

Учитывая наличие в схеме параллельной ОС по напряжению

$$R_{\text{ВЫХ ОС}} = \frac{R_{\text{ВЫХ}}}{(1 + \beta \cdot K)},$$

где β – коэффициент передачи цепи ОС (при $R_1=R_2$ $\beta=0,5$), можно получить выражение для расчёта выходного сопротивления ОУ:

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ1}} - U_{\text{ВЫХ2}}}{U_{\text{ВЫХ2}}} \cdot R_{\text{Н}} \cdot \left(1 + \frac{K}{2}\right).$$

Максимальные выходные напряжение и ток указываются в технических условиях на изготовление ОУ.

К характеристикам передачи относятся: коэффициент усиления по напряжению, частота единичного усиления, скорость нарастания выходного напряжения, время установления выходного напряжения, время восстановления, АЧХ.

Коэффициент усиления по напряжению ОУ K может быть определён экспериментальным путём, рис. 1.8. Входное дифференциальное напряжение ОУ равно падению напряжения на R_3 :

$$U_{R_3} = \frac{U_A \cdot R_3}{(R_2 + R_3)},$$

где U_A – потенциал точки А.

Так как сопротивления резисторов R_1 , соединяющих источник сигнала и выход усилителя, равны между собой, то коэффициент передачи ОУ с такой ОС равен единице ($U_{\text{ВЫХ}}=E_{\text{ВХ}}$). Следовательно,

$$K = \frac{E_{\text{ВХ}}}{U_{R_3}} = \frac{E_{\text{ВХ}} \cdot (R_2 + R_3)}{U_A \cdot R_3}.$$

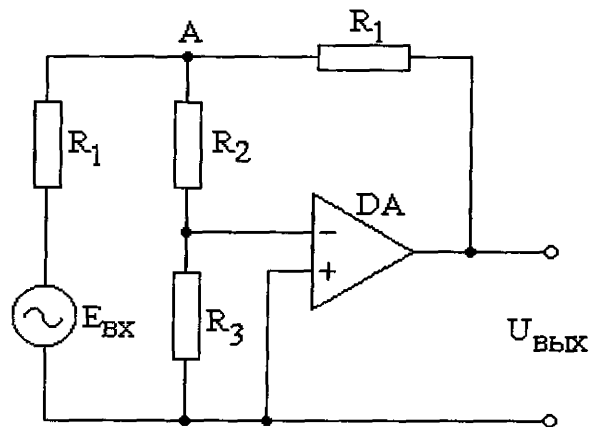


Рис. 1.8. Схема для определения коэффициента усиления ОУ

Частота единичного усиления f_1 – это частота, на которой модуль коэффициента усиления ОУ равен единице.

Скорость нарастания выходного напряжения – это максимальная скорость изменения выходного сигнала при максимальном значении его амплитуды.

2. ПРИМЕНЕНИЕ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

В настоящее время в электронике широкое распространение получила цифровая обработка сигналов. Цифровые методы, основывающиеся на использовании микропроцессоров, проникли во множество областей радио-

электроники и привели к созданию совершенно новых способов обработки сигналов. Одновременно наблюдается развитие аналоговой электроники, поскольку по мере развития систем цифровой обработки повышаются требования к качеству входных и выходных аналоговых сигналов. Операционный усилитель является базовым элементом устройств аналоговой обработки сигналов. Поэтому разработчик систем сбора, передачи и обработки измерительной информации должен обладать знаниями параметров ОУ (схем их включения и умением проектировать устройства на основе ОУ). В настоящем разделе рассматриваются некоторые основные применения ОУ в аналоговой схемотехнике.

2.1. Компараторы

Схемы простейших компараторов (устройств, сравнивающих два входных сигнала) с использованием ОУ и временные диаграммы, поясняющие их работу, представлены на рис. 2.1,а и 2.1,б.

