

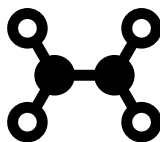


# ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ ДЕСЯТОЕ ЗАНЯТИЕ





<b>ШИМ .....</b>	<b>3</b>
Общая информация .....	3
Характеристики .....	4
Формирование ШИМ .....	7
Применение.....	9
Пример на 555 таймере .....	10
Пример на компараторе .....	12



## Ш И М

Модуляция - это процесс изменения параметров одного сигнала (несущего) с использованием другого сигнала (модулирующего или информационного). В области связи широко используются различные методы модуляции, такие как частотная, амплитудная и фазовая модуляция. В силовой электронике и микропроцессорной технике популярна широтно-импульсная модуляция.

При широтно-импульсной модуляции амплитуда, частота и фаза несущего сигнала остаются неизменными. Однако длительность (ширина) прямоугольных импульсов изменяется под воздействием информационного сигнала. Этот метод часто обозначается аббревиатурой PWM (Pulse-Width Modulation) в англоязычной технической литературе.

Широтно-импульсная модуляция находит широкое применение, например, в управлении электронными устройствами, такими как переменные частотные преобразователи и системы управления моторами. Она позволяет регулировать мощность или яркость сигнала, сохраняя при этом остальные характеристики несущего сигнала неизменными.

### ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Существуют цифровые и аналоговые реализации ШИМ. Принцип их работы остается одинаковым, независимо от вида исполнения, и заключается в сравнении двух видов сигналов:

- опорное напряжение (часто представленное в виде пилообразного или треугольного сигнала);
- входное управляющее напряжение.

Эти сигналы подаются на компаратор, где происходит их сравнение. Если мгновенный уровень несущей выше уровня модулирующего сигнала, то на выходе компаратора формируется низкий сигнал (ноль), а если уровень несущей ниже уровня модулирующего сигнала, то на выходе компаратора появляется высокий сигнал (единица). В результате получается дискретный сигнал с частотой, соответствующей частоте несущей (пилообразной или треугольной), и длительностью импульса, которая пропорциональна уровню модулирующего напряжения.

Выходное напряжение  $V_{out}$  ШИМ представляет собой последовательность импульсов. Регулируя длительность этих импульсов, мы можем управлять средним значением выходного напряжения ШИМ. На рис. 1 приведен пример модуляции, где зеленая осциллограмма - это сигнал несущей (пилообразный), красная осциллограмма - это

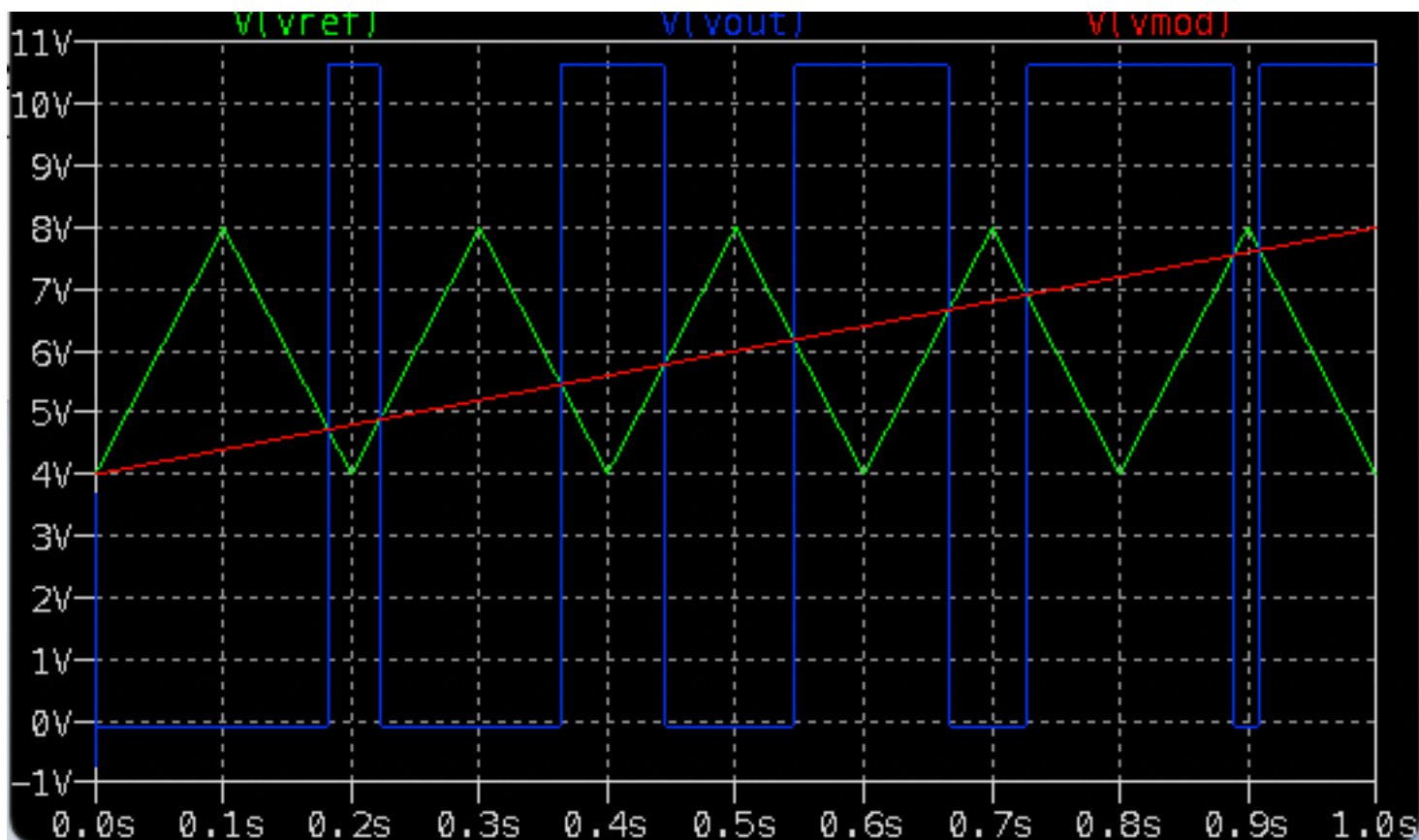


Рис. 1

модулирующий сигнал (управляющий, линейно-возрастающий), синяя осциллограмма – это выходной сигнал. Длительность выходных импульсов изменяется пропорционально уровню выходного сигнала.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ

**Амплитуда** – измеряется в вольтах и определяется необходимостью достижения номинального напряжения питания нагрузки.

**Частота** в Гц, которая определяет точность управления. Точность регулирования возрастает с увеличением частоты. Однако важно учесть, что частота не должна опускаться ниже времени реакции устройства, которым управляют с помощью метода широтно-импульсной модуляции (ШИМ), так как это может вызвать заметные пульсации в регулируемом параметре.

**Скважность импульсных сигналов** (или коэффициент заполнения) играет также важную роль в этом методе. Она определяет отношение длительности активной части импульса к его полному времени.

