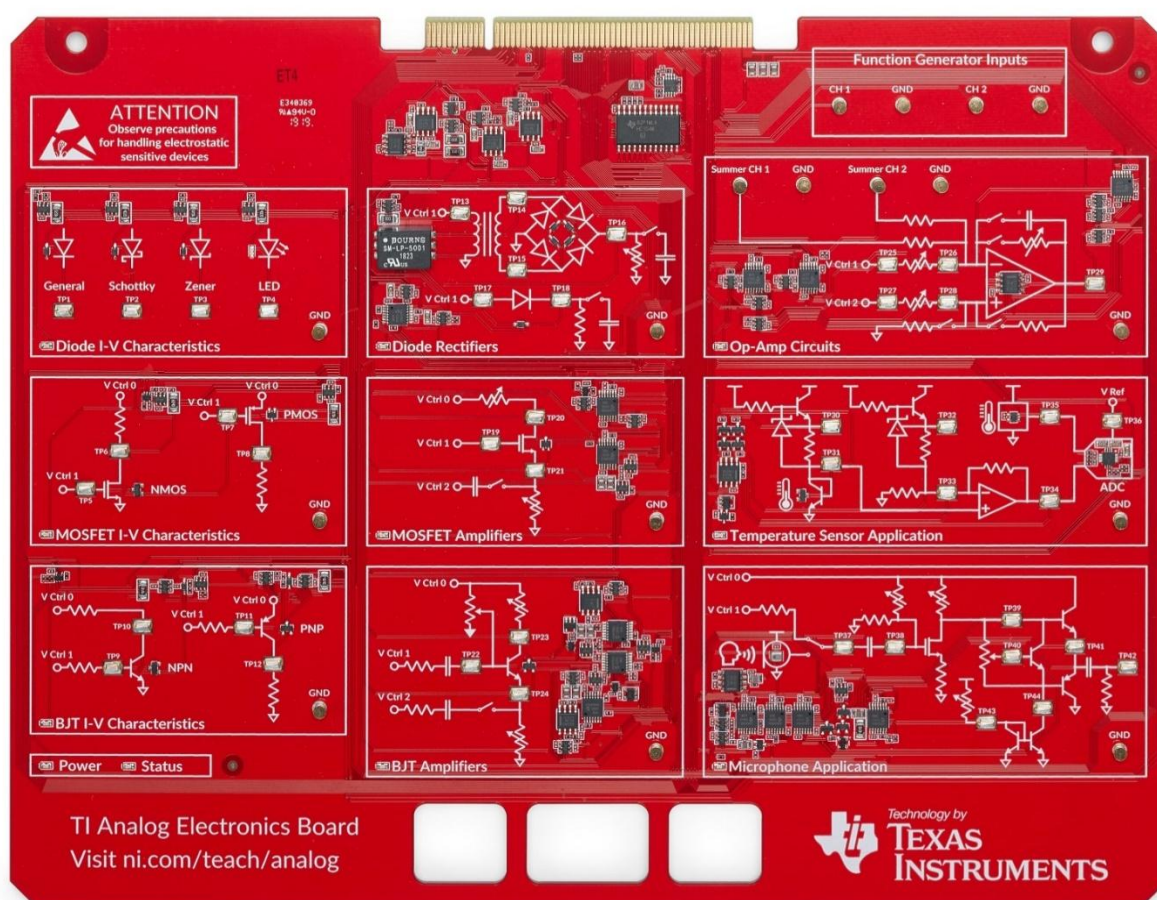


# Руководство к лабораторному практикуму: Аналоговая электроника

С использованием платы TI Power Electronics для NI ELVIS III



## Лабораторная работа 2: Применение полупроводниковых КОМПОНЕНТОВ

Данный документ и описанное в нем программное обеспечение предоставляются в соответствии с лицензионным соглашением. Ни программное обеспечение, ни этот документ не могут быть использованы или скопированы, за исключением случаев, указанных в условиях лицензионного соглашения. Quanser Inc. предоставляет следующие права: а) право воспроизводить работу, включать работу в один или несколько сборников и воспроизводить работу, включенную в сборники, б) создавать и воспроизводить усовершенствования при условии принятия разумных мер для четкой идентификации изменений, внесенных в оригинальную работу, с) распространять и публично представлять работу, в том числе включенную в сборники, и d) распространять и публично представлять усовершенствованную работу. Вышеуказанные права могут быть реализованы на всех носителях и в форматах, известных сегодня или разработанных в будущем. Данные права предоставляются при условии соблюдения следующих ограничений: а) Вы не можете осуществлять никакие из предоставленных вам выше прав любым образом, предназначенным, в первую очередь, или направленным на получение коммерческой выгоды или частной денежной компенсации, и б) Вы должны сохранить все уведомления об авторских правах на Работу и предоставить название Quanser Inc. при указании авторства. Данные ограничения не могут быть отменены без предварительного письменного разрешения Quanser Inc.

LabVIEW и National Instruments являются торговыми марками National Instruments.

Названия других упомянутых торговых марок и изделий являются собственностью их правообладателей.

**Дополнительные отказы от прав:** Читатель принимает все риски использования данного ресурса и всей информации, теорий и программ, содержащихся или описанных в ней. Данный ресурс может содержать технические неточности, типографические ошибки, прочие ошибки и упущения, и устаревшую информацию. Ни автор, ни издатель не несут ответственности за любые ошибки и неточности, за обновление любой информации и за любые нарушения патентного права и прочих прав на интеллектуальную собственность.

