).

Объясните, чем определяется некоторая асимметрия выходных напряжений.

2. Подключите к выходам сопротивления нагрузки (по очереди 1, 3 и 10 кОм) и оцените изменение коэффициентов передачи (при подключении сопротивлений нагрузки используйте разделительные конденсаторы), пример подключения см. на рис. 7.3.

Объясните, почему R_H почти не влияет на коэффициент передачи?

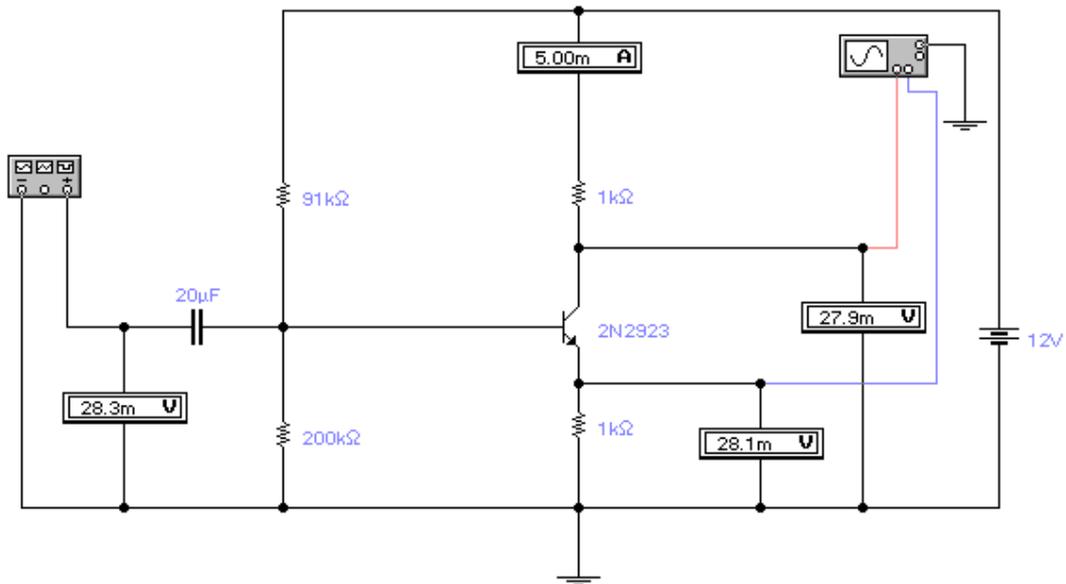


Рис. 7.2. Пример применения схемы фазоинверсного каскада с разделенной нагрузкой (все вольтметры измеряют переменную составляющую, амперметр в цепи коллектора – постоянную)

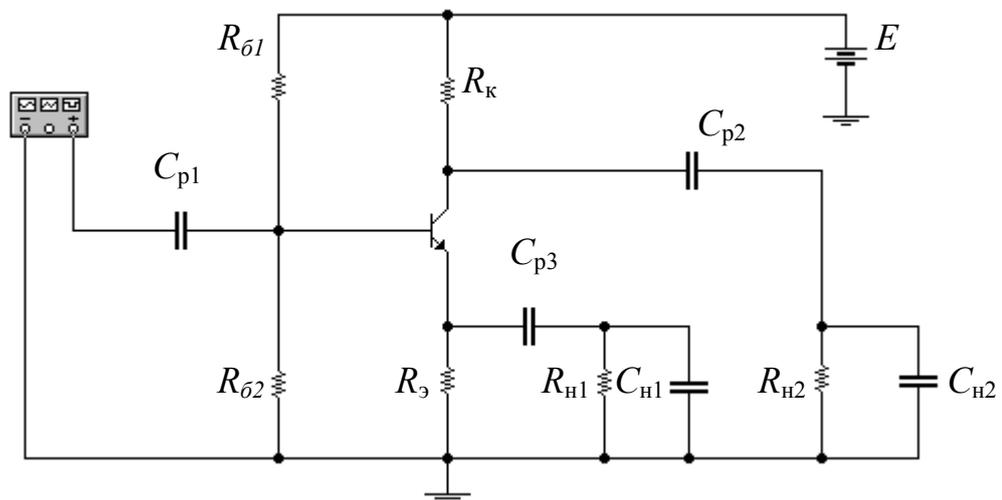


Рис. 7.3. Фазоинверсный каскад с разделенной нагрузкой, каждое плечо которого нагружено сопротивлением и емкостью (C_H и R_H).

3. Подключите параллельно сопротивлениям нагрузки емкости (допустим, по 200 пФ) и с помощью плоттера сравните верхние и нижние граничные частоты по каждому из выходов.