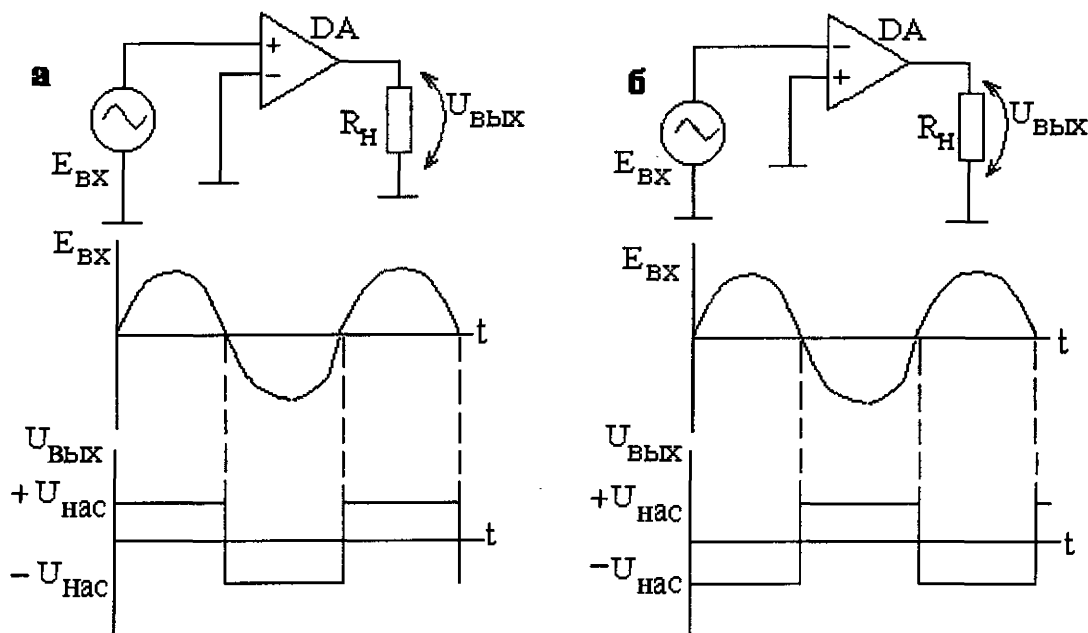


Рис. 2.1. Простейшие компараторы и временные диаграммы их работы:
 а – подача опорного напряжения на инвертирующий вход;
 б – подача опорного напряжения на неинвертирующий вход

На схеме (рис. 2.1,а) на вход (-) подано опорное напряжение земли (0 В). Ко входу (+) приложено напряжение, которое сравнивается с опорным. Как следует из (1.1), выходное напряжение $U_{ВЫХ}$ меняет знак при изменении полярности $E_{ВХ}$ ($E_{д} = E_{ВХ} - 0$). При положительной полуволне входного напряжения $U_{ВЫХ} = +U_{нас}$, при отрицательной $U_{ВЫХ} = -U_{нас}$. При заземлении (+) входа (рис. 2.1,б) наблюдается противоположная картина ($E_{д} = 0 - E_{ВХ}$).

Обе схемы рис. 2.1 позволяют получить следующую информацию о входном сигнале: полярность $E_{ВХ}$, момент равенства $E_{ВХ}$ нулю и направление изменения $E_{ВХ}$ при $E_{ВХ}=0$. Данные компараторы называют также *детекторами нулевого уровня*.

В качестве опорного напряжения можно использовать специальный источник, рис. 2.2. Входное напряжение сравнивается с $U_{ОП}>0$. Для получения опорного напряжения могут использоваться резистивные делители и параметрические стабилизаторы.

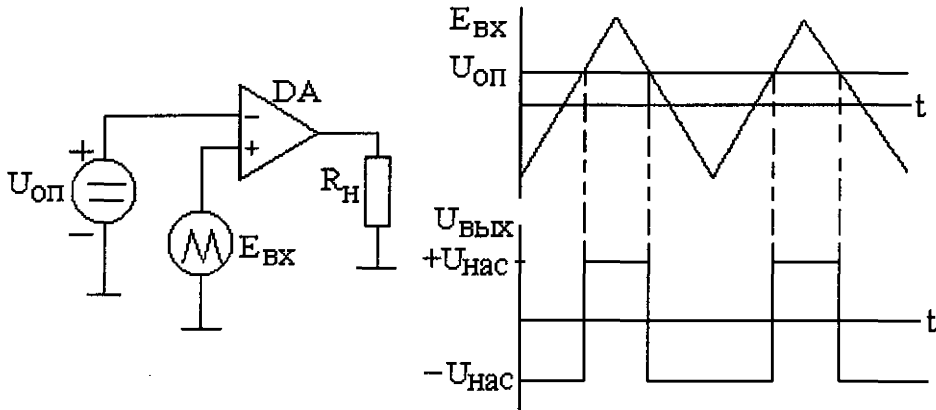


Рис. 2.2. Детектор ненулевого уровня и временная диаграмма его работы

Для схемы рис. 2.3,а $U_{ОП} = \frac{+U_{П} \cdot R_2}{(R_1 + R_2)}$. Изменяя сопротивление одного

из резисторов, можно регулировать $U_{ОП}$. Использование стабилитрона VD в схеме (рис. 2.3,б) позволяет получить более стабильное значение $U_{ОП}$ в случае изменения напряжения источника питания.

