

$$R_{\text{вых3}} = \frac{10^6}{35} \left[1 + \frac{35(12,5 + 650)}{12,5 + 650 + 100 + 505} \right] = 550 \text{ кОм.}$$

Тогда

$$K_{U_{\text{сф. несим}}} = \frac{R_{\text{к}}}{2R_{\text{вых3}}} = \frac{3,3}{2 \cdot 550} = 3 \cdot 10^{-3}$$

и

$$K_{\text{ос. сф}} = \frac{K_{U_{\text{л}}}}{K_{U_{\text{сф. несим}}}} = \frac{20}{3 \cdot 10^{-3}} = 6,6 \cdot 10^3,$$

или

$$K_{\text{ос. сф дБ}} = 76,4 \text{ дБ.}$$

Рассчитаем приведенный дрейф ДУ, считая, что температурные приращения $U_{\text{бэ0}}$ и $I_{\text{б0}}$ транзисторов T_1 и T_2 разнятся на $\pm 5\%$.

Для наихудшего случая, когда отклонения тока и напряжения суммируются, получим из выражения (6.9)

$$\begin{aligned} e_{\text{др ДУ}}^{\text{вх}} &= \frac{U_{\text{см}}}{T} + \frac{dI_{\text{б0 разн}}}{dT} \left(\frac{R'_3}{2} + R_{\text{г}} \right) = \\ &= \frac{0,1 U_{\text{бэ0}}}{T} + b \cdot 0,1 I_{\text{б0}} \left(\frac{R'_3}{2} + R_{\text{г}} \right) = \\ &= \frac{0,1 \cdot 0,45}{300} + 0,005 \cdot 0,1 \cdot 0,029 (0,1 + 0,02) \cdot 10^3 = 0,17 \text{ мВ/}^\circ\text{С.} \end{aligned}$$

§ 6.3. УСИЛИТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

Операционный усилитель (ОУ) представляет собой усилитель электрических сигналов, выполненный в виде интегральной микросхемы с непосредственными (гальваническими) связями и предназначенный для выполнения различных операций над аналоговыми величинами при работе в схемах с отрицательной обратной связью.

Такой усилитель обладает высоким коэффициентом усиления в полосе частот порядка единиц мегагерц, высоким входным и малым выходным сопротивлением. Для упрощения расчетов схем с использованием ОУ часто прибегают к идеализации его параметров, считая $K_{U_{\text{ОУ}}} = \infty$, $R_{\text{вх ОУ}} = \infty$ и $R_{\text{вых ОУ}} = 0$.

ОУ имеет, как правило, два входа и один выход. Инвертирующий вход обозначают знаком «-»; сигнал, поданный на

этот вход, имеет на выходе противоположную фазу. Неинвертирующий вход обозначается знаком «+». Кроме перечисленных сигнальных выводов ОУ имеет выходы для подключения двух источников питания ($\pm E_n$), для установки нулевого напряжения на выходе при $U_{вх} = 0$, для частотной коррекции и т. д.

В связи с тем что $K_{U_{OУ}}$ достаточно велик ($10^5 - 10^6$), схемы на ОУ работают в линейном режиме только при введении отрицательной обратной связи. 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.

Параметры ОУ можно разделить на следующие группы. *Входные параметры, определяемые свойствами входного дифференциального каскада:*

напряжение смещения нуля $U_{см}$, значение которого определяется неидентичностью напряжений $U_{бэ0}$ транзисторов входного дифференциального каскада, и его температурный дрейф $\Delta U_{см}/\Delta T$;

средний $I_{60ср}$ и разностный $I_{60разн}$ входной ток (ток баз транзисторов в режиме покоя входного дифференциального каскада) и температурный дрейф разностного входного тока $\Delta I_{60разн}/\Delta T$;

максимальное входное дифференциальное $U_{вх,дmax}$ и синфазное $U_{вх,сф,max}$ напряжения;

входное дифференциальное сопротивление $R_{вх}$, т. е. сопротивление между входами ОУ для малого дифференциального входного сигнала, при котором сохраняется линейность выходного напряжения;

входное синфазное сопротивление $R_{вх,сф}$, т. е. сопротивление, равное отношению напряжения, поданного на оба входа ОУ, к току входов.

