

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра электротехники

В. А. ПАЦКЕВИЧ, М. В. НАФТОЛЬСКИЙ, И. Л. ГРОМЫКО

# ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

## Ч а с т ь I

*Рекомендовано учебно-методическим объединением  
по образованию в области транспорта и транспортной деятельности  
для студентов специальности 6-05-0715-08  
«Подвижной состав железнодорожного транспорта»  
в качестве пособия по дисциплине «Электронная техника и преобразователи»*

Гомель 2025

УДК 621.314.6(075.8)

ББК 31.264.5

П21

**Р е ц е н з е н т ы :** зав. кафедрой электроснабжения канд. техн. наук, доцент *T. B. Алфёрова* (ГГТУ им. П. О. Сухого);  
кафедра физики и электротехники (доцент кафедры – канд. техн. наук, доцент *A. B. Козлов*) (ГГТУ им. П. О. Сухого)

**Пацкевич, В. А.**

П21      Электронная техника и преобразователи : пособие : в 2 ч. Ч. 1 / В. А. Пацкевич, М. В. Нафольский, И. Л. Громыко ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2025. – 91 с.  
ISBN 978-985-891-214-7 (ч.1)

Рассмотрены теоретический материал и описание экспериментальных исследований в среде Multisim устройств электроники (часть первая) и преобразовательной техники (часть вторая).

Предназначено для самостоятельной подготовки студентов специальности 6-05-0715-08 «Подвижной состав железнодорожного транспорта», а также может быть полезно студентам электроэнергетических специальностей.

**УДК 621.314.6(075.8)**

**ББК 31.264.5**

**ISBN 978-985-891-214-7 (ч. 1)**  
**ISBN 978-985-891-213-0**

© Пацкевич В. А., Нафольский М. В.,  
Громыко И. Л., 2025  
© Оформление. БелГУТ, 2025

## ВВЕДЕНИЕ

Электрическая энергия широко применяется на практике, что объясняется рядом преимуществ, которыми она обладает. Такая энергия, по сравнению с другими видами энергии (химической, тепловой, ядерной, механической и так далее), легко транспортируется на большие расстояния, легко дробится, регулируется и преобразуется в другие виды энергии. В основном электрическая энергия получается на электростанциях, генераторы которых преобразуют механическую энергию в электрическую переменного тока с промышленной частотой (50 или 60 герц). Большая её часть (примерно 80 %) потребляется с такой же частотой. Остальная энергия доходит до потребителя в преобразованном виде (в виде постоянного тока или переменного с частотой отличной от промышленной).

Много энергии постоянного тока идёт на выплавку алюминия, рафинирование меди, электрифицированный транспорт, электрохимические процессы и т. д. Решается вопрос о передаче электроэнергии на большое расстояние на постоянном токе при напряжении более миллиона вольт.

Сейчас всё шире используются альтернативные источники электрической энергии, такие как солнечные и ветряные электростанции. Работа этих источников невозможна без использования преобразовательных агрегатов. Например, на ветряных электростанциях сначала получается переменный ток с непостоянной частотой. Этот ток преобразуется в постоянный, а затем постоянный снова преобразуется в переменный со стабильной промышленной частотой.

Для преобразования электрической энергии широко применяются различные полупроводниковые устройства. Объясняется это тем, что они позволяют преобразовывать электроэнергию без движущихся частей с высоким КПД и получать её в виде постоянного или переменного тока с частотой, отличной от 50 Гц, преобразовывать постоянный ток одного напряжения в постоянный ток другого напряжения. Диапазон мощностей таких преобразователей находится в пределах от долей ватта до тысяч киловатт.

Практика показывает, что разработка и эксплуатация преобразовательных агрегатов должна вестись специалистами, обладающими глубокими знаниями в области теории преобразовательных схем, физики полупроводниковых приборов, методов построения систем управления на основе современной микропроцессорной техники. Инженеры, эксплуатирующие преобразовательные агрегаты, должны понимать их

принцип действия, иметь представление об их возможностях и основных особенностях. Данное пособие содержит знания в области преобразовательной техники, необходимые для лучшего понимания электромагнитных процессов в этих устройствах.

Современное обучение студентов основам преобразовательной техники невозможно представить без математического моделирования процессов в электронных устройствах. Традиционная методика изучения студентами дисциплины «Электронная техника и преобразователи», ориентированная на теоретические методы анализа электромагнитных процессов, всё меньше соответствует современным требованиям к технологиям обучения. В данном пособии теоретический материал дополнен практической частью, которая позволяет студенту самостоятельно или под руководством преподавателя более глубоко изучить процессы в преобразовательных устройствах, наглядно продемонстрировать работу реальных преобразователей. Практическая часть пособия базируется на использовании программного пакета Multisim. При помощи этой программы студентам легко перейти от теории к практике, создавая модели электронных схем для исследования электромагнитных процессов в них. Программа обладает хорошей функциональностью, широкой базой элементов, разнообразными измерительными приборами.

# 1 ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ MULTISIM ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

## 1.1 Основные понятия о программе Multisim

Программа Multisim – инструмент, позволяющий собирать и исследовать путём математического моделирования электрические цепи. Для запуска программы необходимо навести курсор на её пиктограмму  и кратковременно нажать левую клавишу мыши. Далее в работе слово «левая» или «левую» будет подразумеваться по умолчанию. Если потребуется использовать правую клавишу мыши, то на это будет указано дополнительно. После активации программы на экране монитора откроется рабочее окно программы (рисунок 1.1).

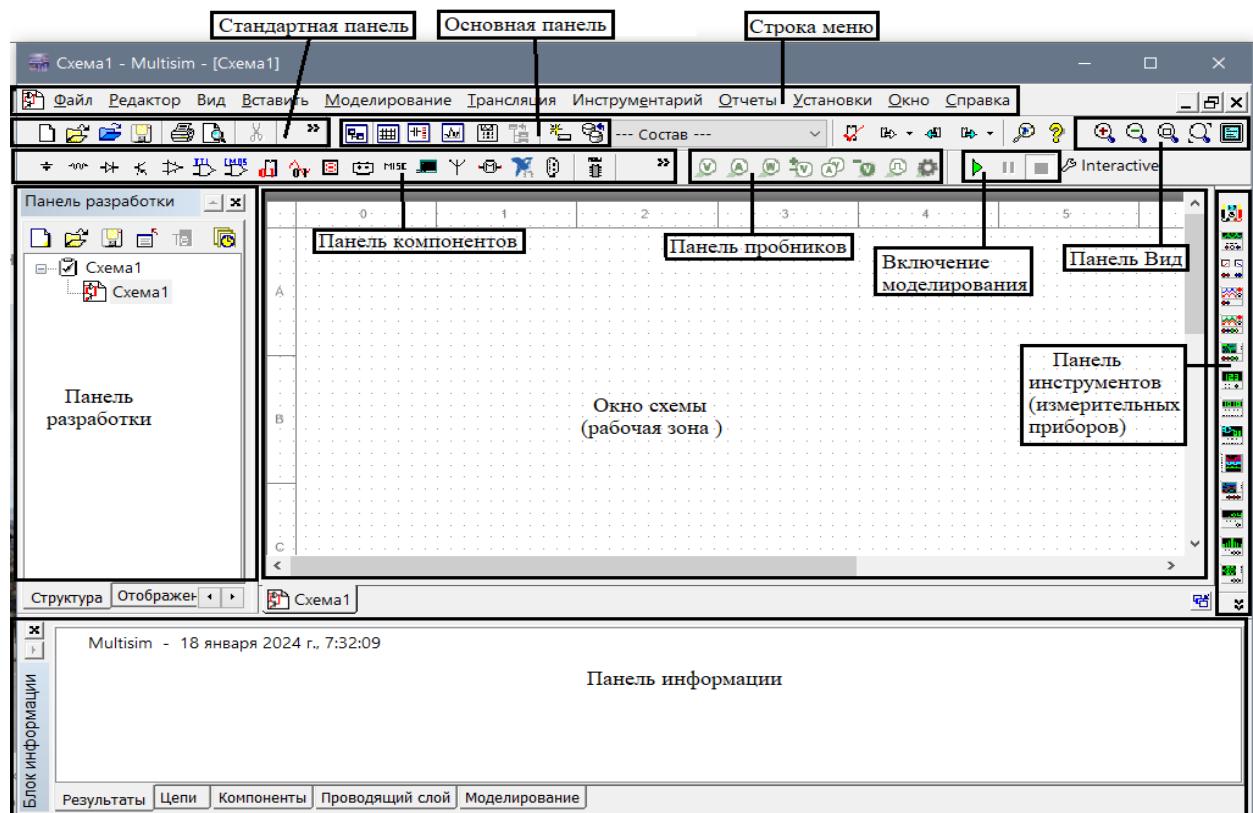


Рисунок 1.1 – Рабочее окно программы Multisim

В верхней части экрана расположена строка, состоящая из меню: «Файл», «Редактор», «Вид», «Вставить», «Моделирование», «Трансляция», «Инструментарий», «Отчеты», «Установки», «Окно», «Справка», которые содержат много пунктов – их назначение стандартно для многих Windows-приложений. Пункты меню, которые необходимо использовать в

работе, рассматриваются при описании порядка выполнения экспериментальных исследований.

Ниже этой строки располагаются панели, на которых имеются группы кнопок, позволяющих вводить команды в программу. Важнейшими панелями, используемыми в данном пособии, являются:

*Стандартная панель;*

*Панель Вид;*

*Панель Включение моделирования;*

*Основная панель;*

*Панель компонентов;*

*Панель разработки;*

*Панель инструментов (измерительных приборов).*

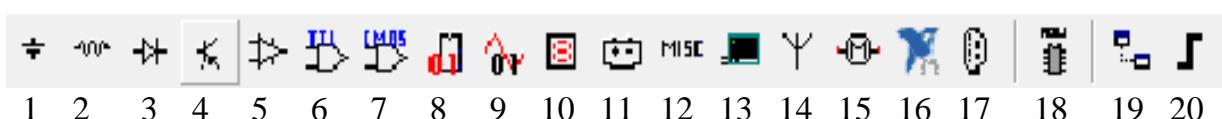
*Стандартная панель* содержит кнопки быстрого доступа к меню «Файл», такие как **[Новый]**, **[Открыть]**, **[Сохранить]** и т. д.

*Основная панель* образована кнопками выбора режима работы, создания пользовательского компонента, запуска постпроцессора и т. д.

*Панель включение моделирования* включает кнопки управления процессом моделирования **[Пуск]**, **[Пауза]** и **[Стоп]**. Их пиктограммы имеют вид **[▶]**, **[||]**, **[■]**.

*Панель Вид* содержит кнопки масштабирования и доступа к командам меню.

*Панель компонентов* позволяет выбрать элементы, необходимые для создания электрической цепи. Её вид приведён на рисунке 1.2.



Здесь:

1 – **[Источники]**. Данная группа содержит различные источники постоянного и переменного напряжения и тока;

2 – **[Пассивные компоненты]**. Эта группа содержит важнейшие пассивные элементы электротехники (резисторы, катушки индуктивности, конденсаторы, трансформаторы и т. д.);

3 – **[Диоды]**. Здесь представлены различные типы выпрямительных и специальных диодов;

4 – **[Транзисторы]**. В этой группе содержатся различные виды биполярных и полевых транзисторов;

5 – [Аналоговые компоненты]. Группа содержит усилители постоянного и переменного тока;

6 – [Логика TTL]. Содержатся микросхемы TTL логики;

7 – [Логика CMOS]. Элементы КМОП логики;

8 – [Цифровые компоненты]. Содержатся различные цифровые устройства;

9 – [Аналого-цифровые компоненты]. В группу включены комбинированные элементы;

10 – [Индикаторы]. Представлены измерительные приборы и индикаторы;

11 – [Компоненты питания];

12 – [Прочие компоненты];

13 – [Периферийные устройства]. Содержатся дисплеи, терминалы, устройства ввода и вывода информации;

14 – [ВЧ-компоненты];

15 – [Электро-механические компоненты];

16 – [Компоненты NI];

17 – [Разъёмы];

18 – [Микроконтроллеры];

19 – [Иерархический блок из файла];

20 – [Шина].

Центральную часть рабочего окна занимает *рабочая зона*, в которой собирается исследуемая электрическая цепь.

Программа Multisim работает с двумя категориями компонентов электрической цепи: реальными (*real*) и виртуальными (*virtual*). У реальных компонентов есть определенное, неизменяемое значение, соответствующее марке выбранного элемента. Виртуальные, в отличии от реальных, являются математическими моделями компонентов с любыми произвольными параметрами. Добавление элементов в схему электрической цепи осуществляется из *панели компонентов*. Основные группы компонентов, которые могут быть использованы в практических исследованиях: [Источники], [Пассивные компоненты], [Диоды], [Транзисторы], [Логика TTL], [Аналоговые компоненты].

*Панель инструментов* содержит [Мультиметр], [Функциональный генератор], [Ваттметр], [Осциллограф], [4-канальный осциллограф], [Плоттер Боде], [Частотомер], [Генератор слов], [Логический преобразователь], [Логический анализатор], [Характеритограф], [Измеритель нелинейных искажений], [Анализатор спектра], [Панорамный анализатор], [Функциональный генератор], [Мультиметр Agilent], [Осцилло-граф Agilent], [Осциллограф Tektronix], [Приборы Labview], [Приборы NIELVISmx], [Датчик тока].

## 1.2 Порядок проведения экспериментальных работ

Порядок выполнения экспериментальных работ заключается в следующем:

1 Изучить особенности исследуемой электрической цепи и состав элементов, её образующих.

2 Активировать программу Multisim.

3 Подготовить *Окно схемы (рабочую зону)*. В *строке меню* рабочего окна программы выбрать опцию **[Установки]** и активировать путь **[Общие установки] – [Компоненты]**. В открывшемся окне, в поле **[Режим установки компонентов]**, активировать **[Возвращаться к библиотеке после установки компонента]** и **[Установить один компонент]**. В поле **[Стандарт отображения]** активировать **[IEC 60617] ([DIN])**. По умолчанию после запуска программы в рабочей зоне могут отображаться координатные точки. При желании их можно удалить. Для этого в *строке меню* рабочего окна программы активировать команду **[Вид]**. В открывшемся окне дезактивировать опцию **[Сетка]**. Если при запуске программы в рабочем окне появятся *панель разработки* и *панель информации*, то для увеличения площади *рабочей зоны* эти панели можно закрыть, активировав кнопки **[x]** на этих панелях.

4 Перенести в *рабочую зону* все элементы, необходимые для создания изучаемой электрической цепи. **Отличительной особенностью данной программы является обязательное наличие в рабочей зоне для большинства схем элемента заземления [GROUND] (аналоговая земля), подключённого к цепи, и, как минимум, одного измерительного прибора.**

5 В соответствии с принципиальной схемой собрать исследуемую электрическую цепь, необходимую для выполнения работы.

6 Из приложения А взять информацию об исходных данных, необходимых для выполнения эксперимента.

7 На основании полученной информации задать рабочие параметры элементам цепи.

8 Выбрать режим работы всех измерительных приборов.

9 Запустить процесс моделирования и выполнить измерения, необходимые для анализа процессов в исследуемой цепи. Результаты измерений занести в таблицу.

10 Используя результаты эксперимента, построить графики и временные диаграммы, позволяющие более детально изучить свойства исследуемого объекта.

11 Сделать выводы о проделанном исследовании.

Перенесение элементов в *рабочую зону* можно осуществлять в следующей последовательности. Курсором на *панели компонентов* найти пиктограмму **[Источники]**. Назначение пиктограммы поясняется всплывающей подсказкой, которая появляется после наведения курсора мыши на пиктограмму.

Однократным нажатием клавиши мыши открыть меню этой группы компонентов. В открывшемся окне **[Компонент]** выбрать компонент **[GROUND]** и клавишей мыши нажать кнопку **[OK]**. Открывается *рабочая зона*, на которой находится курсор с «привязанной» к нему пиктограммой заземлителя. Переместить мышью курсор в желаемую точку *рабочей зоны* и нажать однократно клавишу мыши. Произойдёт закрепление перемещаемой пиктограммы и одновременно снова открывается меню группы **[Источники]**. В окне **[Компонент]** выбрать требуемый для выполняемого экспериментального исследования источник питания (например, постоянного напряжения **[DC\_POWER]**, переменного напряжения **[AC\_POWER]**, источник несинусоидального напряжения **[PULSE\_VOLTAGE]** и т. д.), а затем клавишей мыши нажать кнопку **[OK]**. В *рабочей зоне* курсором разместить источник питания в желаемом месте и сделать однократное нажатие клавиши мыши. Это нажатие закрепляет выбранный источник на поле *рабочей зоны*. Одновременно снова открывается меню группы **[Источники]**. Если для исследуемой схемы необходим только один источник, то в открывшемся меню нажать кнопку **[Закрыты]**. Если для цепи требуется несколько источников питания, то операцию выбора и размещения источника питания с помощью кнопки **[OK]** необходимо выполнить соответствующее число раз, а затем, после закрепления последнего источника в *рабочей зоне*, нажать кнопку **[Закрыты]**.

Далее курсором необходимо на *панели компонентов* найти группу **[Пассивные компоненты]** и однократным нажатием клавиши мыши открыть меню этой группы. В окне **[Семейство]** активировать пиктограмму **[RESISTOR]** и нажать кнопку **[OK]**. Меню закроется и в открывшейся *рабочей зоне* можно найти курсор с «привязанным» к нему резистором.

Переместить курсор с резистором в желаемое место в *рабочей зоне* и нажать однократно клавишу мыши. Резистор закрепится в выбранном месте. Одновременно откроется меню, в котором (если в цепи содержатся несколько резисторов) снова нажать кнопку **[OK]**. В *рабочую зону* занесётся второй резистор и открывается меню. Если требуется большее количество

резисторов, то отмеченные выше операции с кнопкой **[OK]** и клавишей мыши повторяются. После закрепления последнего резистора в открывшемся меню нажать кнопку **[Закрыть]**. На этом операция занесения резисторов в *рабочую зону* завершена. Аналогично заносятся в *рабочую зону* различные конденсаторы **[CAPACITOR]** и катушки индуктивности **[INDUKTOR]**. Элементы цепи заносятся в *рабочую зону* с установленными по умолчанию значениями их параметров. Информация об этих значениях располагается в *рабочей зоне* рядом с пиктограммой элемента.

Для переноса в *рабочую зону* диодов необходимо на *панели компонентов* выбрать группу **[Диоды]** и однократным нажатием клавиши мыши открыть меню этой группы. В окне **[Семейство]** мышью выбрать элемент **[DIODES\_VIRTUAL]**, в окне **[Компонент]** выбрать **[Диоды]** и нажать кнопку **[OK]**. Меню закрывается и в открывшейся *рабочей зоне* появляется курсор с «привязанным» к нему диодом. Мышью этот диод перемещается в желаемое место *рабочей зоны* и однократным нажатием клавиши закрепляется в зоне. Одновременно снова открывается меню для выбора элементов, и можно выбрать и занести в *рабочую зону* путем нажатия кнопки **[OK]** очередной диод. После занесения последнего диода в меню нажимается кнопка **[Закрыть]**. Виртуальные компоненты имеют символ и модель, но без маркировки. Если необходимо в рабочей зоне использовать стабилитрон, то в окне **[Компонент]** выбрать **[ZENER]** и нажать кнопку **[OK]**. Далее процесс занесения в *рабочую зону* стабилитрона выполняется аналогично занесению обычного диода.

Занесение в *рабочую зону* транзистора начинается с выбора на *панели компонентов* группы **[Транзисторы]**. Нажатием клавиши мыши открывается меню этой группы. В окне **[Семейство]** выбрать тип транзистора, для *n-p-n* активировать строку **[BJT\_NPN]**, а для *p-n-p* – строку **[BJT\_PNP]**. В окне **[Компонент]** выбрать марку желаемого транзистора и нажать кнопку **[OK]**. Мышью транзистор перемещается в желаемое место *рабочей зоны* и однократным нажатием клавиши закрепляется в зоне. Одновременно снова открывается меню для выбора элементов, и можно выбирать и заносить в *рабочую зону* путем нажатия кнопки **[OK]** очередной транзистор. После занесения последнего транзистора в меню нажимается кнопка **[Закрыть]**.

Для перемещения в *рабочую зону* измерительных приборов необходимо выбрать курсором на *панели инструментов* требуемый прибор, например **[Мультиметр]**, и однократным нажатием клавиши мыши на его пиктограмму активировать этот прибор. На экране появится курсор с «привязанной» к нему пиктограммой. Переместить курсором пиктограмму в желаемое место и однократным нажатием клавиши мыши закрепить мультиметр в *рабочей зоне*. Аналогично переносятся ваттметр, осциллограф и другие приборы.

Если требуется удалить какой-либо элемент цепи из *рабочей зоны*, то курсором мыши он выделяется, а затем нажимается клавиша **[Delete]** на клавиатуре компьютера. Можно удалять и мышью. В этом случае курсором выбирается удаляемый элемент и нажимается клавиша мыши. Затем нажимается правая клавиша и в открывшемся меню выбирается команда **[Удалить]**. Нажатие клавиши приводит к удалению элемента.

Для сборки электрической цепи элементы, находящиеся в *рабочей зоне*, сначала надо разместить так, чтобы удобно было выполнять межэлементные соединения. За основу можно взять размещение элементов, приведённое в пособии на рисунке. Для перемещения элемента в *рабочей зоне* надо курсор мыши совместить с пиктограммой перемещаемого элемента. Нажать клавишу мыши и, не отпуская эту клавишу, переместить мышью элемент в желаемое место. Для фиксации элемента на новом месте клавишу мыши отпустить.

Если для удобства выполнения схемы надо повернуть пиктограмму элемента в *рабочей зоне*, то курсор наводится на пиктограмму этого элемента и кратковременно нажимается клавиша мыши. Нажатием клавиш **[Ctrl + R]** на клавиатуре компьютера осуществляется поворот пиктограммы по часовой стрелке на  $90^\circ$ . Для поворота против часовой стрелки необходимо нажать клавиши **[Ctrl + Shift + R]**. Нажатием клавиш **[Alt + X]** или **[Alt + Y]** можно поворачивать и на  $180^\circ$  по горизонтали или вертикали. Для поворота мышью нажимается её правая клавиша и в открывшемся меню выбирается и активируется желаемая команда: **[90 по часовой]**, **[90 против часовой]**, **[Развернуть по горизонтали]**, **[Развернуть по вертикали]**.

При сборке электрической цепи выводы элементов соединяются в соответствии с её принципиальной схемой, приведенной в описании методики исследования. Для выполнения межэлементных соединений курсор подводится к выводу элемента до появления вместо стрелки крестообразного значка небольшого размера. Однократным щелчком клавишей мыши зафиксировать начало соединительного проводника. Переместить крестообразный значок к выводу следующего элемента и ещё раз щелкнуть клавишей мыши. Между выбранными выводами должен появиться соединительный проводник (по умолчанию красного цвета). Подключить вывод элемента можно и к межэлементному проводнику, соединяющему выводы двух других элементов. В этом случае мышью с крестообразным курсором закрепляется на выводе элемента начало соединительного проводника, а его конец подводится к межэлементному проводнику, и клавишей мыши выполняется необходимое соединение. **Перемычки между двумя уже проложенными проводниками в рабочей зоне ставить нельзя. Проводник должен начинаться с вывода элемента, а заканчиваться на другом выводе или на другом проводнике.**

Цвет соединительного проводника по желанию можно изменить, для этого курсор наводится на проводник и нажимается правая клавиша мыши. В открывшемся меню выбрать **[Цвет цепи]** и нажать клавишу. Открывается окно **[Палитра]**, в котором мышью выбрать зону с желаемым цветом и нажать клавишу. После выбора зоны с желаемым цветом нажать кнопку **[OK]**.

Для удаления проводника курсор наводится на проводник и кратковременным нажатием клавиши мыши он выделяется. Нажатием клавиши **[Delete]** на клавиатуре компьютера происходит удаление выделенного проводника. Удаление можно осуществить и мышью. Для такого удаления после выделения объекта нажимается правая клавиша мыши и в открывшемся меню находится команда **[Удалить]**. Клавишей мыши эта команда активируется и происходит удаление.

Далее необходимо задать необходимые параметры элементам цепи (источникам питания, резисторам, конденсаторам, катушкам индуктивности, измерительным приборам и т. д.).

**Задавать или изменять параметры элементов или измерительных приборов можно только при выключенном моделировании.** При вводе десятичных чисел разделительным элементом числа является **не запятая, а точка**. Обозначение приставок к единицам измерения параметров приведены в таблице 1.1.

**Таблица 1.1 – Обозначение приставок к единицам измерения параметров**

| Приставка | Русское обозначение | Обозначение в Multisim | Порядок множителя |
|-----------|---------------------|------------------------|-------------------|
| Тера      | Т                   | T                      | $10^{12}$         |
| Гига      | Г                   | G                      | $10^9$            |
| Мега      | М                   | M                      | $10^6$            |
| Кило      | к                   | k                      | $10^3$            |
| Милли     | м                   | m                      | $10^{-3}$         |
| Микро     | мк                  | u                      | $10^{-6}$         |
| Нано      | н                   | n                      | $10^{-9}$         |
| Пико      | п                   | p                      | $10^{-12}$        |

Выбор параметров источника питания начинается с открытия его меню. Для этого курсор мыши устанавливается на пиктограмму источника в *рабочей зоне* и дважды нажимается клавиша. В открывшемся окне параметров в строках **[Напряжение]**, **[Частота]**, **[Фаза]** и т. д. записываются требуемые значения, взятые из приложения А, а затем окно закрывается. Более детально необходимые параметры источников указываются в каждой

работе.

Для задания параметров пассивных элементов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности) курсор наводится на пиктограмму элемента и дважды нажимается клавиша мыши. В открывшемся окне, в строке параметра элемента (обозначается для резистора **[Сопротивление]**, для конденсатора **[Емкость]**, а для катушки индуктивности **[Индуктивность]**), занести требуемое значение и закрыть окно. Если дополнительно не оговаривать единицу измерения параметра, то по умолчанию программа Multisim воспринимает вводимую информацию для напряжения источника питания в вольтах В, его частоты в герцах Гц, сопротивления резистора в омах Ом, индуктивности дросселя в генри Гн, а электрической ёмкости конденсатора в фарадах Ф.

### **Задание 1**

Для закрепления полученной информации необходимо в рабочую зону занести источник переменного напряжения **[AC\_POWER]**, источник постоянного напряжения **[DC\_POWER]**, один резистор, один конденсатор, одну катушку индуктивности (дроссель), один виртуальный диод, один транзистор типа *p-n-p* и один типа *n-p-n*, один ваттметр и два мультиметра.

Открыть меню источника питания переменного напряжения и задать ему напряжение **100** В, а рабочую частоту **100** Гц. Аналогично источнику питания постоянного напряжения задать значение напряжения **100** В. Установить для резистора значение сопротивления **100** Ом, для дросселя индуктивность **100** мГн, а для конденсатора ёмкость **100** мкФ. Один мультиметр перевести в режим измерения переменного напряжения, а второй в режим измерения постоянного тока. Проверить возможность перемещения элементов в рабочей зоне. Повернуть катушку индуктивности и резистор на **90°** по часовой стрелке. Результаты проделанной работы сохранить в **[Файл] (имя файла.ms14)** и показать преподавателю. Остановить моделирование нажатием кнопки **[■]** и удалить все элементы из рабочей зоны.

### **1.3 Работа с измерительными приборами**

Методика задания режима работы измерительных приборов индивидуальна для каждого вида прибора. Одним из часто применяемых приборов является мультиметр. Его пиктограмма приведена на рисунке 1.3, а. Она состоит из символьного изображения прибора и его идентификатора (ХММ1). Мультиметр универсальный прибор. Он предназначен для измерения переменного или постоянного тока и напряжения, сопротивления участков цепи и затухания между двумя узлами. Диапазон измерения

мультиметра выбирается автоматически. Единицы измерения отображаются в информационном поле лицевой панели мультиметра.

Двойным нажатием клавиши мыши на пиктограмму мультиметра (см. рисунок 1.3, *а*) открывается его лицевая панель (рисунок 1.3, *б*). На панели находится темное информационное поле, используемое для отображения

результата измерения. Ниже его находятся кнопки , , ,

, , . С помощью этих кнопок выбирается вид измерительного прибора: **A** – амперметр, **V** – вольтметр, **Ω** – омметр, **dB** – прибор для измерения затухания между двумя узлами. Кнопками  и  задаётся род тока, подлежащего измерению. Единица измерения прибором выбирается автоматически и отображается на информационном поле.

**Мультиметр, включённый последовательно с каким-либо элементом цепи, обязательно должен работать в режиме амперметра, а включённый параллельно – в режиме вольтметра.**

В нижней части панели находится кнопка **[Параметры]**. С её помощью можно изменять внутреннее сопротивление мультиметра. В работах используются параметры, установленные по умолчанию. В левом и правом нижних углах отображаются входные клеммы прибора (положительная и отрицательная). Для перемещения лицевой панели в *рабочей зоне* необходимо курсор мыши навести на слово **[Мультиметр]** на панели прибора. Нажать клавишу мыши и, не отпуская клавишу, мышью переместить панель и отпустить клавишу.

*б)*

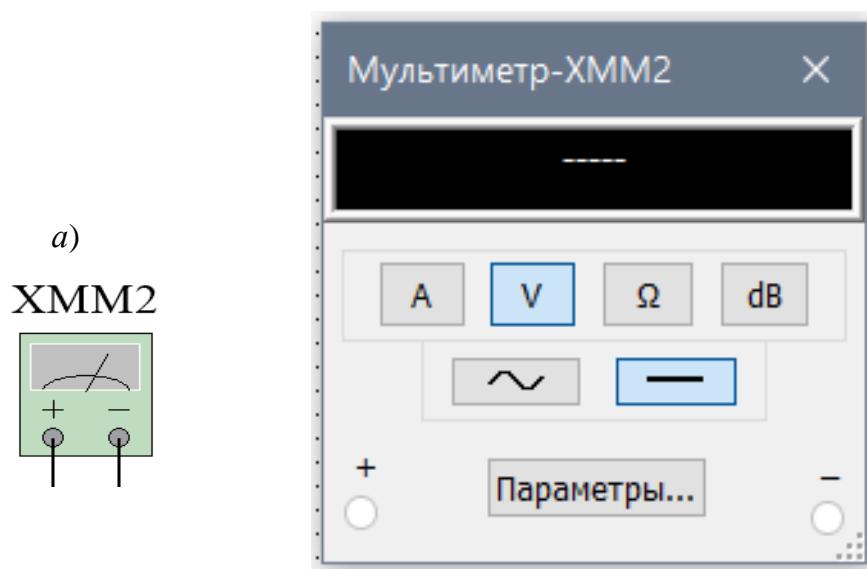
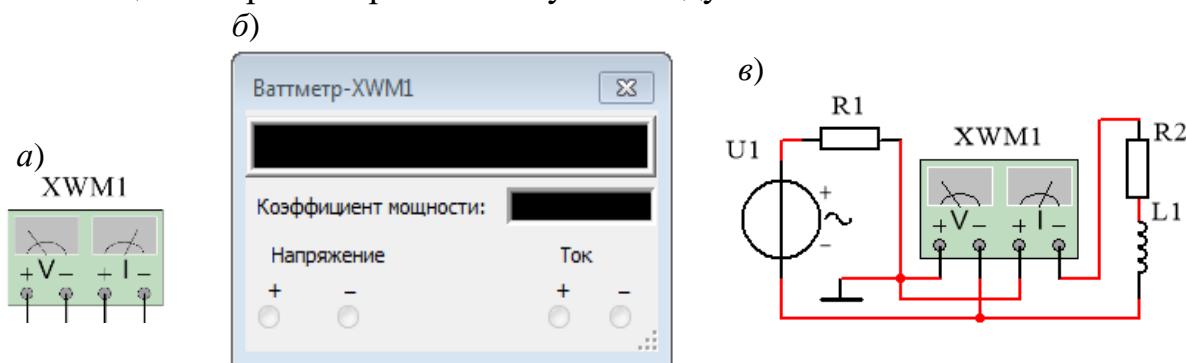


Рисунок 1.3 – Пиктограмма мультиметра (*а*) и его лицевая панель (*б*)

Ваттметр не требует настройки, надо лишь правильно его включить и открыть лицевую панель прибора. У ваттметра на пиктограмме имеются два входа (канала): вход напряжения [V] и вход тока [I] (рисунок 1.4, *a*, *b*). Вход [V] включается параллельно участку цепи, на котором необходимо измерить мощность, а вход [I] включается последовательно. Пример включения приведён на рисунке 1.4, *в*. На этом рисунке ваттметр измеряет мощность на участке цепи, состоящем из последовательно соединённых резистора  $R_2$  и катушки индуктивности  $L_1$ .