4. Измените емкость нагрузки по одному из выходов и оцените изменение формы амплитудно-частотной характеристики и верхней граничной частоты.

Возвратите емкости нагрузки ее исходное значение и повторите эксперимент, изменяя емкость нагрузки по другому выходу.

Повторите эксперимент, выполняя измерения на втором выходе.

5. . Увеличьте C_{p1} до единиц фарад (чтобы исключить ее влияние), либо подключайте плоттер справа от нее. Сравните нижние граничные частоты на вых.1 и вых.2 при одинаковых нагрузках. Увеличьте сопротивления нагрузки обоих плеч и вновь сравните нижние граничные частоты на вых.1 и вых.2.

6. Исследуйте влияние C_{p2} , а затем C_{p3} на нижнюю граничную частоту по каждому из выводов. При этом, исследуя влияние C_{p2} , увеличьте C_{p3} до единиц фарад, и наоборот. Объясните полученные результаты.

Принципиальная схема фазоинверсного каскада с эмиттерной связью показана на рис. 7.4.

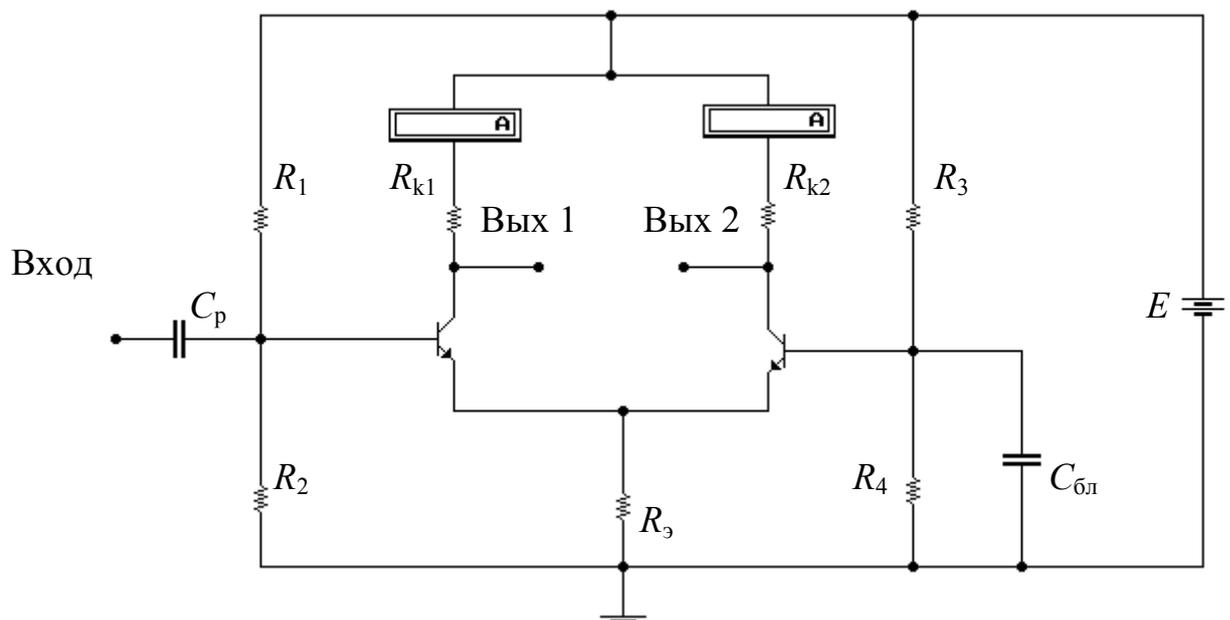


Рис. 7.4. Принципиальная электрическая схема фазоинверсного каскада с эмиттерной связью

7. Для выбранной рабочей точки транзистора рассчитайте сопротивления делителя в цепи базы при условии, что $R_3 = R_k = 1$ кОм (для контроля режима используйте амперметры в коллекторной цепи).

Подключите к входу генератор переменного напряжения (выберите частоту генератора 1-5 кГц и емкость разделительного конденсатора C_p не меньше 20 мкФ, $C_{бл}$ в 5-10 раз больше C_p). Подключив осциллограф к выходам каскада (Вых 1 и Вых 2) убедитесь в противофазности выходных

напряжений. Сравните амплитуды выходных напряжений, подключив к выходам вольтметры, измеряющие переменную составляющую (как, например, на рис. 7.5).

8. Подключите к выходам сопротивления нагрузки (1, 3 и 10 кОм) и оцените изменение коэффициентов передачи (при подключении сопротивлений нагрузки используйте разделительные конденсаторы).

