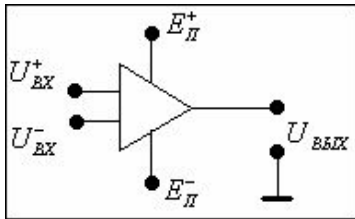
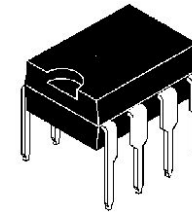


# ГЛАВА 10

## Компараторы напряжения



Компараторы напряжений это устройства, которые предназначены для сравнения двух сигналов. Они имеют два входа. Один из входов предназначен для подачи исследуемого сигнала  $U_x$ , а другой для подачи опорного напряжения  $U_{оп}$ . В момент времени, когда исследуемый сигнал  $U_x$  сравнивается с пороговым напряжением  $U_{пор}$ , который зависит от величины опорного напряжения  $U_{оп}=F(U_{пор})$ , компаратор изменяет свое состояние. Состояние компаратора определяется величиной выходного напряжения, которое может принимать два значения:  $U_{вых}=U_{0вых}$  или  $U_{1вых}$ .

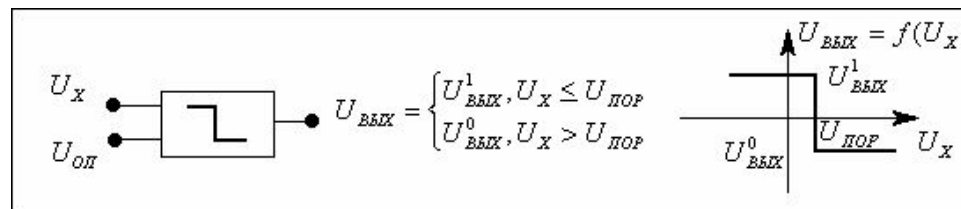
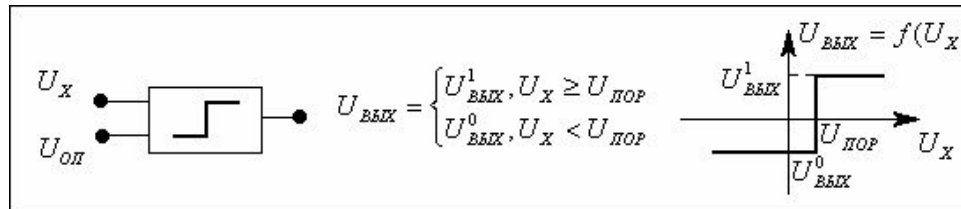
Работу компаратора обычно характеризуют аналитически, в виде неравенств или амплитудной характеристикой. Компаратор с такой характеристикой называется неинвертирующим.

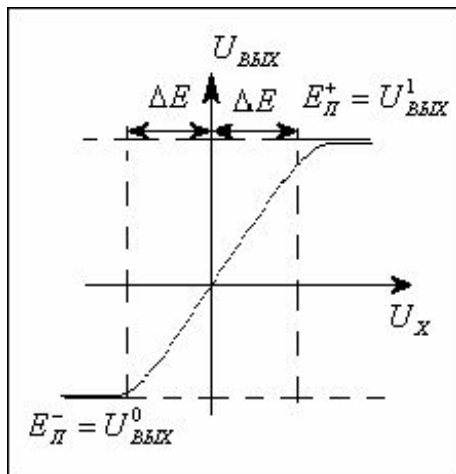
На рис. приведен инвертирующий компаратор. В качестве компараторов обычно используют операционные усилители. Входные ( $U_{вх+}$ ,  $U_{вх-}$ ) и выходное ( $U_{вых}$ ) напряжения ОУ связаны соотношением:

$$U_{вых} = K_{ou} (U_{вх+} - U_{вх-}), \quad (1)$$

где  $K_{ou}$  - коэффициент усиления операционного усилителя.

В связи с тем, что  $K_{ou}$  достаточно велик ( $10^5 - 10^6$ ), линейный режим имеет место только при малых входных сигналах, когда диапазон входных не превышает долей или единиц милливольт. При отсутствии отрицательной обратной связи или при введении положительной обратной связи схемы на ОУ обладают нелинейными свойствами и выполняют функции компараторов, генераторов сигналов и т. п.





