

621.375(075)

№ 5101–2

**Объявляется набор в магистратуру  
в 2021г.**

По направлению:  
**12.04.01 Приборостроение**  
Направленность (профиль) программы:  
**(Технологии цифрового города)**

**Все вопросы по почте:  
ankravets@mail.ru**

Кафедра радиоприемных  
устройств и телевидения

**Учебно-методического пособие**  
по курсу  
**Схемотехника аналоговых электронных  
устройств**  
Часть 2

Для студентов всех форм обучения



Таганрог

Издательство Южного федерального университета

2016

УДК 621.375(075.8)+621.382(075.8)  
ББК 32.846.+3285

Кравец А.В. Учебно-методическое пособие по курсу «Схемотехника аналоговых электронных устройств». Часть 2. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 80 с.

В данной работе изложен теоретический материал соответствующий объему 2-го модуля курса «Схемотехника аналоговых электронных устройств».

Соответствует программе курса «Схемотехника аналоговых электронных устройств» для студентов всех форм обучения по направлению «Радиотехника».

Ил. 44. Библиогр.: 10 назв.

Рецензент Лобач В.Т., канд. техн. наук, профессор кафедры РТС ИРСУ ЮФУ.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. Основные сведения .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Основные параметры операционных усилителей ...</b>	<b>9</b>
<b>3. Основные схемы включения операционных усилителей .....</b>	<b>14</b>
3.1. Инвертирующий усилитель .....	15
3.2. Неинвертирующий усилитель .....	18
3.3. Повторитель.....	19
3.4. Разностный усилитель .....	21
<b>4. Сумматоры .....</b>	<b>23</b>
4.1. Инвертирующий сумматор .....	23
4.2. Неинвертирующий сумматор .....	25
<b>5. Логарифмические преобразователи на операционном усилителе.....</b>	<b>27</b>
<b>6. Прецизионные выпрямители на операционных усилителях.....</b>	<b>31</b>
6.1. Однополупериодные выпрямители.....	32
6.2. Двухполупериодные выпрямители.....	34
<b>7. Однополярное питание.....</b>	<b>43</b>
7.1. Основные сведения.....	43

7.2. Смещение операционных усилителей с однополярным питанием.....	47
7.3. Схема включения операционного усилителя для усиления сигналов переменного тока.....	55
7.4. Введение искусственной нулевой точки.....	56
<b>8. Полностью дифференциальный операционный усилитель.....</b>	<b>60</b>
8.1. Основные сведения.....	60
8.2. Преобразование несимметричных сигналов в дифференциальные.....	63
8.3. Новые функции.....	65
8.4. Инструментальные усилители.....	67
8.5. Фильтры на полностью дифференциальных усилителях.....	68
Библиографический список.....	78

# 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Операционный усилитель – это усилитель, разработанный для построения устройств выполняющих различные операции над аналоговыми сигналами в схемах с отрицательной обратной связью (ООС). Обычно под операционным усилителем понимают усилитель постоянного тока (УПТ), имеющий дифференциальный вход, *большой* коэффициент усиления  $K_0$ , *малые* входные токи  $I_{вх}$ , *большое* входное сопротивление  $R_{вх}$ , *очень маленькое* выходное сопротивление  $R_{вых}$ , *малое* смещение нуля  $U_{см}$ . *Большими* и *малыми* считают такие значения, которые можно считать либо бесконечными, либо нулевыми (идеальный операционный усилитель).

Для идеального операционного усилителя:

$$\begin{array}{ll} K_0 = \infty; & R_{вых} = 0; \\ I_{вх} = 0; & f_{гр} = \infty; \\ R_{вх} = \infty; & U_{см} = 0. \end{array}$$

Обычное применение операционного усилителя – построение схем со свойствами, которые зависят главным образом от параметров цепи обратной связи.

Типичная принципиальная электрическая схема операционного усилителя изображена на рис. 1.1.

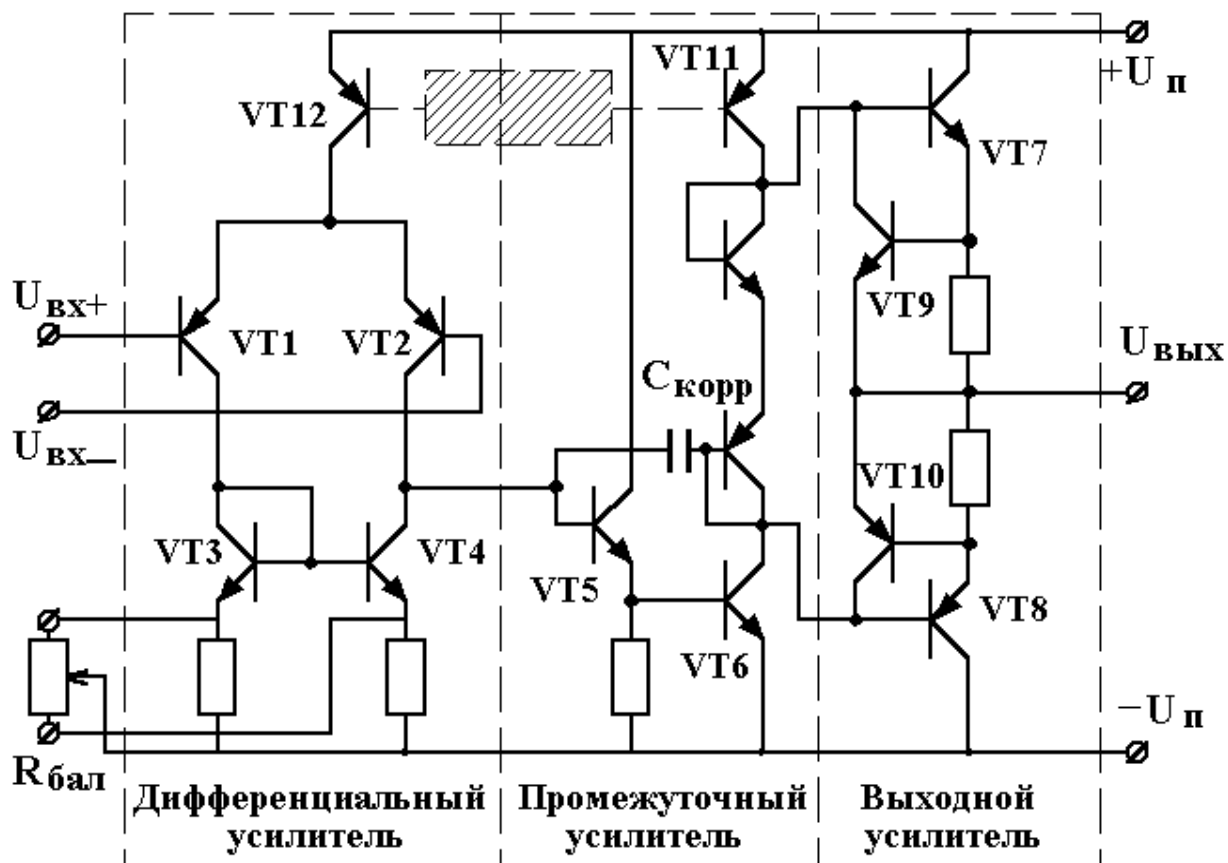


Рис. 1.1. Принципиальная электрическая схема операционного усилителя (часть схемы, закрашенная штриховкой, опущена для упрощения)

Обычно первый каскад операционного усилителя дифференциальный, который определяет входные свойства операционного усилителя. Второй каскад, как правило, имеет высокое входное сопротивление для согласования входного и выходного каскадов и большой коэффициент усиления как по току, так и по напряжению. Выходной каскад служит для согласования с низкоомной нагрузкой, так как имеет малое выходное сопротивление.

Операционные усилители, как правило, запитываются от двухполярных источников питания, имеющих одинаковые по величине положительное и отрицательное напряжение

относительно "земли". Для большинства современных операционных усилителей напряжение питания может меняться в пределах от  $\pm 4$  до  $\pm 22$  В.

Выходное напряжение операционного усилителя определяется простым выражением

$$U_{вых} = K(U_{ВХ+} - U_{ВХ-}), \quad (1.1)$$

где  $K$  – коэффициент усиления операционного усилителя без обратной связи.

Выражение (1.1) часто называют основным уравнением операционного усилителя.

Величина  $K$  для разных типов операционных усилителей изменяется в диапазоне  $10^5 - 10^9$ .

Из-за огромного коэффициента усиления операционный усилитель усиливает шумы и внешние помехи. Поэтому без отрицательной обратной связи операционный усилитель не может работать в линейном режиме. Так как выходное напряжение под влиянием шумов и помех будет быстро достигать максимальных значений и усилитель будет входить в режим насыщения. Коэффициент усиления делают большим главным образом для получения хорошей стабильности параметров при глубокой отрицательной обратной связи.

Условные графические обозначения операционных усилителей приведены на рис. 1.2.

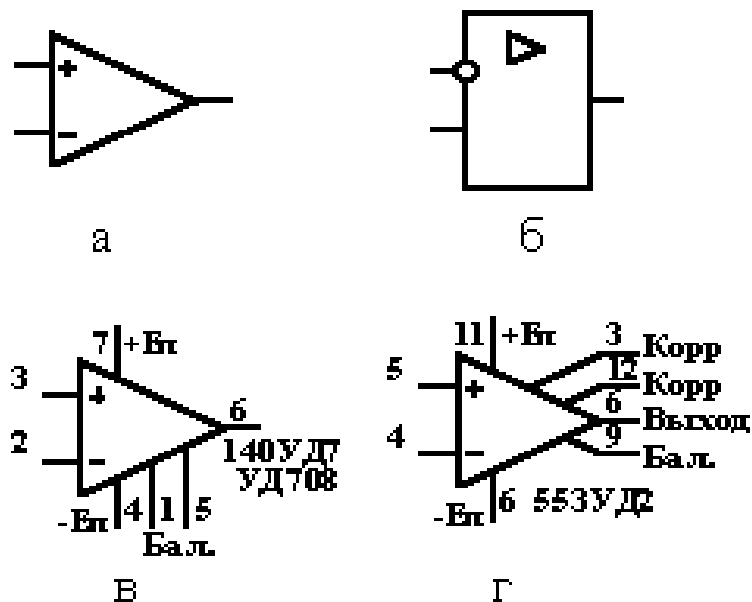


Рис. 1.2. Условные графические обозначения (УГО) операционных усилителей

В настоящее время операционный усилитель на схемах обозначается треугольником с обозначением инвертирующего входа значком "-" и неинвертирующего входа знаком "+" (рис. 1.2,а), что соответствует американскому стандарту условных графических изображений элементов. Этот стандарт получил распространение благодаря многочисленным программам схемотехнического моделирования и широко используется во всем мире. По российскому стандарту условных графических изображений элементов операционный усилитель обозначается прямоугольником. Инвертирующий вход обозначается кружком (рис. 1.2,б). Условные графические обозначения, приведенные на рис. 1.2,а и 1.2,б, используются в функциональных или упрощенных схемах, остальные – в принципиальных схемах.



## 2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

*Коэффициент усиления операционного усилителя (К)* – это отношение значения выходного напряжения к входному напряжению при отсутствии обратной связи.

**К** зависит от частоты и с увеличением частоты уменьшается. Частотная и фазовая характеристики операционных усилителей являются суммой характеристик отдельных каскадов, каждый из которых имеет свою постоянную времени. Суммарная частотная характеристика операционного усилителя часто аппроксимируется диаграммой Боде (рис. 2.1,а). Каждый каскад вносит свой фазовый сдвиг, который может достигать в пределах  $90^\circ$ . Общий фазовый сдвиг зависит от количества каскадов и имеет вид как на рис. 2.1,а. Поскольку на выходе операционного усилителя уже имеется сдвиг фазы  $180^\circ$  относительно инвертирующего входа, на который подается отрицательная обратная связь, то на некоторой частоте суммарный сдвиг фазы достигает  $360^\circ$ . Если на этой частоте величина петлевого усиления  $K\gamma \geq 1$ , где  $\gamma$  – коэффициент ОС, то *отрицательная ОС превращается в положительную*, что приводит к самовозбуждению схемы.

*Статическая передаточная характеристика* – это зависимость выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}$  от входного напряжения  $U_{\text{ВХ}}$ .

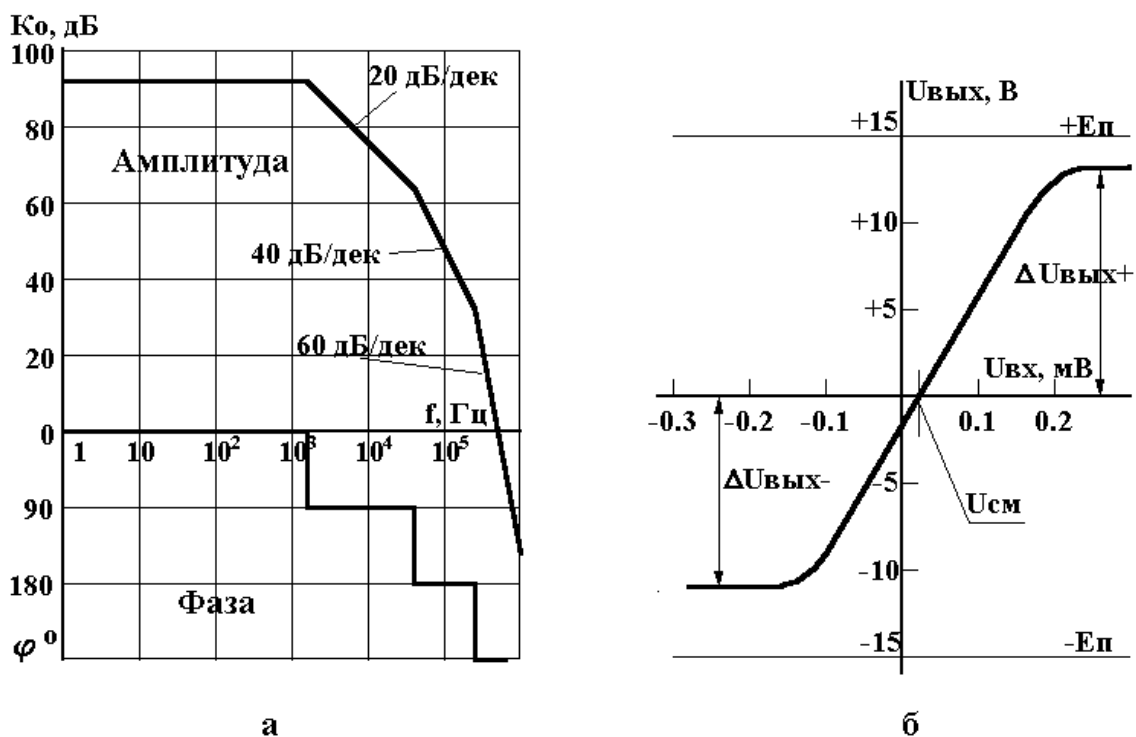


Рис. 2.1. Характеристики операционного усилителя:  
 а – аппроксимированная логарифмическая амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики;  
 б – статическая передаточная характеристика

**Частотная коррекция** позволяет предотвратить самовозбуждение схемы. Как правило, достаточно ввести корректирующий конденсатор, который снижает коэффициент усиления на высоких частотах, приближая функцию операционного усилителя к цепи первого порядка. Частотная коррекция может быть как внутренняя, так и внешняя. В этом случае на обозначении операционного усилителя добавляются два вывода для подключения корректирующего конденсатора.

**Входное сопротивление ( $R_{вх}$ )** определяется как отношение приращения входного напряжения к приращению

входного тока  $\Delta U_{\text{вх}}/\Delta I_{\text{вх}}$ . Типовые значения  $R_{\text{вх}}$  для операционного усилителя с биполярными транзисторами на входах –  $10^4$ – $10^8$  Ом, для операционного усилителя с полевыми транзисторами на входе –  $10^7$ – $10^{12}$  Ом.

**Выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}$  операционного усилителя** – это выходное сопротивление, которое можно определить как отношение напряжения холостого хода к току короткого замыкания  $U_{\text{хх}}/I_{\text{кз}}$ , составляющее для разных операционных усилителей значения –  $10$  –  $10^2$  Ом.

**Входной ток смещения ( $I_{\text{вх}}$ )** – входной ток операционного усилителя, нужный для нормальной работы входных транзисторов. Под  $I_{\text{вх}}$  подразумевают среднее арифметическое двух токов  $I_{\text{вх}+}$  и  $I_{\text{вх}}$ . Входной ток смещения для биполярных входных транзисторов обычно –  $1$  –  $10^3$  нА, входной ток смещения для полевых обычно –  $1$  –  $10^3$  пА.

**Напряжение смещения ( $U_{\text{см}}$ )** определяется как разность напряжений на входах, при которых выходное напряжение становится равным нулю при равных между собой сопротивлениях резисторов, подключаемых к входам. Для операционных усилителей с биполярными транзисторами на входе напряжение смещения определяется разбросом напряжений переходов база-эмиттер входных транзисторов и составляет  $0,1$ – $9$  мВ. Для операционных усилителей с полевыми транзисторами на входе напряжение смещения обычно в несколько раз больше, что объясняется их меньшей крутизной. Если на оба входа операционного усилителя, не охваченного отрицательной обратной связью, подать точно

равные напряжения, например, оба входа заземлить, на выходе скорее всего будет наблюдаться уровень, близкий к одному из питающих напряжений, т.е. операционный усилитель войдет в режим ограничения:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{см}} K_0 \sim 10^{-2} \cdot 10^5 = 1000 \text{ В} \gg E_{\text{пит.}}$$

Для того чтобы при подаче равного напряжения на оба входа усилителя выходное напряжение было близко к нулю, операционный усилитель необходимо сбалансировать. Балансировка операционного усилителя обычно достигается подачей дополнительного тока в цепь коллекторов входного дифференциального каскада с помощью переменного резистора, подключаемого к специальным выводам ( $R_{\text{бал}}$  на рис. 1в).

**Частота единичного усиления ( $f_1$ )** – это частота, на которой модуль коэффициента усиления равен единице.

Характерная зависимость коэффициента усиления от частоты приведена на рис. 2.1,а и 2.2, где логарифмическая амплитудно-частотная характеристика пересекает уровень 0 дБ в точках  $f_1$ .

**Граничная частота ( $f_{\text{гр}}$ )** определяется по уменьшению модуля коэффициент усиления на 3 децибела:

$$|K(f_{\text{гр}})| = 0,707|K(0)|.$$

Область частот  $0 - f_{\text{гр}}$  называют полосой пропускания. При введении отрицательной обратной связи полоса пропускания расширяется (график 2 на рис. 2.2).

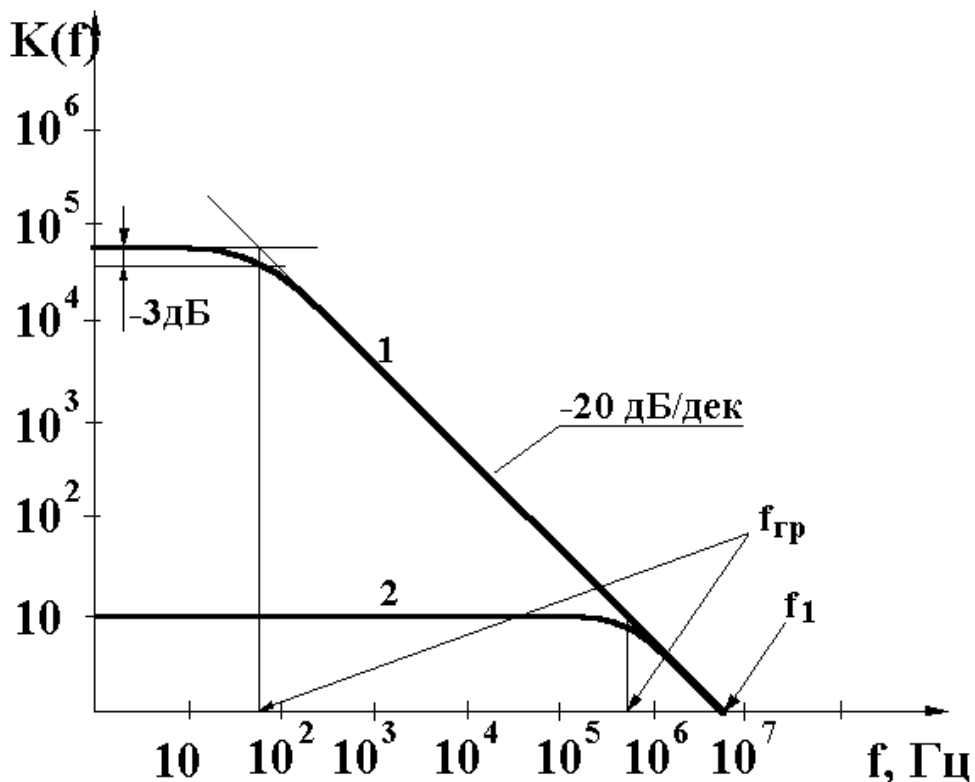


Рис. 2.2. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика

**Скорость нарастания выходного напряжения** определяется как приращение выходного напряжения при импульсном воздействии. Измеряется в В/мкс. Для различных операционных усилителей изменяется в пределах от 0,2 В/мкс для высокоточных операционных усилителей до 200 В/мкс для быстродействующих операционных усилителей.

**Диапазон выходного напряжения ( $\Delta U_{\text{вых}}$ )** – это диапазон значений выходного напряжения, при котором параметры операционного усилителя находятся в гарантированных пределах. Зависит от напряжения питания, у современных операционных усилителей, сделанных по технологии rail-to-rail, практически достигает значений напряжения питания.

**Диапазон синфазных входных напряжений** ( $\Delta U_{\text{вх.сф}}$ ) – это такой диапазон синфазных входных напряжений, в котором параметры операционного усилителя находятся в гарантированных пределах. Зависит от напряжения питания, у современных операционных усилителей, сделанных по технологии rail-to-rail, практически достигает значений напряжения питания.

**Коэффициент ослабления синфазного сигнала** – это отношение синфазного входного напряжения к дифференциальному, вызывающих одно и то же выходное напряжение. Измеряется в децибелах. Для разных операционных усилителей бывает в пределах от 50 до 120 дБ.

**Максимальный выходной ток** ( $I_{\text{вых.мах}}$ ). Для операционных усилителей без защиты от короткого замыкания это предельный выходной ток, который нельзя превышать. Для операционных усилителей, имеющих внутреннюю защиту от короткого замыкания по выходу, это выходной ток в режиме короткого замыкания. Для разных операционных усилителей изменяется в диапазоне 10 – 600 мА.

### **3. ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ**

Как правило, операционные усилители в линейном режиме используются только в схемах с отрицательной обратной связью. Для рассмотрения работы таких схем

необходимо ввести понятие **виртуального нуля**, или **мнимого, заземления**.

### 3.1. Инвертирующий усилитель

Рассмотрим схему инвертирующего усилителя на рис. 3.1.