9. Подключите параллельно сопротивлениям нагрузки емкости (допустим, по 200 пФ) и с помощью плоттера сравните верхние и нижние граничные частоты по каждому из выходов.

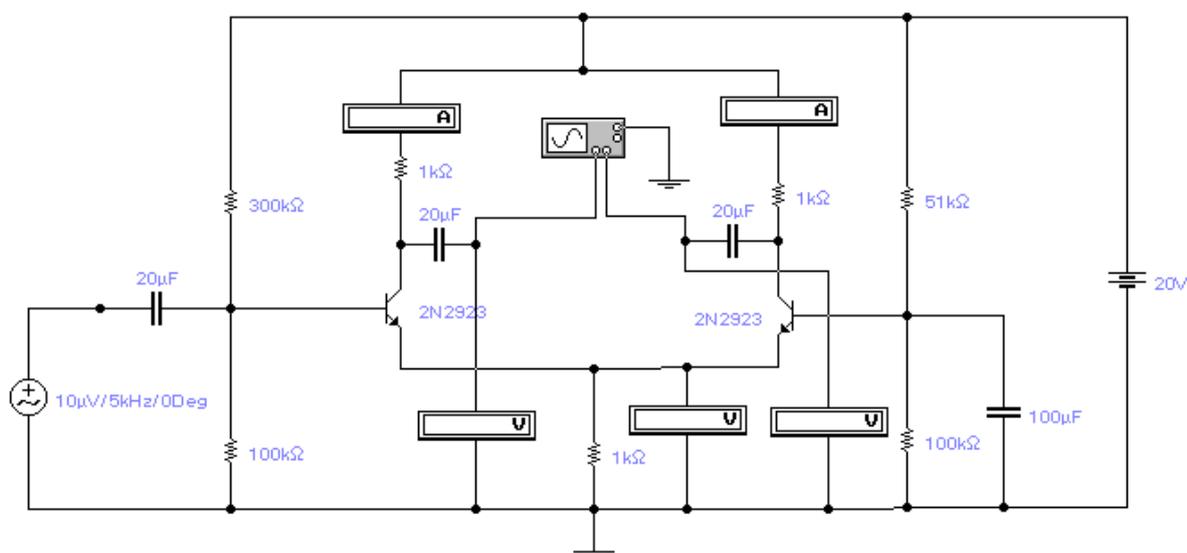


Рис. 7.5. Пример применения каскада с эмиттерной связью (все вольтметры измеряют переменную составляющую, амперметр в цепи коллектора – постоянную составляющую)

10. Отключите $C_{бл}$ и оцените изменение коэффициентов усиления по каждому плечу, а также изменения f_v и f_n .

11. Определите входное сопротивление каскада и входное сопротивление транзисторов для постоянного и переменного токов (предложите методику измерения).

12. Изменяйте R_3 от 1 кОм до 10 Ом, пересчитывая напряжение питания и сопротивления делителей таким образом, чтобы режимы транзисторов ($U_{к0}$, $I_{к0}$, $U_{б0}$, $I_{б0}$) оставались неизменными. При этом

$$E = 2(I_{к0} + I_{б0})R_3 + U_{к0} + I_{к0}R_k,$$

где $I_{к0}$ и $I_{б0}$ измерены в процессе предыдущих экспериментов; $U_{к0}$ целесообразно выбрать и поддерживать равным (5-6) В. $R_{б1}$ (R_1 и R_3) на рис. 16.1:

$$R_{б1} = (E - 2(I_{к0} + I_{б0})R_3 - U_{б0}) / (I_{б0} + I_{дел}),$$

где $I_{дел} = (2 \div 10)I_{б0}$; $R_{б2}$ (R_2 и R_4) на рис.1:

$$R_{\text{б2}} = [2(I_{\text{к0}} + I_{\text{б0}})R_3 + U_{\text{б0}}] / I_{\text{дел.}}$$

Обратите внимание, при каком соотношении R_3 и входного сопротивления транзистора на переменном токе начинает изменяться глубина обратной связи.

13. Разбейте R_3 на два резистора, включенные в параллель, увеличив номинал каждого из них вдвое. Подключите между двумя R_3 сопротивление R (рис. 7.6) и оцените влияние его изменения (от 5 до 30 Ом) на коэффициент усиления по каждому плечу, а также на $f_{\text{в}}$ и $f_{\text{н}}$.

