

Для усилителя, рис. 2.22, может быть задано пятнадцать дискретных значений коэффициента усиления. В случае необходимости шаг квантования можно уменьшить, введя дополнительные резисторы ОС и ключи.

В подобных схемах следует иметь в виду неидеальность электронных ключей, выполненных на транзисторах, то есть учитывать, что последовательно с каждым резистором обратной связи включается сопротивление замкнутого ключа $r_{вкл}$ (в схеме, рис. 2.22, $r_{вкл} \approx 30 \text{ Ом}$).

Не следует полагать, что в усилителях с цифровым управлением доступно только четко выраженное дискретное изменение величины коэффициента передачи напряжения. Применение цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) позволяет строить схемы, в которых изменение коэффициента усиления может производиться как очень плавно (аналогично усилителям рис. 2.20 и 2.21), так и дискретно (аналогично рис. 2.22).

2.4. Преобразователи тока в напряжение и напряжения в ток

Входные и выходные каскады большинства электронных устройств являются источниками или приемниками напряжения. Однако в целом ряде случаев предпочтение отдается токовым сигналам. Токовые сигналы используются в длинных линиях связи распределенных систем управления технологическими процессами, поскольку этот способ обеспечивает хорошую защиту от помех, а сопротивления кабеля и контактных соединений практически не влияют на качество передачи сигнала. С токовым входным сигналом приходится иметь дело, например, в фототранзисторной схеме для измерения освещенности, при измерении тока, потребляемого нагрузкой, и т.д. Токовыми нагрузками являются широко используемые стрелочные измерительные приборы магнитоэлектрической системы.

Преобразователи тока в напряжение (ПТН) и напряжения в ток (ПНТ) используются в различных электронных устройствах и системах, в частности, для согласования каскадов, работающих с потенциальными и токовыми сигналами.

Преобразователи тока в напряжение. Самый простой ПТН представлен на рис. 2.23. В качестве датчика измеряемого тока используется образцовый резистор R , падение напряжения на котором $I_{вх}R$ является входным сигналом для усилителя напряжения. Измеряемые токи $I_{вх}$ должны быть порядка нескольких десятков или, в крайнем случае, единиц микроампер. При измерении токов меньшей величины требуются высокоомные резисторы (генерирующие значительный шум) и малошумящие усилители с малыми токами смещения. Для переменного тока необходимо также учитывать влияние паразитной емкости $C_{п}$, уменьшающей полосу пропускания (частота среза $f_c = 1/2\pi RC_{п}$).

Для измерения малых токов с успехом может использоваться схема, рис. 2.24. Нижняя граница $I_{вх}$ составляет доли пикоампера. Согласно пра-

вилам 1 и 2 весь входной ток протекает через R_{OC} и, следовательно,
 $U_{ВЫХ} = -R_{OC} \cdot I_{ВХ}$.

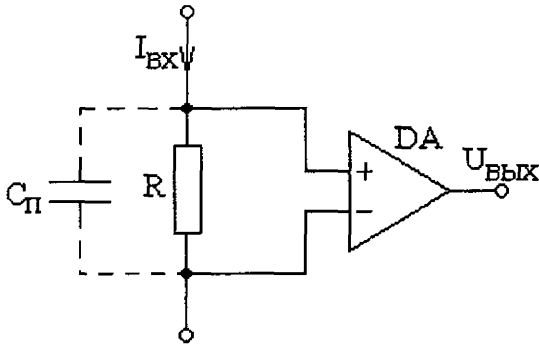


Рис. 2.23. Простейший ПТН

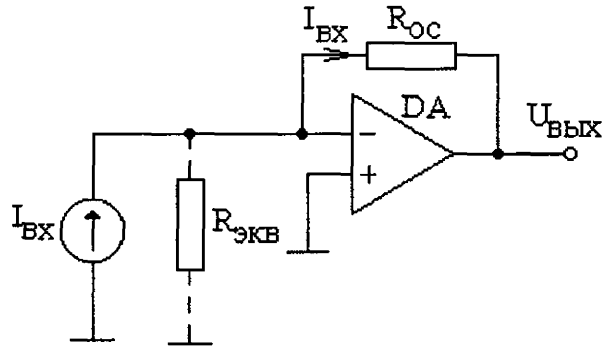


Рис. 2.24. ПТН для малых токов

Коэффициент преобразования:

$$K_1 = \frac{U_{ВЫХ}}{I_{ВХ}} = \frac{-R_{OC}}{1 + \frac{R_{ЭКВ} + R_{OC}}{K \cdot R_{ЭКВ}}} \approx -R_{OC},$$

где K – коэффициент усиления по напряжению разомкнутого ОУ;

$R_{ЭКВ}$ – эквивалентное сопротивление между входом (–) и землей, включающее в себя сопротивление источника тока и дифференциальное входное сопротивление ОУ.