При достаточно больших значениях входного дифференциального напряжения имеет место режим ограничения выходного напряжения, т.е:  $U_{\text{вых}} = U_{1\text{вых}} \approx E_{\text{п}} + \text{sign } U_{\text{вх}+}$ , при  $U_{\text{вх}+} > U_{\text{вх}-}$ , (1.1)

$U_{0 \text{ вых}} \approx E_{\text{п}}^- \text{ sign } U_{\text{вх}+}$ , при  $U_{\text{вх}+} < U_{\text{вх}-}$ ,

Итак, благодаря большому коэффициенту усиления ОУ имеют амплитудную характеристику аналогичную характеристике компаратора.

Недостатком ОУ при использовании их в качестве компараторов является невысокое быстродействие переключения (из-за сложности схемы и большого числа активных элементов).

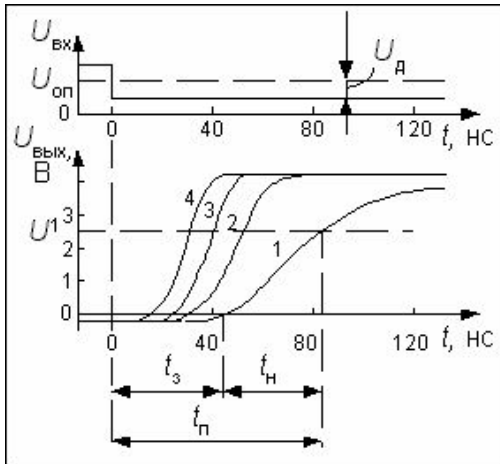
В тех случаях, когда требуется высокое быстродействие применяют специализированные схемы компараторов.

По структуре они аналогичны ОУ, но имеют более простую схему с меньшим числом активных элементов.

Основные параметры компаратора аналогичны параметрам ОУ, но имеются и специфические: зона неопределенности  $2\Delta E = E_{\text{п}}/K_{\text{оу}}$  - это такое изменение исследуемого напряжения вблизи порога срабатывания, при котором компаратор не принимает ни одного из своих стационарных состояний.

Параметры, характеризующие качество компараторов, можно разделить на три группы: точностные, динамические и эксплуатационные.

Компаратор характеризуется теми же *точностными* параметрами, что и ОУ.

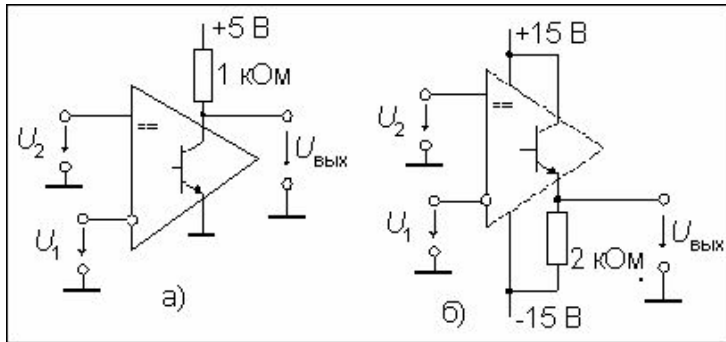


Основным *динамическим* параметром компаратора является время переключения  $t_{\text{п}}$ .

Это промежуток времени от начала сравнения до момента, когда выходное напряжение компаратора достигает противоположного логического уровня. Время переключения замеряется при постоянном опорном напряжении, подаваемом на один из входов компаратора и скачке входного напряжения  $U_{\text{вх}}$ , подаваемого на другой вход. Это время зависит от величины превышения  $U_{\text{вх}}$  над опорным напряжением. На рис. 8 приведены переходные характеристики компаратора  $\mu\text{A}710$  для различных значений дифференциального входного напряжения  $U_{\text{д}}$  при общем скачке входного напряжения в  $100 \text{ мВ}$ . Время переключения компаратора  $t_{\text{п}}$  можно разбить на две составляющие: время задержки  $t_{\text{з}}$  и время нарастания до порога срабатывания логической схемы  $t_{\text{н}}$ . В справочниках обычно приводится время переключения для значения дифференциального напряжения, равного  $5 \text{ мВ}$  после скачка.