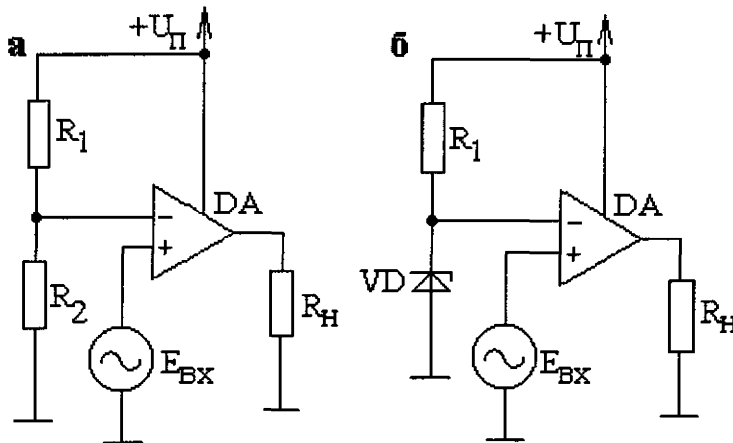


Рис. 2.3. Получение опорного напряжения от источника питания:

а – схема с делителем напряжения;

б – схема со стабилитроном

В качестве нагрузки компаратора могут использоваться различные индикаторы (стрелочные, светодиодные и др.) или электронные схемы.

При этом возникает задача: согласование компаратора с конкретной нагрузкой.

Рассмотренные выше устройства являются простейшими компараторами и находят ограниченное применение. Большее распространение получили компараторы с положительной обратной связью (ПОС), повышающей надежность срабатывания.

Компараторы (рис. 2.1, 2.2, 2.3) очень чувствительны к изменению входного сигнала вблизи опорного уровня. При этом возникают ложные срабатывания, рис. 2.4. Ситуация ухудшается, если $E_{ВХ}$ меняется очень медленно и (или) в соединительных проводах наводятся паразитные ЭДС.

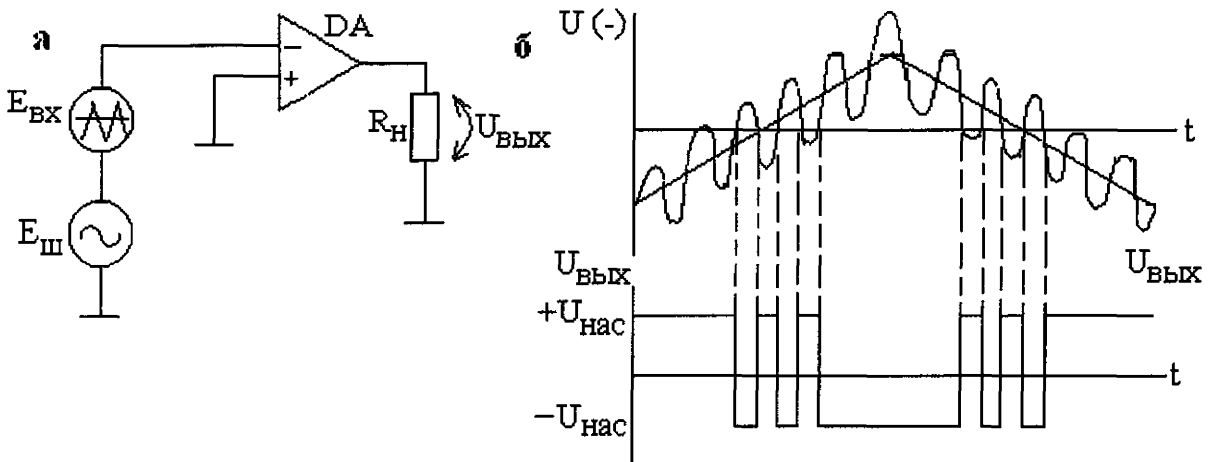


Рис. 2.4. Появление ложных срабатываний компаратора из-за наводки паразитной ЭДС ($E_{ш}$) в соединительных проводах:

а – подключение источника входного сигнала и генератора шума к ОУ;

б – временная диаграмма, поясняющая возникновение ложных срабатываний

Более устойчивыми к действиям помех являются компараторы с положительной обратной связью, называемые также *триггерами Шмитта*.

Выходное напряжение ОУ, охваченного ПОС, равно либо $+U_{НАС}$, либо $-U_{НАС}$. Пусть после включения питания выходное напряжение ОУ из-за наличия внутреннего разбаланса ($U_{ВХ. СДВ} > 0$) равно $+U_{НАС}$, рис. 2.5, а. Тогда опорное напряжение, приложенное к входу (+):

$$U_{оп} = U_{пв} = +U_{НАС} \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Поэтому входное напряжение $E_{ВХ}$ сравнивается с $U_{пв}$. Если $E_{ВХ} < U_{пв}$, разность напряжений между входами ОУ положительна, $E_d > 0$ и $U_{ВЫХ}$ продолжает оставаться равным $+U_{НАС}$. В случае, если $E_{ВХ}$ превысит $U_{пв}$, полярность E_d изменится, и $U_{ВЫХ}$ начнет изменяться от $+U_{НАС}$ к $-U_{НАС}$. При этом $U_{пв}$ уменьшается, абсолютное значение E_d увеличивается, и выходное напряжение изменяется с возрастающей скоростью.

