

13. Генераторы импульсов на специализированных ИМС. Интегральный таймер и некоторые схемы на его основе

В электронных устройствах широко применяются генераторы импульсов, построенные на базе специализированных ИМС. Такие ИМС можно условно разделить на 3 группы.

1. **Специализированные ИМС генераторов импульсов**, предназначенные для узкого применения в составе устройств определенного назначения. Это могут быть как ИМС простых генераторов, так и достаточно сложные ИМС, выполняющие функции преобразователей напряжение-частота, генераторов с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ) и др. В обозначении типов ИМС генераторов импульсов для указания режима их работы используются символы: АГ – формирователи прямоугольных импульсов и одновибраторы; ГГ – мультивибраторы; ГЛ – генераторы линейно изменяющегося напряжения; ГФ – генераторы сигналов специальной формы.

2. **ИМС одновибраторов или мультивибраторов, входящие в состав серий цифровых ИМС**. В таких ИМС приняты дополнительные меры по повышению стабильности частоты и длительности выходных импульсов, а число внешних элементов минимально. Примеры ИМС генераторов ТТЛ:

К155АГ3 – 2 одновибратора;

К531ГГ1 – 2 мультивибратора; возможность управления частотой с помощью внешнего напряжения; минимум внешних элементов (для начальной установки частоты достаточно одного конденсатора).

Также имеются ИМС одновибраторов/мультивибраторов КМОП (пример – К561АГ1).

3. **Универсальные ИМС генераторов импульсов**, на основе которых могут быть выполнены генераторы импульсов различного вида, входящие в состав устройств разного назначения. К таким ИМС относится **интегральный таймер NE555** (варианты обозначения LM555 и др.), **отечественный аналог КР1006ВИ1**. *Таймером* называют устройство для точного задания временных интервалов, таким образом таймер должен представлять собой генератор или формирователь импульсов заданной длительности. ИМС таймера NE555 была разработана в 1970-х годах, но оказалась настолько удачной, что применяется до сих пор для создания импульсных генераторов и других электронных устройств. Следует отметить, что генераторы на основе интегральных таймеров обладают более высокой температурной стабильностью, а ИМС таймера обладает широкими функциональными возможностями и при этом имеет низкую стоимость. Поэтому ее применение для построения генераторов импульсов во многих случаях более предпочтительно, чем ОУ и компараторов.

Функциональная схема и основные параметры интегрального таймера

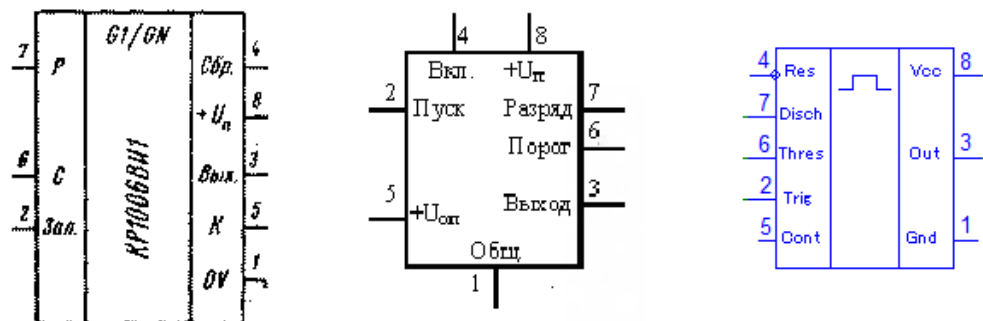


Рис. 13.1. Варианты обозначения ИМС таймера NE555 на принципиальных схемах

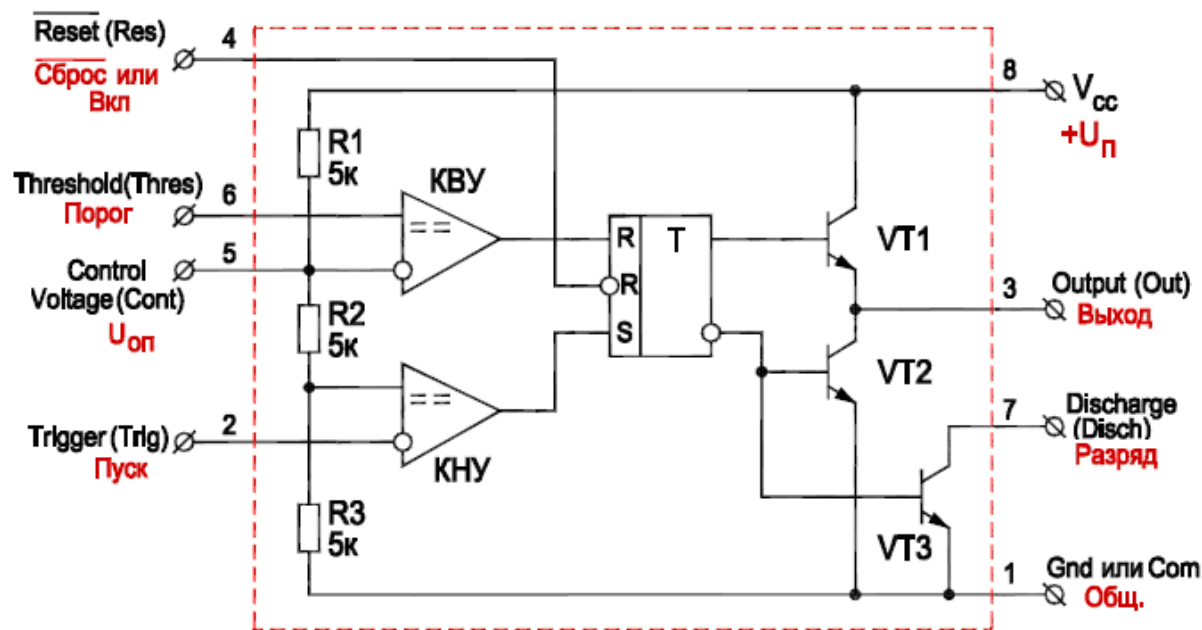


Рис. 13.2. Функциональная схема ИМС интегрального таймера

Состав ИМС таймера:

- компараторы высокого и низкого уровней (КВУ и КНУ),
- RS-триггер,
- основной выходной каскад на транзисторах VT1 и VT2,
- дополнительный выходной каскад с открытым коллектором на транзисторе VT3.

