

Министерство образования и науки Республики Казахстан

Костанайский государственный университет им. А.Байтурсынова

Кафедра электроэнергетики и физики

В.М. Поезжалов  
Ю.П. Мартынюк

## **ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ И СХЕМОТЕХНИКИ**

Учебно-методическое пособие

Костанай, 2016

**ББК 32.85**  
**П 45**

**Рецензенты:**

Джаманбалин Кадыргали Коныспаевич, доктор физико-математических наук, профессор КСТУ им. З. Алдамжар

Кошкин Игорь Владимирович, кандидат технических наук, зав. кафедрой электроэнергетики и физики

Шаяхметов Амангельды Булатович, кандидат технических наук, зав. кафедрой машиностроения

**Авторы:**

Поезжалов Владимир Михайлович, кандидат физико-математических наук, профессор

Мартынюк Юрий Петрович, магистр физики, преподаватель

П 45 Поезжалов В.М., Мартынюк Ю.П.

Основы электроники и схемотехники. Учебно-методическое пособие по специальности 5В060400-Физика – Костанай, 2016. - 62 с.

ISBN 978-601-7481-79-7

В учебно-методическое пособие включены основные сведения об радиоэлектронных компонентах, основных узлах аналоговой и цифровой техники. Особое внимание уделено вопросам расчета режимов радиоэлектронных устройств, приведен подробный вывод основных формул с пояснениями, в пособие включены принципиальные схемы рассматриваемых электронных устройств, рассмотрен их принцип действия.

Предназначено для студентов специальности 5В060400-Физика. Пособие может быть использовано преподавателями высших учебных заведений при проведении занятий по дисциплине «Основы электроники и схемотехники», а также студентами при подготовке к учебным занятиям.

ББК 32.85  
П 45

Утверждено и рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом Костанайского государственного университета им. А. Байтурсынова, 28.04.2016 г, протокол № 3.

ISBN 978-601-7481-79-7

© Поезжалов В.М., Мартынюк Ю.П. 2016

## Содержание

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                            | 4  |
| 1 Условные графические обозначения радиоэлементов.....   | 5  |
| 2 Источники питания.....                                 | 10 |
| 2.1 Классификация источников питания.....                | 10 |
| 2.2 Схемотехника вторичных источников питания.....       | 10 |
| 2.3 Выпрямители.....                                     | 11 |
| 2.4 Сглаживающие фильтры.....                            | 13 |
| 2.5 Стабилизаторы напряжения.....                        | 17 |
| 3 Электронные усилители.....                             | 19 |
| 3.1 Усилители на биполярных транзисторах.....            | 19 |
| 3.2 Дифференциальные и операционные усилители.....       | 28 |
| 3.3 Применение операционных усилителей.....              | 35 |
| 4 Генераторы сигналов.....                               | 45 |
| 4.1 Основные виды сигналов.....                          | 45 |
| 4.2 LC-генератор с трансформаторной обратной связью..... | 48 |
| 4.3 Генератор на основе моста Вина-Робинсона.....        | 49 |
| 4.4 Мультивибратор.....                                  | 50 |
| 4.5 Функциональный генератор.....                        | 51 |
| 5 Устройства цифровой техники.....                       | 52 |
| 5.1 Логические элементы.....                             | 52 |
| 5.2 Логические устройства последовательного типа.....    | 56 |
| Заключение.....                                          | 61 |
| Список использованных источников.....                    | 62 |

## Введение

Широкое применение радиоэлектроники в быту, науке и технике и огромный интерес, проявляемый учащимися к радиосхемам, требует достаточно глубокой подготовки будущего специалиста - физика в области радиотехники.

Современная радиоэлектроника - это собирательное название ряда областей науки и техники, связанных с генерацией, передачей, приемом и преобразованием, хранением информации [1]. Основные из них - радиотехника и электроника, сюда же можно включить опто- и микроэлектронику и функциональную микроэлектронику, использующие в качестве носителя информации многомерный сигнал. Радиоэлектроника не ограничивается электромагнитными колебаниями радиодиапазона. Используются и более короткие волны вплоть до гамма - диапазона, то есть радиоэлектроника стала также всеволновой. Основная задача, решаемая с помощью устройств радиоэлектроники - разработка методов и устройств передачи, приема, обработки и хранения информации, передаваемое с помощью условных сигналов. Информационный процесс протекает как передача, преобразование и хранение сигналов. Информационная направленность радиоэлектроники послужило базой для возникновения новых направлений науки и техники, в частности технической кибернетики, вычислительной и информационной техники.

С другой стороны, несмотря на крайне широкое применение электронных устройств, обучающиеся часто сталкиваются с различными проблемами в изучении теоретического материала. Не в последнюю очередь это связано с недостаточно подробным освещением этих вопросов в специализированной литературе. Ликвидировать данные недостатки и призвано предлагаемое учебно-методическое пособие.

**Целью** данного пособия является помощь в освоении и систематизации знаний в области теории и принципов функционирования, а также – расчетов основных узлов электронных устройств.

**Задачи:** способствовать освоению теоретического материала, научить студентов читать схемы электронных устройств, различать основные виды электрических сигналов, рассчитывать усилительные и генераторные схемы, схемы источников питания, познакомить студентов с основами цифровой техники.

## 1 Условные графические обозначения радиоэлементов

Резистор — это пассивный элемент электрических цепей, обладающий определенным постоянным или переменным значением электрического сопротивления, предназначенный для линейного преобразования тока в напряжение и напряжения в ток, ограничения тока, поглощения электрической энергии. Резисторы являются наиболее распространенными элементами электронных устройств. Условное графическое обозначение резистора приведено на рисунке 1.



Рисунок 1 - Условное обозначение резистора

Это обозначение может дополняться различными элементами (например, штрихами внутри прямоугольника, обозначающими максимально возможную рассеиваемую мощность резистора). Основными параметрами резистора являются сопротивление постоянному току, максимальная рассеиваемая мощность, максимальное допустимое напряжение. Промышленностью выпускаются резисторы с сопротивлением от сотых долей ома до сотен гигаом, рассчитанные на рассеиваемую мощность от долей ватта до единиц мегаватт (например, тормозные резисторы тепловозов и электровозов).

Вторым по распространенности элементом радиоэлектронных устройств являются конденсаторы. Конденсатор - это двухполюсник с определенным постоянным или переменным значением электрической емкости и малой проводимостью (большим сопротивлением постоянному току), предназначенный для накопления заряда и энергии электрического поля. Конденсатор является пассивным электронным компонентом. В простейшем варианте конструкция состоит из двух электродов в форме пластин, называемых обкладками, разделённых диэлектриком, толщина которого мала по сравнению с размерами обкладок. Практически применяемые конденсаторы имеют много слоёв диэлектрика и многослойные электроды, или ленты чередующихся диэлектрика и электродов, свёрнутые в цилиндр или параллелепипед со скруглёнными четырьмя рёбрами (из-за намотки). Условное графическое обозначение конденсатора приведено на рисунке 2.

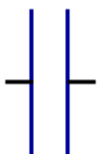


Рисунок 2 - Условное обозначение конденсатора

Конденсаторы традиционной конструкции используют в качестве диэлектрика различные органические материалы (бумагу, политетрафторэтилен, лавсан, полипропилен), неорганические (слюда, керамику), также существуют конденсаторы с вакуумным диэлектриком. В силу достаточно малой диэлектрической проницаемости традиционных материалов практически оказывается очень трудным изготовление конденсаторов большой емкости (более десятков микрофарад), имеющих при этом приемлемые массогабаритные показатели. Поэтому были разработаны так называемые оксидные конденсаторы, в качестве диэлектрика в которых используется тонкий слой оксида алюминия на поверхности алюминия, находящийся в контакте с бумажной прокладкой, пропитанной раствором кислоты. Такие конденсаторы имеют очень большую емкость, достигающую единиц фарад. Однако, они требуют наличия постоянного поляризующего напряжения для нормальной работы, причем, определенной полярности. Поэтому полярность напряжения, при которой обеспечивается нормальная работа оксидного конденсатора нашла отражение в его условном графическом обозначении (знак «+»), приведенном на рисунке 3.

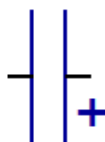
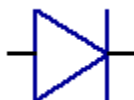


Рисунок 3 - Условное обозначение оксидного конденсатора

Оксидные конденсаторы также называются полярными или электролитическими. Следует отметить, что при приложении к оксидному конденсатору напряжения противоположной полярности происходит разрушение оксидного диэлектрика, иногда сопровождающееся разгерметизацией его корпуса взрывного характера.

Важнейшим и наиболее часто используемым полупроводниковым прибором является диод. Диод в наиболее общем случае - это электронный элемент, обладающий различной проводимостью в зависимости от направления электрического тока. Электроды диода носят названия анод и катод. Если к диоду приложено прямое напряжение (то есть, анод имеет положительный потенциал относительно катода), то диод открыт (через него течёт прямой ток, он имеет малое сопротивление). Напротив, если к диоду приложено обратное напряжение (катод имеет положительный потенциал относительно анода), то диод закрыт (его сопротивление велико, обратный ток мал, и может считаться равным нулю во многих случаях). Условное графическое обозначение полупроводникового диода приведено на рисунке 4.



#### Рисунок 4 - Условное обозначение полупроводникового диода

Особым видом полупроводниковых диодов являются стабилитроны. Полупроводниковый стабилитрон -это полупроводниковый диод, работающий при обратном смещении в режиме пробоя. До наступления пробоя через стабилитрон протекают незначительные токи утечки, а его сопротивление весьма высоко. При наступлении пробоя ток через стабилитрон резко возрастает, а его дифференциальное сопротивление падает до величины, составляющей для различных приборов от долей ома до сотен ом. Поэтому в режиме пробоя напряжение на стабилитроне поддерживается с заданной точностью в широком диапазоне обратных токов. Основное назначение стабилитронов — стабилизация напряжения. Условное графическое обозначение стабилитрона приведено на рисунке 5.

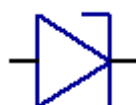


Рисунок 5 - Условное обозначение стабилитрона

В устройствах индикации и освещения широко применяются светодиоды. Светодиод или светоизлучающий диод -это полупроводниковый прибор с электронно-дырочным переходом, создающий оптическое излучение при пропускании через него электрического тока в прямом направлении. Излучаемый светодиодом свет лежит в узком диапазоне спектра. Диапазон и длина волны излучения светодиода зависят от физических свойств использованных полупроводников, например, от ширины запрещенной зоны. Условное графическое обозначение светодиода приедено на рисунке 6.

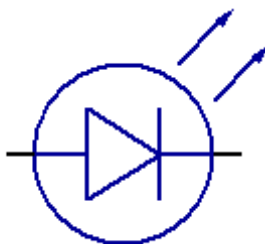


Рисунок 6 - Условное обозначение светоизлучающего диода

Обозначение светодиода состоит из обозначения полупроводникового диода, дополненного символом корпуса в форме круга и стрелками – символом оптического излучения.

Основным активным элементом электронных устройств является транзистор. Транзистор - это радиоэлектронный компонент из полупроводникового материала, обычно с тремя выводами, позволяющий входным сигналом управлять током в электрической цепи. Обычно используется для усиления, генерации и преобразования электрических сигналов. Транзисторы подразделяются на биполярные – в работе которых

участвуют оба типа носителей заряда – как электроны, так и дырки и полевые (или униполярные), в работе которых основным является только один вид носителей заряда, а управление сило протекающего через прибор тока осуществляется при помощи электрического поля. На рисунке 7 показано условное графическое обозначение биполярного транзистора структуры n-p-n.

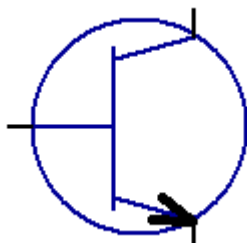


Рисунок 7 - Условное обозначение биполярного транзистора структуры n-p-n

Наряду с транзисторами структуры n-p-n используются (хотя и значительно реже) транзисторы структуры p-n-p. Условное графическое обозначение такого транзистора показано на рисунке 8.

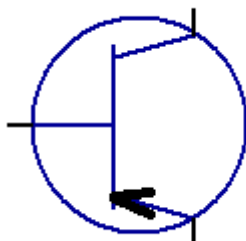


Рисунок 8 - Условное обозначение биполярного транзистора структуры p-n-p

Наиболее распространенным в высокочастотных и усилительных устройствах видом полевых транзисторов является канальный полевой транзистор. Условное графическое обозначение полевого транзистора с каналом p-типа показано на рисунке 9.

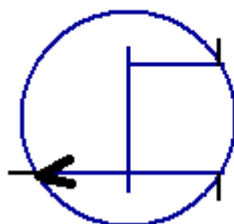


Рисунок 9 - Условное обозначение полевого транзистора с каналом p-типа

Также выпускаются полевые транзисторы с каналом n-типа. Обозначение такого транзистора показано на рисунке 10.

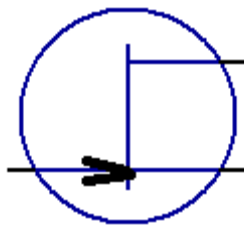


Рисунок 10 - Условное обозначение полевого транзистора с каналом n-типа

Для включения и выключения питания и переключения различных режимов радиоэлектронных устройств применяют выключатели и переключатели различной конструкции. Выключатель - это коммутационный аппарат, имеющий как минимум два фиксированных положения своих контактов («включено» и «отключено») и способный изменить это положение под действием внешних сил на другое положение контактов («включено» или «отключено»). Условное графическое обозначение переключателя показано на рисунке 11.



Рисунок 11 – Условное обозначение переключающего контакта

## 2 Источники питания

### 2.1 Классификация источников питания

Работа большинства электронных устройств заключается в преобразовании или получении различных сигналов с использованием энергии, потребляемой от источника питания.

Источником питания называют устройство, предназначенное для подачи электрического питания на устройства электронной техники.

Источники питания принято разделять на первичные и вторичные.

*Первичные источники питания* преобразуют в электрическую энергию другие ее виды: тепловую, химическую, механическую и т.д.

*Вторичные источники питания* предназначены для преобразования различных форм электрической энергии между собой. Они могут повышать или понижать напряжение, изменять частоту тока, преобразовывать переменный ток в постоянный, стабилизировать напряжение.

На практике первичные источники питания используют лишь в тех случаях, когда устройство невозможно или небезопасно подключать к электрической сети (в основном – в переносных устройствах). В большинстве случаев предпочитают использовать вторичные источники, которые преобразуют напряжение стандартной электрической сети переменного тока в требуемое для заданного электронного устройства.

подавляющее большинство электронных устройств требует для питания постоянное напряжение, причем, значительно меньшее, чем номинальное напряжение электрической сети – 220В. Так, например, устройства на цифровых микросхемах обычно используют напряжение питания 3,3-5В, устройства аналоговой электроники – 9-12В, реже – до 50 В (например, мощные усилители низкой частоты). Кроме того, часто к питающему напряжению предъявляются некоторые дополнительные требования: стабильность (неизменность с течением времени, независимость от потребляемого нагрузкой тока), определенное напряжение пульсаций (переменного тока, наложенного на постоянный).

### 2.2 Схемотехника вторичных источников питания

Вторичные источники питания состоят из нескольких узлов, каждый из которых выполняет свою функцию. Рассмотрим структурную схему трансформаторного источника питания (она представлена на рисунке 12).

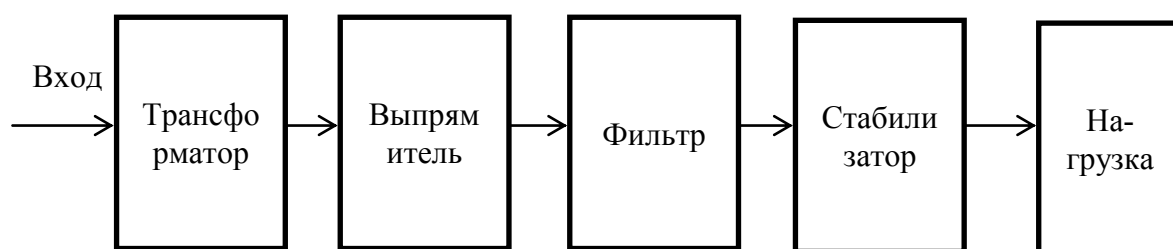


Рисунок 12 – Структурная схема трансформаторного источника питания

На вход источника питания подается переменное напряжение электрической сети. Трансформатор служит для понижения напряжения до необходимой величины (реже используются повышающие трансформаторы – в тех случаях, когда требуется получить напряжение больше сетевого). Выпрямитель преобразует переменное напряжение, снимаемое со вторичной обмотки трансформатора в пульсирующее, фильтр (обычно выполненный на основе конденсатора) сглаживает пульсации выпрямленного напряжения. Затем полученное постоянное напряжение поступает на необязательный узел – стабилизатор, который необходим только тогда, когда нагрузка чувствительна к колебаниям напряжения питания.

## 2.3 Выпрямители

Выпрямителем называется устройство для преобразования переменного тока в постоянный или пульсирующий. Большинство выпрямителей в современной электронике выполнено на основе полупроводниковых диодов различных типов. Самым простым типом выпрямителя является однополупериодный выпрямитель. Он содержит всего один диод. Схема такого выпрямителя показана на рисунке 13.

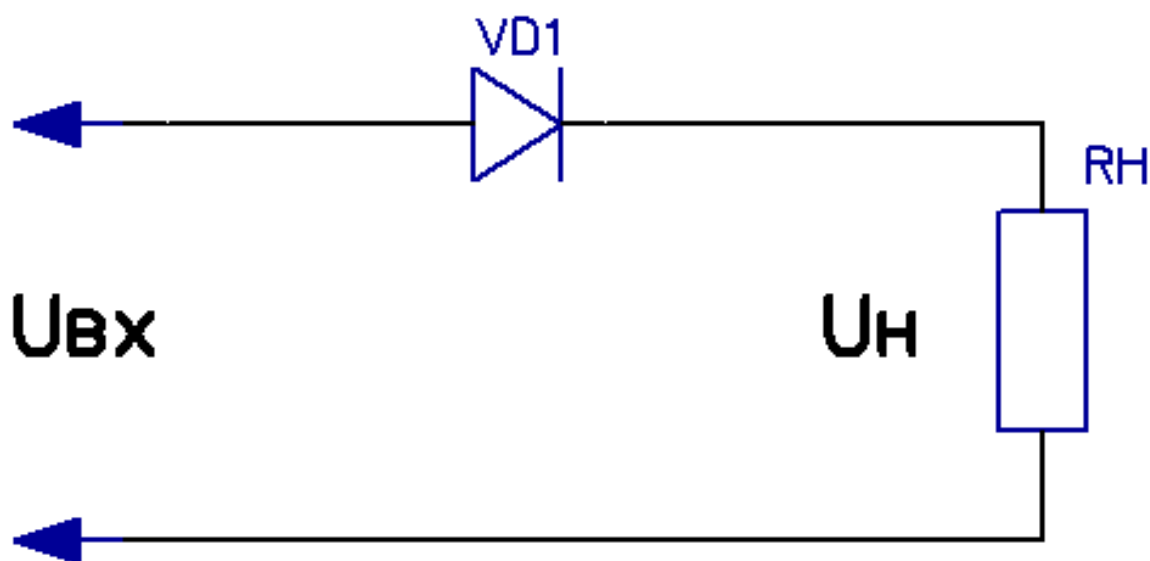


Рисунок 13 – Принципиальная схема однополупериодного выпрямителя.

Работа однополупериодного выпрямителя заключается в следующем: Когда верхняя (по схеме) входная клемма положительна, а нижняя – отрицательна, диод  $VD1$  открыт, так как его анод более положителен, чем катод. При этом напряжение со входа свободно проходит на нагрузку. При перемене полярности входного напряжения диод закрывается и не пропускает отрицательные полупериоды входного напряжения в нагрузку. Таким образом, на верхний (по схеме) вывод нагрузки всегда поступает положительный потенциал.

Работу данного выпрямителя иллюстрирует график, показанный на рисунке 14.

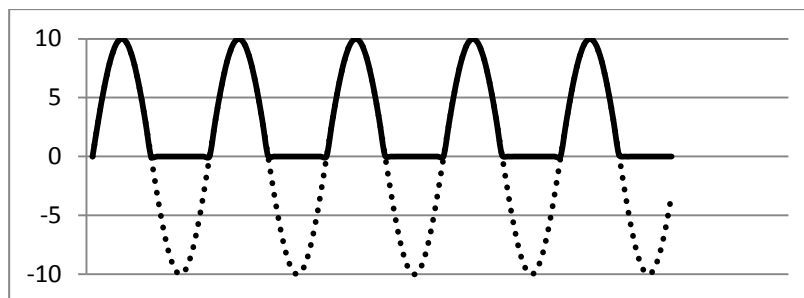


Рисунок 14 – Работа однополупериодного выпрямителя

Пунктирной линией показано входное переменное напряжение, сплошной – выходное. Как видно, в нагрузку проходят только положительные полупериоды переменного напряжения, это и является основным недостатком выпрямителя такого типа: полезную работу совершает лишь каждый второй полупериод переменного напряжения. Это ведет к тому, что приходится использовать трансформатор большей мощности, чем это необходимо, кроме того, постоянный ток нагрузки, проходя по вторичной обмотке трансформатора, вызывает подмагничивание магнитопровода, что снижает эффективность трансформатора, вызывая излишний нагрев. Тем не менее, однополупериодный выпрямитель очень прост и применяется там, где нагрузка потребляет незначительную мощность. Кроме того, он используется в современных импульсных источниках питания, так как форма тока во вторичной обмотке трансформатора в таких источниках несимметрична: неиспользуемые полупериоды имеют гораздо меньшую амплитуду (за счет большей длительности), поэтому их использования для питания нагрузки не имеет смысла. К сожалению, ограниченный объем данного учебного пособия не позволяет рассмотреть этот тип источников питания, более подробно импульсные источники питания описаны в [2].