Рис. 8. Переходная характеристика компаратора  $\mu\text{A}710$  при различных превышениях скачка входного напряжения  $U_{\text{д}}$  над опорным: 1 - на  $2 \text{ мВ}$ ; 2 - на  $5 \text{ мВ}$ ; 3 - на  $10 \text{ мВ}$ ; 4 - на  $20 \text{ мВ}$ .

Выходные каскады компараторов обычно обладают большей гибкостью, чем выходные каскады операционных усилителей. В обычном ОУ используют двухтактный выходной каскад, который обеспечивает размах напряжения в пределах между значениями напряжения питания (например,  $\pm 13 \text{ В}$  для ОУ типа 140УД7, работающего от источников  $\pm 15 \text{ В}$ ). В выходном каскаде компаратора эмиттер, как правило, заземлен, и выходной сигнал снимается с "открытого коллектора". Выходные транзисторы некоторых типов компараторов, например, 521СА3 или LM311 имеют открытые, т.е. неподключенные, и коллектор и эмиттер. Две основные схемы включения компараторов такого типа приведены на рис. 5. На рис. 5а выходной транзистор компаратора включен по схеме с общим эмиттером. При потенциале на верхнем выводе резистора равном  $+5 \text{ В}$  к выходу можно подключать входы TTL, nMOS- и CMOS-логику с питанием от источника  $5 \text{ В}$ . Для управления CMOS-логикой с более высоким напряжением питания следует верхний вывод резистора подключить к источнику питания данной цифровой микросхемы.



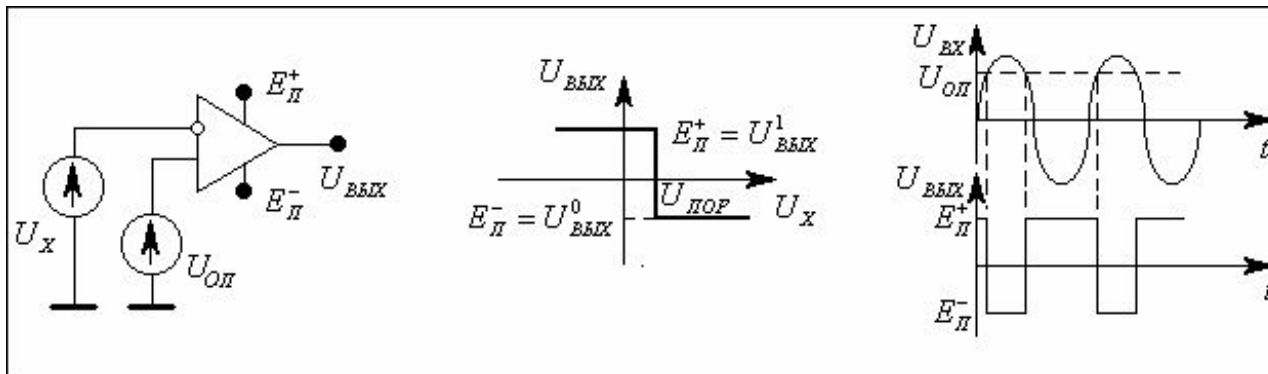
Если требуется изменение выходного напряжения компаратора в пределах от  $U_{+пит}$  до  $U_{-пит}$ , выходной каскад включается по схеме эмиттерного повторителя (рис. 56). При этом заметно снижается быстродействие компаратора и происходит инверсия его входов. Выходной сигнал компаратора почти всегда действует на входы логических цепей и потому согласуется по уровню и мощности с их входами. Таким образом, компаратор - это элемент перехода от аналоговых к цифровым сигналам, поэтому его иногда называют однобитным аналого-цифровым преобразователем.

#### Разновидности схем компараторов

1. Компараторы без положительной обратной связи двухвходовые (для сравнения однополярных входных сигналов) одновходовые (для сравнения разнополярных входных сигналов)
2. Компараторы с положительной обратной связью

#### Двухвходовый инвертирующий компаратор

Схема двухвходового компаратора приведена на рис. .  
 Определим величину порогового напряжения  $U_{пор}$ . Компаратор срабатывает, когда  $U_x = U_{вх-} = U_{вх+} = U_{оп}$ . Отсюда следует, что  $U_{пор} = U_{оп}$ . На рис. приведена амплитудная характеристика, а на рис. временные диаграммы работы схемы, когда входной сигнал гармонический.