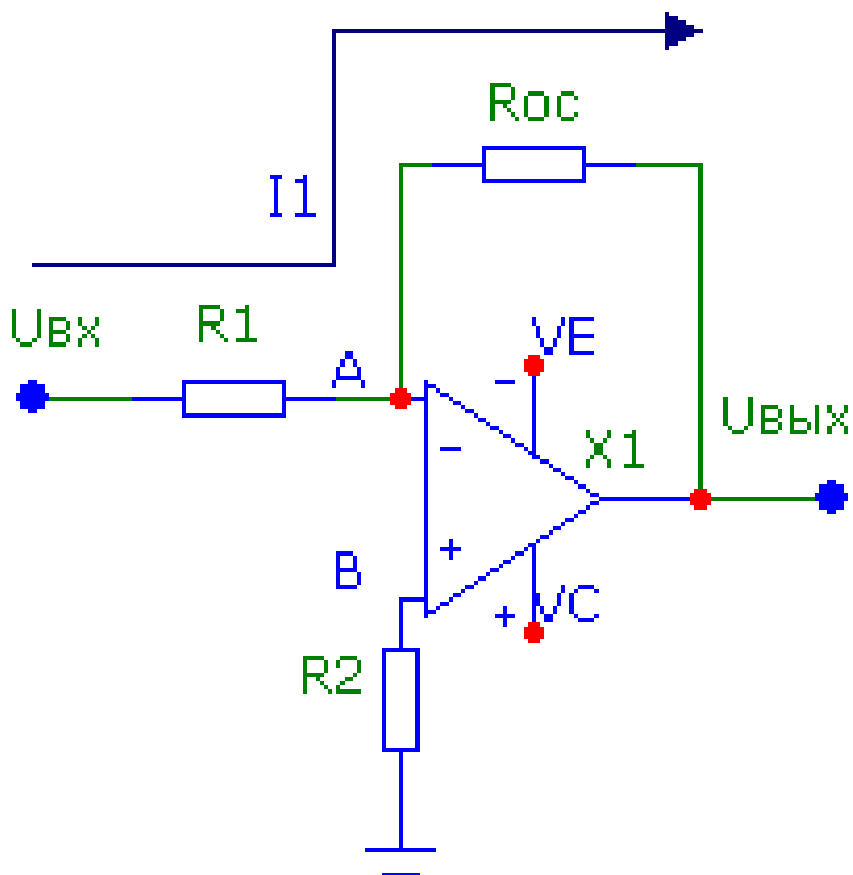


Рис. 3.1. Инвертирующий усилитель

Потенциал на неинвертирующем входе равен нулю, так как этот вход заземлен через  $R_2$ . Так как операционный усилитель работает в линейном режиме, из (1.1) следует:

$$U_B - U_A = \frac{U_{\text{вых}}}{K_0}, \quad (3.1)$$

где  $U_A$  – напряжение на инвертирующем входе;

$U_B$  – напряжение на неинвертирующем входе;

Например, при выходном напряжении, равном 1В, коэффициенте усиления, равном  $10^5$ , получаем напряжение на инвертирующем входе 10 мкВ. Такое напряжение достаточно трудно измерить обычным вольтметром. Соответственно потенциалы на входах операционного усилителя можно с хорошей точностью считать равными. Если один из входов операционного усилителя заземлить, как в нашем случае, на втором входе будет также поддерживаться потенциал, близкий к нулевому, **хотя напрямую входы операционного усилителя гальванически не связаны**. Этот эффект называется *виртуальным* заземлением, или *мнимым нулем*.

Таким образом, напряжение на неинвертирующем входе  $U_B = 0$ , соответственно напряжение на инвертирующем входе  $U_A = 0$ ,

$$U_{\text{вх}} - U_A = U_{\text{вх}}.$$

Все входное напряжение приложено к  $R_1$ :

$$U_{\text{вых}} - U_A = U_{\text{вых}},$$

все выходное напряжение приложено к  $R_{\text{ос}}$ .

Поскольку входной ток операционного усилителя очень мал ( $I_{\text{вх}} \ll I_1$ ), им можно пренебречь, тогда получим:



$$I_1 = -\frac{U_{ВЫХ}}{R_{OC}} = \frac{U_{ВХ}}{R_1}.$$

Это означает, что для инвертирующего усилителя

$$K_U = -\frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = -\frac{R_{OC}}{R_1}. \quad (3.2)$$

Для уменьшения влияния токов смещения на балансировку операционного усилителя неинвертирующий вход заземляется через резистор, равный эквивалентному соединению всех резисторов, подключенных к инвертирующему входу операционного усилителя. Для данной схемы параллельному соединению всех резисторов

$$R_2 = R_1 || R_{oc}.$$

*Входное сопротивление* этой схемы равно сопротивлению резистора  $R_1$ , так как все входное напряжение приложено к этому резистору по причине мнимого заземления.

*Выходное сопротивление*  $R_{ВЫХ.OC}$  примерно равно нулю, так как

$$R_{ВЫХ OC} = \frac{R_{ВЫХ}}{1 + K_{Uoy} \cdot \gamma} \rightarrow 0, \quad (3.3)$$

где  $\gamma = \frac{R_1}{R_{OC}}$ .

При  $R_{ВЫХ} = 100 \text{ Ом}$ ,  $K_0 = 10^5$ ,  $\gamma = 0,1$   $R_{ВЫХ.OC} = 10^{-2} \text{ Ом}$  – это меньше чем сопротивление медных дорожек на печатной плате!

При заданной ЭДС источника сигнала  $E_r$  с внутренним сопротивлением  $R_r$  формула примет вид

$$K_U = -\frac{U_{ВЫХ}}{E_{Г}} = -\frac{R_{OC}}{R_1 + R_{Г}}. \quad (3.4)$$

Выходной ток операционного усилителя, протекающий через резисторы  $R_H$  и  $R_{OC}$ , включенные параллельно относительно выхода операционного усилителя, равен

$$I_{ВЫХ} = I_H + I_{OC} = \frac{U_{ВЫХ}}{R_H} + \frac{U_{ВЫХ}}{R_{OC}}. \quad (3.5)$$

Значение выходного тока операционного усилителя не должно превышать предельно допустимых значений.

### 3.2. Неинвертирующий усилитель

Если подать сигнал на неинвертирующий вход, а  $R_1$  заземлить, как показано на рис. 3.2, можно получить неинвертирующий усилитель.

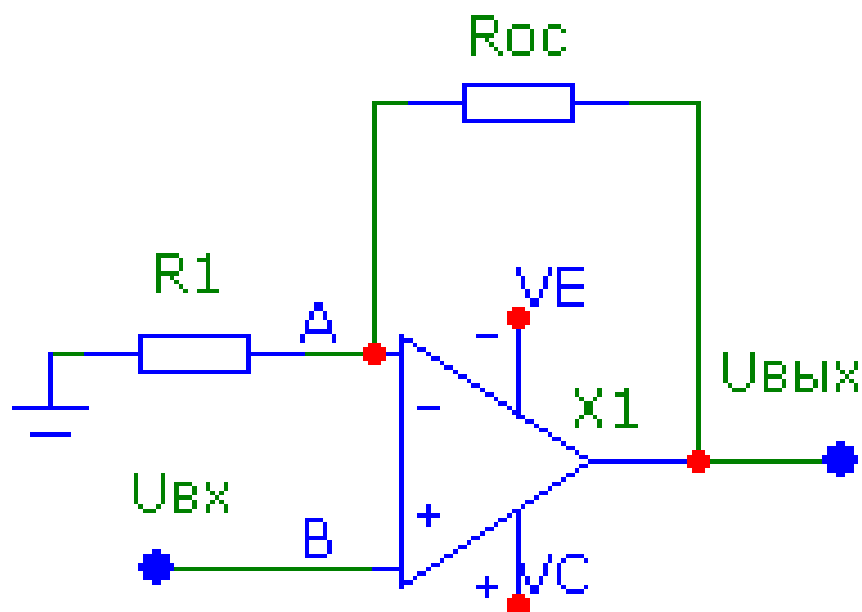


Рис. 3.2. Неинвертирующий усилитель

Напряжение обратной связи снимается с делителя:

$$U_A = U_{\text{вых}} \frac{R_1}{R_1 + R_{OC}}. \quad (3.6)$$

Так как  $U_A = U_{\text{вх}}$ , коэффициент усиления равен

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{K_{UOY}}{1 + K_{UOY} \cdot \gamma} \approx \frac{1}{\gamma} = \frac{R_1 + R_{OC}}{R_1} = 1 + \frac{R_{OC}}{R_1}. \quad (3.7)$$

*Входное сопротивление схемы*

$$R_{\text{вх.OC}} = R_{\text{вх}}(1 + \gamma K_U), \quad (3.8)$$

где  $\gamma = \frac{R_1}{R_{OC} + R_1}$ ,

как обычно входное сопротивление увеличивается при последовательной отрицательной обратной связи.

*Выходное сопротивление стремится к нулю*

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_{\text{ВЫХ.oy}}}{1 + K_{Uoy} \cdot \gamma} \rightarrow 0. \quad (3.9)$$

### 3.3. Повторитель

Если в схеме на рис. 3.2 принять  $R_1 = \infty$  и  $R_{OC} = 0$ , то  $K_{OC} = 1$  и  $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}}$ .

Таким образом, получаем повторитель (рис. 3.3).

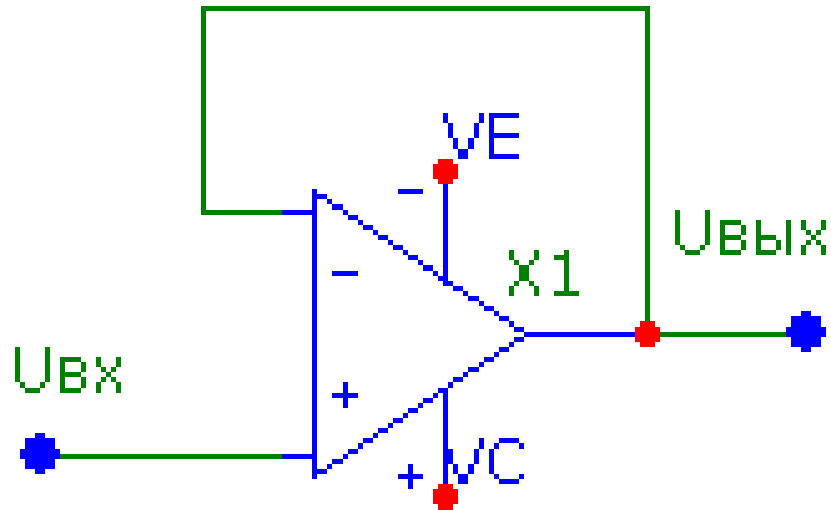


Рис. 3.3. Схема повторителя на операционном усилителе

Для схемы повторителя с коэффициентом усиления, равным единице, глубина (фактор) обратной связи  $F = 1 + K_{OY}$  и выражение для входного сопротивления:

$$R_{вх\ повт} = R_{вх\ OY} (1 + K_{OY}), \quad (3.10)$$

выходного сопротивления:

$$R_{вых\ повт} = \frac{R_{вых\ OY}}{1 + K_{OY}}. \quad (3.11)$$

Входное сопротивление повторителя получается очень высоким, порядка  $10^{12}$  Ом, однако на практике столь большие значения  $R_{вх}$  не достигаются из-за утечек и синфазного входного сопротивления операционного усилителя (сопротивления между входами операционного усилителя и землей).

### 3.4. Разностный усилитель

Разностный усилитель (рис. 3.4) усиливает разность сигналов, приложенных к входам операционного усилителя.

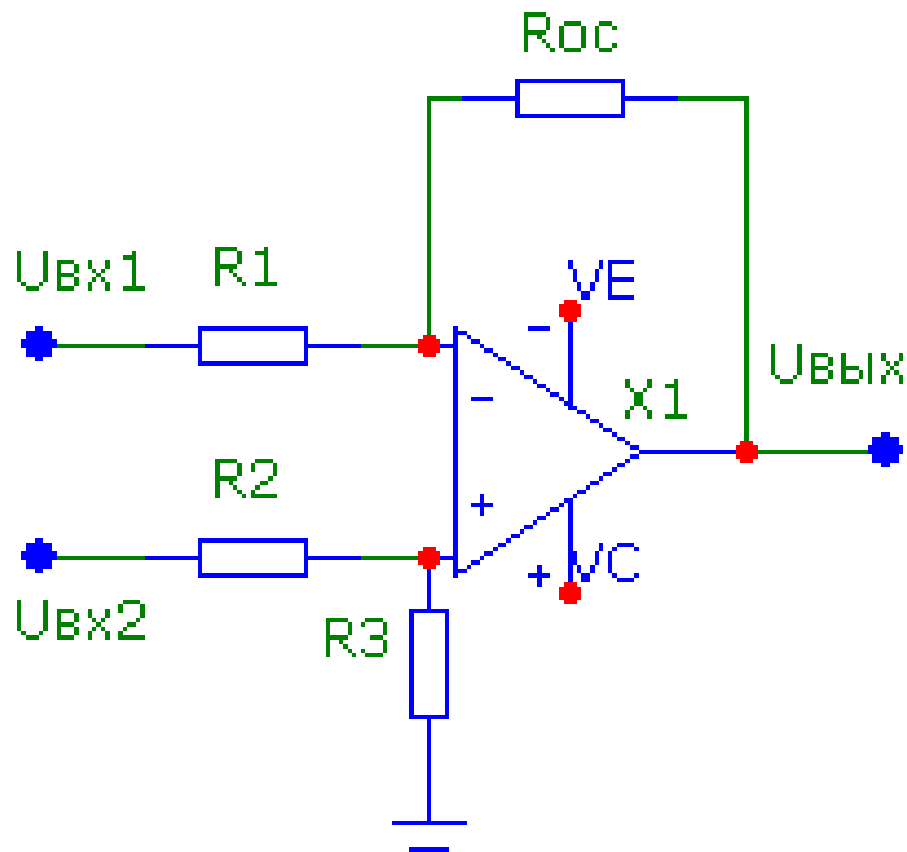


Рис. 3.4. Схема разностного усилителя

Зная формулы для коэффициентов усиления по инвертирующему и неинвертирующему входам, можно получить выражение для выходного напряжения разностного усилителя, используя метод суперпозиции:

$$\begin{aligned}
U_{\text{вых}} &= -K_{\text{инв}} U_{\text{вх1}} + K_{\text{неинвер}} U_{\text{вх2}} \frac{R_3}{R_3 + R_2} = \\
&= \frac{-R_{\text{ос}}}{R_1} U_{\text{вх1}} + \frac{R_1 + R_{\text{ос}}}{R_1} \frac{R_3}{R_3 + R_2} U_{\text{вх2}}.
\end{aligned} \tag{3.12}$$

Если

$$R_2 = R_1, \quad R_3 = R_{\text{ос}}, \quad R_3 / R_2 = R_{\text{ос}} / R_1 = m,$$

то

$$U_{\text{вых}} = -m U_{\text{вх1}} + U_{\text{вх2}} \frac{(m+1)m}{m+1} = m(U_{\text{вх2}} - U_{\text{вх1}}). \tag{3.13}$$

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  $R_{\text{ос}}$ . Способность усиливать полезный сигнал на фоне сильных синфазных помех позволяет применять разностный усилитель в различных измерительных схемах.

Недостатком разностного усилителя (рис. 3.4) является различное входное сопротивление по инвертирующему и неинвертирующему входам, а также трудность регулирования его коэффициента усиления (требуется одновременное изменение двух точно подобранных резисторов).

Для устранения различия и увеличения входных сопротивлений применяется схема разностного усилителя, изображенная на рис. 3.5.

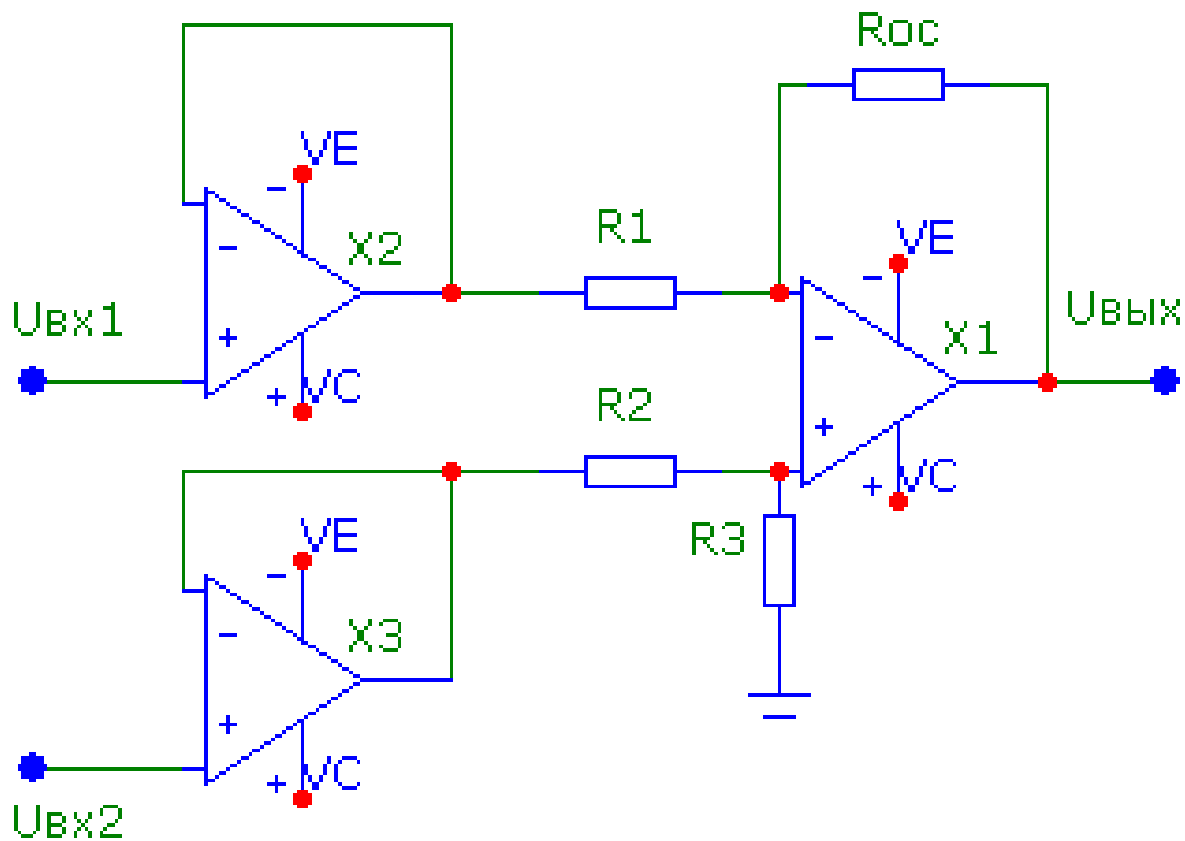


Рис. 3.5. Разностный усилитель с повторителями

Здесь на обоих входах усилителя включены повторители на операционных усилителях, обеспечивающие равное и высокое входное сопротивление схемы.

## 4. СУММАТОРЫ

### 4.1. Инвертирующий сумматор

Благодаря малому потенциалу операционного усилителя на инвертирующем входе его можно использовать в качестве суммирующего усилителя (рис. 4.1). Из данного рисунка видно, что здесь каждый из входов схемы оказывается

разделенным друг от друга низким потенциалом операционного усилителя на инвертирующем входе.

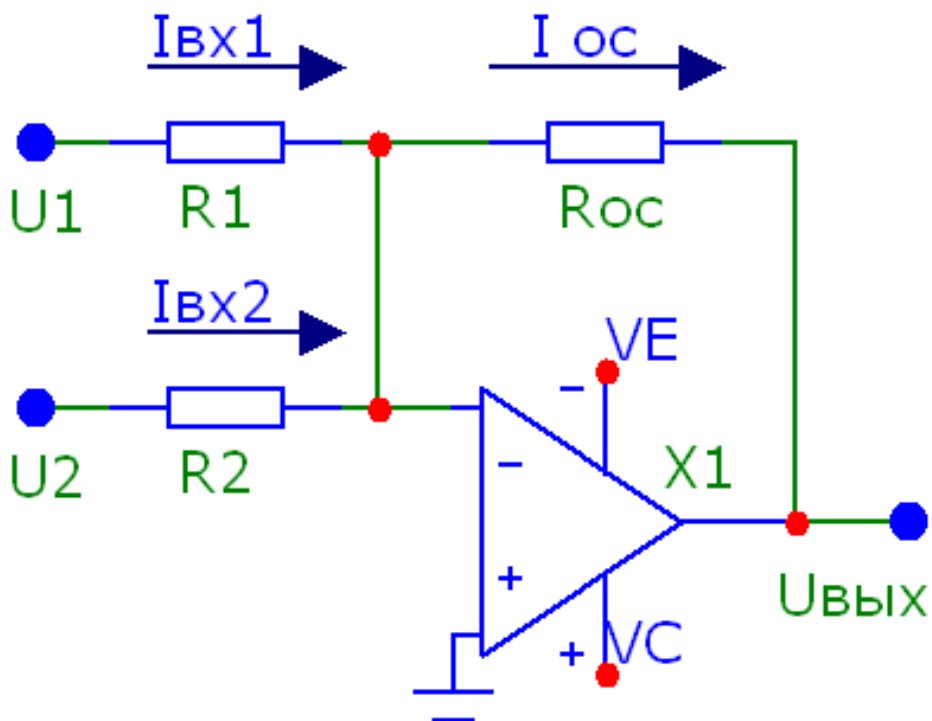


Рис. 4.1. Инвертирующий сумматор на операционном усилителе

Ток в каждом из резисторов на входе определяется только приложенным к нему напряжением и не зависит от тока в других резисторах:

$$I_{ос} = I_{вх1} + I_{вх2}, \quad (4.1)$$

учитывая

$$I_{вх1} = \frac{U_1}{R_1}, \quad I_{вх2} = \frac{U_2}{R_2}, \quad I_{ос} = \frac{U_{вых}}{R_{ос}}.$$



Поэтому входные сигналы независимо друг от друга вызывают на выходе появление напряжения, величина которого пропорциональна отношению  $R_{oc}/R$ . При одновременном действии нескольких сигналов на входе

$$U_{вых} = - \left( U_1 \frac{R_{oc}}{R_1} + U_2 \frac{R_{oc}}{R_2} + \dots + U_n \frac{R_{oc}}{R_n} \right), \quad (4.2)$$

где  $\frac{R_{oc}}{R_1}$ ;  $\frac{R_{oc}}{R_2}$  – коэффициенты суммирования (усиления).

Если  $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$ , то

$$U_{вых} = - \left( \frac{R_{oc}}{R} \right) (U_1 + U_2 + \dots + U_n), \quad (4.3)$$

где отношение  $R_{oc}/R$  имеет смысл коэффициента усиления.

При  $R_{oc}=R$  напряжение будет равно

$$U_{вых} = -(U_1 + U_2 + \dots + U_n). \quad (4.4)$$

## 4.2. Неинвертирующий сумматор

В ряде случаев необходимо произвести простое суммирование, при котором выходное напряжение равно сумме входных напряжений без инверсии. Пусть надо получить  $U_{вых}=U_1+U_2$ . Очевидно, что в этом случае сигналы необходимо подать на прямой вход (рис. 4.2).