Для устранения рассмотренных недостатков были разработаны двухполупериодные выпрямители. Наиболее распространенным их вариантом является выпрямитель, собранный по мостовой схеме, показанный на рисунке 15.

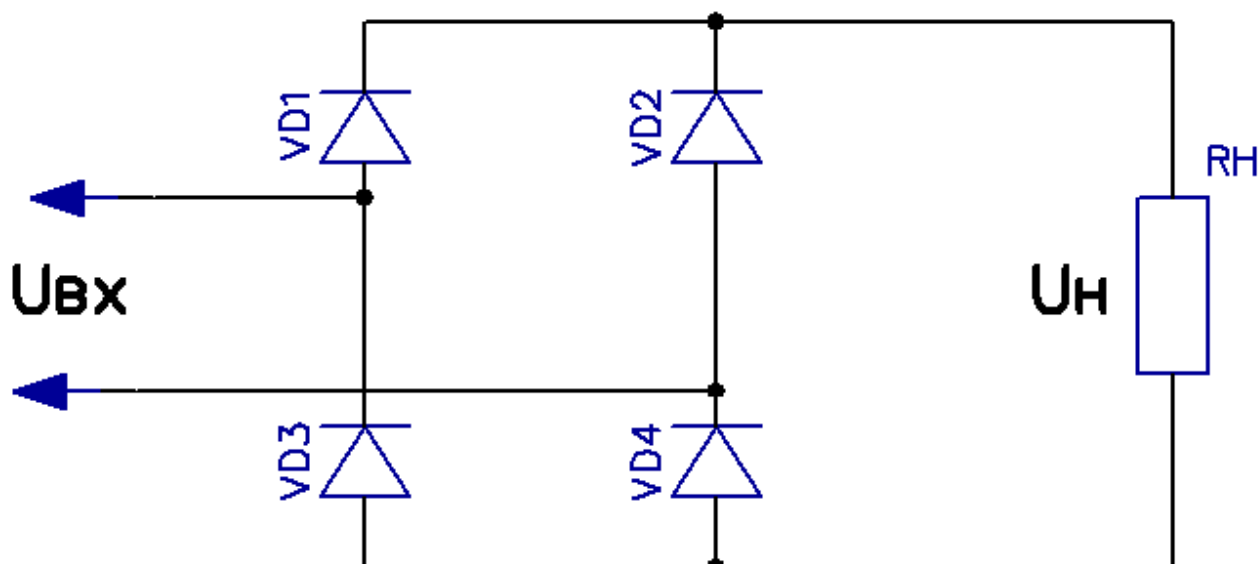


Рисунок 15 – Принципиальная схема двухполупериодного выпрямителя.

Как видно, он состоит из четырех диодов. Работа однополупериодного выпрямителя заключается в следующем: Когда верхняя (по схеме) входная клемма положительна, а нижняя – отрицательна, открыты диоды VD1 и VD4. Положительный полюс входного напряжения поступает через открытый диод VD1 на верхний (по схеме) вывод нагрузки, а отрицательный – через диод VD4 – на нижний. Диоды VD2 и VD3 закрыты и не оказывают влияния на работу схемы.

Когда верхняя (по схеме) входная клемма отрицательна, а нижняя – положительна, открыты диоды VD2 и VD3. Положительный полюс входного напряжения поступает через открытый диод VD2 на верхний (по схеме) вывод нагрузки, а отрицательный – через диод VD3 – на нижний. Диоды VD1 и VD4 закрыты и не оказывают влияния на работу схемы.

Таким образом, какова бы ни была полярность входного напряжения, положительный его полюс всегда оказывается подключенным к верхнему, а отрицательный – к нижнему по схеме выводу нагрузки.

Работу такого выпрямителя можно проиллюстрировать на графике.

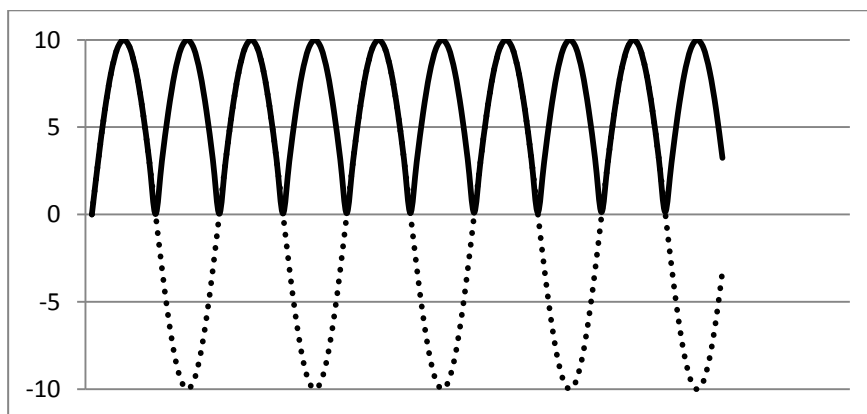


Рисунок 16 - Работа двухполупериодного выпрямителя

Пунктирной линией показано входное переменное напряжение, сплошной – выходное. Как видно, в нагрузку проходят как положительные, так и

отрицательные полупериоды входного напряжения (отрицательные полупериоды как бы «отражаются» зеркально относительно горизонтальной оси времени).

## 2.4 Сглаживающие фильтры

Несмотря на то, что двухполупериодный выпрямитель позволяет использовать оба полупериода переменного напряжения, все равно при его работе напряжение на нагрузке дважды за период становится равным нулю (такое напряжение принято называть пульсирующим). Это является серьезным недостатком и не позволяет питать электронные устройства непосредственно от выпрямителя. Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения обычно используют конденсаторные фильтры.

Конденсаторный фильтр является самым простым видом фильтра, чаще всего он состоит из одного конденсатора, включенного с нагрузкой параллельно, как в случае с однополупериодным выпрямителем показано на рисунке 17.

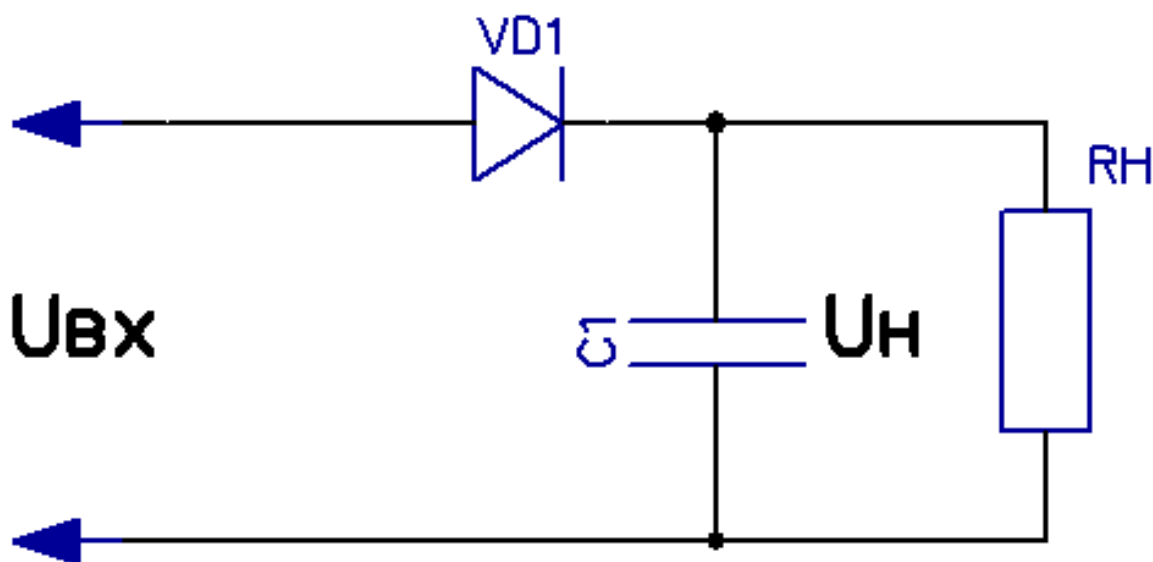


Рисунок 17 – Однополупериодный выпрямитель с фильтром

В те моменты времени, когда входное напряжение больше напряжения на конденсаторе, он заряжается, а когда напряжение на входе выпрямителя становится меньше, чем на конденсаторе, нагрузка питается от него (при этом диод закрывается, что предотвращает разряд конденсатора через обмотку трансформатора). Работа данного фильтра проиллюстрирована на рисунке 18.

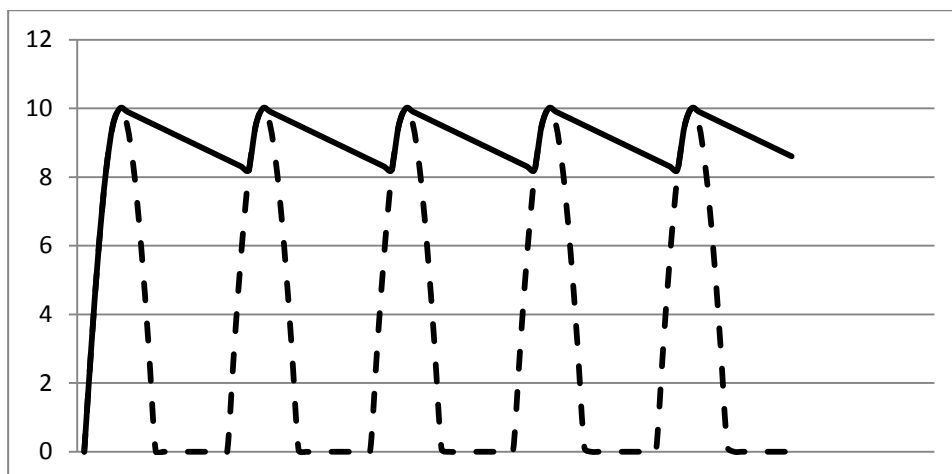


Рисунок 18 – Работа конденсаторного фильтра однополупериодного выпрямителя

На графике сплошной линией показано напряжение на нагрузке, пунктирной – выпрямленное напряжение. Легко заметить, что некоторые колебания (пульсации) напряжения на выходе выпрямителя все-таки присутствуют, однако, напряжение такой формы уже пригодно для питания электронных устройств.

Схема двухполупериодного выпрямителя с конденсаторным фильтром показана на рисунке 19.

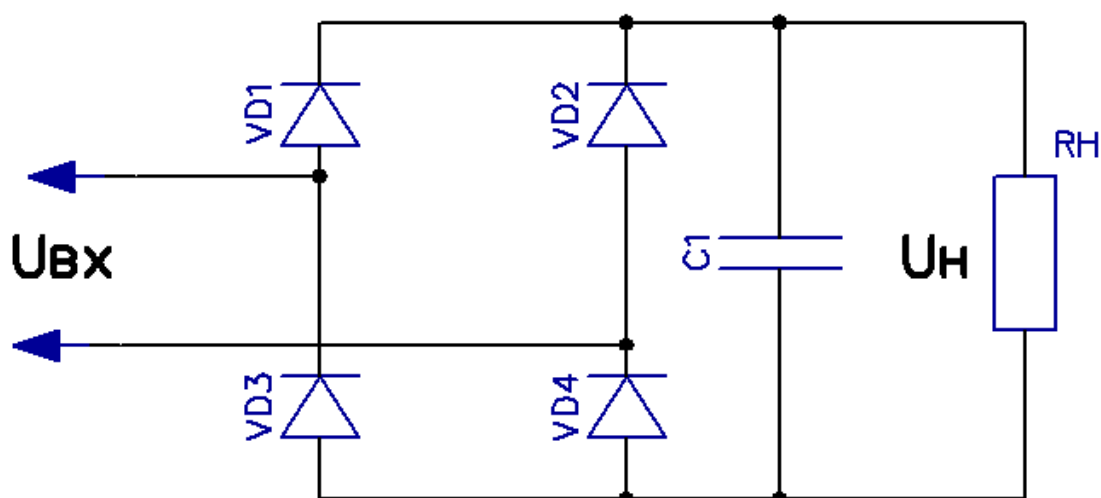


Рисунок 19 – Двухполупериодный выпрямитель с фильтром

Работа фильтра в случае двухполупериодного выпрямления проиллюстрирована на рисунке 20.

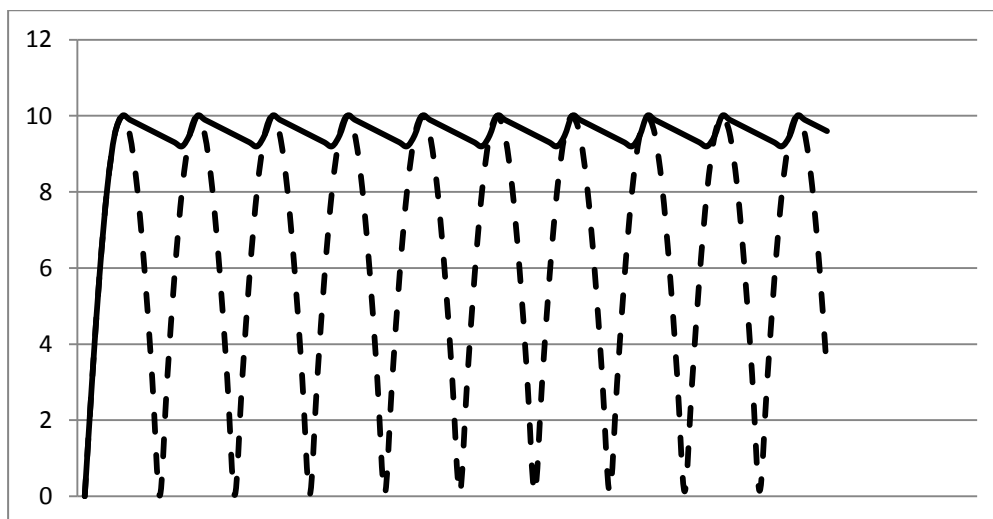


Рисунок 20 – Работа конденсаторного фильтра двухполупериодного выпрямителя

Легко заметить, что амплитуда пульсаций в случае двухполупериодного выпрямителя примерно в два раза меньше.

Одной из задач, возникающих при конструировании источников питания, является расчет конденсатора фильтра.

Для расчета зададимся следующими данными:

- $U_{\text{п}}$  - напряжение пульсаций
- $I_{\text{н}}$  – ток, потребляемый нагрузкой
- $f$  – частота переменного напряжения

Введем некоторые дополнительные переменные, показанные на рисунке 21.

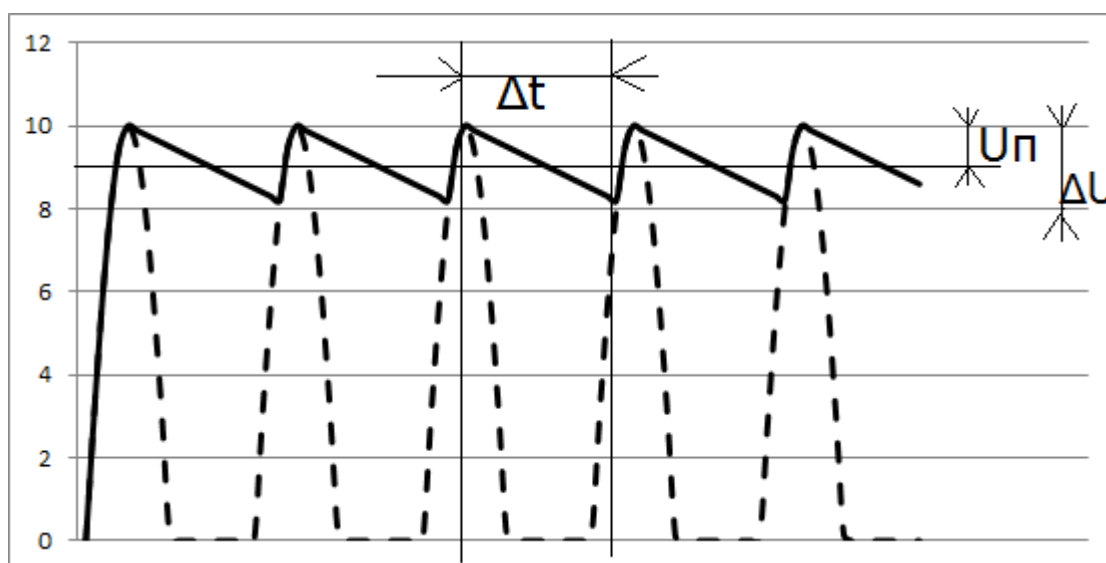


Рисунок 21 – Расчет фильтра

$\Delta U$  – это напряжение, на которое разряжается конденсатор, отдавая энергию в нагрузку. Приблизительно оно равно удвоенному напряжению пульсаций.

$$\Delta U = 2U_{\pi} \quad (1)$$

На эту величину конденсатор разряжается за время  $\Delta t$ . Это время достаточно трудно определить точно, так как для этого придется решать задачу относительно точки пересечения двух кривых. Однако, для практических расчетов можно принять это время равное длительности периода для однополупериодного выпрямителя:

$$\Delta t = \frac{1}{f} \quad (2)$$

Или длительности полупериода для двухполупериодного:

$$\Delta t = \frac{1}{2f} \quad (3)$$

Для конденсатора справедливо следующее выражение:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{\Delta q}{\Delta U} \quad (4)$$

С другой стороны, ток нагрузки и количество электричества, потребляемого ей за время  $\Delta t$  связаны следующим выражением:

$$I_{\text{н}} = \frac{q}{t} = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (5)$$

Выражая из обоих выражений  $\Delta q$  и приравнивая их, получаем:

$$C \Delta U = I_{\text{н}} \Delta t \quad (6)$$

Получаем выражение для емкости конденсатора:

$$C = \frac{I_{\text{н}} \Delta t}{\Delta U} \quad (7)$$

Для однополупериодного выпрямителя:

$$C = \frac{I_{\text{н}}}{2U_{\pi} f} \quad (8)$$

Для двухполупериодного выпрямителя:

$$C = \frac{I_H}{4U_{\Pi}f} \quad (9)$$

## 2.5 Стабилизаторы напряжения

Как уже было отмечено ранее, часто электронные устройства требуют напряжения питания, которое не зависит от таких факторов, как входное напряжение источника (напряжение сети) и ток нагрузки.

К сожалению, рассмотренные нами ранее узлы источников питания не могут обеспечить достаточной стабильности выходного напряжения.

Поэтому приходится использовать различные стабилизаторы напряжения. Одним из достаточно распространенных типов стабилизаторов является параметрический стабилизатор на основе стабилитрона.

Стабилитрон – это двухэлектродный полупроводниковый прибор, в котором обратный (зенеровский) пробой происходит при заданном напряжении, называемом напряжением стабилизации.

Вольтамперная характеристика стабилитрона показана на рисунке 22. Прямая ветвь этой характеристики такая же, как и у полупроводникового диода, а в области обратной ветви наблюдается значительное увеличение тока через стабилитрон при напряжении стабилизации за счет лавинного размножения зарядов.

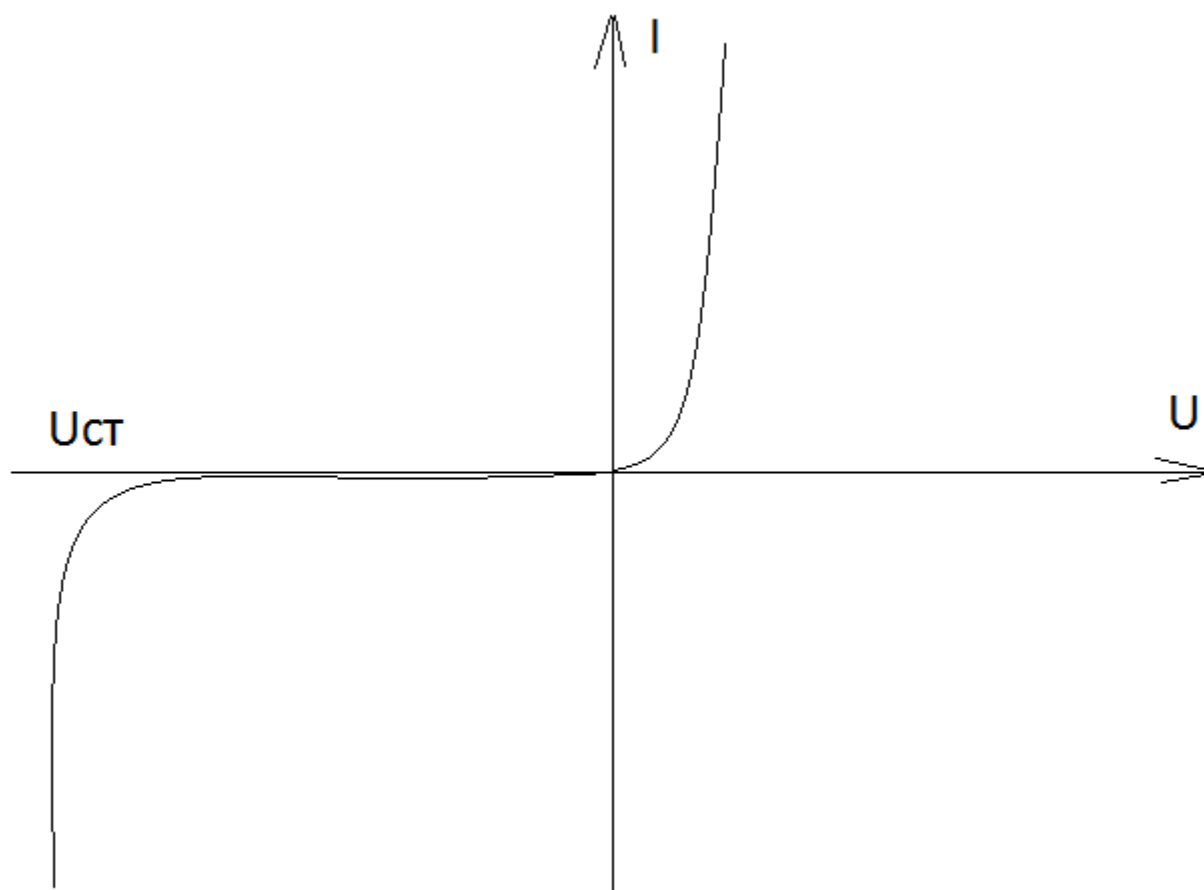


Рисунок 22 – Вольтамперная характеристика стабилитрона

При работе на участке обратного пробоя стабилитрон характеризуется большими изменениями силы тока через него при небольших изменениях напряжения на нем. Это свойство и позволяет использовать его в стабилизаторах напряжения. Схема такого стабилизатора показана на рисунке 23.