Передаточные параметры:

коэффициент усиления по напряжению $K_{U_{OУ}}$, определяемый отношением изменения выходного напряжения к вызвавшему это изменение дифференциальному входному сигналу;

коэффициент ослабления синфазного сигнала $K_{ос,сф}$, определяемый отношением коэффициента усиления дифференциального сигнала в схеме на ОУ к коэффициенту усиления синфазного сигнала;

частота единичного усиления f_T , т. е. частота, при которой $K_{U_{OУ}} = 1$.

Выходные параметры, определяемые свойствами выходного каскада ОУ:

выходное сопротивление $R_{вых}$;

максимальный выходной ток, измеряемый при максимальном выходном напряжении, или минимальное сопротивление нагрузки $R_{\text{н min}}$;

максимальное выходное напряжение в диапазоне линейного усиления. Для большинства типов ОУ величина $U_{\text{вых max}} = 10 \text{ В}$.

Переходные параметры:

скорость нарастания выходного напряжения $V_{U_{\text{вых}}}$ — максимальная скорость изменения во времени напряжения на выходе ОУ (В/мкс) при подаче на вход большого сигнала.

Параметры цепи питания:

напряжение питания $\pm E_{\text{п}}$;

потребляемый ток $I_{\text{пот}}$.

Операционные усилители, выполняемые в виде монолитных ИМС, можно классифицировать следующим образом.

1. По типу транзисторов, используемых во входных каскадах:

ОУ на биполярных транзисторах, имеющие малое напряжение смещения нуля, но значительные входные токи и сравнительно невысокое входное сопротивление ($\sim 10^6 \text{ Ом}$);

ОУ с полевыми транзисторами на входе, в которых достигаются высокое входное сопротивление ($\sim 10^9 \div 10^{12} \text{ Ом}$) и малые входные токи, но возрастает напряжение смещения нуля.

2. По выходной мощности:

стандартные ОУ, которые отдают в нагрузку с сопротивлением $R_{\text{н}} \geq 2 \text{ кОм}$ номинальную выходную мощность $\sim 50 \text{ мВт}$;

мощные ОУ с выходной мощностью от единиц до нескольких десятков ватт;

микромощные ОУ, в которых мощность, потребляемая в режиме покоя, очень мала ($\sim 10^{-6} \text{ Вт}$).

3. По области применения:

ОУ общего применения, характеризующиеся низкой стоимостью, малыми размерами, широким диапазоном напряжения питания, защищенным входом и выходом, не очень высокой частотой f_{T} ;

специальные ОУ, которые, в свою очередь, разделяются на прецизионные, измерительные, электрометрические ОУ и т. п.

Параметры некоторых типов ОУ могут изменяться за счет введения частотной коррекции и токового программирования. Частотная коррекция может быть введена в схему ОУ при его изготовлении. Это так называемые ОУ с внутренней коррекцией. На рис. 6.7 приведена АЧХ ОУ с внутренней коррекцией. Как известно [4], такая форма АЧХ обеспечивает устойчивость схем на ОУ при любом требуемом коэффициенте усиления, что

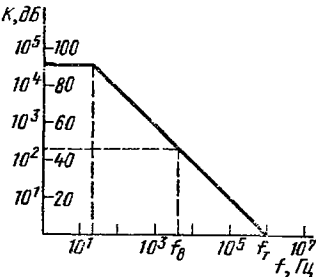


Рис. 6.7

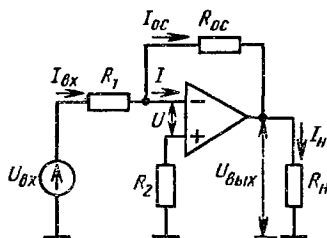


Рис. 6.8

достигается за счет существенного ухудшения частотных свойств ОУ. В случае широкого спектра усиливаемого сигнала частотные свойства ОУ накладывают ограничения на значение коэффициента усиления, который можно получить в схеме усилителя, используя данный ОУ. Например, если верхняя граничная частота сигнала $f_{\text{в}} = 50$ кГц, то максимально возможное усиление в схеме усилителя на ОУ, имеющем АЧХ, приведенную на рис. 6.7, составит 46 дБ. При этом следует иметь в виду, что в диапазоне частот от 25 Гц до 50 кГц глубина F отрицательной обратной связи в схеме усилителя будет уменьшаться и при $f_{\text{в}} = 50$ кГц $F = 1$.