Когда речь идет о частоте в методе широтно-импульсной модуляции (ШИМ), важно учитывать несколько аспектов:

**Коммутационные потери** возникают из-за ограниченной скорости переключения ключей. В состоянии «заперто», на ключе происходит падение всего напряжения питания, но почти не протекает ток. В состоянии «открыто», через ключ проходит полный ток нагрузки, но падение напряжения на нем низкое из-за низкого переходного сопротивления

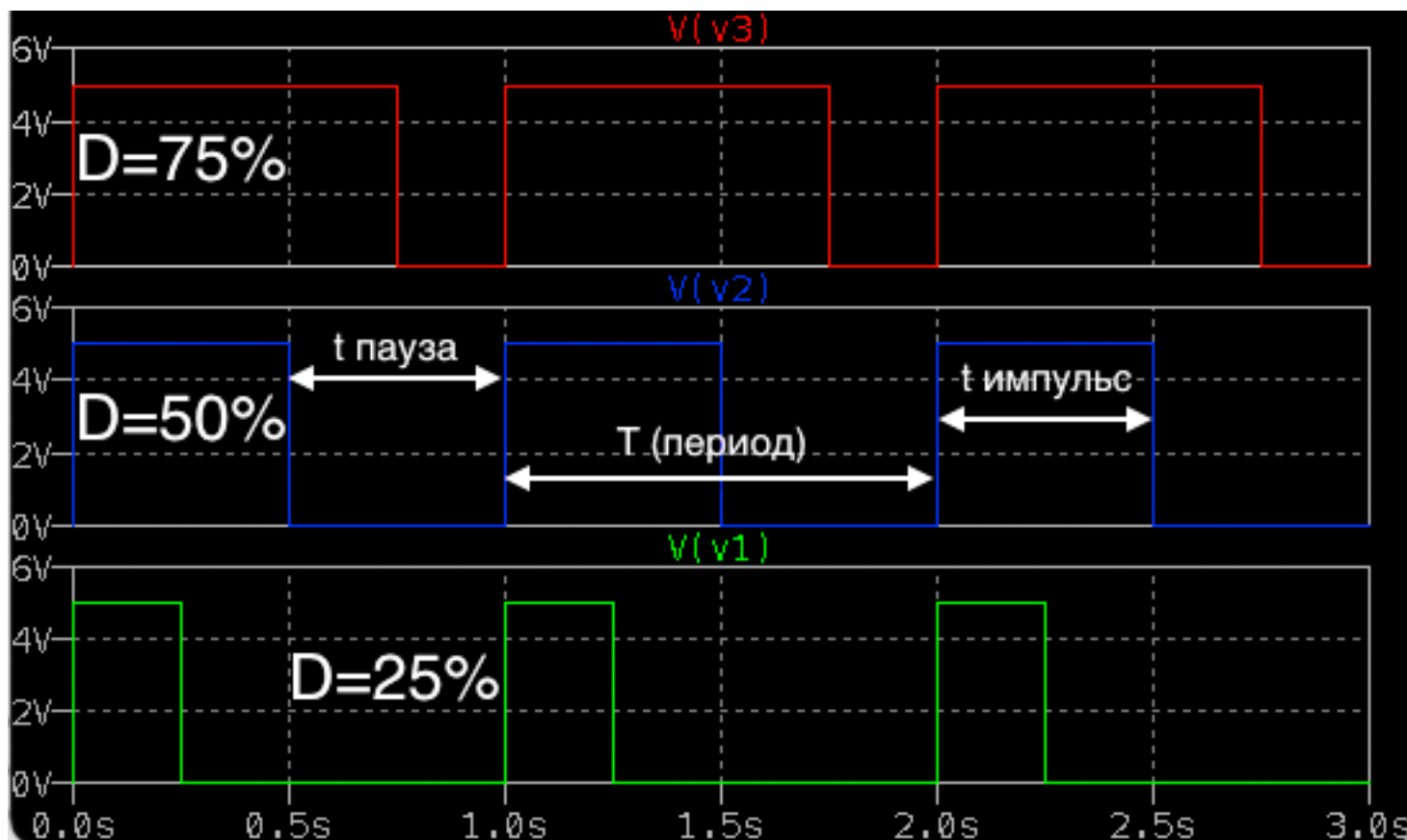


Рис. 2

(единицы Ом). Это приводит к незначительным потерям мощности как в одном, так и в другом состоянии. Однако переключение между этими состояниями, хоть и происходит быстро, но не мгновенно. Во время этого переключения возникает значительное напряжение и протекает большой ток через частично открытый элемент, что приводит к высоким потерям мощности. Чем выше частота ШИМ, тем больше таких переключений происходит за единицу времени, и, следовательно, увеличиваются потери на тепло. Поэтому для построения ключей важно использовать быстродействующие элементы.

Частота ШИМ при управлении, например, электродвигателями, часто должна быть выше частоты, воспринимаемой человеком, которая составляет примерно 25 кГц и выше. Это важно, так как при более низких частотах ШИМ может возникать неприятный свист, который может быть воспринят человеком.

Важно отметить, что эти требования могут находиться в противоречии друг с другом, и выбор оптимальной частоты ШИМ часто представляет собой поиск компромисса, учитывающего различные ограничения и требования конкретной задачи.

На рис.2 представлены сравнительные осциллограммы трех различных импульсов, которые имеют одинаковую амплитуду 5 Вольт и одинаковый период. На каждом графике можно увидеть, что при одинаковом периоде  $T$  время импульса ( $t_{\text{импульс}}$ ) и время паузы ( $t_{\text{пауза}}$ ) разное. Если взять к примеру среднюю осциллограмму синего цвета и применить к схеме на рис. 3 <sup>1</sup>, то можно увидеть, что половину периода ключ замкнут. Когда ключевой элемент находится в замкнутом положении, то на планируемую нагрузку поступает напряжение от источника питания. На второй части полупериода ( $t_{\text{пауза}}$ )

<sup>1</sup> На данной схеме умышленно опущены некоторые элементы для упрощения восприятия концепции

