

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПАРАТОРОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

Цель работы – изучение принципа действия и экспериментальное исследование работы аналоговых компараторов, выполненных на операционных усилителях.

### 13.1. Общие положения

Аналоговыми компараторами называются устройства, предназначенные для сравнения двух напряжений.

На рис. 13.1 приведена схема аналогового компаратора, выполненного на операционном усилителе.

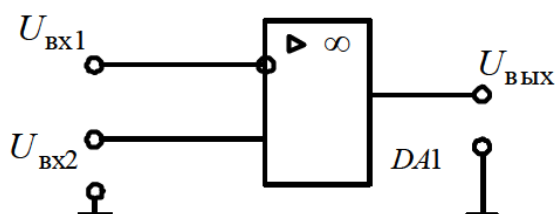


Рис. 13.1. Схема аналогового компаратора, выполненного на операционном усилителе

Операционный усилитель рис. 13.1 включен по дифференциальной схеме, не охвачен обратной связью, поэтому разность входных напряжений  $U_{ВХ1} - U_{ВХ2} = \Delta U_{ВХ}$  не равна нулю.

Передаточная характеристика аналогового компаратора приведена на рис. 13.2.

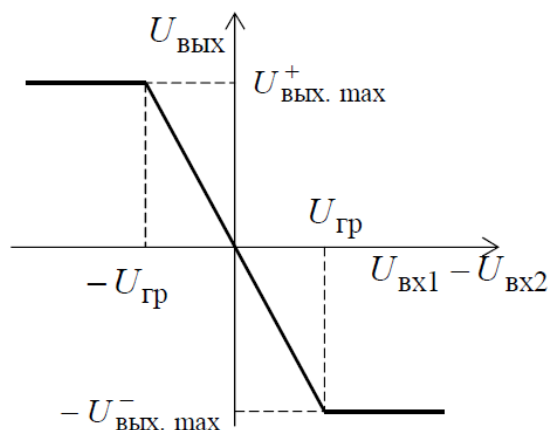


Рис. 13.2. Передаточная характеристика аналогового компаратора, выполненного на операционном усилителе

Передаточная характеристика аналогового компаратора имеет три участка:

- линейный участок пропорционального преобразования

$$U_{\text{ВЫХ}} = k_u \cdot (U_{\text{ВХ1}} - U_{\text{ВХ2}}), \quad (13.1)$$

где  $k_u$  – собственный коэффициент усиления операционного усилителя по напряжению;  $U_{\text{ВХ1}}$  – входное напряжение по инвертирующему входу;  $U_{\text{ВХ2}}$  – входное напряжение по неинвертирующему входу.

Линейный участок передаточной характеристики компаратора ограничен весьма малыми напряжениями  $-U_{\text{ГР}} - +U_{\text{ГР}}$ , причем

$$\pm U_{\text{ГР}} = \frac{\mp U_{\text{ВЫХ.макс}}}{k_u}, \quad (13.2)$$

где  $\mp U_{\text{ВЫХ.макс}}$  – напряжения насыщения ОУ, которые на 1 – 1,5 В меньше напряжения питания  $\pm E_{\text{к}}$  ОУ.

В идеальном ОУ коэффициент усиления по напряжению  $k_u = \infty$  и  $\pm U_{\text{ГР}} = 0$ . В реальном ОУ коэффициент усиления по напряжению  $k_u = 10^4 \div 10^5$  и  $\pm U_{\text{ГР}}$  составляет доли милливольт;

- при  $|U_{\text{ВХ1}} - U_{\text{ВХ2}}| > U_{\text{ГР}}$  выходное напряжение ОУ ограничено значением  $\pm U_{\text{ВЫХ.макс}}$ , а транзисторы выходного усилительного каскада ОУ работают в ключевом режиме.