$R1=R2=R3$, поэтому опорные напряжения (т. е. пороги срабатывания) для КВУ и КНУ $U_{оп.КВУ}=2/3 U_{п}$, и $U_{оп.КНУ}=1/3 U_{п}$.

Компараторы управляют работой RS-триггера, который в свою очередь управляет транзисторами VT1, VT2 и VT3. RS-триггер также имеет инверсный вход сброса \overline{RESET} , при подаче на который сигнала низкого уровня триггер сбрасывается в ноль.

Работа ИМС при подаче на \overline{RESET} напряжения высокого уровня (соизмеримого с напряжением питания).

КВУ сравнивает с $U_{оп.КВУ}=2/3 U_{п}$ напряжение на выводе 6 (Threshold или Порог), КНУ сравнивает напряжение на выводе 2 (Trigger или Пуск) с $U_{оп.КНУ}=1/3 U_{п}$.

Если $U_6 > 2/3 U_{п}$ и $U_2 > 1/3 U_{п}$ то на выходе КВУ устанавливается напряжение лог.1 (т. е. $R=1$), а на выходе КНУ – напряжение лог.0 ($S=0$). Триггер сбрасывается в ноль ($Q=0, \overline{Q}=1$), транзистор VT1 закрыт, а VT2 и VT3 открыты. Напряжение на выводе 3 близко к 0 (определяется напряжением насыщения коллектор-эмиттер VT2). **Если $U_6 < 2/3 U_{п}$ и $U_2 < 1/3 U_{п}$, то на выходе КВУ устанавливается напряжение лог.0 (т. е. $R=0$), а на выходе КНУ – напряжение лог.1 ($S=1$).** Триггер устанавливается в 1 ($Q=0, \overline{Q}=1$), транзистор VT1 открыт, а VT2 и VT3 закрыты. На выводе 3 устанавливается напряжение высокого уровня, близкое к напряжению питания.

Если $U_6 < 2/3 U_{п}$ и $U_2 > 1/3 U_{п}$ то $R=S=0$, триггер находится в режиме хранения (сохраняется предыдущее состояние).

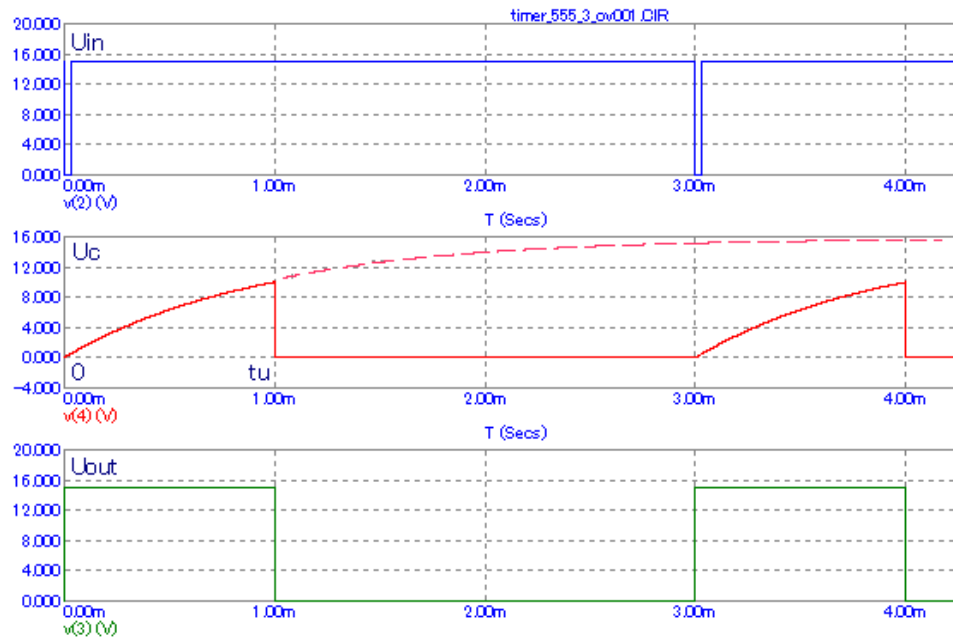
При подаче напряжения на вывод 5 (Control Voltage) пороги срабатывания компараторов изменяются. В дальнейшем будет показано, что изменяя это напряжение, можно управлять длительностью выходного импульса. Если эта возможность не используется, то вывод 5 следует соединять с общим проводом через конденсатор 0,01-0,1 мкФ.

Некоторые параметры ИМС таймера, определяющие границы его применения.

Выходные токи транзисторов VT1, VT2 и VT3 не более 100 мА (некоторые производители заявляют не более 200 мА)

Напряжение питания от 3 до 18 В

Время нарастания и спада выходного импульса не более 0,3 мкс (некоторые производители заявляют не более 0,1 мкс).



Момент t_u : напряжение на конденсаторе $U_c = U_6$ превышает $2/3 U_{\Pi}$, поэтому **$R=1$** . При этом сохраняется **$S=0$** , поэтому триггер сбрасывается в ноль. Транзистор **VT1** закрывается, а **VT2** открывается, поэтому на выходе напряжение уменьшается до значения, близкого к нулю. Транзистор **VT3** также открывается, и через его очень малое сопротивление происходит **быстрый разряд конденсатора C_1 до напряжения, близкого к нулю** (поэтому часто транзистор VT3 называют *разрядным транзистором*). Вновь получаем $U_c = U_6 = U_7 \approx 0 < 2/3 U_{\Pi}$, значит **$R=0$** . Так как **$R=S=0$** , триггер вновь переходит в режим хранения и на выходе сохраняется напряжение, близкое к нулю, до подачи следующего запускающего импульса.

