

## Генераторы импульсных сигналов

*Генераторы импульсных сигналов* – устройства для получения импульсов требуемой формы, амплитуды, длительности и частоты повторения.

Так же, как и все генераторы электрических колебаний, генераторы импульсных сигналов выполняются на основе *активного элемента* (транзистора, усилителя, логического элемента), охваченного положительной обратной связью. Генераторы импульсов могут быть построены на дискретных транзисторах, однако методика расчета таких генераторов оказывается достаточно трудоёмкой, при этом параметры выходных импульсов могут сильно отличаться от расчётных, а также сильно зависят от разброса параметров транзисторов. Поэтому в настоящее время генераторы импульсов в основном выполняются на основе ИМС. Расчёт таких схем оказывается проще, схемы имеют более высокую стабильность. В зависимости от типа используемых ИМС различают:

- 1) генераторы импульсов на аналоговых ИМС (ОУ и компараторах),
- 2) генераторы импульсов на цифровых ИМС (в основном используются ИМС логических элементов и триггеров),
- 3) генераторы импульсов на специализированных ИМС

Генераторы импульсов могут работать в двух основных режимах: автоколебательном и ждущем. Генераторы, работающие в автоколебательном режиме (автогенераторы), формируют на выходе непрерывную последовательность импульсов заданной формы, амплитуды и длительности и частоты повторения. При работе в ждущем режиме генератор формирует импульс заданной формы, амплитуды и длительности при подаче внешнего управляющего сигнала.

Наиболее распространены генераторы прямоугольных импульсов, в том числе потому, что на их основе могут быть выполнены генераторы импульсов иной формы (с помощью дополнительных элементов). Автогенераторы прямоугольных импульсов часто называют *мультивибраторами*; генераторы одиночных прямоугольных импульсов, работающие в ждущем режиме, называют *одновибраторами*.

## Генераторы прямоугольных импульсов на ОУ

### Мультивибратор на ОУ

Мультивибратором обычно называют автогенератор прямоугольных импульсов. Простейшие мультивибраторы начинают работать при включении питания, формируя на выходе последовательность прямоугольных импульсов заданной амплитуды, длительности и частоты повторения. В более сложных мультивибраторах возможно управление с помощью внешних сигналов длительностью, частотой и амплитудой выходных импульсов, запретом/разрешением работы и т. д.

Схема простейшего мультивибратора на ОУ приведена на рис. 10. 1, а. Питание ОУ DA1 осуществляется от двух источников одинакового напряжения противоположной полярности (двуполярное питание - основной вариант для большинства ОУ). ОУ охвачен положительной обратной связью (ПОС) через делитель  $R_2$ - $R_3$  и отрицательной обратной связью (ООС) по цепи  $R_1 - C_1$ .

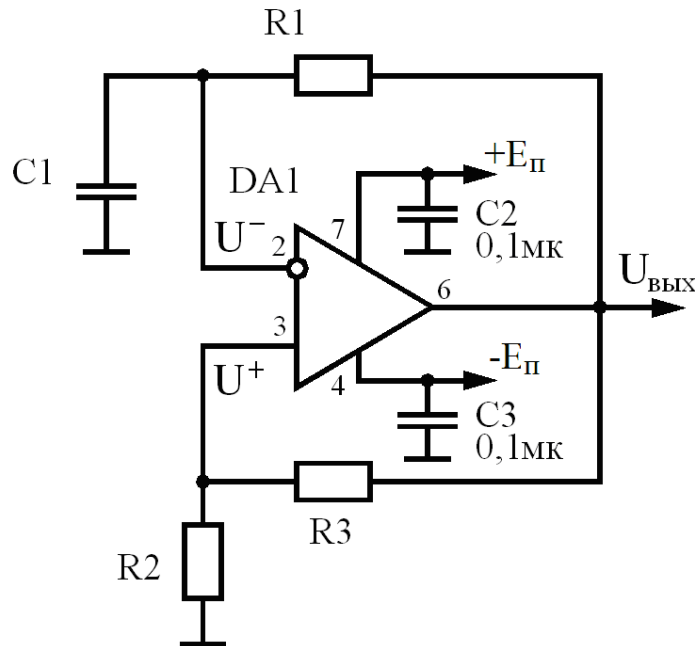


Рис. 11.1. Схема мультивибратора на ОУ

*Примечание.* На схеме также показаны так называемые блокировочные конденсаторы в цепях питания  $C_2$  и  $C_3$  ёмкостью  $0,1 \text{ мкФ}$  (стандарт для большинства ОУ), которые нужны для сглаживания импульсных переходных процессов в цепях питания, а также для обеспечения устойчивости работы ОУ. Далее на схемах цепи питания ОУ не будут показаны (кроме случаев, когда это принципиально важно). Также на схеме для примера показана нумерация выводов ИМС ОУ (также типичная для большинства ИМС, имеющих в своём составе один ОУ), далее тоже показываться не будет.