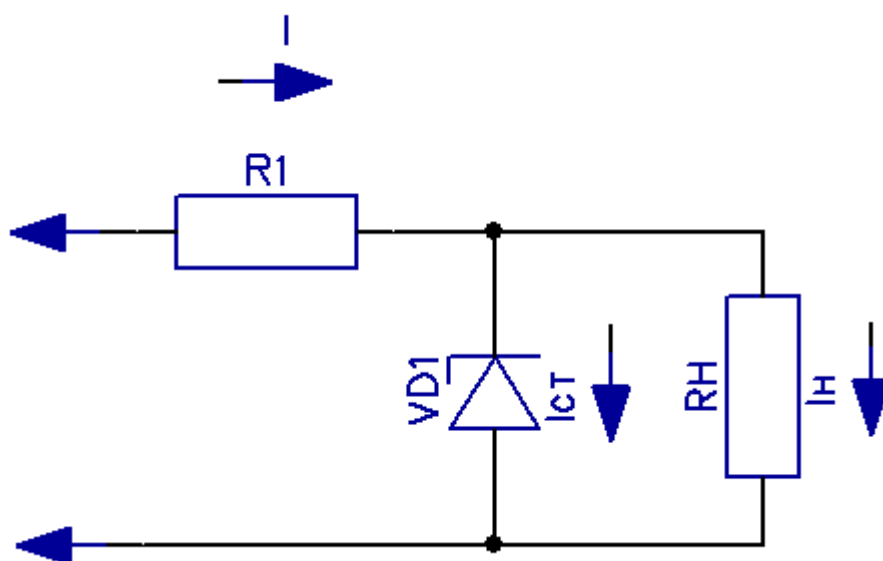


Рисунок 23 – Параметрический стабилизатор на стабилитроне

В данной схеме стабилитрон подключается параллельно нагрузке, а последовательно с ними включается резистор R1. Работу стабилизатора можно пояснить на следующем примере. Предположим, что ток нагрузки увеличился. Это вызовет увеличение падения напряжения на резисторе R1 и соответствующее уменьшение тока через стабилитрон, практически равное уменьшению тока нагрузки. Однако, напряжение на нагрузке при этом изменится лишь незначительно. При уменьшении тока, потребляемого нагрузкой, произойдет обратный процесс. Аналогично стабилизатор реагирует на изменение входного напряжения.

### 3 Электронные усилители

#### 3.1 Усилители на биполярных транзисторах

Усилением электрических сигналов принято называть увеличение их мощности за счет энергии, потребляемой от источника питания[3]. Основным элементом электронных усилителей являются транзисторы различных типов: биполярные и полевые. Схематично устройство биполярного транзистора показано на рисунке 24.

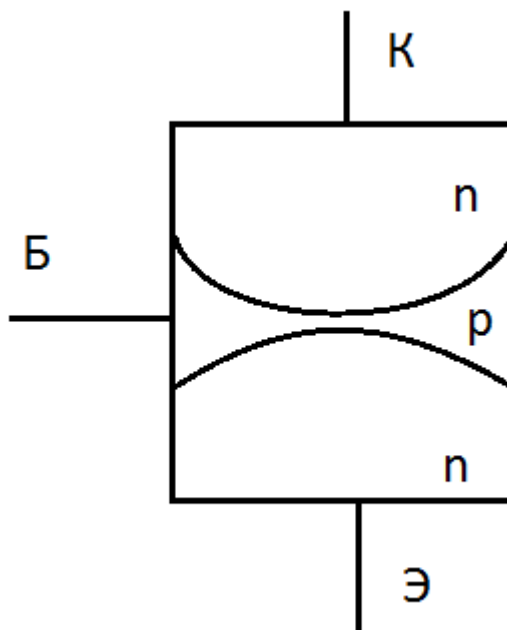


Рисунок 24 – Устройство биполярного транзистора

Он состоит из двух р-п переходов, образованных тремя слоями полупроводника р и п проводимости. К каждому из слоев полупроводника подключается вывод. Транзистор является трехэлектродным прибором. Базой называется средний слой структуры. Эмиттером называют электрод, связанный с областью полупроводника, которая инжектирует неосновные носители заряда в базу, а коллектором – связанный с оставшейся областью, которая собирает носители зарядов, прошедшие через базу.

На данном рисунке изображен транзистор структуры NPN, но существуют и широко применяются транзисторы со слоями противоположной проводимости (структуры PNP). Принцип их действия и схемы включения аналогичны транзисторам NPN за тем исключением, что направления всех токов и полярности прикладываемых к транзистору напряжений меняются на противоположные. Слой базы сделан достаточно тонким (порядка единиц-десятков микрометров) так, чтобы переходы эмиттер-база и коллектор-база перекрывались. При работе транзистора структуры NPN на коллектор подается положительный по отношению к эмиттеру потенциал (порядка единиц-десятков вольт). Учитывая, что толщина базы очень мала, в ней создается электрическое поле достаточно высокой напряженности.

Базе также сообщается небольшой положительный относительно эмиттера потенциал, который вызывает инжекцию электронов в область базы, которые являются там неосновными носителями заряда. Однако, попадая в область базы большинство электронов устремляется в область коллектора под действием электрического поля, создаваемого им. И лишь небольшая часть электронов (порядка процента) участвует в создании тока базы, рекомбинируя с дырками в ней. Эффективности процесса способствует также то, что концентрация примесей в базе делается достаточно малой.

Таким образом, наличие небольшого тока базы вызывает появление в десятки и сотни раз большего тока коллектора. На этом и основаны усилительные свойства транзистора.

В зависимости от того, открыты или закрыты коллекторный и эмиттерный переходы транзистора, выделяют четыре режима его работы: режим отечки, режим насыщения, активный и инверсный режимы.

В режиме отсечки оба перехода транзистора закрыты, сила тока через транзистор (в цепи коллектора и эмиттера) минимальна. В режиме насыщения оба перехода транзистора открыты и ток коллектора максимален. В активном режиме коллекторный переход закрыт, а эмиттерный открыт. Этот режим используется для усиления сигналов. Инверсный режим (эмиттерный переход закрыт, коллекторный – открыт) на практике не используется, так как усилительные свойства транзистора в таком режиме являются неудовлетворительными.

Биполярный транзистор может включаться в схему тремя способами: с общим эмиттером (входной сигнал прикладывается между базой и эмиттером, выходной снимается между коллектором и эмиттером), с общим коллектором (входной сигнал прикладывается между базой и коллектором, выходной снимается между коллектором и эмиттером), с общей базой (входной сигнал прикладывается между базой и эмиттером, выходной снимается между коллектором и базой).

Схема с общей базой характеризуется малым входным и высоким выходным сопротивлением, с общим коллектором – высоким входным и малым выходным сопротивлением, с общим эмиттером – малым входным и высоким выходным сопротивлением. Коэффициент усиления по напряжению схемы с общим коллектором близок к единице, зато она обладает значительным усилением по току. Схема с общей базой, наоборот, обладает коэффициентом усиления тока близким к единице, но достаточно большим коэффициентом усиления напряжения. Транзистор в схеме с общим эмиттером значительно усиливает как ток, так и напряжение[1].

Для расчета узлов электронных устройств, в состав которых входят транзисторы, приходится использовать различные их математические модели. Транзистор является нелинейным элементом цепи, тем не менее, для большинства применений можно использовать линейную модель транзистора. Используемая нами модель связывает токи коллектора, эмиттера и базы (типичное направление токов для транзистора в активном режиме показано на рисунке 25) и потенциалы базы, коллектора и эмиттера.

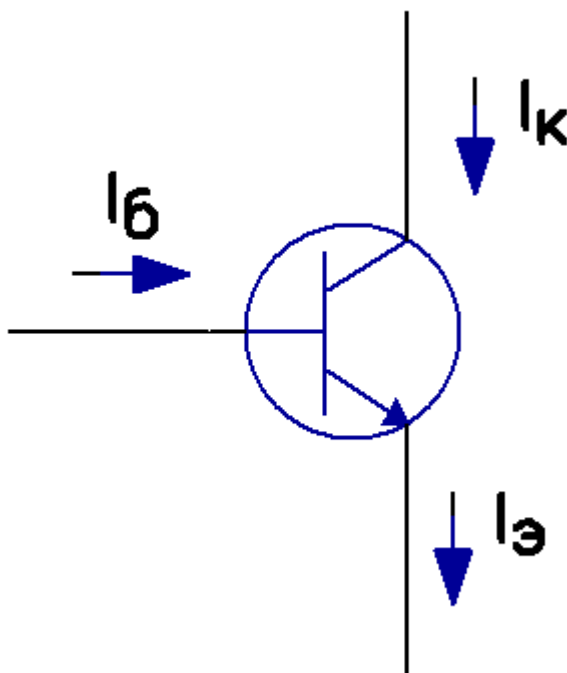


Рисунок 25 – Токи биполярного транзистора в активном режиме

Для биполярных транзисторов можно приближенно принять, что ток через эмиттерный переход начинается при определенной разности потенциалов между эмиттером и коллектором  $U_{б-э} = const$  (0,6В для кремниевых транзисторов и 0,2В для германиевых). Ток коллектора зависит от тока базы и определяется следующим соотношением:

$$I_k = I_б \beta \quad (10)$$

Где  $\beta$  – статический коэффициент передачи тока базы, который характеризует отношение изменений тока коллектора к вызвавшим их изменениям тока базы. Так как ток эмиттера представляет собой сумму токов коллектора и базы, то выражение для него будет следующим:

$$I_э = I_k + I_б = I_б(\beta + 1) \quad (11)$$

Ток базы можно связать с разностью потенциалов базы и эмиттера следующим выражением:

$$I_б = \frac{U_б - U_э - U_{б-э}}{R_э} \quad (12)$$

Где  $R_э$  – дифференциальное входное сопротивление эмиттерного перехода. Оно связано с током коллектора следующим выражением:

$$R_э = \frac{25}{I_k} \quad (I_k - \text{в мА}) \quad (13)$$

Рассмотрим работу транзистора в схеме с общим коллектором более подробно. Схема соответствующего каскада приведена на рисунке 26.

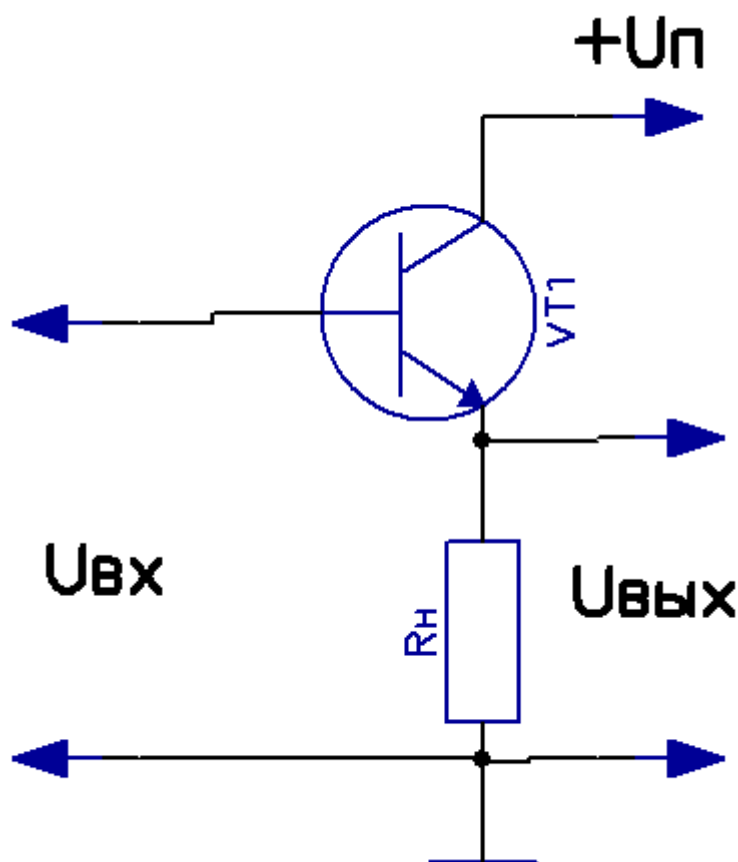


Рисунок 26 – Каскад на биполярном транзисторе с ОК

Выходное напряжение данного каскада равно потенциал эмиттера транзистора. Применяя рассмотренную ранее модель и учитывая, что  $U_6 = U_{вх}$  а  $U_3 = U_{вых}$  получаем:

$$U_{вых} = I_3 R_H = I_6 (\beta + 1) R_H = (U_{вх} - U_{вых} - U_{6э}) \frac{(\beta + 1) R_H}{R_3} \quad (14)$$

Проводя замену части выражения на коэффициент  $a$  в данном выражении, заданный формулой (15)

$$\frac{(\beta + 1) R_H}{R_3} = a \quad (15)$$

Получаем:

$$U_{вых} = (U_{вх} - U_{вых} - U_{6э}) a = a U_{вх} - a U_{вых} - a U_{6э}, \quad (16)$$

$$U_{\text{ВЫХ}}(1 + a) = aU_{\text{ВХ}} - aU_{\text{бэ}} , \quad (17)$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{a}{1+a} U_{\text{ВХ}} - \frac{a}{1+a} U_{\text{бэ}} \quad (18)$$

Учитывая, что множитель при  $U_{\text{ВХ}}$  в данном выражении стремится к единице при достаточно большом  $a$ , а так оно и бывает в большинстве практических случаев, получим итоговое выражение, связывающее входное и выходное напряжение каскада с общим коллектором:

$$U_{\text{ВЫХ}} \approx U_{\text{ВХ}} - U_{\text{бэ}} \quad (19)$$

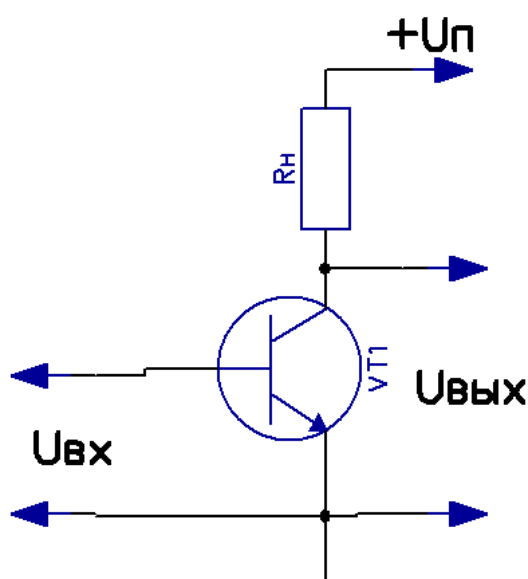
Легко заметить, что коэффициент усиления напряжения данного каскада близок к единице:

$$K_{\text{ун}} \approx 1 \quad (20)$$

С другой стороны, отношение выходного тока (тока коллектора) ко входному (току базы), уже известно нам из модели транзистора:

$$K_{\text{ут}} \approx \beta \quad (21)$$

Таким образом, каскад на биполярном транзисторе с общим коллектором не усиливает напряжение, но усиливает ток. Этим и обусловлена его область применения: усилители тока в составе усилителей мощности, а также для согласования источников сигнала с высоким внутренним сопротивлением с нагрузкой или другими усилительными каскадами, имеющими низкое входное сопротивление. Перейдем к рассмотрению усилительного каскада с общим эмиттером. Его схема приведена на рисунке 27.



### Рисунок 27 – Каскад на биполярном транзисторе с ОЭ

Выходное напряжение данного каскада выразим как разность напряжения питания и падения напряжения на нагрузочном резисторе:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{П}} - I_{\text{К}} R_{\text{Н}} \quad (22)$$

С другой стороны, нам известно, что ток коллектора связан с током базы следующим выражением(23)

$$I_{\text{К}} = \beta I_{\text{Б}} \quad (23)$$

Выражение для тока баазы запишем следующим образом:

$$I_{\text{Б}} = \frac{(U_{\text{ВХ}} - U_{\text{Б-Э}})}{R_{\text{Э}}} \quad (24)$$

Подставляя (24) в (23) получаем:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{П}} - \beta \frac{U_{\text{ВХ}} - U_{\text{Б-Э}}}{R_{\text{Э}}} R_{\text{Н}} \quad (25)$$

Дифференцируя данное выражение по входному напряжению, получим коэффициент усиления напряжения:

$$K_{\text{УН}} = \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dU_{\text{ВХ}}} = - \frac{\beta R_{\text{Н}}}{R_{\text{Э}}} \quad (26)$$

Коэффициент усиления тока будет таким же, как и в предыдущем случае:

$$K_{\text{УТ}} = \frac{dI_{\text{ВЫХ}}}{dI_{\text{ВХ}}} = \beta \quad (27)$$

Из формулы (27) следует, что коэффициент усиления напряжения очень сильно зависит от коэффициента передачи тока транзистора.

С другой стороны, данный коэффициент сильно зависит от температуры и может сильно отличаться у различных экземпляров транзисторов, на практике разброс доходит до 7-8 раз. Это связано с тем, что существующая технология изготовления транзисторов не позволяет производить абсолютно одинаковые приборы, особенно сложно выдерживать стабильную толщину базы, от которой и зависит коэффициент передачи тока. Поэтому коэффициент усиления рассмотренного транзисторного каскада не может быть стабильным[2].

С целью стабилизации коэффициента усиления в цепь эмиттера включают резистор обратной связи, как это показано на рисунке 28.

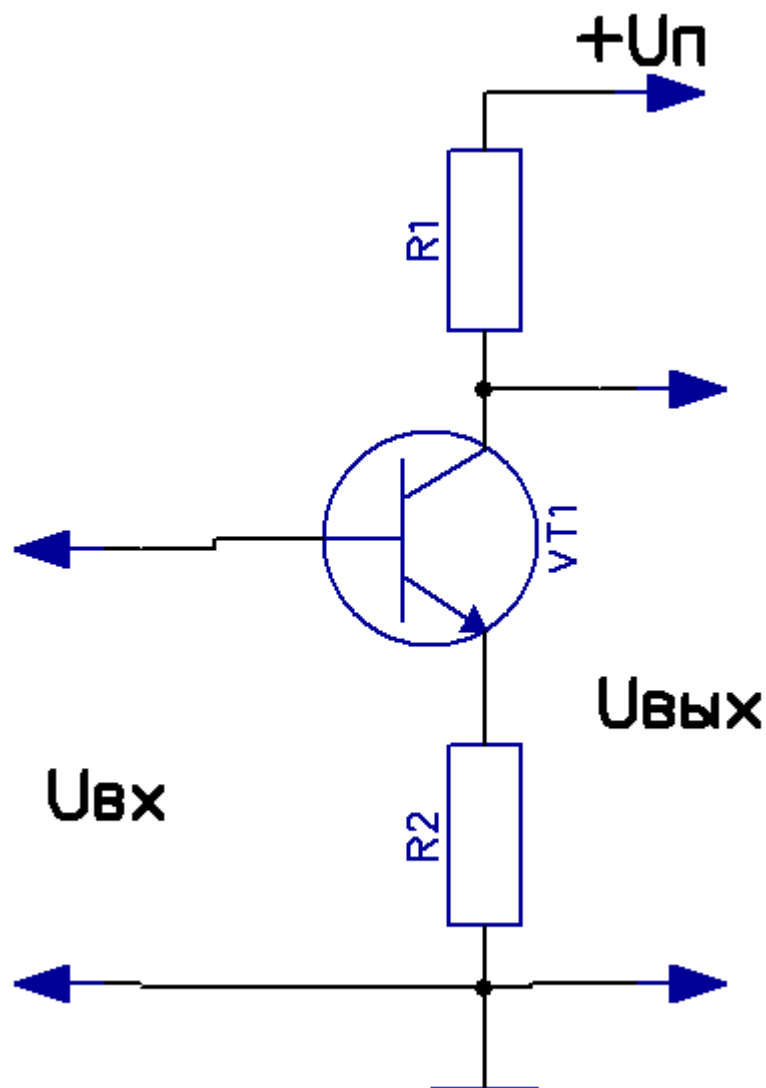


Рисунок 28 – Усилительный каскад по схеме с общим эмиттером с резистором ОС

Легко заметить, что данный усилительный каскад работает эмиттерным повторителем с точки зрения резистора R2 и сигнал на этом резисторе практически полностью повторяет входной. Это вызывает определенные изменения тока эмиттера и практически такие же изменения тока коллектора. Учитывая, что

$$R2 \gg R_{\text{э}} \quad (28)$$

Легко показать, что коэффициент усиления данной схемы будет задаваться выражением:

$$K_y = \frac{R1}{R2} \quad (29)$$

На практике данный усилительный каскад дополняют также цепями смещения и переходными конденсаторами, которые препятствуют протеканию постоянной составляющей тока базы через источник сигнала, а тока коллектора – через нагрузку. Типовая схема усилительного каскада на биполярном транзисторе показана на рисунке 29.