Использование внешних корректирующих элементов позволяет, как правило, обеспечить устойчивую работу ОУ в требуемом диапазоне изменения коэффициента усиления при меньшем ухудшении частотных свойств, но приводит к усложнению схемы усилителя.

При анализе усилительных схем на ОУ обычно принимают следующие упрощающие предположения (при $R_{\text{вх ОУ}} = \infty$ и $K_{\text{У ОУ}} = \infty$):

- 1) входы ОУ не потребляют тока;
- 2) напряжение между входами ОУ равно нулю. Последнее предположение следует из того, что при $K_{\text{У ОУ}} = \infty$ напряжение $U_{\text{вых}} = K_{\text{У ОУ}}(U_1 - U_2)$ всегда конечно и по значению меньше напряжения питания $E_{\text{п}}$, что может иметь место только при $U_1 - U_2 = 0$ или $U_1 = U_2$. Здесь U_1, U_2 — напряжения на входах ОУ.

Инвертирующий усилитель (рис. 6.8) представляет собой ОУ, охваченный цепью параллельной отрицательной обратной связи по напряжению на резисторах $R_{\text{ос}}, R_1$. Цепи частотной коррекции и установки нуля на рис. 6.8 не показаны. Входной сигнал подан на инвертирующий вход. Неинвертирующий вход заземлен через резистор R_2 , сопротивле-

ние которого для снижения величины токового дрейфа выбирается так [3, 4]: $R_2 = R_{oc} \parallel R_1$.

Так как неинвертирующий вход ОУ заземлен и разность напряжений между входами равна нулю, то инвертирующий вход тоже имеет нулевой потенциал относительно земли. Поэтому $I_{вх} = U_{вх}/R_1$. Так как входы ОУ не потребляют тока, то $I_{oc} = -I_{вх} = -U_{вх}/R_1$. Выходное напряжение, т. е. напряжение на выходном выводе относительно общей шины, можно найти как падение напряжения от тока I_{oc} на резисторе R_{oc} , т. е. $U_{вых} = -R_{oc}I_{oc} = -U_{вх}R_{oc}/R_1$.

Отсюда коэффициент усиления инвертирующего усилителя

$$K_{U_{инв}} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = -\frac{R_{oc}}{R_1}. \quad (6.10)$$

При заданной э. д. с. источника сигнала E_r с внутренним сопротивлением $R_r \neq 0$ формула (6.10) примет вид

$$K_{U_{инв}} = \frac{U_{вых}}{E_r} = -\frac{R_{oc}}{R_r + R_1}. \quad (6.10a)$$

Ток выходной цепи ОУ, протекающий через резисторы R_n и R_{oc} , включенные параллельно для приращений тока,

$$I_{вых} = I_n + I_{oc} = \frac{U_{вых}}{R_n} + \frac{U_{вых}}{R_{oc}}. \quad (6.11)$$

Значение выходного тока большинства типов ОУ не должно превышать нескольких миллиампер.

Входное сопротивление инвертирующего усилителя при идеальном ОУ определяется сопротивлением резистора R_1 , т. е. $R_{вх.инв} = R_1$. Выходное сопротивление $R_{вых.инв} = 0$. В случае неидеального ОУ ($R_{вх.ОУ} \neq \infty$, $K_{U_{ОУ}} \neq \infty$) можно получить формулу

$$K_{U_{инв}} = \frac{-R_{oc}/R_1}{1 + \frac{1}{K_{U_{ОУ}}} \left(1 + \frac{R_{oc}}{R_1} + \frac{R_{oc}}{R_{вх.ОУ}} \right)}. \quad (6.12)$$

Это выражение позволяет оценить погрешность величины $K_{U_{инв}}$ при установке в схему любого ОУ данного типа с учетом разброса значений $K_{U_{ОУ}}$ и $R_{вх.ОУ}$.

Погрешность определяется вторым членом в знаменателе выражения и уменьшается при увеличении $K_{U_{ОУ}}$ и $R_{вх.ОУ}$. Так как величина $K_{U_{ОУ}}$ уменьшается с ростом частоты, то погрешность $K_{U_{инв}}$ зависит от диапазона частот, в котором работает усилитель, и увеличивается в области высоких частот.