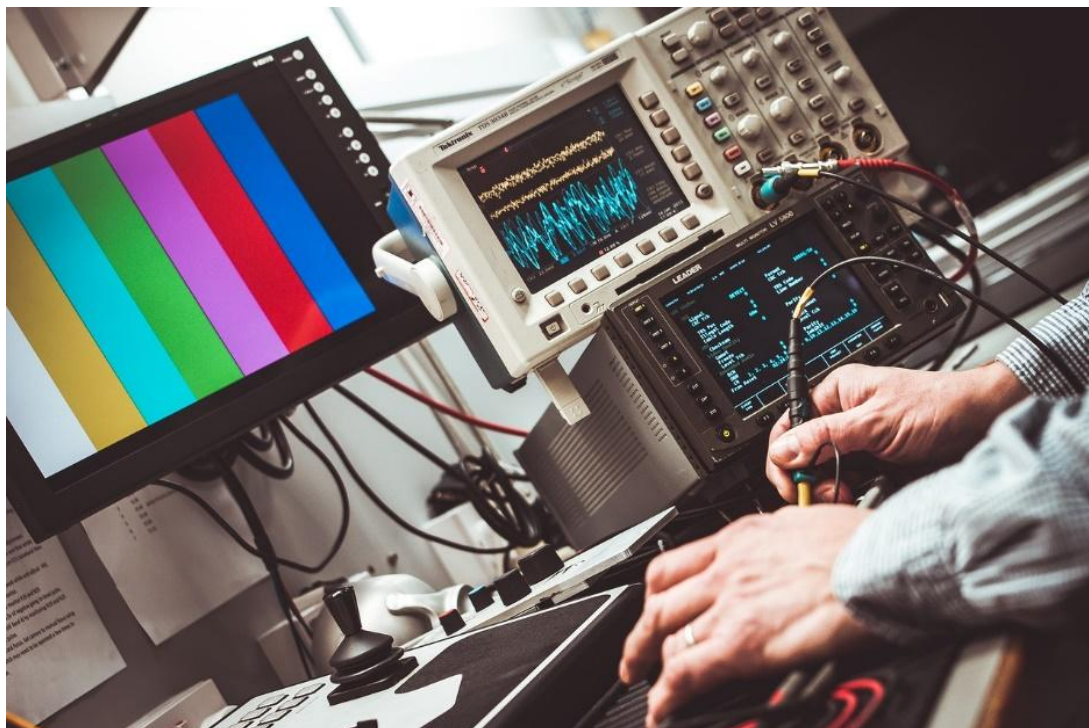
Ни автор, ни издатель не дают никаких гарантий, включая, но не ограничиваясь, любую гарантию на достаточность ресурса и любой информации, теорий или программ, содержащихся или описанных в них, и любую гарантию, что использование любой информации, теорий или программ, содержащихся или описанных в ресурсе, не нарушит любое патентное право или иное право на интеллектуальную собственность. РЕСУРС ПОСТАВЛЯЕТСЯ "КАК ЕСТЬ". ИЗДАТЕЛЬ ЗАЯВЛЯЕТ ОБ ОТКАЗЕ ОТ ЛЮБЫХ ГАРАНТИЙ, ЯВНО ВЫРАЖЕННЫХ ИЛИ ПОДРАЗУМЕВАЕМЫХ, ВКЛЮЧАЯ, НО НЕ ОГРАНИЧИВАЯСЬ, ЛЮБЫЕ ПОДРАЗУМЕВАЕМЫЕ ГАРАНТИИ ТОВАРНОГО СОСТОЯНИЯ, ПРИГОДНОСТИ ДЛЯ КОНКРЕТНОЙ ЦЕЛИ И НЕНАРУШЕНИЯ ПРАВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ.

Издатель или автор не предоставляют лицензий под любым патентным правом или прочим правом на интеллектуальную собственность прямо, косвенно или лишением права возражения.

НИ ПРИ КАКИХ ОБСТОЯТЕЛЬСТВАХ ИЗДАТЕЛЬ И АВТОР НЕ НЕСУТ ОТВЕТСТВЕННОСТИ ЗА ПРЯМЫЕ, КОСВЕННЫЕ, ОСОБЫЕ, СЛУЧАЙНЫЕ, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ИЛИ ВТОРИЧНЫЕ УБЫТКИ, ПОНЕСЕННЫЕ ИЗ-ЗА ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭТОГО РЕСУРСА И ЛЮБОЙ ИНФОРМАЦИИ, ТЕОРИЙ ИЛИ ПРОГРАММ, СОДЕРЖАЩИХСЯ ИЛИ ОПИСАННЫХ В НЕМ, ДАЖЕ БУДУЧИ ПРЕДУПРЕЖДЕНА О ВОЗМОЖНОСТИ ПОДОБНЫХ УБЫТКОВ, И ДАЖЕ ЕСЛИ УБЫТКИ ВЫЗВАНЫ НЕБРЕЖНОСТЬЮ ИЗДАТЕЛЯ, АВТОРА ИЛИ ИНЫХ ЛИЦ, Применимое законодательство может не позволить исключить или ограничить случайные или косвенные убытки, так что приведенные выше ограничения или исключения могут быть к вам не применимы.

**Благодарности:** Структура данного практикума в значительной степени основана на содержании и организации практикума *"Интегральные микросхемы"* Sedra and Smith, а также на учебной программе по аналоговой электронике, разработанной для тренажера AELabs компанией Illuster. Texas Instruments, National Instruments и Quanser выражают благодарность профессорам Седре и Смитту, а также разработчикам Illuster за их вклад в этот лабораторный практикум.

## Лабораторная работа 2: Применение полупроводниковых компонентов



*Рисунок 0-1: Понимание функционирования простых аналоговых схем необходимо для разработки и тестирования сложных приложений*

Осмысление характеристик полупроводника является первым шагом в разработке практических приложений. Типичные компоненты полупроводниковых схем обладают известными свойствами, которые следует понимать, чтобы использовать эти компоненты при проектировании реальных устройств. Кроме того, понимание взаимодействия компонентов в хорошо задокументированных схемных решениях может быть очень информативным при интеграции этих схем в более крупные приложения, подобные рассматриваемым в Лабораторной работе 4.

В этой лабораторной работе мы рассмотрим основные примеры схем, в которых используются полупроводниковые компоненты, исследованные нами в Лабораторной работе 1. Эти схемы представляют собой стандартные функциональные блоки аналоговых приложений в области преобразования, согласования и усиления сигналов, а также в области силовой электроники.

## Цель работы

После выполнения данной лабораторной работы вы сможете:

1. Объяснять теоретические основы и принципы проектирования выпрямительных схем
2. Обосновывать применение различных типов диодов с проектными требованиями
3. Объяснять роль транзисторов в схемах усилителей
4. Применять теоретические знания о транзисторах для разработки простого приложения
5. Выбирать параметры компонентов для достижения желаемых характеристик усилителя
6. Определять причины нежелательного поведения полупроводниковых схем

## Необходимые инструментальные средства и технологии

Платформа: NI ELVIS III

- ✓ Руководство пользователя:  
<http://www.ni.com/en-us/support/model.ni-elvis-iii.html>

Технические средства:  
Плата TI Analog Electronics

- ✓ Руководство пользователя:  
<http://www.ni.com/en-us/support/model.TI-analog-elctronics-board-for-ni-elvis-iii.html>

Программное обеспечение:  
LabVIEW Runtime Engine  
версии 19.0 или выше

- ✓ Перед загрузкой и установкой программного обеспечения обратитесь к своему преподавателю или лаборанту за информацией о лицензиях на программное обеспечение и об инфраструктуре вашей лаборатории
- ✓ Загрузка и установка для NI ELVIS III  
<http://www.ni.com/academic/download>

## Ожидаемые результаты

В этой лабораторной работе вы должны собрать для отчета:

- ✓ Входные и выходные сигналы моделируемых и реальных диодных выпрямителей
- ✓ Анализ проектирования сглаживающего фильтра выпрямителя
- ✓ Передаточные характеристики по напряжению для усилителей на МОП-транзисторах с общим стоком, общим истоком и общим затвором
- ✓ Напряжения смещения для различных конфигураций усилителей на МОП-транзисторах
- ✓ Передаточные характеристики по напряжению для усилителей на биполярных транзисторах с общей базой, общим коллектором и общим эмиттером
- ✓ Значения сопротивлений смещения и выбранные схемы смещения в усилителях на биполярных транзисторах

Преподавателю, скорее всего, необходимо предъявить полный отчет о работе. Узнайте у вашего преподавателя, есть ли конкретные требования к отчету или шаблон для его оформления.

## Раздел 1: Диодные выпрямители

### 1.1 Сведения из теории

#### Однополупериодный выпрямитель

В общих чертах выпрямители преобразуют сигнал переменного тока (AC) в сигнал постоянного тока (DC). Если точнее, они ограничивают сигнал, чтобы он стал строго выше или строго ниже опорного напряжения. Самый простой способ добиться этого – пропустить сигнал через диод, чтобы ток мог протекать только в положительном направлении. Такая схема называется однополупериодным выпрямителем.