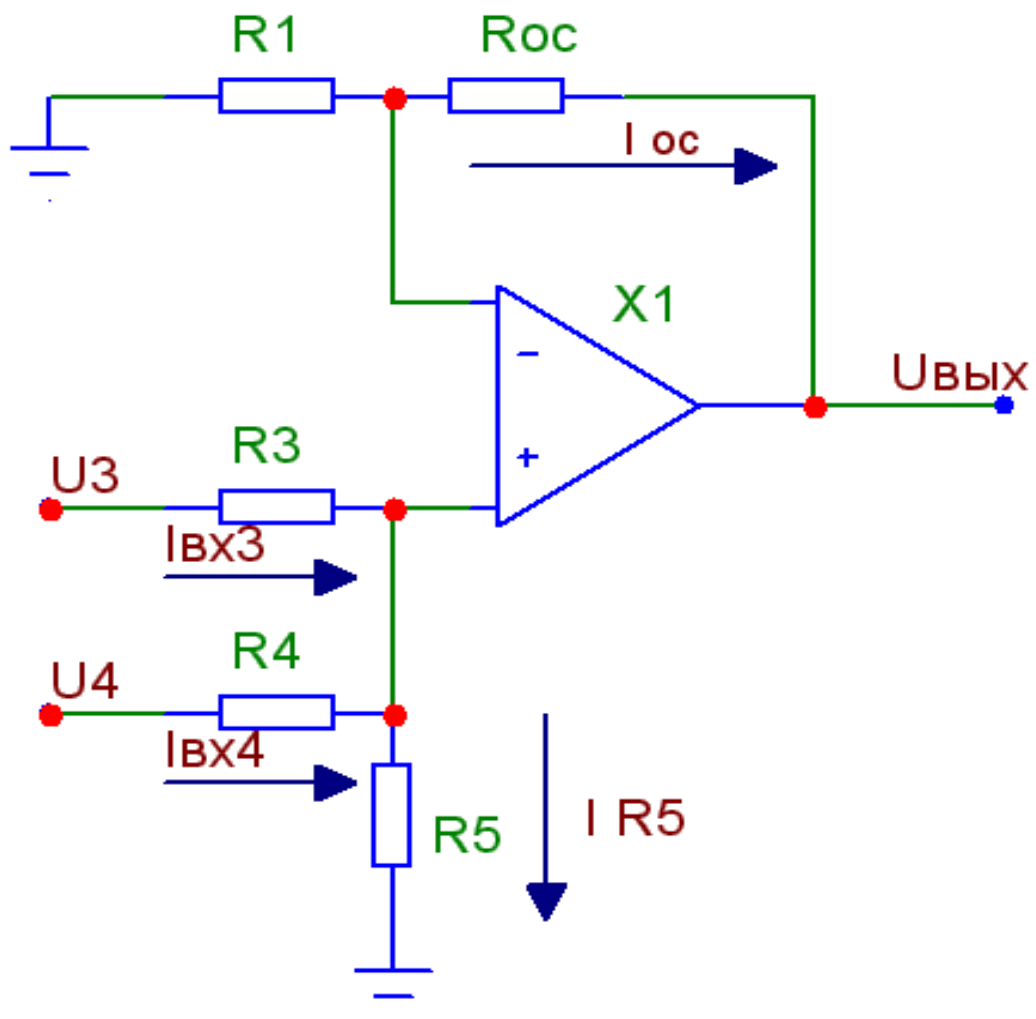


Рис. 4.2. Неинвертирующий сумматор на операционном усилителе

Коэффициенты усиления по каждому из входов находятся по формулам как произведение коэффициента усиления неинвертирующего усилителя и коэффициента передачи делителя по соответствующему входу:

$$K_3 = K_{yc} \cdot K_{\partial 3},$$

$$K_4 = K_{yc} \cdot K_{\partial 4}.$$

Для произвольного номера входа:

$$K_m = K_{yc} \cdot K_{\partial m}, \quad (4.5)$$

где коэффициент усиления неинвертирующего усилителя:

$$K_{yc} = 1 + \frac{R_{OC}}{R_1}. \quad (4.6)$$

Коэффициент передачи делителя по соответствующему входу:

$$K_{\partial m} = \frac{R_5}{R_m + R_5}. \quad (4.7)$$

Выражение для  $U_{\text{вых}}$  будет равно

$$U_{\text{вых}} = (U_3 K_3 + U_4 K_4 + \dots + U_m K_m). \quad (4.8)$$

Для развязки входов между собой и более точного выполнения операции сложения необходимо выполнение следующего условия:

$$R_5 \ll R_3 \parallel R_4 \parallel \dots \parallel R_m.$$

При выполнении этого условия коэффициент передачи делителей очень мал, что требует большого коэффициента усиления усилителя. Получается, что мы сначала сильно ослабляем сигнал, а потом усиливаем. Это может добавить шумов и помех в сигнал. Поэтому целесообразно использовать инвертирующий сумматор (свободный от этого недостатка), а затем инвертировать сигнал при помощи инвертора или инвертирующего усилителя.

## **5. ЛОГАРИФМИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ОПЕРАЦИОННОМ УСИЛИТЕЛЕ**

Логарифмический преобразователь на операционном усилителе представляет собой электронное устройство, в

котором выходное напряжение пропорционально логарифму входного сигнала. Для получения логарифмической зависимости напряжения на выходе операционного усилителя от напряжения на его входе необходимо в цепь обратной связи операционного усилителя включить элемент с логарифмической характеристикой. Таким элементом может быть полупроводниковый диод (рис. 5.1) или биполярный транзистор в диодном включении (рис. 5.2).

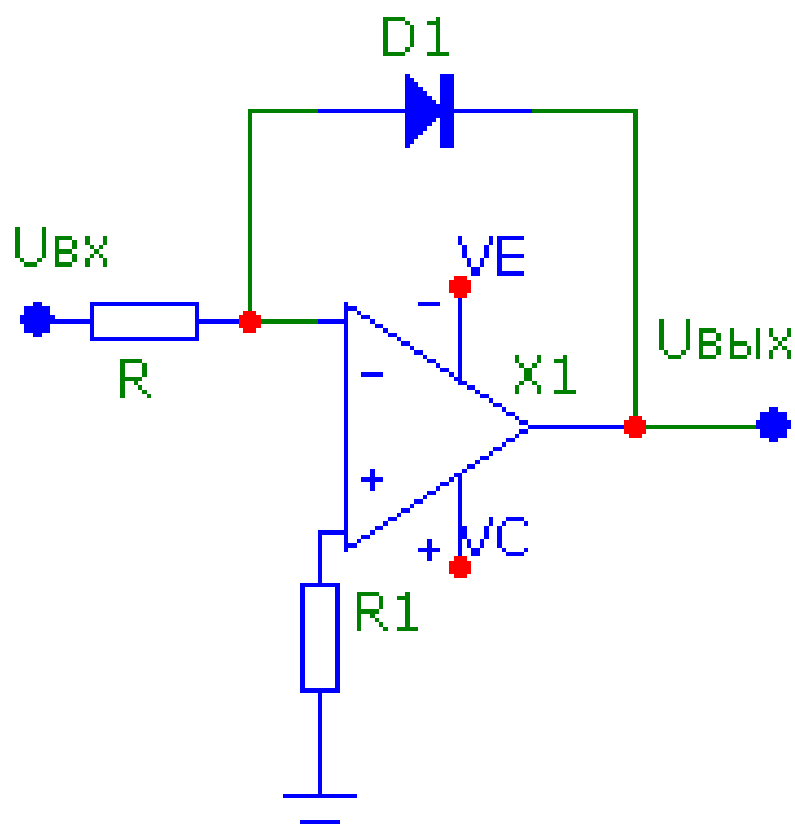


Рис. 5.1. Логарифмический усилитель с диодом в цепи обратной связи

Из теории полупроводников известно, что ток, протекающий через полупроводниковый диод, равен

$$I_{\partial} = I_0 \left( e^{\frac{U_{\partial}}{m\varphi_T}} - 1 \right), \quad (5.1)$$

где  $I_0$  – статический обратный ток,  $1 < m < 2$  – корректирующий множитель.

В рабочей области, где выполняется условие  $I_{\partial} \gg I_0$ , можно считать с достаточной точностью

$$I_{\partial} = I_0 e^{\frac{U_{\partial}}{m\varphi_T}},$$

$$U_{\partial} = m \varphi_T \ln(I_{\partial}/I_0). \quad (5.2)$$

Выражение (5.2) и является искомой логарифмической функцией. При этом для схемы на рис. 5.1 имеем

$$U_{\text{вых}} = -m \cdot \varphi_T \cdot \ln\left(\frac{U_{\text{вх}}}{R_1 I_0}\right) = m \varphi_T \left( \ln \frac{U_{\text{вх}}}{R_1} - \ln I_0 \right). \quad (5.3)$$

Выходное напряжение определяется прямым падением напряжения на диоде. Диапазон возможных рабочих токов ограничен двумя специфическими свойствами диодов – их омическим сопротивлением, на котором при большом токе падает значительное напряжение, приводящее к искажению логарифмической характеристики, а также зависимостью множителя  $m$  от тока. Поэтому удовлетворительная точность может быть получена при изменении входного тока в пределах двух декад.

Влияние множителя  $m$  можно исключить, применив вместо диода транзистор (рис. 5.2). Для коллекторного тока транзистора (при  $U_{кб} = 0$ ) справедливо соотношение

$$I_{\kappa} = \alpha \cdot I_{\varepsilon 0} \cdot \left( e^{U_{бэ} / m \varphi_T} - 1 \right). \quad (5.4)$$

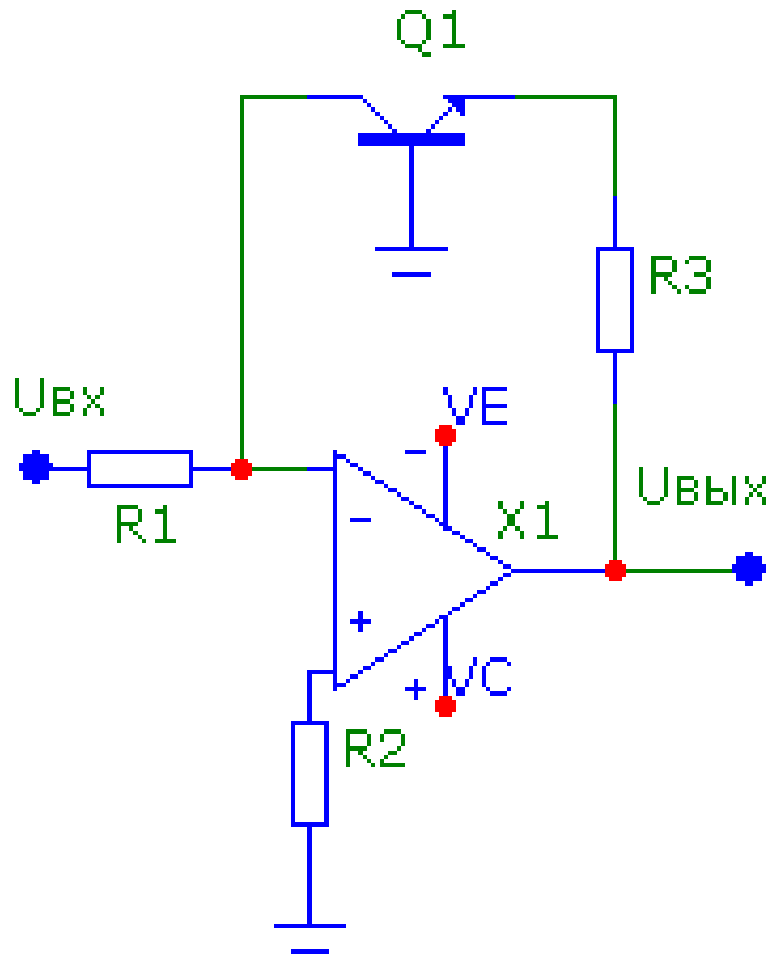


Рис. 5.2. Логарифмический усилитель с транзистором в цепи обратной связи

Зависимости  $\alpha$  и  $m$  от тока взаимно компенсируется.

Тогда

$$I_{\kappa} = \alpha \cdot I_{\varepsilon 0} \cdot e^{U_{бэ} / \varphi_T}; \quad U_{бэ} \approx \varphi_T \ln(I_{\kappa} / I_{\varepsilon 0}). \quad (5.5)$$

Выходное напряжение логарифмического усилителя

$$U_{\text{вых}} = -\varphi_T \ln\left(\frac{U_{\text{вх}}}{R_1 I_{\text{э0}}}\right) \quad (5.6)$$

не зависит от  $m$ , а его изменение диапазона рабочих токов при хорошо подобранных транзисторах может достигать восьми декад.

Рассмотренные схемы не содержат устройств температурной компенсации или коррекции для устранения влияния теплового тока  $I_0$  и температурного потенциала  $\varphi_T$ , что существенно ухудшает их работу.

## **6. ПРЕЦИЗИОННЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ**

В некоторых устройствах обработки аналоговых сигналов необходимо выделение либо составляющих только одной полярности (однополупериодное выпрямление), либо определение абсолютного значения сигнала (двухполупериодное выпрямление). Эти операции могут быть реализованы на пассивных диодно-резистивных цепях, но относительно большое прямое падение напряжения на диодах (0,3 – 0,8В) и нелинейность их вольт-амперной характеристики вносят в этом случае значительные погрешности, особенно при обработке слабых сигналов. Применение операционных усилителей позволяет в значительной степени ослабить влияние реальных характеристик диодов.

## 6.1. Однополупериодные выпрямители

Схемы однополупериодных выпрямителей рис. 6.1 отличаются друг от друга значением выходного напряжения – только положительным или только отрицательным и знаком коэффициента передачи – отрицательным (инвертирующие) и положительным (неинвертирующие).

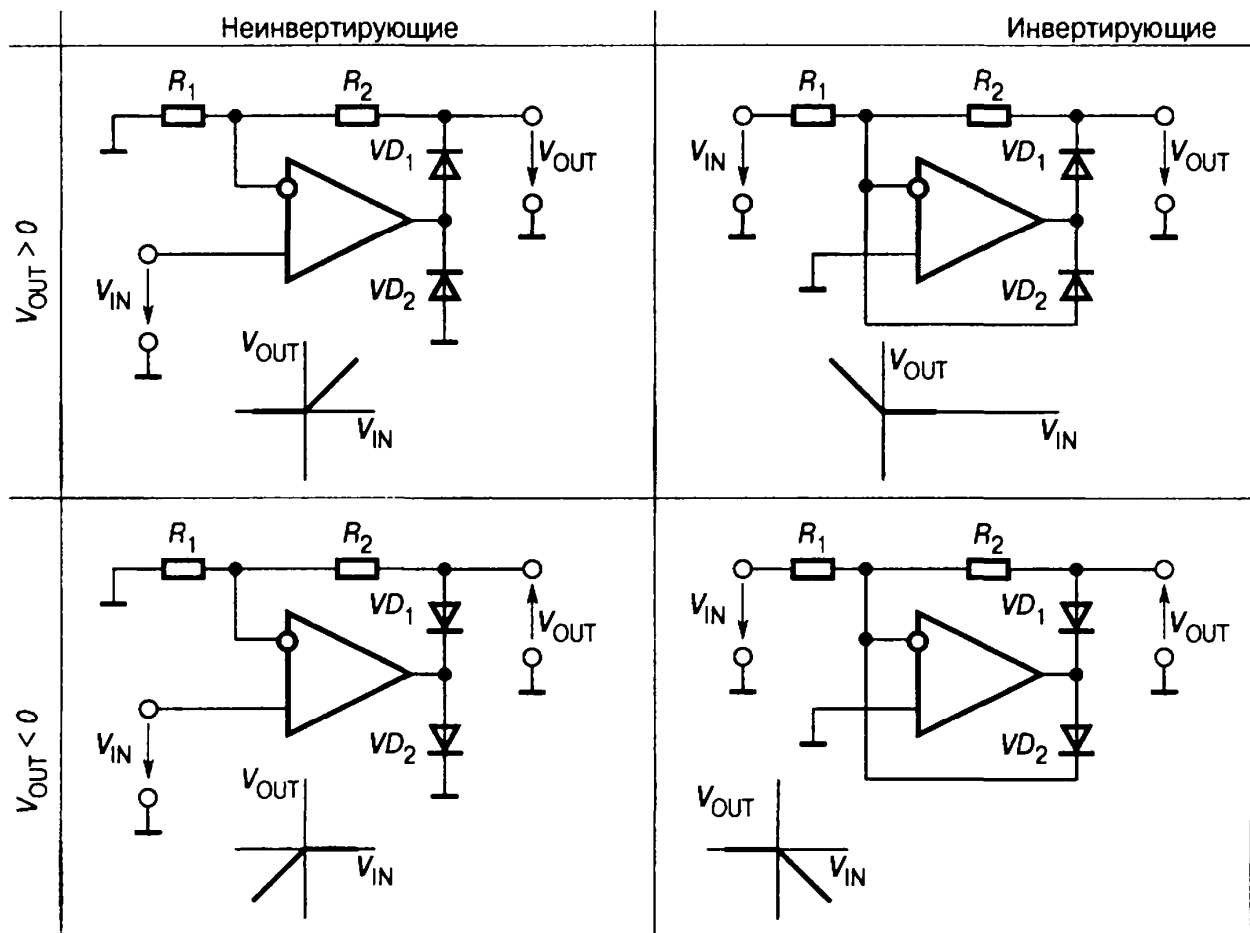


Рис. 6.1. Варианты схем однополупериодных выпрямителей

Неинвертирующие однополупериодные выпрямители имеют высокое входное сопротивление, аналогичное входному сопротивлению неинвертирующего усилителя.



Инвертирующие однополупериодные выпрямители имеют входное сопротивление, равное сопротивлению резистора  $R_1$ . В инвертирующем выпрямителе диод  $D_1$  открывается при отрицательном напряжении входного сигнала, обеспечивая передачу инвертированного сигнала на выход с коэффициентом, определяемым отношением резисторов  $R_1$  и  $R_2$ . Диод  $D_2$  смещен при этом в обратном направлении. В неинвертирующем выпрямителе диод  $D_1$  открывается при положительном напряжении входного сигнала, обеспечивая передачу неинвертированного сигнала на выход с коэффициентом, определяемым отношением резисторов  $R_1$  и  $R_2$ . Диод  $D_2$  смещен при этом в обратном направлении.

Во всех представленных выпрямителях диод  $D_2$  введен для повышения их быстродействия. Введение диода  $D_2$  предотвращает насыщение операционного усилителя и ограничивает перепад его выходного напряжения при смене полярности входного сигнала. В неинвертирующей схеме диод  $D_2$  обеспечивает ограничение выходного напряжения операционного усилителя путем замыкания его выхода на землю, поэтому для этой схемы следует выбирать операционный усилитель, допускающий короткое замыкание на выходе в течение неограниченного времени.

Недостатком представленных схем является их выходное сопротивление, имеющее нелинейный характер.

## 6.2. Двухполупериодные выпрямители

Простейшей схемой прецизионного двухполупериодного выпрямителя является схема с незаземленной нагрузкой (рис. 6.2). Такие выпрямители часто используют с стрелочным миллиамперметром.

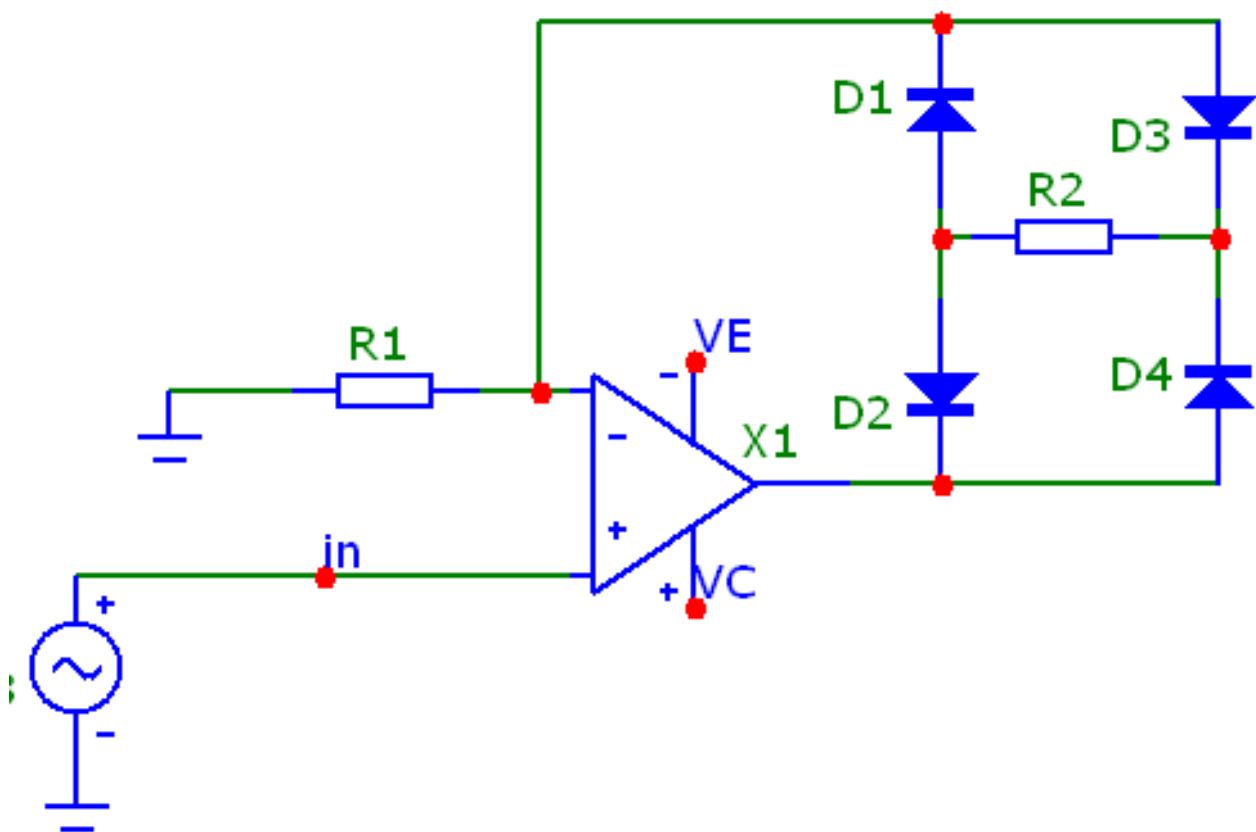


Рис. 6.2. Двухполупериодный выпрямитель с незаземленной нагрузкой

Здесь операционный усилитель служит в качестве управляемого по напряжению источника тока. Поэтому выходной ток не зависит от падения напряжения на диодах и сопротивления нагрузки R2.

Мостовая схема выпрямляет обе полуволны входного

сигнала, при этом выпрямленный ток протекает через нагрузку:

$$I_{OUT} = \frac{|U_{BX}|}{R}. \quad (6.1)$$

Эта схема не требует согласования резисторов и имеет высокое входное сопротивление.

Схемы двухполупериодного выпрямителя с заземленной нагрузкой на операционном усилителе в дифференциальном включении приведены на рис. 6.3 и 6.4. Одинаковые обозначения резисторов означают равенство их номиналов.