Входное сопротивление усилителя при неидеальном ОУ

$$R_{\text{вх. инв}} = R_1 + \frac{R_{\text{вх ОУ}} R_{\text{ос}}}{R_{\text{вх ОУ}} (1 + K_{\text{У ОУ}}) + R_{\text{ос}}}. \quad (6.13)$$

Выходное сопротивление усилителя в этом случае

$$R_{\text{вых. инв}} = \frac{R_{\text{вых ОУ}}}{F} = \frac{R_{\text{вых ОУ}}}{K_{\text{У ОУ}}} K_{\text{У инв}}, \quad (6.14)$$

где $F = K_{\text{У ОУ}} / K_{\text{У инв}}$ — глубина параллельной отрицательной обратной связи, охватывающей усилитель. Напряжение статической ошибки инвертирующего усилителя на ОУ определяется выражением [6]

$$U_{\text{вых. ош}} = U_{\text{см}} \left(1 + \frac{R_{\text{ос}}}{R_1} \right) + I_{601} \left(1 + \frac{R_{\text{ос}}}{R_1} \right) R_2 - I_{602} R_{\text{ос}}$$

Если

$$R_2 (1 + R_{\text{ос}} / R_1) = R_{\text{ос}}, \text{ т. е. } R_2 = R_{\text{ос}} \parallel R_1, \quad (6.15)$$

то

$$U_{\text{вых. ош}} = U_{\text{см}} (1 + |K_{\text{У инв}}|) + I_{60 \text{ разн}} R_{\text{ос}}. \quad (6.16)$$

Напряжение ошибки, вызванное влиянием $U_{\text{см}}$ и входными токами ОУ, может быть скомпенсировано (сделано равным нулю) путем введения цепей компенсации ошибки (цепей установки нуля). Схемы установки нуля обычно приводятся изготовителями ОУ в справочных материалах.

Для уменьшения составляющей $U_{\text{вых. ош}}$, вызванной входными токами ОУ, следует выбирать схемы ОУ с полевыми транзисторами на входе и уменьшать номинал резистора $R_{\text{ос}}$, а следовательно, и R_1 . Обычно рекомендуют выбирать резистор R_1 из условия, чтобы падение напряжения на нем от среднего входного тока ОУ $I_{60 \text{ ср}} = (I_{601} + I_{602}) / 2$ было на порядок меньше входного сигнала, т. е. $I_{60 \text{ ср}} R_1 \leq 0,1 U_{\text{вх мин}}$.

Изменение напряжения ошибки с температурой представляет собой дрейф усилителя на ОУ. Дрейф выходного напряжения, вызванный изменением температуры на 1°C , можно найти с учетом выражения (6.16):

$$\frac{\Delta U_{\text{вых. ош}}}{\Delta T} = \frac{\Delta U_{\text{см}}}{\Delta T} (1 + |K_{\text{У инв}}|) + \frac{\Delta I_{60 \text{ разн}}}{\Delta T} R_{\text{ос}}, \quad (6.17)$$

где $\Delta U_{\text{см}} / \Delta T$ — дрейф напряжения смещения и $\Delta I_{60 \text{ разн}} / \Delta T$ — дрейф разностного входного тока. Эти величины являются параметрами ОУ и приводятся в справочниках.

Дополнительная погрешность усилителя на ОУ создается за счет изменения напряжения питания схемы. Для оценки влия-

ния изменения величины $E_{\text{п}}$ вводят коэффициент ослабления влияния напряжения питания $K_{\text{ОВНП}}$, являющийся параметром ОУ и приводимый в справочных данных *. Коэффициент $K_{\text{ОВНП}}$ представляет собою отношение изменения напряжения питания $\Delta E_{\text{п}}$ к вызванному им изменению $U_{\text{см}}$, выраженное в децибелах, т. е.

$$K_{\text{ОВНП}} = 20 \lg \frac{\Delta E_{\text{п}}}{\Delta U_{\text{см}}}. \quad (6.18)$$

Неинвертирующий усилитель (рис. 6.9) представляет собой ОУ, охваченный цепью последовательной отрицательной ОС по напряжению на резисторах $R_{\text{ос}}$, R_1 . Входной сигнал подан на неинвертирующий вход. Выражение для коэффициента усиления этой схемы можно получить, используя условие равенства напряжений на входах ОУ:

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{ос}} = U_{\text{вых}} \frac{R_1}{R_{\text{ос}} + R_1}. \quad (6.19)$$

Отсюда

$$K_{U_{\text{неинв}}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_{\text{ос}} + R_1}{R_1} = 1 + \frac{R_{\text{ос}}}{R_1} = 1 + |K_{U_{\text{инв}}}|. \quad (6.20)$$

Поскольку входные токи ОУ равны нулю, наличие резистора $R_{\text{г}}$ (внутреннего сопротивления источника сигнала) не влияет на значение коэффициента усиления схемы.