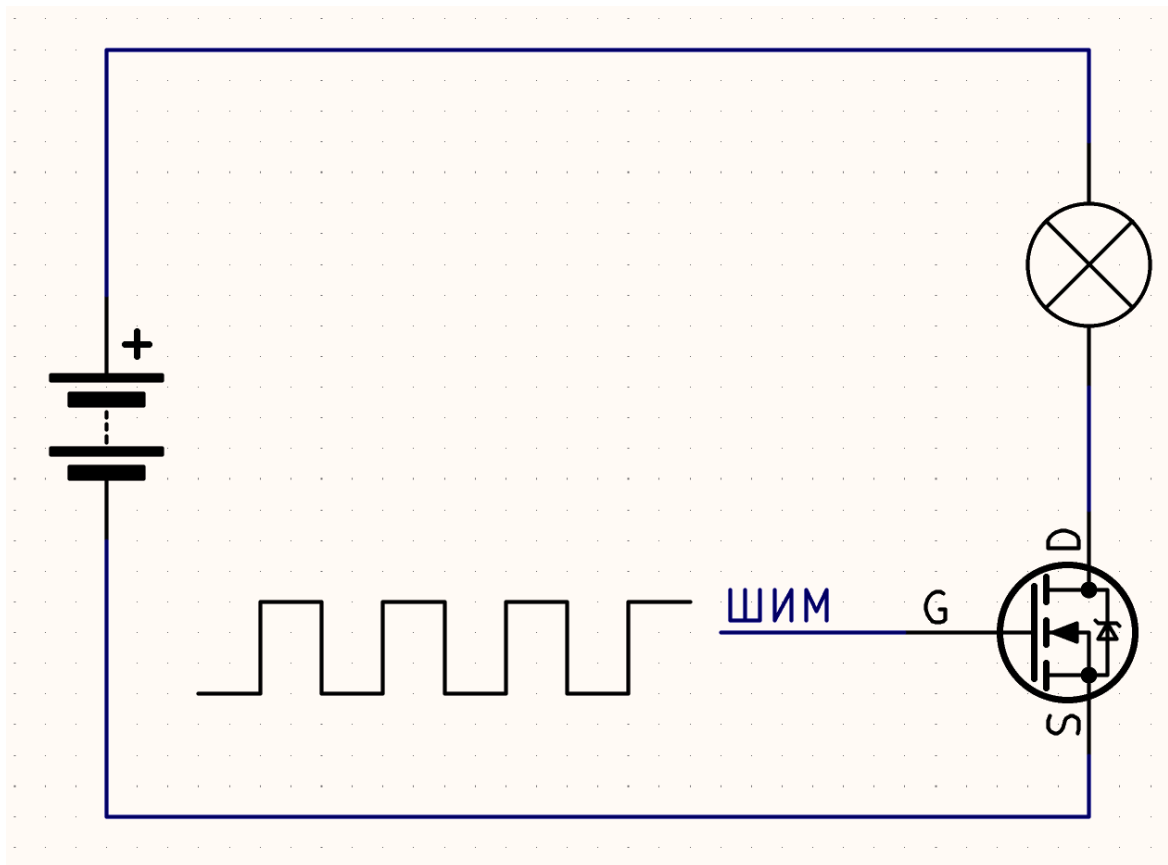


Рис. 3

ключевой элемент находится в состоянии закрытом и на нагрузке соответственно питание отсутствует.

В результате на нагрузке получается напряжение результирующее  $U_{рез}$  (среднее), что может быть выражено, как:

$$U_{рез} = U_{in} \frac{t_{импульс}}{T}$$

Как уже отмечалось ранее, в данном случае отношение  $t_{импульс}$  (время импульса) к  $T$  (периоду), называется «**коэффициент заполнения**» **D**. К этой характеристике есть и обратная, под названием «**скважность**» **S**:

$$S = \frac{1}{D} = \frac{T}{t_{импульс}}$$

На практике удобно измерять параметры широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с использованием коэффициента заполнения (D), который выражается в процентах. Коэффициент заполнения показывает, какую часть периода сигнала транзистор находится в открытом состоянии.

1.  $D = 100\%$ : Это означает, что транзистор всегда находится в открытом состоянии в течение всего периода сигнала. Это соответствует максимальной амплитуде сигнала.

2.  $D = 50\%$ : Здесь транзистор находится в открытом состоянии ровно половину времени внутри одного периода сигнала. Такая форма называется меандром, и сигнал имеет форму прямоугольных импульсов, где длительность импульса равна длительности "паузы".

3.  $D = 0\%$ : Транзистор всегда закрыт, и на выходе ноль. Это соответствует минимальной амплитуде сигнала.

Соответственно, если изменять коэффициента заполнения ( $D$ ) от 0 до 100%, то изменяется величина результирующего напряжения на выходе от 0 Вольт до напряжения источника питания  $U_{in}$ :

$$U_{рез} = U_{in} * D$$

## ФОРМИРОВАНИЕ ШИМ

Для создания нужной продолжительности импульса, который подается на транзистор, чтобы открыть его, используют источники опорного и задающего напряжения, а также компаратор.

Упрощенно, компаратор имеет три вывода: два входа и один выход. Компаратор работает следующим образом. Если величина напряжения на неинвертирующем входе «+» выше, чем на инвертирующем входе «-», то на выходе компаратора будет сигнал высокого уровня. В противном случае – низкого уровня. Для примера будем использовать следующие сигналы: пилообразный будет несущим  $V_{ref}$ , а линейный возрастающе-убывающий - модулирующим  $V_{mod}$  (управляющим). Схема для данного примера приведена на рис. 4. Результат симуляции на рис. 5, где показаны входящие сигналы  $V_{ref}$  и  $V_{mod}$  и исходящий  $V_{out}$  на выходе компаратора.