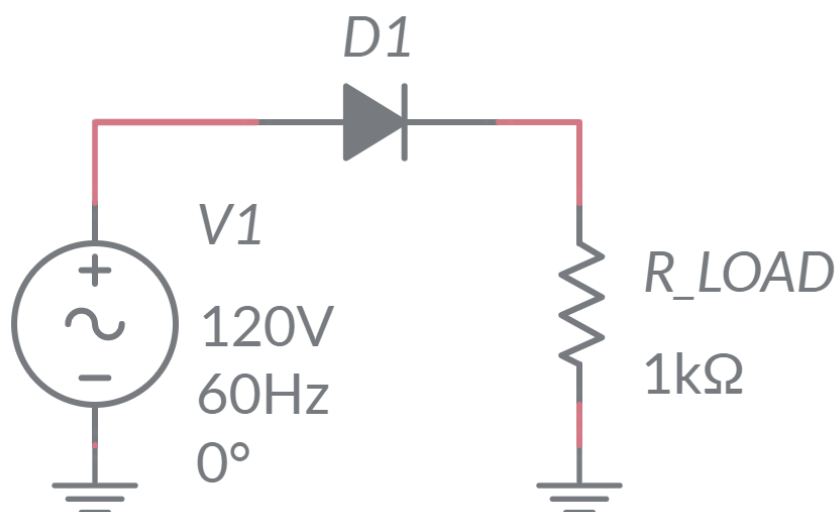


Рисунок 1-1: Простейшая схема выпрямителя

Очевидное преимущество такой схемы в ее простоте; однако она обладает рядом недостатков, зависящих от конкретного приложения. Для приложений обработки сигналов эта схема совершенно непрактична, поскольку полностью теряется вся информация, содержащаяся в отрицательных аналоговых напряжениях. Для большинства приложений силовой электроники однополупериодного выпрямления недостаточно, а содержание гармонических составляющих велико и их необходимо удалить. Питание от сети переменного тока подается только в течение половины периода, то есть половина мощности не используется.

## Двухполупериодный выпрямитель

Решение, которое первым приходит в голову – отдельно выпрямить отрицательную часть сигнала и объединить две части для получения полностью выпрямленного сигнала. Этого можно добиться различными способами, но в реальных проектах вы, скорее всего, встретите единственную топологию двухполупериодного выпрямителя под названием *мостовой выпрямитель*. Его схема показана на рисунке 1-2.

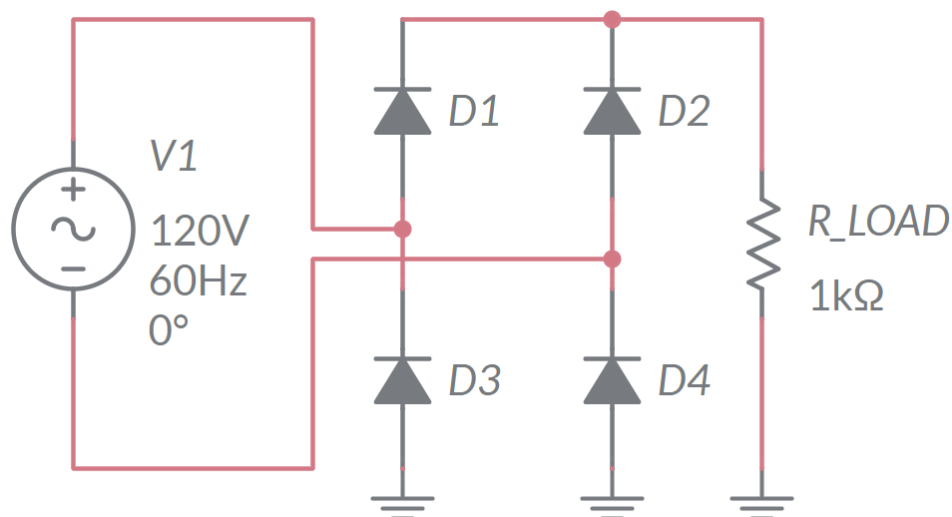


Рисунок 1-2: Двухполупериодный выпрямитель

Эта схема решает проблему потери отрицательной части сигнала, а также несимметричной нагрузки в системах электропитания; однако она все еще обладает значительными ограничениями, в частности, невозможностью управлять пиковыми напряжениями, прикладываемыми к диодам. Это представляет проблему, поскольку для приведенной выше схемы потребуются диоды с напряжением пробоя значительно больше 120 В, иначе диоды D3 и D4 выйдут из строя, что оторвет нагрузку от заземления или к короткому замыканию нагрузки V1 на землю. Поэтому в большинстве приложений электропитания мостовой выпрямитель соединяют с сетью переменного тока через трансформатор, что не только изолирует заземление цепей постоянного тока от источника переменного тока, но и позволяет легко масштабировать входное напряжение для уменьшения потерь в источниках питания, преобразующих постоянное напряжение в постоянное (DC-DC).

### Фильтрация выходного сигнала и сглаживание пика

Выходной сигнал мостового выпрямителя синусоидального сигнала переменного тока будет похож на синусоиду ( $V_{out} = |\sin(t)|$ ), показанную на рисунке 1-3. Он не очень удобен для питания устройства, поскольку в значительной части периода сигнала выходное напряжение очень мало. Кроме



того очень значительны изменения (*пульсации*) выходного напряжения. Эти проблемы усугубляются отрицательным смещением из-за прямого падения напряжения на диодах и ряда других факторов.

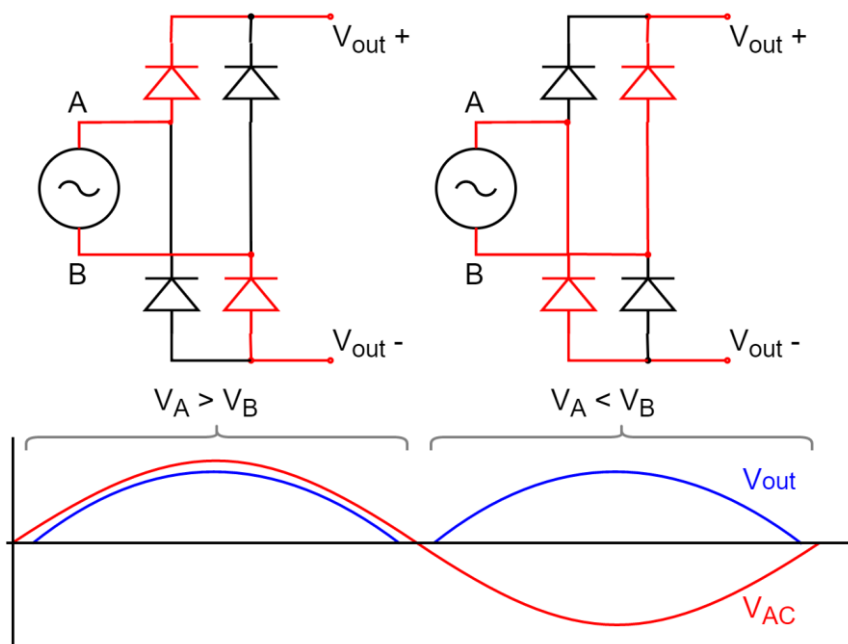


Рисунок 1-3: Принцип действия выпрямителя и выходной сигнал

Для устранения этой проблемы к выходу схемы подключается конденсатор. Емкость конденсатора фильтрует выходной сигнал, уменьшая пульсацию напряжения ценой увеличения пикового тока при зарядке конденсатора. Получившаяся схема показана на рисунке 1-4. Она очень похожа на схему выпрямителя, используемого в подавляющем большинстве современных источниках питания.