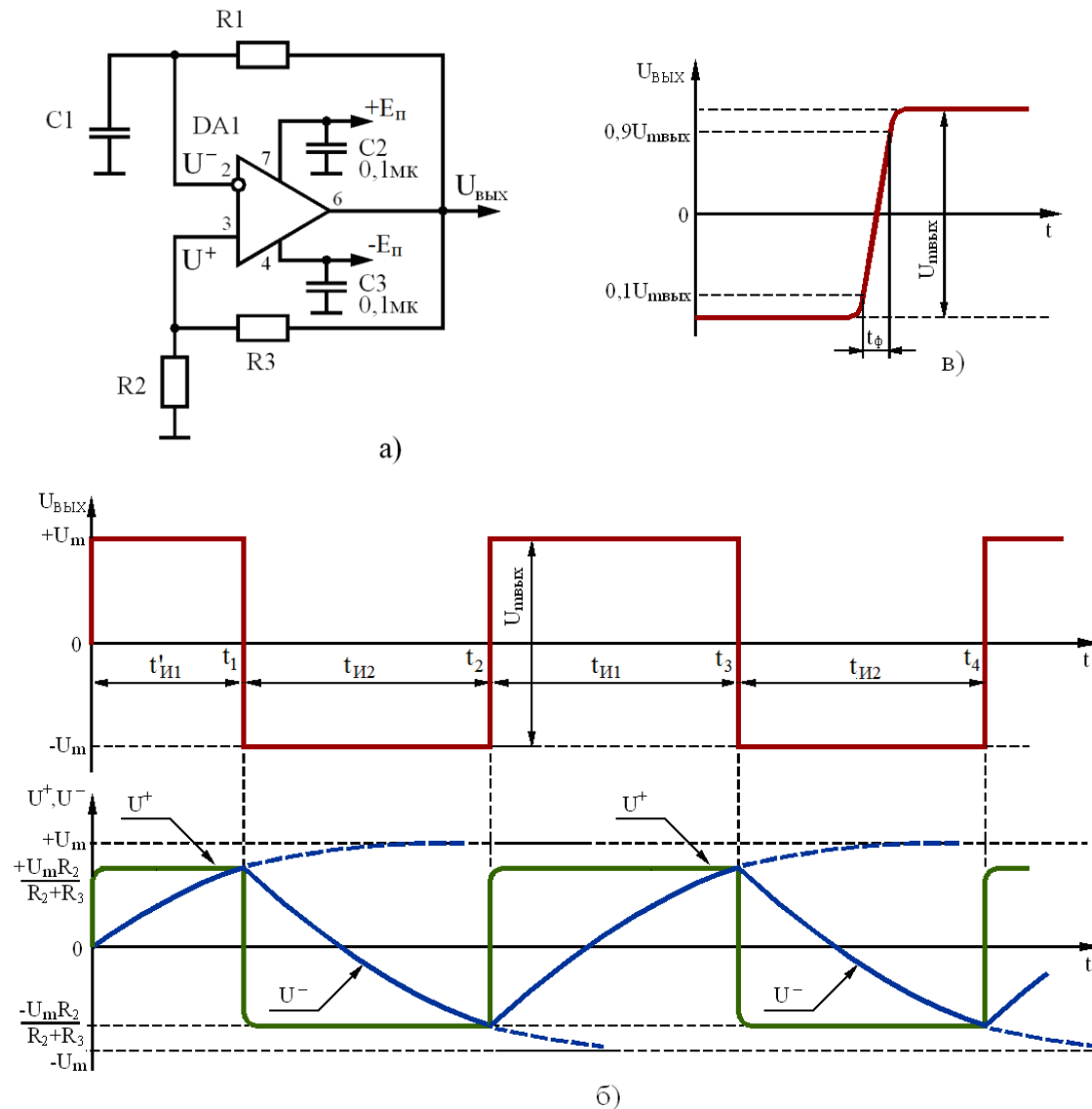


Рис. 10.2. Схема мультивибратора на ОУ (а), временные диаграммы работы (б), фронт выходного импульса (в)

Принцип работы схемы рассмотрим с помощью временных диаграмм ее работы (рис. 10, 2, б). До включения питания (момент  $t=0$ ) все конденсаторы схемы разряжены, поэтому во всех узлах схемы напряжение равно нулю. При включении питания из-за асимметрии входного дифференциального каскада ОУ на его выходе возникает напряжение, которое усиливается ОУ. Это эквивалентно появлению между входами ОУ *напряжения смещения нуля*  $U_{\text{см}}$ , которое равновероятно может быть положительным или отрицательным. Для определённости будем считать, что  $U_{\text{см}} > 0$ , тогда в момент  $t=0$  напряжение на выходе ОУ  $U_{\text{ВЫХ}}$  начинает возрастать. По цепи ПОС это напряжение передается на неинвертирующий вход ОУ, напряжение  $U^+$  на котором увеличивается. Напряжение на конденсаторе  $C_1$  не может измениться мгновенно, поэтому напряжение на инвертирующем входе ОУ  $U^-$  практически не изменяется. Появляется *положительное* дифференциальное входное напряжение ОУ  $U_{\text{вх.диф}} = U^+ - U^-$ , что приводит к дальнейшему росту  $U_{\text{ВЫХ}}$ , к дальнейшему росту  $U^+$  и  $U_{\text{вх.диф}}$  и еще большему дальнейшему росту  $U_{\text{ВЫХ}}$ . Таким образом, благодаря ПОС после включения питания происходит непрерывное и сравнительно быстрое возрастание  $U_{\text{ВЫХ}}$  до максимально возможной величины  $+U_m$ , близкой к напряжению питания  $+E_{\text{П}}$ . Длительность этого процесса определяется *максимальной скоростью изменения выходного напряжения ОУ*  $U_n$  (сокращённо – скоростью нарастания). При этом напряжение на неинвертирующем входе становится равным  $+U_m R_2 / (R_2 + R_3) = K_{\text{нос}} U_m$ , где  $K_{\text{нос}} = R_2 / (R_2 + R_3)$  - коэффициент передачи цепи ПОС.

