

## 11.5. ГЕНЕРАТОРЫ ЛИНЕЙНО ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Линейно изменяющимся или пилообразным напряжением называют электрические колебания (импульсы), содержащие участки, на которых напряжение изменяется практически по линейному закону, а затем возвращается к первоначальному уровню. Такое напряжение используется для создания временной развертки электронного луча на экране ЭЛТ, получения временных задержек импульсных сигналов, модуляции импульсов по длительности в системах автоматического регулиро-

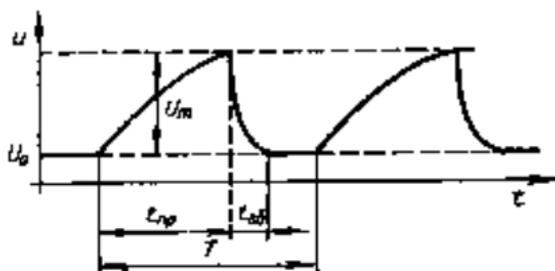


Рис. 11.11. График линейно-изменяющегося напряжения

вания, измерительных приборах, ЭВМ непрерывного действия и т. п.

**Параметры.** Основными параметрами линейно изменяющегося напряжения (рис. 11.11) является:

*длительность прямого (рабочего) хода  $t_{пр}$ ;*

*длительность обратного хода  $t_{обр}$ , или время восстановления  $t_{в}$  исходного состояния; . .*

*амплитуда  $U_m$ ;*

*период повторения  $T$ ;*

*начальный уровень  $U_0$ ;*

*коэффициент нелинейности  $\epsilon$ , характеризующий степень отклонения реального пилообразного напряжения от напряжения, изменяющегося по линейному закону:*

$$\epsilon = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max}}, \quad (11.7)$$

где  $V_{\max} = du/dt$  при  $t = 0$  и  $V_{\min} = du/dt$  при  $t = t_{\text{пр}}$  — скорости изменения пилообразного напряжения соответственно в начале и конце прямого хода.

Качество работы генератора линейно изменяющегося (ГЛИН), или пилообразного (ГПН), напряжения характеризуется параметром  $\xi$ , называемым *коэффициентом использования напряжения источника питания*:

$$\xi = U_{\text{н}}/E_{\text{н}}. \quad (11.8)$$

В соответствии с характером изменения пилообразного напряжения во время прямого хода различают два вида генераторов: генераторы линейно нарастающего и генераторы линейно убывающего (падающего) напряжения. В обоих видах генераторов для получения пилообразного напряжения используется зарядка или разрядка конденсатора во время прямого хода с последующим восстановлением исходного состояния во время обратного хода.

**Принципы построения генераторов пилообразного (линейно изменяющегося) напряжения.** Независимо от практической реализации все ГПН можно представить в виде единой эквивалентной схемы (рис. 11.12). В нее входят источник питания  $E_{\text{н}}$ , зарядный резистор  $R_{\text{н}}$ , который можно рассматривать как внутреннее сопротивление источника питания, конденсатор  $C$  — накопитель энергии, электронный ключ  $S$  и разрядный резистор  $R$  сопротивлением, равным внутреннему сопротивлению замкнутого ключа.

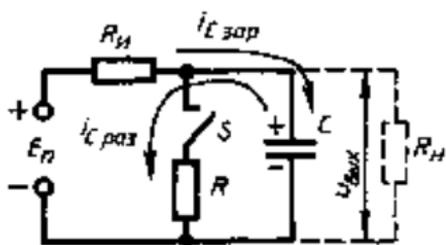


Рис. 11.12. Эквивалентная схема ГПН

В исходном состоянии ключ  $S$  замкнут и на конденсаторе устанавливается начальный уровень напряжения:

$$U_0 = \frac{E_{\text{н}}}{R_{\text{н}} + R} R.$$

При размыкании ключа конденсатор начинает заряжаться током  $i_{C \text{ зар}}$  и напряжение на нем изменяется по экспоненциальному закону:

$$u_C = U_0 + (E_{\text{н}} - U_0)(1 - e^{-t/\tau_1}), \quad (11.9)$$

где  $\tau_1 = R_{\text{н}}C$  — постоянная времени цепи зарядки конденсатора.