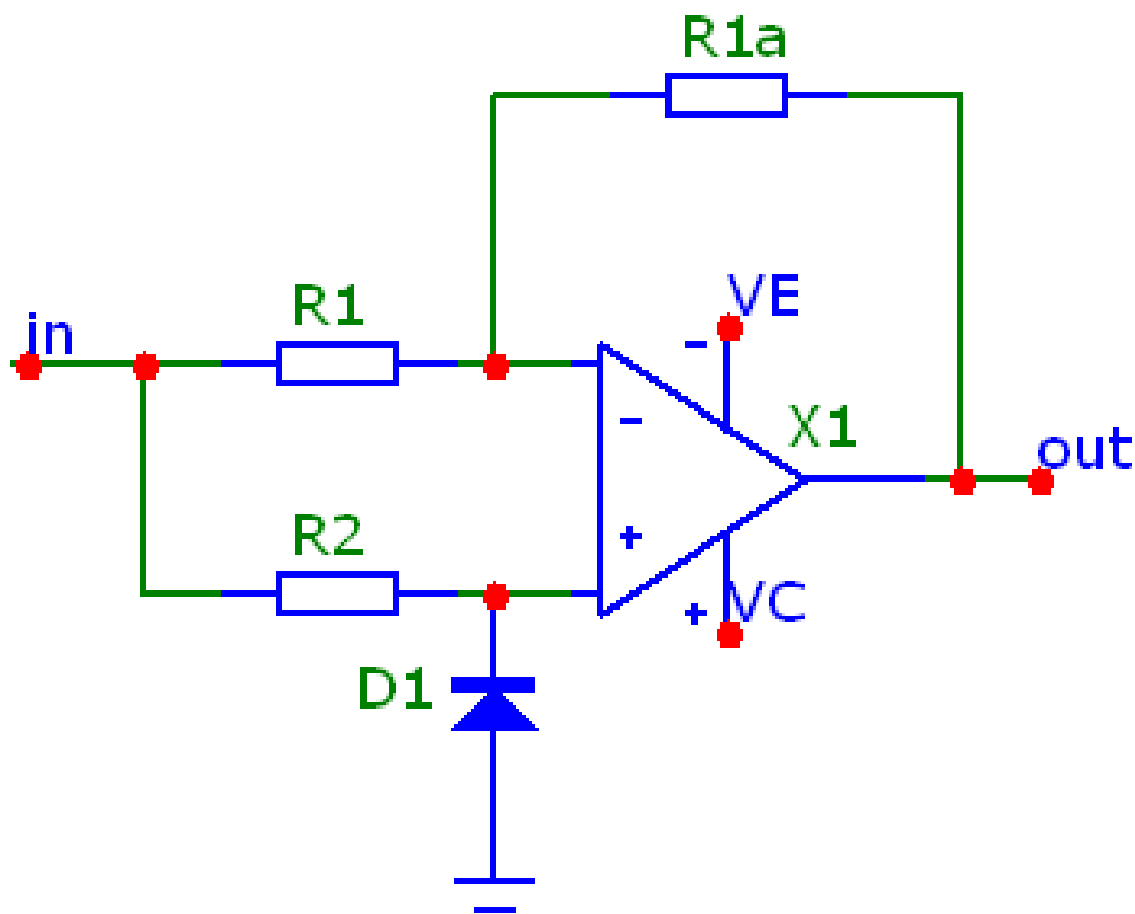


Рис. 6.3. Двухполупериодный выпрямитель с заземленным диодом (простая схема)

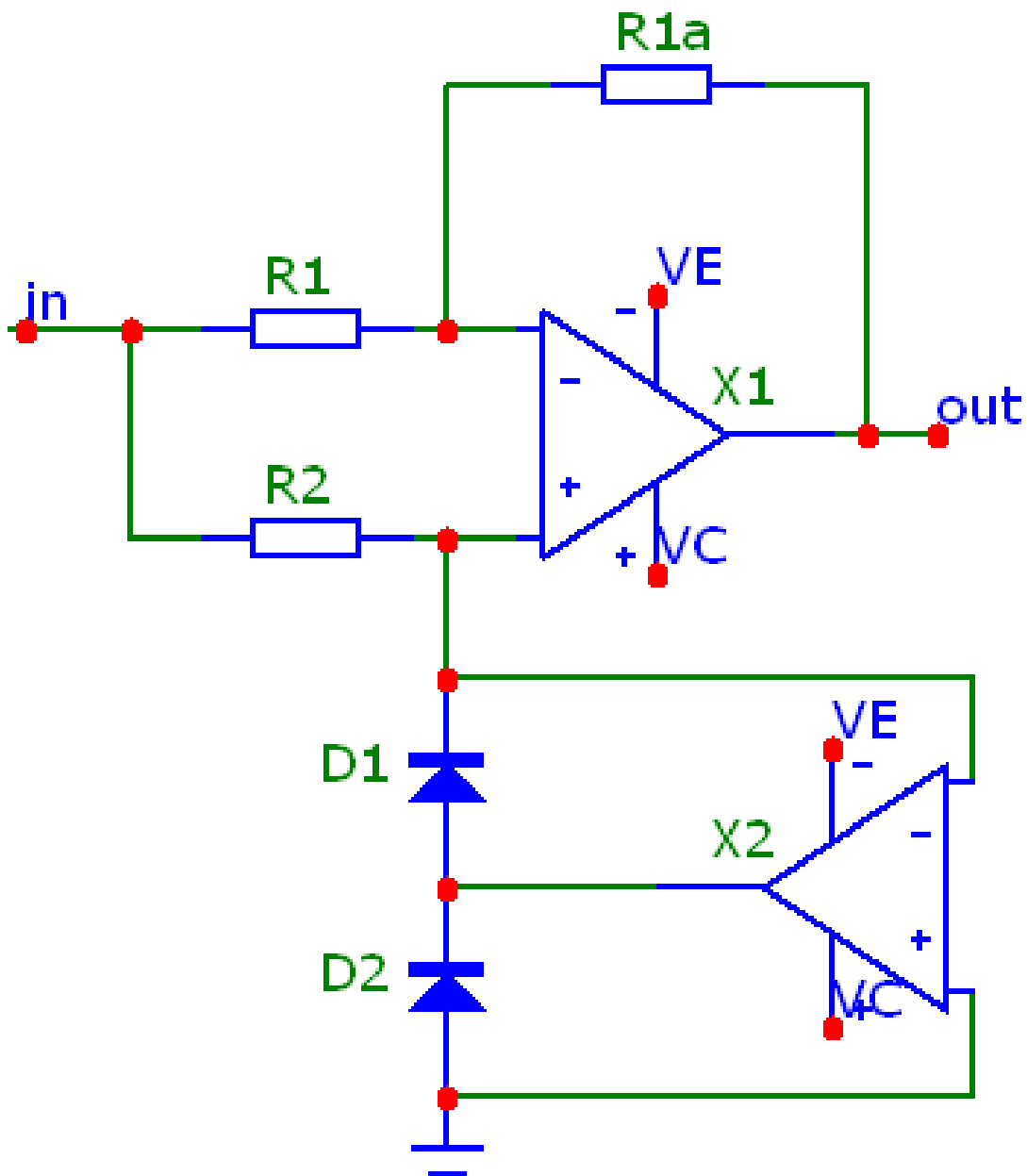


Рис. 6.4. Двухполупериодный выпрямитель с заземленным диодом (схема повышенной точности)

Простейшая из них (рис. 6.3) работает следующим образом. Положительное значение входного напряжения запирает диод, в результате чего схема работает в режиме неинвертирующего усилителя с единичным коэффициентом передачи. Отрицательное значение входного напряжения открывает диод. Схема работает в режиме инвертирующего

усилителя с единичным коэффициентом и  $U_{\text{вых}} = -U_{\text{вх}}$ . Но из-за конечного значения прямого напряжения на диоде последнее равенство выполняется с большой погрешностью.

Точность можно повысить, если в схеме на рис. 6.3 заменить диод D1 моделью идеального диода на операционном усилителе X2 (рис. 6.4). Здесь при положительном значении напряжения входного сигнала выходное напряжение операционного усилителя X2 будет отрицательным, в результате чего диод D1 закроется, а D2 откроется. Выход операционного усилителя X2 будет соединен с общей точкой практически накоротко и цепь обратной связи усилителя разомкнута. Операционный усилитель X1 работает в режиме неинвертирующего повторителя. При отрицательном значении напряжения входного сигнала диод D1 открыт, а диод D2 закрыт. Цепь обратной связи операционного усилителя X2 замкнута через открытый диод D1, поэтому напряжение между входами операционного усилителя X2, а стало быть, и на неинвертирующем входе операционного усилителя X1 близко к нулю. Тогда операционный усилитель X1 работает в режиме инвертирующего повторителя.

Обе схемы имеют разное входное сопротивление для положительных и отрицательных значений напряжений входных сигналов и требует согласования резисторов R1. Операционный усилитель X2 должен допускать короткое замыкание выхода и большое дифференциальное напряжение. Более хорошие характеристики имеет схема,

приведенная на рис. 6.5, обеспечивается одинаковое входное сопротивление для положительного и отрицательного значений входного напряжения. Одинаковые обозначения резисторов означают равенство их номиналов.

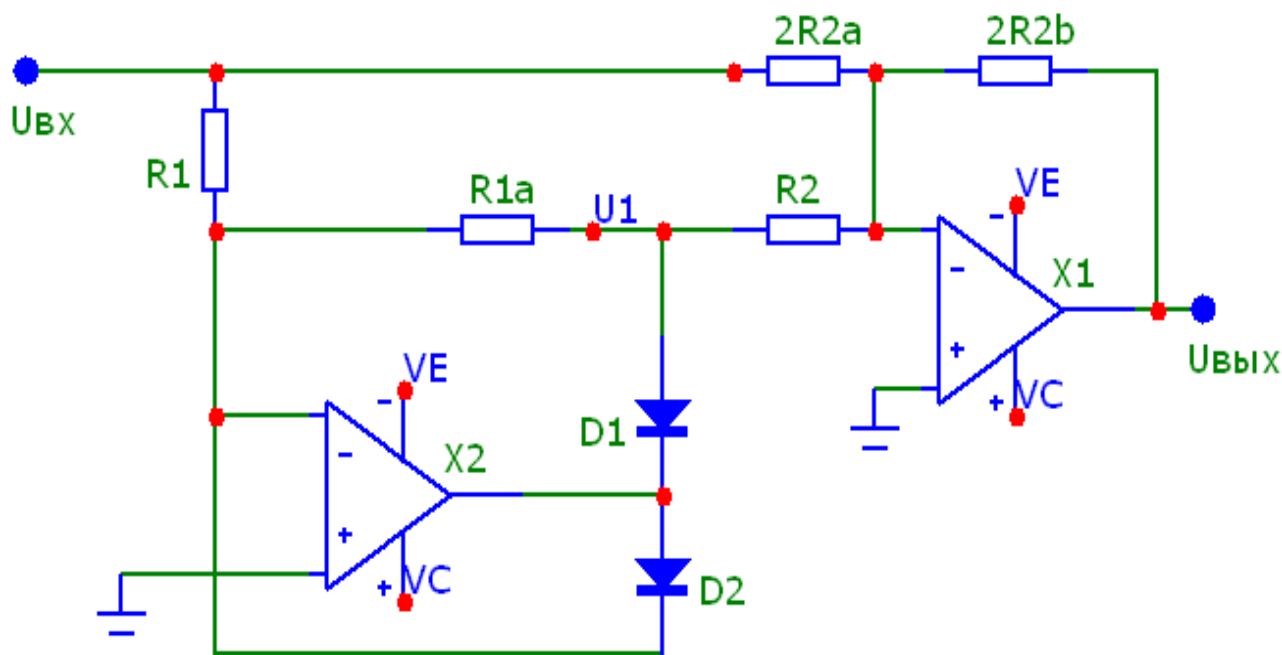


Рис. 6.5. Улучшенная схема двухполупериодного выпрямителя

Схема состоит из сумматора на операционном усилителе X2 и однополупериодного выпрямителя на операционном усилителе X1 (см. левую нижнюю схему на рис. 6.5).

Прежде всего рассмотрим режимы работы операционного усилителя X1. При положительном входном напряжении он работает как инвертирующий усилитель. В этом случае диод D1 открыт, а D2 закрыт, поэтому выходное напряжение операционного усилителя X1 равно инвертированному входному. При отрицательном входном

напряжении диод D1 закрыт, а D2 проводит и замыкает цепь отрицательной обратной связи усилителя, которая препятствует насыщению операционного усилителя X1. Поскольку диод D1 закрыт, напряжение  $U_1$  также равно нулю. Справедливы соотношения:

$$U_1 = \begin{cases} -U_{ВХ} & \text{при } U \geq 0, \\ 0 & \text{при } U \leq 0. \end{cases} \quad (6.2)$$

Подключение сумматора на операционном усилителе X2 обеспечивает двухполупериодное выпрямление. Сумматор формирует напряжение

$$U_{ВЫХ} = -(U_{ВХ} + 2U_1). \quad (6.3)$$

Учитывая формулу (6.2), получаем:

$$U_1 = \begin{cases} -U_{ВХ} & \text{при } U \geq 0, \\ U_{ВХ} & \text{при } U \leq 0. \end{cases} \quad (6.4)$$

Это и есть искомая функция двухполупериодного выпрямителя.

Достоинством рассмотренной схемы является равное входное сопротивление для разных полярностей входного сигнала и отсутствие синфазного напряжения на входах усилителей. Недостаток – необходимость согласовывать большее число резисторов (5 шт.), по сравнению со схемой на рис. 6.3.

Достоинства двух последних устройств объединяет прецизионный выпрямитель, схема которого приведена на рис. 6.6. Одинаковые обозначения резисторов означают равенство их номиналов.

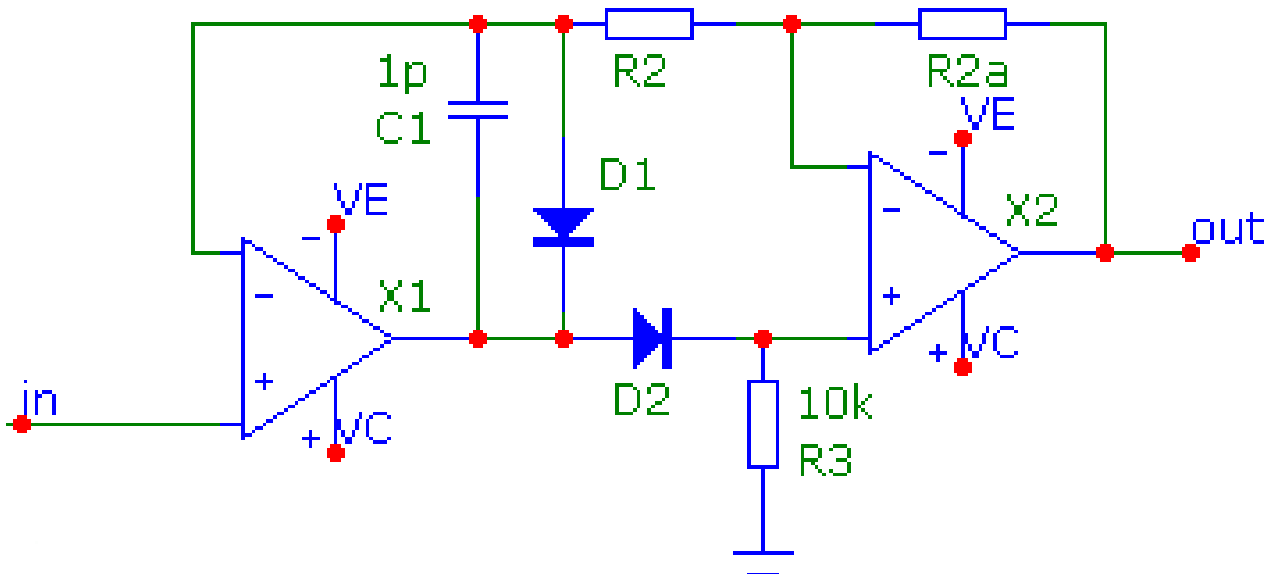


Рис. 6.6. Прецизионный выпрямитель с общей обратной связью

Рассмотрим работу схемы при  $R2 = R2a$ , полагая операционные усилители идеальными.

При  $U_{вх} < 0$  диод  $D1$  открыт, а диод  $D2$  закрыт. Как следствие, потенциалы входов операционного усилителя  $X2$  равны нулю, а напряжение на инвертирующем входе операционного усилителя  $X2$  совпадает с входным. В таком случае операционный усилитель  $X2$  работает как инвертирующий повторитель и  $U_{вых} = -U_{вх}$ , т.е. положительно. Если  $U_{вх} > 0$ , то диод  $D1$  закрыт, а диод  $D2$  открыт. Ток через резистор  $R1$ , а следовательно, и через  $R2$  равен нулю, поэтому выходное напряжение схемы  $U_{вых}$  совпадает с потенциалом инвертирующего входа операционного усилителя  $X1$  и, соответственно, равно входному напряжению. Это можно представить в виде



$$U_{ВЫХ} = \begin{cases} -U_{ВХ} & \text{при } U \leq 0, \\ U_{ВХ} & \text{при } U \geq 0. \end{cases} \quad (6.5)$$

Поскольку при  $U_{вх} > 0$  усилители соединяются каскадно в петле обратной связи, причем операционный усилитель X1 не имеет собственной ОС, необходимо принять меры для обеспечения устойчивости. С этой целью включают конденсатор  $C_k$  емкостью 10 – 100 пФ. Особые требования предъявляются к диоду D2 в отношении минимума обратных токов. Действительно, типовое значение обратного тока у обычных кремниевых импульсных диодов составляет величину порядка 1 мкА. Такой ток создает на резисторе R3 сопротивлением 2 кОм (меньше брать не следует, чтобы не перегружать операционный усилитель X1) напряжение 2 мВ, что очень много для прецизионной схемы. Выпускаются специальные диоды с пониженным обратным током (например, 1D101 имеет  $I_{обр} = 10$  пА). В качестве диода D2 можно также использовать переход затвор – канал полевых транзисторов с управляющим р-п переходом, для которых ток утечки обычно менее 1 нА.

Очень простотая схема двухполупериодного прецизионного выпрямителя представлена на рис. 6.7. Одинаковые обозначения резисторов означают равенство их номиналов.

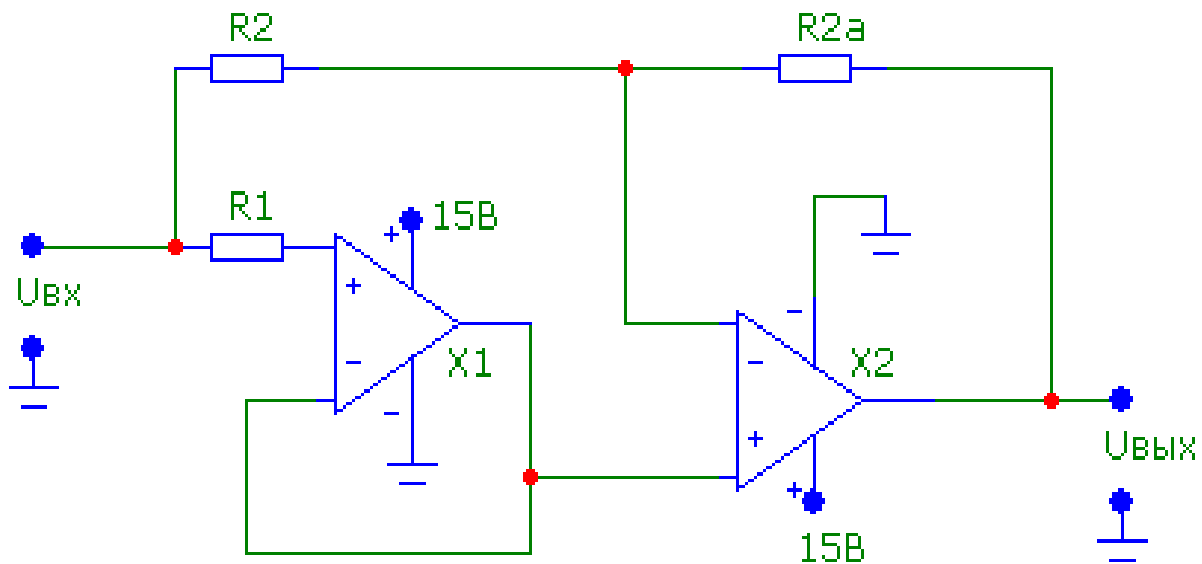


Рис. 6.7. Прецизионный бездиодный выпрямитель на операционном усилителе с однополярным питанием

Такая схема вообще не содержит диодов. Но в ней могут применяться только операционные усилители с полным размахом входных и выходных напряжений (rail-to-rail). Усилители запитываются обязательно от однополярного источника.

Если  $U_{вх} > 0$ , то усилитель операционный усилитель X1 работает как неинвертирующий повторитель. В этом случае усилитель операционный усилитель X2 работает в дифференциальном включении и  $U_{вых} = U_{вх}$ . При  $U_{вх} < 0$  усилитель операционный усилитель X1 переходит в отрицательное насыщение, напряжение на его выходе становится равным нулю, так как питание однополярное. Тогда операционный усилитель X2 переходит в режим инвертирующего повторителя, поэтому

$$U_{ВЫХ} = -U_{ВХ}.$$

Операционный усилитель X2 всегда работает в линейном режиме, а напряжение на неинвертирующем входе операционный усилитель X1 при  $U_{вх} < 0$  становится меньше, чем напряжение отрицательного источника питания. Из-за того что операционный усилитель X1 долго выходит из насыщения, частотный диапазон схемы очень узкий – порядка 0...2 кГц.

## **7. ОДНОПОЛЯРНОЕ ПИТАНИЕ**

### **7.1. Основные сведения**

Операционные усилители преимущественно используются в схемах с двухполярным питанием, но схемы с однополярным питанием позволяют уменьшить сложность источника питания и зачастую повысить экономичность устройств.

Операционные усилители преимущественно используются в схемах с двухполярным питанием, поскольку входные и выходные сигналы операционного усилителя чаще всего могут иметь как положительную, так и отрицательную полярность относительно общей шины схемы. В этом случае, если неинвертирующий вход операционного усилителя соединен с общей шиной, синфазное входное напряжение,

вызывающее погрешность преобразования сигнала схемой на операционном усилителе, отсутствует (рис. 7.1).

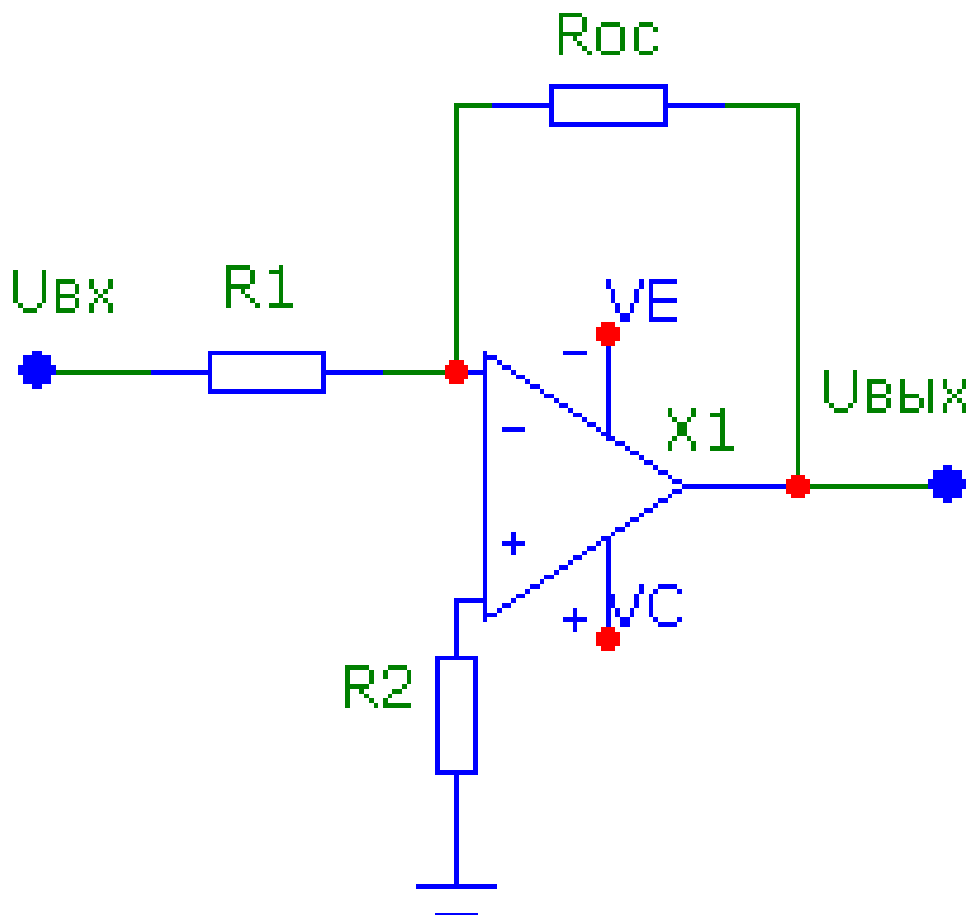


Рис.7.1. Схема усилителя с двухполярным питанием

Тогда выходное напряжение операционного усилителя

$$U_{ВЫХ} = -U_{ВХ} \frac{R_{OC}}{R_1}. \quad (7.1)$$

Схема инвертирующего усилителя с однополярным питанием приведена на рис. 7.2. В ней входное напряжение привязано не к средней точке источников питания, как это делается в случае двухполярного питания операционных усилителей, а к отрицательному выводу источника питания. Эта схема не работает, если входное напряжение положительно, поскольку выходное напряжение должно в

этом случае становится отрицательным, а отрицательного источника питания здесь нет. Для нормальной работы с отрицательными входными сигналами в этой схеме следует использовать операционный усилитель, допускающий соединение входов с шинами питания. Непременное требование соединения входов с общей шиной или другим опорным напряжением затрудняет построение схем на операционных усилителях с однополярным питанием.