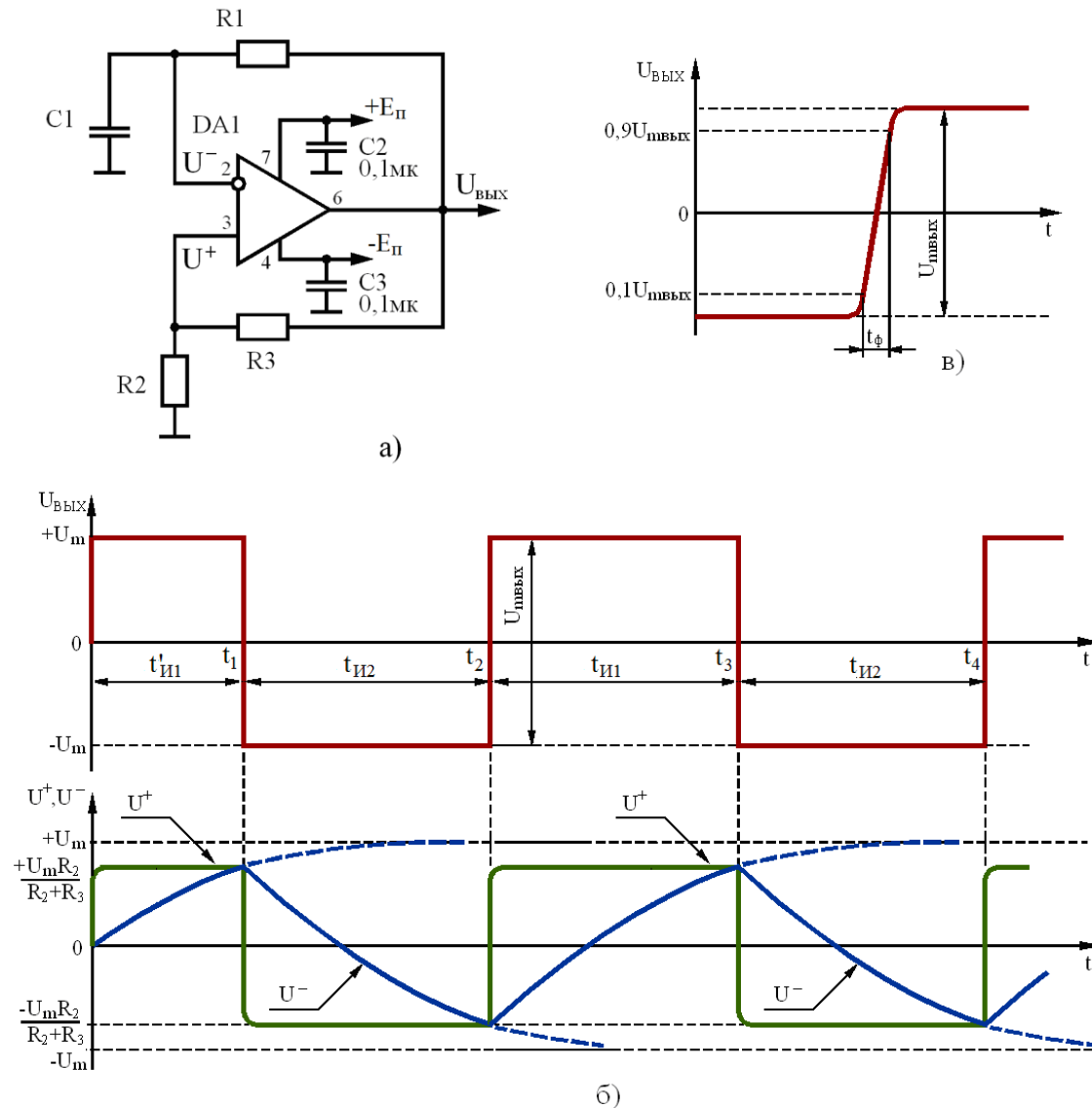


Рис. 10.2. Схема мультивибратора на ОУ (а), временные диаграммы работы (б), фронт выходного импульса (в)

При появлении на выходе ОУ напряжения  $U_{\text{вых}} = U_m$  начинается заряд конденсатора  $C_1$  через резистор  $R_1$ , поэтому на интервале  $t_1 - t_2$  напряжение  $U^-$  плавно возрастает с постоянной времени  $\tau = R_1 C_1$ , асимптотически стремясь к  $U_m$ . Напряжение  $U^+$  на данном интервале остаётся неизменным, поэтому из-за возрастания  $U^-$  дифференциальное входное напряжение ОУ уменьшается. Пока  $U_{\text{вх.диф}}$  остаётся положительным, выходное напряжение остаётся неизменным и равным  $+U_m$ . В момент  $t_2$   $U^-$  становится больше  $U^+ = K_{\text{noc}} U_m$ ,  $U_{\text{вх.диф}}$  становится отрицательным и поэтому  $U_{\text{вых}}$  начинает уменьшаться. Это приводит к уменьшению  $U^+$  и дальнейшему уменьшению  $U_{\text{вых}}$ . Таким образом, благодаря ПОС происходит непрерывное быстрое уменьшение  $U_{\text{вых}}$  до минимально возможной величины  $-U_m$ , близкой к напряжению питания  $-E_{\text{п}}$ . Напряжение  $U^+$  становится равным  $-K_{\text{noc}} U_m$ . Так как  $U^-$  не может измениться мгновенно и остаётся равным  $K_{\text{noc}} U_m$ , то дифференциальное входное напряжение ОУ скачком изменяется до  $-2K_{\text{noc}} U_m$ .

Далее на интервале  $t_1 - t_2$  происходит разряд  $C_1$  через резистор  $R_1$ . Напряжение  $U^-$  плавно уменьшается с постоянной времени  $\tau = R_1 C_1$ , асимптотически стремясь к  $-U_m$ . Поэтому отрицательное  $U_{\text{вх.диф}}$  уменьшается по модулю, но пока оно остаётся отрицательным, выходное напряжение остаётся равным  $-U_m$ . В момент  $t_2$   $U^-$  уменьшается настолько, что становится меньше, чем  $-K_{\text{noc}} U_m$ , поэтому  $U_{\text{вх.диф}}$  вновь становится положительным, выходное напряжение вследствие ПОС вновь возрастает до  $+U_m$ , после чего  $U_{\text{вх.диф}}$  скачком возрастает до  $2K_{\text{noc}} U_m$ .