За время, равное длительности прямого хода  $t_{\text{пр}}$ , на-

пряжение на конденсаторе увеличивается до амплитудного значения  $U_m$  и становится равным

$$U_m + U_0 = U_0 + (E_n - U_0)(1 - e^{-t_{np}/\tau_3}). \quad (11.10)$$

Через время  $t = t_{np}$  ключ замыкается, и конденсатор разряжается. Напряжение на конденсаторе при этом изменяется по закону

$$u_c = (U_m + U_0)e^{-t/\tau_p},$$

где  $\tau_p = \bar{R}\bar{C}$  — постоянная времени цепи разрядки конденсатора. Обычно  $\bar{R} \ll R_n$  и  $\tau_p \ll \tau_3$ , поэтому восстановление начального уровня напряжения на конденсаторе происходит за малое время по сравнению с длительностью прямого хода:  $t_{обр} \ll t_{np}$ .

Простейшие ГПН. На рис. 11.13 показана схема простейшего ГПН на биполярном транзисторе.

В исходном состоянии транзистор, выполняющий роль ключа, открыт и насыщен. Напряжение  $U_{КЭ\text{ нас}}$  и напряжение на конденсаторе  $u_c = u_{вых}$  близки к нулю. При поступлении на базу транзистора отрицательного импульса транзистор запирается, начинается зарядка конденсатора по цепи:  $+E_n \rightarrow R_k \rightarrow C \rightarrow -E_n$  и формирование прямого хода пилообразного напряжения. Постоянная времени цепи зарядки  $\tau_3 = CR_k$ .

После окончания действия входного импульса транзистор снова открывается, и конденсатор разряжается через малое внутреннее сопротивление  $r_i$  открытого насыщенного транзистора. Происходит формирование обратного хода и восстановление начального (близкого к нулю) напряжения на конденсаторе. Постоянная времени цепи разрядки конденсатора  $\tau_p = Cr_i$  значительно меньше, чем  $\tau_3$ , поэтому  $t_{обр} \ll t_{np}$ .

Вместо транзисторного ключа можно использовать логический элемент. На рис. 11.14 показана схема простейшего ГПН на логическом элементе И — НЕ. Зарядный резистор  $R$  и конденсатор  $C$  являются навесными элементами ГПН. Физические процессы, происходящие при работе данного ЛЭ, аналогичны физическим процессам рассмотренного транзисторного ГПН.

Рассмотренные простейшие ГПН надежны в работе, но имеют малые значения коэффициентов  $\epsilon$  и  $\zeta$ . Действительно, скорость изменения напряжения на конденсаторе во время прямого хода определяется на основании (11.9) из выражения

$$V = \frac{du_c}{dt} = \frac{E_n - U_0}{\tau_3} e^{-t/\tau_3}$$

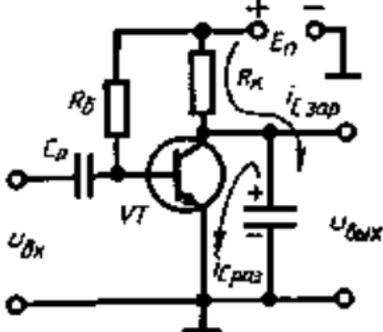


Рис. 11.13. Схема ГПН на биполярном транзисторе

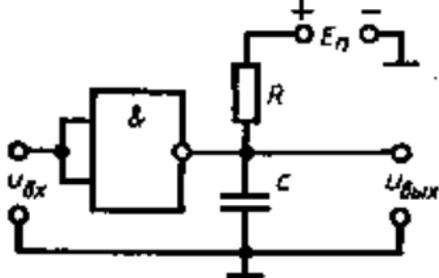


Рис. 11.14. Схема ГПН на логическом элементе И — НЕ

В начале прямого хода эта скорость будет максимальной:

$$V_{\max} = \left. \frac{du_C}{dt} \right|_{t=0} = \frac{E_n - U_0}{\tau_3},$$

а в конце — минимальной:

$$V_{\min} = \left. \frac{du_C}{dt} \right|_{t=t_{\text{пр}}} = \frac{E_n - U_0}{\tau_3} e^{-t_{\text{пр}}/\tau_3}.$$

Подставив значения  $V_{\max}$  и  $V_{\min}$  в выражение (11.7), определим коэффициент нелинейности пилообразного напряжения:

$$\varepsilon = (1 - e^{-t_{\text{пр}}/\tau_3}) \cdot 100 \%. \quad (11.11)$$

Обычно  $t_{\text{пр}} \ll \tau_3$ , поэтому, раскладывая  $e^{-t_{\text{пр}}/\tau_3}$  в ряд и ограничиваясь его первыми двумя членами, выражение (11.11) можно записать в виде

$$\varepsilon = 1 - \left(1 - \frac{t_{\text{пр}}}{\tau_3} + \dots\right) \approx \frac{t_{\text{пр}}}{\tau_3} = \frac{t_{\text{пр}}}{R_n C}. \quad (11.12)$$