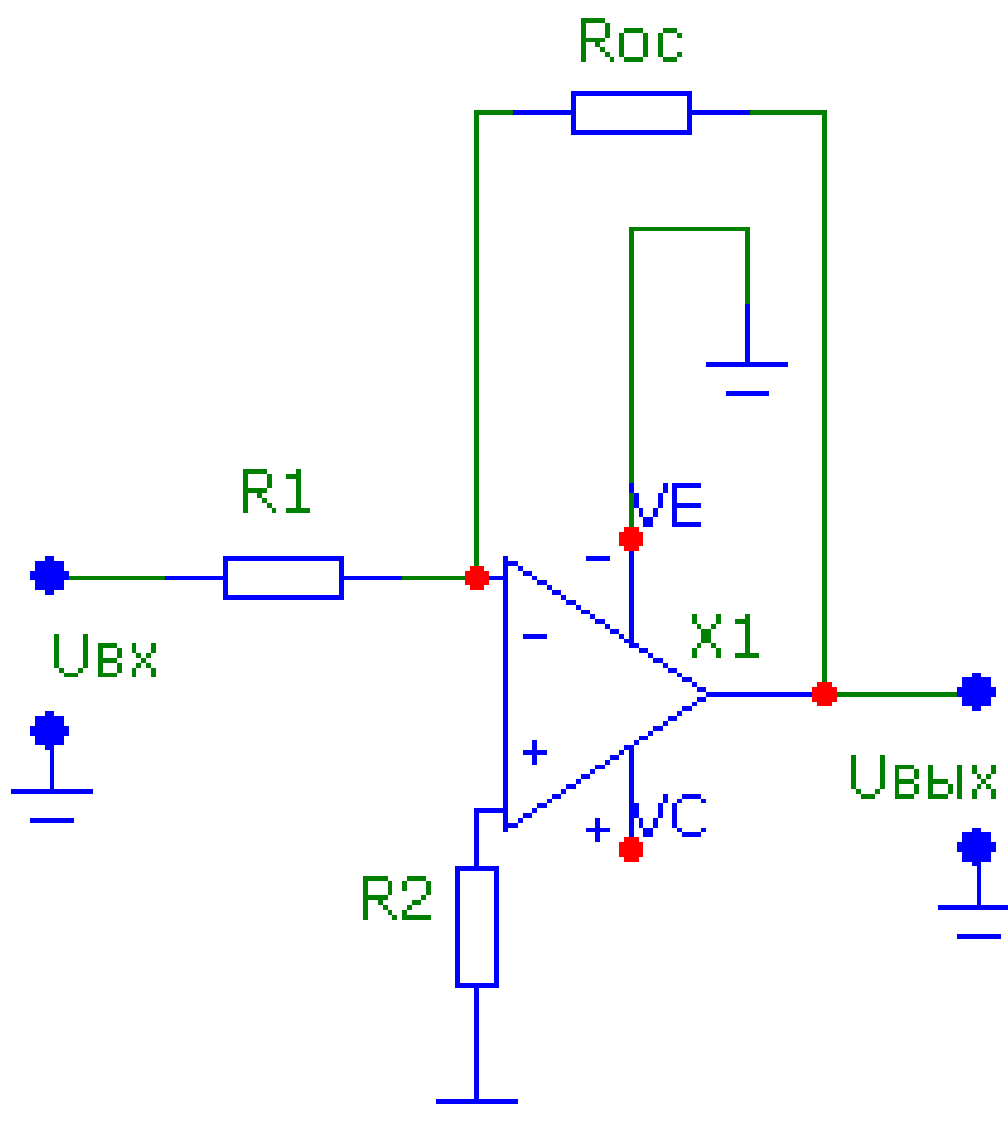


Рис. 7.2. Инвертирующее включение операционных усилителей с однополярным питанием

Особенно просто использовать однополярное питание операционных усилителей тогда, когда источник входного сигнала однополярный как фотодиод на рис. 7.3.

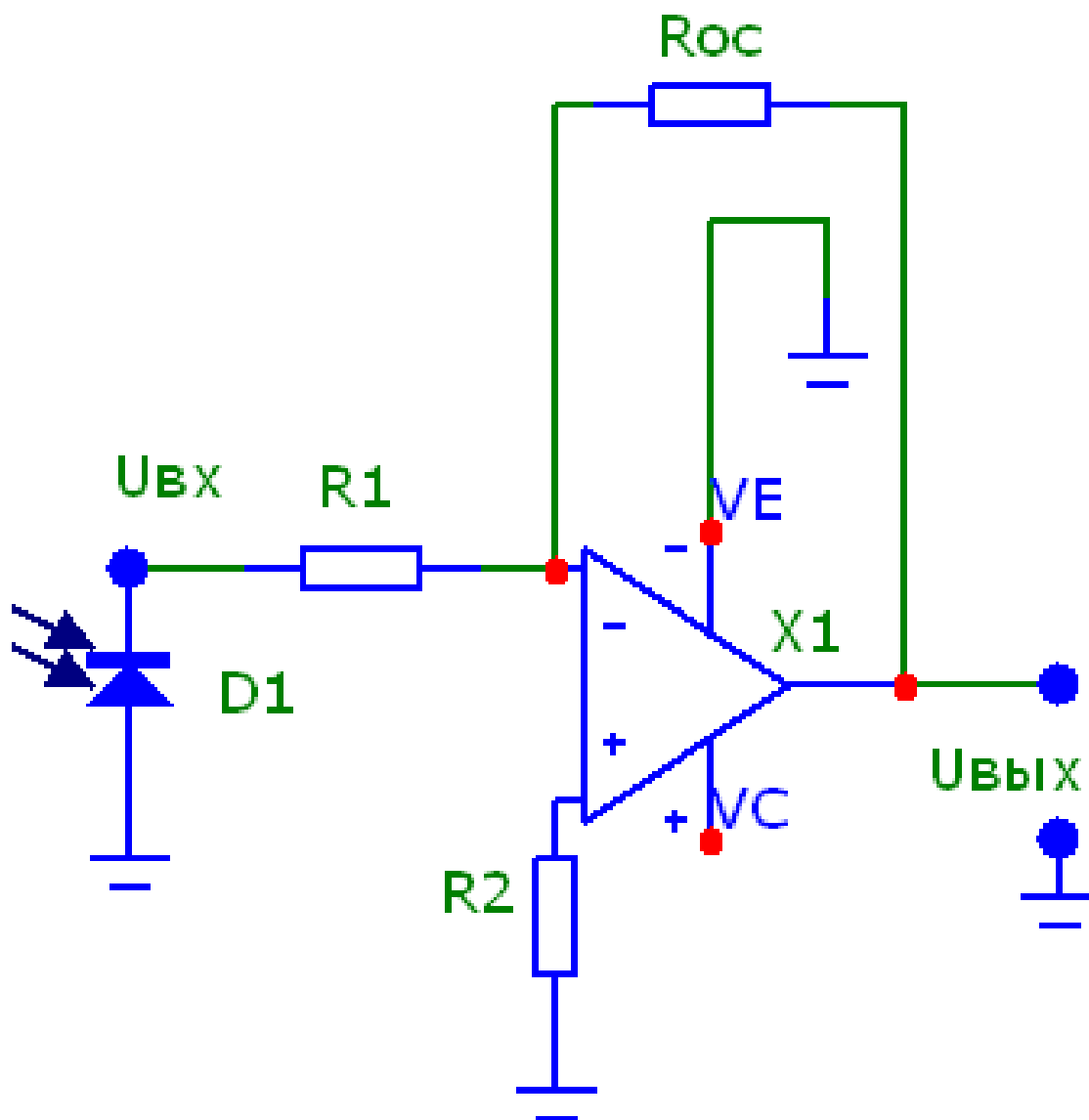


Рис. 7.3. Схема включения операционного усилителя с фотодиодом, работающим в режиме фотозлемента

В других случаях могут использоваться различные способы смещения входных и выходных напряжений операционного усилителя.

## 7.2. Смещение операционных усилителей с однополярным питанием

Для выбора требуемой схемы применения операционного усилителя и определения номиналов, входящих в неё элементов, следует сначала записать требуемую передаточную функцию.

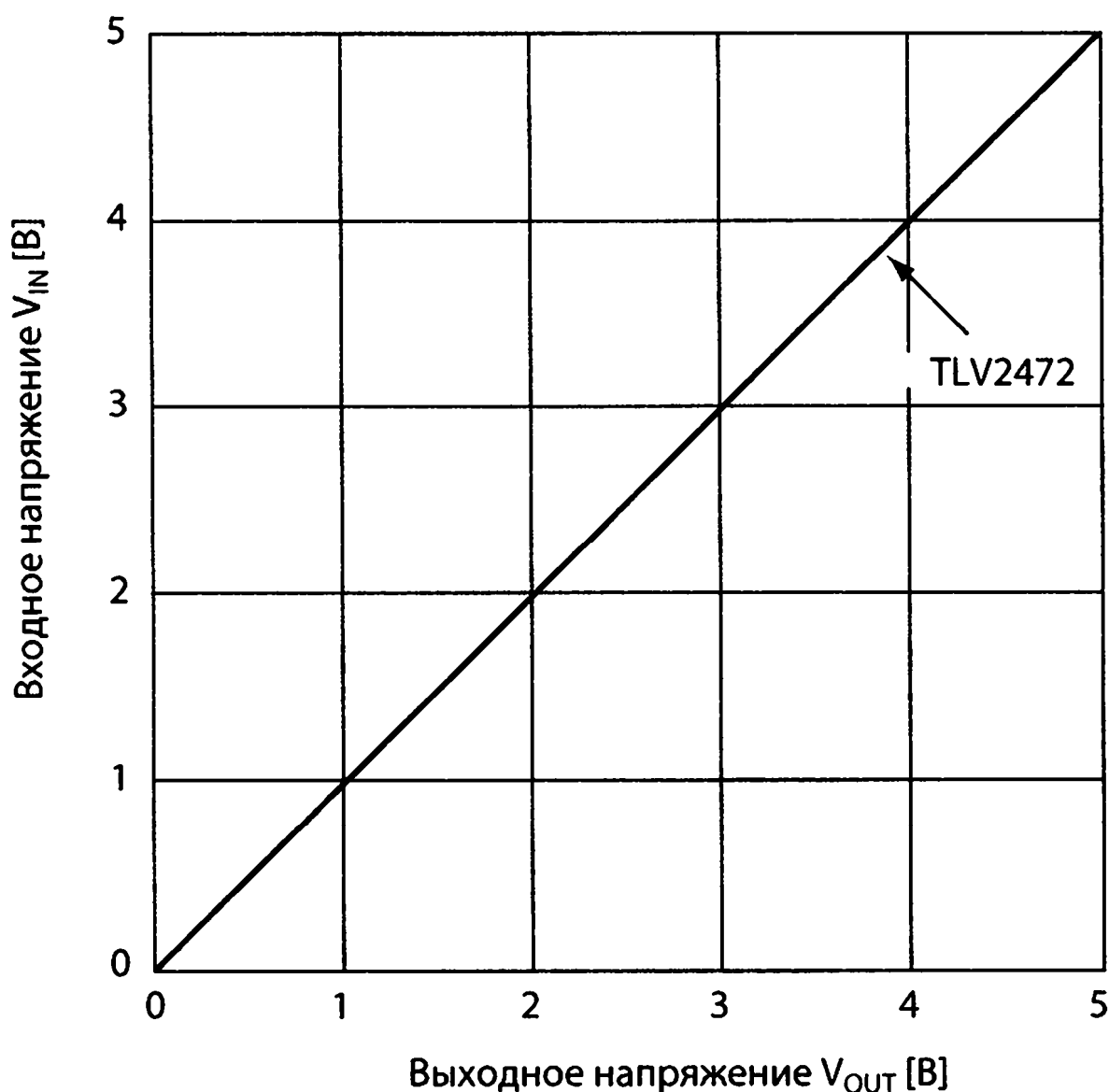


Рис. 7.4. Передаточная характеристика линейного усилителя

Передаточная характеристика линейного усилителя описывается выражением

$$U_{ВЫХ} = \pm m U_{ВХ} \pm b. \quad (7.2)$$

Это уравнение прямой линии, в зависимости от знаков  $m$  (усиления) и  $b$  (точки пересечения с осью ординат), может иметь четыре варианта:

$$U_{ВЫХ} = +m U_{ВХ} + b. \quad (7.3)$$

$$U_{ВЫХ} = +m U_{ВХ} - b. \quad (7.4)$$

$$U_{ВЫХ} = -m U_{ВХ} + b. \quad (7.5)$$

$$U_{ВЫХ} = -m U_{ВХ} - b. \quad (7.6)$$

Имея параметры хотя бы двух точек этой характеристики ( $U_{ВЫХ}$  и  $U_{ВХ}$ ), можно определить значения  $m$  и  $b$  в выражении, описывающем требуемую передаточную функцию.

Далее мы рассмотрим схемы, используемые для реализации передаточных характеристик, описываемых уравнениями (7.3)–(7.6). Отметим, что эти выражения могут быть реализованы и с помощью других схем, но мы будем рассматривать только те схемы, в которых не требуется отрицательное смещение.

$$\text{Вариант 1. } U_{ВЫХ} = +m U_{ВХ} + b$$

На рис. 7.5 приведена схема, реализующая рассматриваемую передаточную функцию.



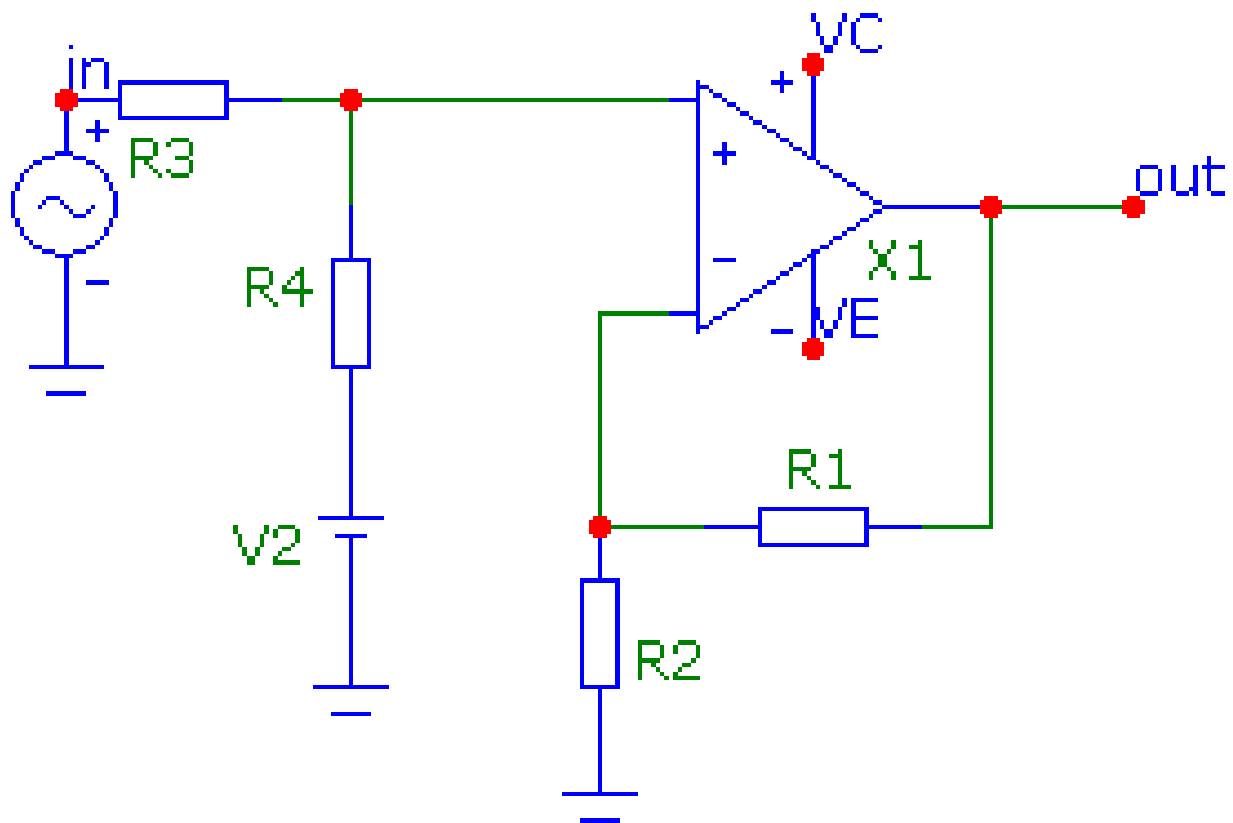


Рис. 7.5. Схема, реализующая передаточную функцию

$$\text{вида } U_{\text{ВЫХ}} = +mU_{\text{ВХ}} + b$$

Передаточная характеристика этой схемы описывается выражением, полученным с использованием принципа суперпозиции:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) + U_{\text{ОП}} \left( \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right). \quad (7.7)$$

Сравнивая это выражение с уравнением прямой линии

$$U_{\text{ВЫХ}} = +mU_{\text{ВХ}} + b, \quad (7.8)$$

получим коэффициенты  $m$  и  $b$ :

$$m = \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right). \quad (7.9)$$

$$b = U_{ОП} \left( \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right). \quad (7.10)$$

Вариант 2.  $U_{ВЫХ} = +mU_{ВХ} - b$

На рис. 7.6 приведена схема, реализующая передаточную функцию вида

$$U_{ВЫХ} = +mU_{ВХ} - b. \quad (7.11)$$

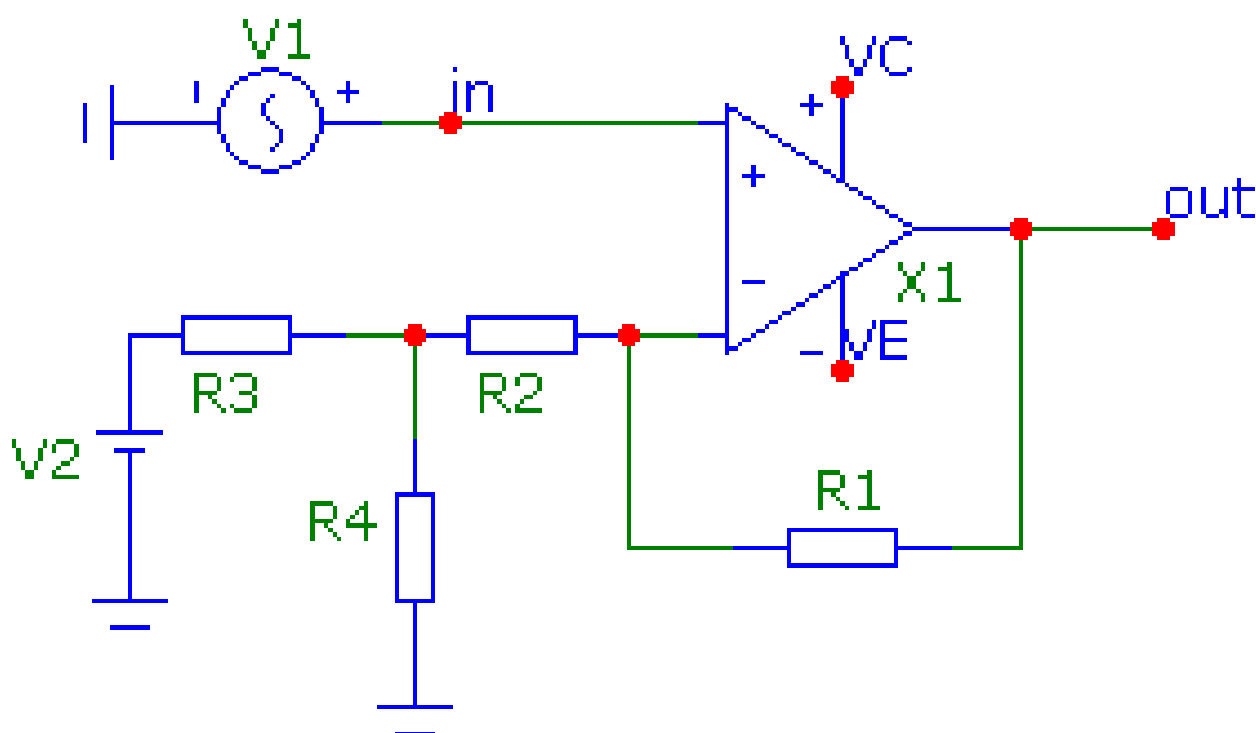


Рис. 7.6. Схема, реализующая передаточную функцию

$$\text{вида } U_{ВЫХ} = +mU_{ВХ} - b$$

Уравнение для передаточной функции этой схемы получим считая соединения резисторов  $R_3$  и  $R_4$  между собой параллельными и считая операционный усилитель идеальным.

$$U_{ВЫХ} = U_{ВХ} \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \left( 1 + \frac{R_1}{R_2 + R_3 // R_4} \right) - U_{ОП} \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \left( \frac{R_1}{R_2 + R_3 // R_4} \right). \quad (7.12)$$

Сравнение выражений (7.11) и (7.12) позволяет найти  $m$  и  $b$ :

$$m = \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \left( 1 + \frac{R_1}{R_2 + R_3 // R_4} \right). \quad (7.13)$$

$$|b| = U_{ОП} \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \left( \frac{R_1}{R_2 + R_3 // R_4} \right). \quad (7.14)$$

Вариант 3.  $U_{ВЫХ} = -mU_{ВХ} + b$

На рис. 7.7 приведена схема, реализующая передаточную функцию вида

$$U_{ВЫХ} = -mU_{ВХ} + b. \quad (7.15)$$

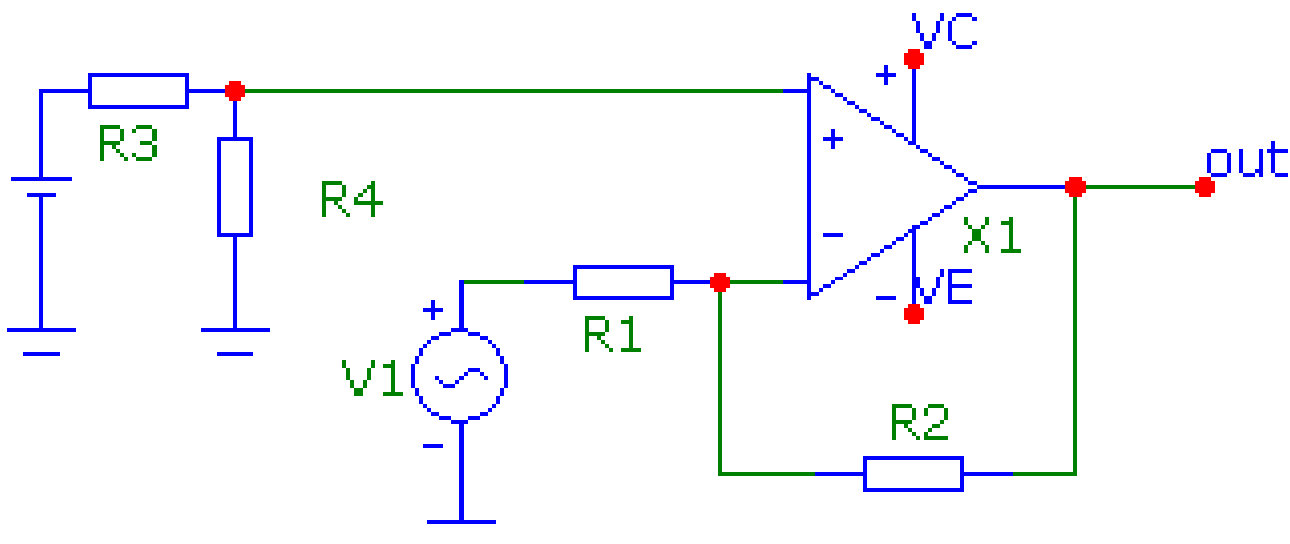


Рис. 7.7. Схема, реализующая передаточную функцию

$$\text{вида } U_{\text{ВЫХ}} = -mU_{\text{ВХ}} + b$$

Используя принцип суперпозиции, запишем уравнение передаточной функции:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ВХ}} \left( \frac{R_2}{R_1} \right) + U_{\text{ОП}} \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right). \quad (7.16)$$

Сравнение коэффициентов в уравнениях (7.16) и (7.15) позволяет получить значения  $m$  и  $b$ :

$$|m| = \left( \frac{R_2}{R_1} \right). \quad (7.17)$$

$$b = U_{\text{ОП}} \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right). \quad (7.18)$$

Необходимо помнить, что при выключенном питании операционного усилителя отрицательное входное напряжение, поданное на его инвертирующий вход, может вызвать его повреждение.