Длительность выходного импульса одновибратора t_u определяется процессом заряда конденсатора C_1 через резистор R_1 . В момент $t=0$ напряжение на конденсаторе $U_c(0)=U_6(0)=U_{кз\ на с}^{VT3}$ близко к нулю. На интервале от 0 до t_u напряжение $U_c = U_6$ возрастает с постоянной времени $\tau=R_1C_1$, асимптотически стремясь к уровню $U_c(\infty)=+U_{\Pi}$, а момент t_u достигает значения $U_c(t_u)=2/3 U_{\Pi}$. Используя соотношение (11.2), см. раздел 11, и пренебрегая $U_{кз\ на с}^{VT3}$, можем записать

$$t_u = \tau \ln \left[\frac{U(\infty) - U(0)}{U(\infty) - U(t_u)} \right] = R_1 C_1 \ln \left[\frac{U_{\Pi} - U_{кз\ на с}^{VT3}}{U_{\Pi} - \frac{2}{3} U_{\Pi}} \right] \approx R_1 C_1 \ln 3 \approx 1,1 R_1 C_1$$

Примечание. Проведём более подробный вывод полученной формулы. Для времязадающей цепи R_1 - C_1 закон Кирхгофа можно записать как

$$U(\infty)=U_{\Pi}=i_{C1}R_1+U_c(t)=R_1C_1 \frac{dU_c(t)}{dt} + U_c(t)$$

$$\text{Решение этого уравнения } U_c(t) = U_c(0) \exp\left(-\frac{t}{R_1C_1}\right) + U(\infty)\left(1 - \exp\left(-\frac{t}{R_1C_1}\right)\right).$$

Для нашего случая $U_c(0)=U_6(0)=U_{кэ на с}^{VT3} \approx 0$, $U_c(\infty)=+U_{\Pi}$, тогда $U_c(t) = U_{\Pi}\left(1 - \exp\left(-\frac{t}{R_1C_1}\right)\right)$, а для момента t_u

$$U_c(t_u) = U_{\Pi}\left(1 - \exp\left(-\frac{t_u}{R_1C_1}\right)\right) = \frac{2}{3}U_{\Pi}. \text{ Отсюда } t_u = R_1C_1 \ln 3 \approx 1,1R_1C_1.$$

Замечания.

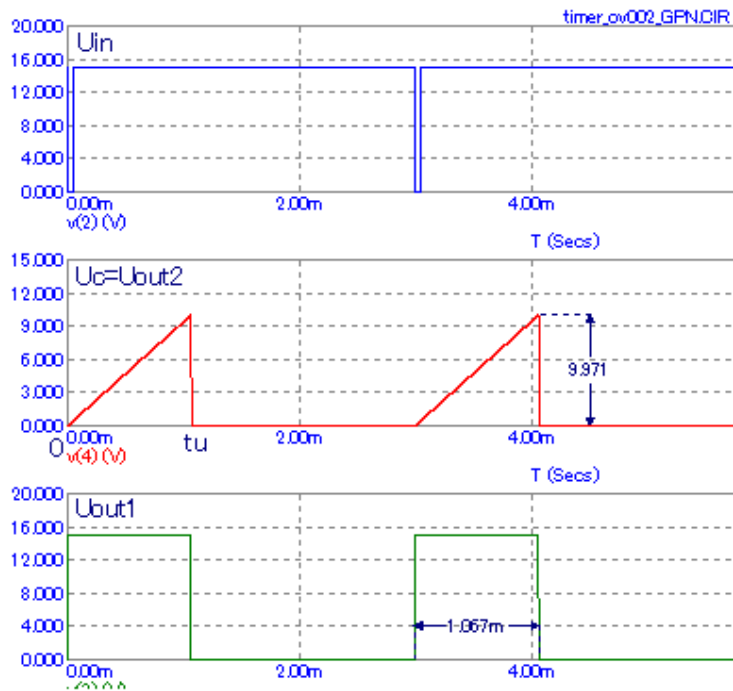
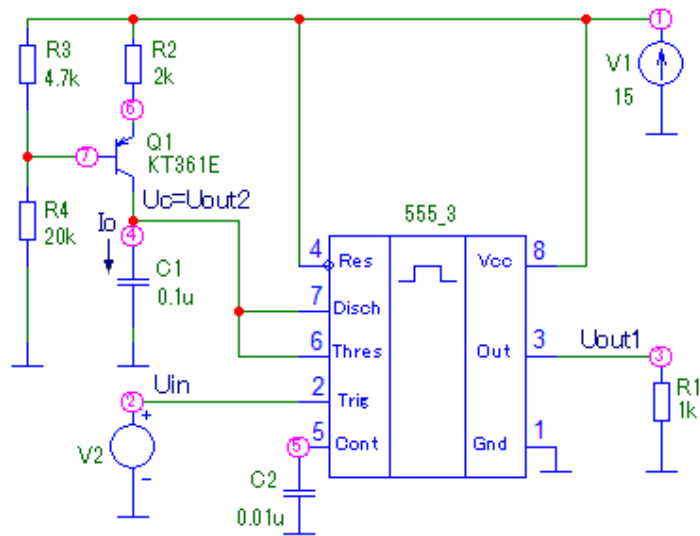
1. Минимальная длительность выходного импульса определяется быстродействием элементов таймера, обычно указывается 10 мкс.

2. Максимальная длительность импульса ограничена величиной тока заряда конденсатора времязадающей цепи, а точнее – тем, как этот ток соотносится с током утечки конденсатора и входным током таймера по выводам 2 и 6 (его производители задают не более 0,5 мкА). Чтобы получить большую длительность импульса, приходится увеличивать сопротивление резистора, при этом ток заряда времязадающего конденсатора уменьшается. Если он станет соизмеримым с входным током таймера (и с током утечки конденсатора, которые для полярных конденсаторов большой ёмкости могут быть достаточно большими), то длительность импульса в реальной схеме будет отличаться от расчетной. *Обычно рекомендуют выбирать сопротивление R_1 не более 200 кОм* (в некоторых источниках – не более 1 МОм). Кроме того, часто указывается *минимальная величина сопротивления R_1 (обычно указывается значение порядка 1 – 2 кОм)* для снижения величины потребляемого ИМС тока и для устойчивости работы.

3. Длительность входного импульса должна быть меньше, чем выходного.

