

При положительной полуволне входного напряжения ток выходной цепи ОУ протекает от $E_{ВХ}$ к выходу ОУ: $+E_{ВХ} \rightarrow R_{ВХ} \rightarrow R_{ОС} \rightarrow ЭБ VT_2 \rightarrow ОУ$. Базовый ток VT_2 порождает ток нагрузки: $\perp \rightarrow R_{Н} \rightarrow ЭК VT_2 \rightarrow -E_{К}$ (выходное напряжение отрицательно).

В случае отрицательной полуволны $E_{ВХ}$ направления токов меняются на противоположные.

$I_{ВЫХ}$: $ОУ \rightarrow БЭ VT_1 \rightarrow R_{ОС} \rightarrow R_{ВХ} \rightarrow -E_{ВХ}$.

$I_{Н}$: $+E_{К} \rightarrow КЭ VT_1 \rightarrow R_{Н} \rightarrow \perp$.

Благодаря выходным транзисторам ток нагрузки может превышать максимальный выходной ток ОУ в β раз.

Реальные усилители мощности строятся по более сложным схемам, обеспечивающим смещение транзисторов при отсутствии входного сигнала и предусматривающим одну или несколько местных обратных связей.

При рассмотрении схем настоящего раздела, за редким исключением, предполагалось, что ОУ является идеальным усилителем напряжения. Реальным ОУ присущ ряд ограничений, которые следует учитывать в зависимости от конкретной схемы, содержащей ОУ, параметров входных и выходных сигналов, условий эксплуатации и других факторов.

3. ОГРАНИЧЕНИЯ, ПРИСУЩИЕ РЕАЛЬНЫМ ОПЕРАЦИОННЫМ УСИЛИТЕЛЯМ

До сих пор ОУ рассматривались с большой степенью идеализации. Так, например, при использовании ОУ как усилителя постоянного тока предполагалось, что выходное напряжение равно произведению входного сигнала на коэффициент усиления ОУ с обратной связью. Однако в действительности к этому выходному напряжению добавляется составляющая ошибки, которая вызывается такими параметрами реального ОУ, как:

- входные токи смещения;
- входной ток сдвига;
- входное напряжение сдвига;
- дрейф.

Если идеальное значение выходного напряжения велико по сравнению с составляющей ошибки, можно не принимать во внимание перечисленные параметры. Если составляющая ошибки сравнима с идеальным значением выходного напряжения или превосходит его, необходимо принять меры по минимизации погрешности.

При использовании ОУ в схемах переменного тока ошибка в выходном напряжении по постоянному току исключается благодаря наличию разделительных конденсаторов связи. Однако в этом случае необходимо учитывать другие параметры реального ОУ: полосу пропускания (частотную характеристику) и скорость нарастания выходного напряжения.

В таблице 3.1 показано влияние параметров реального ОУ на точность преобразования сигнала для различных областей применения.

Таблица 3.1

Влияние параметров ОУ на точность преобразования сигнала

Параметр ОУ	Область применения ОУ			
	Усилители пост. тока		Усилители перемен. тока	
	$U_{\text{ВЫХ}}$ мало	$U_{\text{ВЫХ}}$ велико	$U_{\text{ВЫХ}}$ мало	$U_{\text{ВЫХ}}$ велико
Входной ток смещения	СВ	МОВ	НВ	НВ
Ток сдвига	СВ	МОВ	НВ	НВ
Входное напряжение сдвига	СВ	МОВ	НВ	НВ
Дрейф	СВ	НВ	НВ	НВ
Частотная характеристика	НВ	НВ	СВ	СВ
Скорость нарастания	НВ	СВ	НВ	СВ

Сокращения, принятые в таблице:

СВ – сильное влияние; НВ – не оказывает влияния; МОВ – может оказывать влияние.

3.1. Входные токи смещения, входной ток сдвига

Операционные усилители строятся на транзисторах, в том числе и их входные дифференциальные каскады. Для нормальной работы этих транзисторов предусмотрено их смещение, то есть через входные зажимы ОУ (инвертирующий и неинвертирующий) протекают небольшие токи смещения транзисторов, рис. 3.1.