Входное сопротивление:

$$R_{ВХ} = \frac{R_{OC} \cdot R_{ЭКВ}}{R_{OC} + (k+1) \cdot R_{ЭКВ}}.$$

Учитывая, что обычно $K \cdot R_{ЭКВ} \gg R_{OC}$, можно записать

$$R_{ВХ} \approx \frac{R_{OC}}{1+K}.$$

Выходное напряжение смещения:

$$U_{СМ.ВЫХ} = U_{СДВ} + I_{СМ} R_{OC},$$

где $U_{СДВ}$ – входное напряжение сдвига;

$I_{СМ}$ – входной ток смещения.

Минимальное значение измеряемого тока определяется $U_{СДВ}$, $I_{СМ}$ и их дрейфами. Поэтому с целью улучшения метрологических характеристик ПТН рекомендуется следующее:

1. При входных токах менее 1 мкА желательно использовать ОУ с полевыми входными транзисторами, имеющими очень малые входные токи.

2. Необходимо обеспечивать выполнение условия $R_{ЭКВ} \gg R_{ОС}$, так как $U_{СДВ}$ усиливается схемой в $-R_{ОС}/R_{ЭКВ}$ раз.
3. Погрешность, обусловленную $I_{СМ}$, можно значительно уменьшить, заземлив вход (+) не непосредственно, а через резистор, равный $R_{ОС}$.
4. Дрейф $U_{СДВ}$ и $I_{СМ}$ вызывается изменением температуры. Поэтому целесообразно принятие мер по уменьшению нагрева ОУ в схеме ПТН.
5. В схеме ПТН лучше использовать прецизионные высокостабильные резисторы.

Преобразователи напряжения в ток. В ряде случаев возникает необходимость управлять током нагрузки при помощи входного напряжения. При этом изменение напряжения на нагрузке и колебания ее сопротивления не должны нарушать однозначности зависимости $I_H = F(U_{ВХ})$.

Простейшие ПТН для незаземленной (плавающей) нагрузки приведены на рис. 2.25.

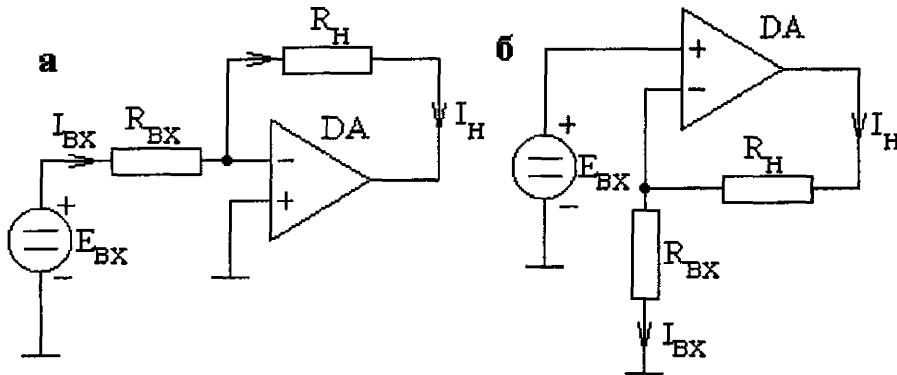


Рис. 2.25. ПТН с плавающей нагрузкой:
а – с инвертирующим усилителем;
б – с неинвертирующим усилителем

Согласно правилам 1 и 2 $I_H = -E_{ВХ}/R_{ВХ}$ для схемы (рис. 2.25,а) и $I_H = E_{ВХ}/R_{ВХ}$ – рис. 2.25,б. Входное сопротивление для инвертирующего преобразователя равно $R_{ВХ}$, для неинвертирующего – $R_{ВХ} \cdot \text{синф}$, где $R_{ВХ} \cdot \text{синф}$ – входное сопротивление ОУ для синфазного сигнала.