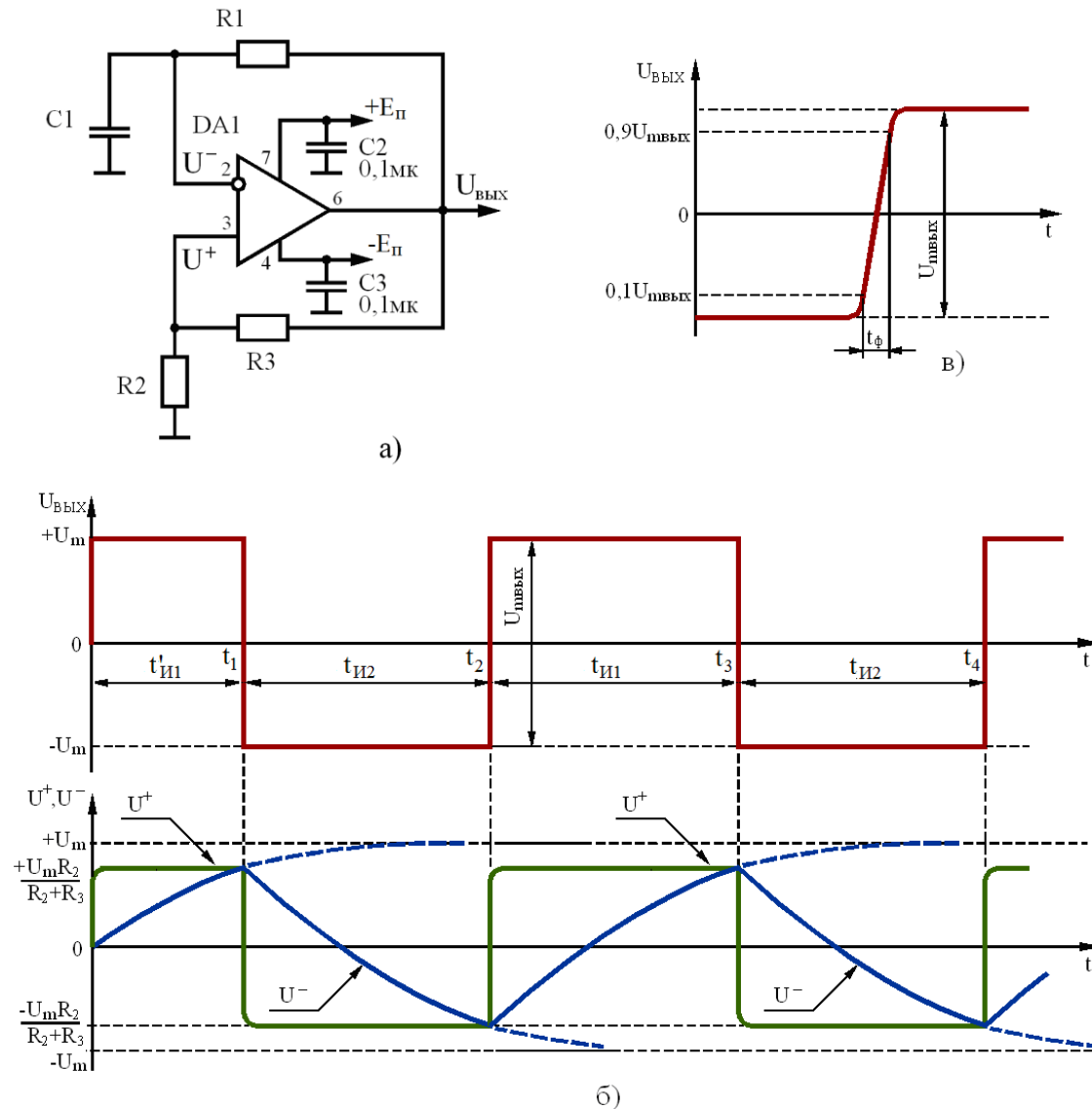


Рис. 10.2. Схема мультивибратора на ОУ (а), временные диаграммы работы (б), фронт выходного импульса (в)

Далее процессы в схеме происходят аналогично. На интервале  $t_2 - t_3$  вследствие заряда  $C_1$  происходит рост  $U^-$  до момента  $t_3$ , когда  $U^- > U^+ = K_{noc} U_m$  и  $U_{ВЫХ}$  становится равным  $+U_m$ , на  $t_3 - t_4$  из-за разряда  $C_1$  происходит уменьшение  $U^-$  до момента  $t_4$ , когда  $U^- < U^+ = -K_{noc} U_m$  и  $U_{ВЫХ}$  становится равным  $-U_m$ .

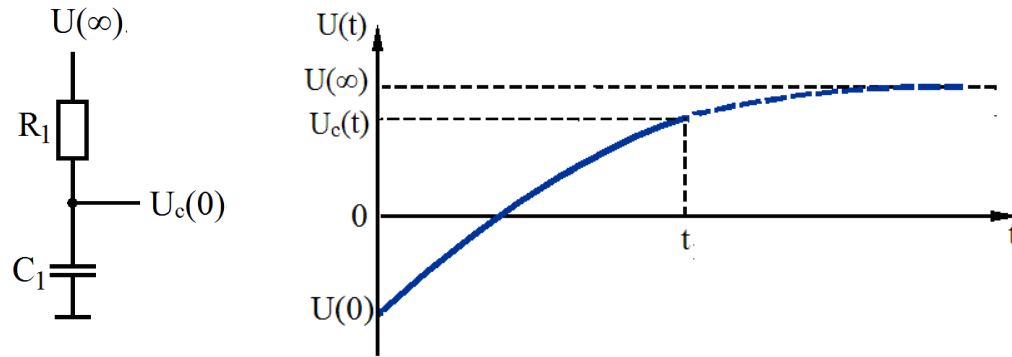
Из временных диаграмм работы схемы видно, что при включении питания схема генерирует импульс уменьшенной длительности  $t'_{и1}$ , т. к. длительность этого импульса определяется изменением напряжения  $U^-$  от 0 до  $K_{noc} U_m$ . Длительность последующих импульсов положительной и отрицательной полярности ( $t_{и1}$  и  $t_{и2}$ ) соответствует изменению  $U$  в пределах  $\pm K_{noc} U_m$ , при этом рост и спад  $U^-$  происходит с одинаковой постоянной времени, поэтому  $t_{и1} = t_{и2} > t'_{и1}$ .

Время фронта и спада выходного напряжения определяются значением  $V_u$  используемого ОУ (рис. 10.1, в). Стандартная методика предусматривает измерение  $t_\phi$  по уровням 0,1 и 0,9 от размаха импульса выходного напряжения  $U_{мввых} = 2U_m$ . Поэтому на интервале  $t_\phi$  выходное напряжение увеличивается на  $(2 \times 0,8)U_m$ , тогда

$$t_\phi \approx 1.6 U_m / V_u.$$

Соотношение приближённое, потому что не учитывается задержка включения/выключения транзисторов ОУ, работающих в ключевом режиме.