**При подключении входные зажимы ваттметра, обозначенные знаком [+], обязательно соединяются между собой и подключаются к участку цепи, идущему к источнику питания.** В этом случае ваттметр будет показывать мощность, поступающую от источника питания в нагрузку.

Отрицательный вход канала [I] подключается последовательно к участку цепи, на котором необходимо измерить мощность. Отрицательный вход канала [V] подключается таким образом, чтобы на этот канал поступало напряжение на выбранном участке. На рисунке 1.4, *в* таким участком является цепь из резистора  $R_2$  и катушки индуктивности  $L_1$ .



После подключения ваттметра курсор мыши наводится на его пиктограмму (см. рисунок 1.4, *а*) и двойным нажатием клавиши мыши открывается лицевая панель, которая имеет вид, изображённый на рисунке 1.4, *б*. На этой панели имеются два информационных поля (закрашены тёмным цветом). Верхнее информационное поле служит для отображения значения мощности, а нижнее выдаёт значение коэффициента мощности  $\cos \varphi$ .

## Задание 2

С целью закрепления полученной информации занести в рабочую зону один источник переменного напряжения [AC\_POWER], один элемент заземления, два резистора, один конденсатор, два мультиметра и один ваттметр. Собрать в соответствии с рисунком 1.5 замкнутую цепь, состоящую из последовательно соединённых источника питания, двух

резисторов, конденсатора, ваттметра и одного из мультиметров. Второй мультиметр подключить параллельно одному из резисторов (его входные клеммы подключаются к выводам этого резистора). К одному из выводов источника питания подключить элемент заземления.

Монтаж электрической цепи начинается с размещения элементов, находящихся в рабочей зоне, таким образом, чтобы удобно было выполнять межэлементные соединения. За основу можно взять размещение элементов, приведённое на рисунке 1.5. Далее по ранее рассмотренной методике выполнить все межэлементные соединения.

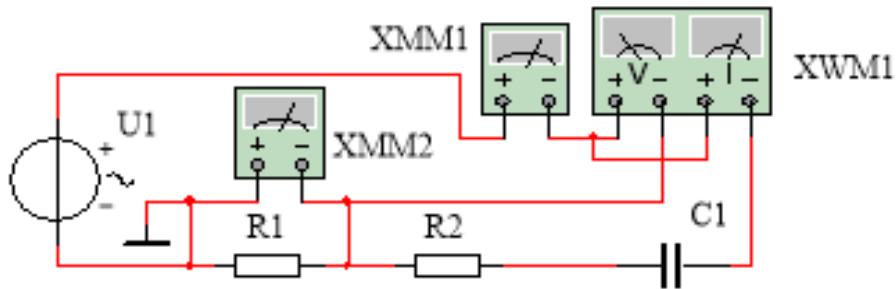


Рисунок 1.5 – Пример подключения измерительных приборов в электрическую цепь

Открыть окно параметров источника питания и установить значения его напряжения и частоты, взятые по указанию преподавателя из приложения А. Аналогично из этого приложения взять и записать в окнах параметров значения сопротивления резисторов и ёмкости конденсатора.

Открыть окна приборов. Перевести мультиметр, включённый последовательно, в режим измерения переменного тока (нажимая соответствующие кнопки в его открытом окне), а мультиметр, включённый параллельно резистору, – в режим измерения переменного напряжения.

Запустить процесс моделирования нажатием кнопки [►] на панели моделирования. Убедиться по показаниям мультиметров, что в цепи протекает ток и на резисторе возникает падение напряжения. Определить по ваттметру значение активной мощности и косинуса угла сдвига фаз (коэффициента мощности). Результаты проделанной работы сохранить в [Файл] (имя файла.ms14) и показать преподавателю. Остановить моделирование нажатием кнопки [■] и удалить все элементы из рабочей зоны.

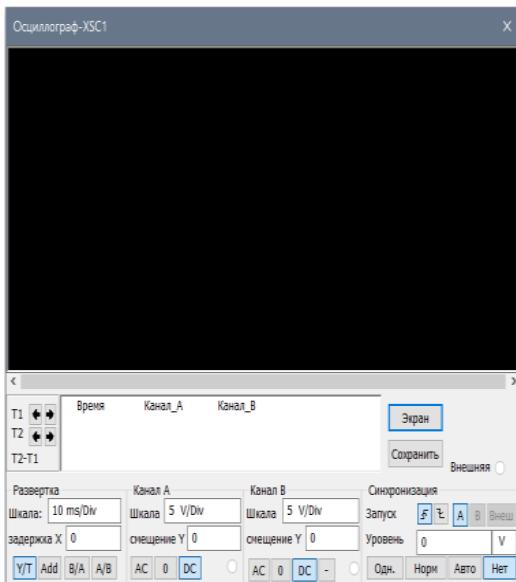
Следующим прибором, широко используемым в экспериментальных исследованиях, является осциллограф. С помощью этого прибора можно исследовать процесс изменения во времени напряжения сигнала, а, используя датчик тока, можно осуществлять контроль за изменением во времени тока. В Multisim есть несколько модификаций виртуальных осциллографов, которыми можно управлять как настоящими. Они позволяют устанавливать желаемые чувствительность канала вертикального отклонения и длительность развёртки, выбирать тип и уровень запуска последней.

Для настройки осциллографа (2-канального) курсор мыши наводится на пиктограмму **[Осциллограф]** и двойным нажатием клавиши мыши открывается лицевая панель. Она имеет вид, изображённый на рисунке 1.6, *а*. На панели осциллографа можно выделить семь окон (рисунок 1.6, *б*). В верхней части панели находится окно графического дисплея (на рисунке 1.6, *а* по умолчанию фон экрана чёрный, а на рисунке 1.6, *б* фон изменён на белый). Изменение цвета фона экрана осуществляется активацией мышью кнопки **[Экран]**, которая находится под окном дисплея.

В этом окне отображаются графики изменения во времени сигналов, подаваемых на входы каналов *A* и *B*. На рисунке 1.6, *б* в качестве примера представлен график, показывающий изменение во времени напряжения прямоугольной формы, которое подано на канал *A*. Таким образом, в осциллографе ось ординат является осью напряжений, а ось абсцисс – осью времени.

Под дисплейным окном находится панель управления осциллографом, на которой, в свою очередь, можно выделить шесть важнейших окон (см. рисунок 1.6, *б*). Непосредственно под дисплеем находится окно **[Управление маркерными линиями]** и окно **[Значения исследуемых параметров]**. Ниже этих двух окон размещаются окна **[Развёртка]**, **[Канал А]**, **[Канал В]** и **[Синхронизация]**.

*а)*



*б)*

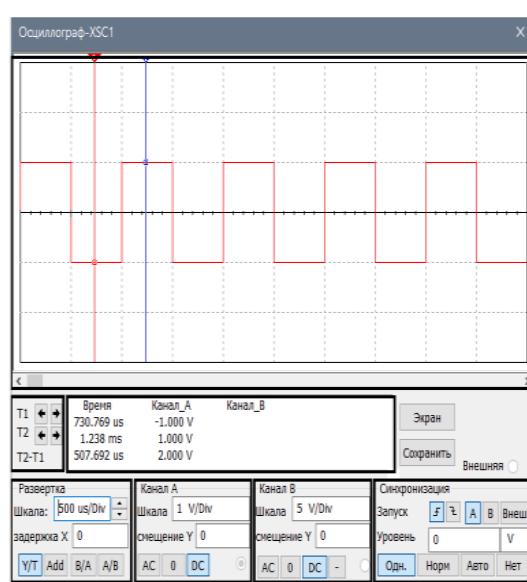


Рисунок 1.6 – Лицевая панель осциллографа:  
*а* – сразу после открытия; *б* – в ходе процесса моделирования

При запуске программы на дисплее появляются две оси координат с координатной сеткой и две маркерные линии, которые по умолчанию совмещены с осью ординат. Над маркерными линиями находятся треугольники, используемые для перемещения этих линий. Маркерные

линии позволяют получить численное значение напряжения в любой точке изображенной на дисплее кривой как в канале *A*, так и в канале *B*. Для этого необходимо маркерную линию переместить в желаемую точку кривой и в окне значений параметров под заголовками **[Канал A]** и **[Канал B]** появятся числа. Они указывают на значение напряжения в точке пересечения линии с графиком исследуемой кривой соответственно в канале *A* и канале *B*. Причём первое число под заголовком указывает на значение напряжения, получаемое пересечением линии № 1, а второе – пересечением линии № 2. Третье число под заголовком соответствует разности напряжений, указываемых первой и второй линиями.

Для перемещения этих линий используется окно управления маркерными линиями. В этом окне в строке **T1** находятся две кнопки: **[◀]** и **[▶]**. Активацией курсором мыши этих кнопок линия № 1 (номер линии указан в треугольнике над линией) перемещается по оси времени (оси *X*). Значение времени в точке нахождения линии отображается в окне значений параметров под заголовком **[Время]**. Аналогично в строке **T2** имеются кнопки **[◀]** и **[▶]**, с помощью которых перемещается линия № 2. Её время отображается во второй строке под заголовком **[Время]**. В третьей строке **[T2–T1]** под этим заголовком записывается число, равное разности чисел в первой и второй строках.

Кнопками **[◀]** и **[▶]** реализуется пошаговое перемещение маркерных линий. Для ускоренного перемещения необходимо курсор мыши совместить с треугольником линии и нажать клавишу мыши. С нажатой клавишей мышью переместить линию в выбранную точку оси *X* и отпустить клавишу. В примере, представленном на рисунке 1.6, б, маркерная линия № 1 совмещена с отрицательной полуволной исследуемого сигнала, а линия № 2 – с положительной. Под заголовком **[Время]** на рисунке 1.6, б отображаются числа **730.769 us**, **1.238 ms** и **507.692 us**. Первое число указывает на положение маркерной линии № 1 на временной оси (**730,769** микросекунд). Второе число – положение линии № 2 на оси времени (**1,238** миллисекунды). Третье число соответствует разнице во времени между линиями (**507,692** микросекунды). **В десятичных числах, выдаваемых программой, разделительным элементом служит точка.** Наличие двух линий позволяет с их помощью определить такие временные параметры сигнала, как длительность импульса и период исследуемого сигнала.

Под заголовком **[Канал A]** находятся три числа: **-1.000**, **1.000** и **2.000**. Первое число даёт значение напряжения в точке пересечения маркерной линии № 1 с графиком, отображающим зависимость исследуемого напряжения от времени (**-1.000** В). Второе число – значение напряжения в точке пересечения линии № 2 с графиком (**1.000** В). Третье число соответствует разности между двумя предыдущими числами (**2.000** В).

В окне **[Развёртка]** в строке **[Шкала]** устанавливается длительность развёртки (сколько единиц времени содержится в одном большом делении на экране дисплея). Для изменения длительности развёртки курсор мыши наводится на поле, на котором отображается её значение. Работая клавишей мыши, необходимо установить требуемое значение развёртки. На рисунке 1.6, б в строке **[Шкала]** записано число **500 us/Div**. Это значит, что одно деление на оси  $X$  соответствует временному промежутку в 500 микросекунд. Рекомендуется длительность развёртки выбирать такой, при которой на экране дисплея будут показаны 2–3 периода исследуемого сигнала. Для этого значение длительности развёртки должно находиться в пределах  $(0,25–0,33)T$ , где  $T$  – период изменения напряжения исследуемого сигнала. Изменением длительности развёртки осуществляется сжатие или растяжение графика по горизонтали. В строке **[задержка X]** записывается время, на которое смещается график по оси  $X$ . В рассматриваемых ниже экспериментальных работах это время должно быть равно нулю (такое значение установлено по умолчанию).

В нижней части окна находятся кнопки, с помощью которых изменяется вид функции, отображаемой на дисплее. В экспериментальных работах должна быть активирована кнопка **[Y / T]**. В этом случае на экране будет отображаться зависимость значений исследуемых напряжений, подаваемых на каналы **[A]** и **[B]**, от времени. По умолчанию эта кнопка активирована.

В окне **[Канал A]** осциллографа строка **[Шкала]** используется для задания его чувствительности. Она позволяет мышью изменять размер изображения по вертикали. Курсор наводится на поле рядом с надписью **[Шкала]** и клавишей мыши выбирается требуемое значение чувствительности. Чувствительность показывает сколько единиц напряжения приходится на одно большое деление шкалы дисплея. Так, на рисунке 1.6, б в строке **[Шкала]** канала **[A]** занесено число **1**. Это значит, что при напряжении **1** В луч, вычерчивающий кривую на экране дисплея, отклонится от нулевой линии на одно большое деление. Рекомендуется предварительно чувствительность осциллографа выбирать такой, при которой максимальное отклонение луча на экране дисплея от нулевой линии не превысит 1,5–2 деления. Для этого значение чувствительности **V/Div** должно находиться в пределах  $(0,5–0,7)U_m$ , где  $U_m$  – значение предполагаемой амплитуды напряжения исследуемого сигнала в вольтах. Выбранная чувствительность осциллографа используется при определении потенциальных параметров с помощью маркерных линий.

В строке **[Смещение]** можно записать число, смещающее ось  $X$  по вертикали. Это позволяет в случае необходимости сдвинуть по вертикали отображаемые кривые вверх или вниз от исходного положения. По умолчанию смещение отсутствует. Рекомендуемое значение смещения указано в порядке выполнения экспериментальной работы.

В нижней части окон каналов находятся кнопки [AC], [0], [DC]. Активирование кнопки [AC] позволяет исследовать только переменную составляющую исследуемого сигнала. Постоянная составляющая не пропускается. Кнопка [0] отключает сигнал от входа осциллографа. Третья кнопка пропускает постоянную и переменную составляющие сигнала. Эта кнопка по умолчанию активирована. Всё описанное для окна [Канал А] справедливо и для окна [Канал В]. Дополнительно в окне [Канал В] имеется кнопка [–]. Она задаёт инверсный режим работы осциллографа в этом канале, в котором сигнал инвертируется относительно оси X.

Блок синхронизации любого осциллографа служит для «привязки» начала развёртки к какой-либо точке на кривой исследуемого сигнала. Это позволяет сделать неподвижным изображение кривой на экране. В данном осциллографе для настройки режима синхронизации служит окно [Синхронизация]. Начинается настройка с выбора источника синхронизирующего сигнала. В строке [Запуск] имеются три кнопки [A], [B] и [Внеш]. С помощью активации курсором мыши какой-либо из этих кнопок выбирается источник сигнала синхронизации: канал A, канал B или внешний источник. По умолчанию таким источником является канал A. В этой строке находятся ещё две кнопки: [ $\oplus$ ] и [ $\ominus$ ]. Эти кнопки указывают на фронт сигнала, от которого происходит синхронизация. Активирование кнопки [ $\oplus$ ] реализует синхронизацию от переднего фронта (участок, на котором происходит нарастание напряжения), а кнопка [ $\ominus$ ] синхронизирует от заднего фронта (участок, на котором происходит снижение напряжения). В строке [Уровень] имеется поле, задающее уровень напряжения, при котором осуществляется синхронизация. По умолчанию этот уровень равен нулю. Для изменения этого напряжения курсор мыши совмещается с полем и кратковременным нажатием клавиши мыши записывается в поле требуемое значение напряжения. В нижней части окна [Синхронизация] расположены четыре кнопки: [Одн.], [Норм], [Авто], [Нет].

[Одн.] (Однократный) – режим ожидания сигнала синхронизации. Используется этот режим для регистрации однократного сигнала или записи периодического сигнала один раз.

[Норм] (Обычный) – в данном режиме осциллограф обновляет изображение на экране графического дисплея каждый раз при достижении уровня синхронизации.

[Авто] (Автоматический) – сигнал синхронизации создается автоматически, данный режим используется в том случае, когда невозможно создать сигнал запуска в однократном или обычном режиме. Запуск осциллограммы производится автоматически при подключении осциллографа к схеме.

**[Нет]** (Синхронизация отсутствует) – данный режим может быть использован в случае измерения напряжения постоянного тока, а также для установления факта наличия сигнала на входе осциллографа. В верхней правой части панели управления осциллографа расположены две кнопки: **[Экран]** и **[Сохранить]**. Кнопка **[Экран]** используется для инверсии цвета фона экрана графического дисплея осциллографа: она позволяет реализовать переключение между белым и черным цветом фона. С помощью кнопки **[Сохранить]** можно реализовать запись информации в файл.

### Задание 3

Для приобретения практического опыта работы с осциллографом необходимо в рабочую зону занести один источник переменного напряжения **[AC\_POWER]**, один элемент заземления, один резистор, один конденсатор, один мультиметр и осциллограф. В соответствии с рисунком 1.7 собрать замкнутую последовательную цепь, состоящую из источника питания, резистора, мультиметра и конденсатора. Элемент заземления подключить к одному из выводов источника питания. Входные зажимы канала A осциллографа подключить к выводам резистора, а канала B – к выводам конденсатора. Мультиметр перевести в режим измерения переменного тока. Значение напряжения источника питания  $U$ , его рабочую частоту  $F$ , сопротивление резистора  $R1$  и ёмкость конденсатора  $C1$  установить по заданию преподавателя в соответствии с приложением А. Открыть панель осциллографа. Запустить процесс моделирования нажатием кнопки **[►]**.

Активировать кнопку однократной развёртки **[Одн.]**. Выбрать чувствительность каналов A и B такую, при которой размер изображения каждой осциллограммы по вертикали составляет не более двух клеток. В строке **[Шкала]** установить длительность развёртки такой, при которой на экране отображается 2–3 периода исследуемого сигнала.

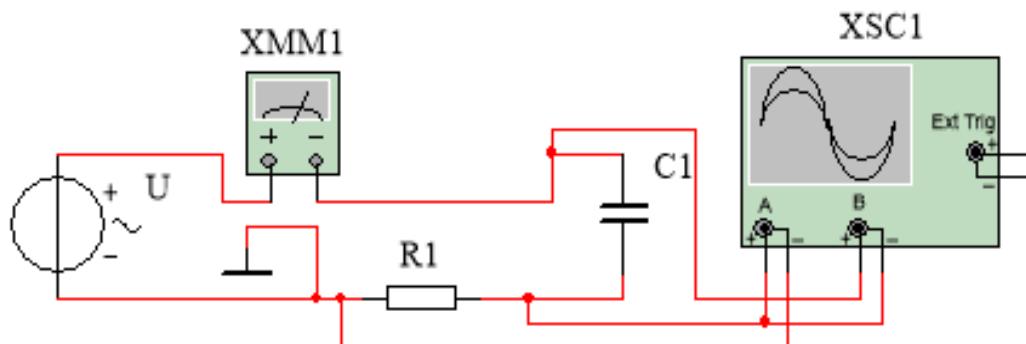


Рисунок 1.7 – Пример подключения осциллографа в электрическую цепь

С помощью строк [Смещение] в каналах *A* и *B* осуществить перемещение осцилограмм: одну выше исходного положения (в положительном направлении) на одно деление, а другую вниз на одно деление (в отрицательном направлении). Для этого в строке [Смещение] канала *A* записать число 1, а в строке [Смещение] канала *B* записать –1. Остановить моделирование нажатием кнопки [■].

Установить одну маркерную линию в точку, соответствующую максимуму напряжения на резисторе, а вторую в точку, соответствующую максимуму напряжения на конденсаторе, и определить значение амплитудного напряжения на резисторе и конденсаторе. Переместить маркерные линии в точки, соответствующие двум соседним максимумам осцилограммы напряжения на резисторе. В окне исследуемых параметров под заголовком [Время] в третьей строке (*T<sub>2</sub>–T<sub>1</sub>*) отобразится значение периода исследуемого напряжения. Определить значение тока в цепи. Результаты проделанной работы сохранить в [Файл] (имя файла.ms14), показать преподавателю и удалить все элементы из рабочей зоны.

В дальнейших исследованиях будет использоваться и 4-канальный осциллограф. В рабочую зону этот осциллограф заносится так же, как и 2-канальный. Однократным нажатием клавиши мыши, совмещённой с пиктограммой 4-канального осциллографа (рисунок 1.8, *а*), открывается его лицевая панель (рисунок 1.8, *б*).

Основные отличия лицевой панели 4-канального осциллографа от 2-канального наблюдаются в окне значений исследуемых параметров и в окне каналов. В окне значений исследуемых параметров добавлены ещё два канала: ([Канал\_C] и [Канал\_D]). Числа под этими заголовками несут такую же информацию, что и под заголовками [Канал\_A] и [Канал\_B]. В окне каналов всегда отображается информация только об одном канале, который выбран переключателем каналов. Переключатель находится в окне каналов. Его вид отдельно приведён на рисунке 1.9, *а*.

Для выбора канала курсор мыши устанавливается на тёмном диске вблизи буквы, соответствующей требуемому каналу, и кратковременно нажимается клавиша мыши. С этого момента информация в окнах [Развёртка], [Синхронизация] и окне каналов относится к выбранному каналу. На рисунке 1.9, *б* показан вид панели осциллографа с выбранным каналом [B].

б)

а)

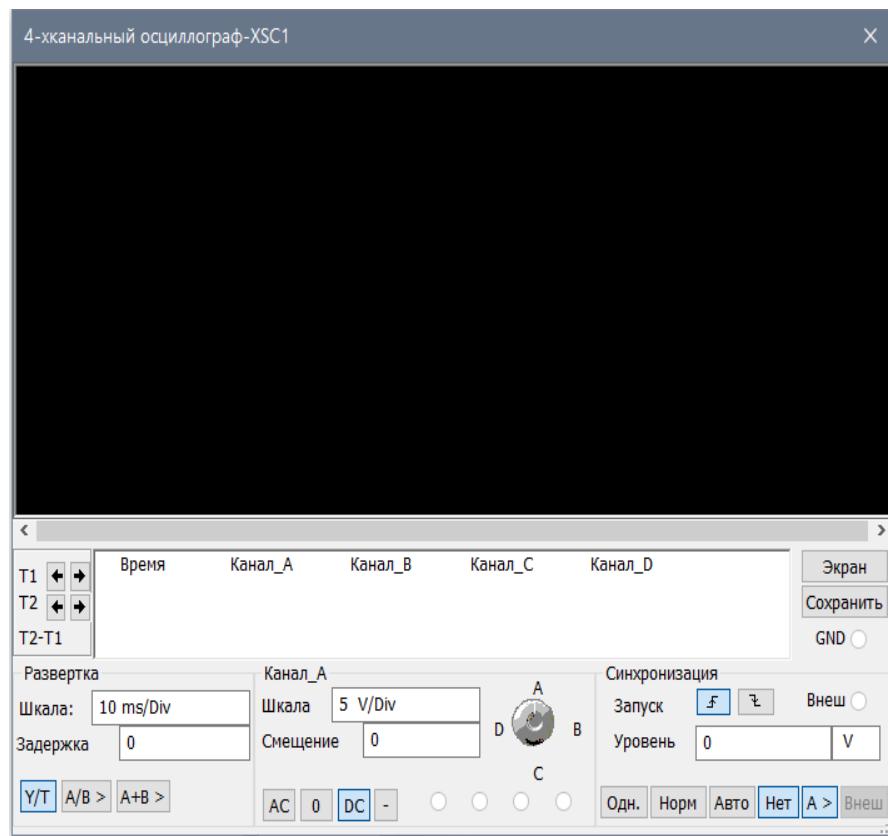
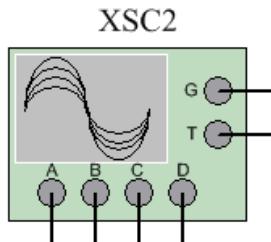


Рисунок 1.8 – 4-канальный осциллограф:

а – пиктограмма; б – лицевая панель прибора

Длительность развёртки этого осциллографа, а также чувствительность каждого из выбранных каналов устанавливается так же, как и у 2-канального. В нижней части окна [Синхронизация] добавлена кнопка [A>]. При её активации курсором мыши появляется меню, в котором можно выбрать канал, от сигнала которого будет осуществляться синхронизация.

а)



б)

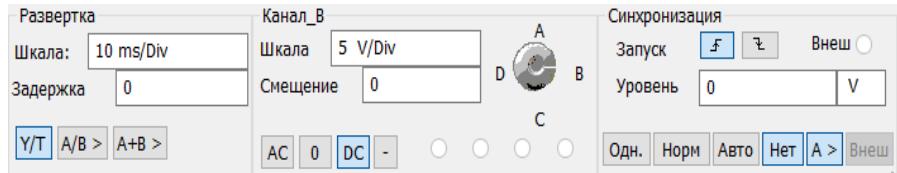


Рисунок 1.9 – Переключатель каналов (а) и панель каналов 4-канального осциллографа с выбранным каналом [В] (б)

Ещё одним прибором, который используется в экспериментальных исследованиях является анализатор спектра. С его помощью можно определить наличие гармоник в исследуемом сигнале, их частоту и амплитуду. В отличии от осциллографа, анализатор спектра показывает зависимость напряжения от частоты. Это значит, что ось *X* этого прибора

является осью частоты. В рабочую зону анализатор заносится также, как и остальные приборы.

Для установки режима работы анализатора необходимо двойным нажатием клавиши мыши по его пиктограмме (рисунок 1.10, *а*) открыть лицевую панель. Её вид приведён на рисунке 1.10, *б*. Левую часть панели занимает экран дисплея в чёрном фоне. Под экраном находятся кнопки [ $\leftarrow$ ] и [ $\rightarrow$ ], с помощью которых осуществляется перемещение маркерной линии по горизонтали (она появляется после запуска программы).

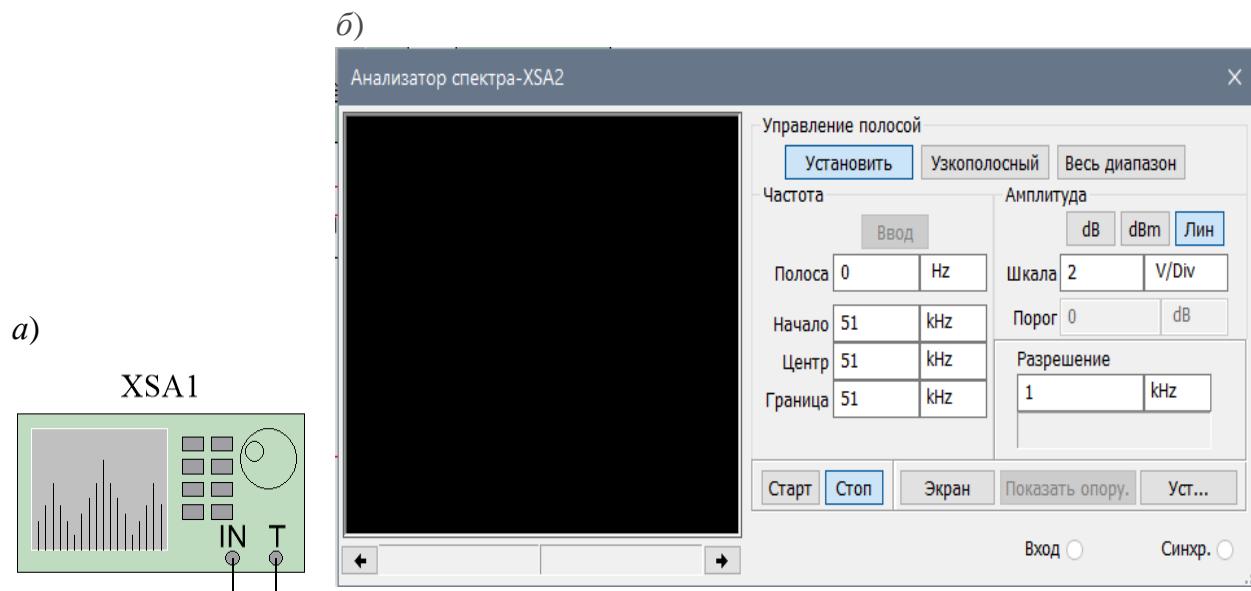


Рисунок 1.10 – Анализатор спектра:  
*а* – пиктограмма; *б* – лицевая панель прибора

В верхней части панели имеются кнопки [Установить], [Узкополосный], [Весь диапазон]. С их помощью выбирается частотный диапазон, в котором планируется измерять напряжение гармоник. Ниже имеются поля [Полоса], [Начало], [Центр], [Граница]. В этих полях записываются значения частот, определяющие ширину полосы пропускания, начальное значение исследуемого диапазона частот, его среднее значение и верхняя граничная частота анализатора. Эти значения устанавливаются на основании задания на экспериментальную работу. Необходимо записать численное значение частоты и единицу её измерения (Гц, кГц, МГц и т. д.). Запись осуществляется наведением курсора мыши на соответствующее поле, а нажатием клавиши устанавливается значение параметра, которое указано в методике исследования.

Под заголовком [Амплитуда] находятся кнопки [dB], [dBm] и [Лин], с помощью этих кнопок выбирается шкала на оси напряжений (ось ординат). В практических работах должна быть активирована кнопка [Лин]. Ниже этих

кнопок находится поле **[Шкала]**. Здесь записывается значение чувствительности анализатора по оси ординат. Она показывает сколько единиц напряжения приходится на одно большое деление на экране. Выбирается такое значение чувствительности, при котором изображение кривых на экране дисплея будет возможно большим, но не выходящим за границы экрана.

Кнопками **[Старт]** и **[Стоп]** осуществляется запуск и остановка процессов в приборе. По умолчанию до запуска моделирования активирована кнопка **[Стоп]**. При запуске моделирования активируется кнопка **[Старт]**. При желании после запуска процесса моделирования кнопкой **[Экран]** экранное поле можно сделать светлым. Настройка прибора происходит следующим образом. При выключенном моделировании в полях **[Полоса]**, **[Начало]**, **[Центр]**, **[Граница]** записываются рекомендуемые в работе значения частот. Нажимается мышью кнопка **[Ввод]** и в поле **[Разрешение]** записывается значение частоты, примерно равное  $(0,2\text{--}0,4)F$ , где  $F$  – частота тока источника сигнала. Запускается процесс моделирования и выбирается рекомендуемая в работе чувствительность анализатора. С помощью маркерной линии, перемещаемой в точку, соответствующую максимальному отклонению графика от оси  $X$ , определяется амплитудное значение требуемой гармоники (рисунок 1.11). Маркерная линия перемещается также, как это делалось в 2-канальном осциллографе.

После установки маркерной линии в полях под графическим дисплеем появляются два числа. Левое число соответствует частоте гармоники, а правое – её амплитудному значению напряжения.

Для снятия характеристик транзисторов и диодов используется характеристиограф. Характериограф – прибор, с помощью которого можно изучать свойства элементов электрической и электронной цепей путём снятия их вольтамперных характеристик (ВАХ). Измерительная информация отображается в виде графиков, выводимых на экран графического дисплея. В программе Multisim с помощью характеристографа можно построить характеристики диодов и транзисторов.