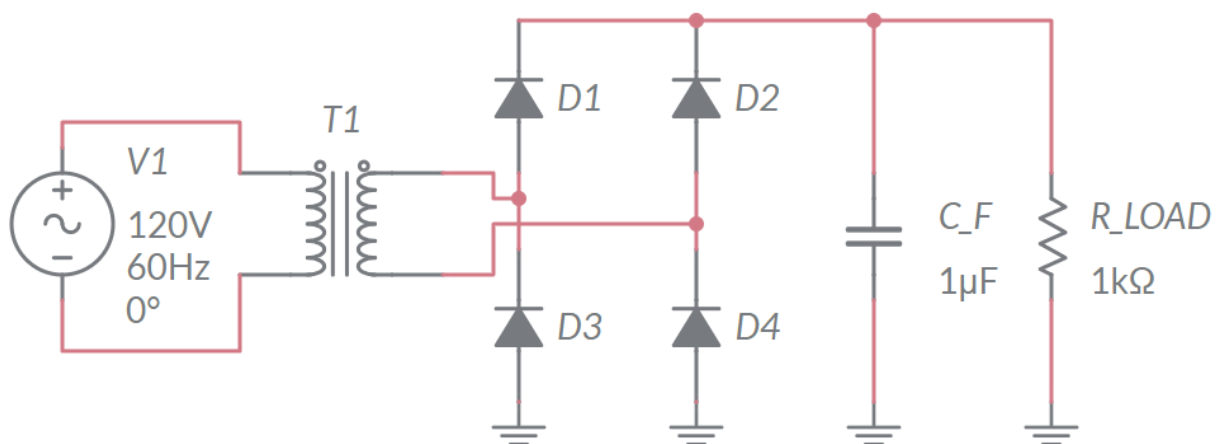


Рисунок 1-2: Двухполупериодный мостовой выпрямитель

## 1.2 Моделирование

Прежде чем приступить к экспериментам с реальным оборудованием, мы мы используем NI Multisim со SPICE моделями для моделирования мостового выпрямителя и рассмотрим его устройство.

1. Откройте новую схему Multisim. Используя обычные диоды, соберите схему, показанную на рисунке 1-2. Пока что не подключайте емкостной фильтр.
2. Настройте V1 на формирование синусоидального сигнала амплитудой 120 В и частотой 60 Гц. Задайте количество витков входной обмотки трансформатора равным 100, количество витков выходной обмотки равным 10.
3. Добавьте средства измерения напряжения/тока на положительном контакте V1, а также на положительной шине выходного напряжения постоянного тока.
4. Запустите моделирование и сделайте скриншот входного и выходного сигналов.
5. Остановите моделирование и добавьте конденсатор фильтра C<sub>F</sub>.
6. Снова запустите моделирование и сделайте скриншот входного и выходного сигналов.
7. Изменяйте значение емкости в диапазоне между 1 пФ и 1 мФ. Отметьте, какое влияние это оказало на выходной сигнал.
8. Увеличьте сопротивление на выходе до 100 кОм и повторите тестирование, изменяя C<sub>F</sub>. Обратите внимание на любые отличия, возникающие при изменении емкости.
9. Остановите моделирование и замените обычные диоды светодиодами (характеристика которых значительно отличается от характеристики обычного диода).
10. Запишите, какое влияние это оказало на результирующие сигналы.

## 1.3 Эксперименты с реальными компонентами

В этом разделе лабораторной работы мы исследуем реальные диодные выпрямители, установленные на плате TI Analog Electronics.

1. Убедитесь, что светодиоды на станции NI ELVIS III горят и мигают так, как следует. Если это не так, обратитесь к лаборанту, запустите приложение TI Analog Electronics Quick Start или обратитесь к разделу Развертывание программного обеспечения Руководства пользователя.
2. Из папки с программным обеспечением лабораторного практикума запустите **Lab2\_Implementation.exe** и убедитесь, что светодиод "Status" платы Analog Electronics горит.
3. Подключите выходы функционального генератора ELVIS III ко входам CH1 и CH2 платы.
4. Подключите пробники осциллографа к **TP17** и **TP18**.

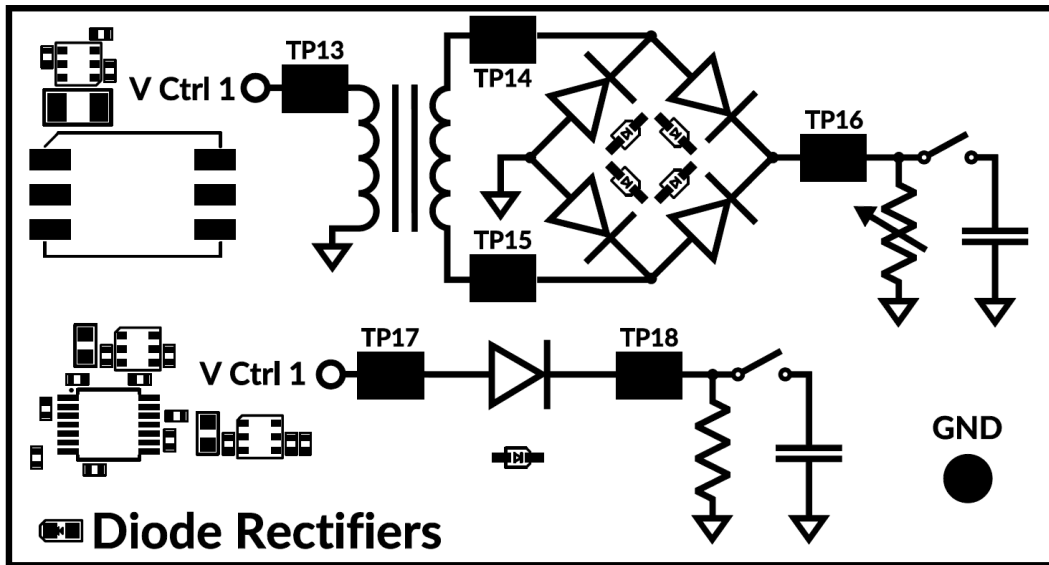


Рисунок 1-5: Раздел диодных выпрямителей с соответствующими контрольными точками

5. Установите канал 1 функционального генератора на формирование синусоидального сигнала частотой 1 кГц и амплитудой 12 Вп-п.
6. Убедитесь, что светодиод "Status" и светодиоды раздела "Diode Rectifiers" горят.
7. Сделайте скриншот выходного сигнала однополупериодного выпрямителя.
8. Измерьте минимальное и максимальное напряжение в точке TP18.
9. Щелкните по **SW2** для подключения емкостного фильтра.
10. Сделайте скриншот выходного сигнала однополупериодного выпрямителя и измерьте минимальное и максимальное выходные напряжения.
11. Снова щелкните по **SW2** для отключения емкостного фильтра.
12. Установите сопротивление нагрузки (**load resistance**) мостового выпрямителя на максимум (6 кОм).
13. Подключите пробники осциллографа к **TP13** и **TP14**.
14. Сделайте скриншот входных и выходных напряжений трансформатора.
15. Переместите второй пробник с TP14 на TP15 и сделайте скриншот входного и выходного сигналов.
16. Переместите второй пробник с TP15 на **TP16** и снова сделайте скриншот входного и выходного сигналов.
17. Измерьте минимальное и максимальное напряжения на выходе выпрямителя, а также интервал времени, в течение которого выходной сигнал равен 0 в каждом периоде. Повторите тест при сопротивлениях нагрузки 3,5 кОм и 1 кОм.
18. Повторите п. 17 с подключенным фильтром.
19. Щелкните по кнопке **Stop** для останова VI.