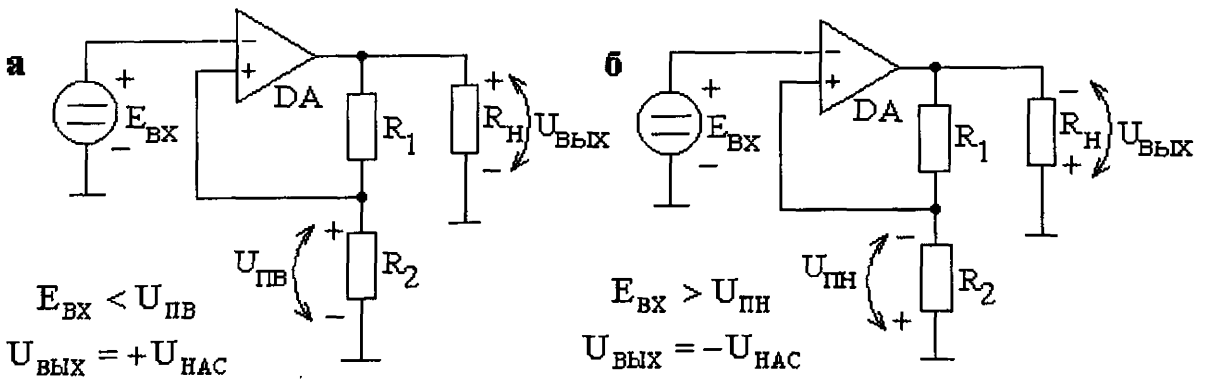


Рис. 2.5. Компаратор с положительной обратной связью:

а – выходное напряжение равно $+U_{НАС}$;

б – выходное напряжение равно $-U_{НАС}$

После достижения выходным напряжением величины $-U_{НАС}$ схема переходит в новое устойчивое состояние (рис. 2.5,б). $U_{ПН}$ имеет отрицательную полярность относительно земли. Это означает, что $U_{ВЫХ}$ будет оставаться равным $-U_{НАС}$ до тех пор, пока $E_{ВХ} > U_{ПН}$. Переключение компаратора в $+U_{НАС}$ произойдет, если $E_{ВХ}$ станет ниже $U_{ПН}$.

Выбирая необходимые значения пороговых напряжений $U_{ПН}$ и $U_{ПВ}$, можно изменять «зону нечувствительности» компаратора в зависимости от уровня помех, рис. 2.6.

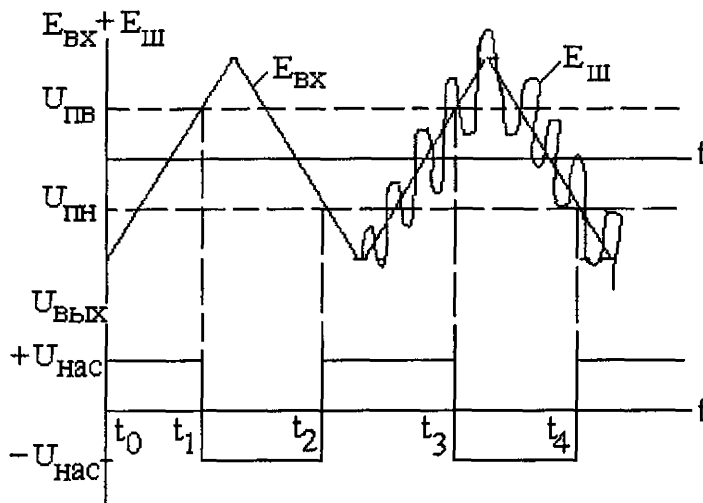


Рис. 2.6. Временные диаграммы работы компаратора с ПОС

Пусть в начальный момент времени t_0 $U_{ВЫХ} = +U_{НАС}$. Когда $E_{ВХ}$ становится больше $U_{ПВ}$ (t_1 и t_3), $U_{ВЫХ}$ быстро переключается в состояние $-U_{НАС}$. При уменьшении входного напряжения ниже $U_{ПН}$ (t_2 и t_4) $U_{ВЫХ}$ становится равным $+U_{НАС}$.

Существует стандартный способ изображения характеристик компаратора, рис. 2.7.

Величина гистерезиса (зоны нечувствительности) определяется пороговыми напряжениями ($U_{\text{гист}} = U_{\text{пв}} - U_{\text{пн}}$).

Компаратор с ПОС может использоваться в качестве формирователя прямоугольных импульсов из напряжения произвольной формы.