Рассмотренная схема является базовой для создания более сложных схем. Например, заменив резистор времязадающей цепи на генератор стабильного тока, можно получить генератор пилообразного импульса.

Генератор пилообразного импульса на базе одновибратора на таймере



В приведенной схеме используется простейший источник тока на транзисторе Q1. Схема работает аналогично простейшему одно-вibratorу. В момент $t=0$ с приходом запускающего импульса лог. нуля происходит запираение разрядного транзистора таймера и начинается заряд конденсатора C_1 от источника тока на транзисторе Q1. В разделе 12 было показано, что при заряде конденсатора от генератора стабильного тока напряжение на конденсаторе со временем линейно возрастает:

$$U_{OUT2} = U_{C1}(t) = \frac{1}{C_1} \int_0^t I_0 dt = \frac{I_o t}{C_1}$$

Поэтому на выводах 2 и 6 ИМС таймера формируется импульс линейно нарастающего напряжения (одновременно на выводе 3 формируется прямоугольный импульс). Как и в простейшей схеме на рис. 13.3, импульс заканчивается в момент $t_{и}$, когда напряжение на конденсаторе превышает $2/3 U_{п}$:

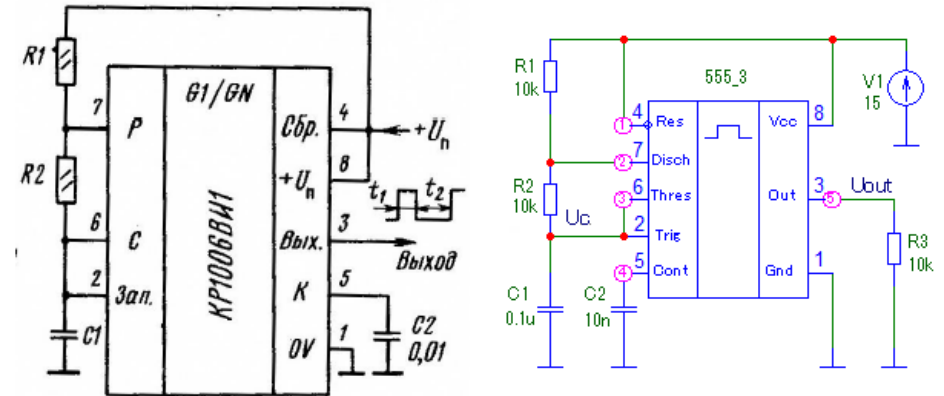
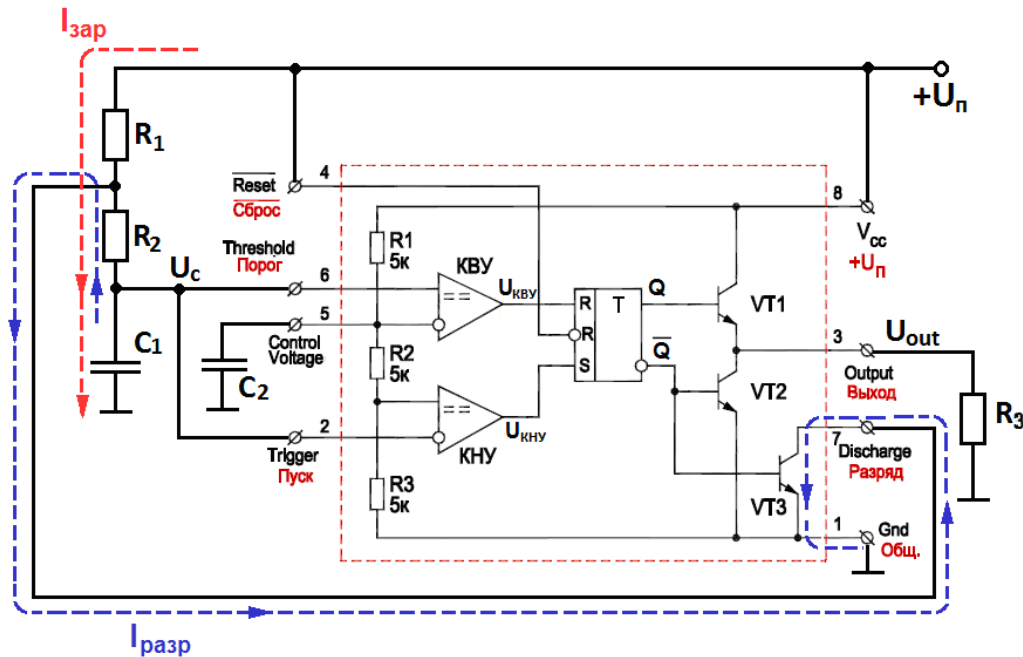
$$U_{C1}(t_H) = \frac{1}{C_1} \int_0^{t_H} I_0 dt = \frac{I_0 t_H}{C_1} = \frac{2U_{II}}{3},$$

откуда можно получить формулу для расчета длительности импульса

$$t_H = \frac{2U_{II}C_1}{3I_0}.$$

В схеме на рис. 13.4 источник тока рассчитан на выходной ток 1 мА, поэтому для $U_{\text{п}}=15$ В и $C_1=0,1$ мкФ получаем $t_{\text{и}}=1$ мс.

Мультивибратор на таймере



Как и в схеме одновибратора, вывод 4 соединён с питанием. Входы 2 и 6 соединены, поэтому входные напряжения компараторов высокого и низкого уровней равны: $U_6 = U_2 = U_c$.

В момент включения питания ($t=0$) конденсатор C_1 разряжен и поэтому $U_c = U_6 = U_2 = 0$. $U_6 < 2/3 U_n$, поэтому для триггера таймера $R=0$, $U_2 < 1/3 U_n$ и поэтому $S=1$. Триггер переходит в единичное состояние, напряжение U_{out} выводе 3 принимает высокий уровень. Разрядный транзистор таймера $VT3$ закрыт и не препятствует заряду конденсатора C_1 , который начинает заряжаться от источника питания через последовательно соединённые R_1 и R_2 (показано на схеме красным цветом). На интервале $0 - t_1$ напряжение $U_2 = U_c$ плавно возрастает с постоянной времени $\tau_{зар} = C_1(R_1 + R_2)$. Когда U_c становится больше $1/3 U_n$, имеем $S=0$, триггер переходит в режим хранения, U_{out} сохраняет высокий уровень и заряд C_1 продолжается.