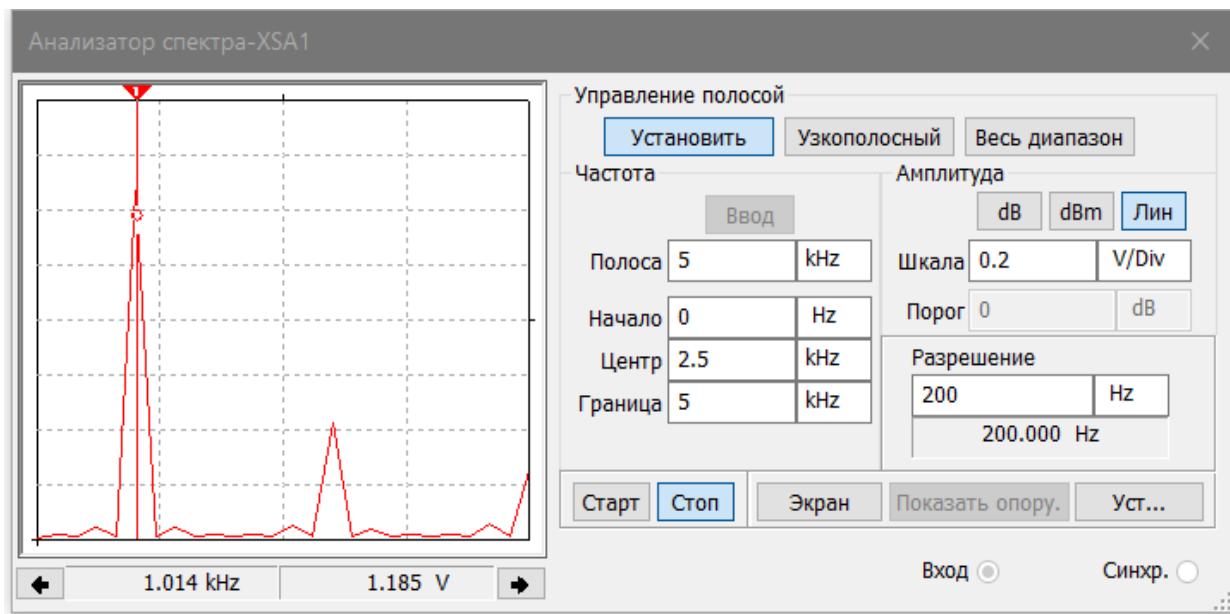


Рисунок 1.11 – Лицевая панель работающего анализатора спектра

Заносится в рабочую зону пиктограмма харктериографа с панели инструментов так же, как и для других приборов. Вид пиктограммы приведён на рисунке 1.12, *а*. Выбор режима работы харктериографа начинается с открытия лицевой панели прибора. С этой целью курсор мыши совмещается с пиктограммой прибора и делается двойной щелчок клавишей мыши. Вид открывшейся панели приведён на рисунке 1.12, *б*.

В левой части панели находится чёрный экран дисплея, на котором будет отображаться ВАХ исследуемого прибора. Под экраном находятся кнопки **[←]** и **[→]**, перемещающие маркерную линию по экрану харктериографа (линия появится после начала моделирования). При перемещении этой линии в окнах под экраном появляются числа. В левом окне отображается значение напряжения в точке ВАХ, выбранной маркерной линией, а в правом окне – соответствующее этому напряжению значение тока.

Правее экрана находится поле **[Выбор компонента]**. Для выбора исследуемого компонента курсор мыши наводится на строку **[Diode]** и нажимается клавиша мыши. Открывается меню, в котором содержатся следующие элементы:

- [Diode]** – различные полупроводниковые диоды;
- [BJT PNP]** – биполярные транзисторы структуры *p-n-p*;
- [BJT NPN]** – биполярные транзисторы структуры *n-p-n*;
- [PMOS]** – полевые транзисторы с каналом *p*-типа;
- [NMOS]** – полевые транзисторы с каналом *n*-типа.

Ниже строки **[Diode]** находятся поля **[Шкала тока A]** и **[Шкала напряжения V]**. В этих полях указываются верхнее и нижнее значения токов на оси токов и верхнее и нижнее значения напряжения на оси напряжений. В

строке [В] показано верхнее значение, а в строке [Н] – нижнее значение шкалы. Шкалы могут иметь логарифмический [Лог] или линейный [Лин] масштаб. В работах используется линейный масштаб, который установлен по умолчанию. Если потребуется логарифмический масштаб, то на это будет указано дополнительно. Ниже поля [Шкала напряжения В] находится кнопка [Экран]. С помощью этой кнопки в процессе моделирования можно сделать экран светлым.

Под кнопкой [Экран] находится кнопка [Моделирование]. Нажатие мышью этой кнопки открывает меню [Параметры моделирования]. В строках этого меню надо задаться диапазоном изменения напряжения, подаваемого на исследуемый элемент цепи, и шагом приращения этого напряжения. Значения этих параметров указываются в порядке выполнения экспериментальной работы.

#### Задание 4

Для приобретения практического опыта работы с характеристиографом предлагается построить ВАХ специального диода – стабилитрона.

Выполнение задания начинается с открытия программы Multisim. На панели инструментов найти курсором мыши пиктограмму [Характериограф] и однократно нажать клавишу мыши. В рабочей зоне появится пиктограмма характеристиографа, которую мышью можно переместить в удобное для сборки цепи место. Однократным нажатием клавиши мыши пиктограмма закрепляется в выбранном месте. На панели компонентов выбрать курсором мыши пиктограмму [Диоды] и нажать клавишу мыши.

В открывшемся меню этой группы в окне [Семейство] выбрать тип диода [ZENER] (стабилитрон). В окне [Компонент] выбрать курсором мыши диод марки 1N4462 и нажать кнопку [Ок]. В открывшейся рабочей зоне появится курсор с «привязанной» к нему пиктограммой диода. Нажатием клавиши мыши эта пиктограмма закрепляется в выбранном месте рабочей зоны, одновременно снова открывается меню, в котором необходимо активировать кнопку [Закрыты].

Навести курсор мыши на пиктограмму характеристиографа и двойным нажатием клавиши мыши открыть его лицевую панель (рисунок 1.12, б). По умолчанию в поле [Выбор компонента] записано [Diode]. Этот режим работы прибора необходимо сохранить. Он позволяет снять ВАХ диода. Нажать кнопку [Моделирование] и в открывшемся окне [Параметры моделирования] установить в окне [Начало] значение начального напряжения **-8 В**, а в окне [Окончание] конечное значение напряжения **1 В**. Значение приращения можно оставить **10 мВ**. Закрыть окно.

В рабочей зоне, в соответствии с рисунком 1.12, в, собрать схему для снятия ВАХ стабилитрона. Нажатием кнопки [►] над рабочей зоной запустить процесс моделирования. На экране дисплея отобразится кривая, соответствующая ВАХ стабилитрона. Передвинуть маркерную линию в

точку характеристики, соответствующую значению напряжения  $-7.5$  В и определить значение тока в стабилитроне при этом напряжении. Результаты проделанной работы сохранить в [Файл] (имя файла.ms14) и показать преподавателю. Остановить моделирование нажатием кнопки [■] и удалить все элементы из рабочей зоны.

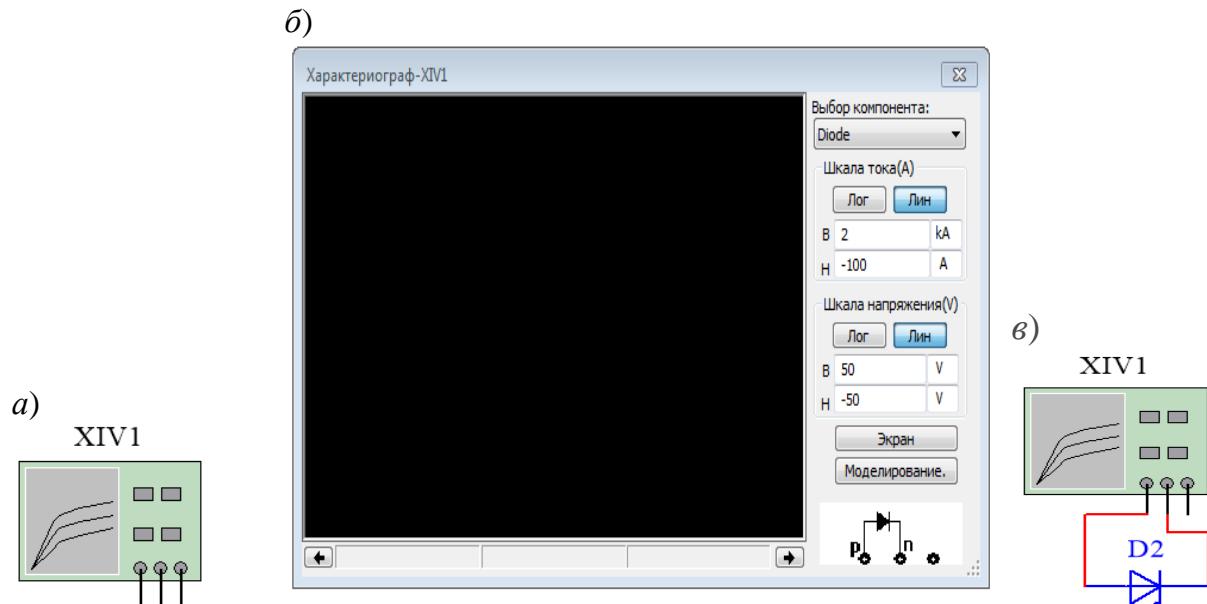


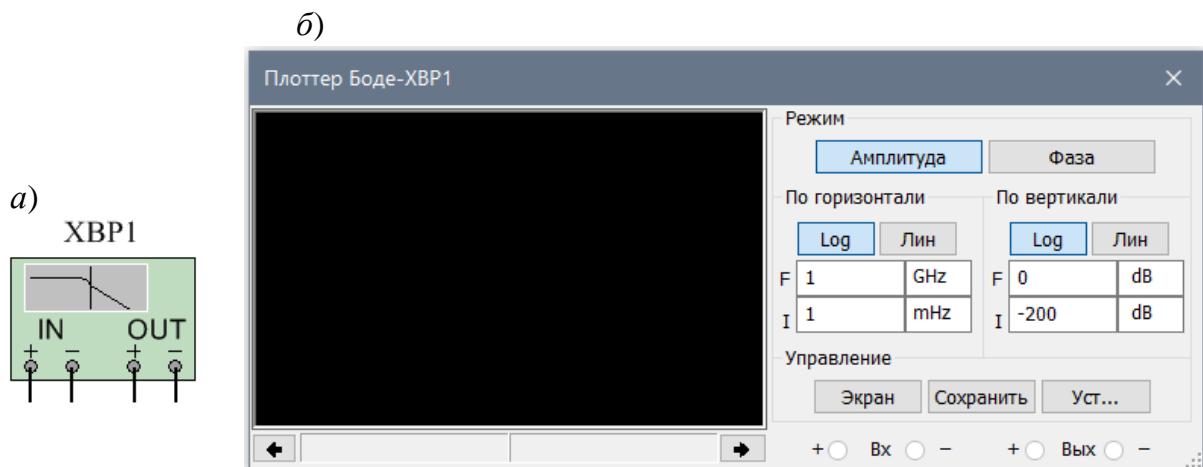
Рисунок 1.12 – Характериограф:

а – пиктограмма характеристографа; б – его лицевая панель; в – схема включения прибора

При исследовании усилителей используется плоттер Боде – измеритель амплитудно-частотных (АЧХ) и фазочастотных характеристик (ФЧХ). Под этими характеристиками подразумевается зависимость коэффициента передачи и угла сдвига фаз между входным и выходным сигналами какого-либо устройства. С помощью этого прибора можно узнать, как изменяется в усилителе коэффициент усиления (коэффициент передачи) и сдвиг по фазе сигнала при изменении частоты. Пиктограмма этого прибора (рисунок 1.13 а) находится на *панели инструментов*. В рабочую зону эта пиктограмма заносится аналогично занесению ранее рассмотренных приборов.

Двойным нажатием клавиши по пиктограмме **XBP1** измерителя АЧХ и ФЧХ открывается его лицевая панель. Вид этой панели представлен на рисунке 1.13, б. При включённом моделировании нажатием кнопки [Экран] тёмный фон экрана можно заменить на светлый. В верхней части панели имеются кнопки [**Амплитуда**] и [**Фаза**]. С помощью этих кнопок выбирается вид изображаемой на дисплейном поле характеристики. По умолчанию активирована первая кнопка. В этом случае будет отображаться АЧХ. Ниже находятся кнопки [**Лог**] и [**Лин**]. С помощью этих кнопок выбирается вид шкалы по горизонтальной и вертикальной осям. Для работы надо активировать кнопки [**Лин**] (линейная шкала).

Ниже этих кнопок находятся поля **[F]** и **[I]**. Информацией в этих полях задаются пределы изменения параметра: **[F]** – максимальное значение, а **[I]** – минимальное значение. По горизонтальной оси – пределы изменения частоты, по вертикальной – в режиме АЧХ коэффициент усиления, а в режиме ФЧХ – угол сдвига фаз между входным и выходным напряжением. В левом окне поля **[F]** для горизонтальной оси указывается значение предела изменения частоты, а в правом отображается его размерность. На рисунке 1.13, *б* в левом поле записана единица, а в правом поле – значение GHz. Это значит, что значение верхнего предела составляет **10<sup>9</sup>** Гц. Минимальное значение частоты по горизонтали **1 mHz** (один миллигерц). По вертикали установлено максимальное значение затухания **0 dB**, а минимальное значение равно **-200 dB**. Конкретные значения параметров, которые необходимо записать в поля по горизонтали и вертикали, даны в описании порядка выполнения конкретной экспериментальной работы.



С целью выбора частоты, на которой определяется коэффициент усиления каскада и угол сдвига фаз, необходимо использовать маркерную линию. Она появляется на экране после запуска процесса моделирования. По умолчанию эта линия находится в крайнем левом положении (на минимальной частоте установленного диапазона частот). Для перемещения этой линии необходимо курсором мыши совместить с треугольником, который находится над маркерной линией в верхней части дисплейного экрана и нажать клавишу мыши. Не отпуская её, мышью переместить линию в желаемое место на экране и отпустить клавишу. В левом окне под экраном дисплея отобразится значение частоты, на которое установлена линия, а в правом окне появится информация о коэффициенте усиления (при нажатой кнопке **[Амплитуда]**) или угле сдвига фаз в градусах (при нажатой кнопке **[Фаза]**). Пошаговое

перемещение маркерной линии можно осуществлять активированием мышью кнопок **[←]** и **[→]**, находящихся под экраном.

### Задание 5

Для иллюстрации возможностей плоттера Боде запустить программу Multisim. В строке меню выбрать и активировать мышью пункт **[Инструментарий]**. В открывшихся последовательно окнах активировать опции **[Создатель схем]**, **[Создатель усилителя с ОЭ]**, **[Проверить]**, **[Создать]**. После активации последней опции в рабочей зоне появляются элементы цепи, которые мышью можно перемещать в этой зоне. Выбрав место расположения элементов цепи, однократно нажать клавишу мыши. На экране возникает готовая электрическая цепь со всеми межэлементными соединениями. Эта цепь представляет собой усилительный каскад на биполярном транзисторе, собранный по схеме с общим эмиттером. Дополнительно для исследования необходимо в рабочую зону с панели инструментов занести и подключить **[Плоттер Боде]** и **[Осциллограф]**, как это изображено на рисунке 1.14.

Навести курсор мыши на транзистор Q1 в рабочей зоне и однократно нажать правую клавишу. В открывшемся окне выделить опцию **[Заменить компонент]** и в меню группы **[Транзисторы]** в окне **[Семейство]** выбрать разновидность транзистора **[BJT\_NPN]**. В окне **[Компонент]** выбрать марку транзистора, рекомендуемую для этого задания в приложении А, и нажать клавишу мыши. Для занесения выбранного транзистора в рабочую зону активировать кнопку **[OK]**. В результате проделанной операции произойдёт замена транзистора. Причём новый транзистор займёт в схеме место удалённого.

Навести курсор мыши на пиктограмму источника переменного напряжения G и двойным нажатием клавиши открыть его меню. В строке **[Напряжение]** записать **0.1 В**, в строке **[Частота (F)]** записать **5 МГц** и закрыть меню.

Установить курсор мыши на пиктограмму конденсатора  $C_e$  и открыть меню этого элемента. В строке **[Ёмкость (C)]** записать значение ёмкости конденсатора, равное **0.001 мкФ**, и закрыть меню.

Запустить процесс моделирования схемы и открыть лицевую панель осциллографа. В окне **[Синхронизация]** активировать кнопку **[Одн.]**, в окне **[Канал А]** в строке **[Смещение]** записать число **-2**, в строке **[Шкала]** выбрать такое значение чувствительности, при котором амплитуда синусоиды будет составлять 1–1,5 клетки на экране.

Аналогично в окне **[Канал В]** в строке **[Смещение]** записать **1**, а в строке **[Шкала]** выбрать такое значение чувствительности, при котором амплитуда синусоиды будет составлять 1–1,5 клетки на экране. В окне

[Развёртка] в строке [Шкала] выбрать значение, при котором на экране отобразятся 2–3 периода исследуемого сигнала. Так, для частоты источника питания в 5 МГц можно записать длительность развёртки **50** ns/Div (50 нс/деление).

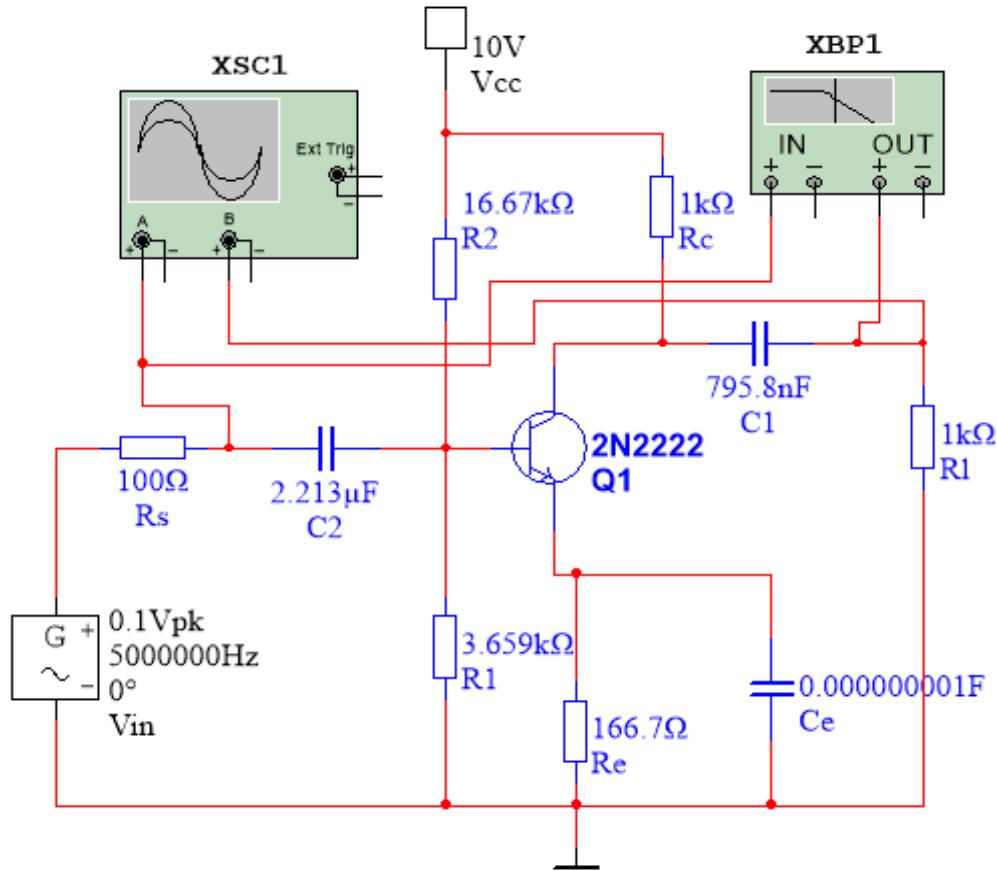


Рисунок 1.14 – Схема цепи для изучения работы плottера Боде

Клавишей мыши открыть окно плottера Боде. В верхней части окна имеются кнопки [Амплитуда] и [Фаза]. С помощью этих кнопок выбирается вид изображаемой на дисплейном поле характеристики. По умолчанию активирована первая кнопка. В этом случае будет отображаться АЧХ. Ниже находятся кнопки [Лог] и [Лин]. С помощью этих кнопок выбирается вид шкалы по горизонтальной и вертикальной осям. Для данной работы надо активировать кнопки [Лин] (линейная шкала). Ниже этих кнопок находятся поля [F] и [I].

По горизонтальной оси в поле [F] надо записать **50** МГц – предельное значение диапазона изменения частоты, а в поле [I] записать **1** Гц – его минимальное значение. Эти значения будут использоваться при отображении на экране как АЧХ, так и ФЧХ.

Для вертикальной оси в режиме АЧХ в поле [F] записать **200** (максимальное значение коэффициента усиления каскада). Причём правое окно этого поля должно быть пустым. Убрать буквы из этого поля можно

курсором мыши. При линейной шкале буква указывает на порядок множителя, на который умножается число в левом окне этого поля ( $k - 10^3$ ,  $M - 10^6$ ,  $G - 10^9$ ). В поле [I] записать **0**.

В режиме  $\Phi\text{ЧХ}$  в поле [F] вертикальной оси записать **0** – максимальное значение угла сдвига фаз в градусах между входным и выходным напряжениями. В поле [I] записать **-300** – минимальное значение этого угла.

Рассматриваемый плоттер позволяет определить значение коэффициента усиления или угла сдвига фаз между входным и выходным сигналами на любой частоте из заданного выше диапазона. Для выбора частоты, на которой определяются коэффициент усиления каскада и угол сдвига фаз, необходимо использовать маркерную линию. Она появляется на экране после запуска процесса моделирования. По умолчанию эта линия находится в крайнем левом положении (на минимальной частоте установленного диапазона частот). Для перемещения этой линии необходимо курсором мыши совместить с треугольником, который находится над маркерной линией в верхней части дисплейного экрана, и нажать клавишу мыши. Не отпуская её, мышью переместить линию в желаемое место на экране и отпустить клавишу. В левом окне под экраном дисплея отобразится значение частоты, на которое установлена линия, а в правом окне появится информация о коэффициенте усиления (при нажатой кнопке [Амплитуда]) или угле сдвига фаз в градусах (при нажатой кнопке [Фаза]). Пошаговое перемещение маркерной линии можно осуществлять активированием мышью кнопок [ $\leftarrow$ ] и [ $\rightarrow$ ], находящихся под экраном.

Установить маркерную линию в точку с частотой, рекомендуемой в приложении A, и на этой частоте определить коэффициент усиления транзисторного каскада. Результаты проделанной работы сохранить в [Файл] (имя файла.ms14) и показать преподавателю. Остановить моделирование нажатием кнопки [■] и удалить все элементы из рабочей зоны.

На практике для изучения тока в цепи (форма и его значение) используется датчик тока. Этот датчик преобразует значение тока в соответствующее ему значение напряжения, которое можно контролировать осциллографом. Таким образом, его выходной величиной является напряжение. Пиктограмма датчика  находится на панели инструментов. Заносится датчик в рабочую зону мышью так же, как и другие измерительные приборы. Его желательно подключать в цепь только после выполнения всех межэлементных соединений.

Для подключения датчика курсор мыши навести на его пиктограмму, находящуюся в рабочей зоне. Нажав клавишу мыши, переместить пиктограмму до совмещения с проводником, ток в котором необходимо

изучить, и отпустить клавишу. Вывод датчика подключить к входу осциллографа. Для того, чтобы не происходило инвертирование полярности тока, размещать датчик необходимо на горизонтальном проводнике, через который ток протекает слева направо. На вертикальном проводнике ток должен протекать сверху вниз. В этом случае направление тока в проводнике совпадает с направлением стрелки, находящейся на пиктограмме датчика. После подключения необходимо двойным нажатием клавиши мыши открыть окно датчика и в строке **[Коэффициент преобразования]** выбрать требуемое соотношение между значением контролируемого тока и выходным напряжением датчика, которое создаёт на экране осциллографа изображение сигнала желаемого размера. Эту операцию удобно делать в процессе моделирования. В этом случае проще выбрать необходимое значение коэффициента преобразования и требуемую чувствительность осциллографа.

#### **1.4 Знания и умения, необходимые для выполнения элементарных операций при работе в среде Multisim**

- 1 Запуск программы Multisim (с. 5).
- 2 Расположение основных панелей на экране монитора: *стандартная панель, панель компонентов, панель Вид, панель инструментов, окно схемы (рабочая зона)* (с. 6).
- 3 Расположение на *панели компонентов* источников питания и пассивных элементов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, диодов, транзисторов, тиристоров) (с. 6).
- 4 Место нахождения на *панели компонентов* элемента заземления (с. 9).
- 5 Место расположения в рабочем окне пиктограмм мультиметра, ваттметра, осциллографа, анализатора спектра, харктериографа, датчика тока, плоттера Боде (с. 5, 7).
- 6 Методика занесения и закрепления в *рабочей зоне* пиктограммы элемента цепи (с. 9).
- 7 Задание параметров элементам цепи (источникам питания, резисторам, катушкам индуктивности) (с. 12).
- 8 Перемещение по *рабочей зоне* пиктограммы элементов (с. 10, 11).
- 9 Удаление элемента цепи из *рабочей зоны* (с. 10).
- 10 Изменение ориентации пиктограммы элемента в *рабочей зоне* (поворот на 90 или 180 градусов) (с. 11).
- 11 Методика соединения между собой выводов на пиктограммах элементов при сборке цепи (с. 11).
- 12 Удаление проводника, соединяющего элементы в *рабочей зоне* (с. 11).
- 13 Замена компонента цепи (с. 29).

- 14 Выбор режима работы мультиметра (с. 13).
- 15 Особенности подключения ваттметра (с. 14, 15).
- 16 Выбор и установка длительности развёртки 2-канального осциллографа (с. 18).
- 17 Выбор и установка чувствительности канала вертикального отклонения 2-канального осциллографа (с. 19).
- 18 Выбор и установка длительности развёртки 4-канального осциллографа (с. 23).
- 19 Выбор и установка чувствительности канала вертикального отклонения 4-канального осциллографа (с. 23).
- 20 Выбор и установка режима синхронизации в осциллографе (с. 20).
- 21 Определение по осциллограмме с помощью маркерных линий временных и потенциальных параметров электрического сигнала (с. 17).
- 22 Смещение по вертикали изображения на экране осциллографа (с. 19).
- 23 Выбор и установка рабочего частотного диапазона в анализаторе спектра (с. 24).
- 24 Выбор и установка чувствительности канала вертикального отклонения анализатора спектра (с. 24).
- 25 Определение с помощью маркерной линии в анализаторе спектра амплитуды и частоты гармоники (с. 24, 25).
- 26 Запуск и остановка процесса моделирования (с. 16).

Для закрепления навыков практической работы в среде Multisim ниже рассмотрены примеры, позволяющие научиться собирать электрические цепи и исследовать электромагнитные процессы в этих цепях.

## **1.5 Примеры применения среды Multisim для анализа процессов в электрических цепях**

### **1.5.1 Исследование разветвлённой цепи постоянного тока**

Для выполнения поставленной задачи используется схема, приведённая на рисунке 1.15, *а*. Она позволяет проверить соблюдение законов Ома, Кирхгофа и баланса мощностей в цепях постоянного тока. В этой схеме необходимо измерить мощность, потребляемую цепью, токи и напряжения на всех элементах и полученные значения подставить в уравнения

$$I_1 = I_2 + I_3;$$

$$U = U_1 + U_2,$$

где  $I_1, I_2, I_3$  – токи ветвей цепи, изображённой на рисунке 1.15, *а*;

$U$  – напряжение источника питания;

$U_1, U_2$  – падения напряжения на резисторе  $R1$  и разветвлённом участке цепи (резисторы  $R2$  и  $R3$ ).

Необходимые значения токов и напряжений можно получить в среде Multisim собрав в *рабочей зоне* и запустив электрическую цепь, приведённую на рисунке 1.15, б. Создание схемы начинается с запуска программы Multisim и перенесения в рабочую зону одного источника постоянного тока, одного элемента заземления, трёх резисторов, пяти мультиметров и одного ваттметра. Курсором на *панели компонентов* найти пиктограмму **[Источники]**. Однократным нажатием кнопки мыши открыть меню этой группы компонентов. В открывшемся окне **[Компоненты]** выбрать компонент **[GROUND]** и курсором нажать кнопку **[OK]**. Открывается *рабочая зона*, в которой находится курсор с «привязанной» к нему пиктограммой заземления. Переместить мышью курсор в желаемую точку *рабочей зоны* и нажать однократно кнопку мыши. Произойдёт закрепление в зоне перемещаемой пиктограммы и одновременно открывается меню группы **[Источники]**. В окне **[Компоненты]** выбрать источник постоянного напряжения **[DC\_POWER]** и нажать кнопку **[OK]**. Курсором в *рабочей зоне* разместить источник питания в желаемом месте и сделать однократное нажатие кнопки мыши. Это нажатие закрепляет выбранный источник на поле *рабочей зоны*. Одновременно снова открывается меню группы **[Источники]**, в котором нажать кнопку **[Закрыть]**.

Далее курсором необходимо на *панели компонентов* найти группу **[Пассивные компоненты]** и однократным нажатием кнопки мыши открыть меню этой группы. В окне **[Семейство]** активировать пиктограмму **[RESISTOR]** и нажать кнопку **[OK]**. Меню закроется, и в открывшейся *рабочей зоне* можно найти курсор с «привязанным» к нему резистором. Переместить курсор с резистором в желаемое место и нажать однократно клавишу мыши. Резистор закрепится в выбранном месте. Одновременно откроется меню, в котором снова нажать кнопку **[OK]**. В рабочую зону поместится второй резистор, и открывается меню, в котором надо третий раз нажать кнопку **[OK]**. В *рабочую зону* будет занесён ещё один резистор. После его закрепления в открывшемся меню нажать кнопку **[Закрыть]**. На этом операция занесения трёх резисторов в *рабочую зону* завершена. Элементы цепи заносятся в *рабочую зону* с параметрами, установленными по умолчанию. Информация о значении этих параметров выводится рядом с пиктограммой элемента.

Выбрать курсором на *панели инструментов* пиктограмму **[Мультиметр]** и однократным нажатием клавиши мыши активировать этот прибор. На экране появится курсор с «привязанной» к нему пиктограммой мультиметра.

Переместить курсор в желаемое место и однократным нажатием клавиши мыши закрепить мультиметр в *рабочей зоне*. Аналогичную операцию по переносу мультиметров выполнить ещё четыре раза. В результате проделанных перемещений в *рабочей зоне* находятся пять мультиметров. В заключении в *рабочую зону* заносится один ваттметр.

В соответствии с рисунком 1.15, *б* собрать в *рабочей зоне* исследуемую электрическую цепь. Установить выбранные *по указанию преподавателя* из приложения А значение напряжения источника питания и параметры резисторов в схеме. Для установки значения напряжения источника питания двойным щелчком мыши открыть его меню и в окне **[Напряжение]** установить заданное значение напряжения. Закрыть это меню и двойным щелчком по пиктограмме резистора  $R_1$  открыть его меню и в окне **[Сопротивление]** ввести заданное значение сопротивления этого резистора и закрыть меню. Аналогично открыть меню резистора  $R_2$ , а затем и  $R_3$  и в открывшихся окнах записать значения сопротивлений этих резисторов.