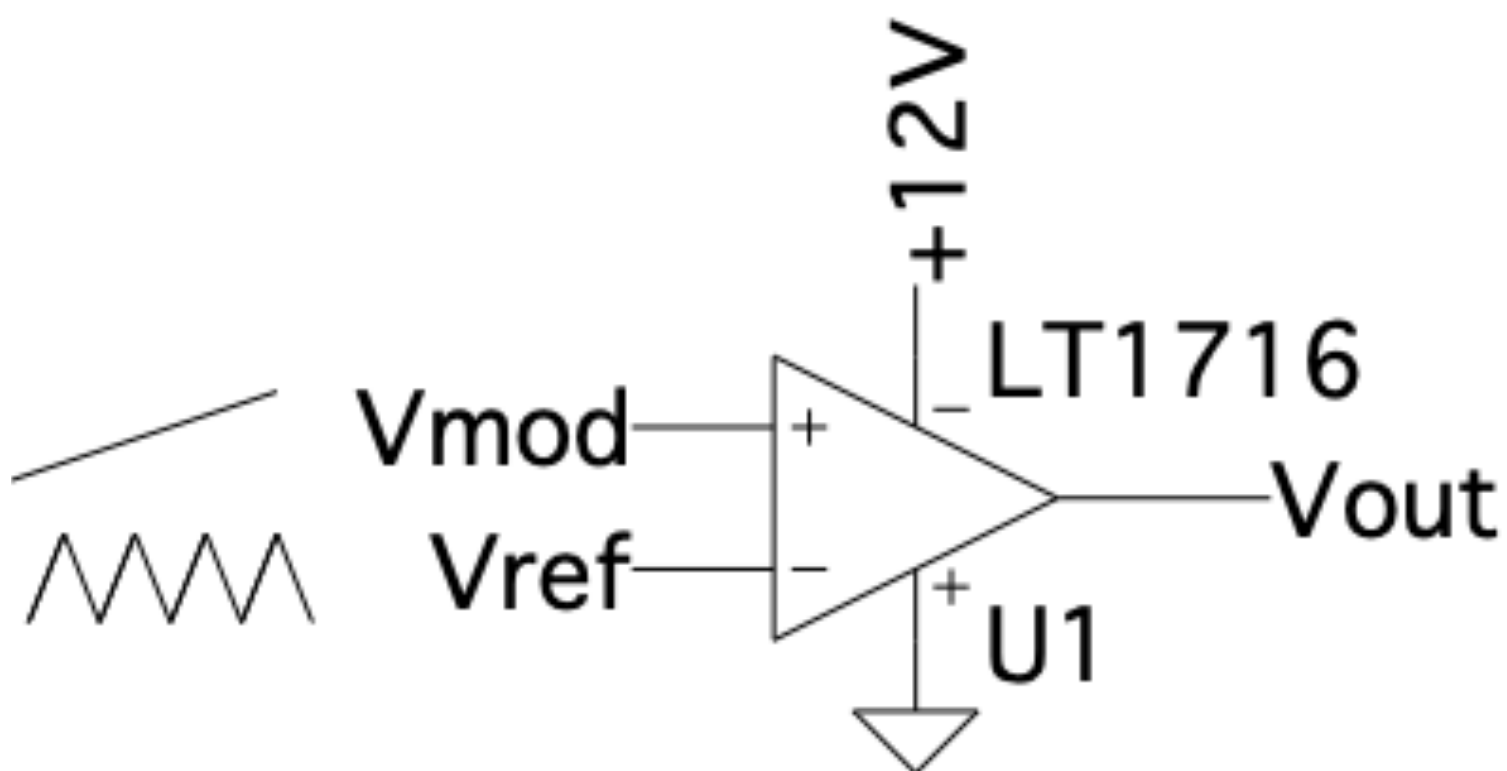


Рис. 4

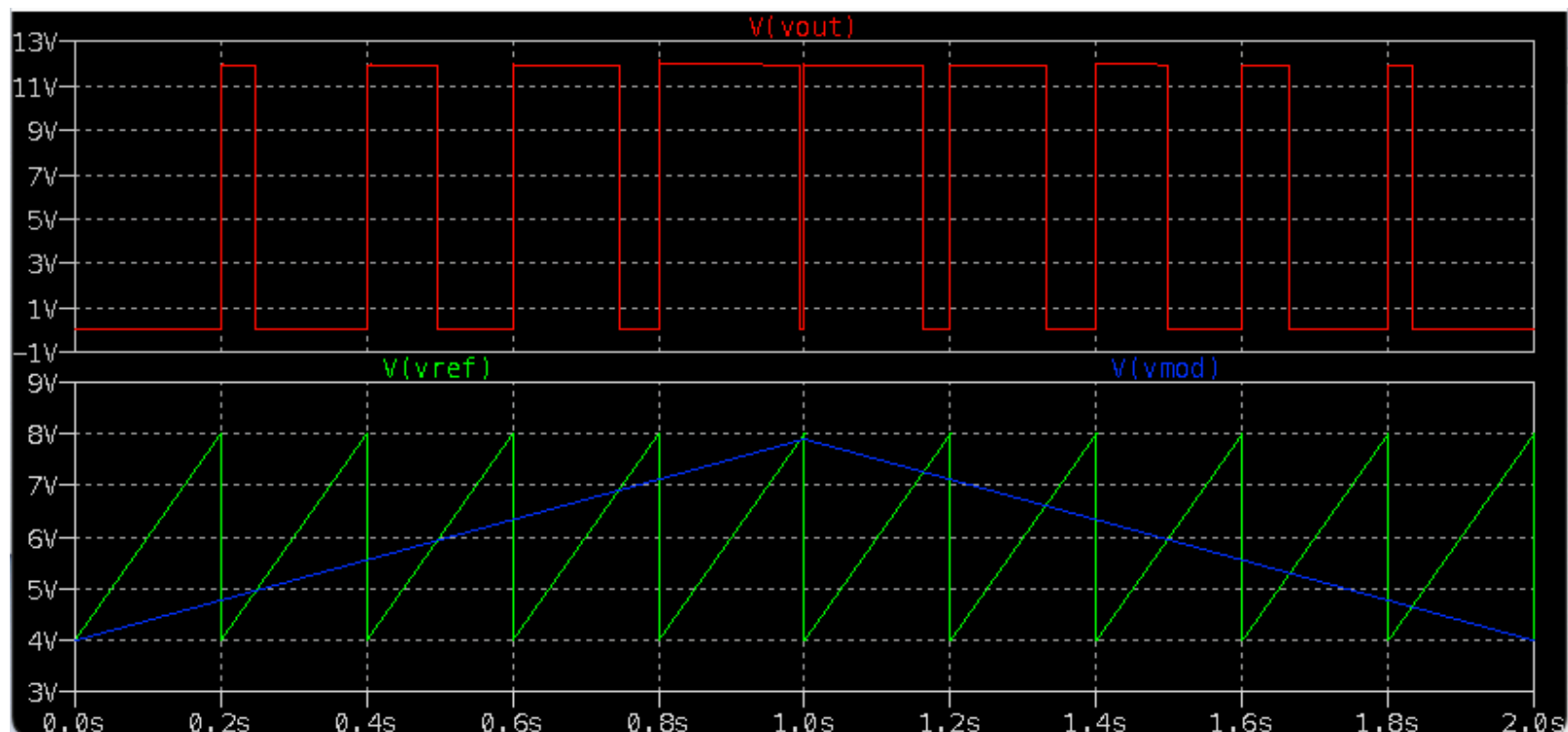


Рис. 5

Как можно заметить, то на выходе следует сначала импульс, а затем пауза, это следует из того, что на неинвертирующий вход подается модулирующий сигнал  $V_{mod}$ , и пока он меньше, чем несущая, то  $V_{out}$  в низком уровне. Если подать на неинвертирующий вход опорный сигнал  $V_{ref}$ , а на инвертирующий вход сигнал модулирующий  $V_{mod}$ , то на выходе будет формироваться сигнал начиная с паузы, затем следует импульс, что подтверждается результатом симуляции на рис. 6.

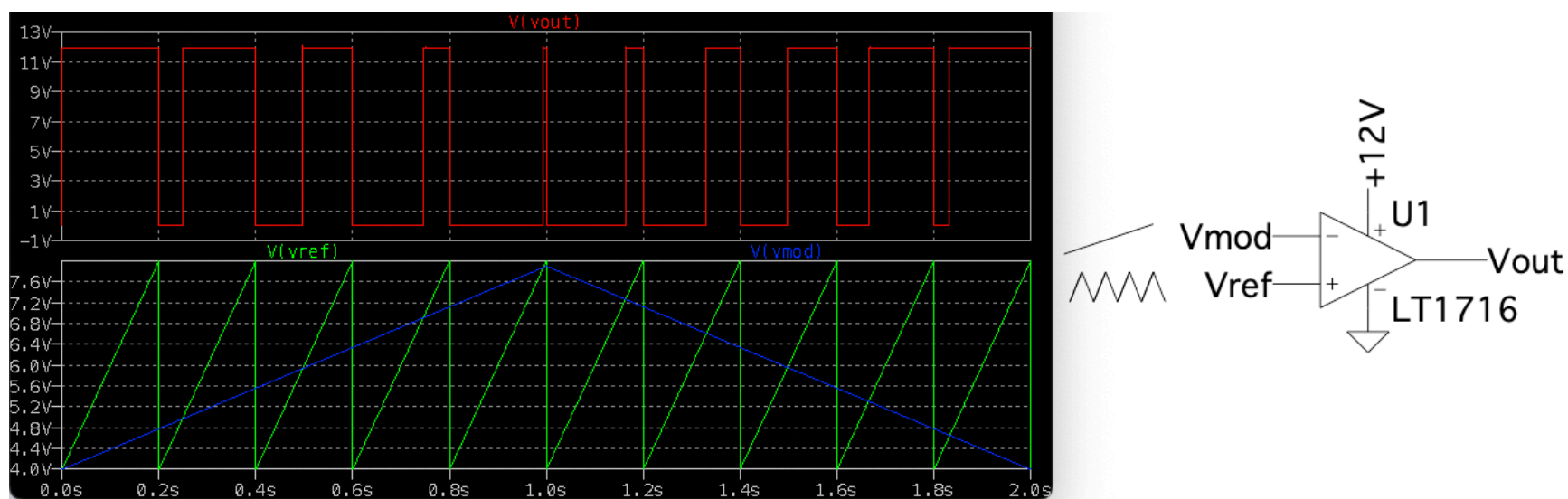


Рис. 6

Изменяя значение задаваемого сигнала, можно контролировать коэффициент заполнения и, следовательно, среднее напряжение на нагрузке.

Для увеличения эффективности системы, частоту опорного сигнала стремятся сделать максимальной. Это позволяет снизить параметры дросселей и конденсаторов (которые на схеме не показаны), что в свою очередь приводит к уменьшению массы и габаритов импульсного блока питания.