## 1.4 Анализ

1-1 Приведите скриншот выходного сигнала однополупериодного выпрямителя. Чему равны максимальное и минимальное напряжения? Как соотносится максимальное выходное напряжение со входным напряжением?

1-2 Как добавление емкостного фильтра изменило сигнал? Насколько сильно это повлияло на максимальное и минимальное выходные напряжения?

1-3 Приведите полученные вами скриншоты выходных сигналов трансформатора. Каковы отличия выходного сигнала от входного? Как это объяснить?

1-4 Приведите полученный скриншот выходного сигнала мостового выпрямителя. Чему равны максимальное и минимальное напряжения? Как соотносится максимальное выходное напряжение со входным напряжением? Как соотносятся форма и напряжение выходного сигнала мостового и однополупериодного выпрямителя?

1-5 Существенно ли повлияло на выходной сигнал изменение сопротивления на выходе? Если да – почему? Как соотносятся форма и напряжение выходного сигнала мостового и однополупериодного выпрямителя при одинаковой нагрузке в 1 кОм?

1-6 Как изменилось поведение выпрямителя при подключении емкостного фильтра? Как изменилось влияние сопротивления на выходе при добавлении фильтра? Чем отличаются отфильтрованные сигналы на выходах одно- и двухполупериодного выпрямителей?

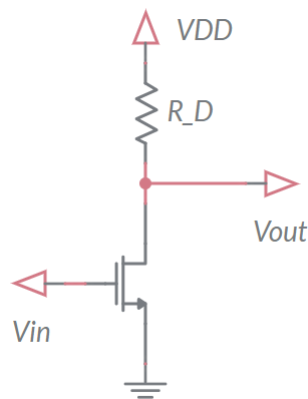
1-7 Чем отличаются характеристики моделируемого и реального выпрямителей? Чем можно объяснить отличия характеристик?

## Раздел 2: Усилители на МОП-транзисторах

### 2.1 Сведения из теории

#### *Передаточная характеристика по напряжению*

В лабораторной работе 1 нас интересовало только соотношение между потенциалом на затворе МОП-транзистора и результирующим током. Но, хотя это полезно понимать, с точки зрения усиления сигнала нас больше интересует выходное напряжение, чем выходной ток. Поэтому мы должны добавить сопротивление, на котором будет формироваться выходное напряжение. Тогда мы сможем получить *передаточную характеристику по напряжению*, которая показывает отношение входного и выходного напряжений. Например, рассмотрим следующую схему:



*Рисунок 2-1: Простой усилитель на МОП-транзисторе*

В области отсечки ток не протекает, и в отсутствие падения напряжения на  $R_D$   $V_{out}$  будет равно  $V_{DD}$ . Напротив, в линейной области практически весь ток протекает в землю, отчего  $V_{out}$  стремится к нулю. При этом схема работает как логический инвертор, когда значение  $V_{in}$  близко к нулю или к  $V_{DD}$ . Самое интересное происходит в области насыщения. Если  $V_{in}$  находится в середине диапазона, ток насыщения через МОП-транзистор формирует постоянное выходное напряжение, прямо пропорциональное входному напряжению. Передаточная характеристика этой схемы похожа на показанную на рисунке 2-2.

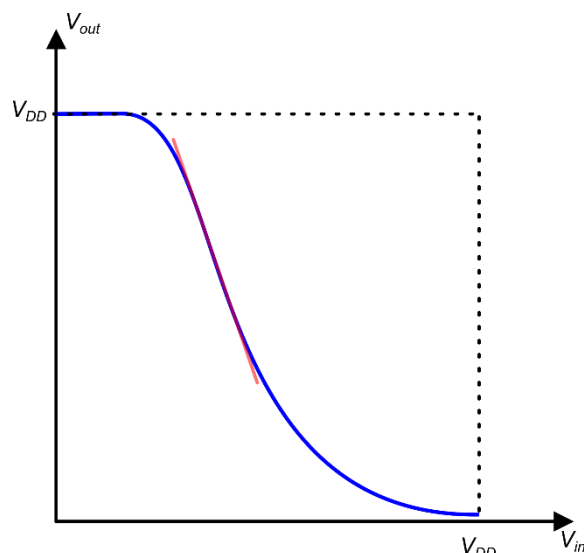


Рисунок 2-2: Пример передаточной характеристики по напряжению

Хотя эта зависимость существенно нелинейна, линейное усиление можно получить, если транзистор будет работать только в середине области насыщения, где кривая очень близка к линейной (выделено красным цветом). Крутизна этой зависимости определяется крутизной характеристики ( $g_m$ ) МОП-транзистора и значением  $R_D$ . Этот режим работы достигается путем *смещения* сигнала так, чтобы сигнал изменялся относительно напряжения смещения в центре этого диапазона.

### Конфигурации усилителей

Существует три распространенных конфигурации при обработке сигнала с использованием МОП-транзистора. В каждой из них к общей шине (или  $V_{DD}$ , или  $V_{SS}$ ) подключается различный вывод транзистора. Первая, и наиболее распространенная конфигурация – *усилитель с общим истоком (ОИ)*. Как следует из этого названия, исток подключен к земле, и выходным является напряжение равно  $V_{DS}$ , в то время как входной сигнал управляет затвором. Вы можете узнать по этому описанию схему, изображенную рисунке 2-1, которая обсуждалась ранее.

Зеркальным отражением усилителя с общим истоком является *усилитель с общим стоком (ОС)*, сток которого подключен напрямую к  $V_{DD}$ , а выходное напряжение снимается с сопротивления между истоком и землей. Эта конфигурация показана на рисунке 2-3.

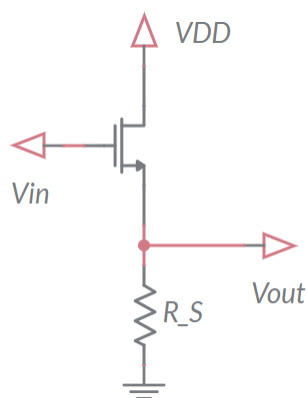


Рисунок 2-3: Усилитель на МОП-транзисторе с общим стоком

Последняя конфигурация несколько сложнее, поскольку, в отличие от конфигураций с общим истоком или с общим стоком, при конфигурации с *общим затвором (ОЗ)* к общей шине подключен затвор. Вместо задания потенциала на затворе,  $V_{in}$  используется для изменения потенциала истока. Эта схема показана на рисунке 2-4.