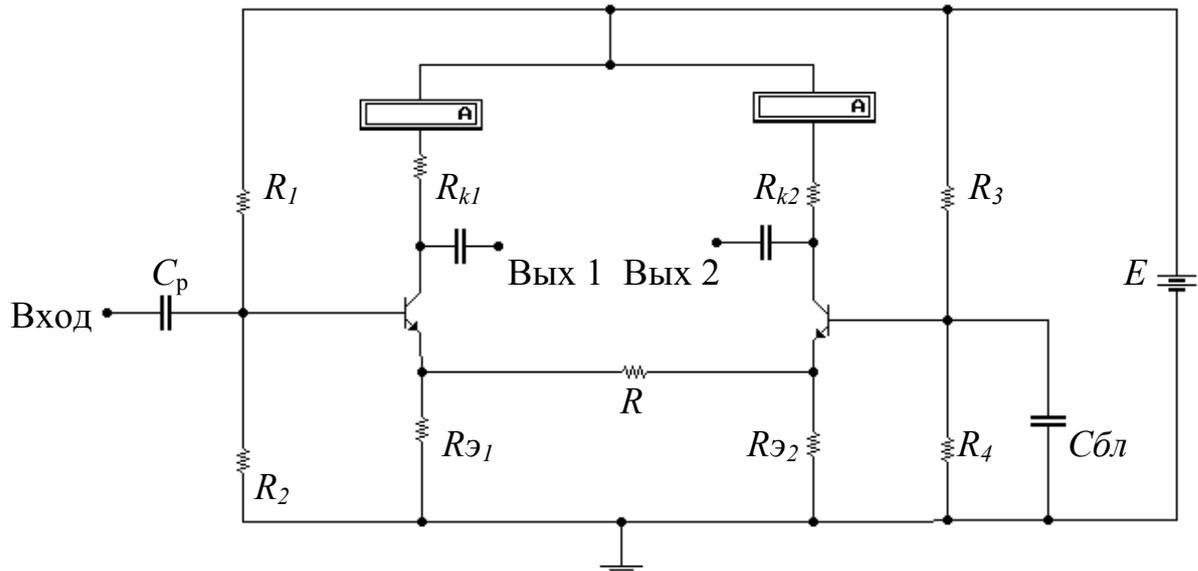


Рис. 7.6. Фазоинверсный каскад с эмиттерной связью и дополнительной обратной связью

14. Выберите одно из значений сопротивления R подключите параллельно сопротивлению конденсатор, емкость которого C выберите из условия

$$R_{\text{экв}} C_{\text{н}} = RC, \text{ где } R_{\text{экв}} = R_{\text{к}} R_{\text{н}} / (R_{\text{к}} + R_{\text{н}}).$$

Исследуйте влияние изменения емкости C на частотную характеристику каскада по каждому выходу.

Все схемы записывайте в файл на диск, результаты измерений фиксируйте в тетради. Сделайте выводы по результатам проделанной работы.

Содержание отчета

- Цель проводимого исследования.
- Методика проведения экспериментов и структурные схемы.

- Принципиальные электрические схемы исследуемых усилителей (могут быть использованы распечатки схем, снабженные необходимыми комментариями и картами напряжений).
- Таблицы с результатами измерений.
- Графики, иллюстрирующие исследуемые явления.
- Выводы, замечания и комментарии по выполненной работе.

Вопросы для самоконтроля в процессе подготовки

(если перед началом эксперимента ответы ясны не на все вопросы, попробуйте найти их в процессе проведения лабораторной работы)

1. Как объяснить, что напряжения на выходах исследуемых схем противофазны?
2. Будут ли выходные напряжения в схеме 7.1 равными, если $R_k \neq R_3$?
3. Какого вида обратные связи имеют место в каскаде с разделенной нагрузкой?
4. В каком случае в каскаде с разделенной нагрузкой искажения на нижних частотах больше – на выходе 1 или на выходе 2?
5. Как можно было бы организовать регулировку коэффициента усиления каскада с разделенной нагрузкой?
6. По какому из выходов каскада с разделенной нагрузкой искажения на верхних частотах больше при одинаковых нагрузках? Почему?
7. Какой будет форма частотной характеристики каскада с разделенной нагрузкой на верхних частотах, если $C_{н1} = C_{н2}$, $C_{н1} < C_{н2}$ и $C_{н1} > C_{н2}$?
8. Покажите, как зависит напряжение обратной связи от частоты в исследуемой схеме.
9. Будут ли выходные напряжения в схеме 7.4 равными, если $R_{к1} \neq R_{к2}$?
10. Как изменится коэффициент усиления по каждому плечу каскада на рис. 7.4, если отключить $C_{ол}$?
11. Чем объяснить влияние сопротивления R на коэффициент усиления каскада?