При рассмотрении влияния входных токов смещения их обычно представляют в виде источников тока, включенных последовательно с каждым из входных зажимов, рис. 3.2.

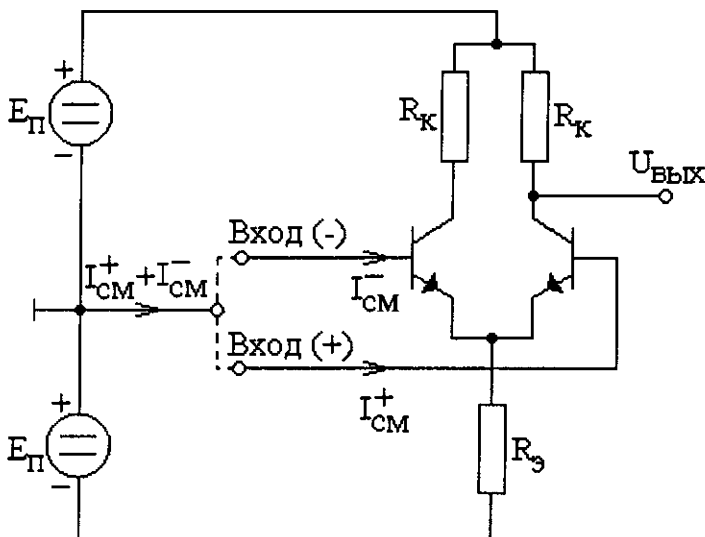


Рис. 3.1. Смещение во входном каскаде ОУ

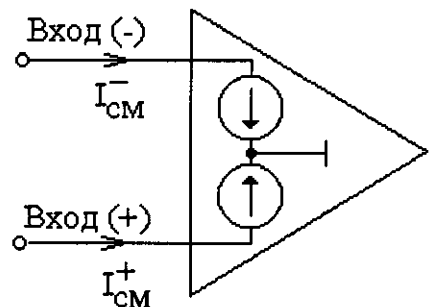


Рис. 3.2. Модель входной цепи для токов смещения

Обычно $I_{CM}^- \neq I_{CM}^+$, поэтому в справочниках дается средний входной ток смещения $I_{CM} = 0,5[|I_{CM}^+| + |I_{CM}^-|]$. Для биполярных транзисторов I_{CM} составляет единицы и более микроампер, для полевых транзисторов I_{CM} — от одного пикоампер и меньше.

Входным током сдвига $I_{ВХ.СДВ}$ называют разность между абсолютными значениями входных токов: $I_{ВХ.СДВ} = |I_{CM}^+| - |I_{CM}^-|$. Обычно $I_{ВХ.СДВ}$ определяют при $U_{ВЫХ} = 0$ и температуре плюс 25°C .

Влияние тока смещения входа (-) на выходное напряжение. В схемах (рис. 3.3) $U_{ВЫХ} \neq 0$ при $E_{ВХ} = 0$.

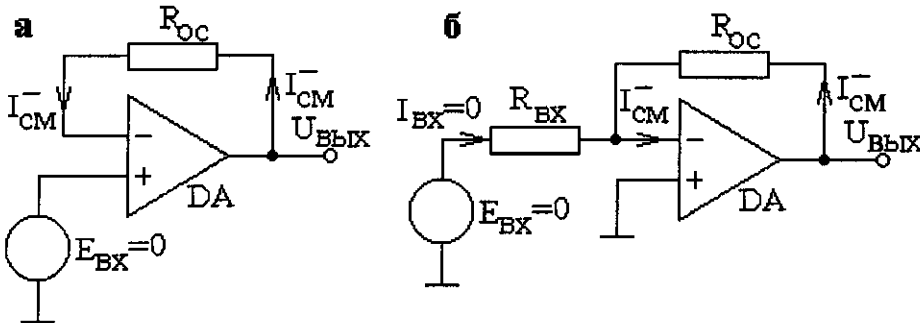


Рис. 3.3. Влияние тока смещения входа (-) на выходное напряжение:

а — подключение $E_{ВХ}$ к входу (+);

б — подключение $E_{ВХ}$ к входу (-)