Для защиты операционный усилитель от повреждения в

этой ситуации в схему может быть введён диод, шунтирующий инвертирующий вход операционного усилителя для входного напряжения отрицательной полярности. Обычно применяют диод с малым прямым падением напряжения, например германиевый или с барьером Шоттки.

Вариант 4. 
$$U_{ВЫХ} = -mU_{ВХ} - b$$

На рис. 7.8 приведена схема, реализующая передаточную функцию вида

$$U_{ВЫХ} = -mU_{ВХ} - b. \quad (7.19)$$

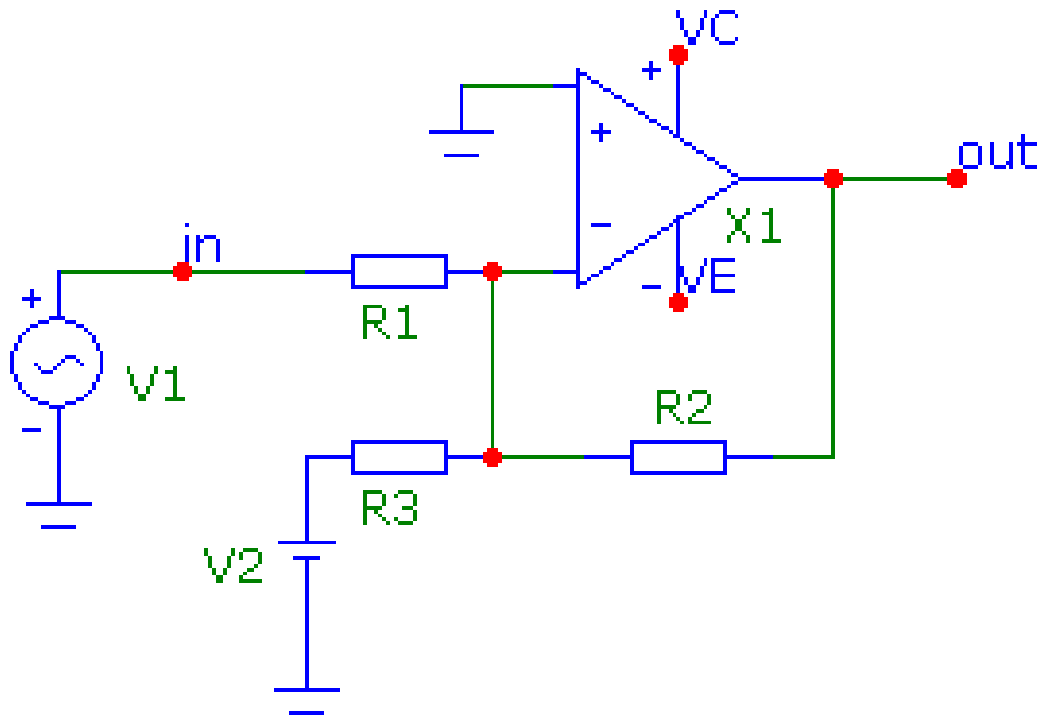


Рис. 7.8. Схема, реализующая передаточную функцию вида

$$U_{ВЫХ} = -mU_{ВХ} - b$$

Используя принцип суперпозиции, запишем уравнение передаточной функции:

$$U_{ВЫХ} = -U_{ВХ} \left( \frac{R_2}{R_1} \right) - U_{ОП} \left( \frac{R_3}{R_2} \right). \quad (7.20)$$

Сравнение коэффициентов в уравнениях (7.19) и (7.20) позволяет получить значения  $m$  и  $b$ :

$$|m| = \left( \frac{R_2}{R_1} \right). \quad (7.21)$$

$$|b| = U_{ОП} \left( \frac{R_3}{R_2} \right). \quad (7.22)$$

Для защиты операционного усилителя от повреждения в этой ситуации в схему может быть введён диод, шунтирующий инвертирующий вход операционного усилителя для входного напряжения отрицательной полярности. Обычно применяют диод с малым прямым падением напряжения, например германиевый или с барьером Шоттки.

Схемы и значения постоянных  $m$  и  $b$  выбираются так, чтобы при любых возможных значениях входного напряжения  $U_{вх}$  выполнялось следующее условие:

$$0 < U_{ВЫХ} < V_c. \quad (7.23)$$

Обычно  $m$  определяется необходимым усилением схемы, поэтому разработчик может выбрать только конфигурацию схемы и постоянную  $b$ .

### 7.3. Схема включения операционного усилителя для усиления сигналов переменного тока

Типовая схема включения операционного усилителя для усиления сигналов переменного тока с питанием от однополярного источника приведена на рис. 7.9.

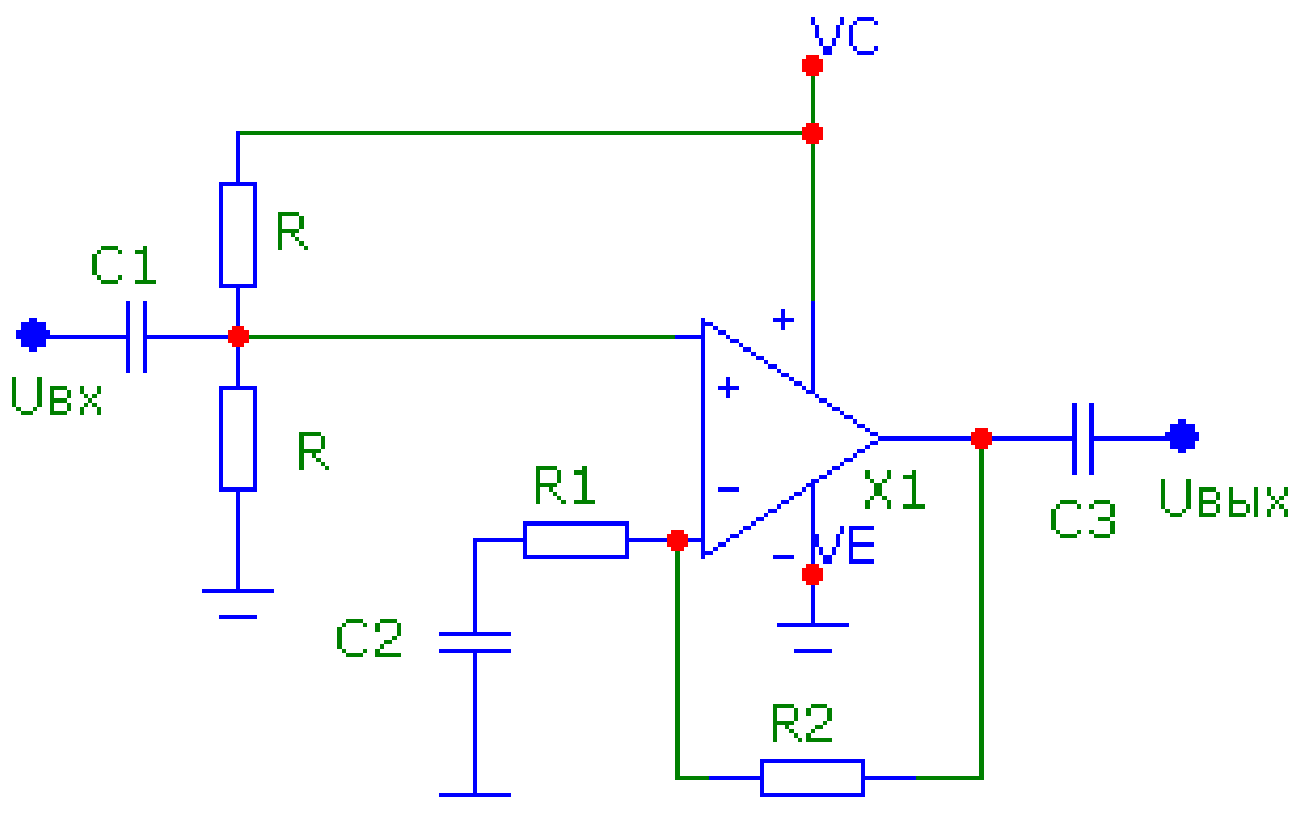


Рис. 7.9. Схема включения операционного усилителя для усиления сигналов переменного тока

Здесь напряжение смещения равно половине напряжения питания. Резисторы делителя цепи смещения могут быть выбраны достаточно высокоомными, чтобы не нагружать источники питания и входного сигнала.

## 7.4. Введение искусственной нулевой точки

От использования цепей смещения можно отказаться, если ввести искусственную нулевую точку, т.е. точку схемы, потенциал которой равен половине напряжения однополярного источника питания. Для того чтобы схема могла усиливать сигналы разной полярности, источник входного сигнала включается между входом усилителя и искусственной нулевой точкой.

На рис. 7.10 представлена схема с резистивным делителем напряжения, средняя точка которого соединена с искусственной нулевой точкой 0.

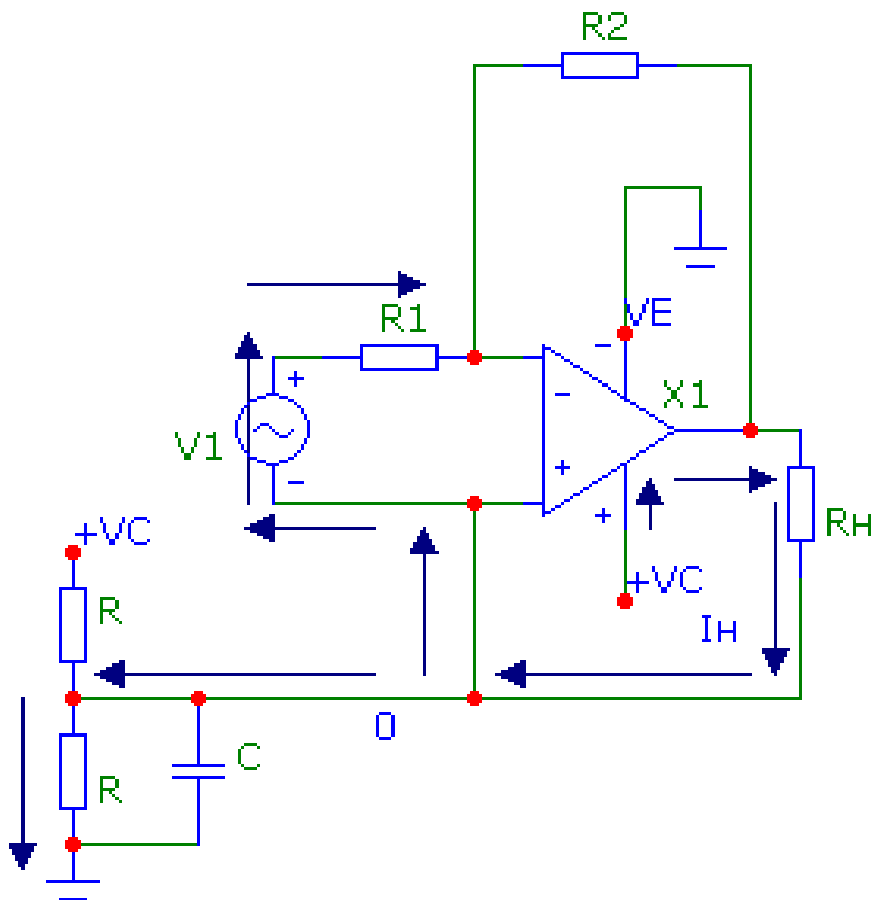


Рис. 7.10. Схема формирования потенциала искусственной нулевой точки



Однако при наличии нагрузки  $R_H$  ток нагрузки  $I_H$  протекает через один из резисторов этого делителя, создавая несимметрию напряжений между полюсами источника питания и точкой 0, причем степень этой несимметрии зависит от силы тока нагрузки. Уменьшение сопротивлений делителя снижает несимметрию этих напряжений, но увеличивает потери энергии в делителе.

Схема со стабилитроном (рис. 7.11) обеспечивает хорошую стабилизацию потенциала искусственной нулевой точки относительно отрицательного полюса источника питания.

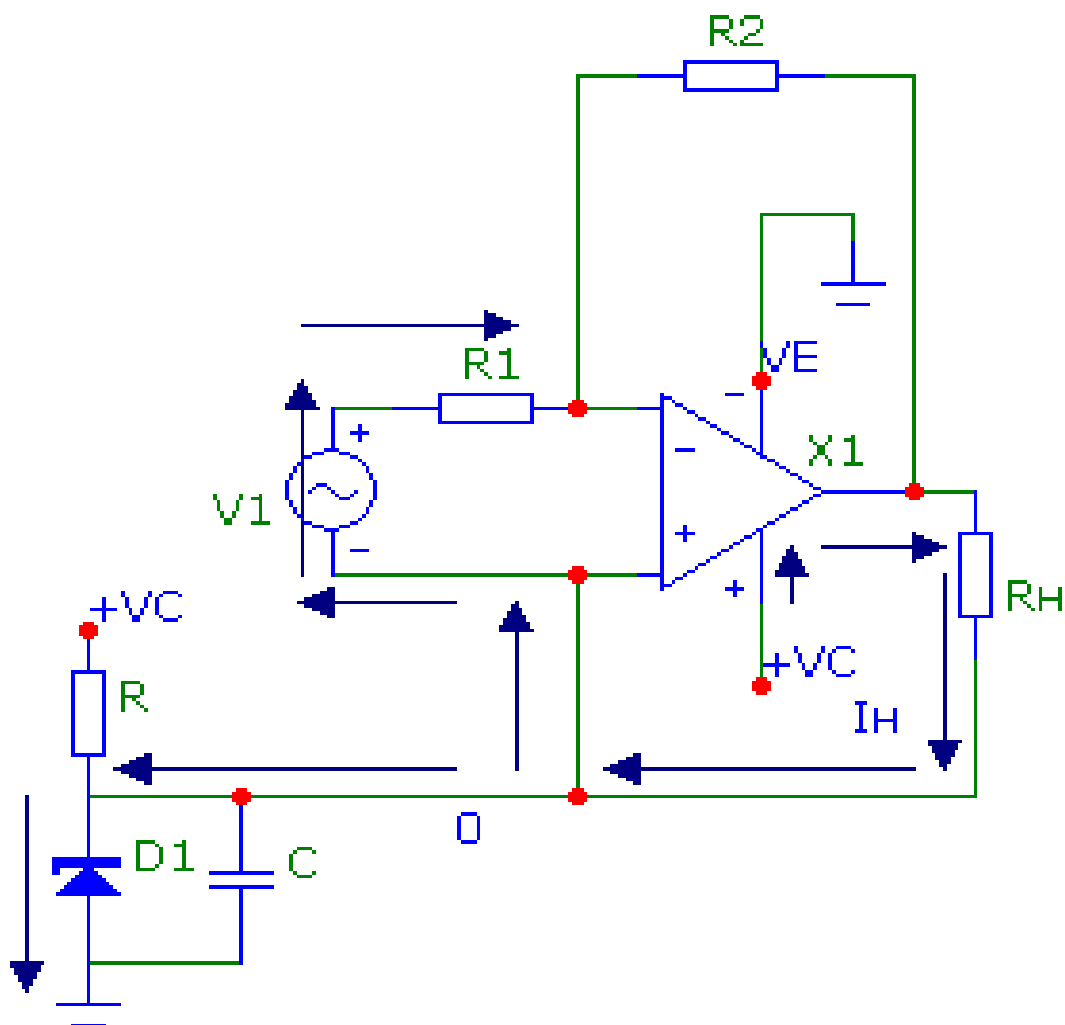


Рис. 7.11. Схема со стабилитроном

Эта схема хорошо работает при вытекающем выходном токе операционного усилителя, но для сохранения стабильности потенциала точки 0 при значительном втекающем выходном токе требуется резистор R с низким сопротивлением, что опять-таки обуславливает повышенные потери.

Лучшие характеристики имеет схема с операционным усилителем, подключенным по схеме неинвертирующего повторителя к средней точке резистивного делителя напряжения (рис. 7.12).

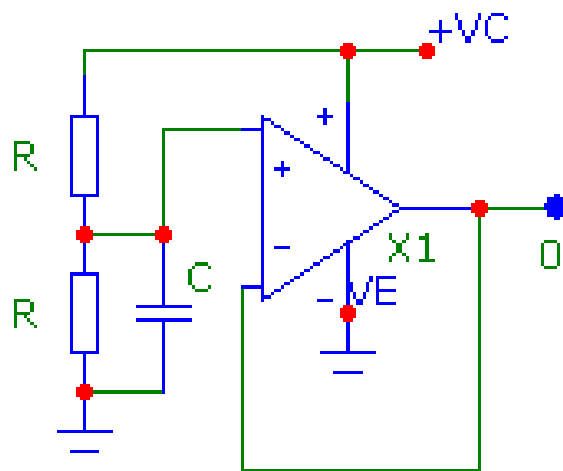


Рис. 7.12. Схема формирования искусственной нулевой точки на операционном усилителе

В данной схеме делитель может быть высокоомным, так как он нагружен только входным током покоя операционного усилителя. Операционный усилитель сравнивает потенциал на выходе схемы с потенциалом в средней точке делителя и поддерживает напряжение на своем выходе таким, чтобы разность сравниваемых потенциалов была равна нулю. Этот эффект достигается благодаря действию отрицательной

обратной связи. При малых токах покоя, потребляемых этой схемой (менее 1 мА), такой активный делитель имеет выходное сопротивление не более 1 Ом.

В том случае, если нагрузка может быть не связана с общей точкой схемы, или с какой-либо из шин питания, можно использовать простейший вариант формирования искусственной нулевой точки на резистивном делителе, но с мостовой усилительной схемой (рис. 7.13).

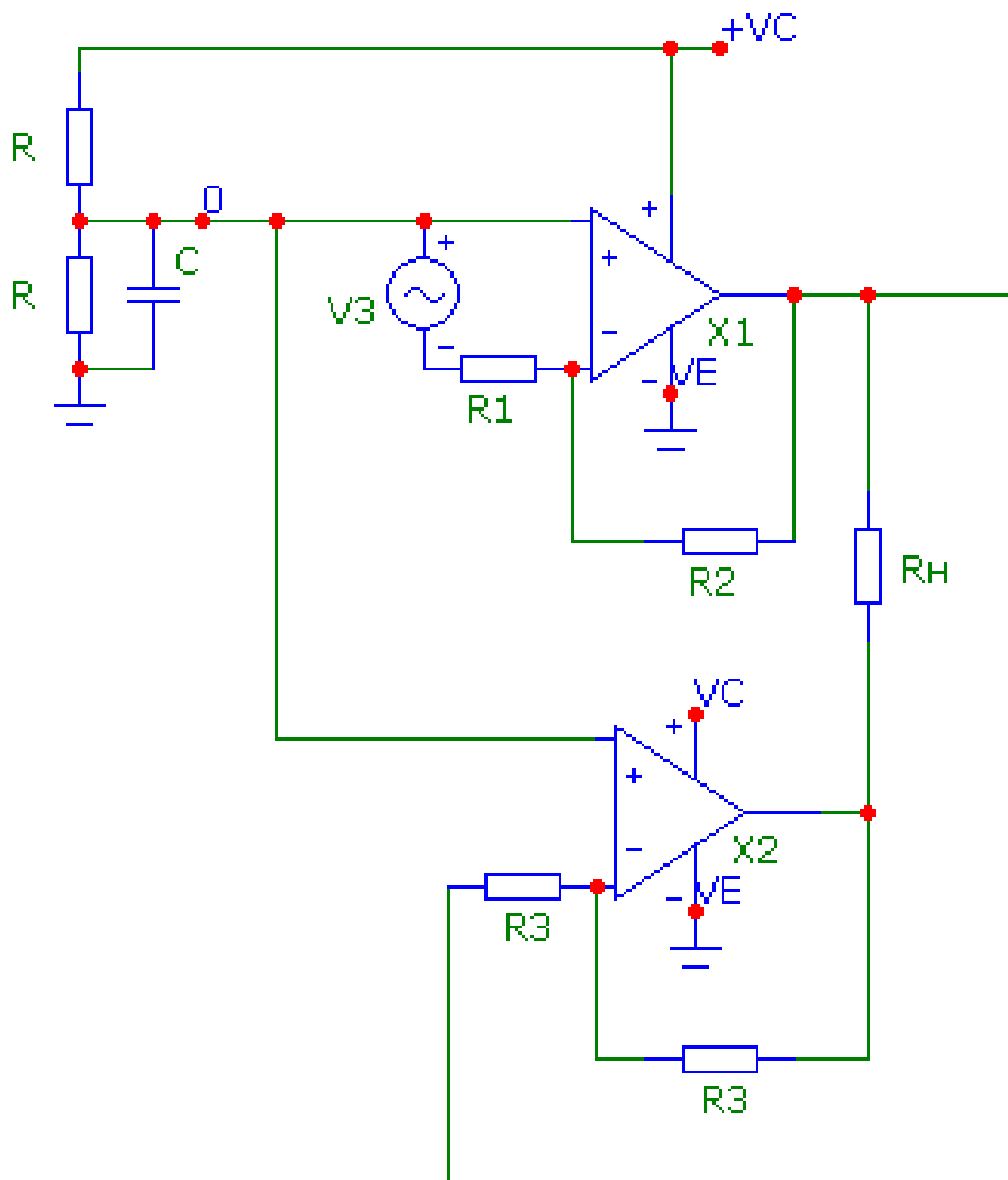


Рис. 7.13. Мостовая усилительная схема

В этой схеме инвертирующий повторитель на операционном усилителе X2 создает на нижнем выводе нагрузки  $R_n$  потенциал, противофазный по отношению к потенциалу верхнего ее вывода. Здесь в искусственную нулевую точку втекает ток, равный  $U_{вх}/R_1$ , поэтому сопротивление резистора  $R_1$  следует взять по возможности большим, иначе возможна несимметрия нулевой точки.

Дополнительные достоинства этой схемы: увеличение максимальной амплитуды напряжения на нагрузке в два раза при том же напряжении питания и заметное повышение КПД при полном размахе выходного напряжения.

## **8. ПОЛНОСТЬЮ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ**

### **8.1. Основные сведения**

Обычно операционный усилитель имеет два входа – инвертирующий и неинвертирующий – и один выход, сигналы на котором снимаются относительно потенциала земли системы (рис. 8.1). При этом входы операционного усилителя являются входами дифференциального усилителя, представляющего собой первый каскад операционного усилителя.

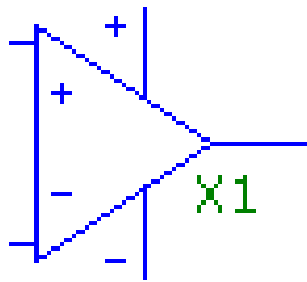


Рис. 8.1. Операционный усилитель с одним выходом

Операционный усилитель имеет также два вывода питания, на которые могут подаваться либо два равные по величине, но различные по полярности напряжения, либо на один из выводов подаётся напряжение питания, а второй подключается к земле.

В полностью дифференциальном операционном усилителе (рис. 8.2) добавлен ещё один выход (инверсный).