### Двухвходовой неинвертирующий компаратор.

Схема двухвходового компаратора приведена на рис. .  
 Определим величину порогового напряжения  $U_{пор}$ . Компаратор срабатывает, когда  $U_x = U_{вх+} = U_{вх-} = U_{оп}$ . Отсюда следует, что  $U_{пор} = U_{оп}$ . На рис. приведена амплитудная характеристика, а на рис. временные диаграммы работы схемы, когда входной сигнал гармонический.

### Одновходовой инвертирующий компаратор.

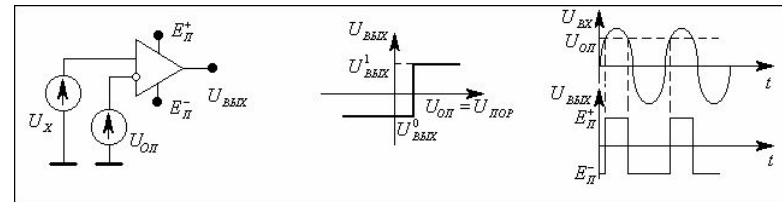
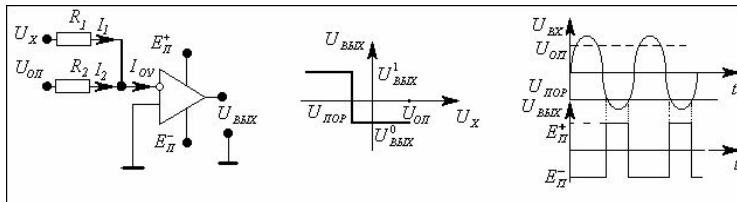
Схема двухвходового компаратора приведена на рис. .  
 Определим величину порогового напряжения  $U_{пор}$ . Компаратор срабатывает, когда  $U_{вх-} = U_{вх+} = 0$ . Для узла «а» по первому закону Кирхгофа запишем соотношение для токов:  $I_1 + I_2 = I_{оу}$ . Каждый из токов запишем по закону Ома и

$$I_1 + I_2 = I_{OY} = 0; \frac{U_X - U_{ВХ}^-}{R_1} + \frac{U_{ОП} - U_{ВХ}^-}{R_2} = 0$$

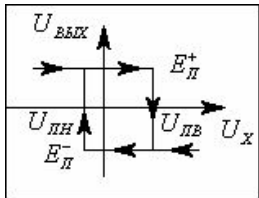
учитывая, что  $U_{вх-} = U_{вх+} = 0$ , получим 
$$U_X = -\frac{R_1}{R_2} U_{оп} = U_{пор}$$

Так как напряжения  $U_{пор}$  и  $U_{оп}$  имеют разные знаки, то компаратор называют инвертирующим.

На рис. приведена амплитудная характеристика, а на рис. временные диаграммы работы схемы, когда входной сигнал гармонический.



## Одновходовый неинвертирующий компаратор.



### Компараторы с положительной обратной связью

Благодаря положительной обратной связи такие компараторы имеют:

1. лучшее быстродействие
  2. высокую помехоустойчивость
- Их называют триггерами Шмидта.

### Инвертирующий компаратор с положительной обратной связью

Схема инвертирующего компаратора с ПОС приведена на рис. . Резисторы  $R_1, R_2$  – образуют цепь положительной обратной связи. За счет нее часть выходного сигнала поступает на неинвертирующий вход, что приводит в таких компараторах к двум порогам срабатывания, каждый из которых связан с выходным сигналом. Одно из пороговых напряжений называется верхним УПВ, а другое нижним УПН. Они равны следующим величинам  $U_{ПВ} = E + nR_1/(R_1 + R_2)$ ,  $U_{ПН} = E - nR_1/(R_1 + R_2)$ . Считаем, что  $U_{оп} = 0$ . Схема работает следующим образом.