## ПРИМЕНЕНИЕ

Метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ) широко применяется для управления различными системами, такими как изменение яркости света, скорости вращения двигателей и контролем силовых транзисторов в импульсных блоках питания. Особенно активно ШИМ используется в системах управления яркостью светодиодов. Благодаря своей низкой инерционности, светодиоды могут быстро переключаться, вспыхивая и погасая на частотах в несколько десятков кГц. Это позволяет человеческому глазу воспринимать светодиоды как постоянно горящие, а яркость света регулируется путем изменения длительности импульсов (время, в течение которого светодиод находится в открытом состоянии) в течение одного периода.

С распространением светодиодных ламп, предназначенных для работы с напряжением 220В, возникла необходимость повышения надежности их работы при изменяющемся входном напряжении. Решение этой проблемы было найдено в виде универсальной микросхемы - драйвера питания, работающей по принципам широтно-импульсной (ШИМ) или частотно-импульсной модуляции (ЧИМ). Эти микросхемы сравнивают поступающее сетевое напряжение с опорным напряжением, формируя на выходе сигнал ШИМ или ЧИМ, параметры которого могут быть настроены с помощью внешних резисторов. Некоторые из таких микросхем допускают внешний аналоговый или цифровой сигнал управления. В результате на светодиоды поступает сглаженный ток, который обеспечивается дросселем, который является одним из обязательных элементов подобных схем.

ШИМ нашел широкое применение во всех жидкокристаллических дисплеях (LCD) с подсветкой на светодиодах. Однако стоит отметить, что во многих мониторах с LED-подсветкой ШИМ-преобразователи работают на частотах в сотни герц, что оказывает негативное воздействие на зрение пользователей компьютеров.

Широтно-импульсная модуляция в цифровой интерпретации представляет собой одну из многочисленных функций микроконтроллера (МК). Микроконтроллер, работая с цифровыми данными, способен выдавать на своих выходах только высокий (100%) или низкий (0%) уровень напряжения. Однако в большинстве ситуаций требуется управлять нагрузкой, плавно изменяя уровень напряжения на выходе МК. Например, это может понадобиться для регулировки скорости вращения двигателя или изменения яркости светодиода.

Как решается эта проблема? Для получения на выходе микроконтроллера любого значения напряжения в диапазоне от 0 до 100% используется метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Этот метод основан на передискретизации, при которой заданная частота переключения в несколько раз превышает реакцию управляемого устройства.

Путем изменения скважности импульсов можно варьировать среднее значение выходного напряжения.

Процесс регулировки обычно осуществляется на частотах в десятки-сотни кГц, что обеспечивает плавное и точное управление.

Для получения ШИМ-сигнала на выводах микроконтроллера можно воспользоваться двумя методами: аппаратным и программным. Каждый микроконтроллер обычно имеет встроенный таймер, способный генерировать ШИМ-импульсы на определенных выводах, что позволяет реализовать **аппаратную** генерацию ШИМ-сигнала.

С другой стороны, получение ШИМ-сигнала **программно** предоставляет больше гибкости в плане разрешения и позволяет использовать больше выводов. Однако этот метод может потреблять больше ресурсов микроконтроллера и требовать дополнительного использования памяти. Важно отметить, что в цифровой ШИМ количество импульсов за период может быть разным, и их моменты включения могут находиться в любой части периода. Уровень выходного сигнала определяется суммарной длительностью всех импульсов за период.

Однако **важно** помнить, что каждый дополнительный импульс означает переключение силового транзистора из открытого состояния в закрытое, что может привести к увеличению потерь энергии во время переключений. Этот аспект следует учитывать при выборе метода генерации ШИМ-сигнала и определении оптимальных параметров для конкретного решения.

## ПРИМЕР НА 555 ТАЙМЕРЕ

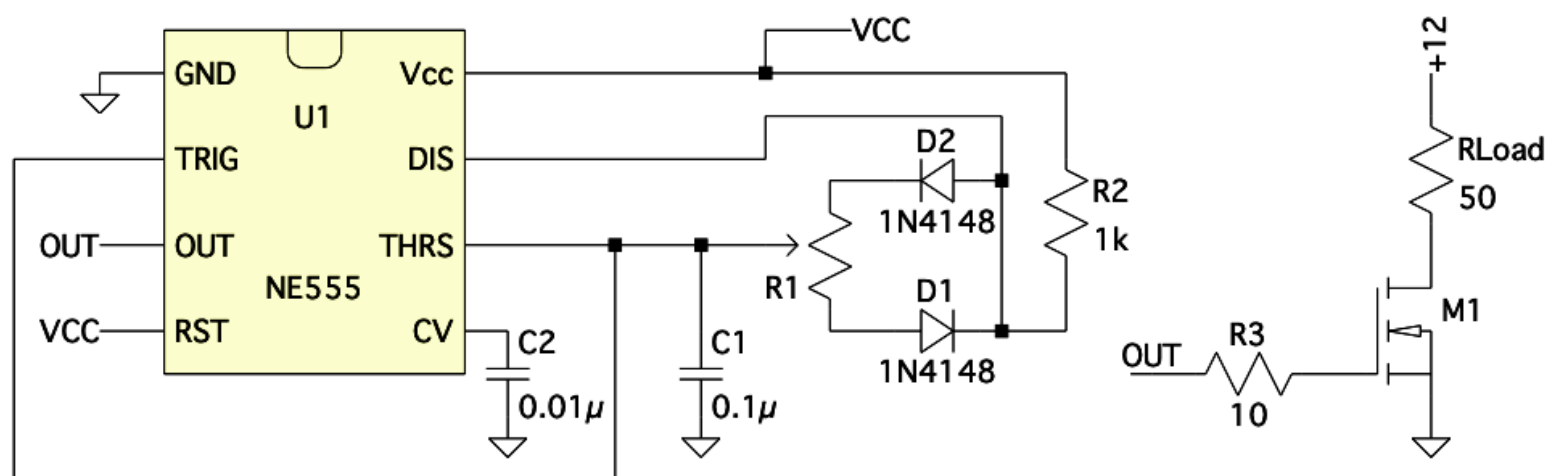


Рис. 7

На рисунке 7 представлена схема ШИМ-регулятора с мощным выходным транзистором, которая способна работать в диапазоне напряжений от 4,5 до 18 В. Это позволяет управлять, например яркостью как отдельного мощного светодиода, так и целой светодиодной лентой. Диапазон регулировки яркости примерно составляет от 5% до 95%. Эта схема представляет собой версию генератора прямоугольных импульсов.

Принцип работы этого электронного регулятора следующий:

1. При подаче напряжения питания начинает заряжаться конденсатор C1 по следующей цепи: R2 – D2 – R1 – C1.
2. Как только напряжение на конденсаторе C1 достигнет уровня  $2/3 V_{CC}$ , внутренний транзистор таймера откроется, и начнется процесс разрядки. Разряд начнется с верхней обкладки C1 и пойдет по цепи: R1 – D1 – 7 вывод 555 таймера.
3. Когда напряжение на конденсаторе C1 достигнет отметки  $1/3 V_{CC}$ , транзистор таймера закроется, и C1 начнет заряжаться снова. Этот процесс повторяется циклически, формируя на выводе 3 таймера прямоугольные импульсы.
4. Изменение сопротивления подстроечного резистора R1 приводит к уменьшению или увеличению времени импульса на выходе таймера (вывод 3), что в свою очередь изменяет среднее значение выходного сигнала.
5. Сформированная последовательность импульсов через токоограничивающий резистор R3 поступает на затвор транзистора M1, который включен по схеме с общим истоком.
6. Нагрузка, представленная светодиодной лентой или последовательно включенными мощными светодиодами, включается в разрыв цепи стока транзистора M1. В данном случае используется сравнительно мощный MOSFET транзистор IRFZ44N с максимальным током стока 49А, что позволяет управлять свечением светодиодной ленты длиной несколько метров.