Очевидно, что длительность импульсов на выходе генератора в первую очередь зависит от постоянной времени цепи  $R_1C_1$ , поэтому эта цепь называется *времязадающей*. Рассмотрим работу времязадающей RC-цепи с общих позиций (рис. 10.3). Если в начальный момент времени конденсатор был заряжен до напряжения  $U(0)$ , то при заряде конденсатора через резистор от источника напряжения  $U(\infty)$  напряжение на конденсаторе будет изменяться с постоянной времени  $\tau=R_1C_1$ , асимптотически стремясь к  $U(\infty)$ .



Закон Кирхгофа для времязадающей цепи можно записать следующим образом

$$U(\infty) = i_c R_1 + U_c(t) = R_1 C_1 \frac{dU_c(t)}{dt} + U_c(t)$$

Решение этого уравнения:  $U_c(t) = U(\infty) + A \exp\left(-\frac{t}{R_1 C_1}\right)$ ,

где  $A$  определяется из начальных условий. В момент  $t=0$   $U_c(0)$ ,

поэтому  $U_c(0) = U(\infty) + A \exp\left(-\frac{0}{R_1 C_1}\right) = U(\infty) + A$ , тогда

$$A = U_c(0) - U(\infty).$$

Отсюда получаем закон изменения напряжения на конденсаторе  $U_c$  во времени в процессе заряда (фактически – функцию, график которой изображен на рис. 10.3):

$$U_c(t) = U_c(0) \exp\left(-\frac{t}{R_1 C_1}\right) + U(\infty) \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{R_1 C_1}\right)\right) \quad (10.1)$$

Из (10.1) можно получить выражение для определения момента  $t$ , когда напряжение на конденсаторе примет некоторое заданное значение  $U(t)$ :

$$t = R_1 C_1 \ln \left[ \frac{U(\infty) - U(0)}{U(\infty) - U(t)} \right] \quad (10.2).$$

Формулы (10.1) и (10.2) могут применяться при выводе формулы для длительности выходного импульса любой схемы генератора с времязадающей RC-цепью.

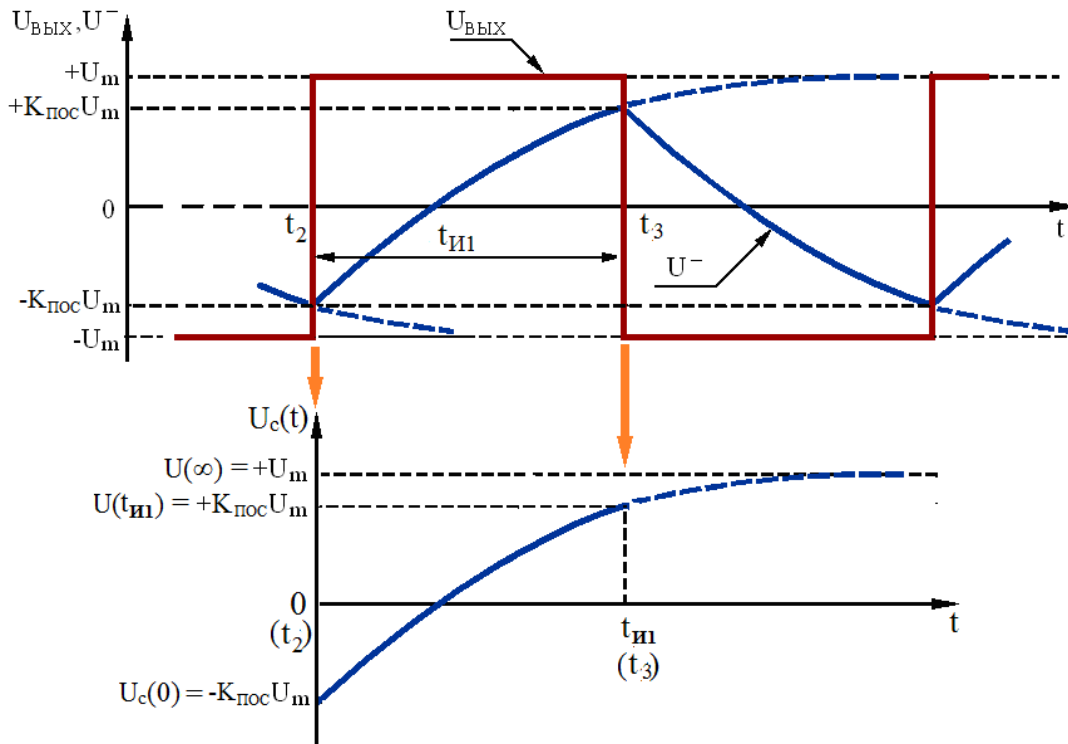


Рис. 10.4. К выводу формул для вычисления длительности выходного импульса мультивибратора на ОУ

Используем (10.1) и (10.2) для получения формул расчёта длительности выходного импульса мультивибратора на ОУ (рис.10.4):

- 1) за начало отсчёта  $t=0$  можно принять момент установления на выходе схемы напряжения  $+U_m$  (соответствует моменту  $t_2$  на рис. 10.2, б), при этом  $U^-(0) = U_c(0) = -K_{noc}U_m$ ;
  - 2) напряжение  $U = U_c$  нарастает с постоянной времени  $\tau = R_1C_1$ , стремясь к  $U(\infty) = U_m$ ;
  - 3) момент окончания импульса  $t = t_{u1}$  соответствует моменту  $t_3$  на рис. 10.1, б;  $U^-(t_{u1}) = U_c(t_{u1}) = +K_{noc}U_m$ .
- Тогда (10.1) записывается как

$$U_c(t) = U_m - U_m(1 + K_{noc})\exp\left(-\frac{t}{R_1C_1}\right),$$

а из (10.2) получается формула для  $t_{u1}$ :