Для реальных ОУ сопротивления во входных цепях стремятся сделать равными для уменьшения токовой составляющей погрешности [см. выражения (6.15), (6.16)].

Вследствие наличия в схеме неинвертирующего усилителя последовательной отрицательной ОС по напряжению его входное сопротивление возрастает в F раз. При неидеальном ОУ

$$R_{\text{вх. неинв}} = R_{\text{вх ОУ}} F = R_{\text{вх ОУ}} \frac{K_{U_{\text{ОУ}}}}{K_{U_{\text{неинв}}}}. \quad (6.21)$$

Выходное сопротивление определяется формулой (6.14).

Если в схеме рис. 6.9 принять $R_1 = \infty$ и $R_{\text{ос}} = 0$, то $K_{U_{\text{неинв}}} = 1$ и $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}$, т. е. имеем повторитель с коэффициентом передачи, равным единице (рис. 6.10).

Для схемы повторителя с коэффициентом усиления

* Иногда вместо $K_{\text{ОВНП}}$ вводят коэффициент влияния нестабильности источника питания на напряжение смещения, имеющий размерность мкВ/В и показывающий, насколько изменится $U_{\text{см}}$ при заданном изменении $E_{\text{п}}$.

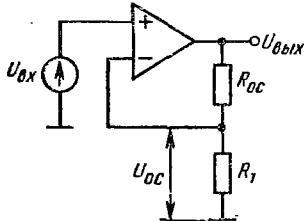


Рис. 6.9

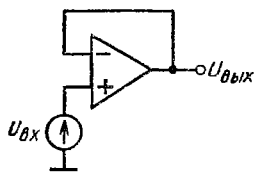


Рис. 6.10

$K_{U \text{ неинв}} = 1$ глубина обратной связи $F = K_{U \text{ ОУ}}$ и выражения для выходного и входного сопротивлений запишутся в виде

$$R_{\text{вх. повт}} = R_{\text{вх. ОУ}} K_{U \text{ ОУ}}, \quad (6.22)$$

$$R_{\text{вых. повт}} = \frac{R_{\text{вых. ОУ}}}{K_{U \text{ ОУ}}}. \quad (6.23)$$

Входное сопротивление повторителя получается чрезвычайно высоким ($\sim 10^{12}$ Ом), однако практически столь высокие значения $R_{\text{вх}}$ не достигаются из-за влияния шунтирующего действия утечек и синфазного входного сопротивления ОУ (сопротивления между входами ОУ и землей).

Напряжение статической ошибки в неинвертирующем усилителе по сравнению со схемой рис. 6.8 увеличивается за счет синфазной составляющей $U_{\text{вых. ош}}^{\text{сф}}$, так как в этой схеме на обоих входах всегда присутствует синфазный сигнал, равный $U_{\text{вх}}$.

Величина $U_{\text{вых. ош}}^{\text{сф}}$ определяется выражением

$$U_{\text{вых. ош}}^{\text{сф}} = U_{\text{вх}} K_{U \text{ сф}} = U_{\text{вх}} \frac{K_{U \text{ неинв}}}{K_{\text{ос. сф}}}. \quad (6.24)$$

Разностный усилитель (рис. 6.11) усиливает разность сигналов, приложенных ко входам ОУ. Зная коэффициенты усиления по инвертирующему и неинвертирующему входам, можно получить выражение для выходного напряжения разностного усилителя, используя метод суперпозиции:

$$\begin{aligned} U_{\text{вых}} &= -K_{U \text{ инв}} U_{\text{вх1}} + K_{U \text{ неинв}} U_{\text{вх2}} \frac{R_3}{R_3 + R_2} = \\ &= \frac{-R_{\text{ос}}}{R_1} U_{\text{вх1}} + \frac{R_1 + R_{\text{ос}}}{R_1} \frac{R_3}{R_3 + R_2} U_{\text{вх2}}. \end{aligned}$$