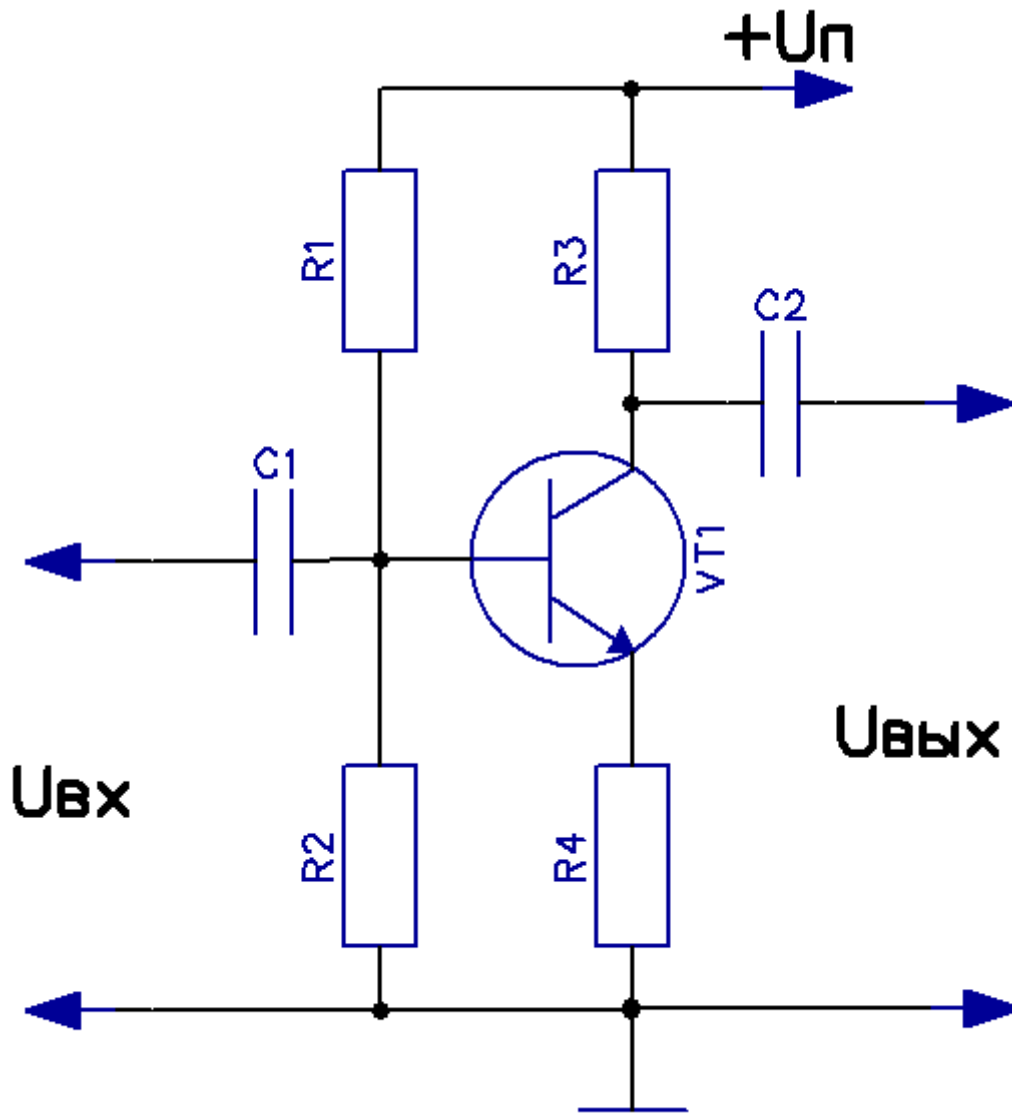


Рисунок 29 – Типовая схема усилительного каскада с ОЭ

Данный усилительный каскад содержит в себе четыре резистора и два конденсатора, параметры которых рассчитываются под те или иные условия эксплуатации.

Сопротивление резистора R3 обычно выбирают в несколько (например, пять) раз меньше сопротивления нагрузки:

$$R_3 = \frac{R_H}{5} \quad (30)$$

Для того, чтобы усилительный каскад передавал как положительные, так и отрицательные полуволны усиливаемого сигнала, напряжение на коллекторе в режиме покоя обычно выбирают равным половине напряжения питания:

$$U_K = \frac{U_{\Pi}}{2} \quad (31)$$

Тогда появляется возможность вычислить ток покоя коллектора по формуле:

$$I_K = \frac{U_{\Pi} - U_K}{R_3} \quad (32)$$

По требуемому коэффициенту усиления находим сопротивление резистора  $R_3$ :

$$R_4 = \frac{R_3}{K_y} \quad (33)$$

Учитывая, что ток эмиттера практически равен току коллектора, находим напряжение на эмиттере в режиме покоя:

$$U_3 = I_K R_3 \quad (34)$$

Зная, что потенциалы базы и эмиттера транзистора отличаются на практически одно и то же значение, находим потенциал базы:

$$U_6 = U_3 + U_{63} \quad (35)$$

Рассчитываем делитель напряжения смещения  $R_1 R_2$ , решая систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{U_{\Pi} R_2}{R_1 + R_2} = U_6 \\ \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 5\beta R_4 \end{cases} \quad (36)$$

Нам остается вычислить емкости конденсаторов. Для этого зададимся минимальной частотой сигнала, которую требуется передавать при помощи усилительного каскада  $f_{\min}$  и найдем емкости, решая следующие неравенства:

$$2\pi f_{\min} C_1 > \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_{\text{ист}}, \quad (37)$$

$$2\pi f_{\min} C_2 > R_H \quad (38)$$

### 3.2 Дифференциальные и операционные усилители

Вы наверняка уже заметили, что расчет транзисторных усилителей является достаточно сложным процессом. Также следует отметить, что рассмотренные нами усилительные каскады на биполярных транзисторах имеют существенный недостаток – дрейф нуля, который проявляется в том, что выходное напряжение (постоянное, на коллекторе транзистора) изменяется под воздействием многих факторов (температуры транзистора, коэффициента передачи тока и других). Это приводит к тому, что подобные каскады можно использовать только для усиления переменного тока[1].

Эти недостатки устранены в так называемых усилителях постоянного тока, одним из видов которых является дифференциальный усилитель. Схема такого усилителя показана на рисунке 30.

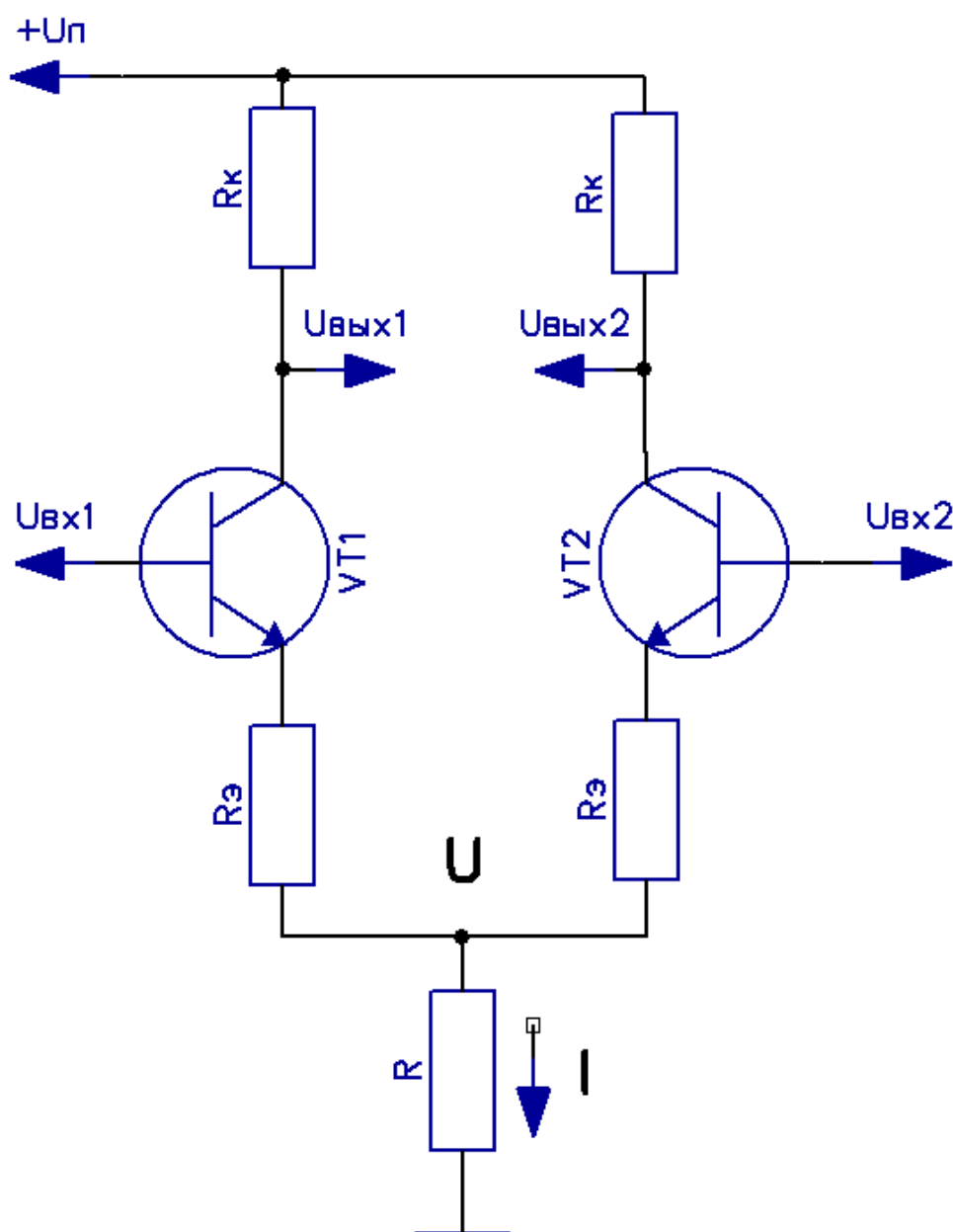


Рисунок 30 – Дифференциальный усилитель

В данном усилителе входное напряжение прикладывается между базами транзисторов, а выходное снимается между коллекторами (или с одного из коллекторов). Рассмотрим работу данного усилителя более подробно. Транзисторы VT1 и VT2 работают эмиттерными повторителями с нагрузкой в виде резисторов  $R_э$  и  $R$ . Поэтому для них справедливы следующие выражения:

$$U_{э1} = U_{вх1} - U_{бэ} , \quad (39)$$

$$U_{э2} = U_{вх2} - U_{бэ} \quad (40)$$

Тогда выражения для токов коллектора и эмиттера примут вид:

$$I_{к1} = I_{э1} = \frac{U_{э1} - U}{R_э} , \quad (41)$$

$$I_{к2} = I_{э2} = \frac{U_{э2} - U}{R_э} \quad (42)$$

Где  $U$ - потенциал в точке соединения резисторов (показан на рисунке 30). Найдем значение  $U$ :

$$U = (I_{э1} + I_{э2})R = \frac{R}{R_э} (U_{э1} + U_{э2} - 2U) , \quad (43)$$

$$U + \frac{2R}{R_э} U = \frac{R}{R_э} (U_{э1} + U_{э2}) , \quad (44)$$

$$U \left( \frac{R_э + 2R}{R_э} \right) = \frac{R}{R_э} (U_{э1} + U_{э2}) , \quad (45)$$

$$U = \frac{R}{R_э + 2R} (U_{э1} + U_{э2}) \quad (46)$$

Подставляя полученное выражение в (41) получаем:

$$I_{к1} = \frac{U_{э1}}{R_э} - \frac{R}{R_э(R_э + 2R)} U_{э1} - \frac{R}{R_э(R_э + 2R)} U_{э2} , \quad (47)$$

$$I_{к1} = U_{э1} \frac{R_э + R}{R_э(R_э + 2R)} - U_{э2} \frac{R}{R_э(R_э + 2R)} , \quad (48)$$

$$I_{к1} = U_{вх1} \frac{R_э + R}{R_э(R_э + 2R)} - U_{бэ} \frac{R_э + R}{R_э R_э + 2R} - U_{вх2} \frac{R}{R_э(R_э + 2R)} + U_{бэ} \frac{R}{R_э(R_э + 2R)} \quad (49)$$

$$I_{K1} = U_{BX1} \frac{R_3 + R}{R_3(R_3 + 2R)} - U_{BX2} \frac{R_3}{R_3 R_3 + 2R} - U_{63} \frac{R}{R_3(R_3 + 2R)} \quad (50)$$

Теперь становится легко найти зависимость между напряжением на коллекторе VT1 и входными напряжениями  $U_{BX1}$  и  $U_{BX2}$  :

$$U_{ВЫХ1} = U_{\Pi} - I_{K1} R_K \quad (51)$$

$$U_{ВЫХ1} = U_{\Pi} - U_{BX1} \frac{R_K(R_3 + R)}{R_3(R_3 + 2R)} + U_{BX2} \frac{R_K R}{R_3 R_3 + 2R} - U_{63} \frac{R}{R_3(R_3 + 2R)} \quad (52)$$

Из выражения (52) видно, что  $U_{BX1}$  и  $U_{BX2}$  входят в него с разными коэффициентами (по модулю) . Однако, легко показать, что оба коэффициента стремятся к  $\frac{R_K}{2R_3}$  при  $R \gg R_3$ .

В силу симметрии схемы можно легко найти выражение для  $U_{ВЫХ2}$  :

$$U_{ВЫХ2} = U_{\Pi} - U_{BX2} \frac{R_K(R_3 + R)}{R_3(R_3 + 2R)} + U_{BX1} \frac{R_K R}{R_3 R_3 + 2R} - U_{63} \frac{R}{R_3(R_3 + 2R)} \quad (53)$$

Вычитая из него  $U_{ВЫХ1}$  получаем выражение для выходного напряжения, если оно снимается между коллекторами транзисторов:

$$U_{ВЫХ2} - U_{ВЫХ1} = U_{BX1} \frac{R_K R + R_K(R_3 + R)}{R_3(R_3 + 2R)} + U_{BX2} \frac{R_K(R_3 + R) + R_K R}{R_3(R_3 + 2R)}, \quad (54)$$

$$U_{ВЫХ2} - U_{ВЫХ1} = (U_{BX1} - U_{BX2}) \frac{R_K}{R_3} \quad (55)$$

Мы показали, что выходное напряжение данного усилителя в обоих случаях зависит от разности входных напряжений, поэтому усилитель и называется дифференциальным. При этом, требуется соблюдение некоторых условий (см. выше), при которых коэффициенты усиления для обоих входов станут равны. Однако, на практике достаточно трудно обеспечить  $R \gg R_3$ , но снимать выходной сигнал между коллекторами транзисторов оказывается неудобным. Для того, чтобы обеспечить строго одинаковые коэффициенты усиления для обоих входов применяют питание усилителя от источника тока, как это показано на рисунке 31. Источник тока обычно выполняется по схеме токового зеркала на двух транзисторах, но возможно его исполнение и на одном транзисторе. Следует отметить, что для дифференциального каскада с источником тока справедливы все полученные нами ранее формулы, если заменить  $R$  на бесконечность.

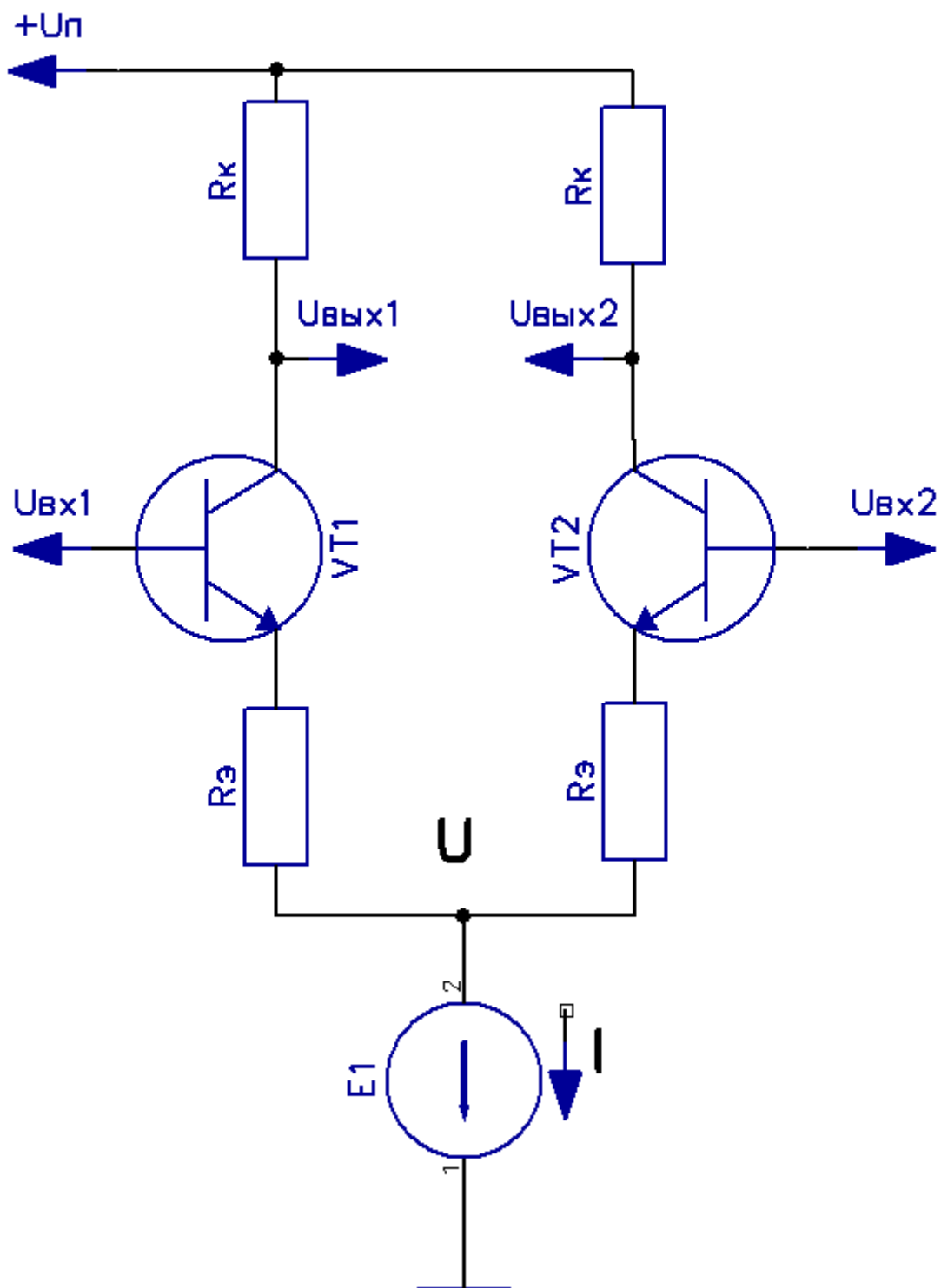


Рисунок 31 – Дифференциальный усилитель с источником тока

Если питание усилителя осуществляется стабильным током, то справедливо следующее выражение для токов эмиттеров:

$$I_{э1} + I_{э2} = I = \text{const} \quad (56)$$

Очевидно, что:

$$\frac{U_{э1}-U}{R_э} + \frac{U_{э2}-U}{R_э} = I \quad (57)$$

$$\frac{U_{э1}+U_{э2}}{R_э} - \frac{2U}{R_э} = I \quad (58)$$

$$-\frac{2U}{R_э} = I - \frac{U_{э1}+U_{э2}}{R_э} \quad (59)$$

Тогда напряжение  $U$  в точке соединения резисторов  $R_э$  будет выражаться формулой:

$$U = \frac{U_{э1}+U_{э2}-IR_э}{2} \quad (60)$$

Подставляя ее в (41) найдем ток коллектора транзистора VT1:

$$I_{к1} = \frac{U_{э1}}{R_э} - \frac{U_{э1}+U_{э2}-IR_э}{2R_э} = \frac{U_{э1}-U_{э2}-IR_э}{2R_э}, \quad (61)$$

$$I_{к1} = \frac{U_{вх1}-U_{вх2}-2U_{бэ}-IR_э}{2R_э} \quad (62)$$

Затем найдем напряжение на коллекторе VT1:

$$U_{вых1} = U_{п} - \frac{R_к}{2R_э}(U_{вх1} - U_{вх2} - U_{бэ} - IR_э) \quad (63)$$

Как видно, в данном случае коэффициент усиления для обоих входов одинаков.

На практике дифференциальные усилители применяют, дополнив их каскадами усиления напряжения (чтобы повысить коэффициент усиления) и тока (для повышения нагрузочной способности), например, как показано на рисунке 32.