Таким образом, кроме линейного участка передаточная характеристика ОУ содержит участок положительного насыщения

$$\Delta U_{\text{ВХ}} > U_{\text{ГР}}; \quad U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ.макс}}^+ \quad (13.3)$$

и участок отрицательного насыщения

$$\Delta U_{\text{ВХ}} < -U_{\text{ГР}}; \quad U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ВЫХ.макс}}^- \quad (13.4)$$

На рис. 13.3. показаны диаграммы напряжений, поясняющие работу аналогового компаратора. Принято, что  $U_{\text{ВХ1}}$  – треугольное напряжение, а  $U_{\text{ВХ2}}$  – произвольно изменяющееся напряжение, выходное напряжение компаратора  $U_{\text{ВЫХ}}$  имеет форму прямоугольных импульсов и изменяется от  $-U_{\text{ВЫХ.макс}}^-$  до  $U_{\text{ВЫХ.макс}}^+$ . При  $U_{\text{ВХ1}} > U_{\text{ВХ2}}$  выходное напряжение компаратора будет максимальным отрицательным –  $-U_{\text{ВЫХ.макс}}^-$ , а при  $U_{\text{ВХ1}} < U_{\text{ВХ2}}$  – максимальным положительным  $U_{\text{ВЫХ.макс}}^+$ .

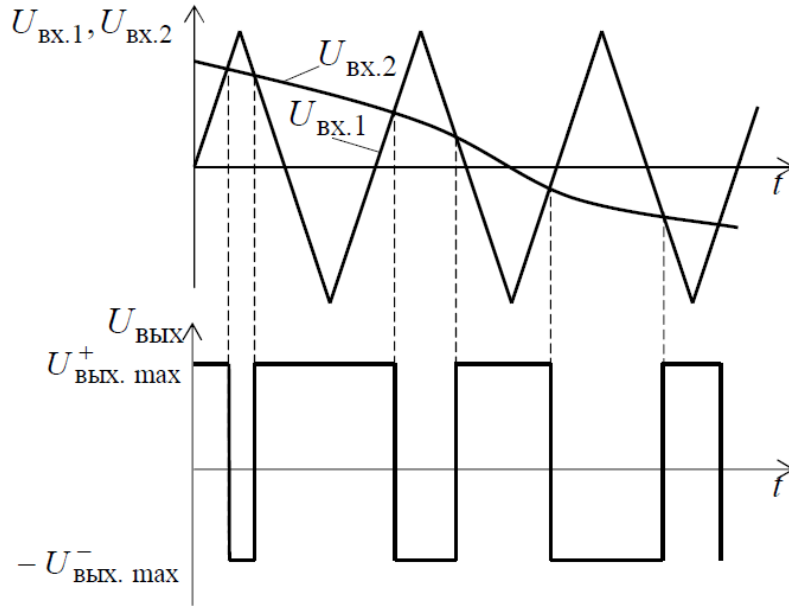


Рис. 13.3. Диаграммы напряжений аналогового компаратора, выполненного на операционном усилителе

Рассмотренная схема компаратора имеет два существенных недостатка:

- при медленно изменяющемся входном сигнале  $U_{ВХ2}$  напряжение на выходе будет также изменяться медленно, не обеспечивая прямоугольного фронта;

- если во входном сигнале присутствует шум, то в выходном напряжении может происходить дребезг в те моменты, когда напряжение на входе проходит точку переключения.

Оба недостатка позволяет устранить схема компаратора с положительной обратной связью или *триггер Шмитта*. Одна из возможных схем триггера Шмитта приведена на рис. 13.4.