Если $R_2 = R_1$, $R_3 = R_{\text{ос}}$ и $R_3/R_2 = R_{\text{ос}}/R_1 = m$, то

$$U_{\text{вых}} = -m U_{\text{вх1}} + \frac{(m+1)m}{m+1} U_{\text{вх2}} = m(U_{\text{вх2}} - U_{\text{вх1}}). \quad (6.25)$$

В разностном усилителе помехи, попадающие или возникающие на его входах, оказываются синфазными сигналами и не усиливаются, так как схема усиливает только разностный сигнал. Для хорошего подавления синфазных сигналов требуется точный подбор резисторов R_1 , R_2 , R_3 и R_{oc} . Способность усиливать полезный сигнал на фоне сильных синфазных помех позволяет применять разностный усилитель в различных измерительных схемах. Если коэффициенты усиления разностного усилителя по инвертирующему и неинвертирующему входам различаются вследствие разброса номиналов резисторов R_1 , R_2 , R_3 и R_{oc} , то напряжение на выходе схемы не будет точно пропорционально разности входных сигналов, а будет определяться выражением

$$U_{\text{вых}} = -m_{\text{инв}} U_{\text{вх1}} + \frac{(1 + m_{\text{инв}})}{(1 + m_{\text{неинв}})} m_{\text{неинв}} U_{\text{вх2}}. \quad (6.26)$$

В этом случае коэффициент ослабления синфазного сигнала определяется не свойствами самого ОУ, а неточностью установки коэффициента усиления.

Если принять, что коэффициент усиления по инвертирующему входу равен $m_{\text{инв}} = m - \frac{1}{2} \Delta m$, а по неинвертирующему $m_{\text{неинв}} = m + \frac{1}{2} \Delta m$, то для подсчета $K_{\text{ос.сф}}$ можно получить выражение

$$K_{\text{ос.сф}} = (1 + m) \frac{m}{\Delta m}. \quad (6.27)$$

Недостатком разностного усилителя (рис. 6.11) является различное входное сопротивление по инвертирующему и неинвертирующему входам [см. формулы (6.13) и (6.21)], а также трудность регулирования его коэффициента усиления (требуется одновременное изменение двух точно подобранных резисторов).

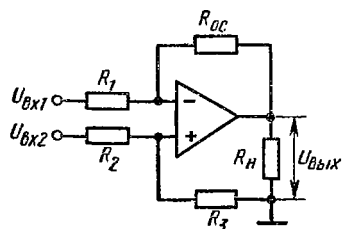


Рис. 6.11

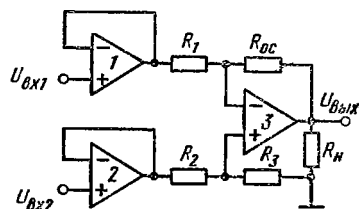


Рис. 6.12

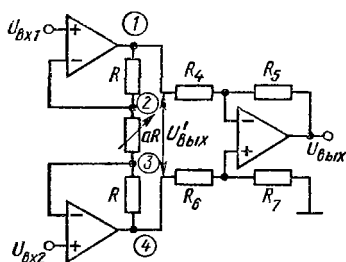


Рис. 6.13

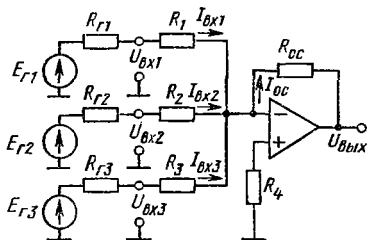


Рис. 6.14

Для устранения различия и увеличения входных сопротивлений применяется схема разностного усилителя, изображенная на рис. 6.12. Здесь на обоих входах усилителя включены повторители на ОУ, обеспечивающие равное и высокое входное сопротивление схемы.