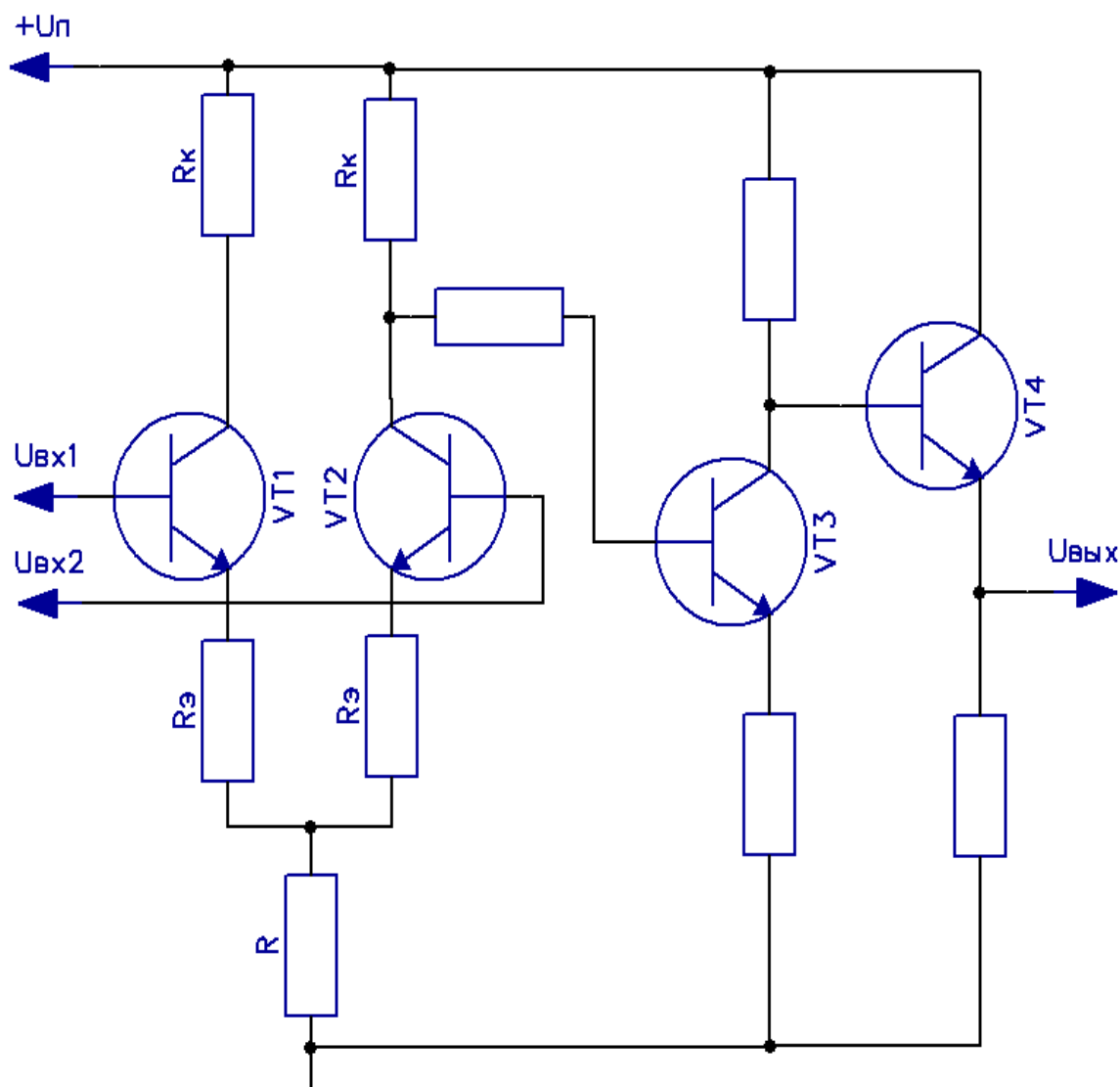
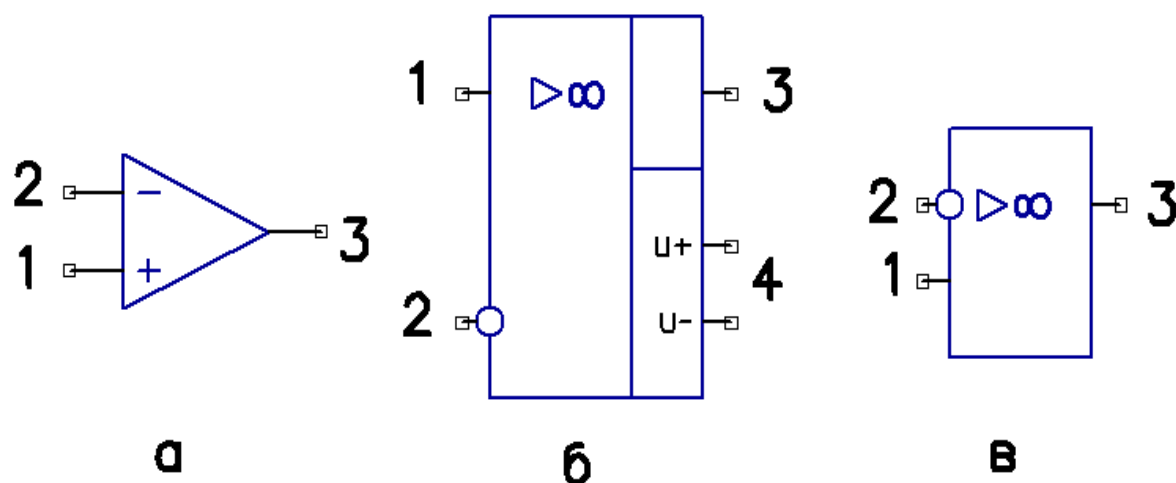


Рисунок 32 – Операционный усилитель

Такой усилитель получил название операционного (ОУ). Их обычно выпускают в виде интегральных схем. Операционные усилители нашли столь широкое применение в современной электронике, что на принципиальных схемах не отображают схему самих ОУ (это было бы нерационально, так как операционные усилители зачастую сложнее, чем схемы, в которых они работают), а используют специальные условные обозначения, показанные на рисунке 33. Обозначение, показанное на рисунке 33 (а), является исторически первым для операционного усилителя. В настоящее время данное графическое обозначение употребляется в основном в зарубежной литературе, хотя, имеет определенные преимущества перед более поздним вариантом, показанным на рисунке 33 (б) и 33 (в). Как видно, обозначение операционного усилителя может как содержать, так и не содержать выводов питания. В дальнейшем в данном пособии будут использоваться условные обозначения, аналогичные приведенному на рисунке 33 (а).



- 1 – неинвертирующий вход
- 2 - инвертирующий вход
- 3 – выход
- 4 – выводы питания

Рисунок 33 – Условное графическое обозначение операционного усилителя

Для расчета узлов электронных устройств на операционных усилителях, подойдет простейшая линейная модель ОУ. Она связывает потенциал на выходе ОУ с разностью потенциалов на его входах (относительно общего провода). Точки, между которыми измеряются потенциалы, показаны на рисунке 34.

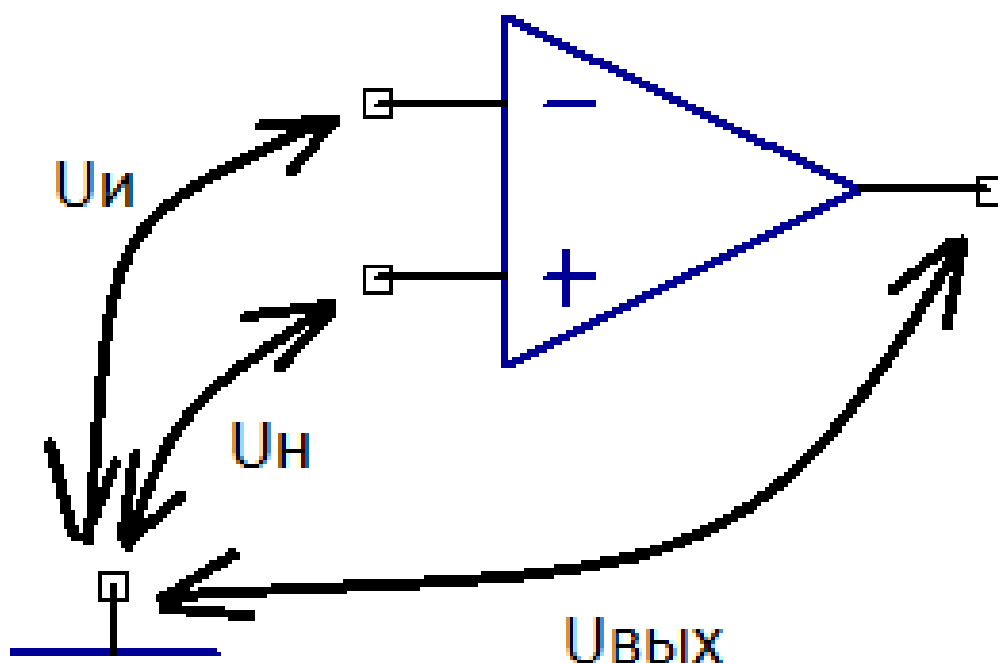


Рисунок 34 – Потенциалы на выводах ОУ

Для большинства ОУ справедлива следующая модель:

$$U_{\text{вых}} = k(U_{\text{н}} - U_{\text{и}}) \quad (64)$$

Где  $k$ - коэффициент усиления дифференциального сигнала ОУ (обычно лежит в пределах от  $10^3$  до  $10^6$ ),  $U_{\text{вых}}$  – выходное напряжение,  $U_{\text{н}}$  – напряжение на неинвертирующем входе,  $U_{\text{и}}$  – напряжение на инвертирующем входе.

### 3.3 Применение операционных усилителей

Рассмотрим простейший узел на ОУ – повторитель, схема которого представлена на рисунке 35.

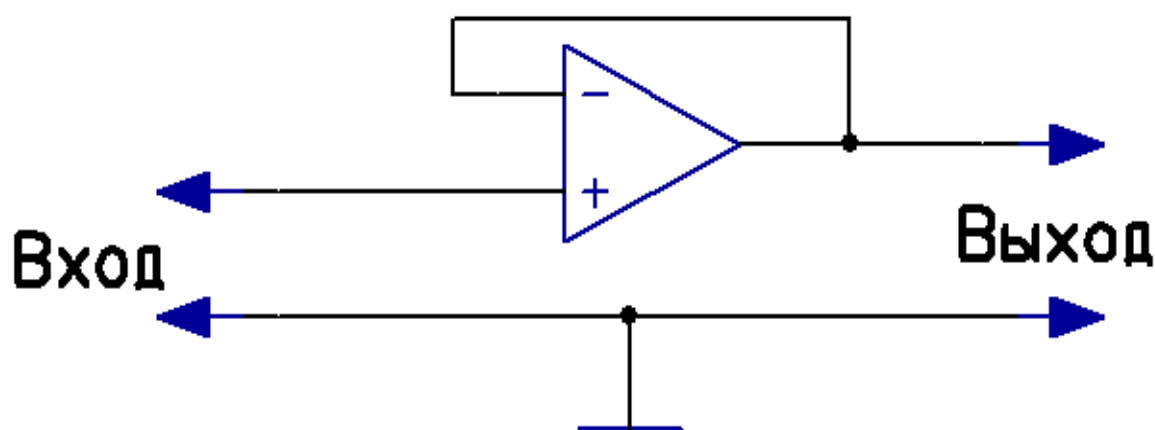


Рисунок 35 – Принципиальная схема повторителя на ОУ

Как видно, входное напряжение приложено между общим проводом и неинвертирующим входом, а инвертирующий вход соединен с выходом ОУ. Тогда справедливо следующее:

$$U_{\text{н}} = U_{\text{вх}} ; U_{\text{и}} = U_{\text{вых}} \quad (65)$$

Подставляя это в выражение для математической модели ОУ, получаем:

$$U_{\text{вых}} = k(U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}) \quad (66)$$

Раскрывая скобки, получаем:

$$U_{\text{вых}} = kU_{\text{вх}} - kU_{\text{вых}} \quad (67)$$

Переносим все слагаемые, содержащие  $U_{\text{вых}}$  в левую часть, а содержащие  $U_{\text{вх}}$  – в правую:

$$U_{\text{ВЫХ}} + kU_{\text{ВЫХ}} = kU_{\text{ВХ}} \quad (68)$$

Выносим  $U_{\text{ВЫХ}}$  за скобки:

$$U_{\text{ВЫХ}} (1 + k) = kU_{\text{ВХ}} \quad (69)$$

Выражаем  $U_{\text{ВЫХ}}$ :

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{kU_{\text{ВХ}}}{1+k} \quad (70)$$

При достаточно большом  $k$  отношением  $\frac{k}{1+k}$  можно пренебречь, так как оно будет близко к единице. Тогда получаем:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \quad (71)$$

То есть, данный узел на операционном усилителе повторяет поданный на него сигнал и обладает коэффициентом усиления, равным единице.

Для того, чтобы получить усилитель, добавим к ОУ цепь ООС, состоящую из резисторного делителя, как показано на рисунке 36.

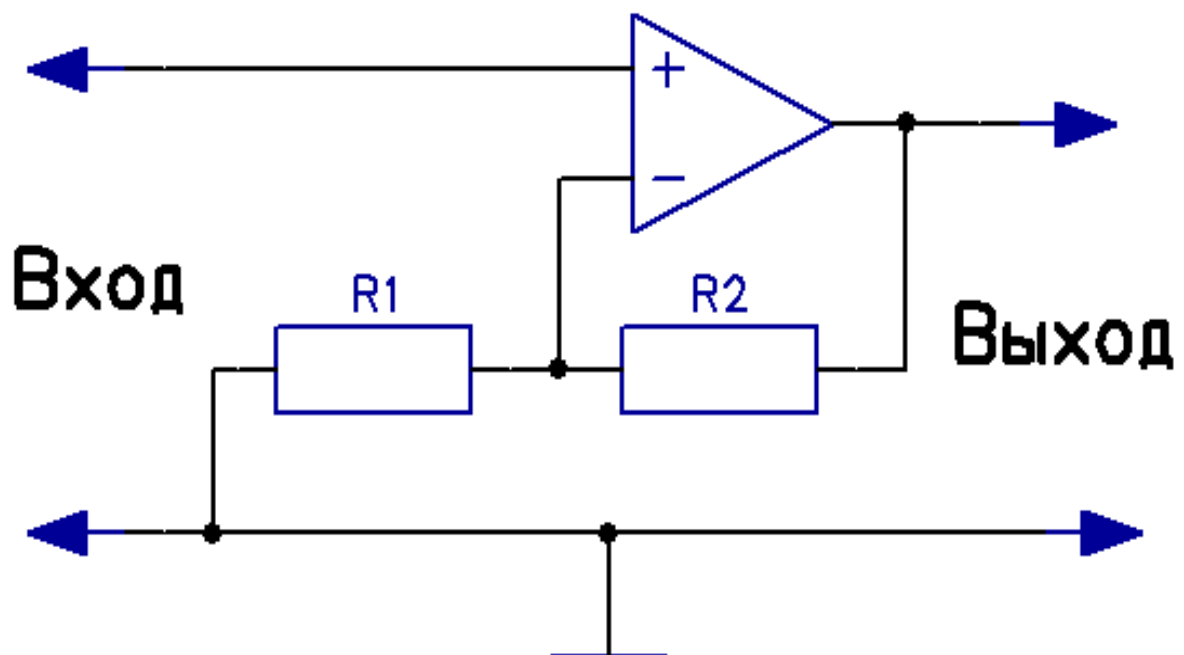


Рисунок 36 – Неинвертирующий усилитель на ОУ.

Как видно, входное напряжение по-прежнему прикладывается к неинвертирующему входу, в то время, как выходной сигнал ОУ ослабляется делителем  $R1R2$  перед подачей его на инвертирующий вход. Для данной схемы справедливо следующее выражение:

$$U_H = U_{BX}; \quad U_H = U_{ВЫХ} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (72)$$

Подставляя его в уже хорошо нам известное выражение для ОУ, получаем:

$$U_{ВЫХ} = k(U_{BX} - U_{ВЫХ} \frac{R_1}{R_1 + R_2}) \quad (73)$$

Раскрывая скобки, получаем:

$$U_{ВЫХ} = kU_{BX} - kU_{ВЫХ} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (74)$$

Переносим слагаемые:

$$U_{ВЫХ} + kU_{ВЫХ} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = kU_{BX} \quad (75)$$

Преобразуем выражение:

$$U_{ВЫХ} (1 + k \frac{R_1}{R_1 + R_2}) = kU_{BX} \quad (76)$$

Выражаем  $U_{ВЫХ}$ :

$$U_{ВЫХ} = \frac{kU_{BX}}{1 + k \frac{R_1}{R_1 + R_2}} \quad (77)$$

При достаточно больших  $k$ , им можно пренебречь, тогда выражение принимает вид:

$$U_{ВЫХ} = \frac{U_{BX}}{\frac{R_1}{R_1 + R_2}} \quad (78)$$

Или:

$$U_{ВЫХ} = \frac{U_{BX}(R_1 + R_2)}{R_1} \quad (79)$$

Коэффициент умилениа легко найти, разделив  $U_{ВЫХ}$  на  $U_{ВХ}$ :

$$k_y = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (80)$$

Другим типичным узлом на базе операционного усилителя является инвертирующий усилитель, схема которого показана на рисунке 37.

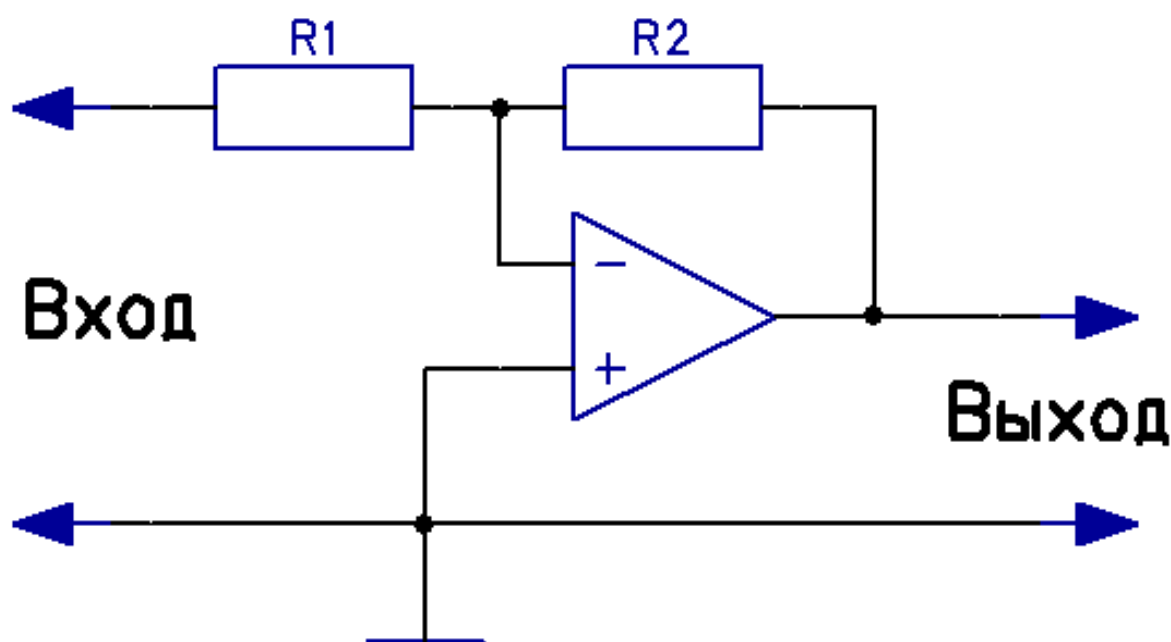


Рисунок 37 – Инвертирующий усилитель на ОУ.

Схемотехнически инвертирующий усилитель напоминает неинвертирующий, с той лишь разницей, что входной сигнал подается на один из резисторов делителя напряжения обратной связи, в то время, как неинвертирующий вход ОУ заземлен, то есть, ему придан нулевой потенциал. Выражения для этого усилителя примут вид:

$$U_{\text{н}} = 0; \quad U_{\text{и}} = U_{\text{вх}} + (U_{\text{вых}} - U_{\text{вх}}) \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (81)$$

Подставляем их в рассмотренную нами модель ОУ:

$$U_{\text{вых}} = -k(U_{\text{вх}} + (U_{\text{вых}} - U_{\text{вх}}) \frac{R_1}{R_1 + R_2}) \quad (82)$$

Раскрываем скобки:

$$U_{\text{вых}} = -kU_{\text{вх}} - kU_{\text{вых}} \frac{R_1}{R_1 + R_2} + kU_{\text{вх}} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (83)$$

Переносим слагаемые:

$$U_{\text{вых}} + kU_{\text{вых}} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = kU_{\text{вх}} \frac{R_1}{R_1 + R_2} - kU_{\text{вх}} \quad (84)$$

Выносим  $U_{\text{вх}}$  и  $U_{\text{вых}}$  за скобки:

$$U_{\text{ВЫХ}} \left( 1 + k \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = k U_{\text{ВХ}} \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - 1 \right) \quad (85)$$

Выполняем сложение в скобках:

$$U_{\text{ВЫХ}} (R_1 + R_2 + k R_1) = k U_{\text{ВХ}} (R_1 - R_1 - R_2) \quad (86)$$

Упрощаем полученное выражение:

$$U_{\text{ВЫХ}} (R_1 (k + 1) + R_2) = -k U_{\text{ВХ}} R_2 \quad (87)$$

Выражаем  $U_{\text{ВЫХ}}$  через  $U_{\text{ВХ}}$ :

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{-k U_{\text{ВХ}} R_2}{(R_1 (k + 1) + R_2)} \quad (88)$$

При достаточно большом  $k$  выражение принимает вид:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{-U_{\text{ВХ}} R_2}{R_1} \quad (89)$$

Найдем коэффициент усиления:

$$k_y = -\frac{R_2}{R_1} \quad (90)$$

Как видно, он отрицателен, поэтому данный усилитель и получил название инвертирующего.

Как уже упоминалось, коэффициент усиления дифференциального сигнала ОУ достаточно велик. Это означает, что при типичных значениях напряжения на выходе усилителя (порядка 10-20В), разность потенциалов между входами усилителя составит единицы милливольт. Соответственно, потенциал точки соединения резисторов  $R_1$  и  $R_2$  в схеме рассмотренного нами инвертирующего усилителя, близок к нулю, что означает, что практически все входное напряжение прикладывается к резистору  $R_1$ , а выходное напряжение зависит от тока, протекающего через этот резистор, который легко определить по формуле:

$$I_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1} \quad (91)$$

Соответственно:

$$U_{\text{ВХ}} = I_{\text{ВХ}} R_1 \quad (92)$$

Подставляя это выражение в формулу (89) для инвертирующего усилителя, получаем:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -I_{\text{ВХ}} R_2 \quad (93)$$

Резистор R1 может быть исключен и тогда мы получим устройство, преобразующее силу тока в напряжение, обладая при этом достаточно малым входным сопротивлением. Схема его показана на рисунке 38.