Максимальный выходной ток ограничивается максимальным выходным напряжением ОУ (напряжением питания) и сопротивлением нагрузки R_H . Для схемы рис. 2.25,а $I_{ВЫХМАХ} = U_{НАС}/R_H$, для схемы рис. 2.25,б $I_{ВЫХМАХ} = U_{НАС}/(R_{ВХ} + R_H)$, где $U_{НАС}$ – выходное напряжение ОУ в режиме насыщения.

Увеличение тока нагрузки может быть достигнуто применением тран-

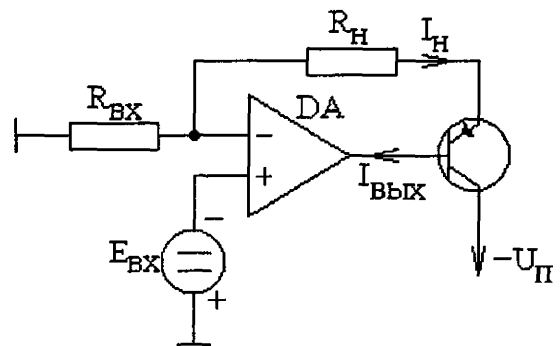


Рис. 2.26. ПТН с увеличенным током нагрузки

зистора, рис. 2.26. Благодаря способности транзистора усиливать ток, I_H может быть в β раз больше максимального выходного тока ОУ ($I_H = \beta \cdot I_{\text{ВЫХ}}$), где β – коэффициент передачи тока транзистора.

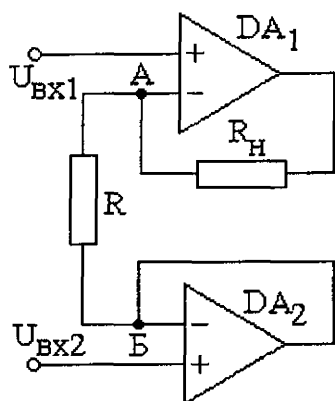


Рис. 2.27. ПНТ с дифференциальным входом

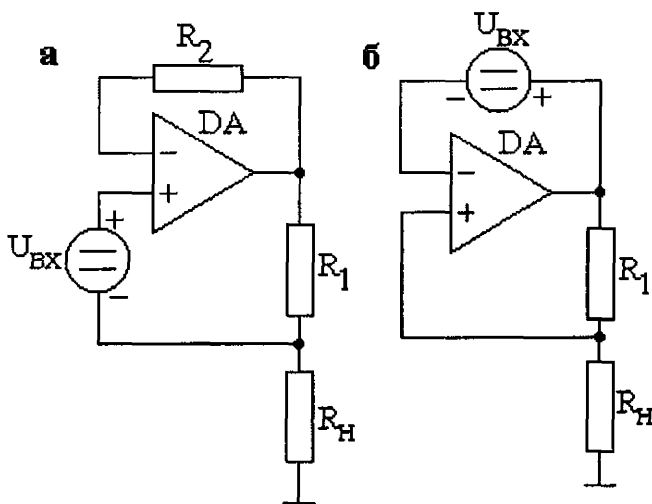


Рис. 2.28. ПНТ с заземленной нагрузкой:
а – подключение источника сигнала ко входу (+);
б – включение источника сигнала в цепь обратной связи

Источник тока (рис. 2.27) позволяет вести управление разностью напряжений $U_{\text{ВХ1}} - U_{\text{ВХ2}}$. Согласно правилу 1 потенциал точки А равен $U_{\text{ВХ1}}$, а потенциал точки Б – $U_{\text{ВХ2}}$. Таким образом, через резистор R протекает ток, равный $(U_{\text{ВХ1}} - U_{\text{ВХ2}})/R$. В соответствии с правилом 2 весь этот ток протекает через нагрузку, поэтому

$$I_H = \frac{1}{R} (U_{\text{ВХ1}} - U_{\text{ВХ2}}).$$

В рассмотренных схемах ПНТ нагрузка является плавающей (незаземленной). Однако в ряде случаев требуется, чтобы один полюс нагрузки был заземлен. Две такие схемы для плавающих источников входного сигнала представлены на рис. 2.28. Согласно правилу 1 напряжение на резисторе R_1 равно $U_{\text{ВХ}}$. Ток нагрузки равен $U_{\text{ВХ}}/R_1$.