Регулировка усиления при высоком $R_{вх}$ разностного усилителя обеспечивается в схеме на рис. 6.13. Здесь симметричный вход создан двумя неинвертирующими усилителями с регулируемым усилением. Общий коэффициент усиления данной схемы находят по формуле [3, 4]

$$K_{U_{\text{разн}}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}} = \left(1 + \frac{2}{a}\right)m, \quad (6.28)$$

где $m = R_5/R_4 = R_7/R_6$, причем $R_4 = R_6$, $R_5 = R_7$. Коэффициент ослабления синфазного сигнала измерительного усилителя по рис. 6.13 определяется выражением [11]

$$K_{\text{ос.сф}} = \left(1 + \frac{2}{a}\right)(1 + m) \frac{m}{\Delta m}. \quad (6.29)$$

Инвертирующий сумматор. Трехвходовой инвертирующий сумматор с усилением суммируемых сигналов изображен на рис. 6.14.

Для входных токов, потребляемых от датчиков входных сигналов, с учетом того, что точка суммирования имеет нулевой потенциал, справедливы выражения $I_{\text{вх1}} = U_{\text{вх1}}/R_1$; $I_{\text{вх2}} = U_{\text{вх2}}/R_2$; $I_{\text{вх3}} = U_{\text{вх3}}/R_3$. Ток цепи обратной связи равен сумме входных токов, т. е. $I_{\text{ос}} = I_{\text{вх1}} + I_{\text{вх2}} + I_{\text{вх3}}$. Выходное напряжение сумматора

$$U_{\text{вых}} = -I_{\text{ос}}R_{\text{ос}} = -R_{\text{ос}} \left(\frac{U_{\text{вх1}}}{R_1} + \frac{U_{\text{вх2}}}{R_2} + \frac{U_{\text{вх3}}}{R_3} \right). \quad (6.30)$$

Из этого выражения видно, что усиление по каждому входу можно регулировать, меняя сопротивление входной цепи.

Величину резистора R_4 , который включен для снижения токового дрейфа, выбирают из условия $R_4 = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 \parallel R_{oc}$ (при $R_{r1} = R_{r2} = R_{r3} = 0$).

Л о г а р и ф м и р у ю щ и й усилитель (рис. 6.15) позволяет получить выходное напряжение, пропорциональное логарифму входного напряжения. Полярность входного сигнала должна обеспечивать прямое напряжение на диоде в цепи обратной связи.

Используя уравнение ВАХ диода и учитывая, что $U_{\text{диода}} = U_{\text{вых}}$, можно получить

$$U_{\text{вых}} = 2,3\varphi_T \lg \frac{U_{\text{вх}}}{I_0 R} = a \lg(bU_{\text{вх}}), \quad (6.31)$$

где $a = 2,3\varphi_T$, $b = 1/(I_0 R)$. Здесь φ_T — температурный потенциал; I_0 — тепловой ток диода.

Если места включения резистора R и диода в рассматриваемом усилителе поменять, то выходное напряжение будет пропорционально антилогарифму входного сигнала.

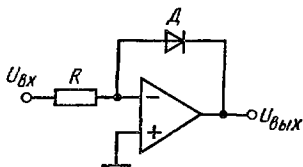


Рис. 6.15

ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ

6.3. Рассчитать нормирующий усилитель на основе ОУ типа К140УД1А с коэффициентом передачи $K_U = 10$, работающий на нагрузку с сопротивлением $R_H = 5$ кОм. Входное сопротивление не менее 10 кОм, выходное сопротивление не более 100 Ом. Усилитель работает от источника сигнала с э. д. с. $E_T = 0,2$ В и внутренним сопротивлением $R_T = 1$ кОм.

Оценить относительную статическую погрешность и дрейф, приведенный ко входу усилителя, если $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ (от 20 до 40°C) и нестабильность источников питания $\pm 10\%$.

Решение

Здесь можно использовать инвертирующее включение ОУ (см. рис. 6.8), поскольку требуемое сопротивление $R_{\text{вх}}$ невелико. Согласно выражению (6.10а), $K_U = K_{U\text{инв}} = -R_{oc}/(R_1 + R_T)$. Требуемая величина $R_{\text{вх}} = R_1 = 10$ кОм, тогда $R_{oc} = K_{U\text{инв}}(R_1 + R_T) = 10 \cdot 11 = 110$ кОм. Такая величина сопротивления R_{oc} не приведет к большой погрешности за счет разностного тока и может считаться приемлемой.

Для уменьшения токовой погрешности выбираем резистор R_2 из выражения (6.15): $R_2 = (R_1 + R_T) \parallel R_{oc} \approx 11$ кОм.