1. Пусть  $U_{ВЫХ} = U^1 = E^+$  следовательно  $U_{+вх} = E - nR_1/(R_1 + R_2)$ , компаратор срабатывает когда

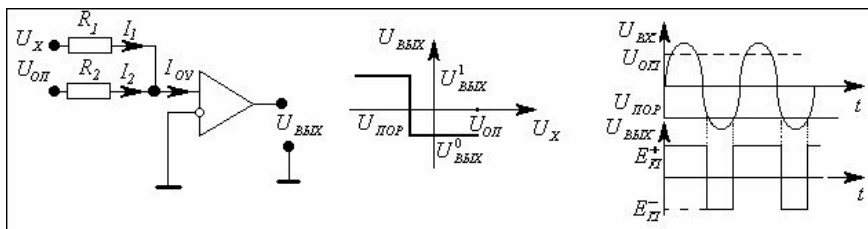
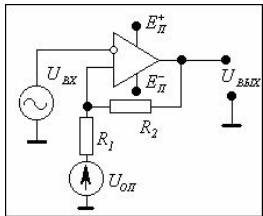
$$U_{X} = U_{ВХ}^- = U_{ВХ}^+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} E^+ = U_{ПВ}$$

2. Пусть  $U_{ВЫХ} = U^0 = E^-$  следовательно  $U_{+вх} = E + nR_1/(R_1 + R_2)$ , компаратор срабатывает когда

$$U_{ВХ}^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} E^-; U_{X} = U_{ВХ}^- = U_{ВХ}^+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} E^- = U_{ПН}$$

Амплитудная характеристика компаратора приведена на рис.

Она имеет гистерезисный характер. Напряжение равное разности  $U_{ПВ} - U_{ПН} = U_{гист}$  называется напряжением гистерезиса.



# Быстродействие компараторов

Быстродействие переключения компараторов зависит от скорости нарастания входных сигналов, т.е. от времени пребывания входного сигнала в зоне неопределенности, а потому переключение компаратора происходит с задержкой. В компараторе с положительной обратной связью переключающий сигнал состоит из двух составляющих:

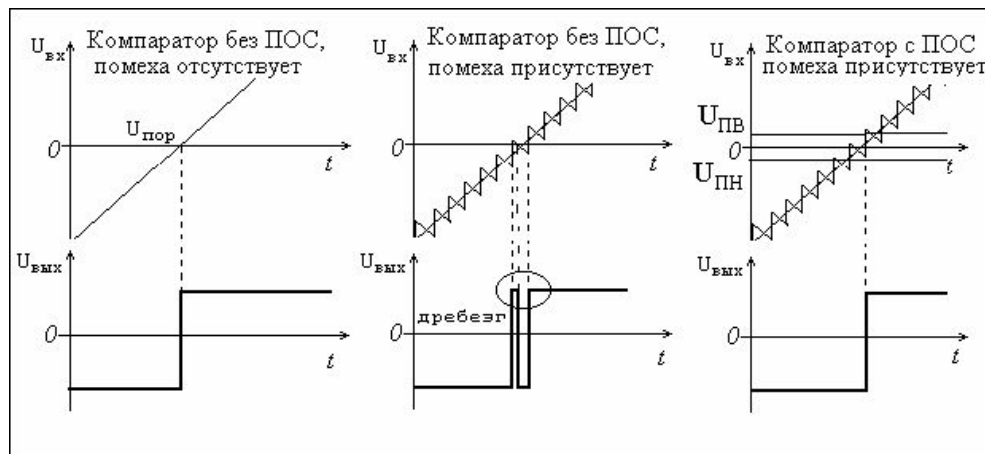
- 1). Входного (исследуемого) сигнала;
- 2). Сигнала поступающего с выхода по цепи ПОС.

Сигнал на выходе компаратора усилен в Коу раз, во столько же раз увеличивается его скорость изменения. За счет этого переключение компаратора с ПОС происходит значительно быстрее, чем без нее.

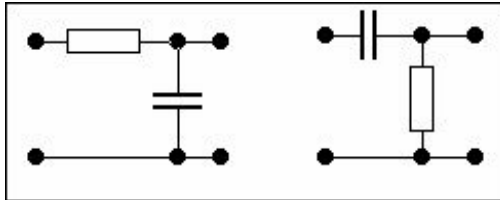
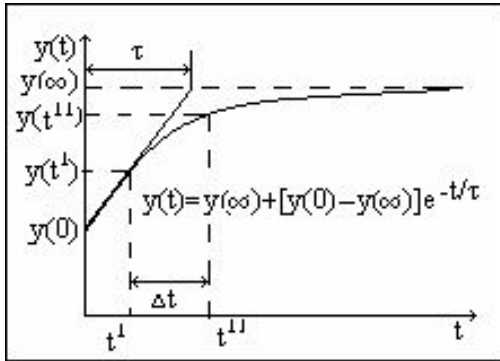
## «Дребезг» компараторов

Под «дребезгом» компараторов понимают многократное изменение входного сигнала, когда исследуемый сигнал  $U_x$  находится вблизи порогового  $U_x \sim U_{пор}$ . «Дребезг» компараторов возникает из-за шумов и электромагнитных наводок, которые накладываются на исследуемый сигнал  $U_x$  или опорное напряжение  $U_{оп}$ .