Недостатками компараторов, построенных на основе типовых ОУ, являются:

1. Малое быстродействие при переключении от одного уровня насыщения к другому.

2. Трудность согласования с конкретной нагрузкой.

Типовое значение напряжения насыщения ОУ – 10...13 В, поэтому подключение компаратора к схеме, собранной, например, на ТТЛ-микросхемах (работающих с сигналами 0...5 В), затруднительно.

Для устранения отмеченных недостатков:

1. Используют быстродействующие ОУ с большой скоростью изменения выходного напряжения (интегральные компараторы).

2. Вводят ограничение пределов изменения выходного напряжения для конкретной нагрузки или применяют ОУ, специально предназначенные для использования в качестве компараторов с возможностью изменения выходного напряжения.

Быстродействующие компараторы. Это ОУ с большим быстродействием, предназначенные специально для использования в качестве компараторов. Одним из таких ОУ является LM710. Выходное напряжение $U_{\text{вых}} = +3,2$ В или $-0,5$ В, при несимметричном питании $-6...+12$ В, что позволяет использовать в качестве нагрузки компаратора цифровые микросхемы ТТЛ-логики (максимальное входное напряжение для ТТЛ-микросхем не должно превышать 5 В). Время срабатывания компаратора около 40 нс против 4000...8000 нс у ОУ общего применения. Токи смещения LM710 велики (около 16 мкА). Это плата за малое время срабатывания. При таких токах смещения сопротивление источника сигнала не должно быть большим (не более 1 кОм).

Ограничение выходного напряжения. В качестве ограничителей выходного напряжения часто используют стабилитроны и диоды, рис. 2.8.

К входу (–) ОУ, рис. 2.8,а, подключен отрицательный полюс источника $E_{\text{вх}}$, следовательно, выходное напряжение положительно и через стабилитрон протекает обратный ток I , величина которого согласно правилам 1 и 2 равна $I = E_{\text{вх}}/R_{\text{вх}}$. В качестве опорного напряжения выбран потенциал земли. В случае, если полярность входного напряжения изменится на про-

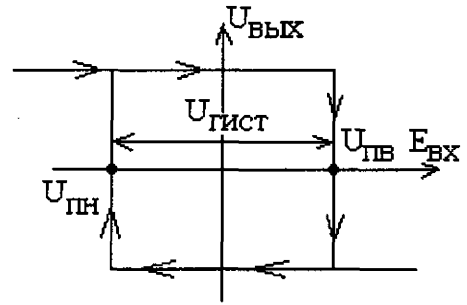


Рис. 2.7. Взаимосвязь входного и выходного напряжений компаратора

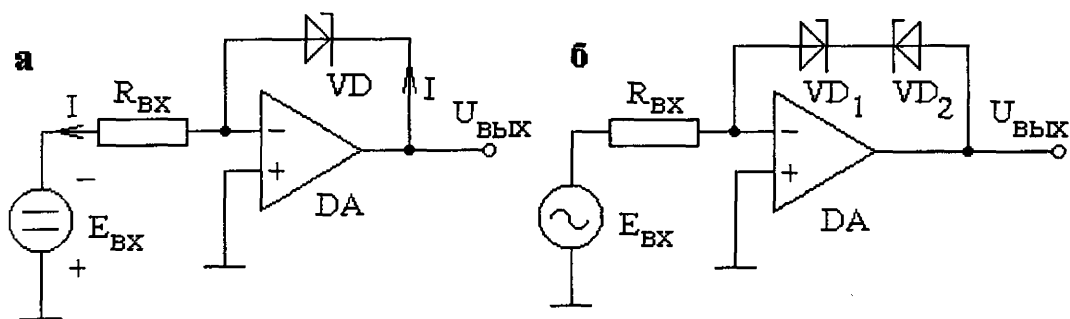


Рис. 2.8. Ограничение выходного напряжения компаратора:
 а – одностороннее;
 б – двухстороннее

тивоположную, то через стабилитрон протекает прямой ток, и на нем падает прямое напряжение, как на обычном диоде (около 0,6 В). Учитывая, что в обоих случаях ОУ не выходит из линейного режима, для выходного напряжения согласно правилу 1 можно записать

$$U_{\text{ВЫХ}} = \begin{cases} U_{\text{СТ}}, & \text{если } E_{\text{ВХ}} \text{ отрицательно} \\ U_{\text{ПР}}, & \text{если } E_{\text{ВХ}} \text{ положительно,} \end{cases}$$

где $U_{\text{СТ}}$ – напряжение стабилизации стабилитрона (обратное напряжение);

$U_{\text{ПР}}$ – прямое напряжение на стабилитроне.

Временные диаграммы, поясняющие работу схем (рис. 2.8), представлены на рис. 2.9.