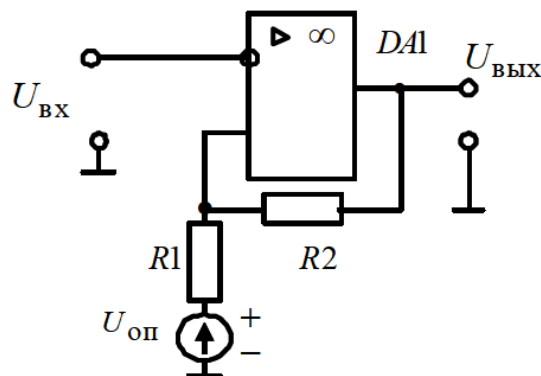


Рис. 13.4. Схема триггера Шмитта на операционном усилителе

Передаточная характеристика триггера Шмитта приведена на рис. 13.5.

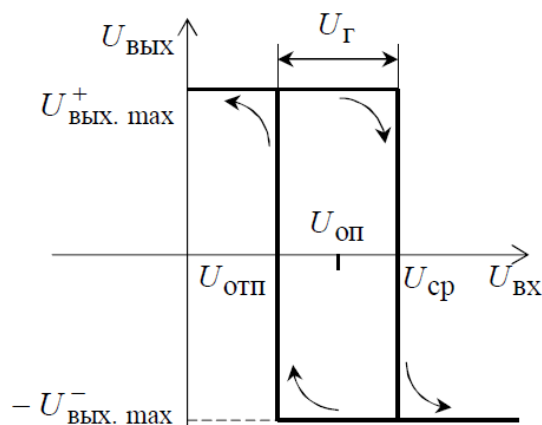


Рис. 13.5. Передаточная характеристика триггера Шмитта, выполненного на операционном усилителе

Переключение схемы в состояние  $-U_{\text{ВЫХ.маx}}^-$  происходит при достижении входным сигналом  $U_{\text{ВХ}}$  напряжения срабатывания  $U_{\text{ср}}$ , а возвращение в исходное состояние  $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ.маx}}^+$  — при снижении  $U_{\text{ВХ}}$  до напряжения отпускания  $U_{\text{отп}}$ .  $U_{\text{ср}}$  и  $U_{\text{отп}}$  — пороговые напряжения. Напряжение  $U_{\text{оп}}$  — опорное напряжение.

Напряжение срабатывания находится из уравнения:

$$U_{\text{ср}} = U_{\text{оп}} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + U_{\text{ВЫХ.маx}}^+ \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (13.4)$$

Напряжение отпускания можно найти из уравнения

$$U_{\text{отп}} = U_{\text{оп}} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - U_{\text{ВЫХ.маx}}^- \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (13.5)$$

Тогда ширина гистерезиса

$$U_{\Gamma} = U_{\text{ср}} - U_{\text{отп}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (U_{\text{ВЫХ.маx}}^+ + U_{\text{ВЫХ.маx}}^-) \quad (13.6)$$

и при выполнении условия

$$U_{\text{ВЫХ.маx}}^+ = |U_{\text{ВЫХ.маx}}^-|$$

ширина гистерезиса

$$U_{\Gamma} = 2 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{\text{ВЫХ.маx}}^+ \quad (13.7)$$

Работает триггер Шмитта следующим образом. Как только входное напряжение  $U_{\text{ВХ}}$  превысит напряжение срабатывания  $U_{\text{ср}}$ , на выходе ОУ появится отрицательное приращение выходного сигнала  $-\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ , которое по цепи положительной обратной связи через делитель напряжения  $R1 - R2$  поступит на неинвертирующий вход ОУ. Операционный усилитель усилит это приращение и на выходе появится дополнительное отрицательное приращение выходного сигнала, которое вновь вызовет изменение напряжения на неинвертирующем входе ОУ. Процесс будет развиваться лавинообразно и закончится, когда выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  достигнет напряжения насыщения  $-U_{\text{ВЫХ. макс}}^-$ . Положительная обратная связь по напряжению ускоряет процесс переключения компаратора. В данной схеме вероятность того, что шумовой сигнал на входе вызовет многократные переключения выходного напряжения уменьшается. Это иллюстрируют диаграммы напряжений, рис. 13.6, поясняющие работу триггера Шмитта.