ПНТ, рис. 2.29, работает на заземленную нагрузку и с заземленным источником входного сигнала.

Рассмотрим схему рис. 2.29,а. Выходное напряжение делится пополам между верхними по схеме резисторами R. Согласно правилу 1 потенциалы обоих входов ОУ равны $U_{\text{ВЫХ}}/2$. Следовательно, напряжение на нагрузке также равно $U_{\text{ВЫХ}}/2$. Ток нагрузки равен:

$$I_H = I_{\text{ВХ}} + I_{\text{ОС}} = \frac{E_1 - U_H}{R} + \frac{U_{\text{ВЫХ}} - U_H}{R}.$$

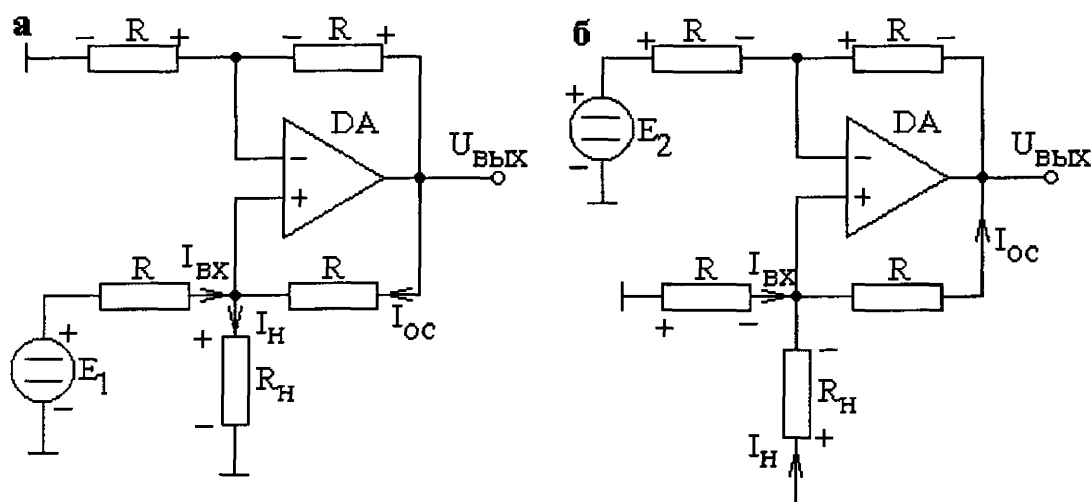


Рис. 2.29. ПНТ с заземленной нагрузкой и источником сигнала:

а – управляемый со стороны входа (+);

б – управляемый со стороны входа (-)

Или учитывая, что $U_{\text{ВЫХ}}=2U_{\text{Н}}$, окончательно имеем $I_{\text{Н}}=E_1/R$. То есть ток нагрузки прямо пропорционален управляющему напряжению E_1 . Все четыре резистора схемы должны быть согласованы (допуск 0,5...1%).

Аналогичную зависимость от E_2 имеет ток нагрузки в схеме рис.

2.29,б. Учитывая, что полярность $U_{\text{ВЫХ}}$ противоположна E_2 , напряжение на каждом из верхних по схеме резисторах равно $U_{\text{R}}=(E_2+U_{\text{ВЫХ}})/2$, рис. 2.30. Согласно правилу 1

$$U_{\text{Н}}=U_{\text{R}}-E_2=\frac{E_2+U_{\text{ВЫХ}}}{2}-E_2=\frac{U_{\text{ВЫХ}}-E_2}{2}.$$

Следовательно, $U_{\text{ВЫХ}}=2U_{\text{Н}}+E_2$. Ток нагрузки (рис. 2.29,б) равен:

$$I_{\text{Н}}=I_{\text{ОС}}-I_{\text{ВХ}}.$$

$$\text{Ток } I_{\text{ОС}}=\frac{U_{\text{R}}}{R}=\frac{(E_2+U_{\text{ВЫХ}})}{2R}, \text{ а ток } I_{\text{ВХ}}=\frac{U_{\text{Н}}}{R}=\frac{(U_{\text{ВЫХ}}-E_2)}{2R}.$$