Рассмотрим работу неинвертирующего компаратора с нулевым опорным напряжением  $U_{оп}=0$ . Из рис. следует, что если при работе компаратора наводка отсутствует то компаратор срабатывает однократно. Если на исследуемый сигнал в компараторе без ПОС накладывается помеха, то наблюдается многократное срабатывание компаратора – дребезг. Если компаратор имеет ПОС, и два порога срабатывания, то при правильном выборе напряжения гистерезиса  $U_{гист}$  дребезг будет отсутствовать. Для устранения дребезга должно выполняться условие  $U_{гист} \geq 2U_{т.пом}$ , где  $U_{т.пом}$  – амплитуда помехи.



# Формирователь импульсов на основе компараторов



Формирователи импульсов – это устройства, которые так изменяют входной сигнал, что на их выходе появляются импульсы требуемой формы.

Благодаря свойствам компаратора, он широко используется в качестве формирователя прямоугольных импульсов, а дополнение его времязадающими элементами позволяет расширить число схем формирователей импульсов. В качестве времязадающих цепей обычно используют RC-цепи первого порядка.

*Свойства цепей первого порядка.* При анализе многих импульсных устройств, приходится иметь дело с переходными процессами, протекающими в цепях первого порядка. Такие процессы описываются дифференциальным уравнением первого порядка  $\tau dy/dt + y = x$ , где  $y(t)$  – отклик цепи (ток или напряжение);  $\tau$  – постоянная времени;  $x$  – входной сигнал цепи (ток или напряжение). Общее решение, такого уравнения, зависит от характера входного сигнала. Если входной сигнал – ступенчатое воздействие ( $x = E \cdot 1(t)$ ), то общее решение записывается в виде  $y(t) = y(\infty) + [y(0) - y(\infty)]e^{-t/\tau}$  (1.2)

Оно подчиняется exp-закону и его график приведен на рис.(1.3), где  $y(0)$  – выходной сигнал при  $t=0$ ;  $y(\infty)$  – выходной сигнал при  $t=\infty$

Определим интервал времени  $\Delta t = t_{11} - t_1$ , в течении которого экспоненциально изменяющаяся функция  $y(t)$  возрастает (убывает) от уровня  $y(t_1)$  до  $y(t_{11})$  (рис. 1.3.).

Согласно (1.2)  $y(t_1) = y(\infty) + [y(0) - y(\infty)]e^{-t_1/\tau}$ , откуда  $t_1 = \tau \ln[(y(\infty) - y(0)) / (y(\infty) - y(t_1))]$ ; аналогично  $t_{11} = \tau \ln[(y(\infty) - y(0)) / (y(\infty) - y(t_{11}))]$ .

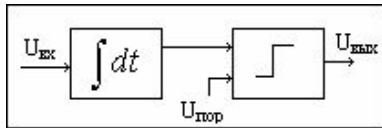
Следовательно,  $\Delta t = t_{11} - t_1 = \tau \ln[(y(\infty) - y(t_1)) / (y(\infty) - y(t_{11}))]$ . 1.3)

Этой формулой широко пользуются при расчете длительностей импульсов, фронтов и различных временных интервалов.

Рассмотрим типовые устройства для формирования задержанного импульса, импульса заданной длительности.



# Формирователи задержанного прямоугольного импульса



Формирование задержанного импульса обычно производится с помощью функциональной схемы приведенной на рис. .

Схема состоит из интегрирующей RC- цепи и компаратора. Временные диаграммы сигналов в характерных точках схемы приведены на рис. . Регулируя величину порогового напряжения  $U_{пор}$ , или  $\tau=RC$  можно изменить значение времени задержки  $t_3$ .