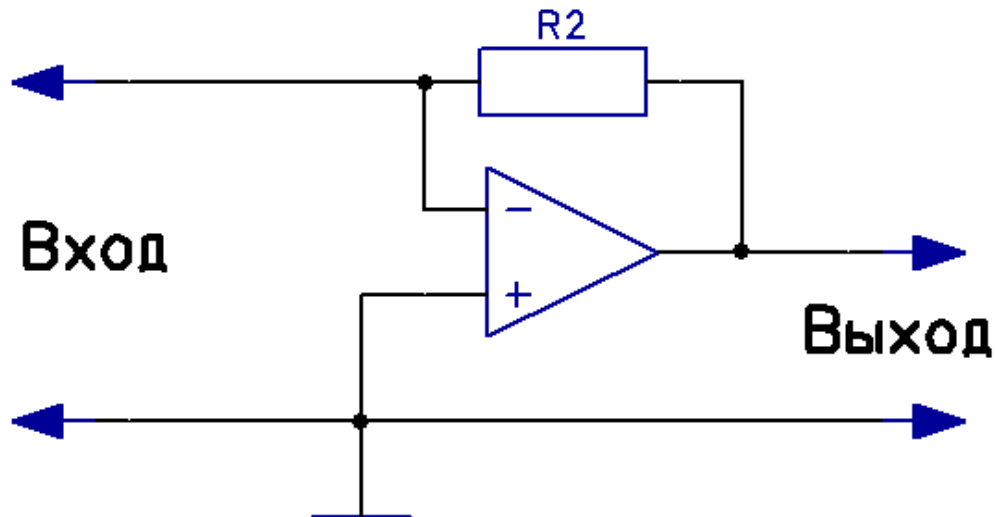


Рисунок 38 – Преобразователь ток-напряжение на ОУ

На основе преобразователя ток-напряжение может быть построен дифференциатор. Его схема приведена на рисунке 39.

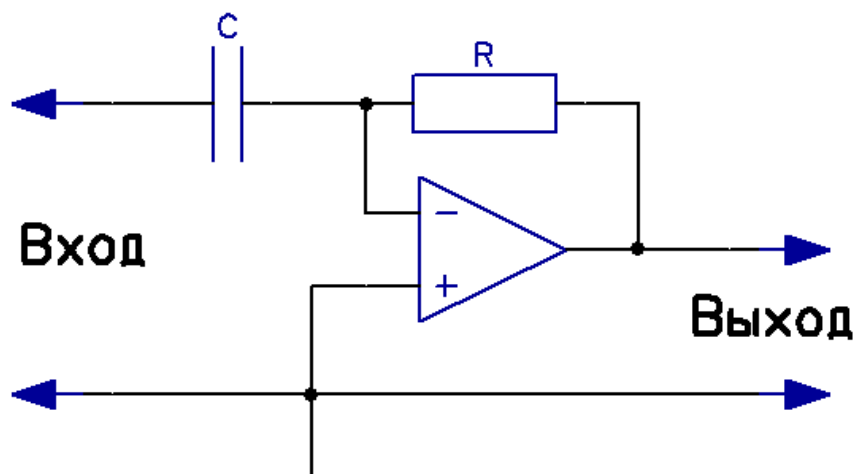


Рисунок 39 – Принципиальная электрическая схема дифференциатора

Для расчетов воспользуемся уже известной нам формулой для преобразователя тока в напряжение (94)

$$U_{\text{ВЫХ}} = -I_{\text{ВХ}} R \quad (94)$$

Для конденсатора  $C$  справедливо:

$$C = \frac{dq}{dU_{\text{ВХ}}} \quad (95)$$

С другой стороны, количество электричества можно выразить через силу тока через конденсатор и время:

$$I_{\text{ВХ}} = \frac{dq}{dt} \quad (96)$$

Выражая из двух последних формул  $dq$  и приравнявая их, получаем:

$$CdU_{\text{ВХ}} = I_{\text{ВХ}} dt \quad (97)$$

Выражаем  $I_{\text{ВХ}}$ :

$$I_{\text{ВХ}} = C \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt} \quad (98)$$

Подставляем  $I_{\text{ВХ}}$  в формулу (94):

$$U_{\text{ВЫХ}} = -RC \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt} \quad (99)$$

Легко заметить, что выходное напряжение пропорционально скорости изменения входного. Иными словами, данное устройство осуществляет математическую операцию дифференцирования.

Поменяв местами резистор и конденсатор можно получить интегратор, принципиальная схема которого показана на рисунке 40.

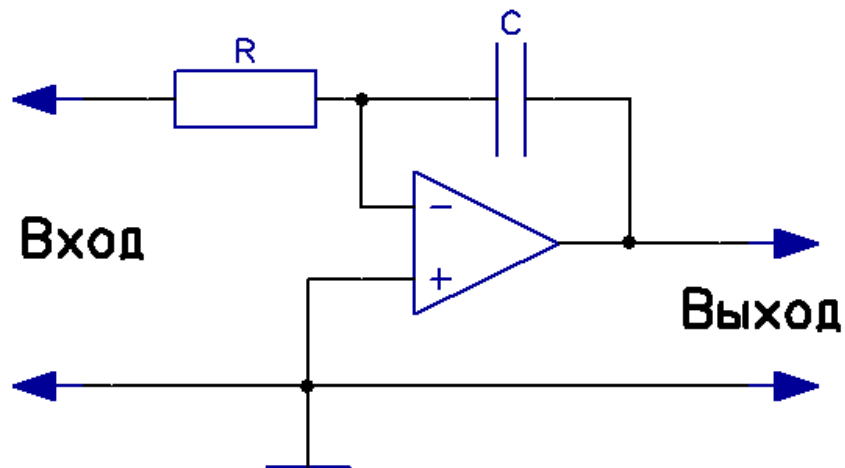


Рисунок 40 – Принципиальная электрическая схема интегратора

Выполним расчет данного узла.

Так как инвертирующий вход ОУ практически не потребляет тока, то сумма токов, протекающих через резистор и конденсатор должна быть равной нулю:

$$I_R + I_C = 0 \quad (100)$$

Выразим ток, протекающий через резистор, через входное напряжение узла:

$$I_R = \frac{U_{ВХ}}{R} \quad (101)$$

А ток, протекающий через конденсатор легко выразить из определения электрической емкости:

$$I_C = C \frac{dU_{ВЫХ}}{dt} \quad (102)$$

Приравниваем полученные выражения для токов:

$$\frac{dU_{ВХ}}{RC} = \frac{dU_{ВЫХ}}{dt} \quad (103)$$

Интегрируем обе части выражения, перенося  $dt$  в левую часть:

$$\frac{-1}{RC} \int U_{ВХ} dt = \int dU_{ВЫХ} \quad (104)$$

В итоге получаем:

$$U_{ВЫХ} = \frac{-1}{RC} \int U_{ВХ} dt + U \quad (105)$$

Мы доказали, что рассматриваемое устройство выполняет математическую операцию интегрирования.

Рассмотренные нами ранее базовые узлы электронных устройств на ОУ работали с отрицательной обратной связью (то есть, выходное напряжение, или его часть, прикладывались к инвертирующему входу ОУ). Существуют также схемы с положительной обратной связью, одной из которых является триггер Шмитта. Его схема показана на рисунке 41.

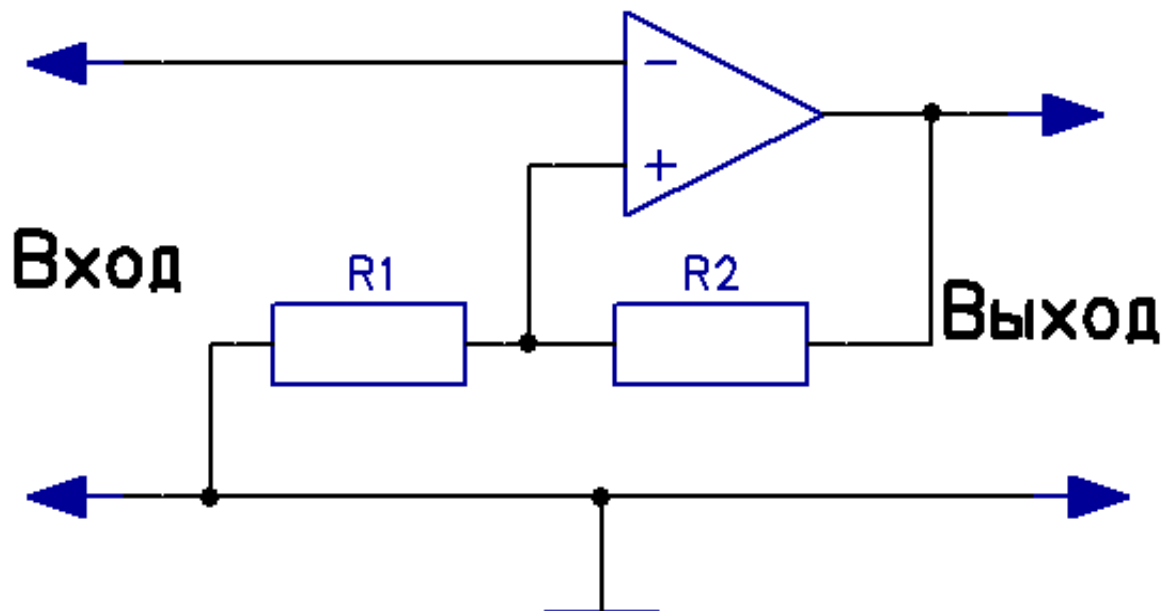


Рисунок 41 – Триггер Шмитта на ОУ

Как видно, делитель обратной связи подключен к неинвертирующему входу ОУ, а входной сигнал подается на инвертирующий. Рассмотрим принцип действия данной схемы. Триггер может находиться в одном из двух устойчивых состояний: в одном из них потенциал выхода близок к потенциалу положительного полюса источника питания, в другом – к потенциалу отрицательного полюса (+ $U_{п}$  и  $-U_{п}$  на рисунке 42). При этом, на неинвертирующем входе усилителя действует напряжение, определяемое по формуле

$$U_{пор} = \pm \frac{U_{пR1}}{R1+R2} \quad (106)$$

Знак в этом выражении зависит от состояния, в котором находится триггер.

Предположим, что он находился в положительном состоянии ( $U_{вых}=+U_{п}$ ). При любом входном напряжении меньше  $+U_{пор}$ , ОУ будет сохранять состояние, так как несмотря на рассмотренную нами ранее математическую модель, он не может выдать напряжение больше  $+U_{п}$ . Теперь будем повышать входное напряжение от нуля до  $+U_{пор}$ . Когда входное напряжение немного превысит пороговое ( $U_{пор}$ ), выходное напряжение начнет уменьшаться, что вызовет уменьшение напряжения на неинвертирующем входе. Это, в свою очередь, приведет к уменьшению выходного напряжения.

Процесс будет развиваться лавинообразно до тех пор, пока выходное напряжение не станет равным  $-U_{п}$ . Дальнейшее уменьшение напряжения на выходе ОУ невозможно в силу его конструктивных особенностей. В данном состоянии триггер работает точно так же, но пороговое напряжение имеет другой знак и для того, чтобы он вернулся в состояние  $U_{вых}=+U_{п}$ , нужно уменьшить входное напряжение до  $-U_{пор.}$ . Данные процессы отражены на рисунке 42.

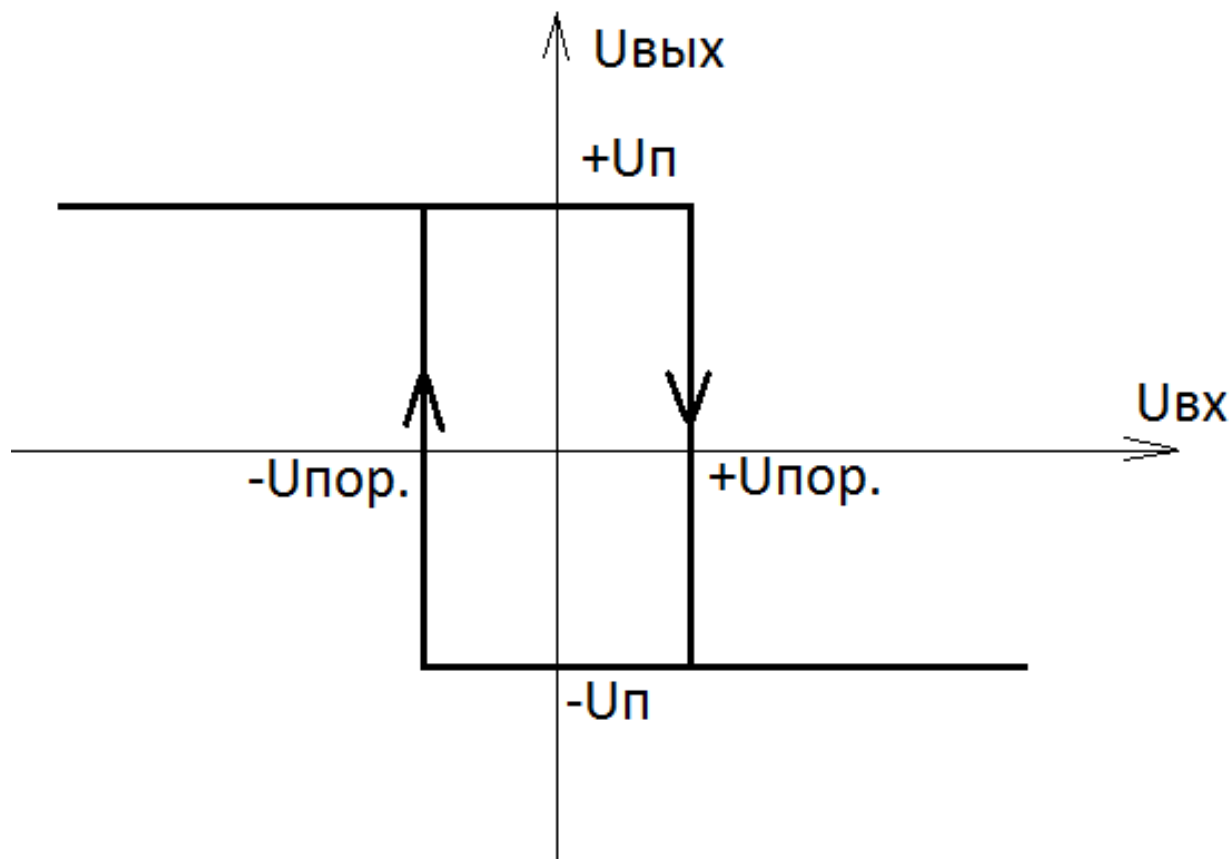


Рисунок 42 – Передаточная характеристика триггера Шмитта

Рассматриваемый нами триггер имеет два устойчивых состояния и два разных уровня входного порогового (вызывающего переключение) напряжения соответственно.

## 4. Генераторы сигналов

### 4.1 Основные виды сигналов

Сигналы, используемые в электронике, отличаются большим разнообразием форм, однако, можно выделить основные, базовые виды сигналов, к которым можно так или иначе свести все остальные.

Особое положение занимает сигнал синусоидальной формы – один из наиболее часто используемых видов сигналов в радиотехнике. Его форма показана на рисунке 43.

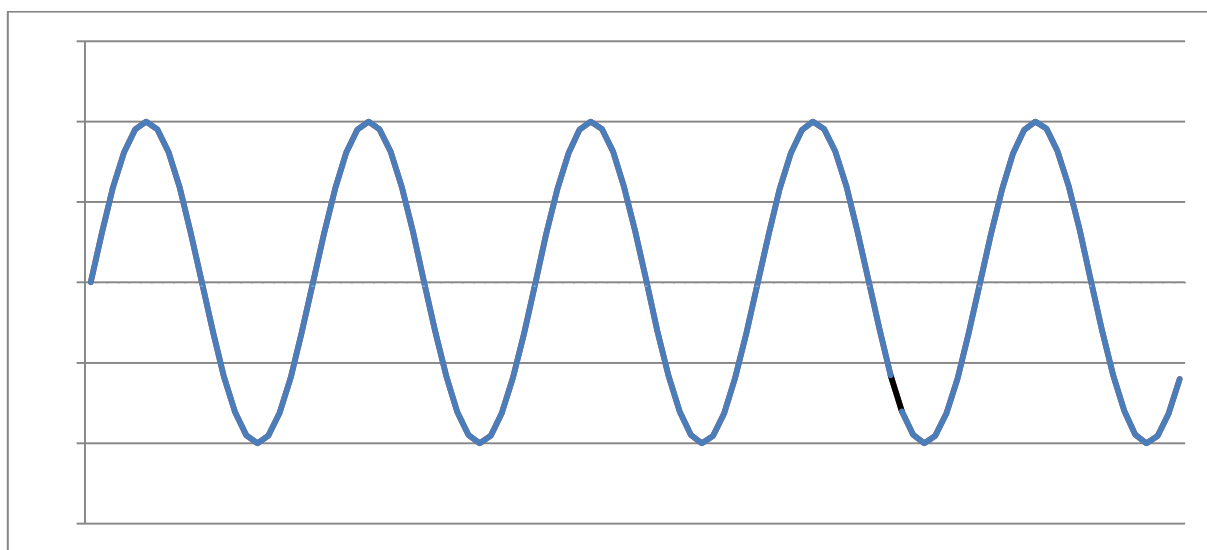


Рисунок 43 – Синусоидальный сигнал

Другой вид сигнала – прямоугольный, в отличие от синусоидального принимает одно из двух возможных значений. Его форма показана на рисунке 44.

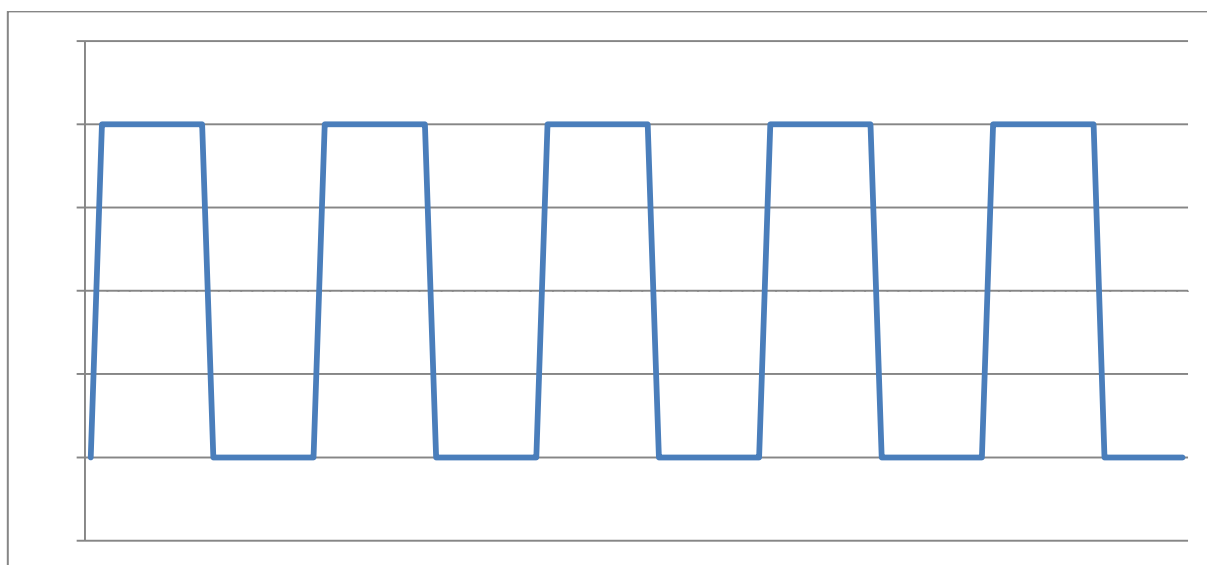


Рисунок 44 – Прямоугольный сигнал

Треугольный (линейно изменяющийся) сигнал состоит из отрезков прямых. Его форма показана на рисунке 45

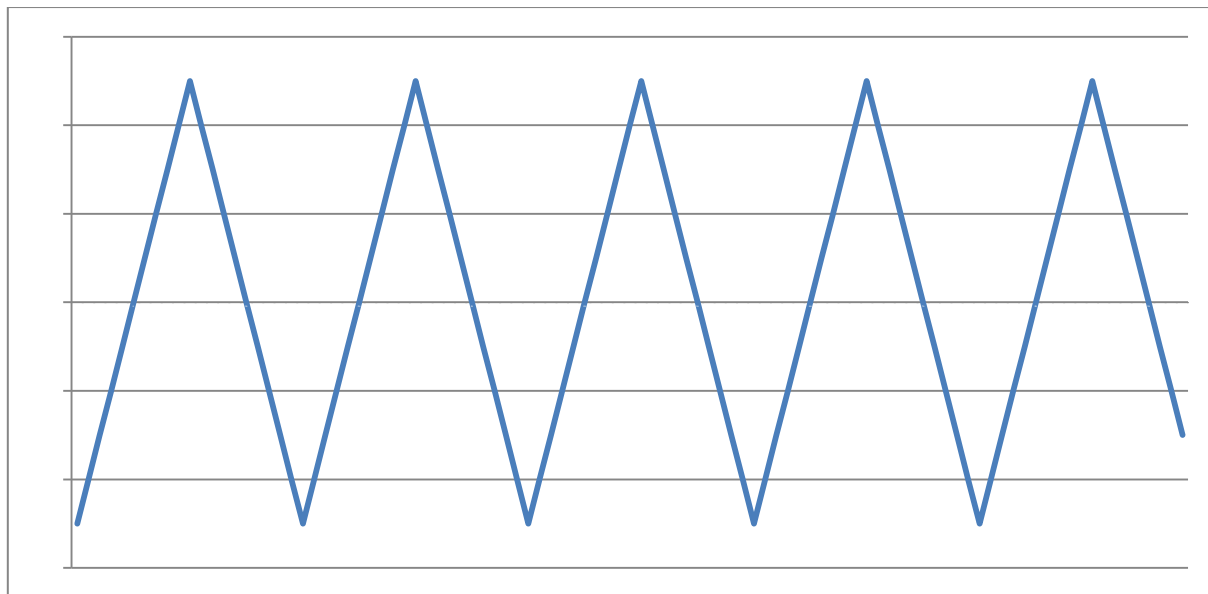


Рисунок 45 – Треугольный сигнал

Сигнал пилообразной формы используется в качестве развертывающего сигнала в электронных осциллографах и телевизионных системах. Его форма показана на рисунке 46.