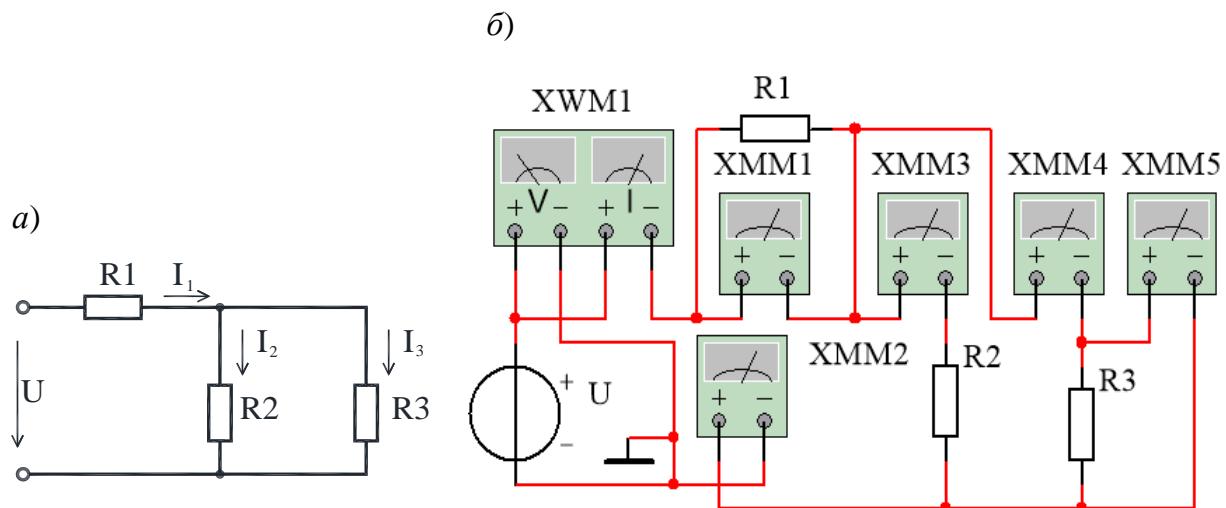


Рисунок 1.15 – Схема электрической цепи:  
*а* – принципиальная; *б* – аналог в среде Multisim

Задать режимы работы измерительных приборов. С этой целью выбрать курсором пиктограмму первого мультиметра **XMM1** и двойным щелчком мыши открыть лицевую панель этого прибора. На открывшейся панели курсором нажать кнопки **[V]** и **[–]**. Эти операции переведут этот прибор в режим измерения постоянного напряжения на резисторе  $R_1$ . Закрывать панель не надо. Далее открыть панель второго мультиметра **XMM2** и нажатием кнопок **[A]** и **[–]** перевести его в режим измерения постоянного тока, протекающего через резистор  $R_1$ . Аналогичным образом третий **XMM3** и четвертый **XMM4** приборы перевести в режим измерения постоянного тока, а пятый прибор **XMM5** сделать вольтметром постоянного тока. По

умолчанию панели мультиметров накладываются друг на друга в одном месте. Для снятия показаний лицевые панели мультиметров надо раздвинуть. С этой целью навести курсор на открытую панель прибора и, нажав клавишу мыши, переместить мышью изображение в желаемое место. После этого отпустить клавишу. Аналогичную операцию необходимо выполнить с лицевыми панелями других мультиметров.

Нажатием кнопки [▶], находящейся над *рабочей зоной*, запустить программу. Через некоторое время на панелях приборов появятся численные значения токов и напряжений в цепи, которые и позволят проверить соблюдение законов Ома и Кирхгофа. Результаты измерений записать в таблицу 1.2. Так, в соответствии с законом Ома, ток в резисторе  $R1$  (показание мультиметра **XMM2**) должен быть равен отношению напряжения на этом резисторе к величине его сопротивления. Проверить расчётом.

**Таблица 1.2 – Результаты измерения параметров цепи постоянного тока со смешанным соединением элементов**

| $U$ , В | $U_1$ , В | $U_2$ , В | $I_1$ , А | $I_2$ , А | $I_3$ , А | $P$ , Вт |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
|         |           |           |           |           |           |          |

В соответствии с первым законом Кирхгофа входящий в узел ток  $I_1$  (показание мультиметра **XMM2**) должен быть равен сумме выходящих токов  $I_2$  и  $I_3$  (показания мультиметров **XMM3** и **XMM4**). Проверить расчётом.

По второму закону Кирхгофа напряжение источника питания должно быть равно сумме падений напряжений на резисторе  $R1$  (показание **XMM1** –  $U_1$ ) и на разветвлённом участке (показание мультиметра **XMM5** –  $U_2$ ). Проверить, насколько теория совпадает с практикой.

Рассчитать мощность на каждом из резисторов, используя выражение  $P_r = I^2R$ . Зная мощность источника питания  $P$  (измеряется ваттметром) и рассчитанные мощности потребителей энергии, проверить соблюдение баланса мощностей для данной цепи, в соответствии с которым мощность источника питания должна быть равна суммарной мощности всех потребителей энергии.

### 1.5.2 Анализ процессов в цепи переменного тока с катушкой индуктивности

Целью эксперимента является изучение возможностей программы Multisim на примере проверки закона Ома в цепи переменного тока, измерения активной мощности источника питания, определения угла сдвига фаз между током и напряжением источника питания и определения амплитудного значения тока в цепи. Принципиальная схема исследуемой

цепи приведена на рисунке 1.16, *а*, а её изображение с измерительными приборами в среде Multisim показано на рисунке 1.16, *б*.

Закон Ома проверяется с помощью выбранного напряжения источника питания, измеренного тока цепи и рассчитанного значения полного сопротивления. Для измерения тока на рисунке 1.16, *б* последовательно в цепь включён мультиметр XMM1.

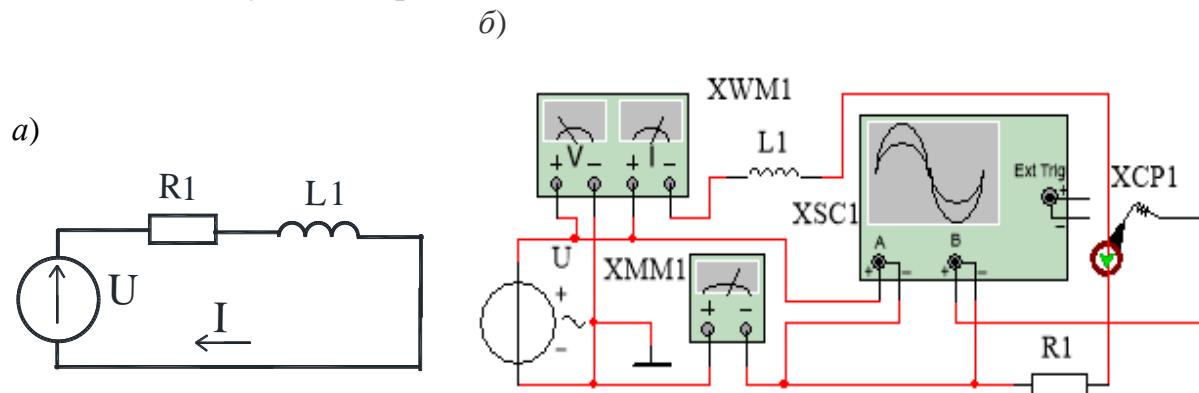


Рисунок 1.16 – Схема электрической цепи:

*а* – принципиальная; *б* – аналог её с измерительными приборами в среде Multisim

Определение угла сдвига фаз между током и напряжением в схеме осуществляется с помощью 2-канального осциллографа XCS1. На вход одного канала подаётся напряжение, относительно которого необходимо определять угол сдвига. В данном примере таким напряжением является напряжение источника питания. На вход второго канала осциллографа подаётся сигнал, пропорциональный току участка цепи, на котором необходимо определить угол сдвига. В рассматриваемом примере ток контролируется с помощью датчика тока XCP1, который совмещён с проводником, ток в котором необходимо контролировать. При таком включении на экране осциллографа будут наблюдаться два сигнала (тока и напряжения), что и позволит определить смещение во времени между ними. При подключении датчика следует правильно располагать его на схеме. Правило закрепления датчика на проводнике в схеме рассмотрено на странице 32.

Выполнение поставленной задачи начинается с запуска программы Multisim и перенесения в *рабочую зону* одного источника переменного напряжения, одного элемента заземления, одного резистора, одного дросселя, одного датчика тока, одного осциллографа, одного мультиметра и одного ваттметра.

Курсором на *панели компонентов* найти пиктограмму **[Источники]**. Однократным нажатием клавиши мыши открыть меню этой группы компонентов. В открывшемся окне **[Компоненты]** выбрать компонент

[GROUND] и курсором нажать кнопку [OK]. Открывается *рабочая зона*, в которой находится курсор с «привязанной» к нему пиктограммой заземления. Переместить мышью курсор в желаемую точку *рабочей зоны* и кратковременно нажать клавишу мыши. Произойдёт закрепление перемещаемой пиктограммы, и одновременно откроется меню группы [Источники].

В окне [Компоненты] выбрать источник переменного напряжения [AC\_POWER] и нажать кнопку [OK]. Курсором в *рабочей зоне* разместить источник питания в желаемом месте и сделать однократное нажатие клавиши мыши. Это нажатие закрепляет выбранный источник на поле. Одновременно снова открывается меню группы [Источники]. В открывшемся меню нажать кнопку [Закрыть].

Далее курсором необходимо на *панели компонентов* найти группу [Пассивные компоненты] и однократным нажатием клавиши мыши открыть меню этой группы. В окне [Семейство] активировать пиктограмму [RESISTOR] и нажать кнопку [OK]. Меню закроется и в открывшейся *рабочей зоне* можно найти курсор с «привязанной» к нему пиктограммой резистора. Переместить курсор в желаемое место *рабочей зоны* и нажать однократно клавишу мыши. Резистор закрепится в выбранном месте. Одновременно откроется меню, в котором выбрать курсором элемент [INDUCTOR] и нажать кнопку [OK]. В рабочую зону занесется катушка индуктивности, и откроется меню, в котором надо нажать кнопку [Закрыть]. На этом операция занесения резистора и катушки индуктивности в *рабочую зону* завершена.

Выбрать курсором на *панели инструментов* [Мультиметр] и однократным нажатием клавиши мыши на его пиктограмму активировать этот прибор. На экране появится курсор с «привязанной» к нему пиктограммой мультиметра. Переместить курсор в желаемое место и однократным нажатием клавиши мыши закрепить пиктограмму в *рабочей зоне*. Аналогично переносится в *рабочую зону* пиктограмма ваттметра.

Найти на *панели инструментов* пиктограмму [Осциллограф] и мышью активировать этот прибор. Переместить его пиктограмму в *рабочую зону* и закрепить мышью. Аналогично перенести в *рабочую зону* с *панели инструментов* пиктограмму [Датчик тока].

Собрать в *рабочей зоне* исследуемую электрическую цепь. С этой целью пиктограммы элементов, находящиеся в *рабочей зоне*, сначала разместить так, чтобы удобно было выполнять межэлементные соединения. За основу можно взять размещение, приведённое на рисунке 1.16, б. Выводы элементов соединить в соответствии со схемой, изображённой на рисунке 1.16, б.

В соответствии с указанием преподавателя из приложения А для данной работы взять и установить значение напряжения  $U$  и частоты  $F$  источника

питания, а также параметры резистора  $R1$  и катушки индуктивности  $L1$  в схеме. Для установки значения напряжения источника питания двойным щелчком мыши открыть его меню и в строке **[Напряжение]** установить для источника заданное значение напряжения, а в строке **[Частота]** – значение его частоты. Закрыть это меню и двойным щелчком по пиктограмме резистора  $R1$  открыть его меню и в строке **[Сопротивление]** ввести заданное значение сопротивления этого резистора и закрыть меню. Аналогично открыть меню катушки индуктивности и в строке **[Индуктивность]** записать значение её индуктивности  $L$ .

Задать режимы работы мультиметра. С этой целью выбрать курсором его пиктограмму и двойным щелчком мыши открыть лицевую панель этого прибора. На открывшейся панели курсором нажать кнопки **[A]** и **[~]**. Эти операции переведут мультиметр в режим измерения переменного тока.

Двойным нажатием курсором мыши на пиктограмму **[Датчик тока]** открыть его окно. В строке **[Коэффициент преобразования]** мышью установить **1 V/mA** (обычно такой коэффициент установлен по умолчанию). В этом случае при значении контролируемого тока в **1 A** на выходе датчика будет напряжение **1000 V**. В связи с этим, если значение тока в цепи будет измеряться амперами, то чувствительность канала осциллографа, подключаемого к датчику, должна устанавливаться в **kV/Div**.

Открыть лицевую панель осциллографа (рисунок 1.17). В окне **[Развёртка]** в строке **[Шкала]** установить значение длительности развёртки из диапазона  $(0,25–0,33)T$ , где  $T$  – период напряжения источника питания переменного тока – величина обратная значению выбранной частоты. В окне **[Канал A]** в строке **[Шкала]** установить значение чувствительности в **V/Div**, выбранное из диапазона  $(0,5–0,7)U_m$ , где  $U_m$  – амплитудное значение напряжения источника питания в вольтах. В поле **[смещение Y]** записать **1**.

В окне **[Канал B]** в строке **[Шкала]** установить предварительное значение чувствительности в **kV/Div**, выбранное из диапазона  $(0,5–0,7)I_m$ , где  $I_m$  – предполагаемое значение амплитуды контролируемого тока в амперах, которое можно определить с помощью формулы  $I_m = U_m / Z$ , где  $Z$  – полное сопротивление цепи, определяемое как корень квадратный из суммы квадратов активного  $R$  и индуктивного  $X$  сопротивлений цепи. В свою очередь, индуктивное сопротивление  $X = 2\pi L / T$ . После запуска программы значение чувствительности осциллографа можно уточнить. В поле **[смещение Y]** записать **-1**.

Нижние кнопки в окнах каналов *A* и *B* остаются активированными по умолчанию. В окне **[Синхронизация]** мышью активировать кнопку **[Одн.]**. Остальные кнопки в этом окне остаются активированными по умолчанию.

Запустить процесс моделирования. На экране отобразятся графики изменения во времени напряжения в цепи (канал *A*) и тока источника питания

(канал  $B$ ). По этим графикам необходимо определить амплитудное значение тока в цепи. С этой целью одну маркерную линию (например, № 1) совместить с амплитудным значением графика, отображающего ток в канале  $B$ . В окне значений исследуемых параметров под надписью [Канал\_B] в строке, номер которой соответствует номеру маркерной линии, находится значение амплитуды напряжения, снимаемого с датчика тока. Зная коэффициент преобразования, установленный ранее, определить значение амплитуды тока.

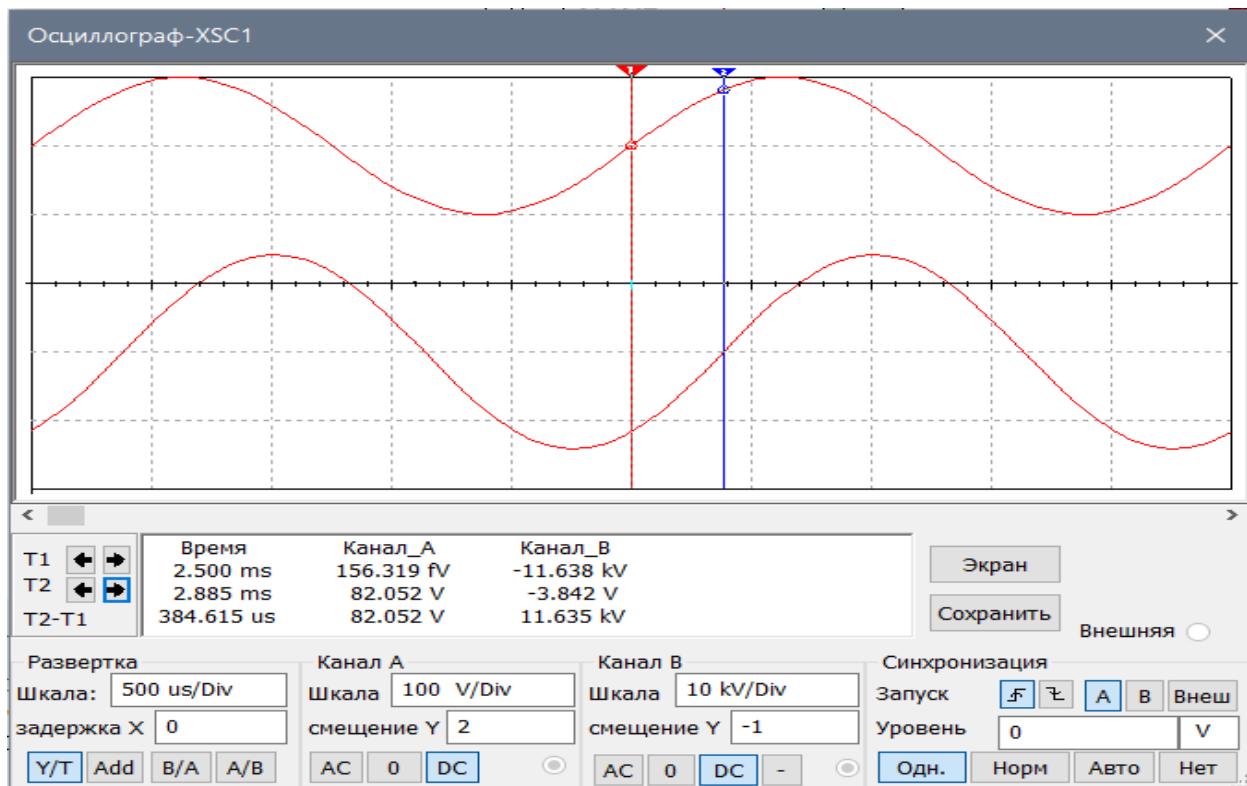


Рисунок 1.17 – Лицевая панель работающего 2-канального осциллографа

Для этого надо значение коэффициента преобразования умножить на значение напряжения, полученное с помощью маркерной линии. Результат расчёта дает значение амплитуды тока  $I_m$  в миллиамперах, которое надо записать в таблицу 1.3. В таблицу надо записать и значения напряжения источника питания  $U$ , тока цепи  $I$ , а также показание ваттметра  $P$  и  $\cos \phi$ .

Таблица 1.3 – Результаты измерения параметров в последовательной цепи переменного тока

| $U$ , В | $I$ , А | $P$ , Вт | $\cos \phi$ | $I_m$ , мА | $T_1$ , мс | $T_2$ , мс | $\Delta T$ , мс | $\phi$ , град |
|---------|---------|----------|-------------|------------|------------|------------|-----------------|---------------|
|         |         |          |             |            |            |            |                 |               |

Для определения угла сдвига фаз между током и напряжением в цепи необходимо одну маркерную линию установить в точку, соответствующую началу нарастания синусоиды напряжения на втором периоде напряжения источника питания (канал *A*), а вторую – на начало синусоиды, изображающую кривую тока на втором периоде (канал *B*), как это изображено в качестве примера на рисунке 1.17. В первой строке окна значений исследуемых параметров под надписью [Время] находится число, соответствующее времени  $T_1$ , а во второй строке – время  $T_2$ . На рисунке 1.17 это соответственно **2.5** и **2.885** мс. В третьей строке находится число, соответствующее разности значений  $T_1, T_2$ . Это число  $\Delta T$  и будет временем, на которое смешены ток и напряжение. Найденные временные значения синусоиды записать в таблицу 1.3. На рисунке 1.17 это **384.615** мкс. Для нахождения угла сдвига фаз  $\phi$  необходимо отмеченное выше время  $\Delta T$  умножить на  $360^\circ$  и разделить на значение периода напряжения источника питания  $T$ . Результат расчета записать в таблицу 1.3.

Закон Ома для цепи переменного тока можно записать в виде

$$I_p = U / Z,$$

где  $U$  – напряжение источника питания цепи;

$Z$  – полное сопротивление цепи переменного тока.

Напряжение источника задано, а для нахождения полного сопротивления цепи можно использовать выражение, получаемое из треугольника сопротивлений,  $Z = R / \cos \phi$ . В этом выражении  $R$  – активное сопротивление цепи, заданное в исходных данных, а  $\cos \phi$  – коэффициент мощности, измеряемый ваттметром. Рассчитанное значение тока цепи  $I_p$  сравнить со значением  $I$ , измеренным мультиметром. Результаты проделанной работы сохранить в [Файл] (имя файла.ms14) и показать преподавателю. Остановить моделирование нажатием кнопки [■] и удалить все элементы из рабочей зоны.

### 1.5.3 Исследование электрической цепи с несинусоидальным напряжением источника питания

Из курса «Теоретические основы электротехники» известно, что несинусоидальное напряжение или ток источника питания можно разложить на синусоидальные составляющие, имеющие определённую амплитуду, частоту и фазу. Эти синусоидальные напряжения и токи называются гармониками. Частота этих гармоник кратна частоте исходного несинусоидального напряжения или тока. Порядок кратности формирует номер гармоники. Состав гармоник определяется формой

несинусоидального напряжения или тока. Для исследования гармонического состава напряжения или тока в цепи можно использовать анализатор спектра.

В качестве примера, иллюстрирующего особенности работы с анализатором спектра, может быть использована схема, приведённая на рисунке 1.18. Она позволяет изучить гармонический состав несинусоидального тока, протекающего в цепи.

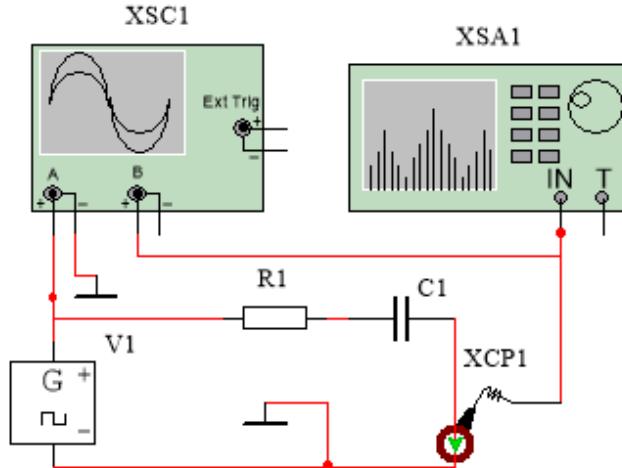


Рисунок 1.18 – Схема электрической цепи для исследования гармонического состава несинусоидального тока

Выполнение поставленной задачи начинается с запуска программы Multisim и перенесения в *рабочую зону* источника несинусоидального напряжения, элемента заземления, резистора, одного конденсатора мультиметра, датчика тока и анализатора спектра.

Курсором на *панели компонентов* найти пиктограмму **[Источники]**. Однократным нажатием клавиши мыши открыть меню этой группы компонентов. В открывшемся окне **[Компоненты]** выбрать компонент **[GROUND]** и курсором нажать кнопку **[OK]**. Открывается *рабочая зона*, на которой находится курсор с «привязанной» к нему пиктограммой заземления. Переместить мышью курсор в желаемую точку *рабочей зоны* и кратковременно нажать клавишу мыши. Произойдёт закрепление перемещаемой пиктограммы и одновременно открывается меню группы **[Источники]**.

В окне **[Компоненты]** выбрать источник несинусоидального напряжения **[CLOCK\_VOLTAGE]** и нажать кнопку **[OK]**. Курсором разместить источник питания в желаемом месте *рабочей зоны* и сделать однократное нажатие клавиши мыши. Это нажатие закрепляет выбранный источник на поле *рабочей зоны*. Одновременно снова открывается меню группы **[Источники]**. В открывшемся меню нажать кнопку **[Закрыть]**. На *панели компонентов* из группы **[Пассивные компоненты]** занести в *рабочую зону* резистор **[RESISTOR]** и конденсатор **[CAPACITOR]**.

Выбрать курсором на *панели инструментов* **[Осциллограф]** и однократным нажатием клавиши мыши по его пиктограмме активировать этот прибор. В *рабочей зоне* появится курсор с «привязанной» к нему пиктограммой осциллографа. Переместить курсор в желаемое место и однократным нажатием клавиши мыши закрепить осциллограф в *рабочей зоне*. Аналогично из *панели инструментов* в *рабочую зону* перенести анализатор спектра и датчик тока. При установке датчика тока следует учитывать рекомендации, приведённые для этого преобразователя на странице 32.

В соответствии с принципиальной схемой, изображённой на рисунке 1.18, собрать в *рабочей зоне* электрическую цепь. Анализатор спектра можно подключать в этой схеме только одним проводником, идущим к входу **[IN]**. Второй проводник анализатора по умолчанию подключён к заземлителю.

Из приложения А взять рекомендуемые преподавателем параметры импульсного источника питания: напряжение  $U$ , длительность импульса  $\Delta t$  в процентах и частота  $F$  следования импульсов. Двойным нажатием мышью на пиктограмму источника питания открыть его меню. В строке **[Частота]** записать заданное значение частоты, в строке **[Длительность]** ввести число, соответствующее необходимой длительности импульса в процентах, вырабатываемого генератором, а в строке **[Напряжение]** записать значение напряжения.

Двойным нажатием по пиктограмме резистора  $R1$  открыть его меню, в строке **[Сопротивление]** ввести значение сопротивления этого резистора **100** Ом и закрыть меню. Аналогично необходимо открыть меню конденсатора и записать значение его ёмкости **100** мкФ.

Двойным нажатием клавиши открыть окно анализатора спектра и в строке **[Полоса]** установить значение, численно равное  $10F$ , где  $F$  – значение частоты источника питания, взятое из исходных данных. В строке **[Начало]** записать **0**. В строке **[Центр]** записать значение  $0,5F$ , а в строку **[Граница]** занести граничное значение, равное  $10F$ .

В строке **[Шкала]** установить чувствительность канала, примерно равную  $(0,1\text{--}0,2)U_m$ , исследуемого сигнала. В процессе работы это значение можно корректировать так, чтобы размах изображения на экране анализатора не выходил за границы экрана. В окне анализатора спектра нажать кнопку **[Ввод]** и в строке **[Разрешение]** записать значение, примерно равное  $0,1F$ .

Открыть лицевую панель осциллографа. В окне **[Развёртка]** в строке **[Шкала]** установить длительность развёртки, значение которой должно находиться в пределах  $(0,25\text{--}0,33)T$ . В окне **[Канал А]** в строке **[Шкала]** установить чувствительность канала, примерно равную амплитуде входного напряжения. В строке **[смещение Y]** этого канала записать число **1**.

Чувствительность канала *B* устанавливается после запуска моделирования. Её значение в строке **[Шкала]** выбирается так, чтобы максимальное отклонение сигнала на экране не превышало полторы клетки от нулевой линии, в строке **[смещение Y]** записать число **-1**. В окне **[Синхронизация]** в строке **[Уровень]** записать число **1** и активировать кнопку **[Одн.]**.

Коэффициент преобразования датчика тока можно оставить **1 V/mA**. В процессе эксперимента это значение можно корректировать.

Запустить процесс моделирования нажатием кнопки **[▶]** над *рабочей зоной*. На экранах анализатора спектра и осциллографа через несколько секунд появятся импульсы напряжения. Если изображение сигнала на экране осциллографа или анализатора спектра выходит за его границы или очень мало, то регулированием чувствительности канала в окне **[Шкала]** необходимо изменить размер изображения до желаемого значения. На экране осциллографа каналом *A* регистрируется напряжение на выходе источника питания, а каналом *B* – ток в цепи.

На экране анализатора спектра наблюдаются импульсы, указывающие на наличие гармоник в исследуемом сигнале. Координаты точки на вершине каждого импульса указывают на оси абсцисс значение частоты гармоники, а на оси ординат – значение её амплитуды. Для повышения точности измерения амплитуд гармоник рекомендуется размер лицевой панели анализатора сделать максимально возможным. Методика изменения размера лицевой панели стандартная как при изменении размера рисунка.

Последовательно, подводя мышью маркерную линию на экране прибора к точке, соответствующей амплитуде каждого импульса, можно определить амплитудное значение и частоту гармоники. Значения этих параметров отображаются под экраном анализатора. Для быстрого перемещения маркерной линии курсор мыши совмещается с треугольником, находящимся над линией, и нажимается клавиша мыши. В нажатом состоянии мышью линия перемещается к нужной точке и отпускается клавиша. Для точного совмещения линии с амплитудной точкой на графике используются кнопки **[◀]** и **[▶]**. С их помощью линия перемещается влево или вправо по частоте дискретными шагами. Этими кнопками находится такое положение маркерной линии на импульсном сигнале, при котором значение исследуемого напряжения будет максимальным.

Полученное с помощью датчика тока значение и будет амплитудой тока гармоники, выраженное в единицах напряжения. Зная установленный коэффициент преобразования датчика, необходимо измеренное значение напряжения преобразовать в значение тока. Измеренные параметры гармоник записать в таблицу 1.4. Результаты проделанной работы сохранить в **[Файл] (имя файла.ms14)** и показать преподавателю. Остановить моделирование нажатием кнопки **[■]** и удалить все элементы из рабочей зоны.

Таблица 1.4 – Измеренные параметры гармоник несинусоидального тока

|                       |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-----------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Частота гармоники, Гц |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Номер гармоники       |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Ток гармоники, мА     |  |  |  |  |  |  |  |  |

## 2 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОНИКИ

### 2.1 Исследование параметрического стабилизатора напряжения

В электронике для надёжной работы многих схем требуется иметь стабильное напряжение питания электрической цепи. Получается такое напряжение с помощью различных стабилизаторов. Простейшим из таких устройств является параметрический стабилизатор постоянного напряжения.

Параметрическим стабилизатором называется такое устройство, в котором стабилизация режима работы осуществляется за счёт свойств (параметров) некоторых элементов.

В параметрическом стабилизаторе напряжения в качестве стабилизирующего элемента используется полупроводниковый стабилитрон. У этого специального полупроводникового диода на обратной ветви ВАХ имеется участок, на котором даже при небольшом изменении обратного напряжения (десятые доли вольта) обратный ток может изменяться в 10 и более раз. Появляется такой участок при напряжении в несколько вольт и выше (значение этого напряжения определяется технологией изготовления диода и материалом исходной полупроводниковой структуры). Такая особенность ВАХ стабилитрона объясняется возникновением электрического пробоя в полупроводниковой структуре и, в первую очередь, его разновидностью – лавинным пробоем. Напряжение, при котором развивается лавинный пробой, называется напряжением стабилизации стабилитрона.

Схема параметрического стабилизатора приведена на рисунке 2.1. Она представляет собой последовательную цепь, состоящую из линейного резистора  $R1$  и нелинейного элемента – стабилитрона  $VD$ . К этой цепи

подключается сопротивление нагрузки  $R_2$ . Полярность включения стабилитрона выбирается такой, чтобы его  $p$ - $n$ -переход был смещён в обратном направлении.

Ток в такой последовательной цепи можно определить графоаналитически с помощью метода зеркального отображения характеристики. В соответствии с этим методом в прямоугольной системе координат строятся ВАХ нелинейного элемента (в нашем случае ВАХ стабилитрона) и зеркально отображённая ВАХ линейного элемента. Последняя строится по двум точкам. Первая точка находится на оси напряжений и соответствует значению напряжения  $U_1$ , прикладываемого к рассматриваемой последовательной цепи. Вторая точка находится на оси токов и соответствует значению тока  $I_k$  в цепи при коротком замыкании нелинейного элемента, т. е.  $I_k = U_1 / R_1$ .