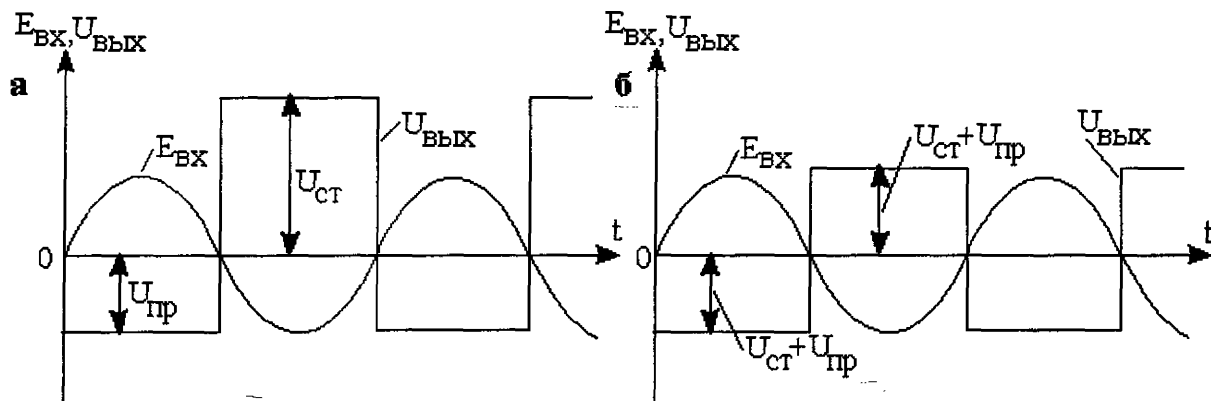


Рис. 2.9. Временные диаграммы работы компараторов
 а – с односторонним ограничением;
 б – с двухсторонним ограничением

В схеме (рис. 2.8,б) в цепь ОС включены два стабилитрона. В случае положительной полярности $E_{\text{ВХ}}$ стабилитрон VD_1 смещен в прямом направлении, а VD_2 – в обратном направлении. Если $E_{\text{ВХ}}$ – отрицательно, то VD_1 является обратно смещенным, а VD_2 – прямо смещенным. Очевидно,

что при любой полярности $E_{ВХ}$ величина выходного напряжения одинакова, но его полярность противоположна полярности входного напряжения.

Используя в схемах (рис. 2.8) различные комбинации стабилитронов и (или) диодов, можно задать необходимо пределы изменения выходного напряжения как положительной, так и отрицательной полярности для согласования выхода компаратора со входом конкретной нагрузки. Необходимым условием является лишь выполнение требования $U_{ВХ.Н} < U_{НАС}$, где $U_{ВХ.Н}$ – входное напряжение нагрузки.

Интегральные компараторы с изменяемым выходным напряжением. Это универсальные компараторы, позволяющие без дополнительных элементов в цепи ОС обеспечивать необходимый уровень выходного напряжения. Одним из таких устройств является компаратор LM311 (LM111), рис. 2.10.

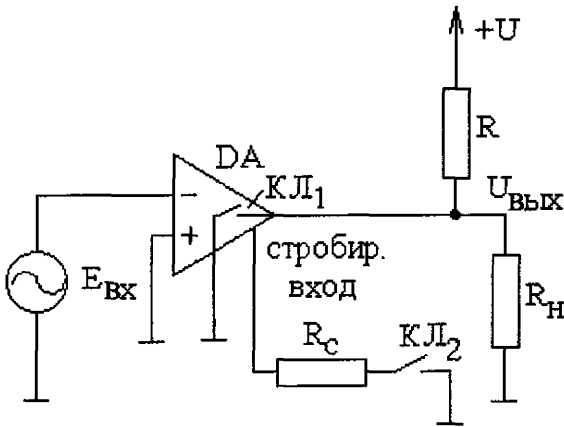


Рис. 2.10 Компаратор LM311 (LM111)

Выходная цепь компаратора представляет собой транзисторный ключ КЛ₁, состояние которого определяется дифференциальным напряжением: E_D положительно – КЛ₁ разомкнут; E_D отрицательно – КЛ₁ замкнут. Напряжение $+U$ подается от дополнительного источника, например, от делителя напряжения источника питания. Его величина определяется нагрузкой компаратора. Например, если нагрузкой является микросхема ТТЛ-логики, то это напряжение равно $+5$ В.

Наличие дополнительного стабилизирующего входа позволяет блокировать выход компаратора. Так, если замкнуть ключ КЛ₂, ключ КЛ₁ размыкается и остается в таком положении независимо от E_D .