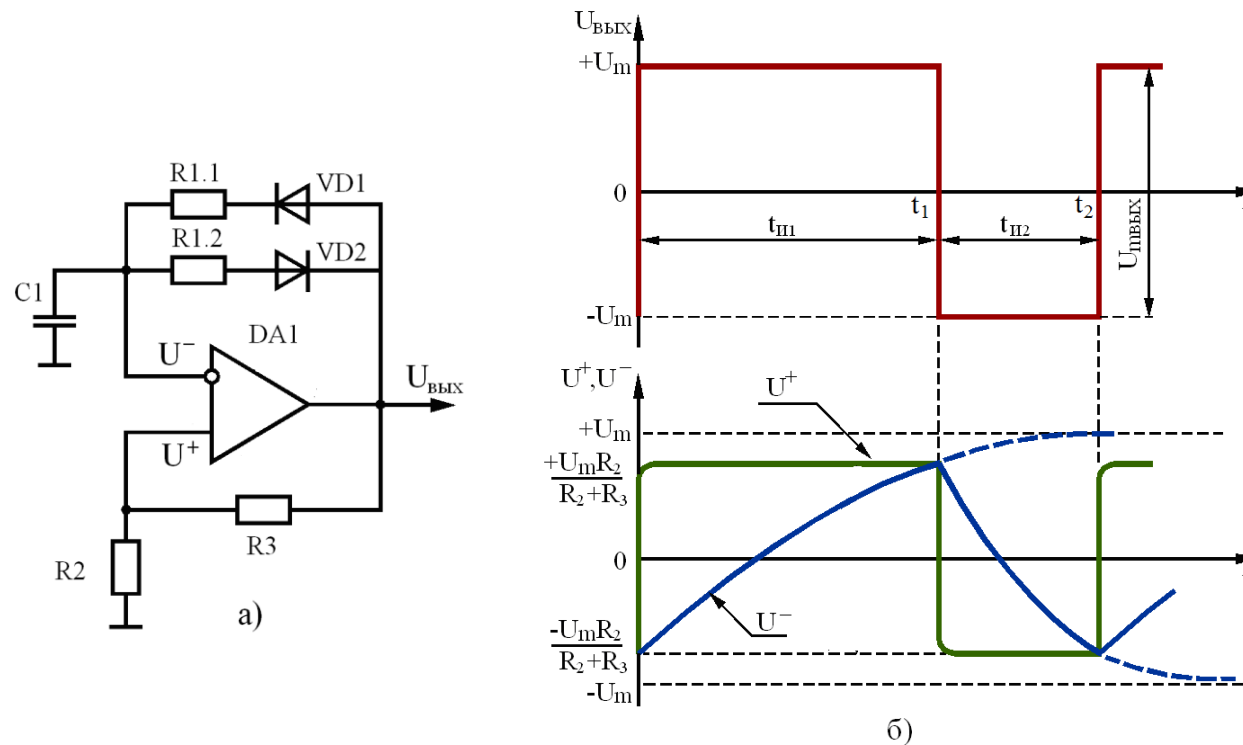
$$t_{u1} = R_1C_1 \ln \left[ \frac{U_m + U_m K_{noc}}{U_m - U_m K_{noc}} \right] = R_1C_1 \ln \left[ \frac{1 + K_{noc}}{1 - K_{noc}} \right] =$$

$$= R_1C_1 \ln \left[ 1 + \frac{2R_2}{R_3} \right] \quad (10.3)$$

Аналогично рассматривая разряд  $C_1$  на интервале  $t_1 - t_2$ , можно показать, что  $t_{u2} = t_{u1}$ .

**Для самостоятельной проработки: получить формулу для расчёта первого импульса  $t'_{u1}$ .**

Если требуется получить разную длительность интервалов положительного и отрицательного выходного напряжения  $t_{u2} \neq t_{u1}$ , то можно ввести в цепь ООС дополнительные элементы, как показано на рис. 10.5, а. Временные диаграммы схемы (рис. 10.5, б) даны для стационарного режима (считается, что включение питания произошло заранее). В этой схеме благодаря диодам  $VD_{1.1}$  и  $VD_{1.2}$  постоянные времени заряда и разряда конденсатора  $C_1$  различны и зависят от полярности  $U_{ВЫХ}$ .



На интервале  $0 - t_1$  выходное напряжение положительно, поэтому диод  $VD_{1.1}$  открыт и диод  $VD_{1.2}$  закрыт. Таким образом, конденсатор  $C_1$  заряжается через резистор  $R_{1.1}$  и значение  $t_{u1}$  будет пропорционально постоянной времени заряда  $\tau_z = R_{1.1}C_1$ . На интервале  $t_1 - t_2$  выходное напряжение отрицательно, поэтому диод  $VD_{1.1}$  закрыт и диод  $VD_{1.2}$  открыт. Разряд  $C_1$  идёт через резистор  $R_{1.2}$ , поэтому  $t_{u2}$  определяется постоянной времени разряда  $\tau_p = R_{1.2}C_1$ .

Если не учитывать неидеальность диодов, то

$$t_{u1} = R_{1.1}C_1 \ln \left[ 1 + \frac{2R_2}{R_3} \right]$$

$$t_{u2} = R_{1.2}C_1 \ln \left[ 1 + \frac{2R_2}{R_3} \right]$$

Рис. 10.5. Схема мультивибратора на ОУ с различной длительностью импульсов положительной и отрицательной полярности (а), временные диаграммы работы (б)

Для временных диаграмм рис. 10.5, б :  $R_{1.1} > R_{1.2}$ , поэтому  $t_{u1} > t_{u2}$ .

*Для самостоятельной проработки: возможно ли для построения схемы с  $t_{u1} > t_{u2}$  использовать не два диода, а один?*



## Одновибратор на ОУ

Простейший одновибратор (рис. 10.6, а) – генератор одиночного прямоугольного импульса заданной амплитуды и длительности при подаче управляющего сигнала. Сравнивая с рис. 10.1, а, можно заметить, что одновибратор можно получить, дополнив схему мультивибратора цепью запуска  $R_4$ - $C_2$ - $VD_2$ , а также зашунтировав конденсатор времязадающей цепи  $C_1$  диодом  $VD_1$ . В этой схеме также используется двуполярное питание ОУ. Временные диаграммы работы одновибратора показаны на рис. 10.6, б.