Ток смещения I_{CM}^- , протекая по резистору R_{OC} , создает на нем падение напряжения $I_{CM}^- R_{OC}$, которое и является выходным напряжением, рис. 3.3,а. Ток смещения I_{CM}^+ протекает по сопротивлению источника входного сигнала с малым сопротивлением и практически не создает на нем падения напряжения. В схеме рис. 3.3,б. $U_{ВЫХ}$ также равно $I_{CM}^- R_{OC}$, так как через резистор $R_{ВХ}$ I_{CM}^- не протекает (на обоих его выводах нулевой потенциал). Очевидно, что влияние тока смещения на $U_{ВЫХ}$ тем заметнее, чем больше сопротивление резистора обратной связи:

$$U_{ВЫХ} = I_{CM}^- \cdot R_{OC} \quad (3.1)$$

При необходимости измерения малых токов смещения усилить влияние I_{CM}^- на выходное напряжение можно, используя дополнительный резистор R' , рис. 3.4,а. Ток I_{CM}^- задает на резисторе R' падение напряжения $I_{CM}^- R'$, которое в свою очередь устанавливает такое же падение напряжения на резисторе $R_{ВХ}$ (правило 1), рис. 3.4,б.

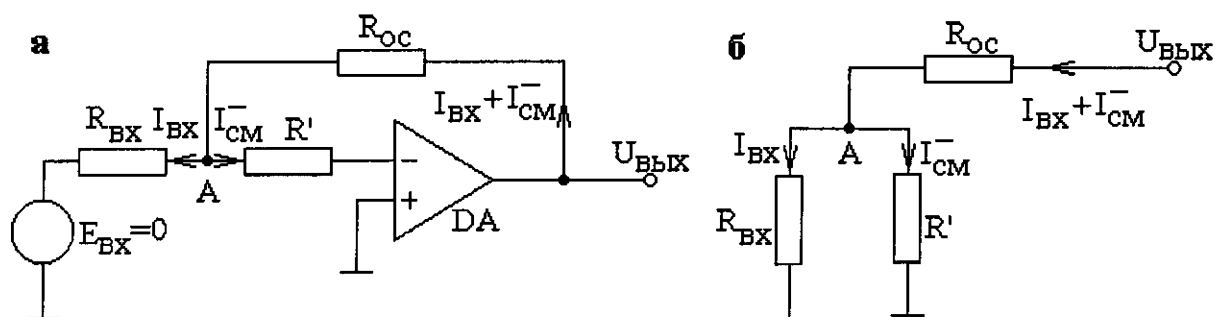


Рис. 3.4. Усиление влияния тока смещения на выходное напряжение:
 а – принципиальная схема;
 б – эквивалентная схема формирования выходного напряжения

Обычно $R' > R_{ВХ}$ и $R_{ОС} \gg R'$. Величина $I_{ВХ} = \frac{I_{СМ}^- \cdot R'}{R_{ВХ}}$ (потенциал точки

А равен $I_{СМ}^- R'$). Выходное напряжение определяется следующим образом:

$$U_{ВЫХ} = (I_{СМ}^- + I_{ВХ}) \cdot R_{ОС} + I_{СМ}^- \cdot R' = \left(1 + \frac{R'}{R_{ВХ}}\right) \cdot I_{СМ}^- \cdot R_{ОС} + I_{СМ}^- \cdot R'.$$

Учитывая, что $R_{ОС} \gg R'$ и $R' > 10R_{ВХ}$, выражение для выходного напряжения можно переписать в следующем виде:

$$U_{ВЫХ} \approx \frac{R'}{R_{ВХ}} \cdot I_{СМ}^- \cdot R_{ОС}.$$

Влияние тока смещения входа (+) на выходное напряжение.

В схеме (рис. 3.5) выходное напряжение отлично от нуля при $E_{ВХ} = 0$, так как через внутреннее сопротивление генератора сигнала $R_{Г}$ протекает входной ток смещения $I_{СМ}^+$.