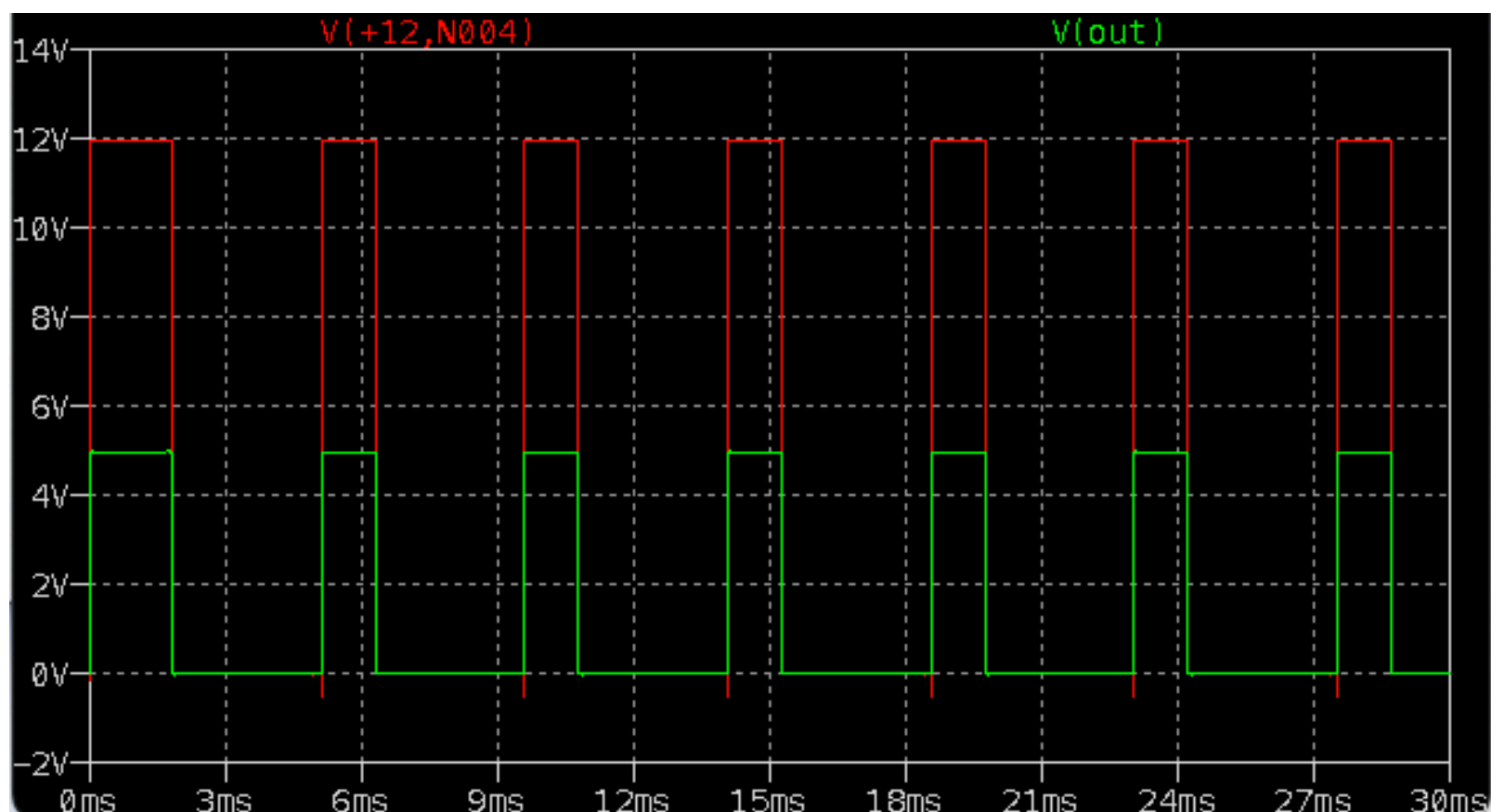


Рис. 8



7. Блокирующий конденсатор C2 предназначен для исключения влияния помех, которые могут возникать по цепи питания в моменты переключения таймера. Его ёмкость может варьироваться в пределах от 0,01 до 0,1 мкФ.

На рис. 8 представлен результат симуляции данной схемы. Сигнал Vout- это сигнал на 3 выводе микросхемы 555 таймера, сигнал V(+12, N004) - это напряжение на нагрузке. Частота импульсов в этой схеме зависит от значений ёмкости C1 и сопротивлений R1 и R2 и может быть вычислена с использованием следующей формулы:

$$f = \frac{1}{\ln(2) \cdot (R1 + 2 \cdot R2) \cdot C1}$$

Где:

- $f$  - частота импульсов в Герцах.
- $\ln(2)$  - натуральный логарифм числа 2 (приблизительно равен 0.6931).
- $R1$  - сопротивление R1 в Омах.
- $R2$  - сопротивление R2 в Омах.
- $C1$  - ёмкость C1 в Фарадах.

Эта формула позволяет рассчитать частоту ШИМ-сигнала на выходе данной схемы на основе значений компонентов R1, R2 и C1.

Эта схема обеспечивает стабильное и плавное регулирование яркости светодиодов и может быть полезной при создании осветительных систем или других устройств, где требуется точное управление яркостью.

## ПРИМЕР НА КОМПАРАТОРЕ

В обобщенном виде требуется получить несущую частоту в виде пилообразного сигнала, который будет поступать на неинвертирующий вход компаратора. На инвертирующий вход компаратора будет поступать сигнал с переменного резистора для упрощения восприятия.

Пилообразный сигнал может быть сформирован разными методами, и одним из наиболее распространенных способов является использование стабильного тока для зарядки конденсатора. В этом случае напряжение на конденсаторе будет линейно увеличиваться, и если разрядить конденсатор полностью при достижении на нем максимального напряжения, то это приведет к формированию пилообразного сигнала. Эта схема по сути является обычным релаксационным генератором.

Обычно для создания такого генератора используют тиристор или аналоги на биполярных транзисторах. Однако можно также применить интегральный таймер 555 для этой цели. Схема генератора пилообразного напряжения с использованием таймера 555