Работу компаратора поясняет диаграмма, рис. 2.11. При разомкнутом ключе КЛ₂ (временной интервал t_0-t_5) выходное напряжение принимает два значения: $U_{ВЫХ}=0$ при положительной полярности $E_{ВХ}$ (t_0-t_1 , t_2-t_3 , t_4-t_5), и $U_{ВЫХ}=+U$, когда $E_{ВХ}$ отрицательно (t_1-t_2 , t_3-t_4). Когда ключ КЛ₂ замкнут (t_5-t_9), ключ КЛ₁ остается разомкнутым ($U_{ВЫХ}=+U$) как в случае положительного (t_5-t_6 , t_7-t_8), так и отрицательного (t_6-t_7 , t_8-t_9) входного напряжения.

Компараторы находят широкое применение в различных устройствах электроники и автоматики. Рассмотрим в заключение одно из таких применений. Предположим, что необходимо контролировать напряжение питания устройства, собранного на микросхемах ТТЛ-логики. Это напряжение должно быть равно $5 \pm 0,5$ В. Поскольку питающее напряжение сравни-

вается с двумя уровнями 4,5 В и 5,5 В, для построения схемы контроля необходимы два интегральных компаратора, например, LM311, рис. 2.12.

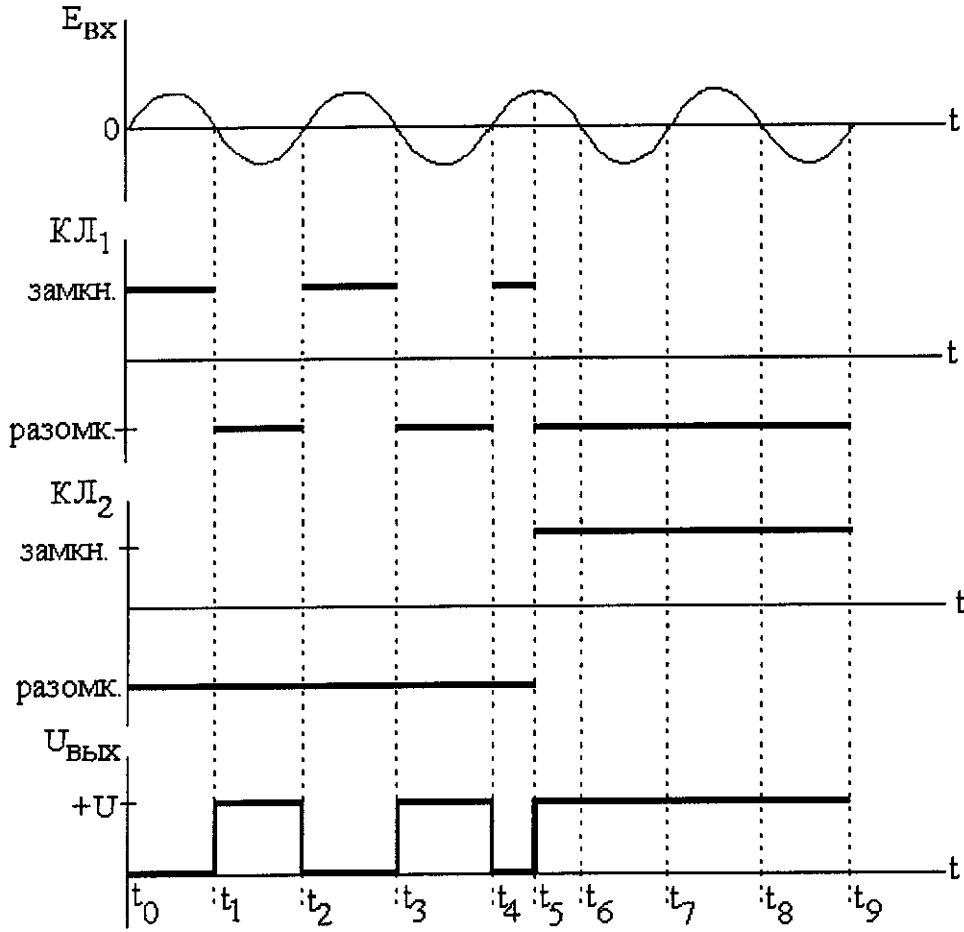


Рис. 2.11. Временные диаграммы работы компаратора LM311

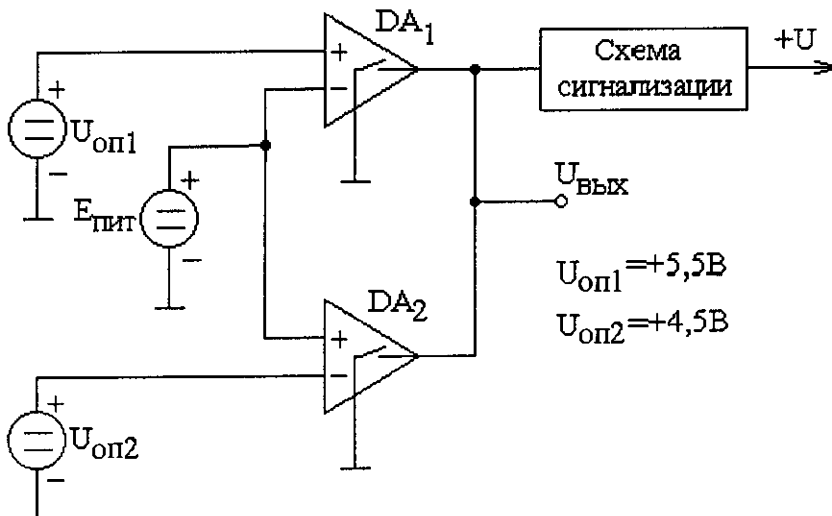


Рис. 2.12. Схема контроля напряжения питания

В случае, если напряжение питания $E_{\text{ПИТ}}$ находится в интервале от 4,5 до 5,5 В, выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ равно $+U$, а напряжение на схеме сигнализации $U_{\text{СС}}$ равно нулю, рис. 2.13. Если $E_{\text{ПИТ}}$ выходит за установленный допуск, $U_{\text{ВЫХ}}=0$, схема сигнализации получает питание ($U_{\text{СС}}=+U$) и сигнализирует о нарушении питания устройства.