В результате этого на внутреннем сопротивлении источника входного сигнала падает напряжение $I_{СМ}^+ R_{Г}$, которое согласно правилу 1 является также выходным сигналом:

$$U_{ВЫХ} = I_{СМ}^+ R_{Г}.$$

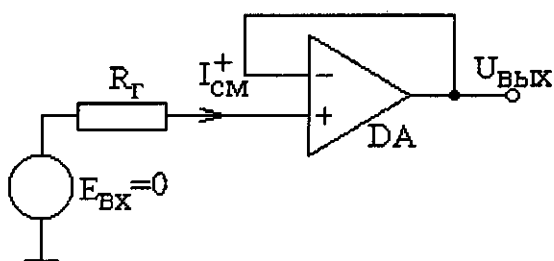


Рис. 3.5. Влияние тока смещения входа (+) на выходное напряжение

Влияние тока сдвига на выходное напряжение. В случае, если $I_{СМ}^- = I_{СМ}^+$, возможна компенсация их влияния на $U_{ВЫХ}$, рис. 3.6. Если $R_{ОС} = R_{Г}$, то на обоих этих резисторах падает одно и то же напряжение $I_{СМ}^+ R_{Г} = I_{СМ}^- R_{ОС}$, рис. 3.6,а. Так как эти напряжения находятся в противофазе (рис. 3.6,б), выходное напряжение равно нулю.

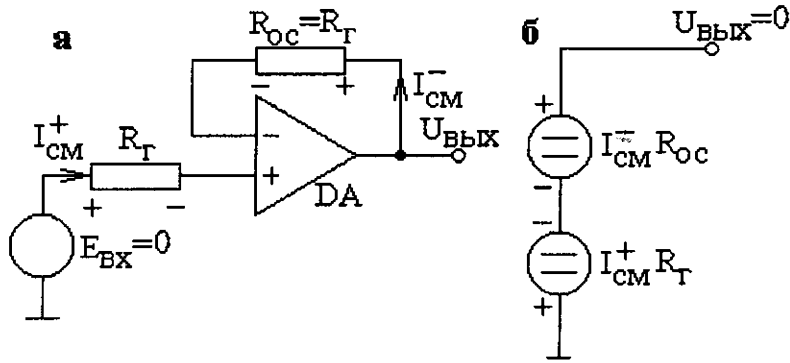


Рис. 3.6. Компенсация влияния токов смещения на выходное напряжение

при $I_{СМ}^- = I_{СМ}^+$:

- а – повторитель напряжения с компенсационным резистором $R_{ОС} = R_T$;
 б – эквивалентная схема формирования выходного напряжения

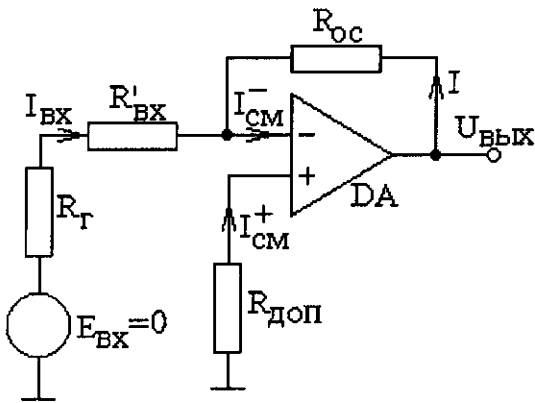


Рис. 3.7. Использование компенсационного резистора в схеме инвертирующего усилителя

У реальных ОУ $I_{СМ}^- \neq I_{СМ}^+$ и $U_{ВЫХ} = (|I_{СМ}^-| - |I_{СМ}^+|) R_{ОС} = R_{ОС} I_{ВХ.СДВ}$. То есть компенсация влияния токов смещения является лишь частичной. Для компенсации влияния токов смещения в схемах инвертирующего или неинвертирующего усилителя включают дополнительный резистор $R_{ДОП}$, рис. 3.7.