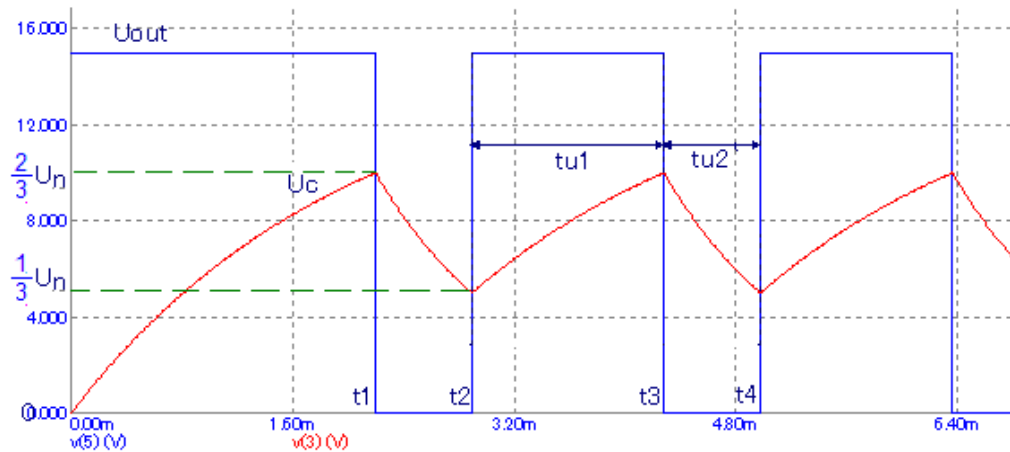
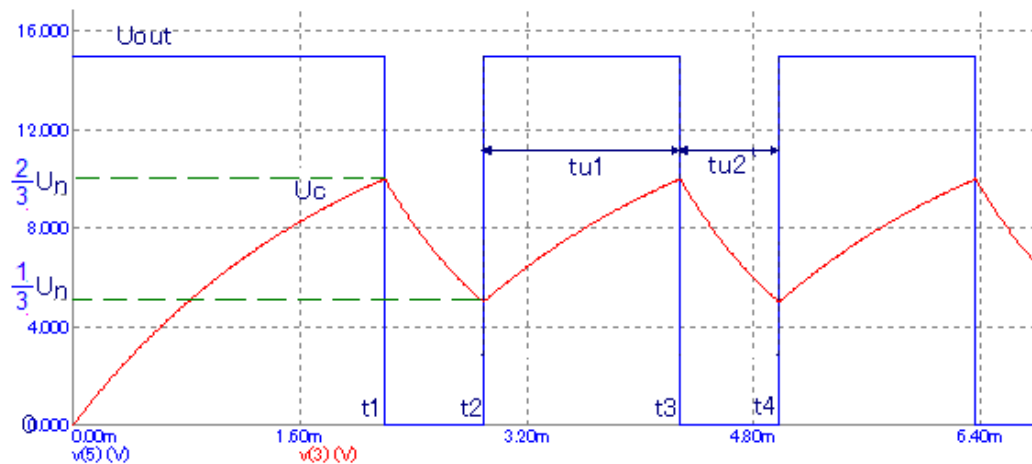


Рис. 13.5. Схема и временные диаграммы работы простейшего мультивибратора на таймере

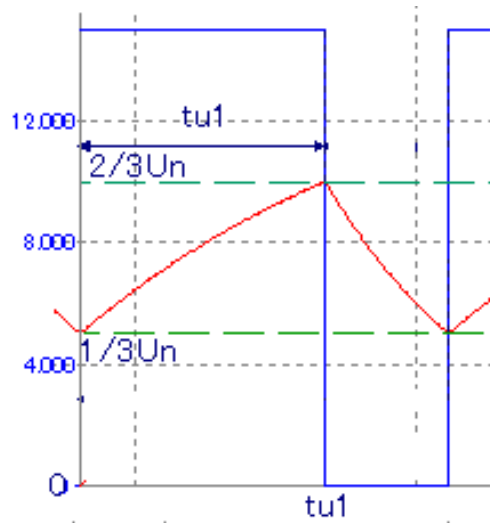


В момент t_1 напряжение $U_2=U_c$ становится больше $2/3U_n$, поэтому $R=1$; $U_2>1/3U_n$, поэтому $S=0$. Триггер таймера сбрасывается в ноль, напряжение U_{out} уменьшается до напряжения низкого уровня. Разрядный транзистор таймера VT3 открывается и конденсатор C_1 разряжается по цепи C_1-R_1-VT3 -общий провод (на схеме показано синим цветом). Напряжение U_c плавно уменьшается с постоянной времени $\tau_{разр}=C_1R_2$. Как только U_c начало уменьшаться, оно становится меньше $2/3U_n$, поэтому $R=S=0$ (триггер в режиме хранения), U_{out} сохраняет низкий уровень.

В момент t_2 U_c становится меньше $1/3U_n$, триггер таймера опять переходит в единичное состояние, на выводе 3 опять устанавливается напряжение высокого уровня, а напряжение U_c начинает возрастать с постоянной времени $\tau_{зар}$

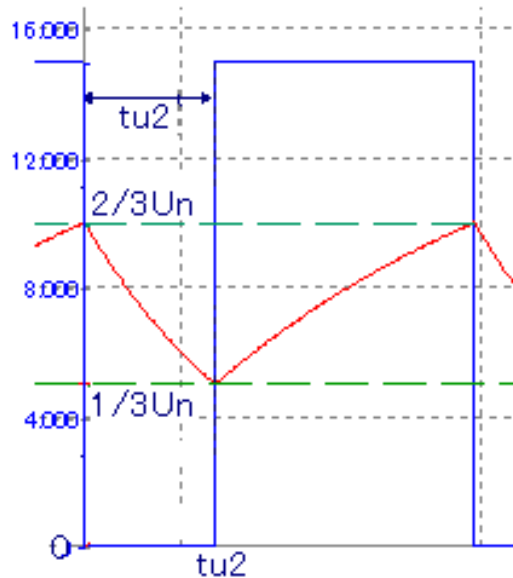
В момент t_3 U_c становится больше $2/3U_n$. Выходное напряжение принимает низкий уровень и напряжение на конденсаторе начинает уменьшаться с постоянной времени $\tau_{разр}$. Далее процессы в схеме циклически повторяются: высокий уровень U_{out} по времени совпадает с зарядом C_1 , низкий уровень U_{out} совпадает с разрядом C_1 , напряжение U_c изменяется между уровнями $1/3U_n$ и $2/3U_n$.