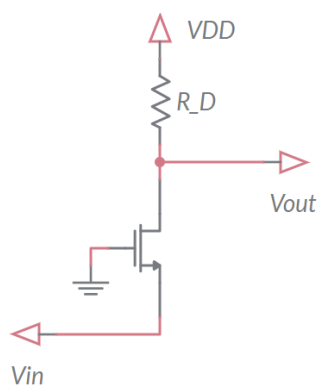


Рисунок 2-4: Усилитель на МОП-транзисторе с общим затвором

Обратите внимание, что в отличие от других конфигураций, сигнал необходимо смещать *ниже* напряжения на общей шине, чтобы ток смог протекать через МОП-транзистор. Функционально такой усилитель похож на усилитель с общим истоком, однако его коэффициент усиления положительный, а не отрицательный.

## 2.2 Моделирование

Перед выполнением экспериментов с реальными компонентами мы промоделируем идеализированные усилители разных топологий в симуляторе NI Multisim Live (перейдите на [www.multisim.com](http://www.multisim.com)).

1. Откройте в Multisim новую схему и добавьте в нее n-канальный МОП-транзистор BSS138P.

2. Создайте схему усилителя с общим истоком, показанную на рисунке 2-1.
3. Добавьте источник напряжения постоянного тока, управляющий напряжением затвор-исток  $V_{in}$ . Установите  $R_D$  равным 5 кОм и напряжение  $V_{DD}$ , равное 15 В постоянного тока.
4. Установите режим развертки напряжения постоянного тока (DC sweep) и настройте  $V_{in}$  на изменение в диапазоне от 0 до 10 В с шагом 0,01 В.
5. Добавьте прибор для измерения напряжения  $V_{out}$ .
6. Запустите моделирование и сохраните результаты.
7. Настройте максимальное и минимальное напряжение развертки таким образом, чтобы захватывать только область насыщения рабочего напряжения МОП-транзистора, и сделайте скриншот получившейся кривой.
8. Выберите наиболее линейную область характеристики и запишите значение напряжения идеального смещения (точка в середине линейного участка), полный рабочий диапазон и крутизну характеристики в этой области.
9. Повторите п.п. 2-8 для усилителя с общим стоком, показанным на рисунке 2-3.
10. Еще раз повторите п.п. 2-8 – для усилителя с общим затвором. Обратите внимание, что для такой конфигурации потребуется отрицательное напряжение смещения, и настройте диапазон развертки соответствующим образом.

### 2.3 Эксперименты с реальными компонентами

В этом разделе лабораторной мы получим передаточные характеристики по напряжению реальных усилителей на МОП-транзисторе, установленном на плате TI Analog Electronics.

1. Убедитесь, что светодиоды на NI ELVIS III горят и мигают так, как следует. Если это не так, обратитесь к лаборанту, запустите приложение TI Analog Electronics Quick Start или обратитесь к разделу Развертывание программного обеспечения Руководства пользователя.
2. Из папки с программным обеспечением лабораторного практикума запустите **Lab2\_Implementation.exe** и убедитесь, что светодиод “Status” платы Analog Electronics горит.
3. Подключите выходы функционального генератора ELVIS III ко входам CH1 и CH2 платы.
4. Подключите пробники осциллографа к **TP19** и **TP20**.



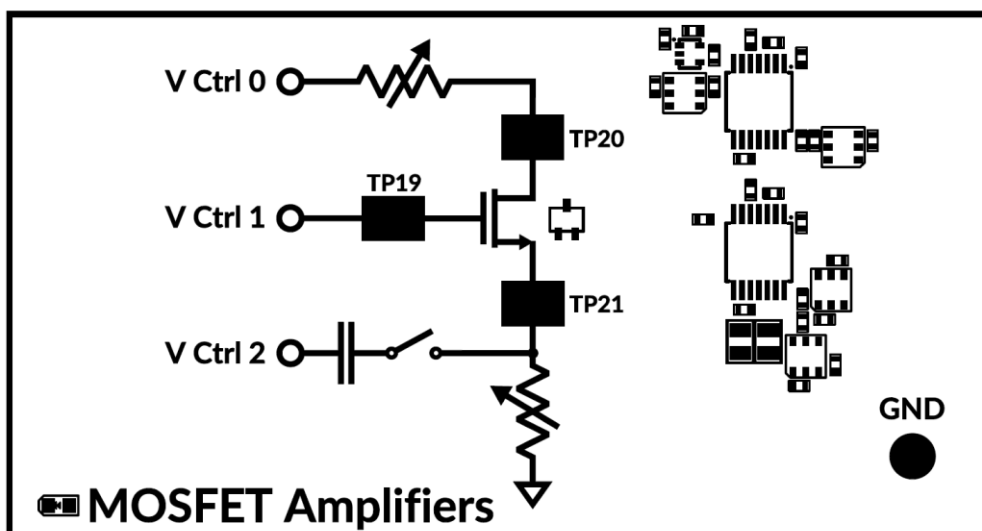


Рисунок 2-3: Раздел усилителей на МОП-транзисторах с соответствующими контрольными точками

5. Щелкните по стрелке запуска VI и убедитесь, что светодиод "Status" горит.
6. Выберите усилитель *FET Amplifier* из списка **Active Section**. Светодиод в разделе MOSFET Amplifiers должен загореться.
7. Установите сопротивление стока равным 5 кОм, а сопротивление истока равным 0 Ом.
8. Установите канал 1 функционального генератора на формирование треугольного сигнала амплитудой 20 Вп-п. Задайте параметр "symmetry" равным 100%.
9. Наблюдайте выходное напряжение в точке TP20. Полученная кривая должна быть похожа на моделируемую передаточную характеристику по напряжению. Определите напряжение идеального смещения для этой схемы и сделайте скриншот передаточной характеристики по напряжению в активной области.
10. Измените выходной сигнал функционального генератора на синусоиду частотой 1 кГц, амплитудой 100 мВп-п и напряжением смещения, определенным в п. 9.
11. Сделайте скриншот выходного напряжения в точке TP20.
12. Измените сопротивление стока и запишите, как это повлияло на выходной сигнал.
13. Повторите п.п. 6-11, задав сопротивление стока равным 0 Ом, а сопротивление истока – 5 кОм. Теперь выходное напряжение следует измерять в точке TP21.
14. Поэкспериментируйте с различными сопротивлениями истока и стока, а также с различными напряжениями смещения и амплитудами входного сигнала. Составьте таблицу сопротивлений, смещений и амплитуд, и определите, в каких случаях наблюдается искажение выходного сигнала.
15. Задайте в канале 1 (или в канале 2 для усилителя с общим затвором) функционального генератора постоянное напряжение 5 В и активируйте канал 2 генератора.

16. Установите сопротивления стока и истока равными 5 кОм.
17. Замкните переключатель между  $V_{ctrl2}$  и выводом истока.
18. Повторите п.п. 8-11 для этой конфигурации. Теперь входной сигнал можно измерить в точке **TP21**, а выходной – в точке **TP20**.
19. Поэкспериментируйте с различными значениями сопротивления стока и истока. Запишите влияние этих сопротивлений на работу усилителя.
20. Щелкните по кнопке **Stop** для останова VI.