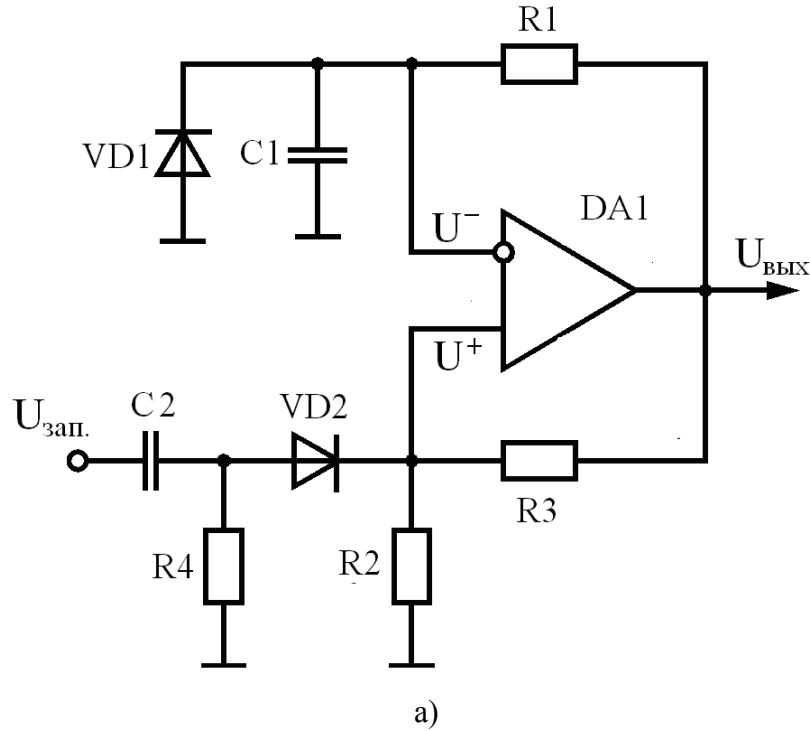
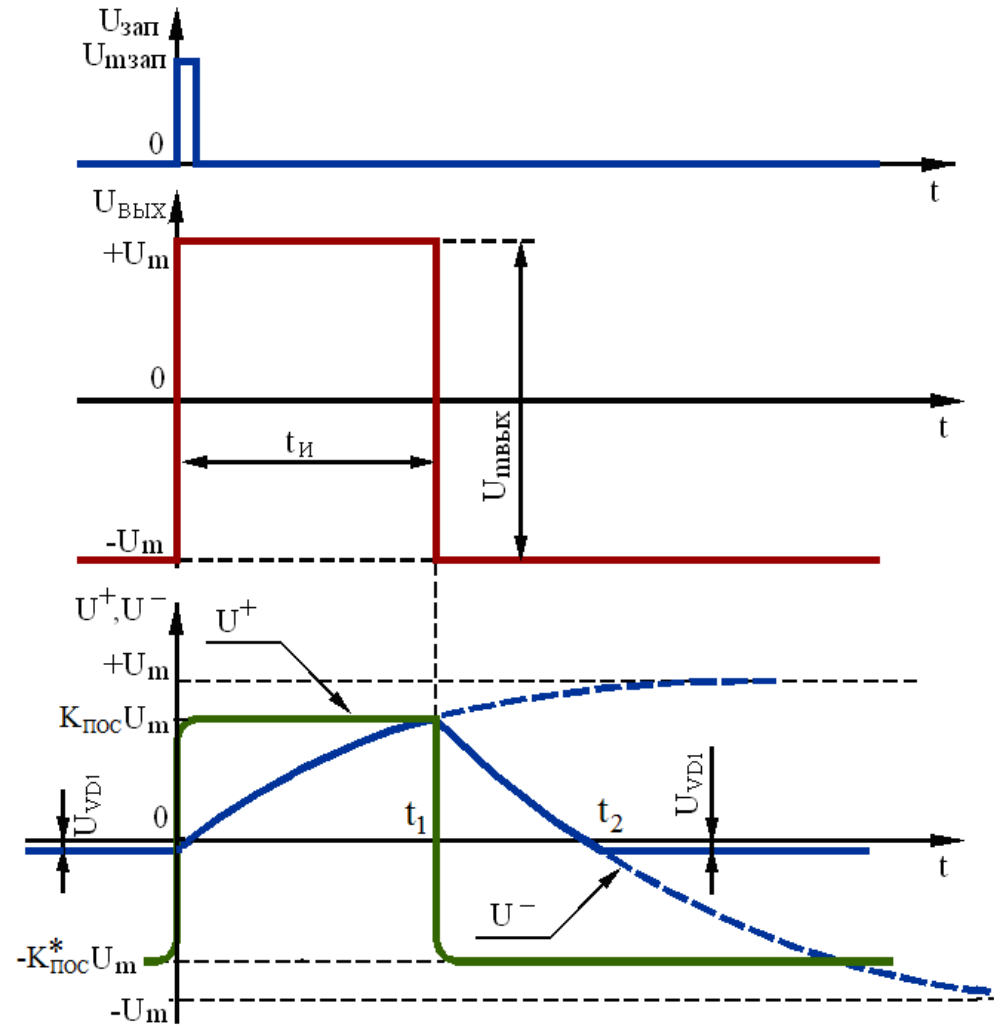


Рис. 10.6. Схема одновибратора на ОУ (а), временные диаграммы ее работы (б)



До подачи запускающего импульса  $U_{in}=0$ . Так как при этом  $U(+)<0$ , диод  $VD_2$  открыт, и параллельно  $R_2$  оказывается включён резистор цепи запуска  $R_4$  (из-за чего  $K_{noc}$  несколько уменьшается и становится равным  $K_{noc}^* = \frac{(R_2 \parallel R_4)}{(R_2 \parallel R_4) + R_3}$ ). Таким образом,

$$U(+)=U(+)_HAC = -\frac{U_m(R_2 \parallel R_4)}{(R_2 \parallel R_4) + R_3} = -U_m K_{noc}^*.$$

С выхода ОУ на диод  $VD_1$  через резистор  $R_1$  подаётся отрицательное напряжение  $-U_m$ , поэтому  $VD_1$  открыт и напряжение на конденсаторе равно  $U^- = -U_{VD1}$ , где  $U_{VD1}$  – прямое напряжение диода (0,5...0,6 В). Так как  $U^+ < U^-$ ,  $U_{ex.duf} = U^+ - U^- < 0$ , поэтому  $U_{вых}$  остаётся равным  $-U_m$  (состояние устойчиво).