Формулы для расчета длительности интервалов $t_{и1}$ и $t_{и2}$ получаются при анализе процессов заряда и разряда конденсатора C_1 .



1. Заряд C_1 через R_1 и R_2 . Напряжение U_c увеличивается с постоянной времени $\tau_{зар}$, асимптотически стремясь к U_n . Поэтому $U(0) = 1/3 U_n$, $U(t_{u1}) = 2/3 U_n$, $U(\infty) = U_n$. Используя (11.2), имеем

$$t_{u1} = \tau \ln \left[\frac{U(\infty) - U(0)}{U(\infty) - U(t_u)} \right] = \tau_{зар} \ln \left[\frac{U_n - \frac{1}{3} U_n}{U_n - \frac{2}{3} U_n} \right] \approx (R_1 + R_2) C_1 \ln 2 \approx 0,69 (R_1 + R_2) C_1$$



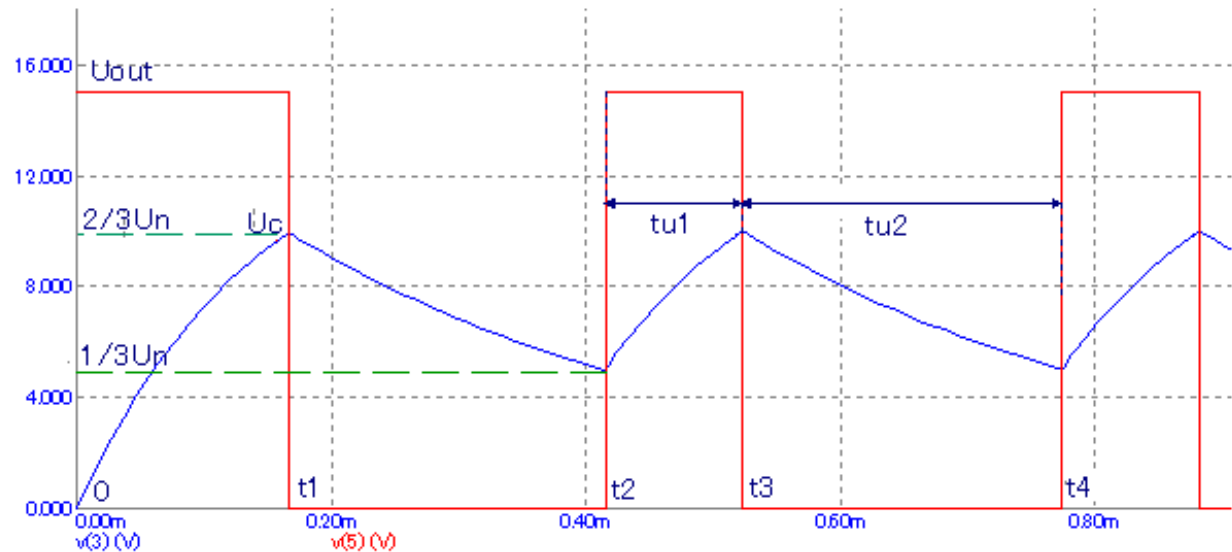
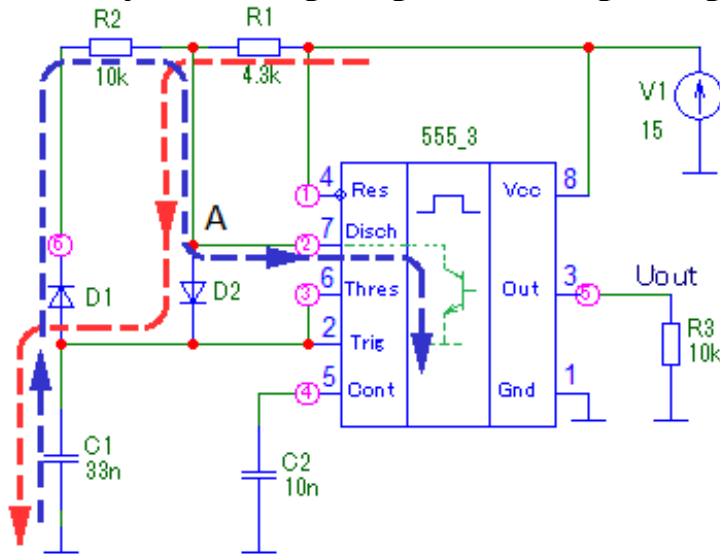
2. Разряд C_1 через R_2 . Напряжение U_c уменьшается с постоянной времени $\tau_{разр}$, асимптотически стремясь к 0. Поэтому $U(0) = 2/3 U_n$, $U(t_{u1}) = 1/3 U_n$, $U(\infty) = 0$. Используя (11.2), имеем

$$t_{u2} = \tau_{разр} \ln \left[\frac{0 - \frac{2}{3} U_n}{0 - \frac{1}{3} U_n} \right] \approx R_2 C_1 \ln 2 \approx 0,69 R_2 C_1.$$

Примечание. Из временных диаграмм видно, что первый импульс оказывается большей длительности, чем последующие импульсы высокого уровня, так как при этом конденсатор C_1 заряжается от нуля до $2/3 U_n$ (а не от $1/3 U_n$ до $2/3 U_n$ как последующие). Можно легко показать, что длительность первого импульса $t'_{u1} \approx 1,1 (R_1 + R_2) C_1$.

Очевиден недостаток простейшей схемы: всегда $t_{u1} > t_{u2}$.