Амплитуда пилообразного напряжения в соответствии с (11.10) и с учетом (11.11)

$$U_m = (E_n - U_0)(1 - e^{-t_{\text{пр}}/\tau_3}) = (E_n - U_0)\varepsilon,$$

и коэффициент использования напряжения источника питания на основании (11.8)

$$\xi = \frac{U_m}{E_n} = \frac{E_n - U_0}{E_n} \varepsilon. \quad (11.13)$$

Поскольку при зарядке конденсатора напряжение на нем увеличивается не по линейному, а по экспоненциальному закону, то для получения пилообразного напряжения

с удовлетворительной линейностью приходится использовать лишь начальный участок экспоненты. При этом  $U_0 \ll \ll E_n$ , и выражение (11.13) запишется в виде

$$\xi \approx \varepsilon.$$

При коэффициенте нелинейности  $\varepsilon = 1\%$  получаем  $\xi = 1\%$ . Следовательно, рассмотренная схема ГПН не позволяет получить большую амплитуду и коэффициент использования напряжения источника питания при малом коэффициенте нелинейности.

Нелинейность возрастания напряжения на конденсаторе при его зарядке вызвана уменьшением тока зарядки. Если же ток зарядки сделать стабильным, то напряжение на конденсаторе будет изменяться по линейному закону. Это позволит при малом коэффициенте нелинейности увеличить амплитуду пилообразного напряжения и коэффициент использования источника питания.

**ГПН с повышенной линейностью.** В настоящее время ГПН с малым значением коэффициента нелинейности ( $\varepsilon < 1\%$ ) и его незначительной зависимостью от сопротивления нагрузки создаются на основе интегральных ОУ.

В ГПН на ОУ (рис. 11.15) высокая линейность пилообразного напряжения достигается действием положи-

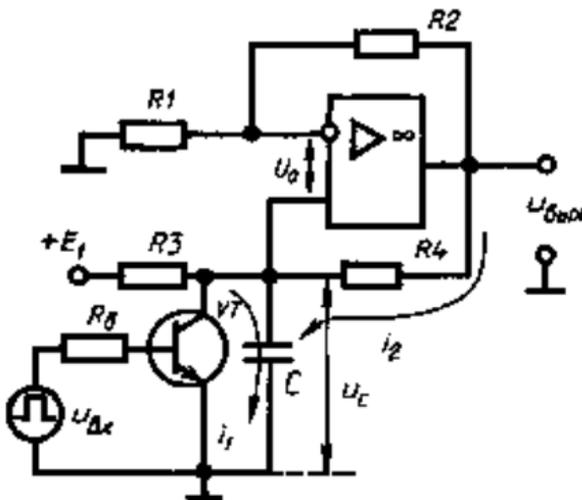


Рис. 11.15. Схема ГПН на базе интегрального ОУ

тельной ОС в цепи зарядки конденсатора С. Во время действия на входе положительного импульса транзистор VT открыт и насыщен. Происходит формирование обратного хода пилообразного напряжения, во время которого конденсатор разряжается через малое сопротивление насыщенного транзистора практически до нулевого уровня.

В паузах между входными импульсами транзистор закрыт и конденсатор заряжается током  $i_1$  от источника  $E_1$  через резистор  $R_3$ .

Напряжение  $u_c$ , образуемое на конденсаторе, поступает на неинвертирующий вход ОУ, работающего в линейном режиме с коэффициентом усиления по неинвертирующему входу  $K_u^{(+)} = 1 + (R_2/R_1)$ . В результате на выходе ОУ создается напряжение  $u_{вых} = u_c K_u^{(+)}$ , а на резисторе  $R_4$  — напряжение, равное  $u_{R4} = u_{вых} - u_c = u_c K_u^{(+)} - u_c = u_c R_2/R_1 = u_c K_u^{(-)}$ . Напряжение  $u_{R4} = u_c R_2/R_1$  создает ток  $i_2$ , который протекает через конденсатор  $C$  в том же направлении, что и ток  $i_1$ . Следовательно, ток зарядки конденсатора в паузах между входными импульсами

$$i_{C\text{зар}} = i_1 + i_2.$$

По мере зарядки конденсатора ток  $i_1$  уменьшается, а напряжения на конденсаторе и на выходе ОУ увеличиваются. Если  $K_u^{(-)} = R_2/R_1 > 1$ , то напряжение на резисторе  $R_4$  и протекающий через него ток  $i_2$  при увеличении  $u_c$  также увеличиваются. Увеличение тока  $i_2$  при соответствующем подборе коэффициента усиления может полностью компенсировать уменьшение тока  $i_1$  и зарядка конденсатора будет происходить постоянным током. Таким образом обеспечивается высокая линейность пилообразного напряжения.