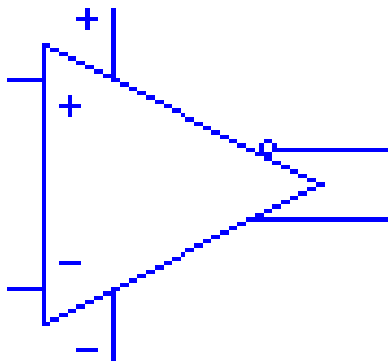


Рис. 8.2. Полностью дифференциальный операционный усилитель

Сигналы на втором выходе находятся в противофазе с сигналами на первом выходе, и, подобно входам операционного усилителя, выходы полностью дифференциального операционного усилителя называются инвертирующим и неинвертирующим.

Для полностью дифференциального операционного усилителя цепи обратной связи должны быть включены между каждым из выходов и входами, как это показано, например, на рис. 8.3.

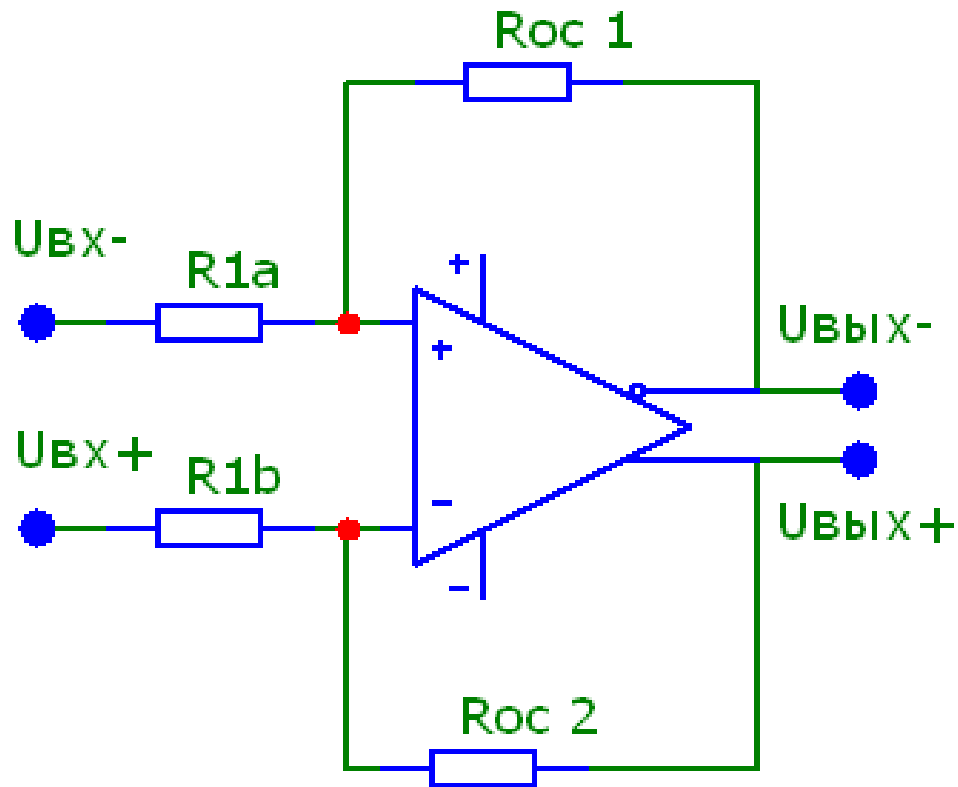


Рис. 8.3. Пример введения цепей ОС в полностью дифференциальном операционном усилителе

Обе цепи обратной связи для полностью дифференциального операционного усилителя должны быть идентичными. Если они различаются между собой, то могут возникнуть значительные искажения сигналов второго порядка.

Коэффициент усиления дифференциального каскада равен

$$\frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{R_{ОС}}{R_1}. \quad (8.1)$$

## 8.2. Преобразование несимметричных сигналов в дифференциальные

Очень часто полностью дифференциальные операционные усилители применяются для преобразования несимметричных сигналов в дифференциальные (рис. 8.4). Это требуется, например, для формирования входных сигналов для аналого-цифровых преобразователей с дифференциальными входами. Одинаковые обозначения резисторов означают равенство их номиналов.

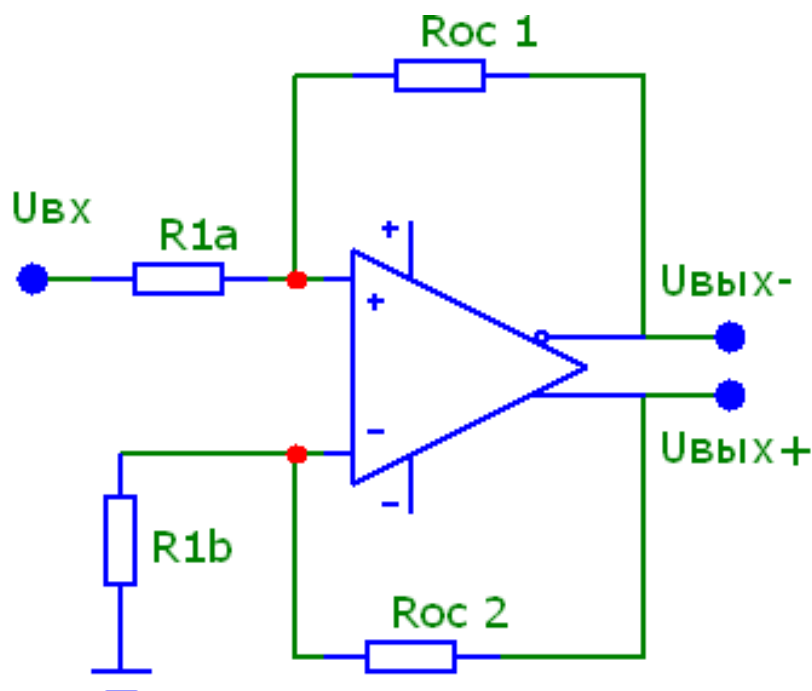


Рис. 8.4. Преобразователи несимметричных сигналов в дифференциальные

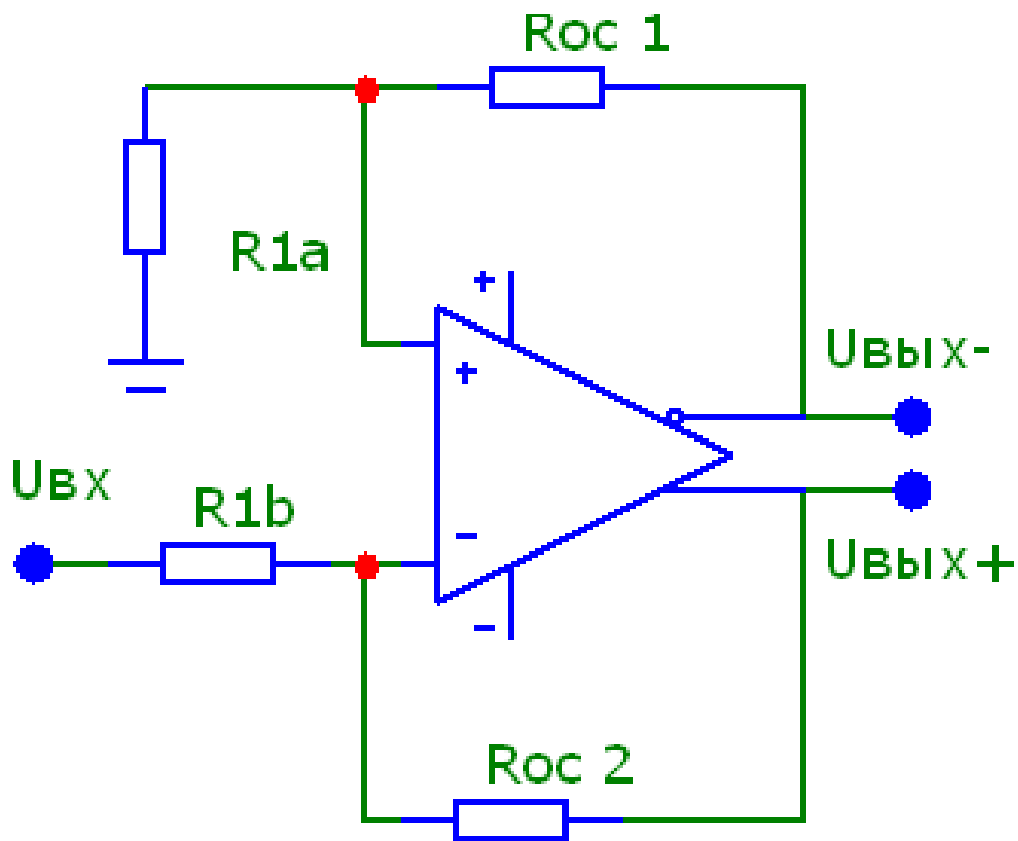


Рис. 8.4. Окончание

Несмотря на различие схем, приведённых на рис. 8.4, работают они практически одинаково.

Коэффициент усиления дифференциального каскада равен

$$\frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = -\frac{R_{OC}}{R_1}.$$

На рис. 8.5 приведены осциллограммы входного  $U_{вх}$  и выходных ( $U_{вых+}$  и  $U_{вых-}$ ) напряжений преобразователя несимметричных сигналов в дифференциальные при

$$R_{oc} = R_1.$$



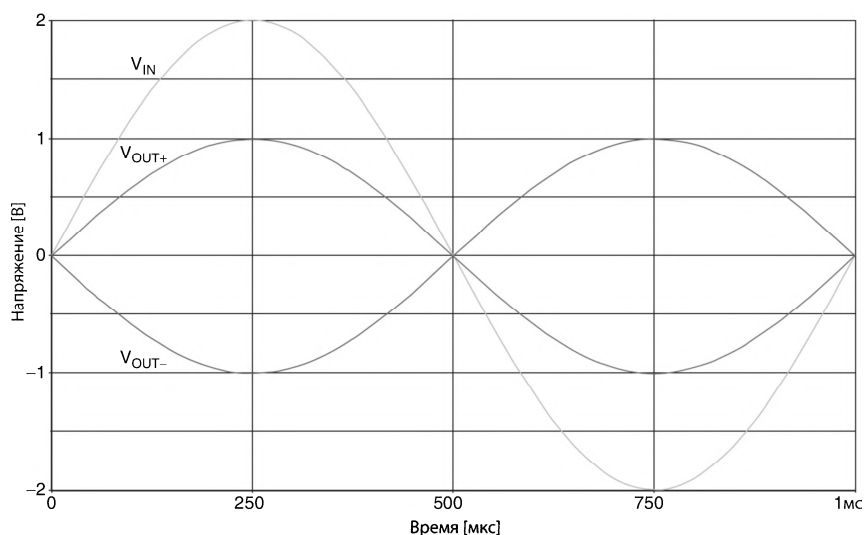


Рис. 8.5. Связь между собой напряжений  $U_{вх}$  и  $U_{вых+}$  и  $U_{вых-}$  в преобразователе несимметричных сигналов в дифференциальные

При первом взгляде на рис. 8.5 кажется, что амплитуда выходного напряжения в 2 раза меньше, чем входного, хотя  $R_{ос} = R_1$ . Однако надо сравнивать входной сигнал  $U_{вх}$  с разностью  $(U_{вых+}) - (U_{вых-})$  и тогда коэффициент передачи становится равен 1.

### 8.3. Новые функции

Полностью дифференциальные операционные усилители имеют дополнительный вывод  $U_{осм}$ , который служит для управления уровнем синфазного выходного напряжения. Этот вывод может работать и как вход, и как выход, так как он питается от делителя напряжения питания операционного усилителя, однако как выход он используется редко. Когда он используется как выход, его напряжение соответствует

синфазному напряжению, относительно которого изменяются напряжения  $U_{\text{вых}+}$  и  $U_{\text{вых}-}$ .

Обычно вывод  $U_{0\text{см}}$  используется для установки синфазного смещения выходных сигналов полностью дифференциального операционного усилителя. Это очень полезная функция для сопряжения несимметричных сигналов с дифференциальным входом быстродействующих прецизионных аналого-цифровых преобразователей, имеющих выход опорного напряжения (рис. 8.6). Однако при использовании вывода  $U_{0\text{см}}$  для установки синфазного смещения выходов полностью дифференциального операционного усилителя сужается динамический диапазон и может возникнуть одностороннее ограничение выходных напряжений. Одинаковые обозначения резисторов означают равенство их номиналов.

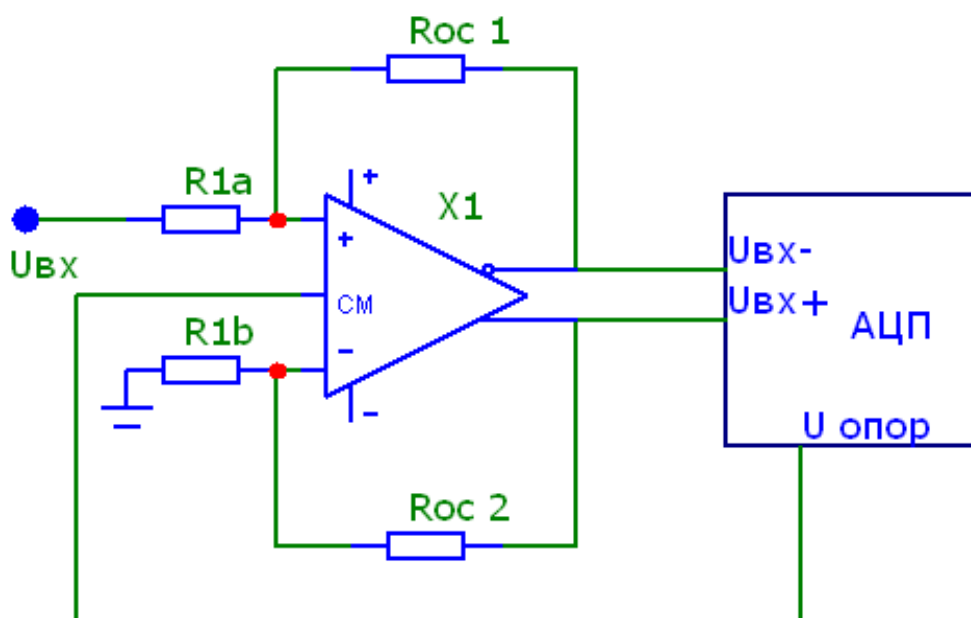


Рис. 8.6. Использование полностью дифференциального операционного усилителя для согласования несимметричных сигналов с дифференциальным входом АЦП

В схеме, приведённой на рис. 8.6, не показаны элементы, используемые для компенсации и развязки по цепям питания. Она лишь демонстрирует базовый принцип применения полностью дифференциального операционного усилителя для согласования несимметричных сигналов с дифференциальным входом АЦП.

#### 8.4. Инструментальные усилители

Инструментальный усилитель можно собрать из двух операционных усилителей с несимметричными выходами и полностью дифференциального операционного усилителя (рис. 8.7).

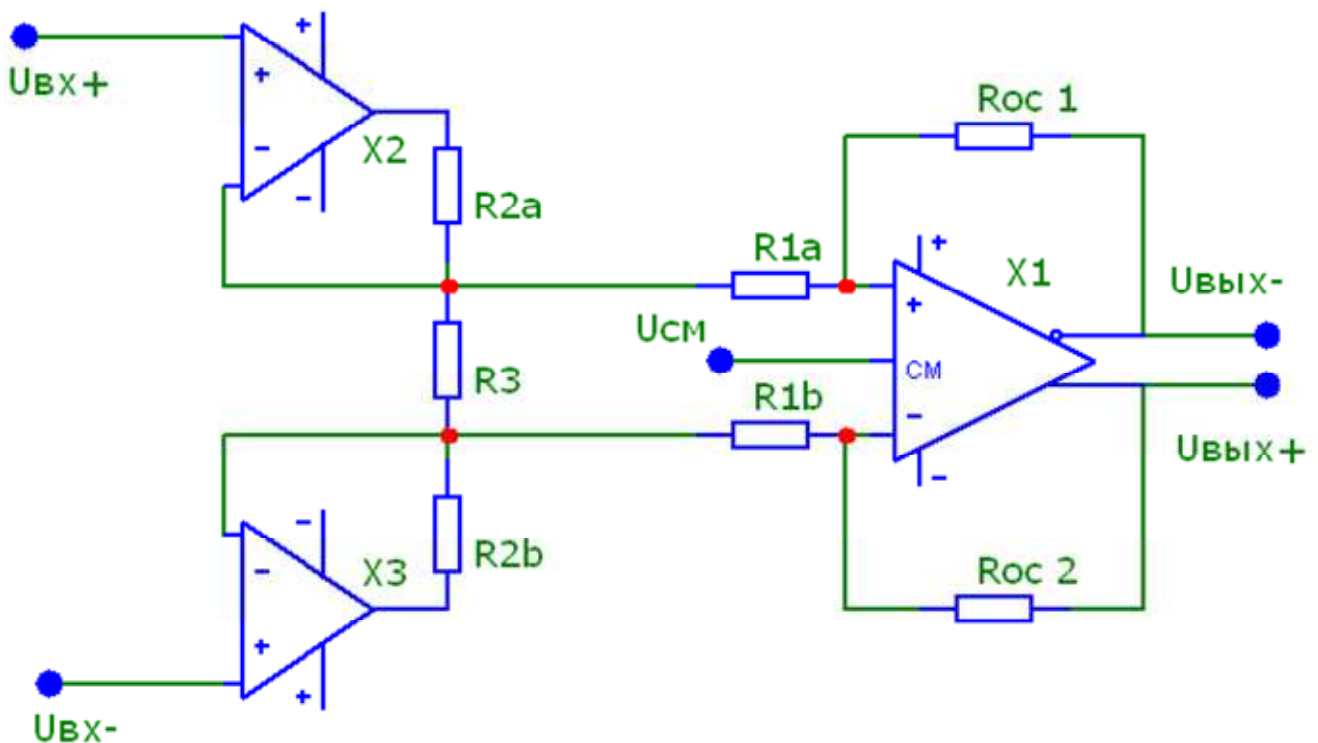


Рис. 8.7. Инструментальный усилитель

Одинаковые обозначения резисторов означают равенство их номиналов:

$$\begin{aligned}R_{oc1} &= R_{oc2} = R_{oc}, \\R_{1a} &= R_{1b} = R_1, \\R_{2a} &= R_{2b} = R_2, \\K &= \frac{R_{oc}}{R_1} \left( 1 + \frac{2R_2}{R_3} \right).\end{aligned}\tag{8.3}$$

Инструментальный усилитель работает с входными и выходными сигналами обеих полярностей, имеет высокое входное сопротивление, большой коэффициент подавления синфазной помехи и является полностью дифференциальным.

### **8.5. Фильтры на полностью дифференциальных усилителях**

Фильтрация применяется для удаления из входных сигналов нежелательных частотных компонентов, засоряющих полезный сигнал. Дифференциальные фильтры выполняют ту же работу, что и фильтры для несимметричных сигналов.

Для реализации дифференциального фильтра компоненты в его цепях ОС просто зеркально отображают друг друга. Обозначим компоненты в верхней цепи ОС буквой А, а в нижней – В.

Элементы блокировки по цепям питания в приведённых

ниже схемах не показаны. Однако следует иметь в виду, что для работы быстродействующих операционных усилителей требуются соответствующие элементы блокировки. Их выбор должен основываться на обеспечении хороших характеристик на частотах, которые требуется отфильтровывать.

### **Однополюсный фильтр**

Однополюсный фильтр является простейшим фильтром, выполняемым на операционном усилителе с несимметричным выходом, и остаётся таковым же при использовании полностью дифференциальных операционных усилителей.

Фильтр нижних частот выполняется путём введения в цепи обратной связи конденсаторов так, как это показано на рис. 8.8.

Одинаковые обозначения резисторов означают равенство их номиналов.

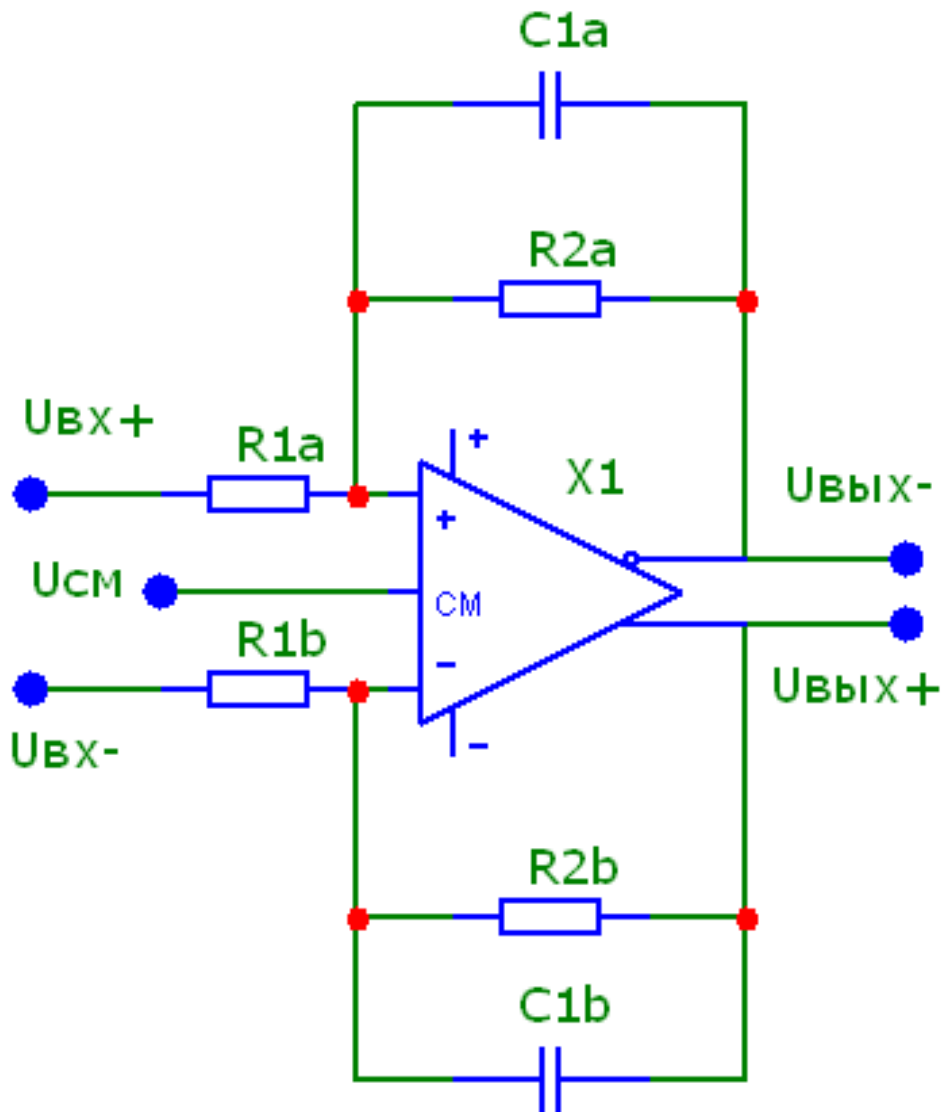


Рис. 8.8. Однополюсный полностью дифференциальный фильтр нижних частот

Коэффициент усиления по напряжению:  $K = -\frac{R_2}{R_1}$ .

Граничная частота  $F_{ГП} = \frac{1}{2\pi R_2 C_1}$ .

Фильтр верхних частот выполняется введением конденсаторов последовательно с входными резисторами, как это показано на рис. 26. Одинаковые обозначения резисторов означают равенство их номиналов.