Мультивибратор на таймере с произвольным соотношением $t_{н1}$ и $t_{н2}$.



В момент включения питания ($t=0$) конденсатор C_1 разряжен, $U_c=U_6=U_2=0$, т. е. $U_6 < 2/3 U_{н}$, $U_2 < 1/3 U_{н}$, поэтому для триггера таймера $R=0$, $S=1$. Триггер в единичном состоянии, U_{out} приобретает высокий уровень. Зарядный транзистор таймера закрыт.

Интервал $0-t_1$. Диод **D1** закрыт и **D2** открыт, поэтому **заряд конденсатора C_1 происходит по цепи: источник питания $V1$ - $R1$ - $D1$ - $C1$ – общий провод**. Напряжение на конденсаторе C_1 U_c возрастает с постоянной времени $\tau_{зар} \approx C_1 R_1$ (сопротивлением открытого диода пренебрегаем). Напряжение U_{out} сохраняет высокий уровень.

Момент t_1 . U_c становится больше $2/3 U_{н}$, поэтому $R=1$, $S=0$. Триггер переходит в нулевое состояние, U_{out} сбрасывается до низкого уровня. Разрядный транзистор таймера открывается, и через него точка А схемы оказывается подсоединённой к общему проводу.

Интервал t_1-t_2 . Напряжение на катоде диода **D2** в момент t_1 равно $+2/3 U_{н}$, а анод **D2** через разрядный транзистор соединяется с общим проводом. Поэтому **D2** закрывается. Но открывается диод **D1** (т. к. напряжение на его аноде в момент t_1 равно $+2/3 U_{н}$, а катод через R_2 и открытый разрядный транзистор таймера соединен с общим проводом), поэтому происходит **разряд конденсатора C_1 по цепи: C_1 – $D1$ – R_2 – разрядный транзистор – общий провод**. Напряжение U_c уменьшается с постоянной времени $\tau_{разр} \approx C_1 R_2$, U_{out} остается на низком уровне.

Момент t_2 . U_c становится меньше $1/3 U_{н}$, поэтому $R=0$, $S=1$. Триггер вновь переходит в единичное состояние, U_{out} приобретает высокий уровень, зарядный транзистор таймера закрывается.

Далее на интервале t_2-t_3 U_{out} имеет высокий уровень, U_c возрастает с постоянной времени $\tau_{зар}$. **На интервале t_3-t_4** U_{out} переходит на низкий уровень и U_c уменьшается с постоянной времени $\tau_{разр}$. Далее процессы в схеме циклически повторяются.

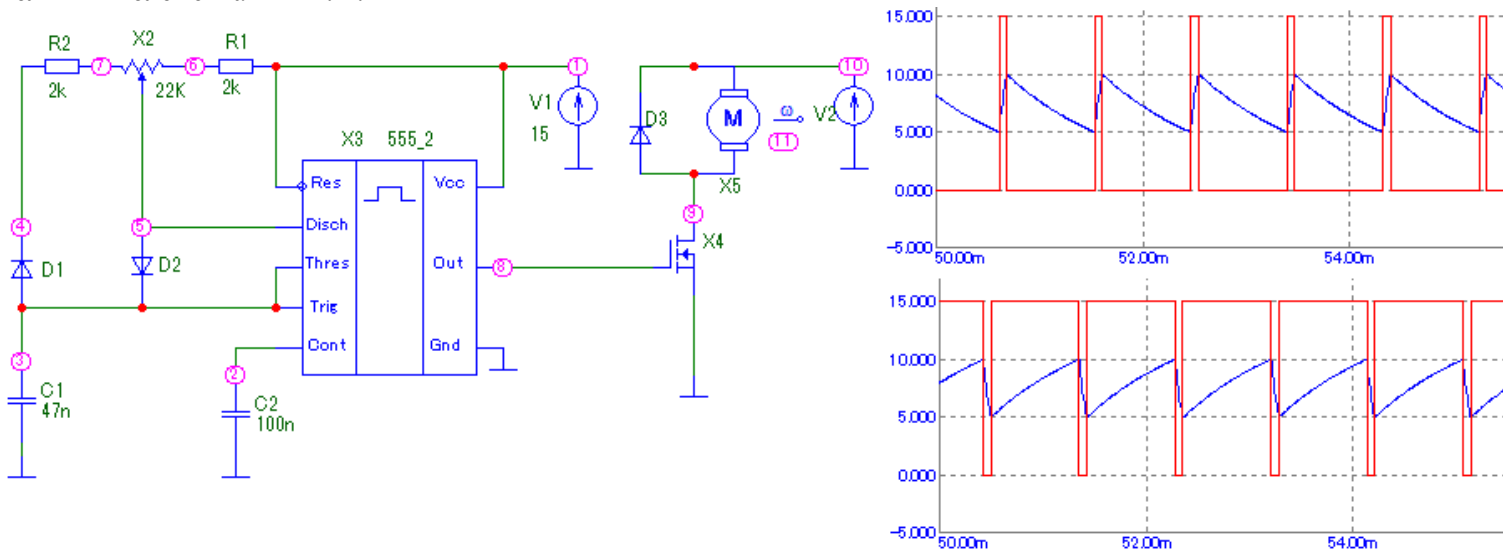
С учётом изложенного выше можно легко получить формулы для расчета длительности временных интервалов:

$$t_{u1} \approx 0,69R_1C_1, t_{u2} \approx 0,69R_2C_1$$

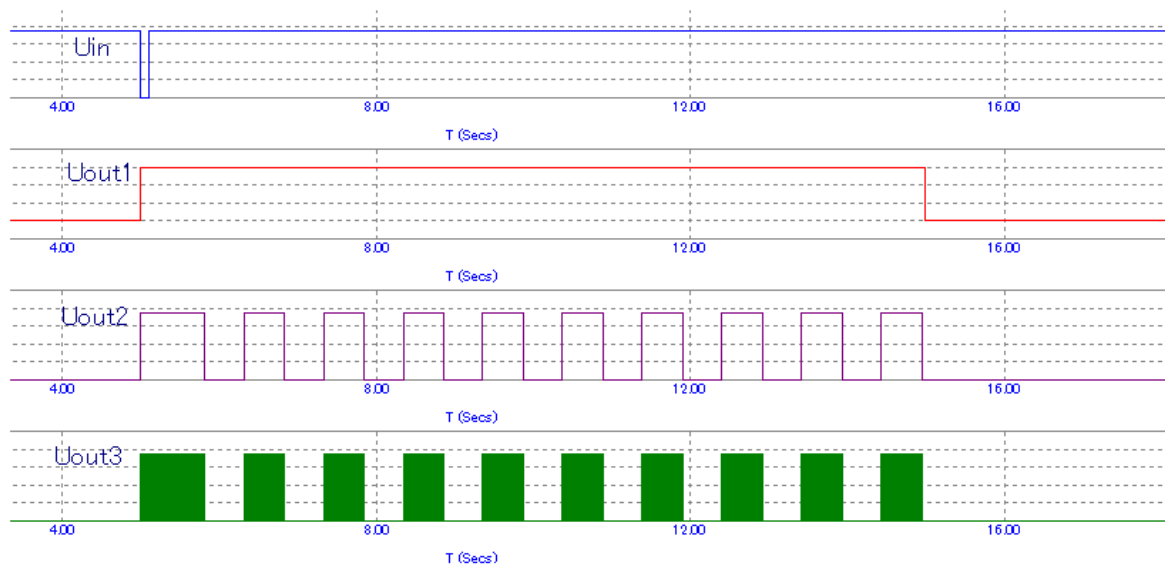
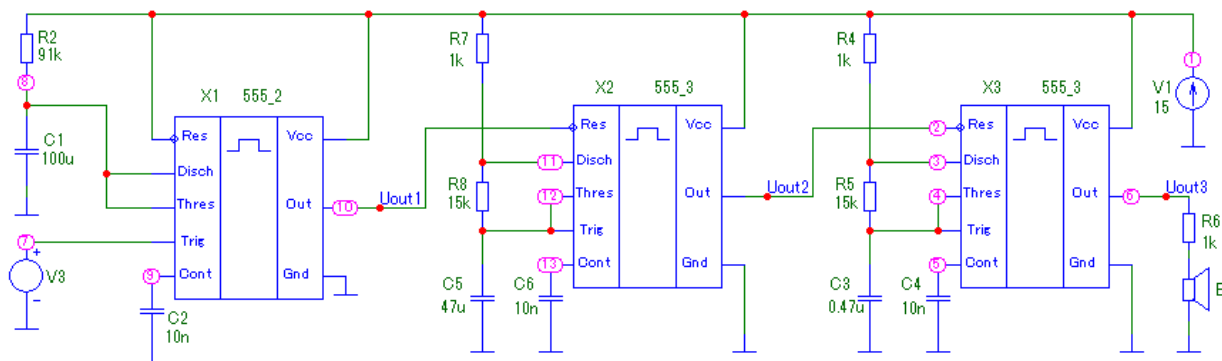
Как и в схеме на рис. 13.4, первый импульс оказывается большей длительности:

$$t'_{u1} \approx 1,1R_1C_1$$

Подобная схема может быть использована для управления частотой вращения двигателя постоянного тока. Ранее упоминалось, что двигатель постоянного тока может быть запитан импульсами тока постоянной амплитуды, но изменяемой длительности. Чем больше длительность импульсов, тем больше средний ток обмотки и тем выше частота вращения двигателя. В данной схеме к выходу таймера подсоединен ключ на полевом транзисторе, в выходную цепь которого подключён двигатель. Импульс положительной полярности на выходе таймера открывает ключ, через обмотку двигателя протекает ток. В схему введен потенциометр, при перемещении движка которого меняется соотношение постоянных времени заряда и разряда времязадающего конденсатора. Таким образом можно изменять соотношение t_{u1} и t_{u2} , а значит и отношение t_{u1} и периода (при этом период T , равный сумме t_{u1} и t_{u2} , остаётся постоянным). В конечном счете это приводит к изменению среднего тока обмотки и частоты вращения. На рисунке рядом со схемой показаны временные диаграммы для крайних положений движка потенциометра. При правом по схеме положении движка величина t_{u1} минимальна, что соответствует минимальной частоте вращения (верхняя диаграмма), при левом положении движка t_{u1} максимальна и частота вращения также будет максимальна (нижняя диаграмма). Подобная схема может быть использована также для регулировки яркости свечения групп светодиодов, управления нагревательными элементами и п. п.



Пример схемы на основе мультивибратора на таймере для управления частотой вращения двигателя постоянного тока



На основе базовых схем включения таймера могут быть выполнены более сложные схемы. В качестве примера можно привести схему генератора звуковых импульсов, который может быть использован в системах охранной сигнализации, оповещения и т.п.

При подаче на вход устройства управляющего импульса лог. нуля схема генерирует 10 звуковых импульсов длительностью примерно 0,5 сек и периодом повторения около 1 сек., частота звуковых колебаний около 1 кГц.

Первый таймер включен как одновибратор, а второй и третий таймеры как простейшие мультивибраторы. При этом выход таймера X1 подключён к входу сброса таймера X2, аналогично выход таймера X2 подключён к входу сброса таймера X3. В исходном состоянии, когда на вход схемы подается лог. 1, выходное напряжения одновибратора $U_{out1} \approx 0$, тем самым блокируется работа мультивибратора на X2, т.е. $U_{out2} \approx 0$. При этом запрещается работа мультивибратора на X2, поэтому $U_{out3} \approx 0$. При подаче на вход схемы импульса лог. нуля одновибратор на таймере X1 формирует импульс лог. 1 длительностью около 10 сек.. В течение этого интервала разрешается работа мультивибратора на X2, который за это время успевает сгенерировать 10 импульсов лог. 1 с периодом повторения около 1 сек и длительностью несколько меньшей 0,5 сек. Каждый из этих импульсов, подаваемый на вход сброса таймера X3, разрешает его работу, и таким образом мультивибратор на X3 включается примерно раз в секунду, на интервале около 0,5 сек работая с частотой около 1 кГц.