*формирователь задержанного прямоугольного импульса положительной полярности по положительному перепаду.* Принципиальная схема приведена на рис. .

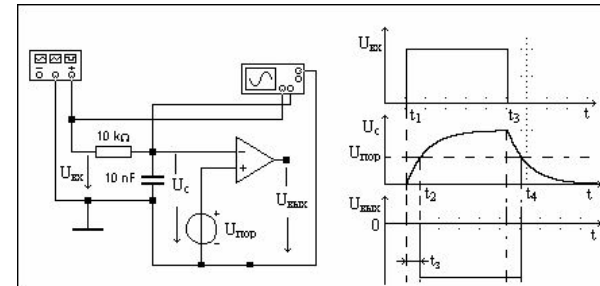
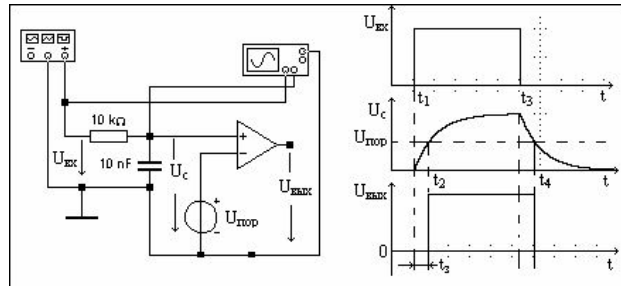
Компаратор включен по схеме неинвертирующего компаратора. В схеме питания компаратора принято, что  $E^+ = +10$  В и  $E^- = 0$  В. Поскольку для данной схемы  $\tau = RC$ ;  $y(\infty) = E$ ;  $y(0) = 0$ ;  $y(t_1) = 0$ ;  $y(t_{11}) = U_{пор}$ , то величина времени задержки, согласно (1.3) определяется соотношением

$$t_3 = RC \ln\left(\frac{E}{E - U_{пор}}\right)$$

*формирователь задержанного прямоугольного импульса отрицательной полярности по положительному перепаду.*

Принципиальная схема приведена на рис. . В схеме питания компаратора принято, что  $E^+ = 0$  В, а  $E^- = -10$  В. Компаратор включен по схеме инвертирующего компаратора.

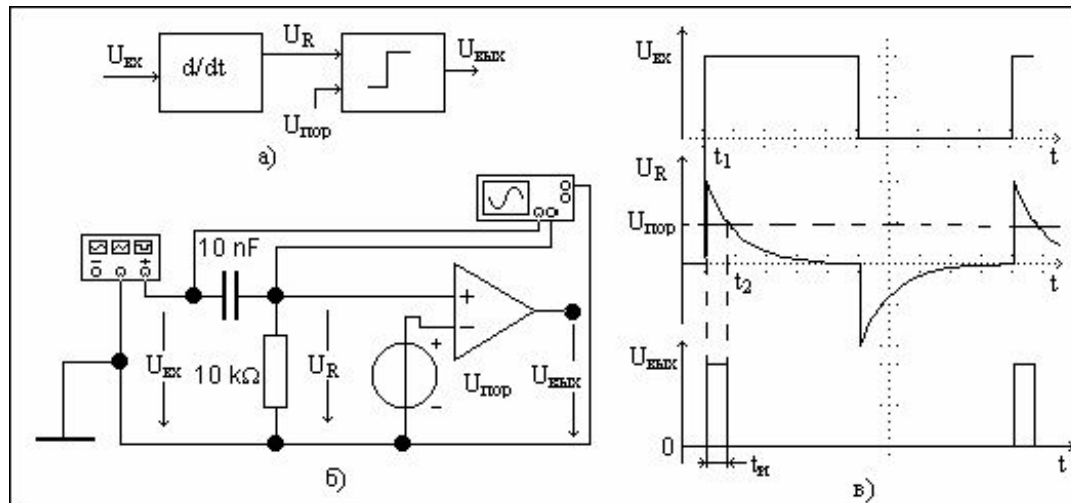
Поскольку для данной схемы  $\tau = RC$ ;  $y(\infty) = E$ ;  $y(0) = 0$ ;  $y(t_1) = 0$ ;  $y(t_{11}) = U_{пор}$ , то величина времени задержки определяется аналогично ( ).