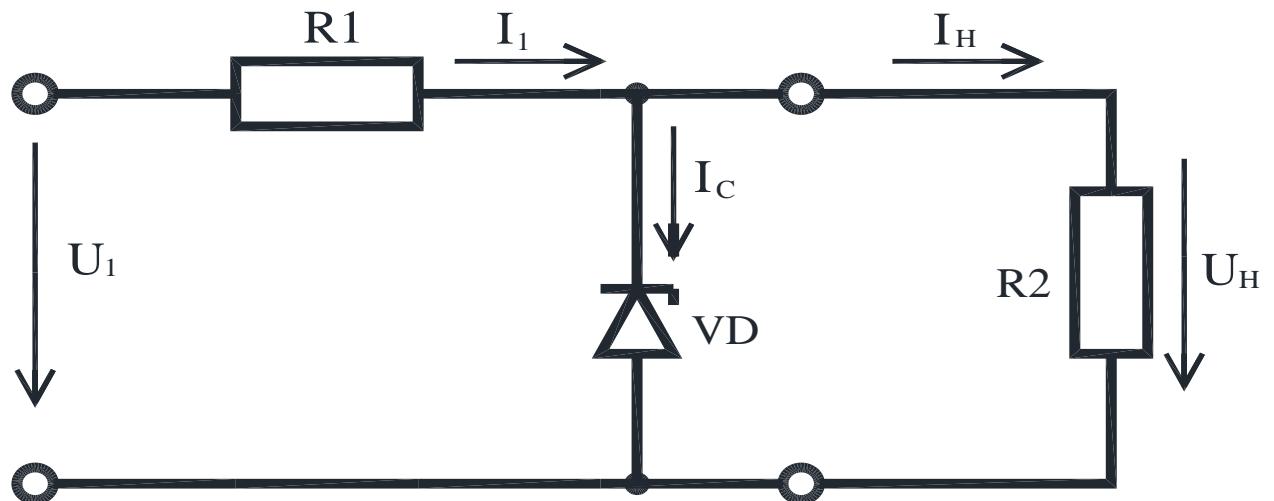


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема параметрического стабилизатора напряжения

Найденные точки соединяются прямой линией. Координаты точки пересечения ВАХ нелинейного элемента с прямой линией на оси напряжений указывают на значение напряжения на нелинейном элементе, а на оси токов – значение тока в цепи.

На рисунке 2.2 описанная методика расчёта использована для анализа процессов в параметрическом стабилизаторе напряжения. На ВАХ стабилитрона прямые линии построены для трёх значений напряжения питания. Напряжение  $U_{1\min}$  имеет такое значение, при котором ток в цепи соответствует минимально допустимому току стабилитрона  $I_{c\min}$ ,  $U_{1\max}$  даёт значение тока в цепи, соответствующее максимально допустимому току стабилитрона  $I_{c\max}$ , а средняя линия построена для номинального режима. Из

рисунка 2.2 видно, что на интервале изменения напряжения питания  $U_1$  от  $U_{1\min}$  до  $U_{1\max}$  напряжение на стабилитроне практически не изменяется и соответствует напряжению стабилизации стабилитрона  $U_c$ . Разница между  $U_1$  и  $U_c$  всегда падает на балластном резисторе  $R1$ .

Если напряжение питания  $U_1$  выйдет за пределы отмеченного диапазона, то при малом его значении ток в цепи станет меньше тока  $I_{c\ min}$  и напряжение на стабилитроне станет меньше напряжения стабилизации  $U_c$ . Это значит, что стабилизатор перестаёт выполнять стабилизирующую функцию. При большом напряжении  $U_1$  ток через стабилитрон превысит предельно допустимое значение  $I_{c\ max}$ . В этом случае стабилитрон перегреется и выйдет из строя.

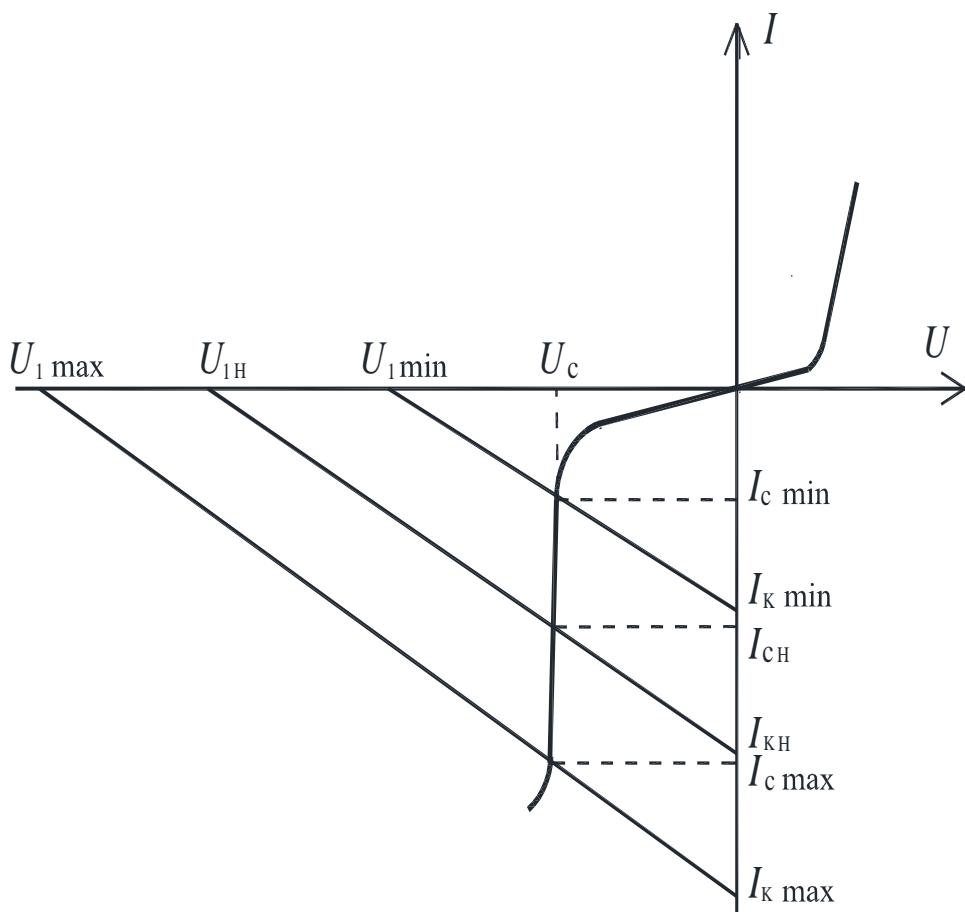


Рисунок 2.2 – Вольт-амперная характеристика, поясняющая работу параметрического стабилизатора напряжения

При подключении нагрузки параллельно стабилитрону ток в нём уменьшится, и если при этом он останется больше, чем  $I_{c\ min}$ , то напряжение на стабилитроне не изменится. На практике при проектировании параметрического стабилизатора значение  $R1$  выбирается таким, чтобы при

номинальном входном напряжении  $U_{1\text{h}}$  и номинальной нагрузке значение тока стабилитрона  $I_{\text{ch}}$  находилось в средней части интервала между  $I_{\text{c min}}$  и  $I_{\text{c max}}$  (см. рисунок 2.2). В этом случае при отклонении сопротивления нагрузки или напряжения питания  $U_1$  от номинального значения ток через стабилитрон будет изменяться в большую или меньшую сторону, а напряжение на стабилитроне и нагрузке останется неизменным. Изменять  $U_1$  и  $R2$  можно до значений, при которых ток стабилитрона не выходит за пределы рабочего диапазона. Так уменьшать сопротивление нагрузки можно до тех пор, пока ток стабилитрона не достигнет значения  $I_{\text{c min}}$ . Дальнейшее уменьшение  $R2$  приведёт к уменьшению напряжения на стабилитроне и к нарушению процесса стабилизации. При увеличении сопротивления нагрузки ток в ней уменьшается, а в стабилитроне возрастает и может превысить предельно допустимое значение.

### Методика расчёта параметрического стабилизатора напряжения

Исходными данными для проектирования параметрического стабилизатора являются номинальное напряжение на нагрузке  $U_{\text{hh}}$ , номинальный ток нагрузки  $I_{\text{hh}}$  и возможные отклонения напряжения питания  $\Delta U_1\%$  и тока нагрузки  $\Delta I_{\text{h}}\%$  от номинального значения. Эти параметры выбираются из приложения А.

По справочнику выбирается стабилитрон с напряжением стабилизации  $U_c$ , равным заданному напряжению на нагрузке  $U_{\text{hh}}$ . По току стабилитрон выбирается таким образом, чтобы

$$(I_{\text{c min}} + I_{\text{c max}}) / 2 \geq I_{\text{hh}}.$$

Для выбранного стабилитрона в справочнике находятся значения максимально допустимого  $I_{\text{c max}}$  и минимально допустимого  $I_{\text{c min}}$  тока.

Рабочий ток стабилитрона

$$I_c = (I_{\text{c min}} + I_{\text{c max}}) / 2.$$

Входное напряжение стабилизатора в номинальном режиме

$$U_{1\text{h}} = n_c U_{\text{hh}},$$

где  $n_c$  – коэффициент передачи стабилизатора.

Для оптимальных условий работы стабилизатора рекомендуется выбирать  $n_c$  в пределах от 1,4 до 2.

Отклонение входного напряжения от номинального значения

$$\Delta U_1 = U_{1\text{h}} \Delta U_1\% / 100 \text{ \%}.$$

Минимальное значение входного напряжения

$$U_{1\text{min}} = U_{1\text{h}} - \Delta U_1.$$

Максимальное значение входного напряжения

$$U_{1\max} = U_{1h} + \Delta U_1.$$

Сопротивление балластного резистора  $R1$

$$R1 = (U_{1h} - U_{hh}) / (I_c + I_{hh}).$$

Сопротивление нагрузочного резистора  $R2$

$$R2 = U_{hh} / I_{hh}.$$

Выбираются стандартные резисторы из номинального ряда Е24 (приложение Б), значение сопротивления которых имеет ближайшее значение к рассчитанному значению  $R1$  и  $R2$ . Для дальнейших расчётов принимаются за значения  $R1$  и  $R2$  выбранные стандартные значения сопротивления.

Отклонение тока нагрузки от номинального значения

$$\Delta I_h = I_{hh} \Delta I_h \% / 100 \%.$$

Минимальный рабочий ток стабилитрона

$$I_{p.\min} = (U_{1h} - \Delta U_1 - U_{hh}) / R1 - (I_{hh} + \Delta I_h).$$

Максимальный рабочий ток стабилитрона

$$I_{p.\max} = (U_{1h} + \Delta U_1 - U_{hh}) / R1 - (I_{hh} - \Delta I_h).$$

Если рассчитанные значения тока  $I_{p.\min} < I_{c.\min}$  или  $I_{p.\max} > I_{c.\max}$ , то можно или выбрать другой стабилитрон с большим током, или попытаться изменить сопротивление резистора  $R1$ .

Качество работы стабилизатора определяется коэффициентом стабилизации

$$K_{ct} = \Delta U_1 U_{hh} / \Delta U_h U_{1h},$$

где  $\Delta U_1$  – отклонение напряжения питания стабилизатора от номинального значения, равное абсолютному значению разности между номинальным и реальным напряжениями на входе стабилизатора;

$\Delta U_h$  – отклонение напряжения на нагрузке от номинального значения, равное абсолютному значению разности между напряжением на нагрузке при токе, отличном от номинального, и напряжением на нагрузке в номинальном режиме.

У большинства параметрических стабилизаторов напряжения значение коэффициента стабилизации находится в пределах от нескольких единиц до

нескольких десятков. Если требуется больший коэффициент стабилизации, то применяются компенсационные стабилизаторы.

Для экспериментального изучения процессов в параметрическом стабилизаторе напряжения по указанию преподавателя из приложения А взять исходные данные для его расчёта. По рассмотренной выше методике рассчитать сопротивление балластного резистора и выбрать марку стабилитрона. Результаты расчёта использовать для выбора параметров схемы при экспериментальном исследовании цепи в среде Multisim.

### Порядок выполнения экспериментальной работы

Открыть программу Multisim. На *панели инструментов* найти курсором мыши пиктограмму **[Мультиметр]** и выполнить операцию занесения в *рабочую зону* трёх этих приборов. На *панели компонентов* выбрать курсором мыши пиктограмму **[Пассивные компоненты]** и нажать клавишу мыши. В открывшемся меню этой группы в окне **[Семейство]** выбрать элемент **[RESISTOR]** и занести в *рабочую зону* два резистора.

На *панели компонентов* выбрать курсором мыши пиктограмму **[Источники]** и нажать клавишу мыши. В открывшемся меню этой группы в окне **[Компонент]** выбрать источник питания постоянного напряжения **[DC\_POWER]** и занести его в *рабочую зону*, а затем в этом же окне выбрать элемент **[GROUND]** и занести его в *рабочую зону*.

На *панели компонентов* выбрать курсором мыши пиктограмму **[Диоды]** и нажать клавишу мыши. В открывшемся меню этой группы в окне **[Семейство]** мышью активировать элемент **[ZENER]** и в окне **[Компонент]** активировать выбранную в результате расчёта марку стабилитрона.

В соответствии с принципиальной схемой, изображённой на рисунке 2.3, в *рабочей зоне* собрать электрическую цепь.

Открыть рабочие окна всех мультиметров и установить для них необходимые режимы работы. Так как в цепи действует источник постоянного напряжения, то все они должны работать с постоянным напряжением **[–]**. Такой режим у них установлен по умолчанию. Измеряемая величина определяется местом включения прибора. Мультиметры XMM1, XMM2, XMM3 должны контролировать ток **[A]**, а XMM4 – напряжение **[V]**.

Для сопротивления балластного резистора  $R_1$  и сопротивления нагрузки  $R_2$  установить значения, полученные в результате теоретического расчёта стабилизатора. Установить напряжение источника питания, соответствующее номинальному расчётному значению  $U_{1h}$ .

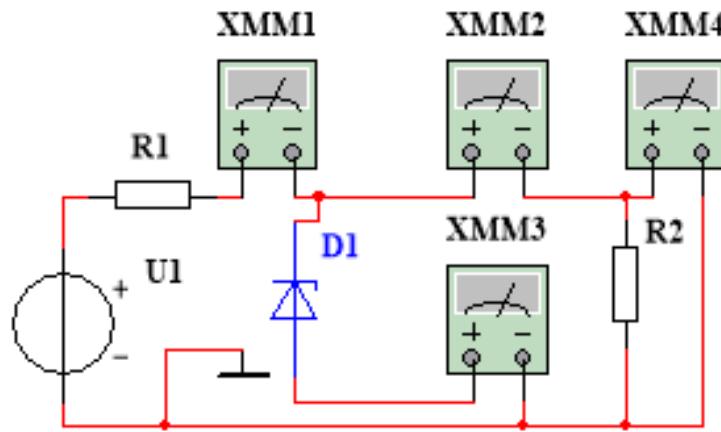


Рисунок 2.3 – Схема цепи для исследования стабилизатора напряжения

Запустить процесс моделирования нажатием кнопки [►]. В окнах мультиметров появится информация, указывающая на значение электрических параметров в схеме. Первый мультиметр контролирует значение входного тока цепи  $I_1$ , второй – значение тока нагрузки  $I_h$ , третий – ток стабилитрона  $I_c$ , а мультиметр XMM4 измеряет напряжение на нагрузке  $U_h$ . Результаты измерений при номинальном входном напряжении  $U_{1h}$  занести в таблицу 2.1. Остановить моделирование кнопкой [■].

Таблица 2.1 – Результаты измерения токов и напряжений в схеме стабилизатора

| $U_{1h}$ , В  |               |               |                 | $U_{1 \min}$ , В |               |               |                     | $U_{1 \max}$ , В |               |               |                     |
|---------------|---------------|---------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|---------------------|------------------|---------------|---------------|---------------------|
| $I_1$ ,<br>mA | $I_h$ ,<br>mA | $I_c$ ,<br>mA | $U_{hh}$ ,<br>В | $I_1$ ,<br>mA    | $I_h$ ,<br>mA | $I_c$ ,<br>mA | $U_{h \min}$ ,<br>В | $I_1$ ,<br>mA    | $I_h$ ,<br>mA | $I_c$ ,<br>mA | $U_{h \max}$ ,<br>В |
|               |               |               |                 |                  |               |               |                     |                  |               |               |                     |

Установить значение напряжения источника питания, соответствующее расчётному значению  $U_{1 \min}$ . Запустить процесс моделирования и записать в таблицу 2.1 показания мультиметров при  $U_{1 \min}$ . Остановить моделирование и задать источнику питания напряжение, соответствующее расчётному значению  $U_{1 \max}$ . Запустить процесс моделирования и записать в таблицу 2.1

новые показания мультиметров, соответствующие новому значению напряжения источника питания. Выключить моделирование.

Рассчитать отклонение напряжения на нагрузке при  $U_{1 \min}$  по формуле

$$\Delta U_h = U_{hh} - U_{h \min},$$

где  $U_{h \min}$  – измеренное значение напряжения на нагрузке при  $U_{1 \min}$ .

Изменение напряжения на нагрузке при  $U_{1\max}$

$$\Delta U_{h\max} = U_{h\max} - U_{hh},$$

где  $U_{h\max}$  – измеренное значение напряжения на нагрузке при  $U_{1\max}$ .

Отклонение напряжения на входе стабилизатора

$$\Delta U_1 = U_{1h} - U_{1\min}.$$

Зная  $U_{1h}$ ,  $U_{hh}$ ,  $\Delta U_1$ ,  $\Delta U_{h\min}$  и  $\Delta U_{h\max}$ , рассчитать коэффициент стабилизации стабилизатора при отклонении напряжения питания  $U_1$  в большую и меньшую сторону, используя выражение

$$K_{ct} = \Delta U_1 U_{hh} / \Delta U_h U_{1h}.$$

На этом экспериментальное исследование параметрического стабилизатора напряжения завершено.

### Контрольные вопросы

- 1 Назначение стабилизаторов постоянного напряжения и их разновидности.
- 2 Какими параметрами характеризуют свойства стабилизаторов постоянного напряжения?
- 3 Какие параметры стабилитронов используются при проектировании параметрических стабилизаторов?
- 4 ВАХ полупроводникового стабилитрона и её отличие от ВАХ других полупроводниковых диодов.
- 5 В каком режиме работает стабилитрон в параметрическом стабилизаторе напряжения?
- 6 На чём основан принцип действия параметрического стабилизатора напряжения?
- 7 Почему не допускается работа параметрического стабилизатора напряжения в режимах, при которых ток стабилитрона меньше минимально допустимого значения?
- 8 Почему не допускается работа параметрического стабилизатора напряжения в режимах, при которых ток стабилитрона больше максимально допустимого значения?
- 9 Достоинства и недостатки параметрического стабилизатора напряжения.
- 10 Назначение балластного резистора в параметрическом стабилизаторе.
- 11 Области применения параметрического стабилизатора напряжения.

## 2.2 Исследование биполярного транзистора

Транзистором называется полупроводниковый прибор с тремя и более выводами, предназначенный для усиления, генерирования, преобразования и коммутации электрических сигналов. В электронных устройствах используются биполярные и полевые (униполярные) транзисторы, а также приборы, состоящие из полевого и биполярного транзисторов (JGBT-транзисторы). Ниже рассматриваются процессы в биполярном транзисторе.

У биполярного транзистора в кристалле полупроводника специальными технологическими приёмами сформированы три области с чередующимися типами примесной проводимости полупроводниковой структуры. Существуют два типа примесных полупроводников. В полупроводниках *p*-типа проводимость в основном создаётся преимущественно положительно заряженными частицами (в полупроводниковой технике они называются дырками), а в полупроводниках *n*-типа проводимость, в основном, формируется отрицательно заряженными частицами (электронами). В зависимости от порядка чередования в полупроводнике этих областей различают две разновидности биполярных транзисторов: *p-n-p*- и *n-p-n*-типа. Из каждой области сделан электрический вывод. Вывод из одной крайней области называется эмиттером, из другой крайней области – коллектором, а вывод из промежуточной области считается базой. Различие между этими разновидностями транзисторов заключается в полярности напряжений, которые необходимо подавать на их электроды. Так, для открытия транзистора *n-p-n*-типа на его базу относительно эмиттера надо подавать положительный потенциал, а на базу *p-n-p* – отрицательный.

Так как обычный транзистор имеет только три вывода, то при включении его в электрическую схему один из выводов обязательно является общим между входной и выходной цепью. В зависимости от этого различают три схемы включения транзистора в усилительном каскаде. Для биполярного транзистора такими схемами являются схема с общей базой (ОБ), схема с общим эмиттером (ОЭ) и схема с общим коллектором (ОК). Наиболее широко применяется схема с ОЭ. Объясняется это тем, что данная схема благодаря большому коэффициенту усиления по току и напряжению имеет наибольший коэффициент усиления по мощности.

На практике при анализе процессов в цепях с транзисторами можно использовать их статические характеристики. С помощью этих характеристик устанавливаются зависимости между токами и напряжениями на электродах транзистора. Используются два вида характеристик: входные и выходные. Для схемы с ОЭ входной характеристикой служит зависимость тока базы от значения напряжения между базой и эмиттером. Снимается эта характеристика при постоянном значении напряжения между коллектором и эмиттером транзистора.

Выходной характеристикой является зависимость тока коллектора от значения напряжения между коллектором и эмиттером, снятая при фиксированном значении тока базы. Примерный вид статических характеристик для схемы с ОЭ изображён на рисунке 2.4. Входные показаны для двух значений напряжения между коллектором и эмиттером 0 В и 5 В. Такие значения этого напряжения чаще всего встречаются в справочниках. Выходные характеристики приведены для пяти различных фиксированных значений тока базы.

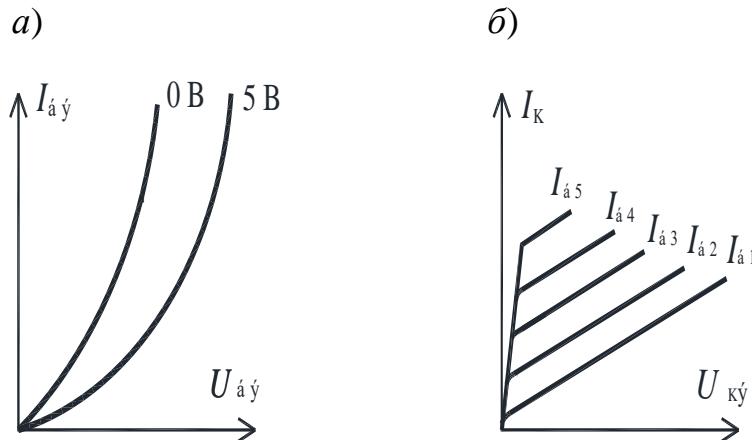


Рисунок 2.4 – Статические характеристики биполярного транзистора:  
а – входные; б – выходные

Важность этих характеристик для работы с транзисторами подчёркивается тем, что для многих транзисторов они приведены в справочниках. С помощью статических характеристик можно выбрать оптимальный режим работы транзистора по постоянному току, определить допустимые амплитуды переменного напряжения на его входе и выходе, проанализировать степень искажения усиливаемого сигнала, рассчитать значения постоянных коэффициентов ( $h$ -параметров), используемых для создания математической модели транзистора. Получить статические характеристики можно экспериментальным путём.

При теоретическом анализе электромагнитных процессов в цепях с транзисторами последние часто заменяются математическими моделями (схемами замещения). Одной из таких схем является схема, приведённая на рисунке 2.5. В соответствии с этой схемой транзистор можно представить в виде четырёхполюсника – блока, содержащего два входных и два выходных зажима. В четырёхполюснике входные и выходные токи и напряжения связываются между собой системой уравнений, которая позволяет по известным двум величинам определить две неизвестные.

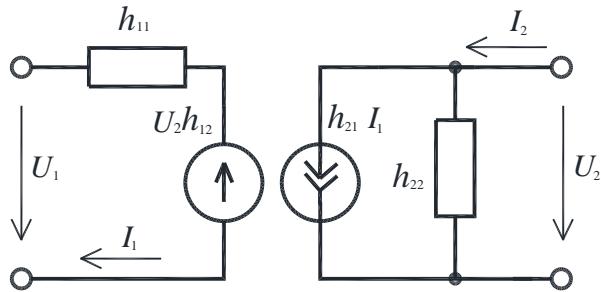


Рисунок 2.5 – Схема замещения биполярного транзистора

В электронике наиболее часто используется  $h$ -форма записи уравнений четырёхполюсника, которая имеет вид

$$U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2;$$

$$I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2.$$

В этих уравнениях  $U_1$  и  $U_2$  – напряжения на входе и выходе четырёхполюсника, а  $I_1$  и  $I_2$  – токи на его входе и выходе. Параметры  $h_{11}$ ,  $h_{12}$ ,  $h_{21}$ ,  $h_{22}$  являются постоянными коэффициентами, значения которых зависят от свойств конкретного транзистора. Физический смысл  $h$ -параметров следующий:

$h_{11}$  – входное сопротивление транзистора при коротком замыкании сигнала на выходе;

$h_{12}$  – коэффициент обратной передачи по напряжению;

$h_{21}$  – коэффициент передачи тока при коротком замыкании сигнала на выходе;

$h_{22}$  – выходная проводимость транзистора при холостом ходе на его входе.

Для транзистора как усилителя входными и выходными параметрами являются соответствующие приращения токов и напряжений на его входе и выходе. При включении транзистора по схеме с ОЭ входными величинами являются приращение напряжения между базой и эмиттером  $\Delta U_{бэ}$ , а также приращение тока базы  $\Delta I_b$ . Выходными – приращение напряжения между коллектором и эмиттером  $\Delta U_{кэ}$  и приращение тока коллектора  $\Delta I_k$ . В соответствии с этим для схемы с ОЭ систему уравнений четырёхполюсника можно представить в виде

$$\Delta U_{бэ} = h_{11}\Delta I_b + h_{12}\Delta U_{кэ};$$

$$\Delta I_k = h_{21}\Delta I_b + h_{22}\Delta U_{кэ}.$$

Из теории четырёхполюсников известно, что значение постоянных коэффициентов в уравнениях можно определить экспериментальным путём. Так, если допустить что  $\Delta U_{кэ} = 0$  (т. е.  $U_{кэ} = \text{const}$ ), то из первого уравнения системы  $h_{11} = \Delta U_{бэ} / \Delta I_b$ , а из второго уравнения  $h_{21} = \Delta I_k / \Delta I_b$ . Если допустить,

что  $\Delta I_b = 0$  (т. е.  $I_b = \text{const}$ ), то из первого уравнения  $h_{12} = \Delta U_{b\text{e}} / \Delta U_{\text{ce}}$ , а из второго  $h_{22} = \Delta I_b / \Delta U_{\text{ce}}$ . Для нахождения отмеченных выше приращений тока и напряжения можно использовать линейные участки статических характеристик транзистора. По входной характеристики определяют параметры  $h_{11}$  и  $h_{12}$ , а выходной –  $h_{21}$  и  $h_{22}$ . Примеры выбора приращений для определения  $h$ -параметров приведены на рисунке 2.6.

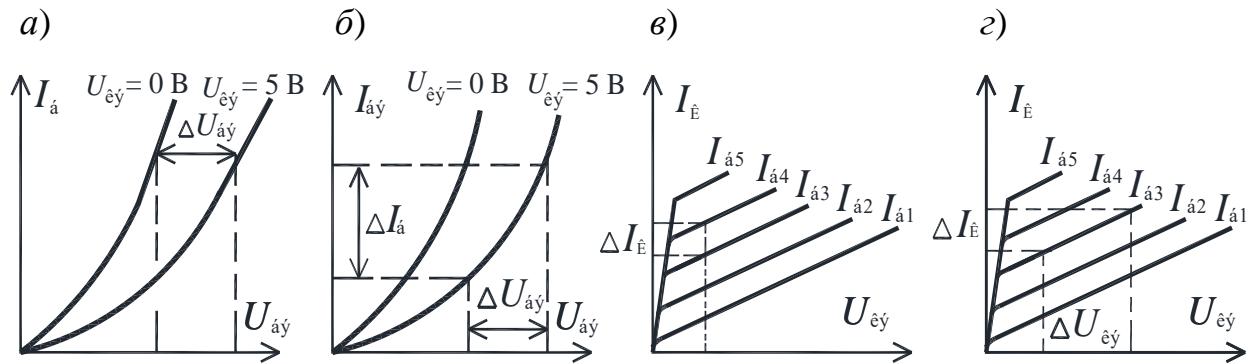


Рисунок 2.6 – Статические характеристики транзистора:  
а, б – входные; в, г – выходные

Входные характеристики сняты при двух значениях напряжения  $U_{\text{ce}}$  (0 и 5 В). Выходные характеристики сняты при пяти значениях тока базы  $I_b$ , причём  $I_{b1} < I_{b2} < I_{b3} < I_{b4} < I_{b5}$ . Рисунок 2.6, а используется для определения  $h_{12}$ , 2.6, б – для определения  $h_{11}$ , 2.6, в – для определения  $h_{21}$ , 2.6, г – для определения  $h_{22}$ . Из приведённого выше следует, что для определения  $h$ -параметров биполярного транзистора необходимо знать его вольтамперные характеристики (входные и выходные). На практике эти характеристики получаются экспериментальным путём. Ниже рассматривается методика проведения такого экспериментального исследования транзистора путём моделирования процессов в среде Multisim.

### Порядок выполнения экспериментального исследования

Открыть программу Multisim. На *панели инструментов* найти курсором мыши пиктограмму **[Характериограф]** и однократно нажать клавишу мыши. В *рабочей зоне* появится пиктограмма характериографа, которую мышью можно переместить в удобное для сборки цепи место. Однократным нажатием клавиши мыши пиктограмма закрепляется в выбранном месте. На *панели компонентов* выбрать курсором мыши пиктограмму **[Транзисторы]** и нажать клавишу мыши. В открывшемся меню этой группы в окне **[Семейство]** выбрать тип проводимости транзистора (**BJT\_NPN** или **BJT\_PNP**), взятый по указанию преподавателя из приложения А. В окне

[Компонент] выбрать курсором мыши марку этого транзистора и нажать кнопку [Ок]. В открывшейся *рабочей зоне* появится курсор с привязанной к нему пиктограммой транзистора. Нажатием клавиши мыши эта пиктограмма закрепляется в выбранном месте *рабочей зоны*, одновременно снова открывается меню, в котором необходимо активировать кнопку [Закрыть].

Навести курсор мыши на пиктограмму характеристиографа и двойным нажатием клавиши мыши открыть его лицевую панель (рисунок 2.7). По умолчанию в поле [Выбор компонента] записано [Diode]. Этот режим работы прибора необходимо сохранить. Он позволяет снять входную характеристику транзистора.

Нажать кнопку [Моделирование] и в открывшемся окне [Параметры моделирования], в строке [Начало] записать значение  $U_{бэ\ min}$ , а в строке [Окончание] – значение  $U_{бэ\ max}$ . Эти рекомендуемые параметры для выбранного транзистора берутся из приложения А. Значение приращения можно оставить 10 мВ. Закрыть окно.

В соответствии с рисунком 2.8, *a* в *рабочей зоне* собрать схему для снятия входной характеристики транзистора типа *n-p-n*  $I_b = f(U_{бэ})$  при нулевом напряжении на его выходе  $U_{кэ} = 0$  В. **При исследовании транзистора типа *p-n-p* точки подключения к характеристиографу его базы и эмиттера меняются местами.**

Нажатием кнопки [▶] над *рабочей зоной* запустить процесс моделирования. На экране дисплея отобразится кривая входной характеристики транзистора, параметры которой необходимо занести в таблицу 2.2.