Согласно правилу 1 $I_{ВХ} = \frac{I_{СМ}^+ \cdot R_{ДОП}}{R_{ВХ}}$,

где $R_{ВХ} = R'_{ВХ} + R_T$. Через резистор обратной связи протекает ток

$$I = I_{СМ}^- - I_{ВХ} = I_{СМ}^- - \frac{R_{ДОП}}{R_{ВХ}} I_{СМ}^+.$$

Условием компенсации влияния токов смещения на $U_{ВЫХ}$ является равенство:

$$I_{СМ}^+ \cdot R_{ДОП} = I_{СМ}^- \cdot R_{ОС} - \frac{R_{ОС} \cdot R_{ДОП}}{R_{ВХ}} \cdot I_{СМ}^+.$$

Из которого, полагая $I_{СМ}^+ = I_{СМ}^-$, можно получить выражение для расчета компенсационного резистора

$$R_{ДОП} = \frac{R_{ОС} \cdot R_{ВХ}}{R_{ОС} + R_{ВХ}} = R_{ОС} \parallel R_{ВХ}.$$

Определение сопротивления резистора компенсации. Сопротивление резистора $R_{\text{доп}}$ должно быть равно результирующему сопротивлению всех параллельных резистивных ветвей, подключенных ко входу (-). В расчетные соотношения следует также включать внутренние сопротивления всех источников сигналов. Если ко входу (+) подключено более одного резистора, компенсация токов выполняется в соответствии со следующим принципом: сопротивление постоянному току между входом (+) и землей должно быть равно сопротивлению постоянному току между входом (-) и землей. При этом источники сигналов заменяются на их заземленные внутренние сопротивления, а потенциал выхода ОУ полагается равным потенциалу земли.

3.2. Входное напряжение сдвига

Выходное напряжение реального операционного усилителя (РОУ) при отсутствии сигнала на входе может отличаться от нуля вследствие некомпенсированного внутреннего разбаланса, рис. 3.8,а.

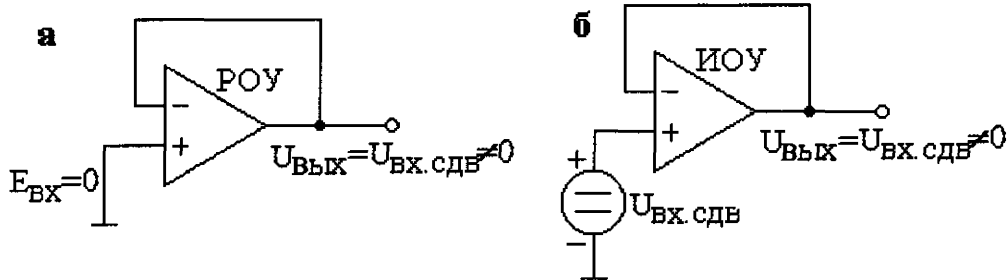


Рис. 3.8. Влияние внутреннего разбаланса ОУ на выходное напряжение:
а – реальный операционный усилитель;
б – идеальный операционный усилитель

В схеме (рис. 3.8,б) суммарный эффект всех внутренних небалансов учитывается подключением ко входу(+) идеального операционного усилителя (ИОУ) источника постоянного напряжения $U_{\text{вх.сдв}}$.

Влияние входного напряжения сдвига на выходное напряжение. Наиболее заметно влияние $U_{\text{вх.сдв}}$ на выходное напряжение при использовании ОУ без обратной связи. В этом случае выходное напряжение усилителя при отсутствии входного сигнала зачастую оказывается равным либо $+U_{\text{нас}}$, либо $-U_{\text{нас}}$, рис. 3.9. В самом деле, $U_{\text{вых}} = kE_{\text{д}} = kU_{\text{вх.сдв}}$, где k – коэффициент усиления ОУ без обратной связи (для ОУ широкого применения $k = 1 \cdot 10^3 \dots 200 \cdot 10^3$).

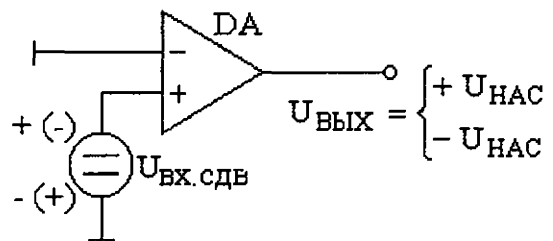


Рис. 3.9. Действие $U_{\text{вх.сдв}}$ в ОУ без обратной связи