Окончательное выражение для тока нагрузки имеет следующий вид:

$$I_{\text{Н}}=\frac{E_2+U_{\text{ВЫХ}}}{2R}-\frac{U_{\text{ВЫХ}}-E_2}{2R}=\frac{E_2}{R}.$$

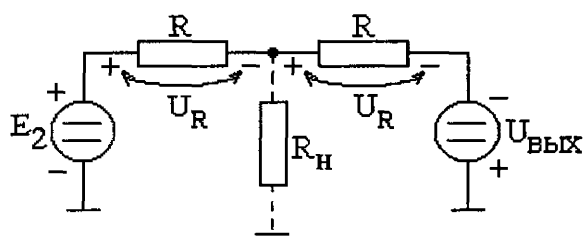


Рис. 2.30. К выводу зависимости для тока нагрузки

При подаче двух управляющих напряжений E_1 и E_2 одновременно $I_H = (E_1 - E_2)/R$, т.е. источник тока управляется дифференциальным сигналом.

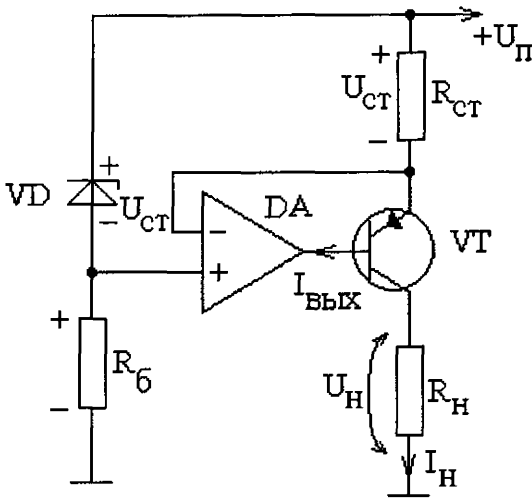


Рис. 2.31. Источник тока с заземленной нагрузкой

Ещё одна схема ПНТ с заземленной нагрузкой и с фиксированным значением выходного тока представлена на рис. 2.31.

Согласно правилу 1 напряжение на резисторе $R_{СТ}$ равно напряжению стабилизации стабилитрона VD $U_{СТ}$. Эмиттерный ток транзистора VT $I_Э = U_{СТ}/R_{СТ}$. Учитывая, что для транзистора VT $I_К \approx I_Э$, ток нагрузки равен $I_Н = U_{СТ}/R_{СТ}$. Благодаря применению транзистора ток нагрузки может быть в β раз больше максимального выходного тока ОУ $I_{ВЫХ\ MAX}$, где β – коэффициент передачи тока транзистора. Необходимым

условием работы источника тока является выполнение неравенства $U_Н < U_П - U_{СТ} - U_{КЭ\ НАС}$, где $U_{КЭ\ НАС}$ – напряжение между коллектором и эмиттером транзистора VT в режиме насыщения.

Рассмотренная схема не является ПНТ в «чистом виде», поскольку выходной ток $I_Н$ задается либо изменением напряжения стабилизации $U_{СТ}$ (сменой стабилитрона), либо изменением сопротивления резистора $R_{СТ}$.

2.5. Применение ОУ в измерительной технике

Вольтметр постоянного тока. Основным требованием к прибору для измерения напряжения (вольтметру) является высокое входное сопротивление. От величины этого сопротивления зависит ошибка измерения напряжения (методическая погрешность). Пусть, например, необходимо измерить напряжение на резисторе R_2 делителя напряжения, рис. 2.32. Оба резистора имеют равные сопротивления 300 кОм. Сопротивление стрелочного вольтметра (выполненного на основе головки магнитоэлектрической системы с током полного отклонения 50 мкА) на пределе измерения 10 В равно 200 кОм.

Очевидно, что напряжение на резисторе R_2 равно 5 В. Вольтметр шунтирует резистор R_2 . Сопротивление нижнего плеча делителя становится равным $R_2 || R_{ИЗМ} = 120$ кОм. Вольтметр показывает напряжение около 2.8 В, то есть методическая погрешность измерения напряжения превышает 50%.