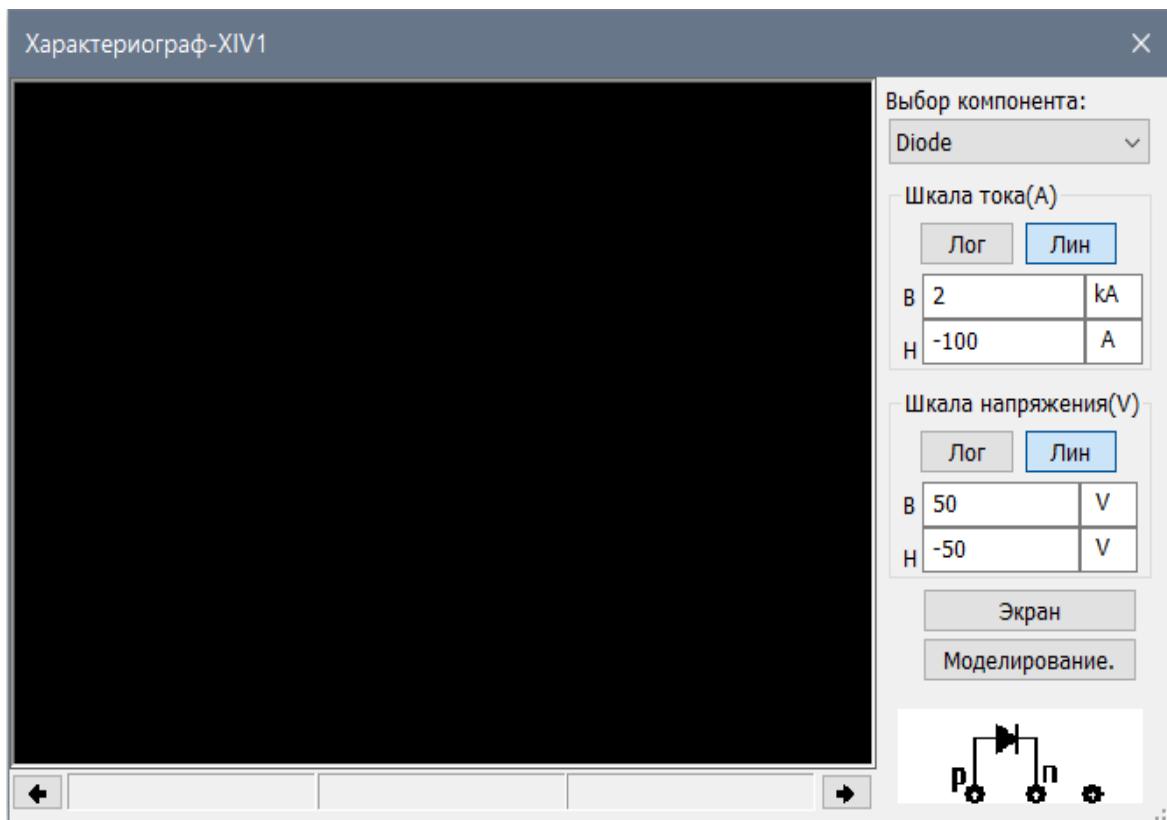


Рисунок 2.7– Лицевая панель харктериографа

Начинать операцию занесения необходимо с выбора значений напряжений  $U_{бэ}$ , при которых будут сниматься значения тока базы  $I_b$ . В диапазоне изменения входного напряжения  $U_{бэ}$ , рекомендованном в приложении А, необходимо выбрать 6–7 значений этого напряжения. Выбранные значения записать в таблицу 2.2. Кнопками [ $\leftarrow$ ] и [ $\rightarrow$ ] под экраном дисплея передвигать маркерную линию по оси  $X$  в точки, соответствующие выбранным значениям входного напряжения (на значение напряжения, на которое установлена маркерная линия, указывает левое число под экраном). Правое число под экраном соответствует значению тока базы в данной точке входной характеристики. Значения всех найденных токов базы  $I_b$  при нулевом коллекторном напряжении занести в таблицу 2.2. Выключить процесс моделирования кнопкой [■].

На панели компонентов выбрать мышью группу [Источники]. В открывшемся меню в поле [Компоненты] выбрать источник постоянного напряжения [DC\_POWER] и нажать кнопку [Ок]. Однократным нажатием клавиши мыши пиктограмма источника закрепляется в рабочей зоне и одновременно снова открывается меню. В открывшемся меню нажать кнопку [Закрыть]. Навести курсор на пиктограмму источника питания, двойным нажатием клавиши мыши открыть его меню и в строке [Напряжение] записать 5 В. Закрыть меню и в соответствии с рисунком 2.8, б для

транзистора типа *n-p-n* собрать в рабочей зоне электрическую цепь для снятия экспериментальной входной характеристики при напряжении между коллектором и эмиттером  $U_{кэ} = 5$  В.

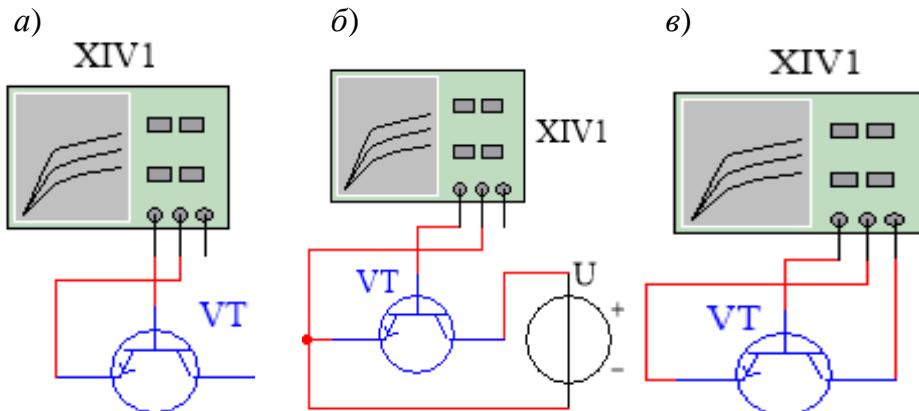


Рисунок 2.8 – Схемы цепей для снятия ВАХ транзистора:  
а и б – входных; в – выходных

Таблица 2.2 – Координаты точек для построения входных характеристик

|                |               |  |  |  |  |  |  |
|----------------|---------------|--|--|--|--|--|--|
| $U_{кэ} = 0$ В | $U_{бэ}$ , мВ |  |  |  |  |  |  |
|                | $I_b$ , мА    |  |  |  |  |  |  |
| $U_{кэ} = 5$ В | $I_b$ , мА    |  |  |  |  |  |  |

При работе с транзистором типа *p-n-p* входы харктериографа, к которым подключаются выводы эмиттера и базы транзистора, поменять местами. Дополнительно необходимо изменить на противоположную полярность включения в цепь источника питания. Запустить процесс моделирования кнопкой [►]. На экране отобразится входная характеристика. Её параметры при тех же значениях напряжения  $U_{бэ}$  с помощью методики, рассмотренной для первой характеристики, записать в таблицу 2.2. Выключить процесс моделирования.

На лицевой панели харктериографа в строке [Выбор компонента] курсором мыши выбрать тип заданного транзистора (BJT PNP или BJT NPN). На этой же панели активировать кнопку [Моделирование]. В окне [Параметры моделирования] для коллекторного напряжения в строке [Начало] ноль, а в строке [Окончание] записать предельные значения записать коллекторного напряжения  $U_{кэ max}$ , взятые для выбранного транзистора из приложения А. В строке [Приращение] для коллекторного напряжения можно оставить значение, записанное здесь по умолчанию. Аналогично для тока базы в строке [Начало] записать рекомендуемое для выбранного транзистора минимальное значение  $I_{b min}$ , а в строке [Окончание] – предельное значение  $I_{b max}$ . В строке [Приращение] для тока базы записать

число 5. Это значит, что на экране дисплея будут отображены пять выходных характеристик транзистора.

В соответствии с рисунком 2.8, в, собрать в рабочей зоне электрическую цепь для снятия выходной характеристики  $I_k = f(U_{k\theta})$ . Запустить процесс моделирования. На экране дисплея отобразится семейство характеристик.

Для построения этих характеристик необходимо знать их координаты. На рабочем участке, расположенном правее области насыщения (правее точек излома кривых), выходные характеристики практически прямолинейны, поэтому для их построения достаточно знать координаты двух точек, принадлежащих каждой из этих характеристик.

Рекомендуется процесс нахождения координат точек выполнять в следующей последовательности. С помощью кнопок [←] и [→] маркерная линия устанавливается в такое положение, при котором она проходит несколько правее изломов характеристик. В трёх окнах под дисплеем появляются числа. В левом окне – значение тока базы  $I_b$ , при котором получена характеристика. По умолчанию здесь выведено первым минимальное значение этого тока, указанное в исходных данных. В среднем окне показано значение напряжения между коллектором и эмиттером транзистора, а в правом – значение тока коллектора. Полученные в ходе эксперимента значения  $I_b$ ,  $U_{k\theta}$  и  $I_k$  необходимо занести в таблицу 2.3.

Далее, не изменяя положения маркерной линии, перейти на следующую характеристику, рассчитанную при другом, увеличенном токе базы. Для выбора новой характеристики курсор наводится на открытую панель характеристографа и нажимается правая клавиша мыши, в открывшемся окне активируется строка [Выбрать кривую]. Появляется новое окно со строкой [Кривая]. Клавишей мыши активируется эта строка и на экране открывается меню значений тока базы, при которых рассчитаны выходные характеристики. Эти значения можно сразу занести в верхнюю строку таблицы 2.3. Выбором соответствующего значения тока базы из открывшегося меню определяется желаемая характеристика.

Курсором мыши выбирается следующее значение тока базы и нажимается кнопка [OK]. На экране в точке пересечения выбранной характеристики с маркерной линией появляется маркер (значок в виде окружности небольшого диаметра). Под дисплейным окном отображаются значения  $I_b$ ,  $U_{k\theta}$  и  $I_k$  для второй характеристики. Так как положение маркерной линии не изменилось, то и значение  $U_{k\theta}$  осталось прежним, а  $I_b$  и  $I_k$  увеличились. Значения  $U_{k\theta}$  и  $I_k$  для выбранного тока базы  $I_b$  записать в таблицу 2.3. Далее выбирается следующий ток базы и новые значения  $I_b$  и  $I_k$  заносятся в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Координаты точек для построения выходных характеристик

### транзистора

| $I_{61} = \dots, \text{ mA}$ |                   | $I_{62} = \dots, \text{ mA}$ |                   | $I_{63} = \dots, \text{ mA}$ |                   | $I_{64} = \dots, \text{ mA}$ |                   | $I_{65} = \dots, \text{ mA}$ |                   |
|------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|
| $U_{k\alpha}, \text{ В}$     | $I_k, \text{ mA}$ |
|                              |                   |                              |                   |                              |                   |                              |                   |                              |                   |
|                              |                   |                              |                   |                              |                   |                              |                   |                              |                   |

Выполнив отмеченные выше операции для всех значений тока базы, маркерную линию переместить в точку, находящуюся вблизи максимального значения напряжения  $U_{k\alpha \max}$  между коллектором и эмиттером транзистора. Это положение линии позволяет получить координаты второй точки каждой кривой выходной характеристики. С этой целью, как и выше, выбираются токи базы  $I_b$  от минимального до максимального значения и определяются для нового значения  $U_{k\alpha}$  параметры  $I_b$  и  $I_k$ . Эти параметры необходимо записать в таблицу 2.3.

Значения  $U_{k\alpha}$  и  $I_k$  в таблице 2.3 позволяют построить по двум точкам пять выходных характеристик транзистора на их линейном участке. Здесь для каждого значения тока базы (каждой характеристики) имеются два значения  $U_{k\alpha}$  и соответствующие им значения тока коллектора  $I_k$ . По данным, содержащимся в таблицах 2.2 и 2.3, в масштабе построить входные и выходные характеристики транзистора.

Входные и выходные характеристики позволяют определить  $h$ -параметры транзистора. Так, параметр  $h_{11}$  равен отношению приращения напряжения между базой и эмиттером к соответствующему приращению тока базы при фиксированном значении напряжения на коллекторе транзистора, т. е.  $h_{11} = \Delta U_{b\alpha} / \Delta I_b$  при  $U_{k\alpha} = \text{const}$ . Значения  $\Delta U_{b\alpha}$  и  $\Delta I_b$  выбираются из входной характеристики, снятой при  $U_{k\alpha} = 5 \text{ В}$  (см. рисунок 2.6, б). В этом выражении напряжение можно подставлять в милливольтах, а ток – в миллиамперах, тогда сопротивление получается в омах. Этот параметр соответствует входному сопротивлению транзистора.

Коэффициент  $h_{12}$  равен отношению приращения напряжения между базой и эмиттером транзистора к соответствующему приращению напряжения между коллектором и эмиттером, взятыми при фиксированном значении тока базы, т. е.  $h_{12} = \Delta U_{b\alpha} / \Delta U_{k\alpha}$  при  $I_b = \text{const}$ . Значения  $\Delta U_{b\alpha}$  и  $\Delta U_{k\alpha}$  брать из входных характеристик, снятых при  $U_{k\alpha} = 0 \text{ В}$  и  $U_{k\alpha} = 5 \text{ В}$ , их размерность должна быть одинаковой (вольты или милливольты). Для этого выбора на оси токов найти точку, соответствующую выбранному значению тока базы  $I_b$ , при котором рассчитывается параметр. Значение этого тока должно находиться внутри диапазона значений тока базы, указанных в исходных данных. Из выбранной точки строится перпендикуляр к оси токов до

пересечения с ВАХ, снятыми при  $U_{кэ} = 0$  В и  $U_{кэ} = 5$  В. Из полученных точек пересечения опустить перпендикуляры на ось напряжений  $U_{бэ}$  (см. рисунок 2.6, *а*). Тем самым на оси напряжений найдены два значения напряжения  $U_{бэ}$ . Разница между этими значениями является значением  $\Delta U_{бэ}$ . Так как рассматриваемые входные характеристики сняты при двух значениях напряжения между коллектором и эмиттером транзистора (0 В и 5 В), то в этом случае  $\Delta U_{кэ} = 5$  В.

Коэффициент  $h_{21}$  равен отношению приращения тока коллектора к соответствующему приращению тока базы, взятыми при фиксированном значении напряжения между коллектором и эмиттером, т. е.  $h_{21} = \Delta I_{к} / \Delta I_{б}$  при  $U_{кэ} = \text{const}$ .

Определение  $\Delta I_{к}$  и  $\Delta I_{б}$  начинается с выбора значения коллекторного напряжения, при котором рассчитывается коэффициент. Это значение должно находиться в средней части диапазона изменения напряжения между коллектором и эмиттером транзистора, указанного в исходных данных, которые приведены в приложении А. Из точки на оси напряжений выходных характеристик, соответствующей выбранному значению напряжения  $U_{кэ}$ , провести перпендикуляр к этой оси до пересечения с двумя любыми соседними выходными характеристиками (см. рисунок 2.6, *в*). Из полученных точек пересечения провести перпендикуляры к оси токов коллектора. Разница значений токов коллектора, полученных при пересечении перпендикулярами оси токов, равна  $\Delta I_{к}$ . Значение  $\Delta I_{б}$  равно разности значений токов базы, при которых сняты используемые характеристики. В соответствии с рисунком 2.6, *в*  $\Delta I_{б} = I_{б4} - I_{б3}$ . Размерность значений  $\Delta I_{к}$  и  $\Delta I_{б}$  должна быть одинаковой.

Параметр  $h_{22}$  равен отношению приращения тока коллектора к соответствующему приращению напряжения между коллектором и эмиттером, взятыми при фиксированном значении тока базы, т. е.  $h_{22} = \Delta I_{к} / \Delta U_{кэ}$  при  $I_{б} = \text{const}$ . Для определения значений  $\Delta I_{к}$  и  $\Delta U_{кэ}$  выбирается выходная характеристика, снятая при токе базы, находящемся вблизи средней части диапазона изменения этого тока (см. рисунок 2.6, *г*). На оси напряжений фиксируются две точки. Разница значений напряжений в этих точках равна  $\Delta U_{кэ}$ . Положение точек следует выбирать таким, при котором значение  $\Delta U_{кэ}$  составляет несколько вольт. Из выбранных точек построить перпендикуляры к оси напряжений до пересечения с выбранной выходной характеристикой. В свою очередь, из полученных точек пересечения опустить перпендикуляры на ось токов. На этой оси перпендикулярами фиксируются два значения тока коллектора. Разница между этими значениями равна  $\Delta I_{к}$ . В выражении для  $h_{22}$  напряжение можно подставлять в милливольтах, а ток в миллиамперах, тогда размерность результата получается в сименсах – это выходная проводимость транзистора (величина,

обратная его выходному сопротивлению). Результаты расчёта  $h$ -параметров записать в таблицу 2.4.

**Таблица 2.4 – Расчётные значения  $h$ -параметров транзистора**

| $h_{11}$ , Ом | $h_{12}$ | $h_{21}$ | $h_{22}$ , См |
|---------------|----------|----------|---------------|
|               |          |          |               |

### **Контрольные вопросы**

- 1 Разновидности биполярных транзисторов.
- 2 Схемы включения транзистора в усилительных каскадах.
- 3 Какие способы создания смещения на базу транзистора применяются на практике?
- 4 Какие схемы замещения используются при моделировании биполярного транзистора?
- 5 Какими уравнениями описываются свойства полупроводникового транзистора как четырёхполюсника?
- 6 Физический смысл  $h$ -параметров транзистора.
- 7 Какие статические характеристики характеризуют свойства транзистора?
- 8 Как определяется входное сопротивление транзистора?
- 9 Как определяется выходное сопротивление транзистора?
- 10 Какие величины являются входными для биполярного транзистора, включённого по схеме ОЭ?
- 11 Какие величины являются выходными для биполярного транзистора, включённого по схеме ОЭ?

## **2.3 Исследование усилительного каскада на биполярном транзисторе**

В настоящее время на практике часто возникает необходимость в усилении слабых электрических сигналов. Устройство, с помощью которого за счёт источника питания сигнал низкого уровня преобразуется в сигнал высокого уровня, называется усилителем. Наиболее широко для усиления электрических сигналов применяются электронные усилители на транзисторах.

Основным конструктивным элементом таких устройств является усилительный каскад на биполярном или полевом транзисторе. При использовании биполярного транзистора наиболее широко применяется схема с ОЭ, так как она имеет максимальный коэффициент усиления по мощности. Два варианта таких схем приведены на рисунке 2.9.

Различаются они способом создания смещения на базу транзистора. В схеме на рисунке 2.9, а смещение создаётся резистором  $R1$ , а на рисунке 2.9, б – делителем напряжения на резисторах  $R1$  и  $R2$ . Под смещением подразумевается подача на базу транзистора тока даже при отсутствии

входного сигнала. Это необходимо для того, чтобы создать определённый режим работы каскада.

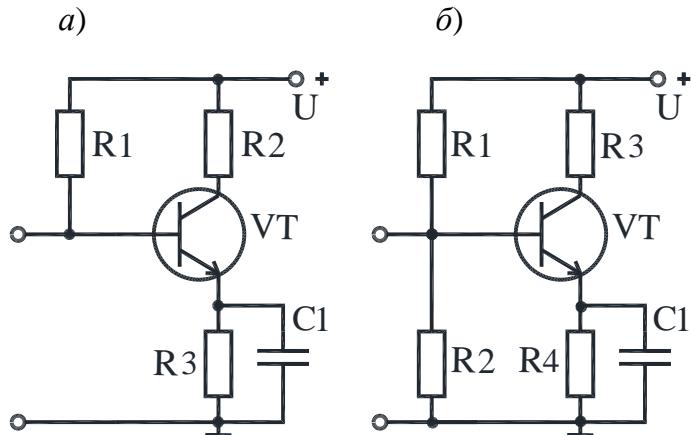


Рисунок 2.9 – Схемы усилительных каскадов на биполярном транзисторе

Если не создавать смещение, то из-за односторонней проводимости эмиттерного  $p$ - $n$ -перехода ток в базе от входного переменного сигнала будет протекать только при одной его полярности, которая смещает этот переход в прямом направлении. В результате на выходе каскада происходит значительное искажение усиливаемого напряжения. Форма сигнала на выходе усилителя не соответствует форме сигнала на входе. Такой режим работы усилительного каскада называется режимом (классом)  $B$ . Он находит применение в специальных двухтактных усилителях.

Введением цепи смещения создаётся постоянный ток базы, который формирует на коллекторе транзистора постоянное напряжение, значение которого примерно в два раза меньше напряжения источника питания каскада. Если теперь через разделительный конденсатор большой ёмкости (необходим для исключения влияния сопротивления источника сигнала на значение смещающего тока базы) подать переменное напряжение, то при одной полярности этого напряжения результирующий ток базы будет возрастать, а при другой – уменьшаться. При этом выходное напряжение на коллекторе в первом случае будет уменьшаться, а во втором – возрастать. Таким образом, каскад будет реагировать на обе полярности входного сигнала. Направление изменения напряжения на входе и выходе каскада противоположно. Фактически это значит, что данный усилительный каскад создаёт сдвиг по фазе между входным и выходным сигналами. Зависимость угла сдвига фаз между входным и выходным напряжениями от частоты называется фазочастотной характеристикой усилительного каскада (ФЧХ). Режим работы с начальным током базы называется режимом (классом)  $A$ . Такой каскад создаёт минимальное искажение усиливаемого сигнала и поэтому применяется широко на практике.

Схема на рисунке 2.9, *а* проста в реализации, однако она не обеспечивает необходимой температурной стабилизации режима работы каскада. Параметры транзистора сильно зависят от температуры его полупроводниковой структуры. Так, с ростом температуры из-за ионизации сопротивление полупроводниковой структуры уменьшается и коллекторный ток увеличивается. Напряжение на коллекторе транзистора уменьшается. Фактически это значит, что даже при постоянном значении напряжения на входе усилительного каскада его выходное напряжение изменяется.

Схема на рисунке 2.9, *б* содержит больше элементов, но она обеспечивает меньшую зависимость свойств каскада от температуры. Достигается это введением резистора  $R4$  в цепь эмиттера транзистора  $VT$ . При протекании тока эмиттера на этом резисторе создаётся падение напряжения, которое вычитается из падения напряжения на резисторе смещения  $R2$ . В результате ток базы формируется разностью отмеченных выше падений напряжений. Падение напряжения на эмиттерном резисторе  $R4$  создаёт отрицательную обратную связь по току в каскаде, которая стабилизирует его режим работы. С ростом температуры полупроводниковой структуры увеличивается ток коллектора и эмиттера транзистора, что приводит к увеличению падения напряжения на эмиттерном резисторе и снижению напряжения между базой и эмиттером. В результате ток базы уменьшается. Снижение тока базы вызывает увеличение сопротивления транзистора, что приводит к уменьшению тока коллектора и эмиттера транзистора. Поэтому с ростом температуры ток коллектора транзистора изменяется незначительно.

Введение отрицательной обратной связи по току снижает коэффициент усиления транзистора. Однако если каскад работает в усилителе переменного тока, то снижение коэффициента усиления можно значительно ослабить. С этой целью параллельно эмиттерному резистору подключается конденсатор  $C1$ . Ёмкость этого конденсатора выбирается такой, чтобы на частоте усиливаемого сигнала его ёмкостное сопротивление было значительно меньше сопротивления эмиттерного резистора  $R4$ . В результате на частоте усиливаемого сигнала, на этом конденсаторе и эмиттерном резисторе падение напряжения очень мало. Тем самым устраняется отрицательная обратная связь на переменном токе и увеличивается коэффициент усиления каскада.

Так как ёмкостное сопротивление конденсатора зависит от частоты переменного тока, то падение напряжения на эмиттерной цепи также будет изменяться при увеличении частоты сигнала. При уменьшении частоты падение напряжения в эмиттерной цепи возрастает, из-за увеличения ёмкостного сопротивления конденсатора  $C1$ , а коэффициент усиления каскада уменьшается. Зависимость коэффициента усиления транзисторного каскада от частоты усиливаемого сигнала иллюстрируется амплитудно-

частотной характеристикой. Пример такой характеристики приведён на рисунке 2.10.

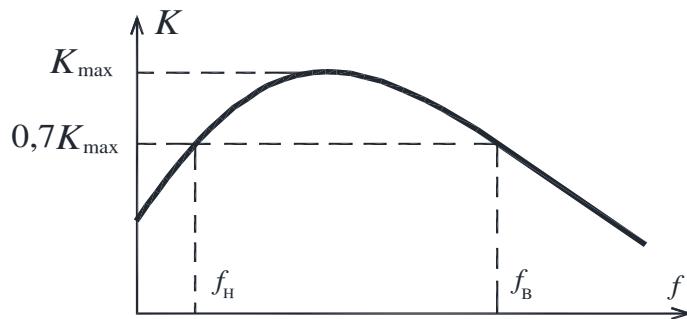


Рисунок 2.10 – АЧХ усилительного каскада

Из вышесказанного следует, что с увеличением частоты сигнала на входе усилителя коэффициент усиления каскада возрастает. Однако это увеличение происходит не постоянно, а до некоторой частоты. При дальнейшем росте частоты сигнала коэффициент усиления каскада падает. Объясняется это наличием паразитных ёмкостей токоведущих цепей и межэлектродными ёмкостями в самом транзисторе.

Для характеристики способности каскада усиливать сигналы той или иной частоты вводится понятие полосы пропускания. Под этим понятием подразумевается разность между верхней и нижней граничными частотами на АЧХ. Граничными считаются такие частоты, на которых коэффициент усиления уменьшается до значения  $0,707K_{\max}$ , где  $K_{\max}$  – максимальное значение коэффициента усиления каскада на АЧХ. При этом граничная частота на участке нарастания коэффициента усиления называется нижней граничной частотой, а на участке снижения этого коэффициента – верхней граничной частотой.

Экспериментально отмеченные свойства усилительного каскада на биполярном транзисторе можно проверить путём моделирования процессов в среде Multisim. Здесь можно определить его АЧХ и ФЧХ при отсутствии и наличии конденсатора, шунтирующего резистор обратной связи в эмиттерной цепи, измерить коэффициент усиления и угол сдвига фаз каскада на номинальной частоте входного сигнала.

### Порядок выполнения экспериментального исследования

Запустить программу Multisim. На панели компонентов курсором мыши найти группу **[Транзисторы]** и нажатием клавиши мыши активировать эту группу. В открывшемся меню в окне **[Компонент]** курсором мыши выбрать марку транзистора, рекомендуемую для этого эксперимента в приложении А, и нажать кнопку **[ОК]**. В открывшейся *рабочей зоне* нажатием клавиши

мыши закрепить пиктограмму транзистора в её центральной части. Одновременно открывается меню [Транзисторы], в котором надо нажать кнопку [Закрыть]. По указанию преподавателя для проведения исследований необходимо выписать из приложения А максимально допустимое напряжение между коллектором и эмиттером выбранного транзистора  $U_{k\max}$  и максимально допустимое значение коллекторного тока  $I_{k\max}$ .

На *панели компонентов* выделяется группа [Источники] и клавишей мыши открывается её меню. В открывшемся меню в окне [Компонент] выбрать источник переменного напряжения [AC\_POWER] и нажать кнопку [OK]. Закрепить клавишей мыши пиктограмму источника переменного напряжения  $U_1$  в открывшейся *рабочей зоне*. Одновременно снова открывается меню группы [Источники]. В окне [Компонент] выделить источник постоянного напряжения [DC\_POWER] и нажатием кнопки [OK] занести его в *рабочую зону*. После закрепления в *рабочей зоне* пиктограммы источника постоянного напряжения  $U_2$  снова открывается меню группы [Источники]. В окне [Компонент] выделить элемент заземления [GROUND] и нажатием кнопки [OK] перенести его в *рабочую зону*. После закрепления мышью пиктограммы элемента заземления снова открывается меню [Источники], в котором надо нажать кнопку [Закрыть].

Курсором на *панели компонентов* выбирается группа [Пассивные компоненты] и нажатием клавиши мыши открывается меню этой группы. В окне [Семейство] найти элемент [VARIABLE\_RESISTOR] (резистор  $R1$  с переменным сопротивлением) и нажатием кнопки [OK] занести этот элемент в *рабочую зону*. Нажатием клавиши мыши закрепить пиктограмму переменного резистора. В открывшемся меню в окне [Семейство] выделить пиктограмму [RESISTOR] (резистор с постоянным сопротивлением) и нажатием кнопки [OK] занести и закрепить этот элемент в *рабочей зоне*. Для создания исследуемой цепи операцию занесения в *рабочую зону* резистора с постоянным сопротивлением необходимо выполнить пять раз. Затем в окне [Семейство] выделить элемент [CAPACITOR] (конденсатор) и нажатием кнопки [OK] занести конденсатор в *рабочую зону*. В электрической цепи три конденсатора, поэтому операцию занесения их надо выполнить три раза. После закрепления в *рабочей зоне* третьего конденсатора в открывшемся меню надо нажать кнопку [Закрыть].

На *панели инструментов* найти пиктограмму [Мультиметр] и нажать клавишу мыши. В открывшейся *рабочей зоне* мышью закрепить пиктограмму этого прибора **XMM1**. На *панели инструментов* курсором найти и активировать нажатием клавиши мыши пиктограмму [Плоттер Боде] (измеритель АЧХ и ФЧХ). Закрепить эту пиктограмму **XBP1** в *рабочей зоне*.

В соответствии с рисунком 2.11 в рабочей зоне собрать электрическую цепь для исследования усилительного каскада на биполярном транзисторе. Далее надо определить и установить значения параметров элементов цепи.

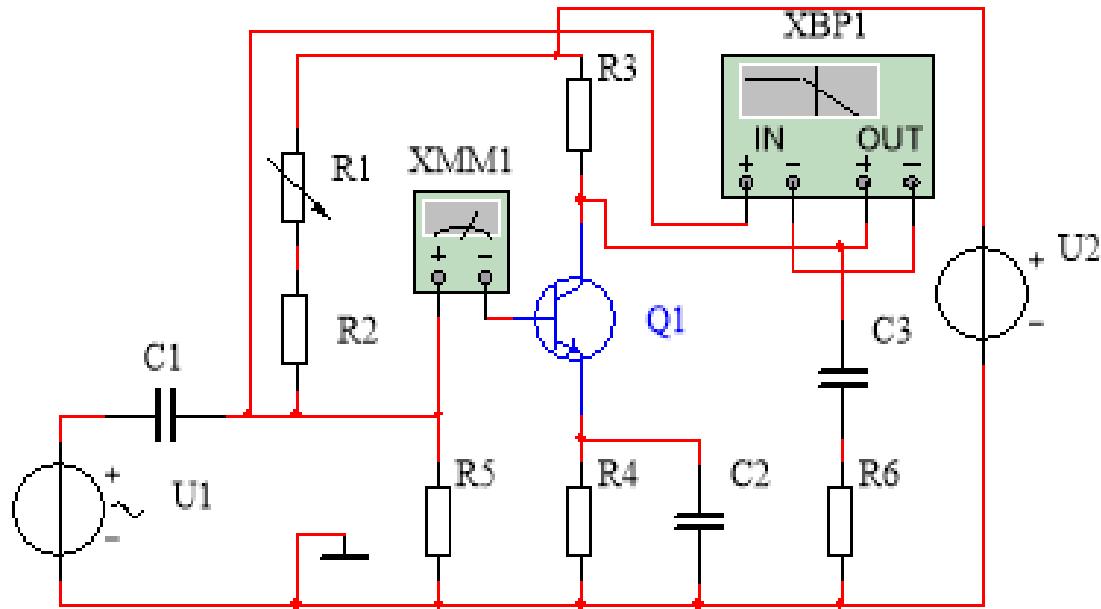


Рисунок 2.11 – Схема цепи для экспериментального исследования усилительного каскада

Напряжение источника питания  $U_2$  усилительного каскада  $U = 16$  В. Сопротивление коллекторного резистора  $R_3 = U / (1,1I_{k \max})$ . Сопротивление эмиттерного резистора  $R_4 = 0,1R_3$ . Рассчитанные значения параметров округлить до ближайших целых значений. Сопротивление базового регулируемого резистора смещения  $R_1 = 20000$  Ом. Сопротивление нерегулируемого резистора смещения  $R_2$ , включённого последовательно с регулируемым, равно 2000 Ом. Сопротивление резистора  $R_5$ , включённого между базой и эмиттером транзистора, и нагрузочного резистора  $R_6$  составляет 10000 Ом.

Для изменения значения сопротивления какого-либо резистора курсор наводится на его пиктограмму и двойным нажатием клавиши мыши открывается меню элемента. В строке [Сопротивление] записывается требуемое значение этого параметра и нажимается кнопка [OK]. Аналогично выполняется установка значений ёмкости конденсаторов. Конденсатор  $C_1$ , подключённый к базе транзистора, может иметь ёмкость 1 мкФ или больше. Ёмкость эмиттерного конденсатора  $C_2$  выбрать 0,01 мкФ, а разделительного конденсатора  $C_3$  – 10 мкФ.