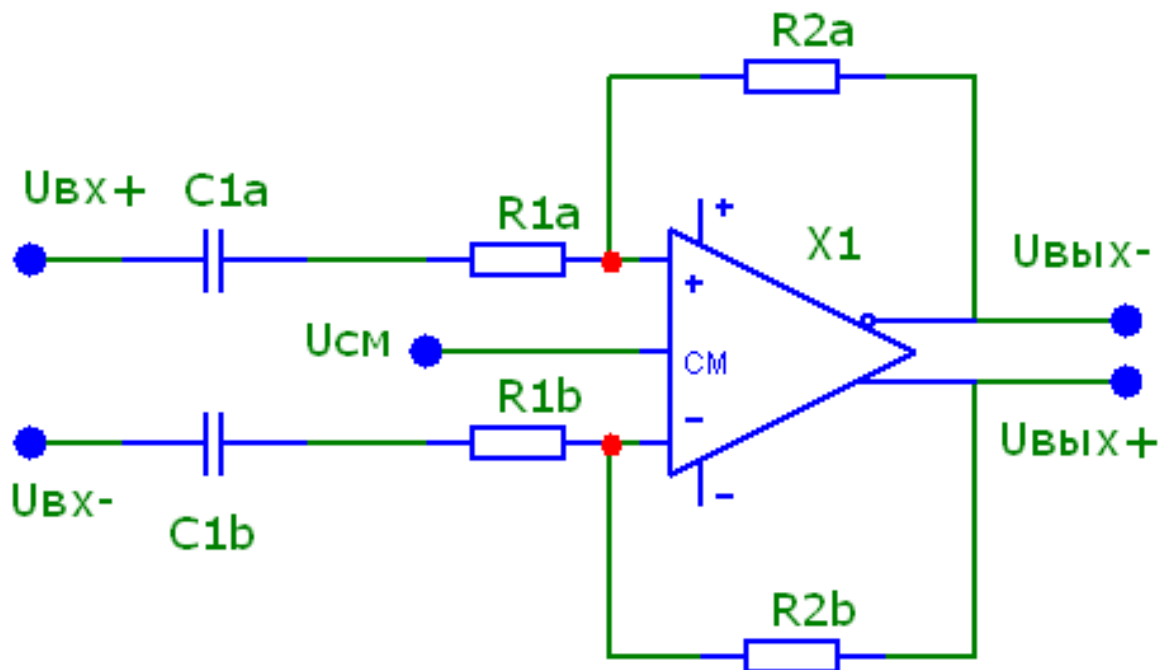


Рис. 8.9. Однополюсный полностью дифференциальный фильтр верхних частот

Коэффициент усиления по напряжению:  $K = -\frac{R_2}{R_1}$ .

Граничная частота  $F_{ГР} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$ .

При неудачном сочетании номиналов резисторов  $R_1$  и  $R_2$  и конденсаторов  $C_1$  сдвиг фазы в цепи обратной связи может привести в этой схеме к потере устойчивости. Это справедливо как для операционных усилителей с несимметричным выходом, так и для полностью дифференциальных операционных усилителей.

## **Двухполюсные фильтры**

Во множестве схем двухполюсных фильтров на операционных усилителях с несимметричными выходами используются цепи и отрицательной, и положительной обратных связей. По этой причине их реализация в виде полностью дифференциальных схем невозможна. В других схемах используется только отрицательная ОС, но сигнал подаётся на неинвертирующий вход, которого в полностью дифференциальных операционных усилителях нет. Всё это ограничивает возможности разработчика.

Однако существует схема, с помощью которой можно создать полностью дифференциальные фильтры нижних и верхних частот, полосовые и режекторные фильтры. За конструктором остаётся выбор: использовать незнакомую схему или применять несколько операционных усилителей с несимметричными выходами.

### **Фильтры с несколькими цепями ОС**

Фильтры с несколькими цепями обратной связи представляют собой простейшие схемы, которые могут быть использованы с полностью дифференциальными операционными усилителями (рис. 8.13 и 8.14). К сожалению, расчёт элементов этих схем представляет определённые сложности, поэтому для наглядности в схемах на рис. 8.13 и 8.14 соотношения номиналов компонентов приведены для



единичного коэффициента передачи в полосе пропускания. Одинаковые обозначения резисторов означают равенство их номиналов.

$$\text{Граничная частота } F_{ГР} = \frac{1}{2\pi R C}.$$

$$R_1 = R_2 = 0,65 R; \quad R_3 = 0,375 R;$$

$$C_1 = C. \quad C_2 = 4C.$$

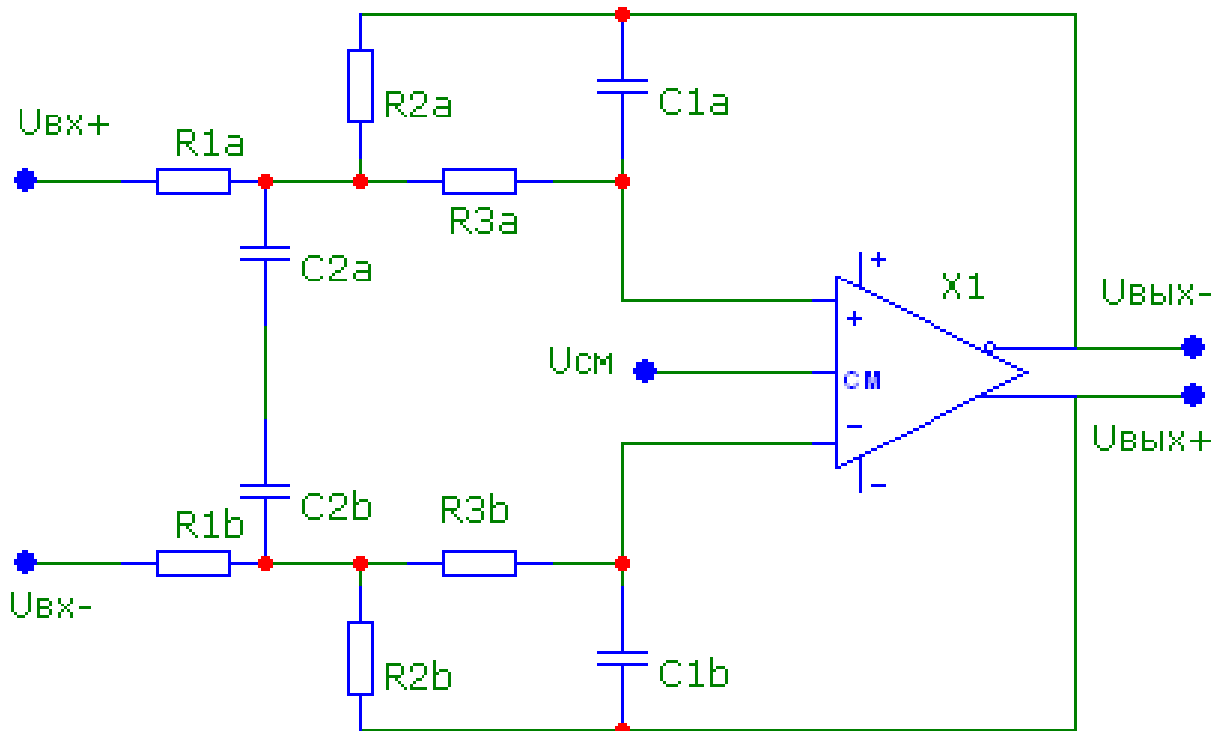


Рис. 8.10. Дифференциальный фильтр нижних частот

$$\text{Граничная частота } F_{ГР} = \frac{1}{2\pi R C}.$$

$$R_1 = 0,467 R; \quad R_2 = 2,11 R;$$

$$C_1 = C_2 = C_3 = C.$$

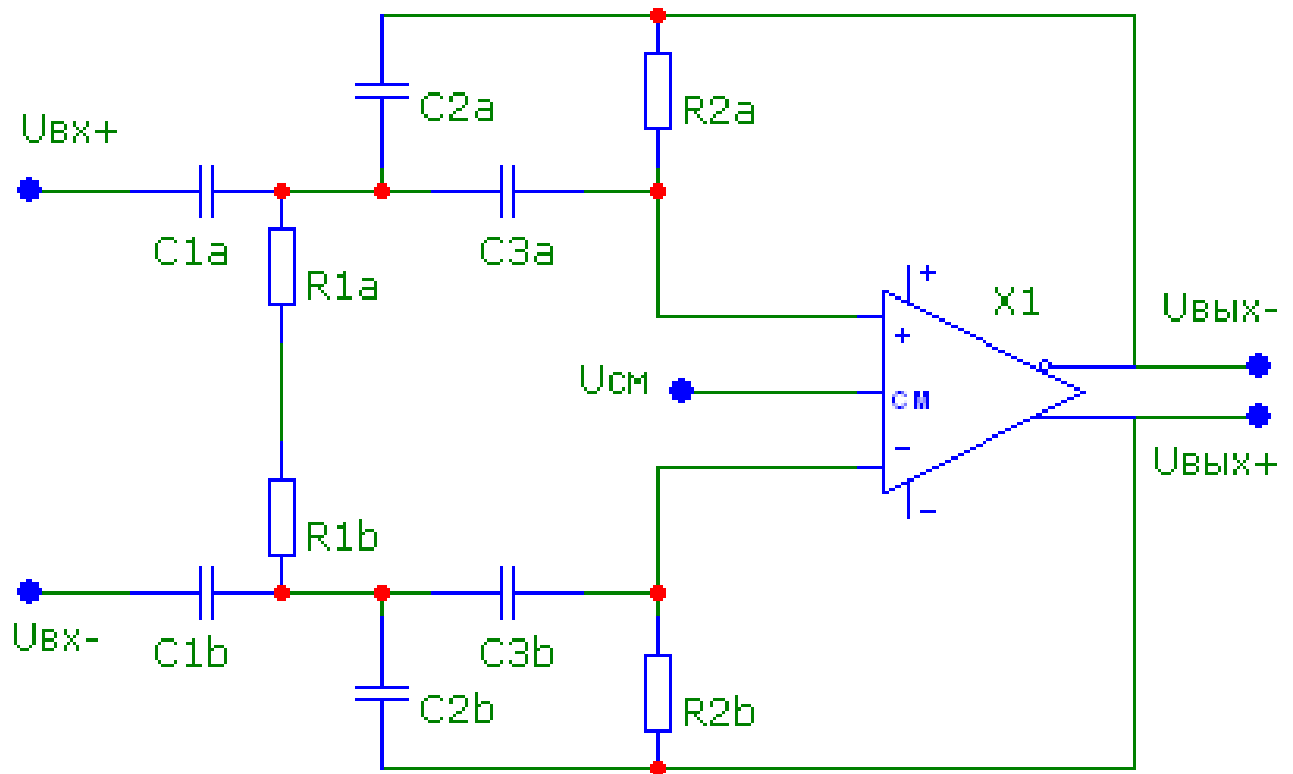


Рис. 8.11. Дифференциальный фильтр верхних частот

В схемах фильтров условие идентичности обеих цепей обратной связи является необязательным. По этой причине полосовой фильтр может быть построен с использованием одной цепи обратной связи, обеспечивающей пропускание только низких частот, а другой – только высоких. На рис. 8.12 приведена схема полосового фильтра, пропускающего частоты в полосе человеческой речи (300–3000 Гц). На рис. 8.13 приведена амплитудно-частотная характеристика этого фильтра.

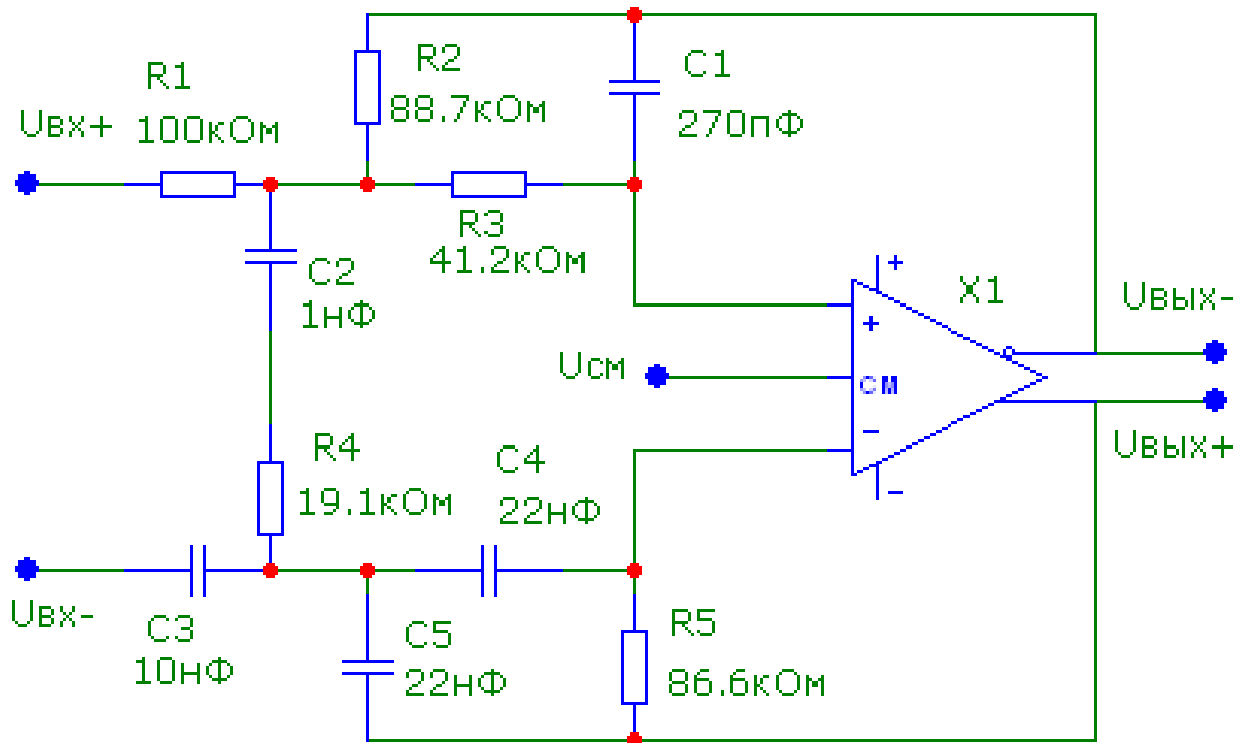


Рис. 8.12. Дифференциальный фильтр звуковых частот

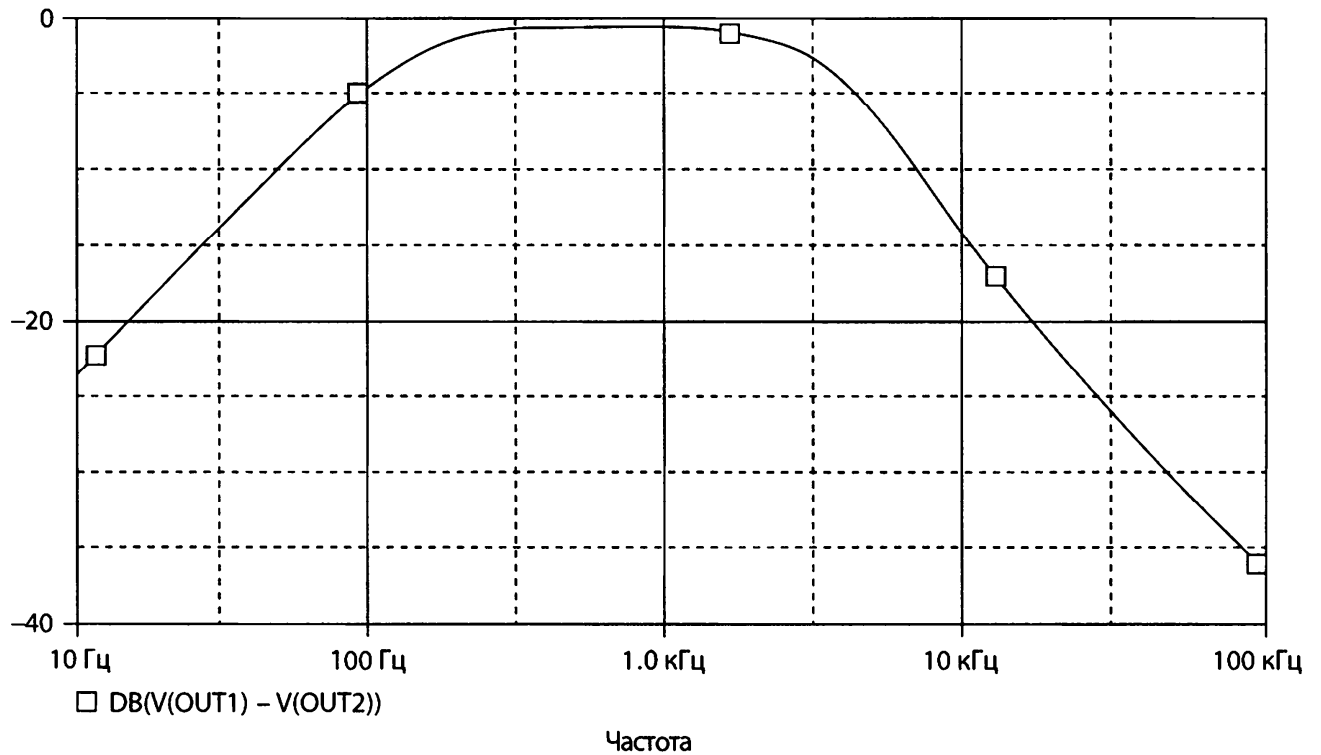


Рис. 8.13. Амплитудно-частотная характеристика фильтра звуковых частот

## Биквадратный фильтр

Биквадратный фильтр (рис. 8.14) представляет собой двухполюсную схему, которую можно использовать как фильтр нижних или верхних частот, полосовой или режекторный фильтр. При использовании операционных усилителей с несимметричными выходами для реализации такой схемы требуются три операционных усилителя, причём третий операционный усилитель используется только для инвертирования сигналов с выхода предыдущего операционного усилителя. В полностью дифференциальном операционном усилителе такая инверсия является его неотъемлемым свойством, что позволяет сократить требуемое количество операционных усилителей до двух, исключив третий операционный усилитель.

Полосовой фильтр	Фильтр нижних частот
Центральная частота	Граничная частота
$F_0 = \frac{1}{2\pi R C}$	$F_{ГР} = \frac{1}{2\pi R C}$
$R_3 = R$	$R_3 = R$
$C_1 = C_2 = C$	$R_2 = 0,707 R$
Коэффициент усиления по напряжению $K = -\frac{R_2}{R_1}$	Коэффициент усиления по напряжению $K = -\frac{R_2}{R_1}$
$R_2 = Q R$	$C_1 = C_2 = C$

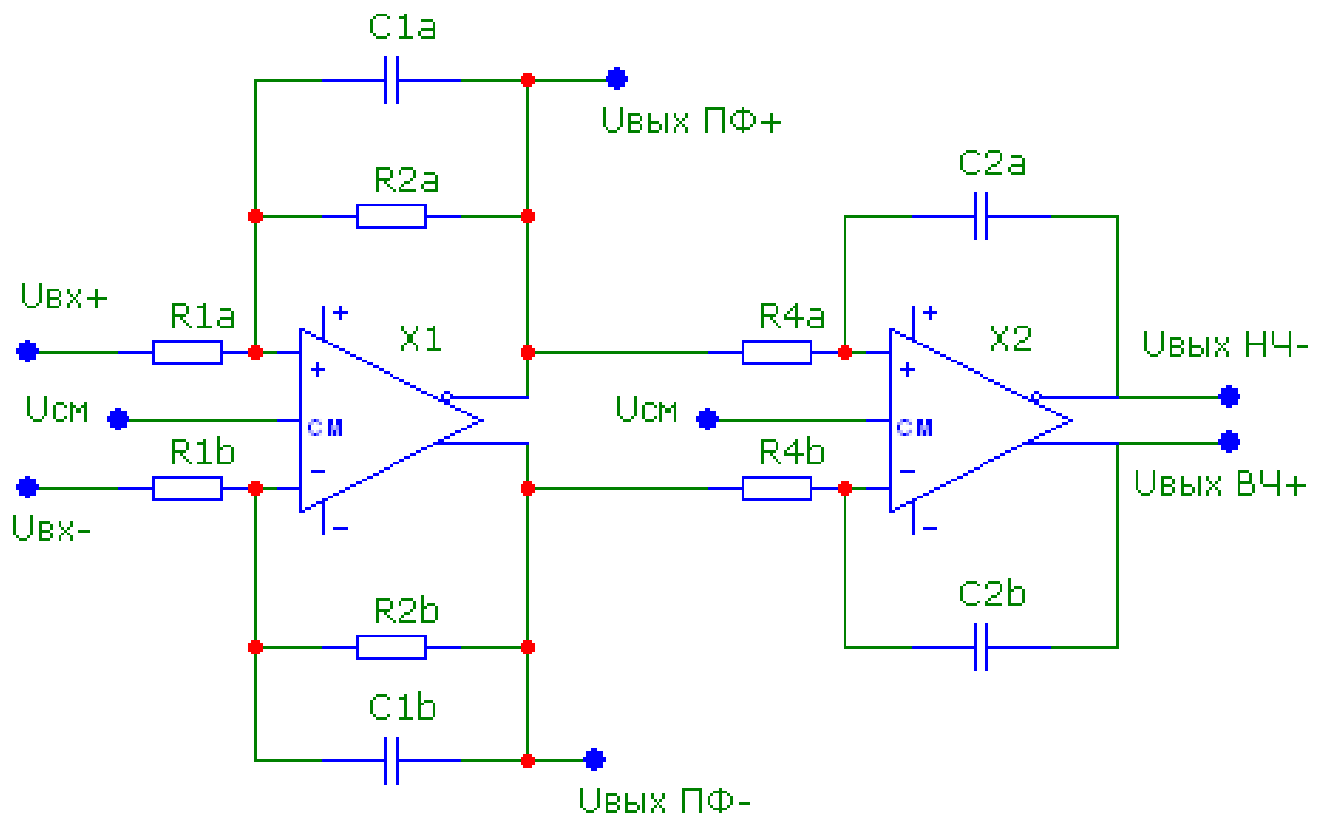


Рис. 8.14. Биквадратный фильтр на полностью дифференциальных операционных усилителях

Для фильтра верхних частот и режекторного фильтра необходимость использования третьего операционного усилителя сохраняется, и по этой причине применение данной схемы выигрыша не даёт. Тем не менее все четыре функции фильтрации при использовании только двух полностью дифференциальных операционных усилителей могут выполнять другие топологии.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мамонкин И.Г. Усилительные устройства. – М.: Связь, 1977. – 357 с.
2. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. – 3-е изд. – М.: Додэка-XXI, 2011. – 528 с.
3. Практикум по радиоэлектронике: методическое руководство / Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск, 2009. – 70 с.
4. Картер Б., Манчини Р. Операционные усилители для всех. – М.: Додэка-XXI, 2011. – 544 с.
5. Прянишников В.А. Электроника: полный курс лекций. – 3-е изд., испр. и доп. – СПб.: Учитель и ученик: КОРОНА-принт, 2003. – 416 с.
6. Фолкенберри Л. Применение операционных усилителей и линейных интегральных схем. – М.: Мир, 1995. – 250 с.
7. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: справочное руководство: пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 512 с.
8. Мошиц Г., Хорн П. Проектирование активных фильтров: пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 320 с.
9. Мамонкин И.Г. Усилительные устройства. – 2-е изд. – М.: Связь, 1977. – С. 310–346.
10. Масленников В.В., Сироткин А.П. Избирательные RC-усилители. – М.: Энергия, 1980. – 217 с.



**Кравец Андрей Владимирович**

**Учебно-методическое пособие**

по курсу

**Схемотехника аналоговых электронных устройств**

**Часть 2**

Ответственный за выпуск Кравец А.В.

Редактор Проценко И.А.

Корректор Селезнева Н.И.

Подписано в печать

Заказ №

Тираж 20 экз.

Формат 60x84 1/16. Усл. п.л. – 5,0. Уч.-изд. л. – 4,9.

---

Издательство Южного федерального университета

344091, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1.

Тел. (863)2478051.

Отпечатано в Отделе полиграфической, корпоративной и  
сувенирной продукции

ИПК КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ.

ГСП 17 А, Таганрог, 28, Энгельса, 1.

Тел. (8634)371717, 371655.