При подаче на вход запускающего импульса амплитудой  $U_{in}$  напряжение на неинвертирующем входе становится равным  $U_{in} + U(+)_HAC$ . Для того, чтобы началось формирование выходного импульса, дифференциальное входное напряжение ОУ должно стать положительным, т. е. должно быть выполнено условие  $U(+)>U(-)$ :

$$U(+)=U_{in} + U(+)_HAC = U_{in} - \frac{U_m(R_2 \parallel R_4)}{(R_2 \parallel R_4) + R_3} > -U_{D1},$$

Таким образом, для запуска одновибратора амплитуда входного импульса должна превышать минимальное значение

$$U_{in} > U_{in}^{\min} = \frac{U_m(R_2 \parallel R_4)}{(R_2 \parallel R_4) + R_3} - U_{D1}.$$

Выбирая  $R_4 \gg R_2$  и пренебрегая сравнительно малой величиной  $U_{D1}$ , получаем приближённое выражение для определения  $U_{in}^{\min}$ :

$$U_{in} > K_{noc} U_m.$$

Таким образом, если амплитуда запускающего импульса превышает  $U_{in}^{\min}$ , то  $U_{ex.duf} > 0$  и  $U_{вых}$  начнёт возрастать. Благодаря ПОС по цепи  $R_2 - R_3$  (так же, как в мультивибраторе на ОУ) выходное напряжение ОУ становится равным  $U_m$ , и  $U^+ = K_{noc} U_m$ . Теперь

на диод  $VD_1$  с выхода ОУ через резистор  $R_1$  подаётся положительное напряжение, поэтому  $VD_1$  закрывается и начинается заряд конденсатора  $C_1$ . Напряжение  $U$  возрастает с постоянной времени  $\tau = R_1 C_1$ , асимптотически стремясь к  $+U_m$ , что приводит к уменьшению  $U_{ex.диф}$ . На интервале  $0-t_1$   $U_{ex.диф}$  остаётся положительным, поэтому до момента выходное напряжение остаётся равным  $+U_m$ . Так как  $U^+ = K_{noc} U_m$ , диод  $VD_2$  закрывается, отключая цепь запуска от неинвертирующего входа ОУ, поэтому по окончании импульса запуска состояние схемы не меняется.

В момент  $t_1 \equiv t_u$   $U$  возрастает настолько, что становится больше  $K_{noc} U_m$  (как и в схеме мультивибратора, достаточно очень малого кратковременного превышения),  $U_{ex.диф}$  становится отрицательным и вследствие ПОС  $U_{вых}$  становится равным  $-U_m$ . Одновременно  $U^+ = -K_{noc} U_m$ , а  $U$  начинает убывать вследствие разряда  $C_1$ , стремясь к  $-U_m$ . В момент  $t_2$   $U$  становится отрицательным и отключается диод  $VD_1$ , из-за этого напряжение  $U$  стабилизируется на уровне  $-U_{VD1}$ . Именно из-за того, что дальнейшее уменьшение  $U$  оказывается невозможным,  $U$  не может стать меньше  $-K_{noc} U_m$  и генерация импульса на выходе не повторяется. Таким образом, начиная с момента  $t_2$  схема переходит в исходное состояние, которое может продолжаться сколь угодно долго, пока на вход не будет подан следующий запускающий импульс.

Вывод формулы для расчёта  $t_u$  можно упростить, используя соотношения (10.2) и (10.3). По временной диаграмме для  $U$  (рис.10.6, б) определяем  $U(0) = -U_{VD1}$ ,  $U(t_u) = K_{noc} U_m$ ,  $U(\infty) = U_m$ . Тогда

$$t_u = R_1 C_1 \ln \left[ \frac{U(\infty) - U(0)}{U(\infty) - U(t_u)} \right] = R_1 C_1 \ln \left[ \frac{U_m + U_{VD1}}{U_m - K_{noc} U_m} \right] = R_1 C_1 \ln \left[ \frac{1}{1 - K_{noc}} \left( 1 + \frac{U_{VD1}}{U_m} \right) \right] = R_1 C_1 \ln \left[ \left( 1 + \frac{R_2}{R_3} \right) \left( 1 + \frac{U_{VD1}}{U_m} \right) \right]$$

Если  $U_m \gg U_{VD1}$ , то

$$t_u \approx R_1 C_1 \ln \left[ \frac{1}{1 - K_{noc}} \right] = R_1 C_1 \ln \left( 1 + \frac{R_2}{R_3} \right).$$

Время фронта выходного импульса одновибратора  $t_\phi$  определяется так же, как для мультивибратора. **Длительность запускающего импульса  $t_H$  должна превышать время фронта**, иначе за время действия входного импульса не сможет запуститься ПОС и генерации выходного импульса не будет (одновибратор на ОУ с низкой скоростью нарастания не может запускаться очень короткими импульсами).

Для нормальной работы одновибратора постоянная времени входной цепи должна значительно превышать время переключения ОУ, т. е. время фронта. С учетом того, что при подаче входного импульса диод  $D2$  открыт, постоянная времени входной цепи приближенно равна

$$\tau_{ex} \approx C_2 (R_4 \parallel R_2 \parallel R_3) \gg t_\phi.$$

Существуют варианты схем мультивибраторов и одновибраторов на ОУ с однополярным питанием.

Несмотря на простоту, рассмотренные схемы используются сравнительно редко. Основное назначение ОУ – построение усилительных схем, в которых ОУ работает в активном режиме. Ключевой режим для ОУ не является основным, поэтому возникающие задержки включения/выключения для большинства ОУ не нормируются. Поэтому при малых длительностях выходных импульсов реальная длительность импульса может не соответствовать расчетной. Также стоит учесть, что при получении импульсов малой длительности нужно также обеспечить малую длительность фронта, для чего могут потребоваться дорогие быстродействующие ОУ с очень высокой скоростью нарастания.

*Пример. Длительность импульса 10 мкс, фронт 0,1 мкс (1% от длительности). При амплитуде 10 В необходим ОУ с  $V_u > 100$  В/мкс.*

Поэтому мультивибраторы и одновибраторы на ОУ используются для получения импульсов с длительностью не менее сотен мкс. Более подходящими для использования в генераторах прямоугольных импульсов (и в других импульсных устройствах) считаются ИМС компараторов.