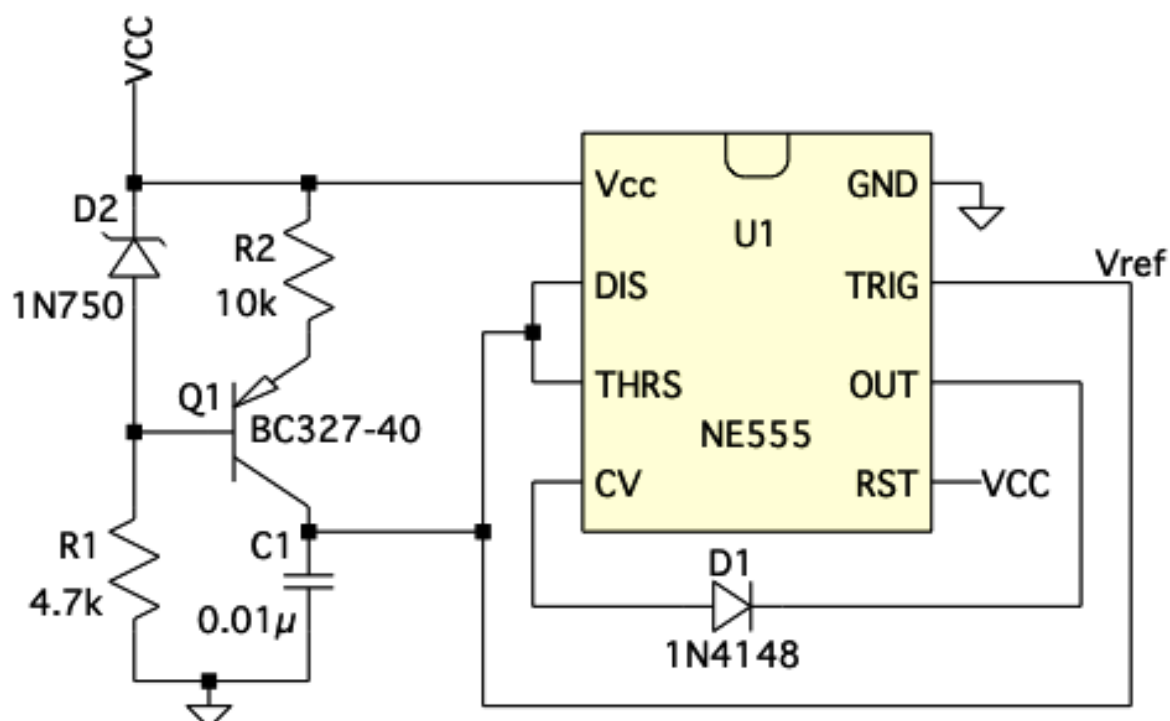


Рис. 9

показана на рис. 9. Она включает в себя источник стабильного тока, основанный на транзисторе Q1 и стабилитроне D2, а также блок управления разрядом, построенный на микросхеме интегрального таймера 555 и диоде D1. Выход 3 таймера соединен с входом 5 через диод D1, что позволяет снизить напряжение на внутреннем делителе до нуля в том случае, если на выходе таймера есть сигнал низкого уровня. Такая конфигурация позволяет практически полностью разряжать конденсатор C1. Как только напряжение на конденсаторе снижается до определенного минимума, таймер переключается, и начинается зарядка конденсатора от источника тока, после чего процесс повторяется циклично. Сигнал на выходе данной схемы представлен на рис. 10.

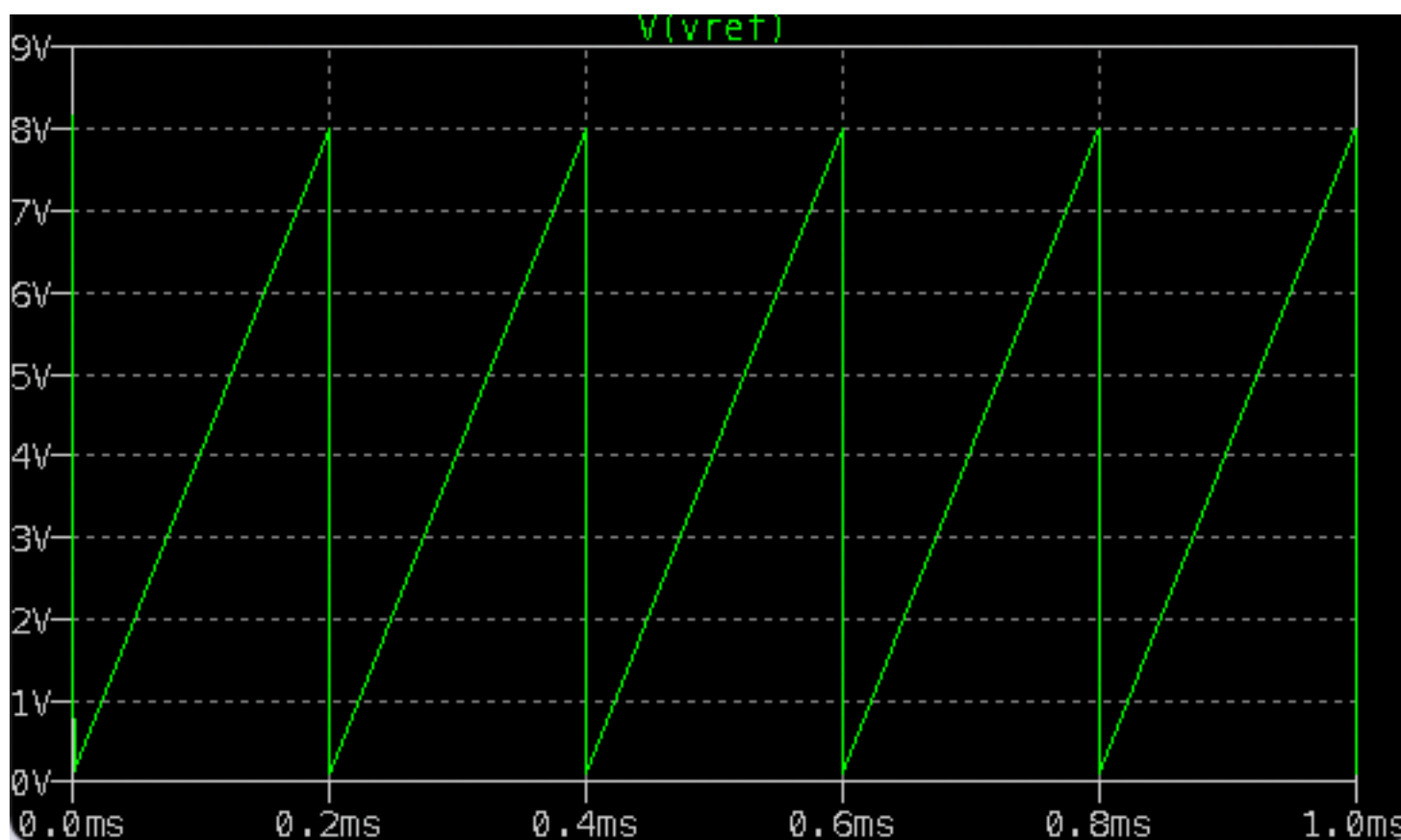


Рис. 10

Частота колебаний генератора пилообразного напряжения зависит от ёмкости конденсатора C1 и сопротивления резистора R2 и определяется следующей формулой:

$$f = \frac{0.5}{R_2 \cdot C_1}$$

При заданных значениях компонентов она составит примерно 5 кГц.

Ток, протекающий через резистор R2, должен быть небольшим, так как в процессе разряда конденсатора выход источника тока связывается с землей. Этот ток можно рассчитать с помощью следующей формулы:

$$I = \frac{D_2 - V_{be}}{R_2},$$

где D2 - напряжение стабилизации стабилитрона D2 (в данном случае 4,7В), а Vbe - прямое напряжение на переходе база-эмиттер транзистора Q1 (0,7В). Чтобы обеспечить хорошую форму сигнала, ток через резистор R2 не должен превышать 20 мА.

В качестве транзистора Q1 можно использовать практически любой маломощный pnp транзистор, например, bc327. Стабилитрон D2 - любой со значением стабилизации 4,7 вольта. Если использовать стабилитрон с напряжением стабилизации 2,7 вольта, то напряжение питания схемы можно снизить до 5В. Диод D1 - любой кремниевый, например, 1N4148.