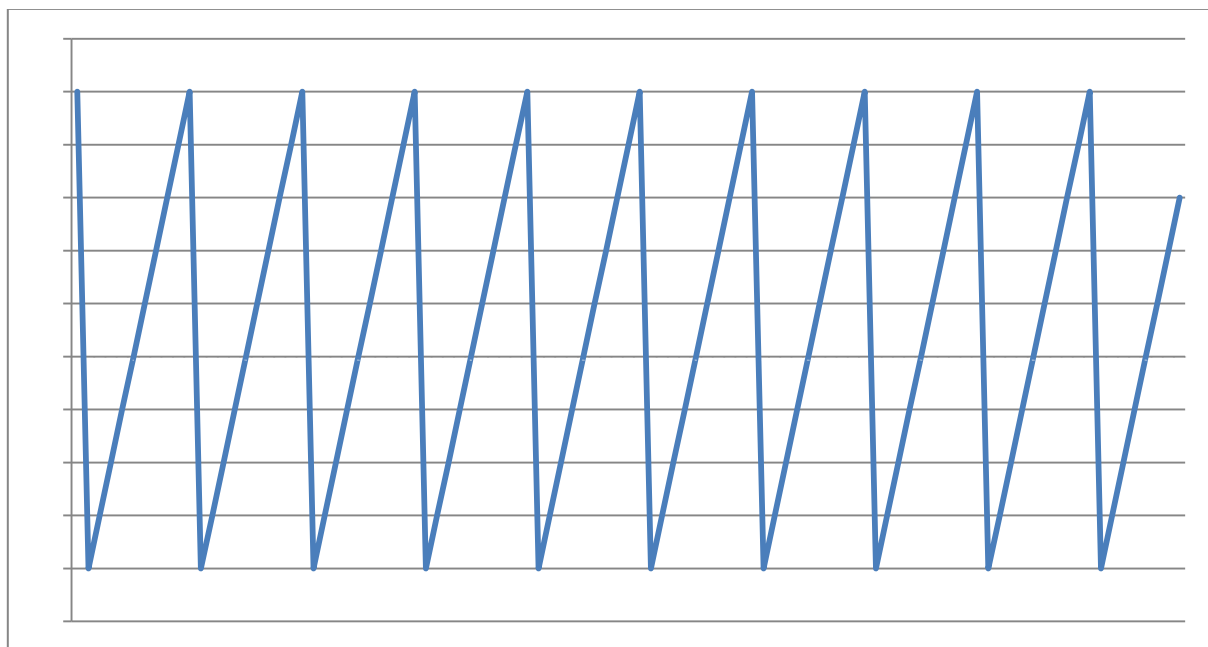


Рисунок 46 – Пилообразный сигнал

Генератором называют устройство, предназначенное для преобразования энергии, потребляемой от источника питания в энергию переменного тока заданной формы. В общем виде любой генератор сигналов можно представить, как устройство, состоящее из двух узлов: усилителя и цепи положительной обратной связи, соединенных, как показано на рисунке 47.



Рисунок 47 – Структурная схема генератора

Как видно, сигнал с выхода цепи положительной обратной связи поступает на вход усилителя, а на вход этой цепи – с выхода усилителя. Как правило, форма и спектр генерируемого сигнала определяется параметрами цепи обратной связи. Обычно она состоит из частотозависимых элементов, таких, как катушки индуктивности, конденсаторы, кварцевые резонаторы.

Для возникновения сигнала в генераторе (иначе говоря – для возбуждения генератора) должны выполняться два условия: баланс амплитуд и баланс фаз. Для того, чтобы пояснить смысл данных условий, введем понятие разомкнутой цепи генератора. Разомкнутой назовем цепь, из соединенных последовательно усилителя и цепи ОС, как показано на рисунке 48.

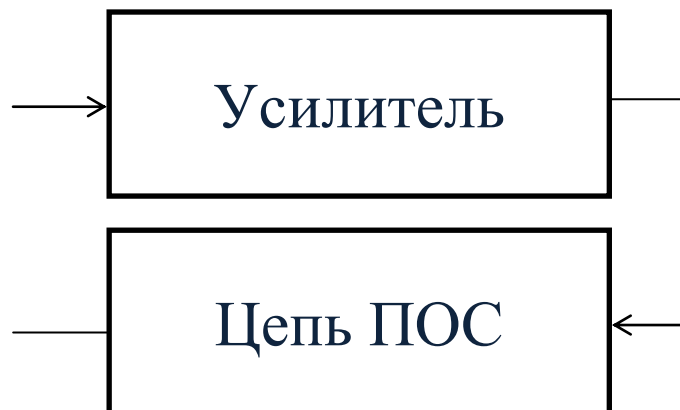


Рисунок 48 – Разомкнутая цепь генератора

С учетом данной модели, условия самовозбуждения генератора будут следующими:

*Баланс амплитуд:* усиление разомкнутой цепи на рабочей частоте должно быть не меньше единицы (то есть, усилитель как минимум полностью компенсирует потери, вносимые цепью обратной связи)

*Баланс фаз:* сдвиг фаз, вносимый разомкнутой цепью на рабочей частоте должен быть кратен  $2\pi$ .

Если оба этих условия выполняются для набора частот, то в генераторе могут одновременно возникать колебания на каждой из них.

## 4.2 LC-генератор с трансформаторной обратной связью

Одной из простейших схем генератора синусоидальных сигналов является LC генератор с трансформаторной обратной связью, схема которого приведена на рисунке 49. Он состоит из усилителя на транзисторе VT1, в коллекторную цепь которого включен колебательный контур L1C1, являющийся одновременно и элементом цепи обратной связи. Данный контур содержит также индуктивно связанную с катушкой L1 катушку L2, которая служит для подачи

сигнала обратной связи на вход усилителя, а именно – в цепь базы транзистора VT1. Делитель R1R2 служит для подачи смещения на транзистор.

Данный генератор вырабатывает синусоидальные колебания с частотой, близкой к частоте собственных колебаний контура L1C1.

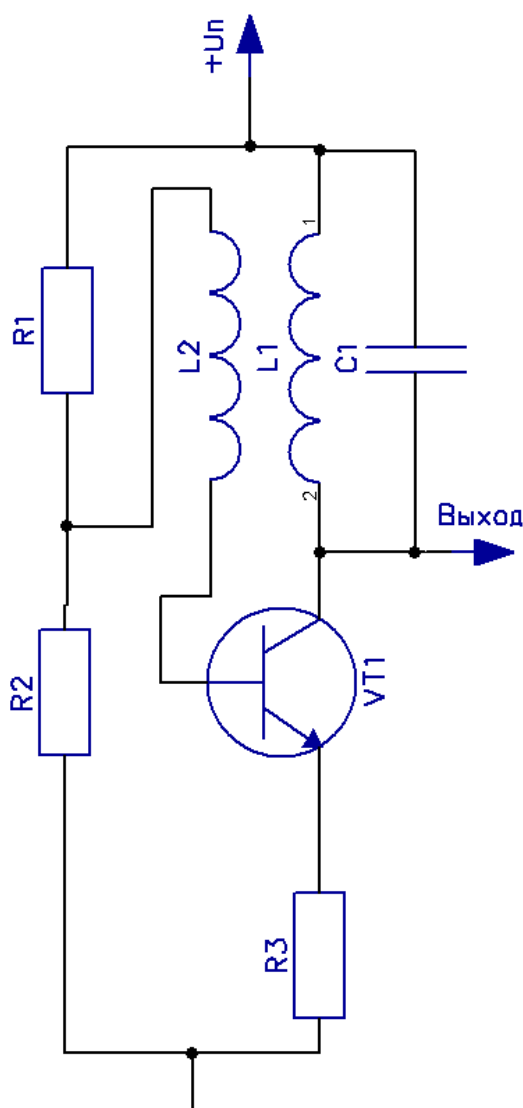


Рисунок 49 – LC генератор с индуктивной обратной связью

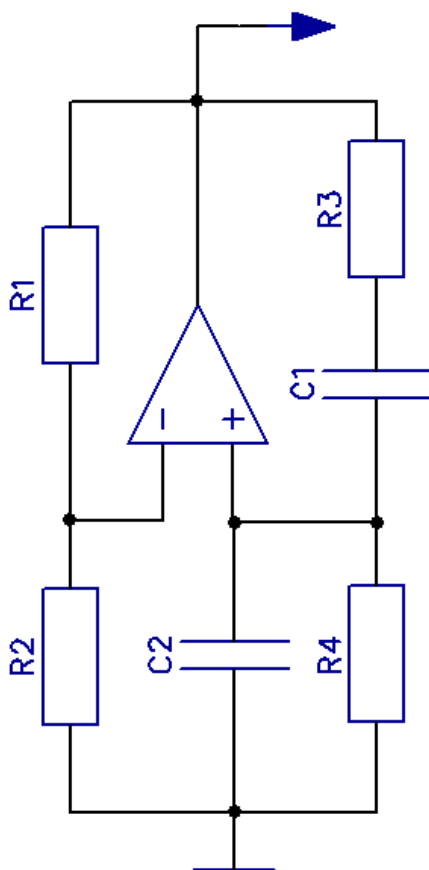
Общим недостатком LC генераторов является то, что с их помощью затруднительно получать колебания относительно низких частот (ниже ста килогерц). Это связано с тем, что для работы в данном диапазоне частот требуется катушка достаточно большой индуктивности и конденсатор достаточно большой емкости, которые невозможно сделать малогабаритными.

#### 4.3 Генератор на основе моста Вина-Робинсона

Для работы в области низких частот более целесообразно применять RC генераторы, цепь обратной связи которых состоит только из резисторов и конденсаторов. За счет применения резисторов достаточно большого сопротивления (единицы и десятки мегаом) возможно получение частот вплоть до десятых долей герца, при этом габариты генератора остаются вполне приемлемыми.

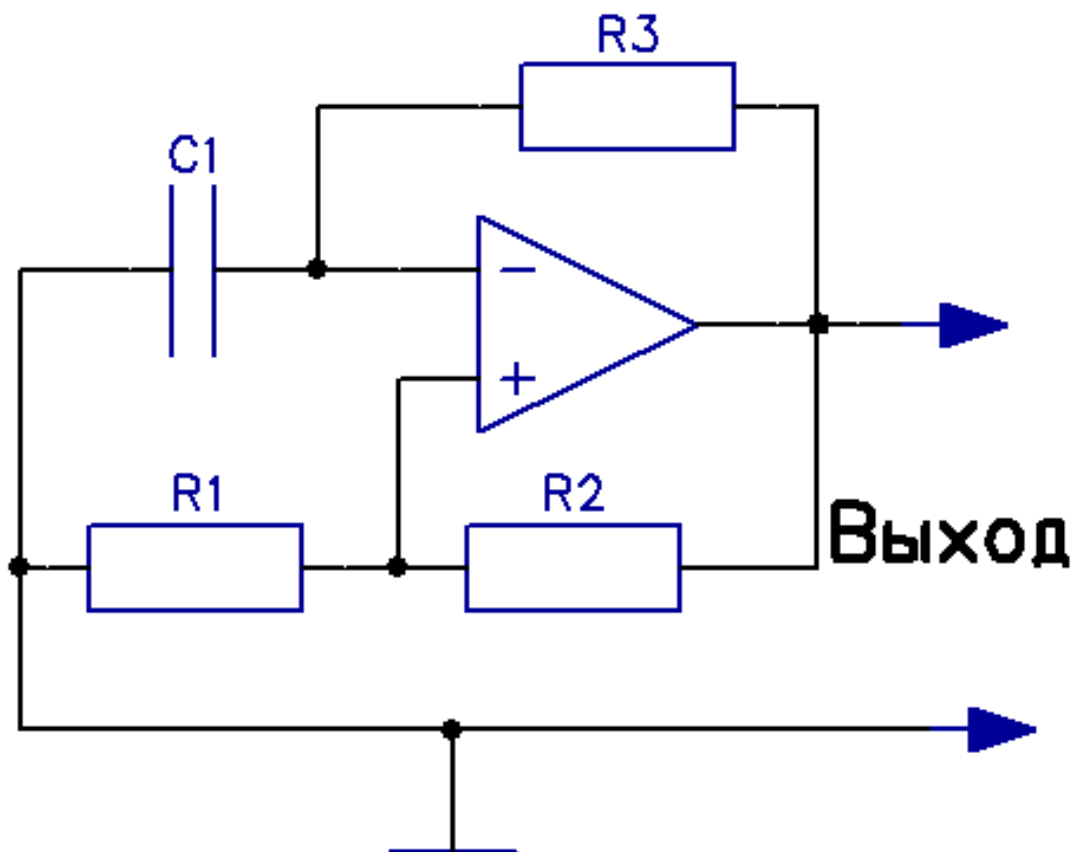
Одним из RC генераторов синусоидального сигнала является генератор на основе моста Вина-Робинсона. Схема такого генератора показана на рисунке 50.

Генератор состоит из моста  $R_1R_2R_3R_4C_1C_2$ , в обе диагонали которого включен операционный усилитель. Легко заметить, что цепь  $R_1R_2$  является цепью обратной связи для операционного усилителя, а частотозависимая цепь  $R_3R_4C_1C_2$  – цепью положительной обратной связи. Частота собственных колебаний данного генератора зависит от значений элементов цепи положительной обратной связи.



#### 4.4 Мультивибратор

Для получения сигнала прямоугольной формы может быть использован мультивибратор на операционном усилителе, схема которого показана на рисунке 51. Он состоит из триггера Шмитта, цепь обратной связи которого составляет делитель напряжения  $R1R2$  и интегрирующей цепочки  $C1R3$ , от параметров которой и зависит частота колебаний. Рассмотрим принцип действия мультивибратора более подробно. Предположим, что в исходном состоянии конденсатор был разряжен, а триггер Шмитта находится в состоянии, в котором напряжение на выходе положительно. Конденсатор начнет заряжаться до положительного относительно общего провода потенциала через резистор  $R3$ , пока напряжение на нем не достигнет порогового напряжения срабатывания триггера. Это вызовет переключение триггера в другое состояние, в котором напряжение на его выходе отрицательно, а конденсатор начнет заряжаться до отрицательного потенциала. Этот процесс также продолжается до достижения порога срабатывания, в результате чего триггер снова переключится в состояние с положительным напряжением на выходе. Таким образом, на выходе мультивибратора образуются прямоугольные импульсы, а на конденсаторе – сигнал экспоненциальной формы.



#### 4.5 Функциональный генератор

Для получения сигнала треугольной и прямоугольной формы (одновременно) может быть использован функциональный генератор, схема которого показана на рисунке 52. Он состоит из триггера Шмитта, выполненного на левом (по схеме) операционном усилителе и интегратора, выполненного на правом (по схеме) операционном усилителе, которые включены в кольцо.

Рассмотрим принцип действия функционального генератора более подробно. Предположим, что в исходном состоянии на выходе интегратора был нулевой потенциал, а триггер Шмитта находится в состоянии, в котором напряжение на выходе положительно. Так как на вход интегратора подается положительное напряжение, напряжение на его выходе станет линейно уменьшаться, пока не достигнет порогового напряжения срабатывания триггера. Это вызовет переключение триггера в другое состояние, в котором напряжение на его выходе отрицательно, а напряжение на выходе интегратора станет линейно возрастать. Этот процесс также продолжается до достижения порога срабатывания, в результате чего триггер снова переключится в состояние с положительным напряжением на выходе. Таким образом, на выходе триггера Шмитта образуются прямоугольные импульсы, а на выходе интегратора – сигнал треугольной формы.

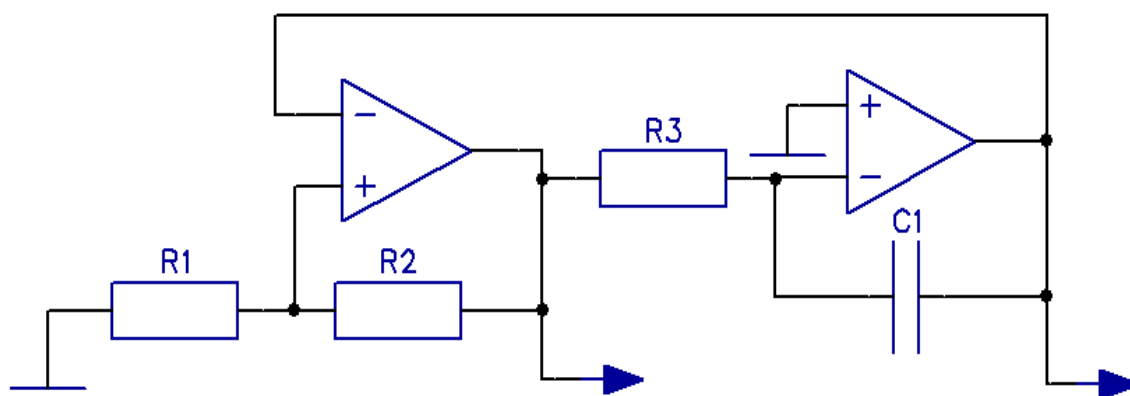


Рисунок 52 – Функциональный генератор

## 5. Устройства цифровой техники

### 5.1 Логические элементы

Наряду с аналоговой электроникой, рассмотренной нами ранее, широко используются различные устройства цифровой техники. Цифровая техника вытеснила аналоговую во многих областях электроники благодаря большей помехозащищенности, высокой эффективности и надежности[4].

Основу цифровых схем составляют логические элементы – устройства, выполняющие элементарные логические операции. Каждый из логических элементов имеет один или несколько входов и один выход. Каждый из входов и выходов может находиться в одном из двух логических состояний, которым соответствуют определенные уровни напряжения: высоком (единичном) и низком (нулевом).

Рассмотрим основные логические операции более подробно. Самой простой операцией является отрицание. Таблица истинности для данной операции приведена в таблице.

Таблица 1 – логическая функция «НЕ»

| X | $\overline{X}$ |
|---|----------------|
| 0 | 1              |
| 1 | 0              |

Данную логическую функцию выполняет логический элемент «НЕ», условное графическое обозначение которого приведено на рисунке 53.

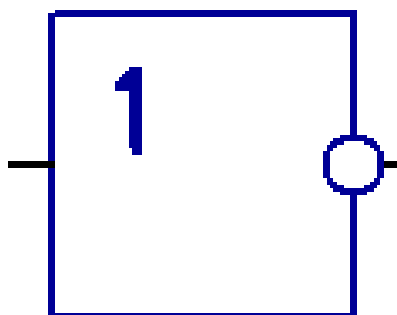


Рисунок 53 – Логический элемент «НЕ»

Одной из бинарных логических операций (имеющих два аргумента) является операция логического умножения, иначе называемая операцией «И». Ее таблица истинности приведена в таблице 2.

Как видно, данная операция истинна только тогда, когда истинны оба ее аргумента. Легко заметить, что она полностью совпадает с операцией арифметического умножения[5].

Таблица 2 – логическая функция «И»

| X | Y | $X \wedge Y$<br>(«И») |
|---|---|-----------------------|
| 0 | 0 | 0                     |
| 0 | 1 | 0                     |
| 1 | 0 | 0                     |
| 1 | 1 | 1                     |

Функцию логического умножения выполняет логический элемент «И», условное графическое обозначение которого приведено на рисунке 54.

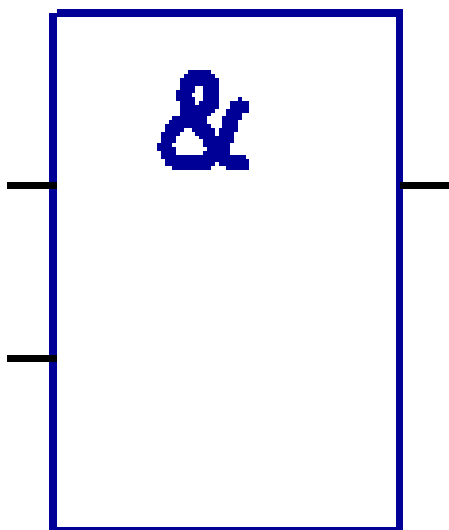


Рисунок 54 – Логический элемент «И»

Еще одной базовой логической операцией является операция логического сложения, иначе называемая операцией «ИЛИ». Ее таблица истинности приведена в таблице 3. Как видно, данная операция истинна тогда, когда истинным является хотя бы один ее аргумент.

Таблица 3 – логическая функция «ИЛИ»

| X | Y | $X \vee Y$<br>(«ИЛИ») |
|---|---|-----------------------|
| 0 | 0 | 0                     |
| 0 | 1 | 1                     |
| 1 | 0 | 1                     |
| 1 | 1 | 1                     |

Функцию логического сложения выполняет логический элемент «ИЛИ», условное графическое обозначение которого приведено на рисунке 55.

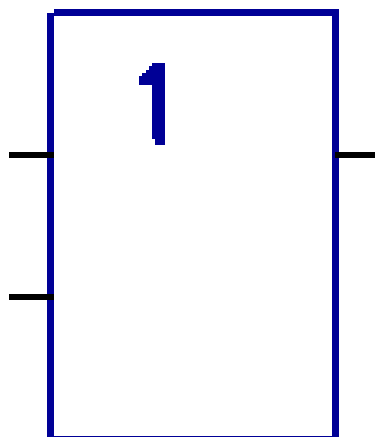


Рисунок 55 – Логический элемент «ИЛИ»

Важной логической функцией является операция «Исключающее ИЛИ», которая истинна, если ее операнд не равны между собой и ложна, если они равны. Таблица истинности для этой операции приведена в таблице 4.

Таблица 4 – логическая функция «Исключающее ИЛИ»

| X | Y | $X \oplus Y$ (Искл. «ИЛИ») |
|---|---|----------------------------|
| 0 | 0 | 0                          |
| 0 | 1 | 1                          |
| 1 | 0 | 1                          |
| 1 | 1 | 0                          |

Логическую функцию «Исключающее ИЛИ» выполняет логический элемент «Исключающее ИЛИ», условное графическое обозначение которого представлено на рисунке 56.