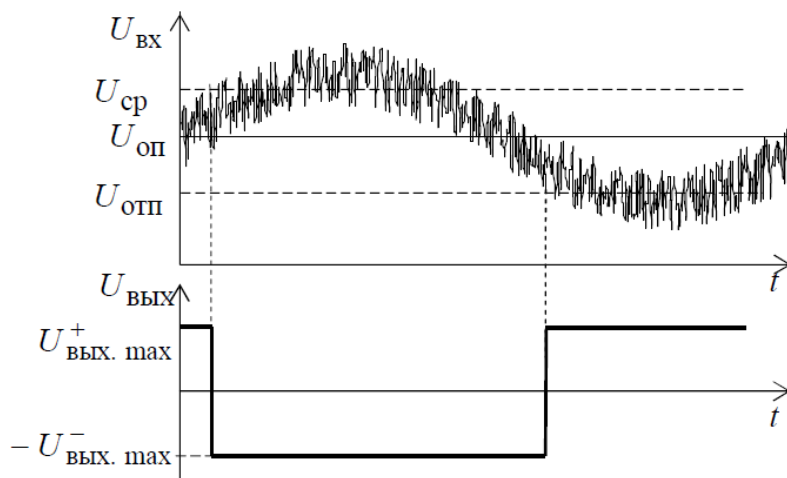


Рис. 13.6. Диаграммы напряжений, поясняющие работу триггера Шмитта

При  $U_{\text{оп}} = 0$  схема триггера Шмитта значительно упрощается (см. рис. 13.7), а передаточная характеристика триггера Шмитта, рис. 13.7, становится симметричной относительно начала координат.

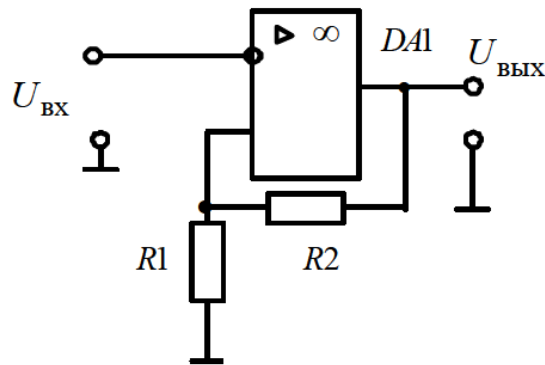


Рис. 13.6. Схема триггера Шмитта при  $U_{\text{отп}} = 0$

Для схемы рис. 13.6 пороговые напряжения и зона гистерезиса составляют:

напряжение срабатывания

$$U_{\text{ср}} = U_{\text{ВЫХ. макс}}^+ \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad (13.8)$$

напряжение отпускания

$$U_{\text{отп}} = -U_{\text{ВЫХ. макс}}^- \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad (13.9)$$

ширина гистерезиса

$$U_{\Gamma} = 2 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{\text{ВЫХ. макс}}^+. \quad (13.10)$$

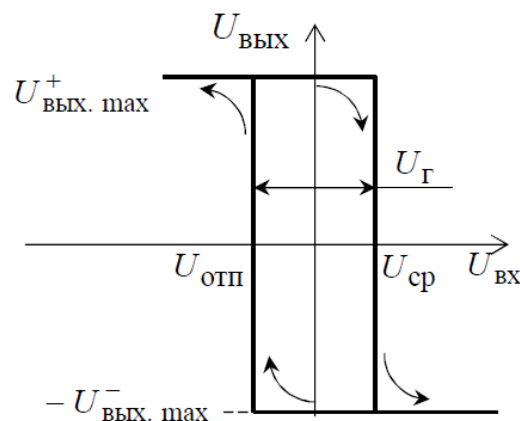


Рис. 13.7. Передаточная характеристика триггера Шмитта при  $U_{\text{отп}} = 0$

Схема рис. 13.6 служит основой для построения релаксационных генераторов импульсов на операционном усилителе.