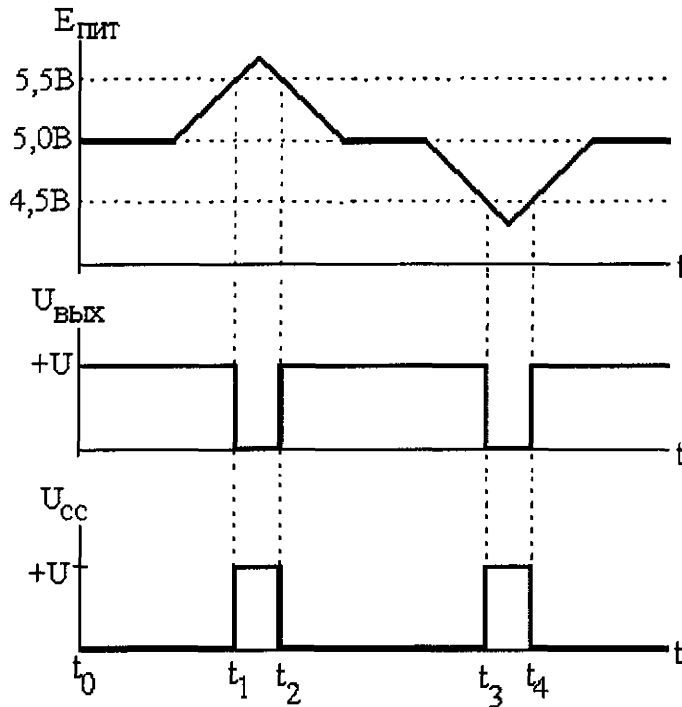


Рис. 2.13. Временные диаграммы работы устройства контроля напряжения питания

Если $E_{\text{ПИТ}}=5\pm 0,5$ В (моменты времени t_0-t_1 , t_2-t_3), $U_{\text{ОП1}} > E_{\text{ПИТ}} > U_{\text{ОП2}}$ ($U_{\text{ОП1}} = 5,5$ В и $U_{\text{ОП2}} = 4,5$ В) и на выходе обеих микросхем DA_1 и DA_2 напряжение равно $+U$, а напряжение на схеме сигнализации $U_{\text{СС}}$ равно нулю.

Когда $E_{\text{ПИТ}} > U_{\text{ОП1}}$ (t_1-t_2), дифференциальное входное напряжение DA_1 отрицательно и ее выходное напряжение равно потенциалу земли ($U_{\text{ВЫХ}}=0$). Схема сигнализации получает питание ($U_{\text{СС}}=+U$).

В случае, если $E_{\text{ПИТ}} < U_{\text{ОП2}}$ (t_3-t_4) $E_{\text{диф}} DA_2$ отрицательно, $U_{\text{ВЫХ}}=0$, $U_{\text{СС}}=+U$.

Рассмотренное устройство контроля напряжения питания реализует логическую функцию «ИЛИ»: схема сигнализации включается или в случае, когда $E_{\text{ПИТ}} > U_{\text{ОП1}}$, или если $E_{\text{ПИТ}} < U_{\text{ОП2}}$.

2.2. ОУ в инвертирующем и неинвертирующем включении

Во многих случаях ОУ применяется с отрицательной обратной связью. При этом характеристики схемы не зависят от коэффициента усиления операционного усилителя без обратной связи K , а определяются только параметрами внешних элементов.