Напряжение источника питания переменного напряжения  $U_1$ , формирующего входной сигнал, установить 0,001 В, а значение его частоты 10 МГц. Для выполнения этих установок навести курсор на пиктограмму

источника и двойным нажатием клавиши мыши открыть его меню. В меню записать требуемые значения напряжения и частоты, а затем его закрыть.

Навести курсор мыши на пиктограмму мультиметра и двойным нажатием клавиши мыши открыть окно этого прибора. В открывшемся окне нажать кнопку **[A]**. Эта операция переведёт мультиметр в режим измерения постоянного тока. Такой род тока установлен по умолчанию.

Двойным нажатием клавиши по пиктограмме **XBP1** измерителя АЧХ и ФЧХ открыть его лицевую панель. Вид панели представлен на рисунке 2.12. Нажатием кнопки **[Экран]** тёмный фон экрана можно заменить на светлый. В верхней части панели имеются кнопки **[Амплитуда]** и **[Фаза]**. С помощью этих кнопок выбирается вид изображаемой на дисплейном поле характеристики. По умолчанию активирована первая кнопка. В этом случае будет отображаться АЧХ. Ниже находятся кнопки **[Log]** и **[Лин]**. С помощью этих кнопок выбирается вид шкалы по горизонтальной и вертикальной осям. Для работы надо активировать кнопки **[Лин]** (линейная шкала). Ниже этих кнопок находятся поля **[F]** и **[I]**. С помощью этих полей задаются пределы изменения параметра: **[F]** – максимальное значение, а **[I]** – минимальное значение. По горизонтальной оси – пределы изменения частоты, по вертикальной – в режиме АЧХ коэффициент усиления, а в режиме ФЧХ – угол сдвига фаз между входным и выходным напряжениями. В левом окне полей указывается значение предела измерения, а в правом отображается его размерность. Минимальное значение по горизонтали и вертикали установить равным нулю. Максимальное значение частоты (поле по горизонтали) составляет **50** МГц, а максимальное значение коэффициента усиления (поле по вертикали) может находиться в пределах **100–300**. Более точно значение этого коэффициента выбирается в процессе эксперимента. Окно размерности по вертикали должно быть пустым. Информация изменяется мышью.

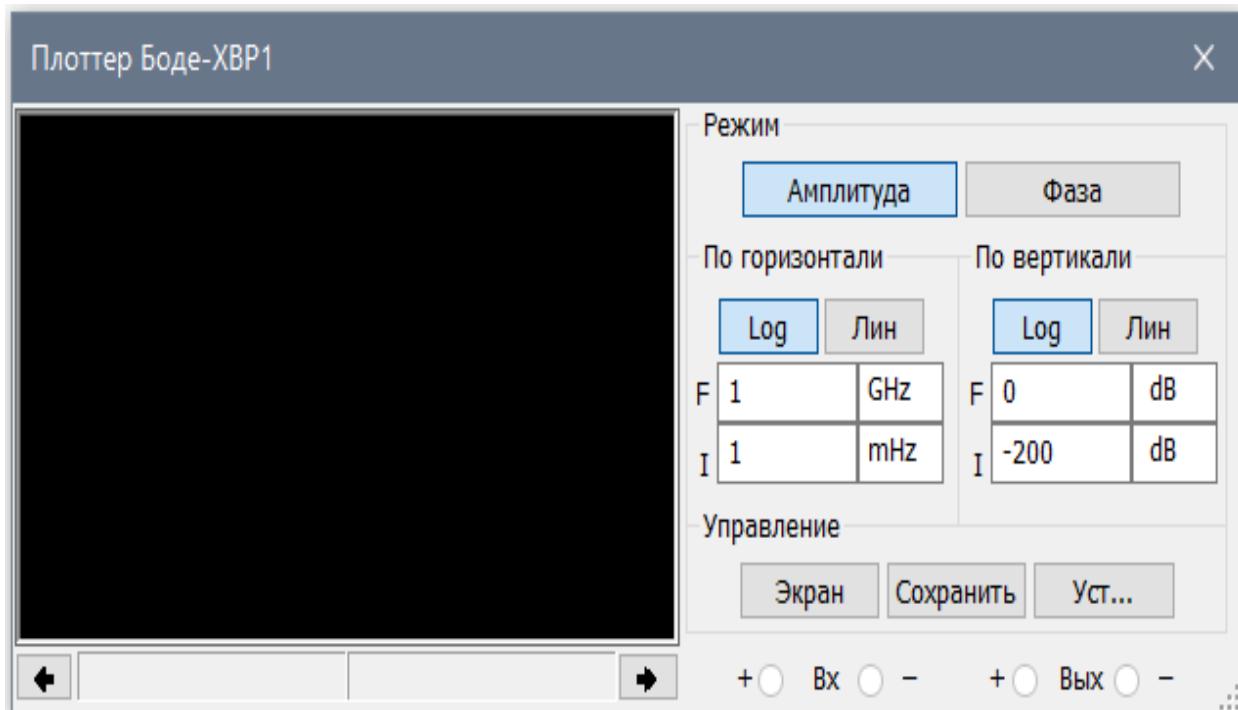


Рисунок 2.12 – Лицевая панель измерителя АЧХ и ФЧХ

Выбор частоты, на которой определяются коэффициент усиления каскада и угол сдвига фаз, реализуется с помощью маркерной линии. Она появляется на экране после запуска процесса моделирования. По умолчанию эта линия находится в крайнем левом положении (на минимальной частоте установленного диапазона частот). Для перемещения этой линии необходимо курсор мыши совместить с треугольником, который находится над маркерной линией в верхней части дисплейного экрана, и нажать клавишу мыши. Не отпуская её, мышью переместить линию в желаемое место на экране и отпустить клавишу. В левом окне под экраном дисплея отобразится значение частоты, на которое установлена линия, а в правом окне появится информация о коэффициенте усиления (при нажатой кнопке **[Амплитуда]**) или угле сдвига фаз в градусах (при нажатой кнопке **[Фаза]**). Пошаговое перемещение маркерной линии можно сделать активированием мышью кнопок **[←]** и **[→]**, находящихся под экраном.

Нажатием кнопки **[▶]** запустить процесс моделирования. Изменением сопротивления регулировочного резистора  $R1$  по мультиметру установить ток базы транзистора, значение которого должно соответствовать среднему значению из диапазона токов базы, рекомендуемого для данного транзистора в приложении А. Для изменения сопротивления резистора  $R1$  необходимо курсор навести на его пиктограмму. Рядом с ней появится полоска с ползунком. Курсор навести на ползунок и нажать клавишу мыши. Не отпуская клавишу, передвинуть ползунок в сторону уменьшения или увеличения сопротивления резистора и отпустить клавишу. Изменение

сопротивления происходит ступенчато. Размер ступеней можно изменять, для этого навести курсор на пиктограмму резистора и двойным нажатием клавиши мыши открыть его окно. В строке **[Приращение]** записать желаемую степень приращения сопротивления. Изменение сопротивления в сторону увеличения можно осуществлять и нажатием латинской буквы *A* на клавиатуре компьютера.

Характеристики усилительного каскада исследуются для двух вариантов: без эмиттерного конденсатора *C2* и с ним. Для первого варианта необходимо отключить конденсатор. Для его отключения необходимо кнопкой **[■]** остановить процесс моделирования и удалить один из проводников, с помощью которых конденсатор подключается к эмиттерному резистору *R4*. Кнопкой **[▶]** запустить моделирование. На экране измерителя АЧХ появится линия, показывающая зависимость коэффициента усиления транзисторного каскада от частоты.

Для определения значения коэффициента усиления на выбранной частоте маркерную линию передвинуть правее исходного положения в точку, соответствующую этой частоте. В левом окне под экраном измерителя АЧХ отобразится значение частоты, а в правом окне – значение коэффициента усиления. Если активировать кнопку **[Фаза]**, то в правом окне под дисплеем отобразится значение угла сдвига фаз между входным и выходным напряжениями на выбранной частоте. В процессе исследования весь частотный диапазон необходимо разбить на 8–10 значений частоты. Последовательно, устанавливая маркерной линией примерно выбранные значения частоты, определить при нажатой кнопке **[Амплитуда]** коэффициент усиления каскада, а затем при нажатой кнопке **[Фаза]** и угол сдвига фаз на этих частотах. Результаты измерения занести в таблицу 2.5. Выключить процесс моделирования кнопкой **[■]**.

Подключить эмиттерный конденсатор. Запустить процесс моделирования и нажать кнопку **[Амплитуда]**. Аналогично первому варианту задаться значениями частоты и для выбранных с помощью маркерных линий этих значений определить коэффициент усиления. При выборе значений частот обязательно выбрать частоту, на которой коэффициент усиления каскада принимает максимальное значение  $K_{\max}$ . Результаты исследования занести в таблицу 2.5. Нажать кнопку **[Фаза]** и для тех же значений частоты определить и записать в таблицу значения угла сдвига фаз.

Рассчитать значение коэффициента усиления транзистора *K*, соответствующее  $0,707K_{\max}$ . С помощью маркерной линии на АЧХ найти значение частот, при которых получается рассчитанное значение коэффициента усиления каскада. Таких частот будет две: одна до максимума характеристики, а вторая после максимума. Первая частота будет являться нижней граничной частотой, а вторая – верхней граничной частотой.

Значения отмеченных частот записать в отчёт. Определить полосу пропускания усилительного каскада, как разницу между найденными выше значениями граничных частот.

**Таблица 2.5 – Результаты измерения параметров для построения АЧХ и ФЧХ усилительного каскада**

| Ёмкость конденсатора | $f$ , МГц     |  |  |  |  |  |  |  |  |
|----------------------|---------------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $C1 = 0$             | $K$           |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                      | $\phi$ , град |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $C1 > 0$             | $K$           |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                      | $\phi$ , град |  |  |  |  |  |  |  |  |

Установить маркерную линию на частоту, заданную в исходных данных, и на этой частоте в окне под дисплеем узнать коэффициент усиления усилителя. Результат записать в отчёт. Нажать кнопку **[Фаза]** и установить маркерную линию на заданную рабочую частоту усилительного каскада. В окне под дисплеем определить значение угла сдвига фаз каскада на рабочей частоте. На этом экспериментальное исследование усилительного каскада завершено.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Принцип действия биполярного транзистора.
- 2 Разновидности транзисторов, в чём их различие?
- 3 Основные схемы включения транзистора в усилительном каскаде и их свойства.
- 4 Какие статические характеристики транзисторов применяются на практике?
- 5 Как изменение температуры полупроводниковой структуры влияет на работу транзистора?
- 6 Классы усилительных каскадов. В чём их различие?
- 7 Какие схемные решения используются для создания смещения на базу транзистора?
- 8 Какие способы температурной стабилизации рабочей точки транзистора используются на практике?
- 9 Как изменяется фаза сигнала на выходе усилительного каскада?
- 10 Как определяется полоса пропускания усилителя?
- 11 Как определяется коэффициент усиления по напряжению усилительного каскада?

## **2.4 Исследование генератора синусоидального напряжения с трансформаторной обратной связью**

На практике может возникнуть необходимость в получении переменного напряжения с частотой, отличной от 50 Гц. В этом случае используются специальные генераторы, выполненные чаще всего на полупроводниковых приборах. Генераторы электрических колебаний преобразуют энергию источника постоянного тока в энергию переменного тока требуемой формы.

В зависимости от формы выходного напряжения различают генераторы синусоидальных (гармонических) колебаний и генераторы несинусоидальных колебаний (импульсные, или релаксационные, генераторы). Одним из таких электронных устройств является генератор синусоидального напряжения с трансформаторной обратной связью. Схема такого генератора приведена на рисунке 2.13.

Схема представляет собой усилительный каскад на транзисторе, в котором с помощью магнитосвязанных обмоток  $L1$  и  $L2$  создана обратная связь. Из теории усилителей известно, что введение обратной связи изменяет коэффициент усиления усилителя. Если считать коэффициент чисто активным, то для усилителя, охваченного обратной связью, коэффициент усиления можно определить из выражения  $K_{oc} = K / (1 + K\beta)$ . Здесь  $K_{oc}$  – коэффициент усиления с введённой обратной связью, а  $K$  – коэффициент усиления без обратной связи,  $\beta$  – коэффициент передачи обратной связи, показывает, какая доля выходного напряжения усилителя поступает на его вход. Знак в знаменателе выражения для  $K_{oc}$  определяется видом обратной связи. При положительной связи – знак минус, а при отрицательной – плюс. Из выражения для  $K_{oc}$  следует, что при положительной обратной связи в усилителе и  $K\beta = 1$  коэффициент усиления устремляется в бесконечность. На практике это означает, что усилитель становится источником сигнала т. е. становится генератором. Из вышеотмеченного следует, что для перевода усилительного каскада на транзисторе из режима усиления в режим генерирования сигнала необходимо наличие двух условий. Первым является наличие положительной обратной связи в усилителе, а вторым – коэффициент передачи обратной связи  $\beta$  должен быть таким, чтобы  $K\beta = 1$ . Первое условие называется балансом фаз, а второе – балансом амплитуд. Полупроводниковые генераторы в основном различаются способом создания положительной обратной связи. В работе исследуется генератор, в котором обратная связь реализуется с помощью магнитосвязанных катушек, т. е. с трансформаторной обратной связью, его схема приведена на рисунке 2.13.

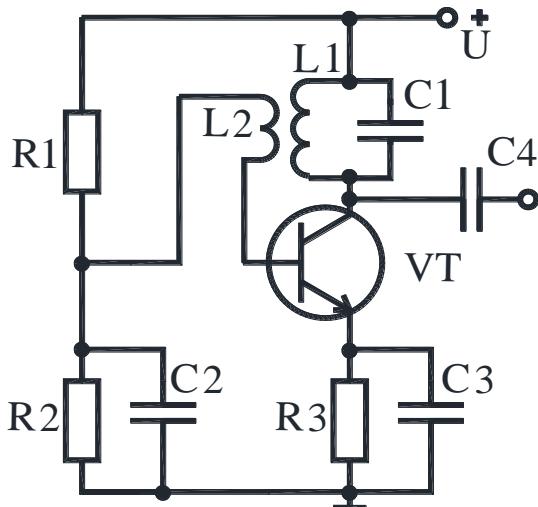


Рисунок 2.13 – Схема генератора синусоидального напряжения с трансформаторной обратной связью

На этой схеме с помощью резисторов  $R1$  и  $R2$  задаётся начальное смещение на базу транзистора  $VT$ . Резистор  $R3$  формирует необходимый ток коллектора в режиме покоя. Конденсатор  $C1$  и катушка индуктивности  $L1$  образуют параллельный колебательный контур, в котором транзистором создаются электрические колебания. Катушка  $L1$  имеет магнитную связь с катушкой  $L2$ , которая называется катушкой обратной связи. В этой катушке при возникновении электрических колебаний в контуре  $L1, C1$  наводится переменная ЭДС, подаваемая на базу транзистора.

Конденсаторы  $C2$  и  $C3$  имеют малое ёмкостное сопротивление. С их помощью шунтируются резисторы  $R2$  и  $R3$  малым реактивным сопротивлением конденсаторов  $C2$  и  $C3$ , и обеспечивается беспрепятственное прохождение переменной ЭДС от катушки обратной связи к эмиттерному переходу транзистора. Конденсатор  $C3$  дополнительно устраняет отрицательную обратную связь по току в транзисторном каскаде и увеличивает его коэффициент усиления. Конденсатор  $C4$  является разделительным. Он пропускает в нагрузку синусоидальное напряжение и задерживает постоянную составляющую напряжения на коллекторе транзистора.

Работает генератор следующим образом. При подключении его к источнику постоянного напряжения  $U$  из-за наличия смещения транзистор оказывается в открытом состоянии. В результате через открытый транзистор в колебательный контур, состоящий из  $L1$  и  $C1$ , поступает импульс тока, и в этом контуре возникает переходной процесс второго порядка. Параметры контура выбраны таким образом, что переходный процесс в нём носит колебательный характер. Однако из-за наличия потерь в контуре при отсутствии обратной связи в схеме (нет магнитной связи между  $L1$  и  $L2$ )

процесс является затухающим и через небольшой промежуток времени амплитуда колебаний тока устремится к нулю.

Если ввести обратную связь (создать магнитную связь между  $L1$  и  $L2$ ), то через транзистор под воздействием ЭДС обратной связи начинает протекать переменный ток. Если подобрать полярность включения катушки  $L2$  такой, при которой переменный ток коллектора транзистора будет совпадать по фазе с током в колебательном контуре, и подобрать значение ЭДС в этой катушке таким, при котором коллекторный ток транзистора компенсирует потери в контуре, то ток в контуре начнёт возрастать. Возрастание этого тока увеличивает ЭДС обратной связи, поступающую на базу транзистора, и переменный ток коллектора. С увеличением тока коллектора ток в контуре ещё больше возрастёт. Процесс нарастания тока в контуре не идёт до бесконечности, так как с увеличением тока транзистора его коэффициент усиления уменьшается. В результате через некоторое время амплитуда тока в контуре стабилизируется, и генератор начнёт работать в установившемся режиме.

Таким образом, для возникновения колебаний тока в генераторе необходимо правильно выбрать полярность подключения катушки обратной связи  $L2$  и создать в ней такое значение ЭДС, при котором коллекторный ток транзистора будет компенсировать потери в колебательном контуре. Баланс фаз достигается изменением полярности включения катушки  $L2$ , а баланс амплитуд – изменением количества витков в катушке  $L2$  или изменением расстояния между  $L1$  и  $L2$ .

Период колебания тока в контуре теоретически определяется значениями индуктивности катушки  $L1$  и ёмкости конденсатора  $C1$ . Однако на практике из-за наличия активных сопротивлений цепи и выходной ёмкости транзисторного каскада реальное значение периода колебаний генератора будет немного отличаться от теоретического.

Снимать переменное напряжение, вырабатываемое генератором, можно с коллектора транзистора через разделительный конденсатор  $C4$  или с дополнительной обмотки, которая имеет магнитную связь с обмоткой  $L1$ .

Экспериментально свойства генератора синусоидального напряжения с трансформаторной обратной связью можно проверить путём моделирования процессов в среде Multisim.

### **Порядок выполнения экспериментального исследования**

Открыть программу Multisim. На *панели компонентов* курсором мыши найти группу **[Транзисторы]** и нажатием клавиши мыши активировать эту группу. В открывшемся меню в окне **[Компонент]** курсором мыши выделить марку транзистора, рекомендуемую для этой работы в приложении А, и

нажать кнопку **[OK]**. В открывшейся *рабочей зоне* нажатием клавиши мыши закрепить пиктограмму транзистора в её центральной части. Одновременно снова открывается меню **[Транзисторы]**, в котором надо нажать кнопку **[Закрыть]**.

На *панели компонентов* выделить группу **[Источники]** и клавишей мыши открыть её меню. В открывшемся меню в окне **[Компонент]** выбрать источник постоянного напряжения **[DC\_POWER]** и нажатием кнопки **[OK]** занести его в *рабочую зону*. Закрепить клавишей мыши пиктограмму источника постоянного напряжения в открывшейся *рабочей зоне*. Одновременно снова открывается меню группы **[Источники]**. В открывшемся меню в окне **[Компонент]** выбрать источник переменного напряжения **[AC\_POWER]** и нажатием кнопки **[OK]** занести его в *рабочую зону*. Закрепить клавишей мыши в открывшейся *рабочей зоне* пиктограмму источника переменного напряжения. Аналогично в окне **[Компонент]** выделить элемент заземления **[GROUND]** и нажатием кнопки **[OK]** перенести его в *рабочую зону*. После закрепления мышью пиктограммы элемента заземления снова открывается меню **[Источники]**, в котором надо нажать кнопку **[Закрыть]**.

Курсором на *панели компонентов* выбирается группа **[Пассивные компоненты]** и нажатием клавиши мыши открывается меню этой группы. В открывшемся меню в окне **[Семейство]** активировать пиктограмму **[RESISTOR]** (резистор с постоянным сопротивлением) и нажатием кнопки **[OK]** занести его в *рабочую зону*. Для исследуемой цепи операцию занесения в *рабочую зону* резистора с постоянным сопротивлением необходимо выполнить пять раз. Затем в окне **[Семейство]** выделить элемент **[CAPACITOR]** (конденсатор). В электрической цепи пять конденсаторов, поэтому операцию занесения их надо выполнить пять раз. Далее в окне **[Семейство]** этой группы выделить курсором мыши элемент **[TRANSFORMER]** (трансформатор), а в окне **[Компонент]** найти и выделить разновидность трансформатора **[1P1S]**, нажатием кнопки **[OK]** занести трансформатор в *рабочую зону*. В открывшемся меню выделить элемент **[INDUCTOR]** (катушка индуктивности) и нажатием клавишей мыши кнопки **[OK]** занести и закрепить этот элемент в *рабочей зоне*. В этом же меню найти и выделить элемент **[SWITCH]** (переключатель), а в окне **[Семейство]** выделить разновидность переключателя **[SPDT]**. Активированием кнопки **[OK]** занести и нажатием клавиши мыши закрепить этот элемент в *рабочей зоне*. В открывшемся меню активировать кнопку **[Закрыть]**. Пиктограмма ключа *S1*, изображённая на рисунке 2.14, получается путём поворота по вертикали из исходного положения, получаемого при занесении элемента в *рабочую зону*. С помощью

трансформатора  $T1$  напряжение с колебательного контура подается на вход транзистора, т. е. создается обратная связь.

На *панели инструментов* найти пиктограмму **[Оscиллограф]** и нажать клавишу мыши. В открывшейся *рабочей зоне* мышью закрепить пиктограмму этого прибора. На *панели инструментов* курсором найти и активировать нажатием клавиши мыши пиктограмму **[Плоттер Боде]** (измеритель АЧХ и ФЧХ). Закрепить эту пиктограмму в *рабочей зоне*.

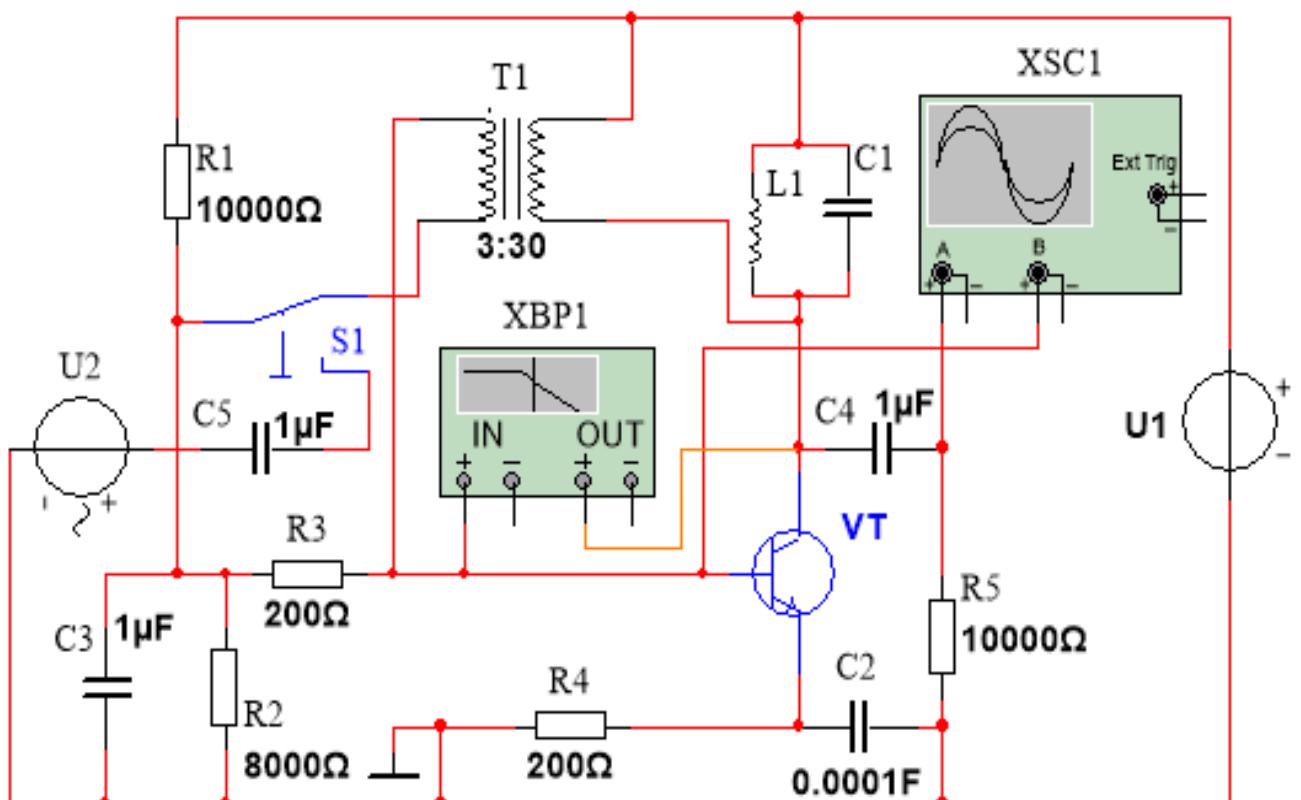


Рисунок 2.14 – Схема электрической цепи для исследования генератора синусоидального напряжения

В соответствии с рисунком 2.14 в *рабочей зоне* собрать электрическую цепь для исследования генератора на биполярном транзисторе. Напряжение источника питания усилительного каскада  $U1 = 10$  В, а источника входного сигнала  $U2 = 2$  В. Для установки в источнике  $U1$  заданного напряжения необходимо курсор навести на его пиктограмму и дважды нажать клавишу мыши. В открывшемся окне в строке **[Напряжение]** записать выбранное значение напряжения и закрыть окно. Аналогично устанавливается напряжение и для источника  $U2$ . Дополнительно в окне этого источника необходимо в строке **[Частота]** записать значение частоты, равное **10** Гц.

Сопротивление резисторов должно соответствовать значениям, указанным на рисунке 2.14. Для изменения сопротивления резистора необходимо курсор мыши навести на его пиктограмму и дважды нажать

клавишу мыши. В открывшемся окне в строке [Сопротивление] записать требуемое значение и закрыть окно. Значение ёмкости конденсаторов  $C2–C5$  выбирается из рисунка 2.14, а для конденсатора  $C1$  – из приложения А. Значение индуктивности дросселя  $L1$  выбирается из исходных данных в приложении А и устанавливается так же, как и значение сопротивления для резисторов.

Заданные в приложении А значения ёмкости конденсатора  $C1$  и индуктивности дросселя  $L1$  позволяют рассчитать период  $T$  и частоту  $f$  напряжения, вырабатываемого генератором. Для этого можно воспользоваться следующими формулами:  $T = 2\pi\sqrt{L1C1}$  и  $f = 1 / T$ . Результаты расчёта записать в таблицу 2.6. Для задания количества витков первичной и вторичной обмоток двойным нажатием мышью на пиктограмму трансформатора открыть его окно и в открывшемся окне в строке [Первичная 1] записать число **3**, в строке [Вторичная 1] записать число **30**, а затем закрыть окно.

Таблица 2.6 – Результаты расчёта и измерения временных параметров цепи

| Источник информации о параметре                                   | Частота $f$ , Гц | Период $T$ , мкс |
|---|------------------|------------------|
| Рассчитанное значение частоты и периода генератора                |                  |                  |
| Значение резонансной частоты и периода по АЧХ усилителя           |                  |                  |
| Значение частоты и периода по осциллограмме напряжения генератора |                  |                  |

Двойным нажатием клавиши по пиктограмме плоттера **XBP1** (измерителя АЧХ и ФЧХ) открыть его лицевую панель. В верхней части панели имеются кнопки [Амплитуда] и [Фаза]. С помощью этих кнопок выбирается вид изображаемой на дисплейном поле характеристики. По умолчанию активирована первая кнопка. В этом случае будет отображаться АЧХ. Для работы надо активировать кнопки [Лин] (линейная шкала). Ниже этих кнопок находятся поля [F] и [I]. С помощью этих полей задаются пределы изменения параметра: [F] – максимальное значение, а [I] – минимальное значение.

По горизонтальной оси установить максимальное значение рабочей частоты плоттера  $F = 1,5f$ , а её минимальное значение  $I = 0,6f$ , где  $f$  – рассчитанное значение рабочей частоты исследуемого генератора. Для вертикальной оси  $F = (500...950)$ , а  $I = 0$ . Причём, для данной работы правое поле в строке [F] по вертикали должно быть пустым. По умолчанию в правом поле записана буква  $G$ , что соответствует значению множителя  $10^9$ .

Открыть лицевую панель осциллографа. В окне **[Развёртка]** в строке **[Шкала]** записать длительность развёртки, примерно равную  $(0,2\text{--}0,25)T$ , где  $T$  – период сигнала, вырабатываемого генератором. В строке **[Шкала]** для канала  $A$  и канала  $B$  записать **10 V/Div**, а в строке **[Смещение]** для канала  $A$  записать **1.4** и для канала  $B$  записать **-1.4**. В окне **[Синхронизация]** в строке **[Уровень]** записать **1 V**. Для реализации ждущего режима активировать кнопку **[Одн.]**. В канале  $B$  нажать кнопку **[AC]**.

Нажатием кнопки **[▶]** запустить процесс моделирования и на экране плоттера появится график, соответствующий АЧХ резонансного усилительного каскада на биполярном транзисторе. Этот усилитель имеет узкую полосу пропускания. Для её определения необходимо маркерную линию совместить с точкой на графике, соответствующей максимуму функции. В левом поле под экраном появится значение резонансной частоты, на которой возник максимум, а в правом поле – значение этого максимума ( $K_{\max}$ ). Значение резонансной частоты записать в таблицы 2.6 и 2.7.

*Таблица 2.7 – Параметры резонансного усилителя*

|  |  |
|--|--|
| Значение резонансной частоты усилителя, Гц   |  |
| Нижняя граничная частота, Гц                 |  |
| Верхняя граничная частота, Гц                |  |
| Полоса пропускания усилительного каскада, Гц |  |

Для определения полосы пропускания усилителя необходимо рассчитать значение коэффициента усиления, равное  $0,707K_{\max}$ , где  $K_{\max}$  – максимальное значение коэффициента усиления каскада. Маркерной линией найти на графике точки до и после максимума кривой АЧХ, в которых коэффициент усиления равен  $0,707K_{\max}$ . Частоты, на которых получается это значение, будут нижней граничной частотой (до максимума) и верхней граничной частотой (после максимума). Разница между этими частотами есть полоса пропускания усилительного каскада. Её надо определить и записать в таблицу 2.7. Кнопкой **[■]** выключить процесс моделирования.

Путём изменения положения перекидного контакта переключателя перевести схему в генераторный режим работы. Для переключения необходимо курсор мыши совместить с изображением переключающего контакта на пиктограмме переключателя. После увеличения толщины изображения этого контакта нажать клавишу мыши. Произойдёт переброс подвижного контакта на цепь, связанную с первичной обмоткой трансформатора.

Нажатием кнопки [►] запустить процесс моделирования. На экране осциллографа появятся две осциллограммы синусоидального напряжения, вырабатываемого генератором. Каналом *A* контролируется выходное напряжение усилительного каскада, а каналом *B* – напряжение на входе транзистора. Примерно через минуту, когда на экране будут осциллограммы установившегося режима работы генератора, выключить процесс моделирования кнопкой [■]. При необходимости изменением длительности развёртки в строке [Шкала] можно сжать или растянуть изображение по горизонтали.

Осциллограммы показывают, что выходное напряжение на коллекторе транзистора сдвинуто по фазе на  $180^\circ$  относительно входного напряжения в базовой цепи. Так как для возникновения колебаний необходимо, чтобы выходное напряжение усилителя совпадало по фазе с напряжением на колебательном контуре, то выбором полярности подключения вторичной обмотки трансформатора создается дополнительный сдвиг по фазе на  $180^\circ$  между напряжением на колебательном контуре и напряжением на базе транзистора (входе усилителя). По умолчанию на схеме, приведенной на рисунке 2.14, выбрана необходимая полярность включения вторичной обмотки трансформатора (обмотка обратной связи). Если изменить эту полярность, то колебания в генераторе не возникнут. Данный факт можно проверить при исследовании цепи, изображённой на этом рисунке.