## 2.4 Анализ

2-1 Приведите передаточные характеристики по напряжению для всех трех моделируемых конфигураций, укажите выбранное вами напряжение смещения и область относительной линейности.

2-2 Чему равна крутизна каждого из усилителей в линейной области? Учитывая взаимосвязь этой крутизны и усиления сигнала, на какой топологии вы остановите выбор, если вам нужен конкретный коэффициент усиления?

2-3 Приведите скриншоты передаточных характеристик реальных усилителей. Как соотносятся напряжение смещения и линейная область реальных и модулируемых усилителей?

2-4 Приведите скриншоты сигналов, полученные в п. 11. Заметно ли усилители искажают сигнал?

2-5 Какое влияние оказывают сопротивления истока и/или стока на коэффициент усиления каждой из конфигураций усилителя?

2-6 Исходя из вашего понимания влияния крутизны характеристики МОП-транзистора и структуры усилителя с общим истоком, как вы будете выбирать сопротивление стока для получения требуемого коэффициента усиления?

2-7 Какие ограничения на амплитуду входного сигнала и коэффициент усиления усилителя вы определили при выполнении п.п. 14 и 19? Как вы считаете, какие факторы главным образом влияют на эти ограничения?

2-8 Зачем нужна емкостная развязка на входе усилителя с общим затвором? Чем это отличается от схемы смещения входного сигнала усилителя, которую вы обычно применяли? Почему напряжение на затворе должно быть больше  $V_{SS}$ , чтобы эта конфигурация работала?

## Раздел 3: Усилители на биполярных транзисторах

### 3.1 Сведения из теории

#### Сравнение биполярных и МОП-транзисторов

Поскольку основы теории, описывающей функционирование усилителя на биполярных транзисторах, по существу такая же, как уже рассмотренная теория усилителя на МОП-транзисторах, мы опустим подробный анализ передаточных характеристик и сосредоточимся на влияющих на процесс проектирования факторах, которые различны для этих двух типов транзисторов.

В то время как входное сопротивление МОП-транзистора практически бесконечно в большинстве приложений, биполярный транзистор активируется током, протекающим через базу. Это значит, что или источник сигнала должен предоставлять достаточный ток, или, если вход изолирован разделительным конденсатором, это должна делать схема смещения, чтобы не разряжать разделительный конденсатор и не ослаблять входной сигнал.

Второе значительное отличие заключается в том, что у большинства МОП-транзисторов сравнительно мало переменных, влияющих на их функциональность, в основном ограниченных физическим размером канала. Напротив, в физической конструкции биполярных транзисторов имеется ряд переменных, которые могут значительно повлиять на вольтамперную характеристику, и, следовательно, могут повлиять на работу транзистора в качестве компонента усилителя или логического ключа.

#### Конфигурации усилителя на биполярных транзисторах

Эти конфигурации покажутся вам очень знакомыми, если вы работали с усилителями на МОП-транзисторах. В общих чертах, каждая конфигурация усилителя на биполярных транзисторах очень похожа на аналогичную на основе МОП-транзистора, и большая часть различий сводится к методам смещения входных сигналов.

Три основных типа усилителей на биполярных транзисторах показаны на рисунке 3-1:

- (a) С общим эмиттером
- (b) С общим коллектором
- (c) С общей базой

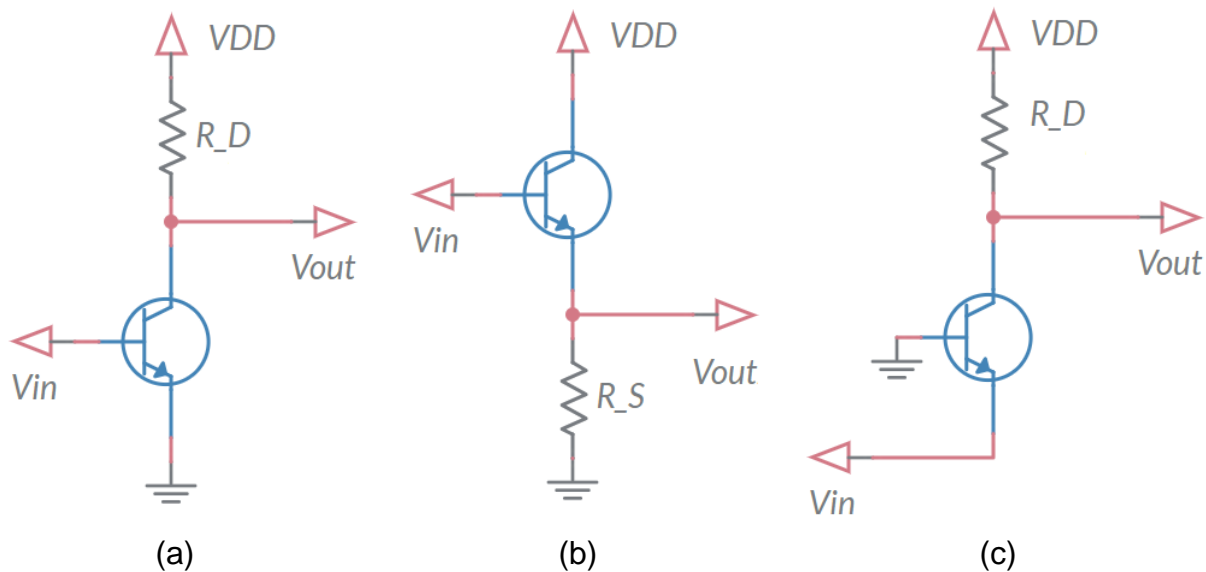


Рисунок 3-1: Конфигурации усилителей на биполярных транзисторах

Как и с усилителями на МОП-транзисторах, для которых наиболее распространена конфигурация с общим истоком, в большинстве приложений с усилителями на биполярных транзисторах используется конфигурация с *общим эмиттером*. Она позволяет получить высокие коэффициенты усиления, и для нее относительно просто настроить смещение. Схема с общим коллектором функционально похожа на схему с общим стоком. Она выдает буферизованное напряжение, практически совпадающее со входным напряжением, и поэтому эту схему часто называют "эмиттерным повторителем". И, наконец, схема с общей базой, как правило, используется в тех случаях, когда требуется высокое выходное сопротивление; однако ее недостаток – крайне низкое входное сопротивление, которое может привести к перегрузке источника сигнала.

### Схемы смещения

Более подробно мы рассмотрим применение схем смещения в лабораторной работе 4, а пока сосредоточимся на двух простейших решениях задачи правильного смещения входного сигнала.

Первое решение (которое мы продемонстрируем в этой лабораторной работе) – использовать делитель напряжения, соединенный с источником входного сигнала через разделительный конденсатор. Сопротивления коллектора и эмиттера потребуются для ограничения тока, добавляемого схемой смещения к току коллектора.

Второй вариант – использовать резистор обратной связи между коллектором и базой транзистора. Преимущество отрицательной обратной связи между выходным напряжением и напряжением смещения заключается в увеличении

стабильности смещения при изменении коэффициента усиления или температуры, которые могут повлиять на ток эмиттера.