Следующим шагом полученный сигнал можно подавать на неинвертирующий вход компаратора, что отражено в схеме на рис. 11.

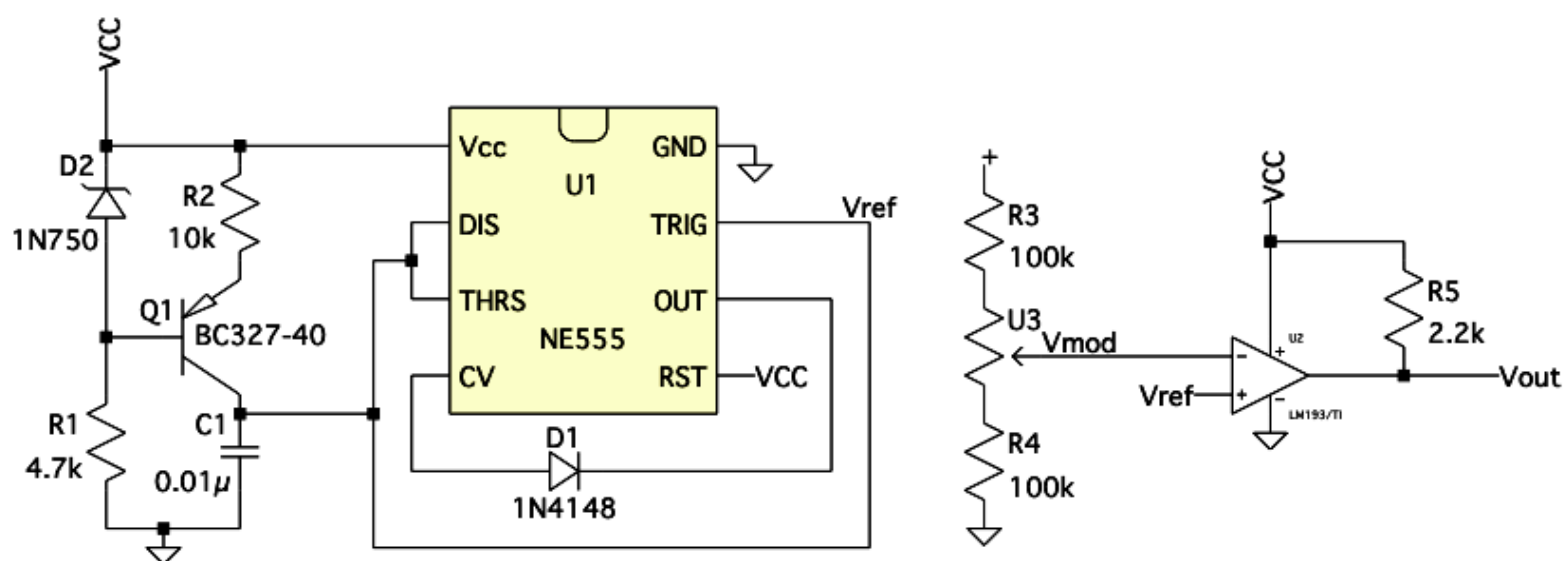


Рис. 11

На инверсный вход будет подаваться сигнал Vmod, банально с потенциометра. Будет происходить уменьшение значения напряжения от 7 к 1 Вольту и возвращения обратно, чтобы наглядно оценить изменение сигнала на выходе компаратора. Результат симуляции данного примера показан на рис. 12, где осциллограмма зеленого цвета показывает



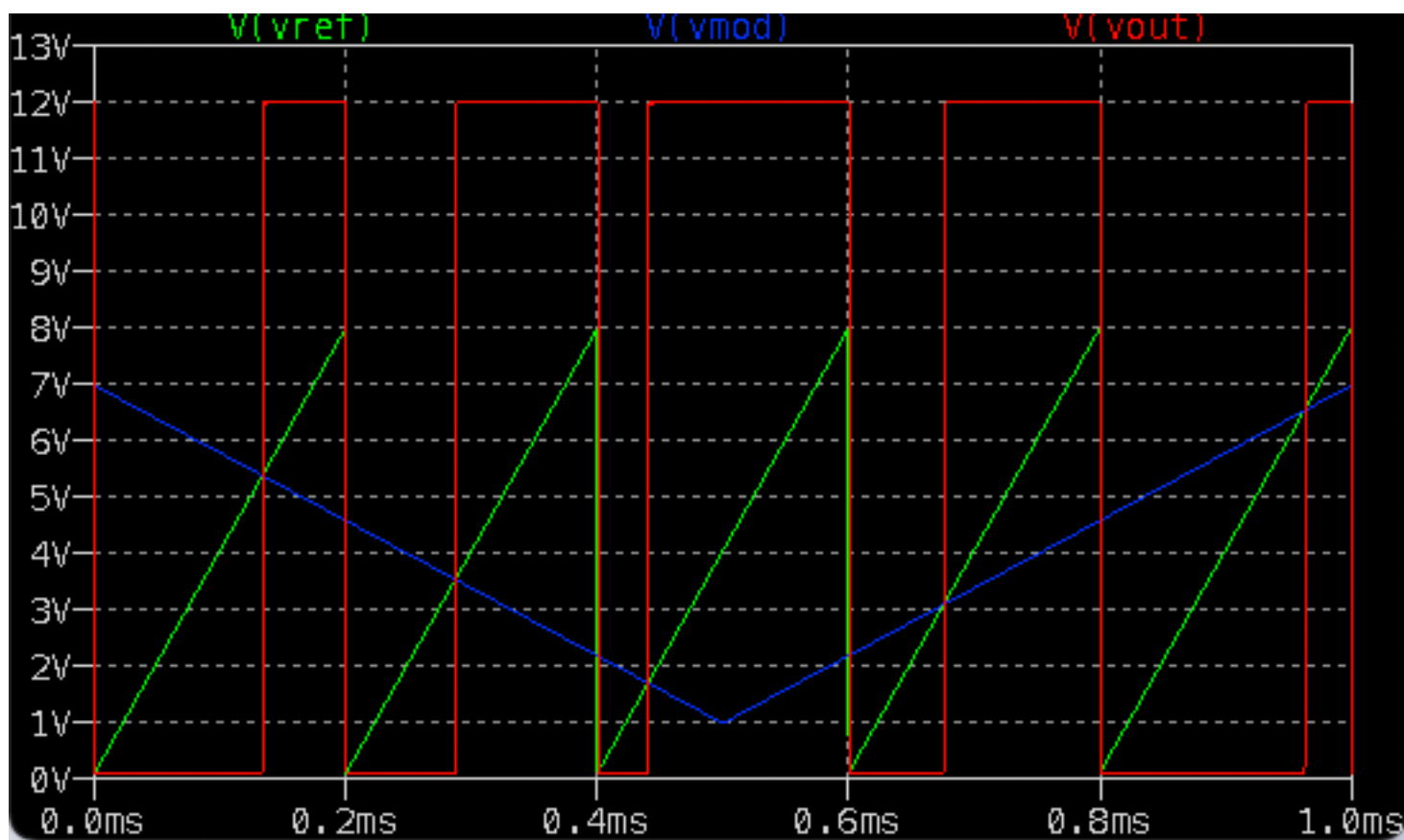


Рис. 12

несущую, осциллограмма синего цвета- это напряжение модулирующее, которое изменяется при повороте движка потенциометра, осциллограмма красного цвета- это выходной сигнал на компараторе.