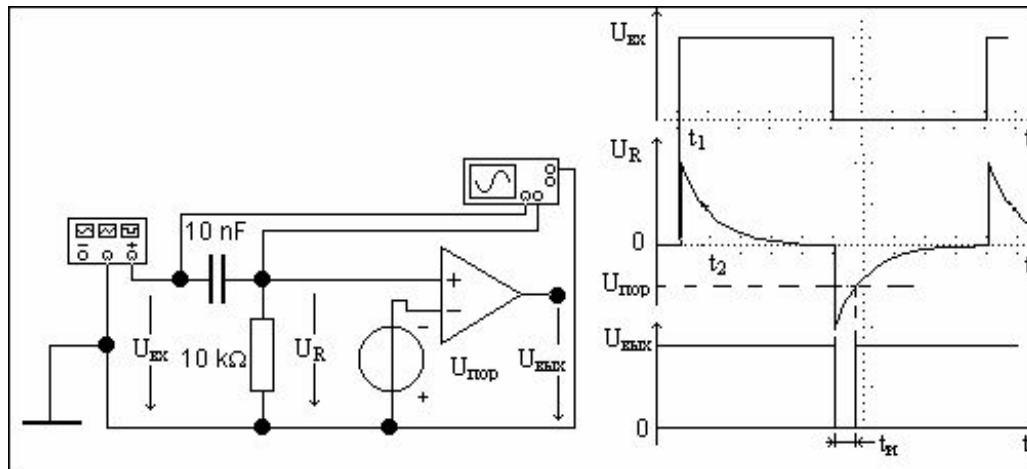
# Формирователи укороченных импульсов

Формирование коротких импульсов заданной длительностью импульса, соответствующих фронтам входного более длинного импульса, обычно производится с помощью функциональной схемы приведенной на рис. . Схема состоит из дифференцирующей RC- цепи и компаратора. Временные диаграммы сигналов в характерных точках схемы приведены на рис. . Регулируя величину порогового напряжения  $U_{пор}$ , или  $\tau=RC$  можно изменить значение времени задержки  $t_z$ . Формирователь импульса положительной полярности заданной длительности по положительному перепаду. Принципиальная схема приведена на рис. . Компаратор включен по схеме неинвертирующего компаратора. В схеме питания компаратора принято, что  $E^+ = +10\text{ В}$  и  $E^- = 0\text{ В}$ . Поскольку для данной схемы:  $\tau = RC$ ;  $y(\infty) = 0$ ;  $y(0) = E$ ;  $y(t_1) = 0$ ;  $y(t_1 + 1) = U_{пор}$ , то величина времени задержки, согласно (1.3) определяется соотношением

$$t_i = RC \ln(E/U_{пор}), \quad (|E| > |U_{пор}|). \quad (1)$$



**Формирователь импульса положительной полярности с инвертированием заданной длительности по отрицательному перепаду.** Принципиальная схема приведена на рис. . Компаратор включен по схеме неинвертирующего компаратора. В схеме питания компаратора принято, что  $E_+ = 10 \text{ В}$ , а  $E_- = 0 \text{ В}$ . Поскольку для данной схемы:  $\tau = RC$ ;  $y(\infty) = E$ ;  $y(0) = 0$ ;  
 $y(t_1) = 0$ ;  $y(t_{11}) = U_{\text{пор}}$ , то величина времени задержки определяется аналогично ( ).



## Формирователь импульса отрицательной полярности заданной длительности по

**отрицательному перепаду.** Принципиальная схема приведена на рис. .

Компаратор включен по схеме неинвертирующего компаратора. В схеме питания компаратора принято, что  $E^+ = 0$  В, а  $E^- = -10$  В. Поскольку для данной схемы:  $\tau = RC$ ;  $y(\infty) = E$ ;  $y(0) = 0$ ;  $y(t_1) = 0$ ;  $y(t_{11}) = U_{пор}$ , то величина времени задержки определяется аналогично ( ).

## Обобщенная структурная схема формирователя последовательности импульсов

Часто требуется в ответ на некоторый входной сигнал сформировать несколько прямоугольных импульсов с разными временными параметрами. Структурная схема такого формирователя состоит из формирователей отдельных импульсов (ФИ1, ФИ2, ФИn) и сумматора (+).