С помощью маркерных линий выделить один период синусоиды и определить его длительность. Значению периода будет соответствовать число под экраном осциллографа в строке [T2–T1] для канала *A*. Результат измерения записать в таблицу 2.6. Перевести полученное значение периода в частоту и сравнить с резонансной частотой усилительного каскада, измеренной выше.

Увеличить в полтора раза напряжение источника питания постоянного напряжения и запустить кнопкой [►] процесс моделирования. Через 60–70 секунд кнопкой [■] выключить процесс моделирования. С помощью методики, рассмотренной для меньшего напряжения, по осциллограмме определить период выходного напряжения генератора. Результат измерения сравнить с аналогичным измерением при меньшем напряжении. Дать заключение о степени влияния изменения напряжения питания генератора на частоту, вырабатываемого им напряжения. На этом экспериментальное исследование генератора синусоидального напряжения завершено.

### Контрольные вопросы

- 1 Разновидности генераторов синусоидального напряжения.
- 2 Условия возникновения установившихся колебаний в генераторе сигналов.
- 3 Как достигается баланс фаз в генераторе с трансформаторной обратной связью?

4 Как достигается баланс амплитуд в генераторе с трансформаторной обратной связью?

5 Какие факторы влияют на частоту колебаний в генераторе с трансформаторной обратной связью?

6 Как рассчитать частоту переменного напряжения, вырабатываемого генератором с трансформаторной обратной связью?

7 Для чего в эмиттерной цепи транзистора параллельно резистору включён конденсатор?

8 Какой усилитель называется резонансным?

9 Какой вид имеет АЧХ резонансного усилителя?

10 Как передаётся в нагрузку переменное напряжение, выработанное генератором?

11 Области применения генератора синусоидального напряжения.

## 2.5 Исследование мультивибратора

На практике может возникнуть необходимость в генерировании переменного напряжения прямоугольной формы. В качестве источника такого напряжения можно использовать мультивибратор. Мультивибратором называется электронная цепь, с помощью которой постоянное напряжение источника питания преобразуется в переменное, по форме приближающееся к прямоугольной. Эта цепь может выполняться на дискретных или логических элементах, а также с помощью операционных усилителей.

Мультивибраторы могут работать в автоколебательном и ждущем режимах, а также в режиме синхронизации. В первом случае мультивибратор формирует периодический импульсный сигнал с частотой, определяемой параметрами элементов мультивибратора. Во втором случае он создаёт одиночный импульс лишь при наличии специального запускающего сигнала, формируемого внешними устройствами. Длительность сформированного импульса определяется параметрами элементов мультивибратора. В режиме синхронизации сигналом, подаваемым на базу транзистора от внешнего устройства, изменяется рабочая частота мультивибратора. Она становится равной частоте синхронизирующего сигнала.

На рисунке 2.15 приведена классическая схема мультивибратора на дискретных элементах. Такой мультивибратор содержит два усилительных каскада на транзисторах  $VT1$  и  $VT2$  структуры типа  $n-p-n$ , входы и выходы которых соединяются с помощью конденсаторов  $C1$  и  $C2$ . Резисторы  $R1$  и  $R4$  называются коллекторными, а  $R2$  и  $R3$  базовыми. В схеме сопротивление коллекторных резисторов должно быть значительно меньше сопротивления базовых. Если  $R1 = R4$ ,  $R2 = R3$  и  $C1 = C2$ , то такой мультивибратор называется симметричным.

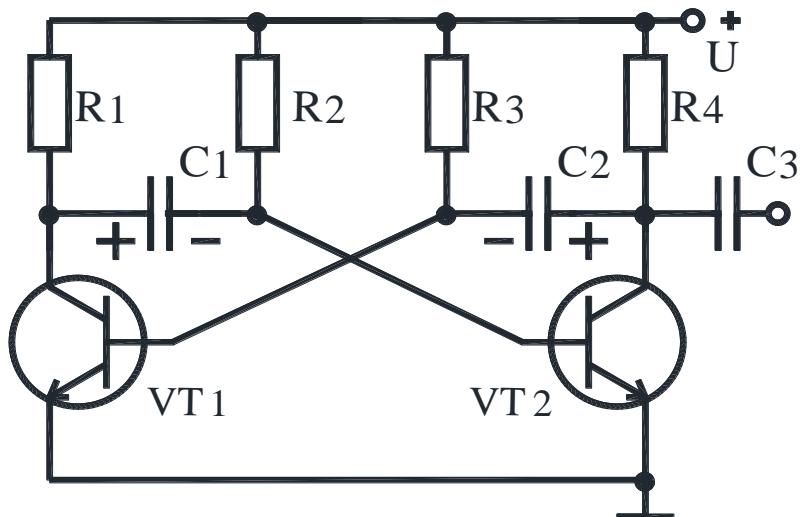


Рисунок 2.15 – Принципиальная схема транзисторного мультивибратора

Функционирование мультивибратора заключается в периодическом открытии и закрытии транзисторов. Причём этот процесс осуществляется в противофазе: когда открыт один транзистор, второй в это время закрыт, а через некоторое время они меняются состояниями. В открытом состоянии транзистор находится в режиме насыщения, и напряжение между его коллектором и эмиттером мало (десятые доли вольта). В закрытом состоянии на коллекторе значение напряжения приближается к напряжению источника питания. Переход из одного состояния транзистора в другое (опрокидывание мультивибратора) проходит за единицы микросекунд, в результате на коллекторе транзистора формируется напряжение, по форме приближающееся к прямоугольной. Это напряжение непосредственно или через конденсатор  $C_3$  передаётся в нагрузку.

Работу мультивибратора в установившемся режиме рассмотрим с момента открытия транзистора  $VT1$  и закрытия  $VT2$ . С этого момента в схеме протекают два процесса: перезаряд конденсатора  $C1$  и перезаряд конденсатора  $C2$ . Конденсатор  $C1$  перезаряжается током, протекающим по цепи, которая состоит из резистора  $R2$ , конденсатора  $C1$  и открытого транзистора  $VT1$ . Конденсатор  $C2$  перезаряжается током, протекающим по цепи, состоящей из резистора  $R4$ , конденсатора  $C2$  и перехода эмиттер-база транзистора  $VT1$ . Так как сопротивление коллекторного резистора  $R4$  мало, то ток перезаряда конденсатора  $C2$  сравнительно большой. В результате этот конденсатор быстро заряжается до напряжения источника питания с полярностью, указанной на рисунке 2.15, и ток перезаряда падает до нуля.

Конденсатор  $C1$  перезаряжается медленно, так как сопротивление базового резистора  $R2$  велико и ток перезаряда в этой цепи мал. В процессе перезаряда конденсатора  $C1$  напряжение на нём с полярностью, указанной на рисунке 2.15, начинает медленно уменьшаться до нуля, а затем происходит

переполюсовка этого напряжения и на правой обкладке конденсатора  $C1$  появляется положительный потенциал, а на левой – отрицательный. Через открытый транзистор  $VT1$  изменённое напряжение на конденсаторе  $C1$  прикладывается к переходу база-эмиттер транзистора  $VT2$ . При этом на базу этого транзистора подаётся положительный потенциал, а на эмиттер – отрицательный. Такая полярность напряжения между базой и эмиттером транзистора является отпирающей. Как только напряжение на  $C1$  с изменённой полярностью достигнет значения в несколько десятых долей вольта транзистор  $VT2$  откроется.

С открытием  $VT2$  напряжение на заряженном ранее конденсаторе  $C2$  прикладывается к переходу база-эмиттер транзистора  $VT1$ . Такая полярность напряжения на базе закрывает этот транзистор. Произошло опрокидывание мультивибратора, и в схеме начинается второй интервал работы. На втором интервале в схеме также протекают два процесса: перезаряд  $C1$  и перезаряд  $C2$ . Первый конденсатор перезаряжается по цепи  $R1$ ,  $C1$  и переход база-эмиттер  $VT2$ , а второй – по цепи  $R3$ ,  $C2$  и открытый транзистор  $VT2$ . Конденсатор  $C1$  из-за малого значения сопротивления коллекторного резистора  $R1$  быстро заряжается до напряжения источника питания с полярностью указанной на рисунке 2.15 и процесс здесь затухает. Конденсатор  $C2$  из-за большого значения сопротивления базового резистора  $R3$  перезаряжается медленно. В процессе этого перезаряда напряжение на  $C2$  с полярностью, указанной на рисунке 2.15, уменьшается до нуля, а затем происходит переполюсовка напряжения, и оно начинает нарастать с противоположной полярностью. Как только напряжение на  $C2$  с изменённой полярностью достигнет значения в несколько десятых долей вольта, откроется транзистор  $VT1$  и напряжением на  $C1$  закроется  $VT2$ . Происходит второе опрокидывание мультивибратора. На этом заканчивается второй интервал работы схемы. Далее процессы повторяются.

Таким образом, период работы мультивибратора состоит из двух интервалов. Длительность каждого интервала определяется временем перезаряда конденсатора на интервале через базовый резистор. Так, длительность первого интервала определяется выражением

$$t_1 = R2C1\ln 2 \approx 0,69R2C1.$$

Аналогично длительность второго интервала

$$t_2 = R3C2\ln 2 \approx 0,69R3C2.$$

Длительность периода импульсов, вырабатываемых мультивибратором,

$$T \approx 0,69(R2C1 + R3C2).$$

Частота следования импульсов

$$f = 1 / T.$$

В приведённых формулах  $R2$  и  $R3$  – значения сопротивления одноимённых базовых резисторов, а  $C1$  и  $C2$  – значения ёмкости одноимённых конденсаторов. Отношение периода следования импульсов к длительности импульса называется скважностью:  $Q1 = T / t_1$  и  $Q2 = T / t_2$ . Для симметричного мультивибратора скважность равна двум.

Из выражения для периода следует, что частоту следования импульсов (величину, обратную периоду) можно регулировать изменением ёмкости конденсаторов и сопротивления базовых резисторов. Изменение ёмкости конденсаторов позволяет регулировать частоту без изменения режима работы транзисторов по постоянному току. Поэтому такой способ регулировки более предпочтителен. Однако, применяя этот способ, трудно реализовать плавную регулировку частоты следования импульсов. Объясняется это отсутствием на практике подходящих конденсаторов переменной ёмкости. Мультивибраторы работают, как правило, на сравнительно низких частотах (от единиц герц до десятков килогерц). На таких частотах ёмкость конденсаторов должна измеряться тысячами пикофарад и более.

Регулировка частоты следования импульсов изменением сопротивления базовых резисторов  $R2$  и  $R3$  приводит не только к изменению периода следования импульсов, но и к изменению режима работы транзисторов по постоянному току. В результате, при широком диапазоне изменения частоты, транзисторы могут выйти из насыщения в открытом состоянии, и форма импульсов искажается. Однако регулировка сопротивлением базовых резисторов позволяет легко реализовать плавное изменение частоты следования импульсов. Причём, применяя сдвоенные резисторы, можно регулировать частоту без изменения скважности импульсов.

Для расчёта мультивибратора необходимо знать требуемую амплитуду выходных импульсов  $U_{\text{вых.макс}}$ , длительность импульса  $t_i$ , длительность фронта импульса  $t_\phi$ , длительность среза импульса  $t_c$ , период следования импульсов  $T$  и температуру окружающей среды  $t_{\text{окр}}$ . Значения  $t_\phi$  и  $t_c$  определяют степень отличия реальной формы напряжения на коллекторе транзистора от прямоугольной. На рисунке 2.16 видно, что напряжения  $U_{k1}$  и  $U_{k2}$  на коллекторах первого и второго транзисторов нарастают не мгновенно, а за некоторый промежуток времени. Аналогично и снижается напряжение за некоторый промежуток времени. Однако это время во много раз меньше времени нарастания напряжения. Поэтому на осциллограмме кажется, что напряжение на коллекторе транзистора уменьшается от максимального значения  $U$  до нуля мгновенно.

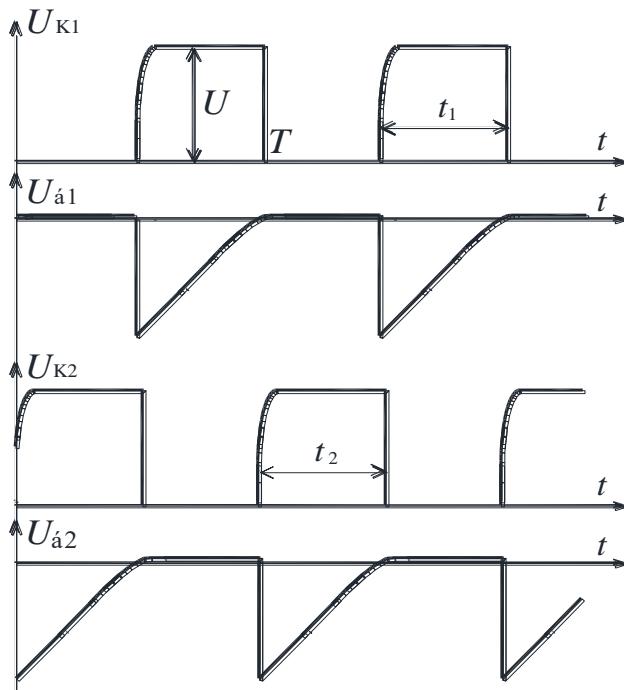


Рисунок 2.16 – Временные диаграммы работы мультивибратора

Под длительностью фронта импульса (переднего фронта) подразумевается время, за которое на этапе нарастания значение напряжения импульса изменяется от  $0,1U_{\text{вых. max}}$  до  $0,9U_{\text{вых. max}}$ . Эта длительность в основном определяется временем заряда конденсатора через коллекторный резистор, и с уменьшением сопротивления последнего значение  $t_{\phi}$  уменьшается. Длительность среза импульса (заднего фронта) есть время, за которое напряжение импульса на этапе его снижения уменьшится от значения  $0,9U_{\text{вых. max}}$  до значения  $0,1U_{\text{вых. max}}$ . Это время в основном определяется частотными свойствами транзистора и, как правило, очень мало.

Упрощённый расчёт мультивибратора начинается с выбора транзистора, который по своим параметрам подходит для работы в данной схеме. Важнейшими параметрами, определяющими пригодность транзистора для работы в мультивибраторе с заданными свойствами, являются граничная частота транзистора в схеме с общей базой  $f_{\text{гр}}$ , максимальное допустимое напряжение между эмиттером и коллектором  $U_{\text{кэ max}}$  и минимальное значение коэффициента усиления по току  $h_{21e}$  в схеме с общим эмиттером.

Для выбранного транзистора граничная частота в схеме с общей базой

$$f_{\text{гр}} \geq 5(T / t_{\text{и}}^2 - 1 / t_{\text{и}}).$$

Максимальное допустимое напряжение между эмиттером и коллектором транзистора

$$U_{\text{кэ max}} \geq (2,2 \dots 2,4) U_{\text{вых. max.}}$$

Минимальное значение коэффициента усиления по току для выбиравшего транзистора

$$h_{21\alpha \min} \geq (T / t_i - 1) k_{\text{нас}} / 0,02,$$

где  $k_{\text{нас}}$  – коэффициент насыщения – параметр, показывающий, во сколько раз реальный ток базы насыщенного транзистора больше минимально необходимого для перевода транзистора в режим насыщения. Для мультивибратора рекомендуется  $k_{\text{нас}} = 4 \dots 5$ .

Используя рассчитанные значения  $f_{\text{гр}}$ ,  $U_{\text{кэ max}}$ , и  $h_{21\alpha \min}$ , из приложения А выбрать транзистор, у которого значения отмеченных выше параметров больше рассчитанных ранее. Для выбранного транзистора находятся значения  $f_{\text{гр}}$ ,  $U_{\text{кэ max}}$ ,  $h_{21\alpha}$ , а также значения максимального тока коллектора  $I_{\text{к max}}$ , максимально допустимой температуры полупроводниковой структуры  $t_{\text{к max}}$  и обратного тока коллектора транзистора  $I_{\text{кбо}}$ .

Температурный коэффициент, учитывающий степень влияния окружающей температуры на значение максимального тока коллектора транзистора,

$$n = \sqrt{(t_{\text{к max}} - t_{\text{окр}}) / (t_{\text{к max}} - 20)}.$$

Значение сопротивления коллекторных резисторов  $R1$  и  $R4$

$$R_{\text{к}} = R1 = R4 = k U_{\text{вых. max}} / I_{\text{ки}}^n$$

где  $k$  – коэффициент запаса,  $k = 8 \dots 10$ .

Сопротивление базовых резисторов

$$R_6 = R2 = R3 = h_{21\alpha} R_{\text{к}} / k_{\text{нас}}.$$

Напряжение источника питания мультивибратора можно выбрать равным амплитудному значению импульса, т. е.  $U = U_{\text{вых. max.}}$ .

Обратный ток коллектора транзистора при заданных условиях эксплуатации

$$I_{\text{кбо max}} = I_{\text{кбо}} 2^{(0,1 t_{\text{окр}} - 2)}.$$

Если отношение  $I_{\text{кбо max}} R_6 / U$  значительно меньше единицы, то температурным влиянием обратного тока коллектора транзистора на временные параметры мультивибратора можно пренебречь. В противном случае необходимо выбрать другой транзистор.

Ёмкости времязадающих конденсаторов:

$$C1 = t_i / 0,69 R_6;$$

$$C2 = (T - t_i) / 0,69 R_6.$$

Длительность среза импульса

$$t_c = 0,32 / f_{\text{гр.}}$$

Длительность фронта импульса

$$t_{\Phi} = 2,2R_kC2.$$

Свойства мультивибратора на биполярных транзисторах можно проверить экспериментально. С этой целью, по указанию преподавателя, из приложения А для данной работы взять исходные данные для расчёта схемы и, по рассмотренной выше методике определить параметры всех её элементов, а затем выполнить моделирование в среде Multisim.

### Порядок выполнения экспериментального исследования

Открыть программу Multisim. На *панели компонентов* курсором мыши найти группу **[Транзисторы]** и нажатием клавиши мыши активировать эту группу. В открывшемся меню в окне **[Компонент]** курсором мыши выбрать марку транзистора, используемую при расчёте мультивибратора, и нажать кнопку **[OK]**. В открывшейся *рабочей зоне* нажатием клавиши мыши закрепить пиктограмму транзистора в её центральной части. Одновременно открывается меню **[Транзисторы]**, в котором надо снова нажать кнопку **[OK]** и закрепить мышью второй транзистор в *рабочей зоне*, а затем нажать кнопку **[Закрыть]**. После занесения транзисторов в *рабочей зоне* их пиктограммы изображены одинаково. Для удобства сборки цепи пиктограмму одного транзистора можно повернуть по горизонтали (рисунок 2.17). Для такого поворота курсор наводится на пиктограмму и однократно нажимается правая клавиша мыши. В открывшемся окне выбирается команда **[Развернуть по горизонтали]** и нажимается клавиша мыши.

На *панели компонентов* выделить группу **[Источники]** и клавишей мыши открыть её меню. В открывшемся меню в окне **[Компонент]** выбрать источник постоянного напряжения **[DC\_POWER]** и нажатием кнопки **[OK]** занести его в *рабочую зону*. Закрепить клавишей мыши пиктограмму источника постоянного напряжения в открывшейся *рабочей зоне*. Одновременно снова открывается меню группы **[Источники]**. Аналогично в окне выделить элемент заземления **[GROUND]** и нажатием кнопки **[OK]** перенести его в *рабочую зону*. После закрепления мышью пиктограммы элемента заземления снова открывается меню **[Источники]**, в котором надо нажать кнопку **[Закрыть]**.

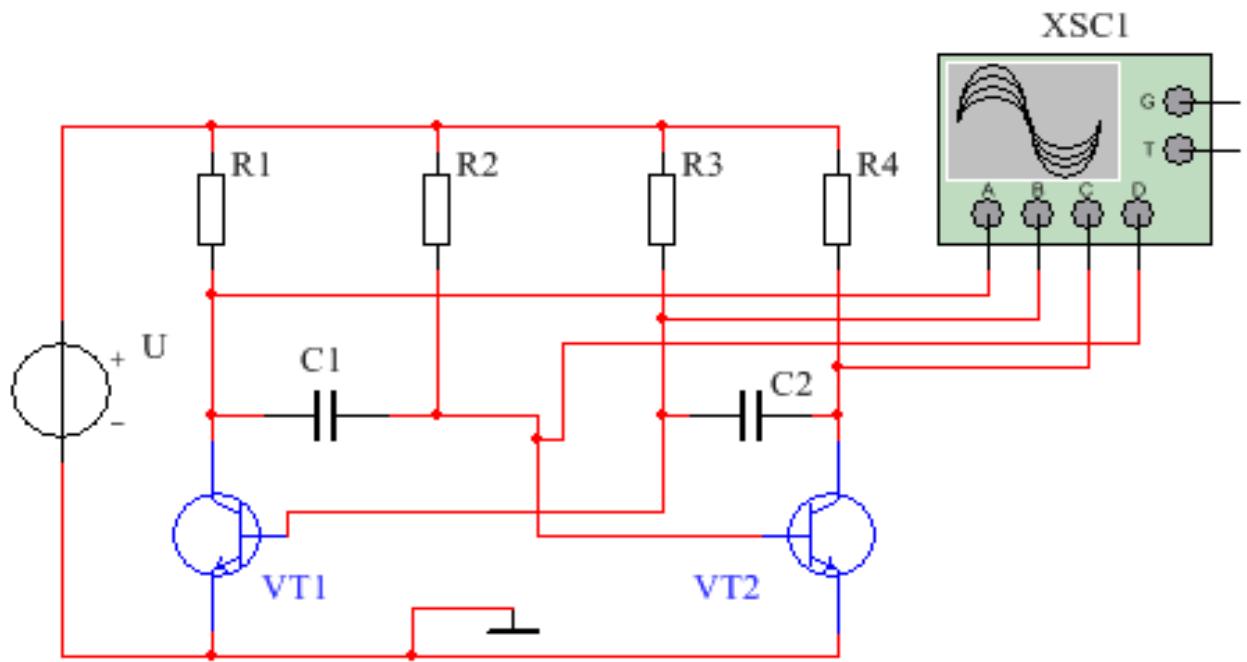


Рисунок 2.17 – Схема мультивибратора в среде Multisim

На *панели компонентов* выделить группу **[Пассивные компоненты]** и нажатием клавиши мыши открыть меню этой группы. В открывшемся меню в окне **[Семейство]** выделить пиктограмму **[RESISTOR]** (резистор с постоянным сопротивлением) и нажатием кнопки **[OK]** занести его в *рабочую зону*. Для исследуемой цепи операцию занесения в *рабочую зону* резистора с постоянным сопротивлением необходимо выполнить четыре раза. Затем в окне

**[Семейство]** выделить элемент **[CAPACITOR]** (конденсатор). В схеме два конденсатора, поэтому операцию занесения их надо выполнить два раза.

На *панели инструментов* найти курсором мыши пиктограмму **[4-канальный осциллограф]** и однократно нажать клавишу мыши. В рабочей зоне появится пиктограмма прибора, которую мышью необходимо переместить в удобное для сборки цепи место. Однократным нажатием клавиши мыши пиктограмма закрепляется в выбранном месте.

В соответствии с рисунком 2.17 собрать в *рабочей зоне* электрическую цепь, подлежащую исследованию. Задать всем резисторам и конденсаторам рассчитанные ранее значения сопротивлений и емкостей, а источнику питания  $U$  – требуемое значение напряжения.

Открыть лицевую панель осциллографа. По умолчанию открыт канал *A*. В окне **[Канал А]** в строке **[Смещение]** записать число **1.6**, смещающее осциллограмму канала *A* вверх на 1,6 делений. В строке **[Шкала]** установить чувствительность канала, равную **20 V/Div**. В окне **[Синхронизация]** в строке **[Уровень]** записать число **1** и активировать кнопку **[Одн.]**. В окне

[Развёртка], в строке [Шкала] записать значение длительности развёртки, которое примерно равно  $(0,2\text{--}0,3)T$ , где  $T$  – рассчитанное ранее значение периода следования импульсов мультивибратора.

Переключателем каналов прибора открыть канал  $B$  и в окне [Канал В] в строке [Шкала] установить такую же чувствительность, как и в канале  $A$ , а в строке [Смещение] записать 1. Открыть канал  $C$  и в окне [Канал С] в строке [Шкала] установить значение чувствительности аналогичное тому, которое было выбрано для канала  $A$ , а в строке [Смещение] записать **–1.4**.

Открыть канал  $D$  и в окне [Канал D] в строке [Шкала] установить такую же чувствительность, как и в канале  $A$ , а в строке смещение записать **–1.8**.

Запустить процесс моделирования и по истечении нескольких секунд остановить его. На экране осциллографа зафиксируются осцилограммы напряжения на коллекторах транзисторов (входы  $A$  и  $C$ ) и напряжения на их базах (каналы  $B$  и  $D$ ). Эти осцилограммы необходимо в масштабе зарисовать в отчёте о выполненной работе.

При необходимости в окне [Развёртка] в строке [Шкала] можно сделать коррекцию длительности развёртки, при которой на экране будут отображены один или два периода выходного напряжения на коллекторе транзистора. Дополнительно можно сделать коррекцию чувствительности каналов, чтобы максимальное отклонение изображения сигнала от нулевой линии не превышало 1–1,2 деления. Определить и записать в таблицу 2.8 амплитудное значение напряжения на коллекторе транзистора  $U_{\text{вых. max}}$ .

Рассчитать и занести в таблицу 2.8 значения  $0,1U_{\text{вых. max}}$ , а также  $0,9U_{\text{вых. max}}$ . Установить маркерную линию № 1 на начало нарастания импульса на переднем фронте, а линию № 2 на срез импульса (задний фронт). В этом случае в окне [Значения исследуемых параметров] под заголовком [Время] в третьей строке **(T2–T1)** отобразится информация, соответствующая длительности импульса  $t_i$ . Значение экспериментальной длительности импульса записать в таблицу 2.8.

Для определения периода следования импульсов  $T$  установить первую маркерную линию на начало нарастания первого импульса, а вторую на начало нарастания второго импульса. В этом случае в окне [Управление маркерными линиями] в строке **(T2–T1)** отобразится число, соответствующее искомому периоду  $T$ , которое также необходимо записать в таблицу 2.8.

Изменить длительность развёртки таким образом, чтобы на экране осциллографа по горизонтали наблюдался в основном только один полный импульс напряжения на коллекторе какого-либо транзистора, и, в первую очередь, его передний фронт.

**Таблица 2.8 – Параметры сигнала, создаваемого мультивибратором**

| Измерено   |          |               |                           | Вычислено                    |                              |          |
|------------|----------|---------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|----------|
| $t_i$ , мс | $T$ , мс | $t_\phi$ , мс | $U_{\text{вых. max}}$ , В | $0,1U_{\text{вых. max}}$ , В | $0,9U_{\text{вых. max}}$ , В | $f$ , Гц |
|            |          |               |                           |                              |                              |          |

Установить первую маркерную линию в точку этого импульса, соответствующую  $0,1U_{\text{вых. max}}$  на переднем фронте выбранного транзистора, а вторую маркерную линию в точку, соответствующую  $0,9U_{\text{вых. max}}$  на этом фронте. При установке линий из-за дискретного характера их перемещения может не получиться выполнить установку в точках, точно соответствующих рассчитанным значениям напряжения  $0,1U_{\text{вых. max}}$  и  $0,9U_{\text{вых. max}}$ . В этом случае маркерные линии необходимо расположить в точках максимально приближённых к рассчитанным значениям напряжения. Значение длительности переднего фронта  $t_\phi$  импульса напряжения на коллекторе транзистора отображается в окне [Значения исследуемых параметров] под заголовком [Время] в третьей строке ( $T_2-T_1$ ), его надо записать в таблицу 2.8. На этом экспериментальное исследование мультивибратора на биполярных транзисторах завершено.

### Контрольные вопросы

- 1 Какое устройство называется мультивибратором?
- 2 Какие разновидности мультивибраторов применяются на практике?
- 3 Какими параметрами характеризуется импульсный сигнал?
- 4 Как рассчитывается скважность импульсных периодических сигналов?
- 5 Изобразить схему мультивибратора на транзисторах и пояснить его работу.
- 6 Чем определяется время открытого состояния транзистора в мультивибраторе?
- 7 Чем определяется время закрытого состояния транзистора в мультивибраторе?
- 8 Как можно изменить рабочую частоту мультивибратора?
- 9 Нарисовать временные диаграммы работы мультивибратора.
- 10 Какие факторы влияют на длительность переднего фронта импульса, формируемого мультивибратором?
- 11 Какие факторы влияют на длительность заднего фронта импульса (длительность среза импульса), формируемого мультивибратором?
- 12 Как рассчитывается период колебаний мультивибратора?

*ПРИЛОЖЕНИЕ А*  
(*обязательное*)

**Исходные данные для экспериментальных исследований**



*ПРИЛОЖЕНИЕ Б*  
(*справочное*)

**Справочные данные на электронные приборы**



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Миловзоров, О. В.** Электроника : учеб. для вузов / О. В. Миловзоров, И. Г. Панков. – 8-е изд., перераб. и доп. – М. : Юрайт, 2025. – 397 с.
- 2 **Бурков, А. Т.** Электронная техника и преобразователи : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / А. Т. Бурков. – М. : Транспорт, 2001. – 464 с.
- 3 **Бурков, А. Т.** Электроника и преобразовательная техника : учеб. для студентов вузов ж.-д. трансп. : в 2 т. Т. 1. Электронная техника / А. Т. Бурков. – М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2015. – 365 с.
- 4 Электронные преобразователи электрической энергии для тягового подвижного состава : учеб. / Ю. М. Иньков, В. В. Литовченко, Н. Г. Шабалин, В. А. Шаров. – М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2023. – 168 с.
- 5 **Ищук, А. А.** Схемотехническое моделирование в среде Multisim : учеб. пособие для вузов / А. А. Ищук, И. А. Оболонин. – СПб. : Лань, 2024. – 124 с.
- 6 **Салита, Е. Ю.** Электронная техника и преобразователи в электроснабжении : учеб. пособие / Е. Ю. Салита, Т. В. Ковалева, Т. В. Комякова. – Омск : ОмГУПС, 2021. – 111 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....   | 3  |
| 1 ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ MULTISIM ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ<br>И АНАЛИЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ.....                   | 5  |
| 1.1 Основные понятия о программе Multisim.....  | 5  |
| 1.2 Порядок проведения экспериментальных работ.....   | 8  |
| 1.3 Работа с измерительными приборами.....  | 13 |
| 1.4 Знания и умения, необходимые для выполнения элементарных операций<br>при работе в среде Multisim..... | 32 |
| 1.5 Примеры применения среды Multisim для анализа процессов в элекtri-<br>ческих цепях.....               | 33 |
| 1.5.1 Исследование разветвлённой цепи постоянного тока.....   | 33 |
| 1.5.2 Анализ процессов в цепи переменного тока с катушкой индуктивности.....                              | 36 |
| 1.5.3 Исследование электрической цепи с несинусоидальным напряжением.....                                 | 41 |
| 2 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОНИКИ.....   | 45 |
| 2.1 Исследование параметрического стабилизатора напряжения.....   | 45 |
| 2.2 Исследование биполярного транзистора.....   | 52 |
| 2.3 Исследование усилительного каскада на биполярном транзисторе.....                                     | 62 |
| 2.4 Исследование генератора синусоидального напряжения с трансформатор-<br>ной обратной связью.....       | 71 |
| 2.5 Исследование мультивибратора.....   | 79 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А. Исходные данные для экспериментальных исследований.....                                     | 89 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Справочные данные на электронные приборы.....   | 89 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....  | 90 |