ГПН на ОУ часто выполняются на основе интегратора (рис. 11.16, а).

До поступления входного импульса выходное напряжение потенциометром  $R_n$  устанавливается на заданном уровне  $U_{вых0}$  (рис. 11.16, б). Конденсатор  $C$  заряжается до напряжения  $U_{c0} = 0 - U_{вых0}$ . При поступлении на вход

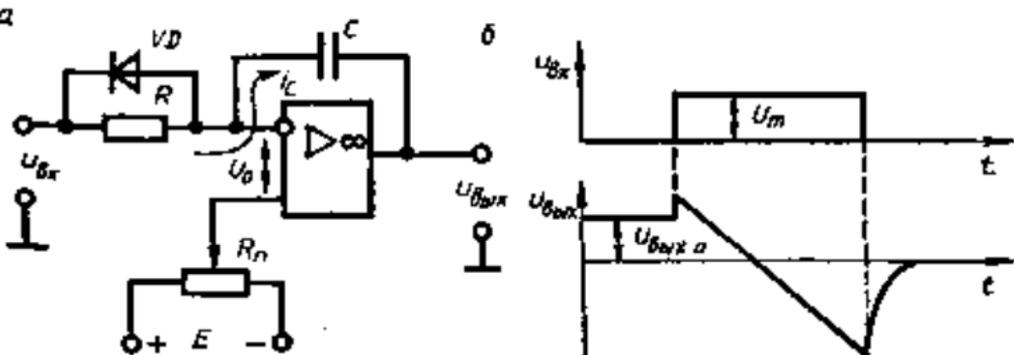


Рис. 11.16. Схема интегратора, применяемого в качестве ГПН (а), и графики изменений входного и выходного напряжений (б)

положительного импульса начинается перезарядка конденсатора через резистор  $R$  и выходное сопротивление ОУ. Принимая  $U_0 \approx 0$ , получаем, что ток перезарядки  $i_C = u_{вх}/R$  и  $u_{вых} = -u_C = -\frac{1}{C} \int i_C dt = -\frac{1}{RC} \int u_{вх} dt$ . Если входное напряжение представляет собой прямоугольный импульс с амплитудой  $\bar{U}_m$ , то

$$u_{вых} = \frac{1}{RC} U_m t,$$

т. е. выходное напряжение изменяется по линейному закону, который обеспечивается действием отрицательной ОС, стабилизирующей ток перезарядки конденсатора. Действительно, при уменьшении тока  $i_C$  увеличивается напряжение на инвертирующем входе ОУ ( $u_{вх}^{(-)} = u_{вх} - i_C R$ ). Это вызовет уменьшение напряжения на выходе ОУ и увеличение напряжения на конденсаторе (так как  $u_C = u_{вх}^{(-)} - u_{вых}$ ), которые приводят к увеличению тока  $i_C$ .

После прекращения действия входного импульса конденсатор  $C$  разряжается через диод  $VD$  и выходное сопротивление ОУ. Поскольку выходное сопротивление ОУ

достаточно велико (сотни Ом или единицы кОм), то для уменьшения длительности обратного хода пилообразного напряжения параллельно конденсатору можно подключить электронный ключ  $S$ , который открывается управляющими импульсами на время формирования обратного хода (рис. 11.17). Ключ не должен обладать утечкой тока в закрытом состоянии, так как это может привести

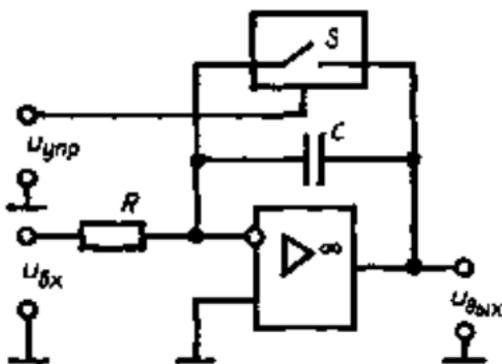


Рис. 11.17. Схема ГПН с малой длительностью обратного хода

к уменьшению амплитуды пилообразного напряжения и ухудшению его линейности. В качестве ключа часто используются полевые транзисторы и тиристоры.