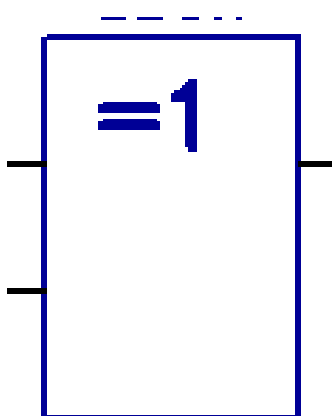


Рисунок 56 – Логический элемент «Исключающее ИЛИ»

Часто используются логические функции, представляющие собой отрицание одной из ранее рассмотренных функций. Одна из таких логических операций –

«И-НЕ», представляющая собой отрицание логического умножения. Таблица истинности, соответствующая данной логической операции приведена в таблице.

Таблица 5 – логическая функция «И-НЕ»

| X | Y | $\overline{X \wedge Y}$ («И-НЕ») |
|---|---|----------------------------------|
| 0 | 0 | 1                                |
| 0 | 1 | 1                                |
| 1 | 0 | 1                                |
| 1 | 1 | 0                                |

Логическую операцию «И-НЕ» выполняет логический элемент «И-НЕ», условное графическое обозначение которого приведено на рисунке 57. Следует отметить, что на условном графическом обозначении отрицание обозначается окружностью около выхода, в остальном же обозначение данного логического элемента полностью совпадает с обозначением элемента «И»

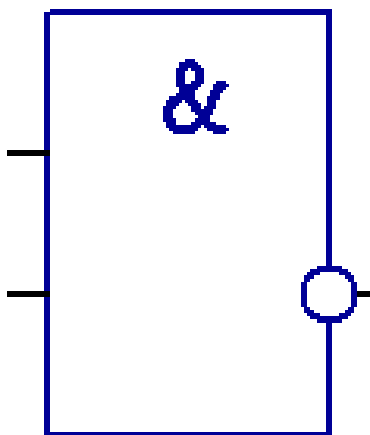


Рисунок 57 – Логический элемент «И-НЕ»

Также часто применяется отрицание логического сложения – функция «ИЛИ-НЕ», таблица истинности которой приведена в таблице.

Таблица 6 – логическая функция «ИЛИ-НЕ»

| X | Y | $\overline{X \vee Y}$ («ИЛИ-НЕ») |
|---|---|----------------------------------|
| 0 | 0 | 1                                |
| 0 | 1 | 0                                |
| 1 | 0 | 0                                |
| 1 | 1 | 0                                |

Данную функцию выполняет логический элемент «ИЛИ-НЕ», условное графическое обозначение которого приведено на рисунке 58.

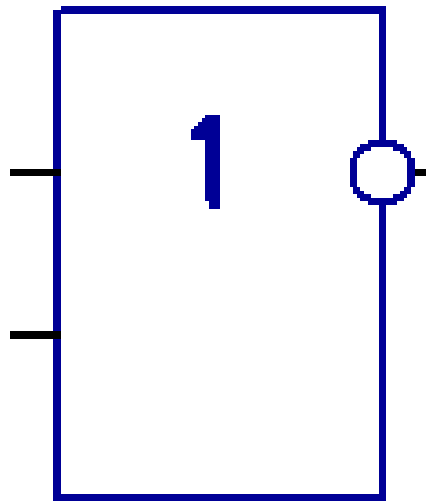


Рисунок 58 – Логический элемент «ИЛИ-НЕ»

Рассмотренные нами логические элементы могут объединяться в устройства, реализующие более сложные логические функции. Существуют также логические элементы с большим числом входов (до восьми), но выполняемые ими логические функции аналогичны рассмотренным.

## 5.2 Логические устройства последовательного типа

Логическими устройствами последовательного типа называют такие устройства, поведение которых определится не только сигналами, подаваемыми на входы и состоянием, в котором устройство находится в данный момент. Обычно такие устройства содержат цепи обратной связи, подающие сигналы с выходов устройства на его входы.

Простейшим устройством последовательного типа является RS-триггер. Схема такого триггера, выполненного на логических элементах «И-НЕ» приведена на рисунке 59. Триггер содержит два входа-  $R$  и  $S$  и два выхода  $Q$  и  $\bar{Q}$ , называемые прямым и инверсным выходами, соответственно.

Рассмотрим работу данного триггера более подробно. Предположим, что оба входа триггера находятся в нулевом состоянии. В этом случае оба выхода триггера согласно логике работы входящих в его состав элементов перейдут в единичное состояние. Теперь подадим высокий логический уровень на вход  $R$ . При этом верхний (по схеме) логический элемент переключится в нулевое состояние, а уровень логического нуля с его выхода переведет нижний (по схеме) элемент в нулевое состояние. Если подать высокий логический уровень на вход  $S$ , в нулевое состояние перейдет уже нижний (по схеме) элемент, а верхний окажется в единичном состоянии.

В случае подачи высокого логического уровня на оба входа триггера он сохраняет состояние, в котором находился. Рассмотренные процессы отражены в таблице 7.

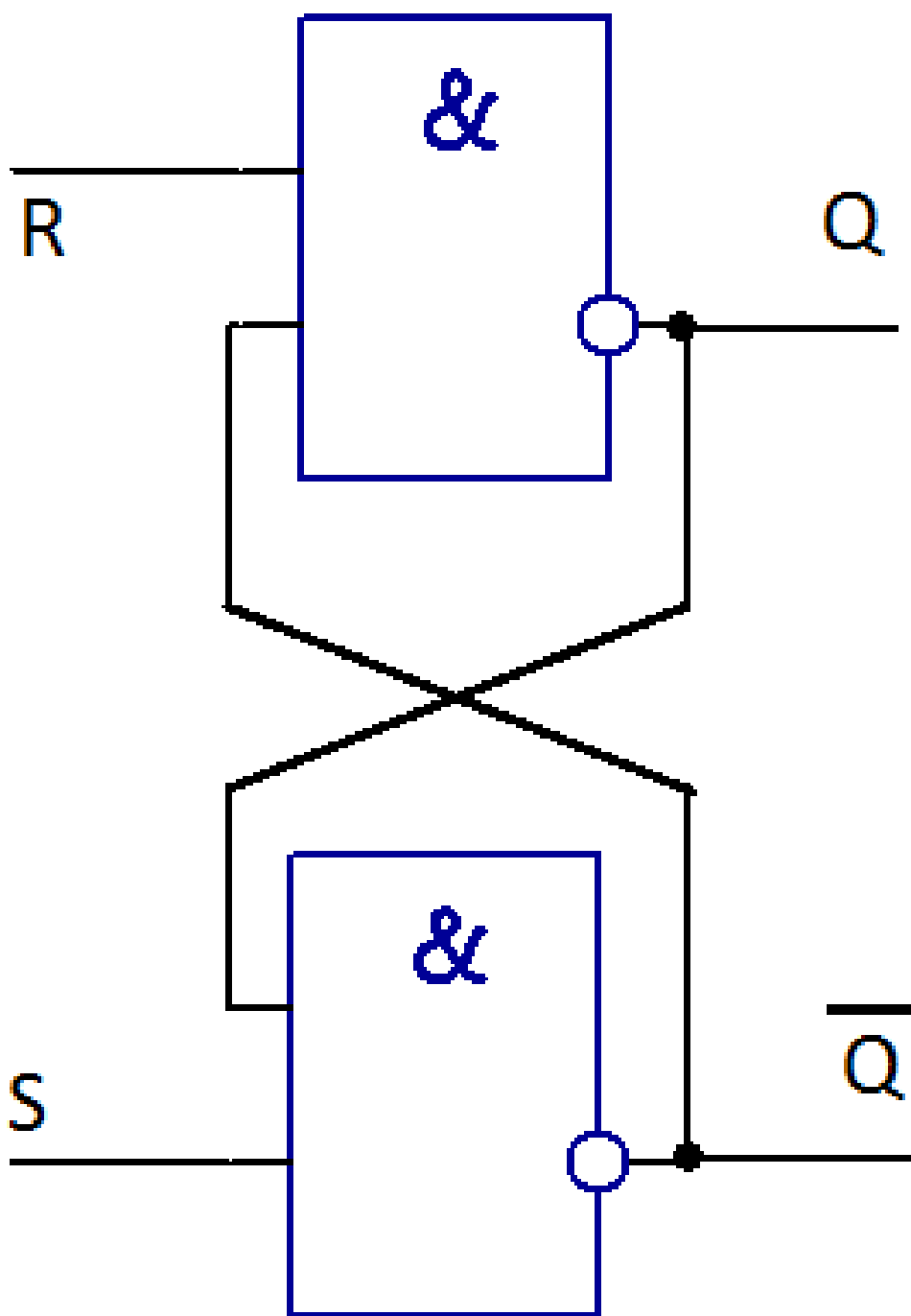


Рисунок 59 – RS-триггер

Таблица 7 – таблица истинности RS-триггера

| R | S | Q                    | $\bar{Q}$ |
|---|---|----------------------|-----------|
| 0 | 0 | 1                    | 1         |
| 0 | 1 | 1                    | 0         |
| 1 | 0 | 0                    | 1         |
| 1 | 1 | Предыдущее состояние |           |

Легко заметить, что RS-триггер выполняет функцию памяти: подачей определенных логических уровней на входы можно менять состояние триггера,

стирать записанную информацию (подачей логических нулей на оба входа), хранить записанную информацию, подавая высокие логические уровни на входы. Недостатком RS-триггера является то, что управление хранением информации и передача самой информации в триггер осуществляется по одним и тем же входам, что бывает очень неудобно практически. Для устранения этого недостатка был разработан D-триггер, принципиальная схема которого показана на рисунке 60.

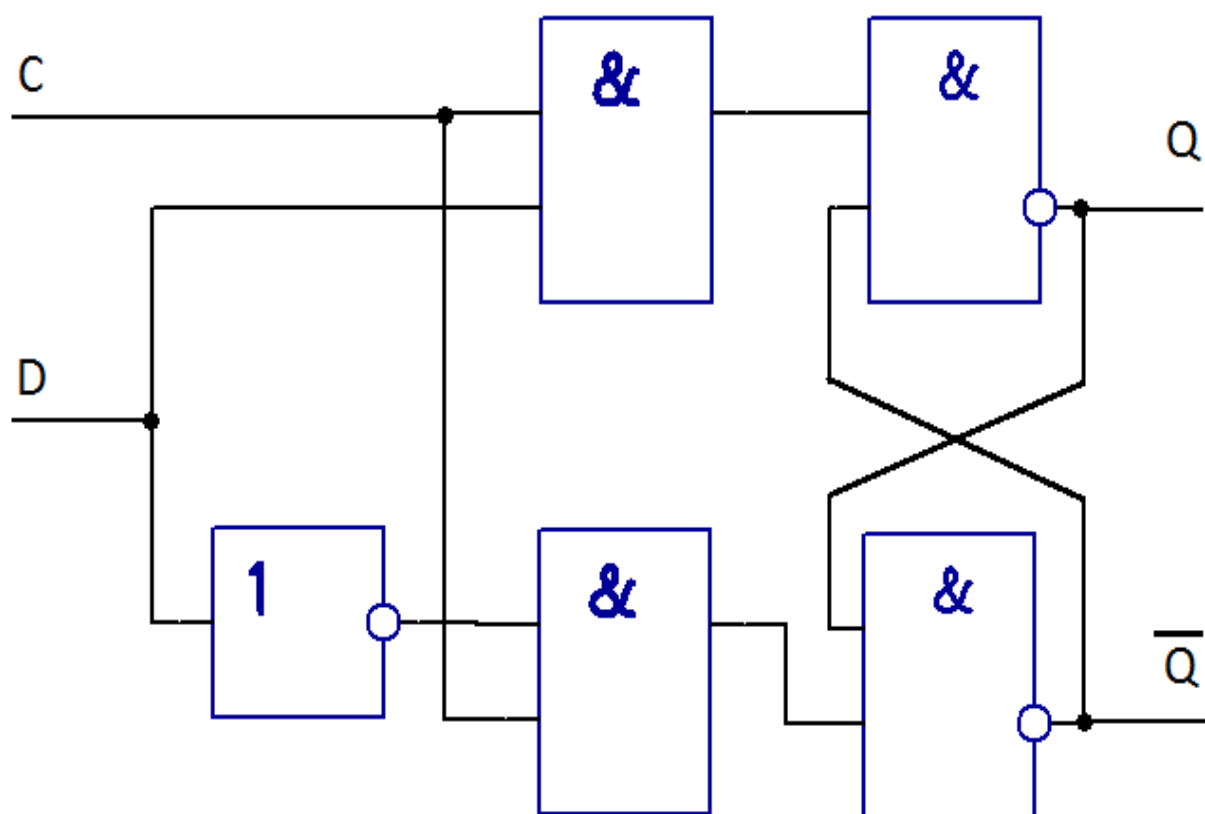


Рисунок 60 – D-триггер

Легко заметить, что данный триггер состоит из RS-триггера, дополненного логическими элементами. Он имеет два входа: информационный D и вход тактового сигнала C.

Логика работы D-триггера очень проста: при подаче высокого уровня на вход C он переходит в состояние, соответствующее логическому уровню на входе D, а когда вход C находится в нулевом состоянии, триггер сохраняет свое состояние. Таким образом в данном триггере информационный и логический входы разделены, что позволяет более удобно применять его при проектировании устройств цифровой техники.

Условное графическое обозначение D-триггера приведено на рисунке 61.

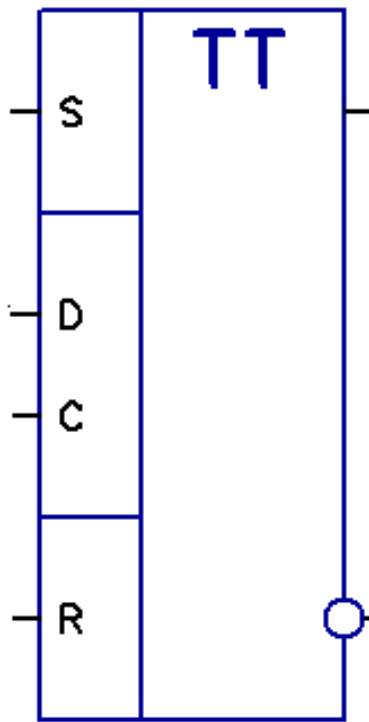


Рисунок 61 – условное графическое обозначение D-триггера

Другим триггером, созданным на основе RS-триггера, является триггер типа Т. Принципиальная схема этого триггера приведена на рисунке 62. Данный триггер, в отличие от D-триггера не имеет информационного входа. Логика работы триггера типа Т заключается в том, что он при поступлении каждого импульса на вход С меняет свое состояние на противоположное.

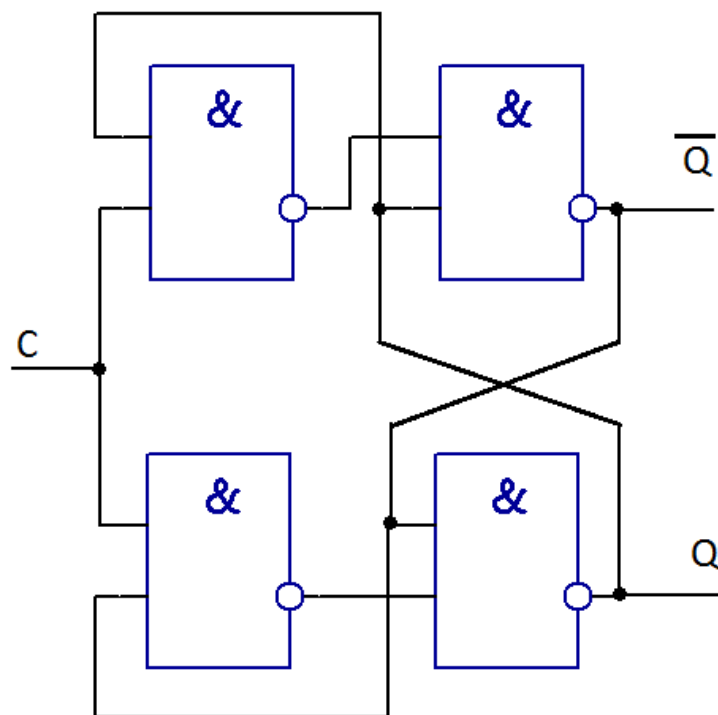


Рисунок 62 – Т-триггер

Одним из видов логических устройств последовательного типа являются регистры. Они используются для хранения нескольких бит информации, для преобразования последовательного кода в параллельный и наоборот, а также для многих других целей.

Рассмотрим работу простейшего трехбитового регистра, принципиальная схема которого приведена на рисунке 63.

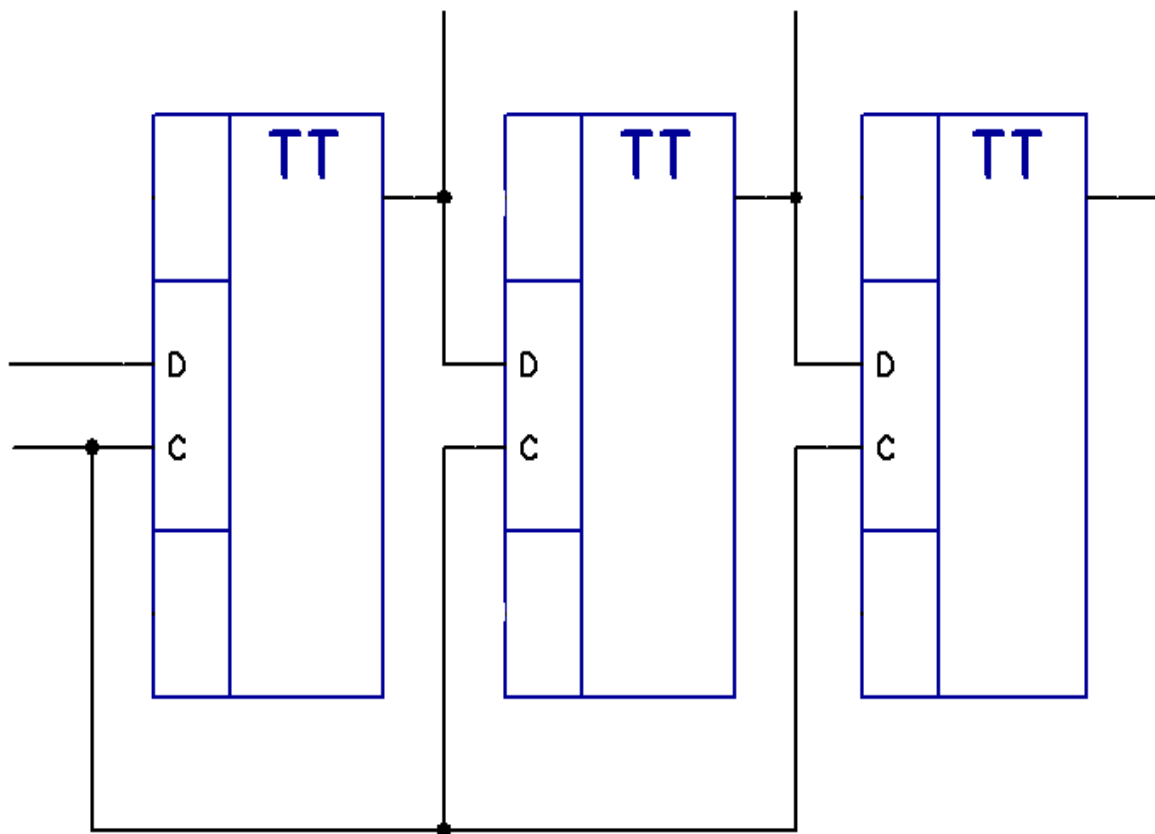


Рисунок 63 – Принципиальная схема регистра

Данный регистр состоит из трех триггеров типа D, включенных последовательно. Он имеет вход тактового сигнала С, вход данных D и три выхода Q1, Q2 и Q3. Тактовый сигнал со входа С подается одновременно на входы С всех триггеров. При подаче высокого уровня на вход С регистра первый триггер запоминает состояние, которое было на этот момент на входе D регистра, второй триггер запоминает состояние первого триггера. А третий – второго. Таким образом, данные, записанные в регистре, «сдвигаются» на одну позицию вправо.

## **Заключение**

В данном пособии были рассмотрены основные вопросы, касающиеся расчета и проектирования узлов питания, усилителей, генераторов сигналов и устройств цифровой техники. Одной из целей, которая ставилась авторами при разработке пособия является устранение «белых пятен» в изложении материала, принятом в традиционной литературе, поэтому в данном пособии и приведены достаточно подробные выводы основных формул, что редко можно встретить даже в специализированной литературе по электронике, хотя, в учебной литературе по другим областям физики вывод формул приводится обязательно. Это позволит обучающимся усваивать материал в более дружественной форме и не относиться к расчетным формулам как к некоему тайному знанию. Тем не менее, современная электроника охватывает значительно большее количество областей, которые практически невозможно изложить в объеме данного учебно-методического пособия. В связи с этим, авторы рекомендуют обучающимся не пренебрегать рекомендуемой для изучения литературой и воспринимать весь спектр источников информации по дисциплине комплексно, развивая при этом навыки поиска и систематизации знаний, что является одной из важнейших компетенций современного специалиста в любой области.

### **Список использованных источников**

1. Лачин В.И., Савелов Н.С. Электроника. Феникс: Ростов-на-Дону, 2002. – 572, с. 364-369.
2. Платт Ч. Электроника: логические микросхемы, усилители и датчики. БХВ-Петербург: СПб, 2015 - 448 с. , с 10-13
3. Зиновьев Г.С. Силовая Электроника М.:Юрайт, 2015 - 668 с. с. 450-475
4. Миленина С.А. Электротехника, электроника и схемотехника. Учебник и практикум М.:Юрайт, 2015, 400 с. , с. 120-135
5. Богомолов С.А. Основы электроники и цифровой схемотехники М.:Академия, 2014 - 208 с., с.47-75