## 3.2 Моделирование

Прежде чем экспериментировать с реальными компонентами мы промоделируем идеализированные усилители разных топологий.

1. Откройте в Multisim новую схему и добавьте биполярный транзистор n-p-n типа BC847.
2. Создайте схему усилителя с общим эмиттером, показанную на рисунке 3-1.
3. Добавьте источник напряжения постоянного тока для управления напряжением базы  $V_{in}$ , установите  $R_E$  равным 5 кОм и подключите к цепи VDD напряжение 15 В постоянного тока.
4. Установите режим развертки напряжения постоянного тока (DC sweep) и настройте  $V_{in}$  на изменение в диапазоне от 0 до 10 В с шагом 0,01 В.
5. Добавьте прибор для измерения напряжения  $V_{out}$ .
6. Запустите моделирование и сохраните результаты.
7. Настройте максимальное и минимальное напряжение развертки таким образом, чтобы захватывать только активную область рабочего тока биполярного транзистора и сделайте скриншот получившейся кривой.
8. Выберите наиболее линейную область характеристики и запишите значение напряжения идеального смещения (точка в середине линейной области), полный рабочий диапазон и крутизну характеристики в этой области.
9. Повторите эксперимент для усилителя с общим коллектором, показанным на рисунке 3-3.
10. Еще раз повторите эксперимент – для усилителя с общей базой. Обратите внимание, что для такой конфигурации потребуется отрицательное напряжение смещения, и настройте диапазон развертки соответствующим образом.

## 3.3 Эксперименты с реальными компонентами

В этом разделе работы мы получим передаточные характеристики по напряжению реальных усилителей на биполярном транзисторе, установленном на плате TI Analog Electronics.

1. Убедитесь, что светодиоды на NI ELVIS III горят и мигают так, как следует. Если это не так, обратитесь к лаборанту, запустите приложение TI Analog Electronics Quick Start или обратитесь к разделу Развертывание программного обеспечения Руководства пользователя.
2. Из папки с программным обеспечением лабораторного практикума запустите **Lab2\_Implementation.exe** и убедитесь, что светодиод “Status” платы Analog Electronics горит.

3. Подключите выходы функционального генератора ELVIS III ко входам CH1 и CH2 платы.
4. Подключите пробники осциллографа к **TP22** и **TP23**.

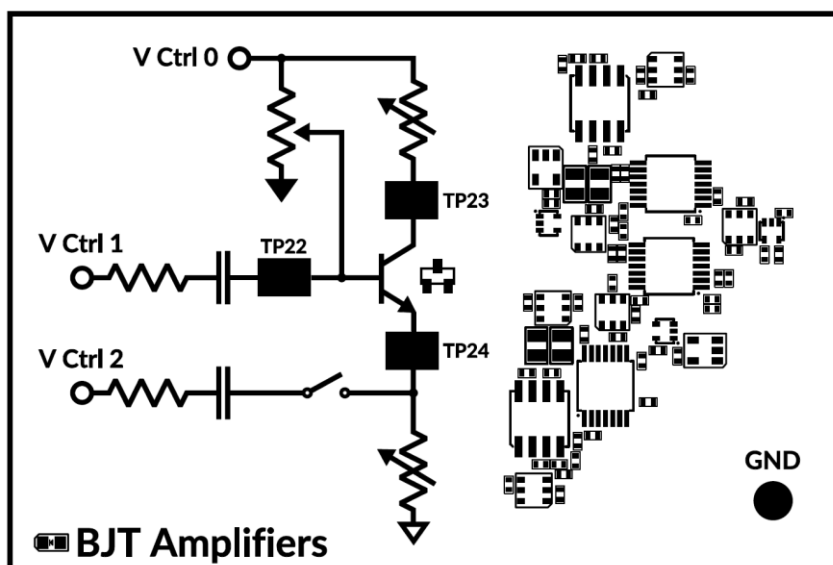


Рисунок 3-2: Раздел усилителей на биполярных транзисторах с соответствующими контрольными точками

5. Щелкните по стрелке запуска VI и убедитесь, что светодиод "Status" горит.
6. Выберите усилитель *BJT Amplifier* из списка **Active Section**. Светодиод в разделе BJT Amplifiers должен загореться.
7. Установите сопротивление коллектора равным 5 кОм, а сопротивление эмиттера равным 0 Ом.
8. Установите канал 1 функционального генератора на формирование синусоиды частотой 1 кГц и амплитудой 100 мВп-п.
9. Изменяйте сопротивление потенциометра, используемого для смещения сигнала, и наблюдайте, как это влияет на входной и выходной сигналы. Запишите напряжения смещения, при котором сигнал начал искажаться. Сделайте скриншоты искаженных сигналов.
10. Сделайте скриншот неискаженного выходного напряжения в точке **TP23**.
11. Изменяйте сопротивление коллектора и запишите, как это повлияло на выходной сигнал.
12. Добавьте сопротивление между эмиттером и землей. Обратите внимание на то, как это повлияло на смещение и коэффициент усиления усилителя.
13. Повторите п.п. 6-11, задав сопротивление коллектора равным 0 В, а сопротивление эмиттера – 5 кОм. Теперь выходное напряжение следует измерять в точке **TP24**.
14. Задайте в канале 1 функционального генератора уровень 5 В постоянного тока (амплитудой 0 В) и активируйте канал 2 генератора, установив на нем такую же синусоиду частотой 1 кГц и амплитудой 100 мВп-п, что ранее было в канале 1.
15. Установите сопротивления коллектора и эмиттера равными 5 кОм.

16. Соедините ключом точку  $V_{ctrl2}$  с выводом эмиттера.
17. Повторите п.п. 7-11 при этой конфигурации. Теперь входной сигнал можно измерить в точке **TP24**, а выходной - в точке **TP23**.
18. Поэкспериментируйте с различными значениями сопротивлений эмиттера и коллектора. Запишите влияние этих сопротивлений на работу усилителя.
19. Щелкните по кнопке **Stop** для останова VI.

### 3.4 Анализ

3-1 Приведите передаточные характеристики по напряжению для всех трех моделируемых конфигураций, укажите выбранное вами напряжение смещения и область относительной линейности.

3-2 Чему равна крутизна в линейной области для каждого усилителя? Учитывая взаимосвязь этой крутизны и усиления сигнала, на какой топологии вы остановите выбор, если вам нужен конкретный коэффициент усиления?

3-3 Как схема смещения повлияла на выходной сигнал усилителей с общим эмиттером и общим коллектором? В каком диапазоне напряжений смещения способны были работать эти усилители?

3-4 Опишите искажения, наблюдаемые вами на границах диапазона усиления. Как вы считаете, почему сигнал исказился подобным образом?

3-5 Какое влияние оказывают сопротивления эмиттера и/или коллектора на коэффициент усиления для каждой из конфигураций усилителя?

3-6 Как добавление сопротивления эмиттера изменило функциональность схемы смещения? Оказало ли это влияние на коэффициент усиления?

3-7 Как процесс смещения усилителя с общей базой отличается от процесса смещения двух других конфигураций?

3-8 Зачем нужна емкостная развязка на входе усилителей? Что произойдет, если входной сигнал напрямую подать на усилитель?