

4. Усилительные схемы, выполненные на основе микросхем операционных усилителей (ОУ)

Введение

При расчете усилителей на микросхемах ОУ целесообразно использовать известные при расчете линейных электрических цепей метод наложений (суперпозиции) и принцип “мнимой земли”.

Принцип “мнимой земли” состоит в следующем. Положим, что ОУ идеален и его коэффициент усиления равен бесконечности. При этом, если ОУ охвачен отрицательной обратной связью и работает в линейном режиме, напряжение между его входами будет равно нулю. Действительно в схеме инвертирующего усилителя на ОУ (рис. 4.1) выполняются следующие соотношения:

$$-E_2 < U_{\text{ВЫХ}} < E_1,$$

где $U_{\text{ВЫХ}}$ - напряжение на выходе ОУ, работающего в линейном режиме, $E=E_1=E_2$ - напряжение питания.

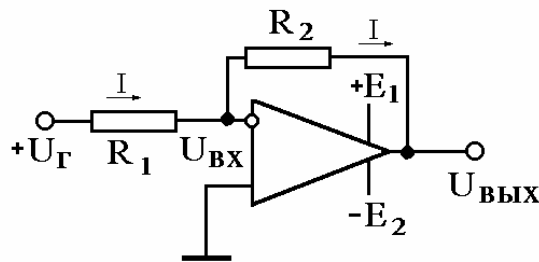


Рис. 4.1. Схема инвертирующего усилителя на ОУ.

По определению $U_{\text{ВЫХ}} = KU_{\text{ВХ}}$, где K - коэффициент усиления ОУ. Отсюда при $K=\infty$ и т.к. $U_{\text{ВЫХ}}$ конечно, $U_{\text{ВХ}}=0$. Поскольку напряжение на инвертирующем входе равно нулю, в названии принципа используется слово “земля”. Но “земля” эта “мнимая” (виртуальная), т.к. ток от источника $U_{\text{Г}}$, подключенного к инвертирующему входу ОУ через сопротивление R_1 , в эту “мнимую землю” не течет, поскольку для идеального ОУ $R_{\text{ВХ}}=\infty$, а течет по резистивной цепи обратной связи. В итоге получаем:

$$I = \frac{U_{\text{Г}}}{R_1} = -\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_2} \quad \text{или} \quad U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{R_2}{R_1} U_{\text{Г}}.$$

Задача 4.1. Рассчитать напряжение на выходе усилителя-сумматора, приведенного на рис. 4.2, полагая, что ОУ идеален. Значения элементов схемы следующие: $R_1=R_2=R_5=5\text{кОм}$, $R_3=R_4=10\text{кОм}$, а $U_{Г1}=+1\text{В}$, $U_{Г2}=-2\text{В}$, $U_{Г3}=-3\text{В}$.

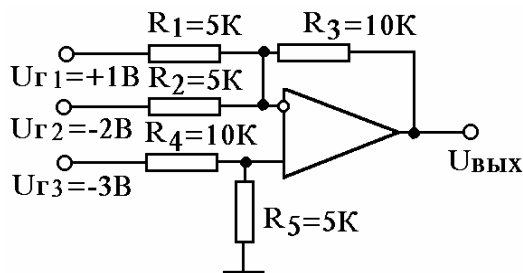


Рис. 4.2. Схема усилителя-сумматора.

Решение: 1. При расчете воспользуемся методом наложений. Полагаем, что $U_{Г2}=U_{Г3}=0$. При этом получим схему, представленную на рис. 4.3,а. Поскольку для идеального ОУ входные токи равны нулю, по сопротивлениям, находящимся между общей шиной и неинвертирующим входом, ток протекать не будет. При этом можно считать, что неинвертирующий вход заземлен. Исходя из принципа “мнимой земли”, ток по сопротивлению R_2 , присоединенному между инвертирующим входом и землей, не течет, т.к. в противном случае $U_{ВХ}>0$ и $U_{ВЫХ}=KU_{ВХ}=-\infty$, что невозможно. Отсюда получаем окончательно упрощенную схему для расчета (рис. 4.3,б).

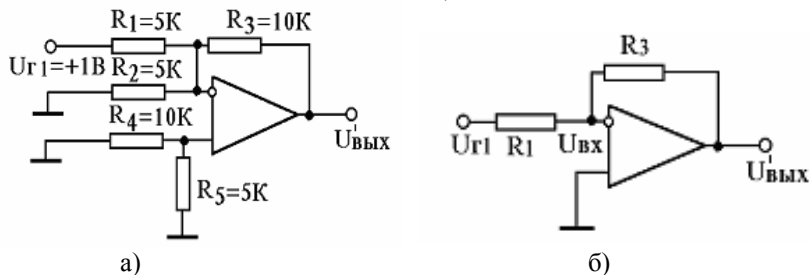


Рис. 4.3. Упрощенные схемы усилителя-сумматора для случая $U_{Г2}=U_{Г3}=0$.

$$\text{Отсюда } U'_{\text{ВЫХ}} = -U_{Г1} \frac{R_3}{R_1} = -2\text{В}.$$

2. Аналогично можно провести расчет для случая $U_{Г1}=U_{Г3}=0$:

$$U''_{\text{ВЫХ}} = -U_{Г2} \frac{R_3}{R_2} = 4\text{В}.$$

3. Для расчета выходного напряжения от источника $U_{Г3}$, воспользуемся упрощенной схемой, приведенной на рис. 4.4,а.

3.1. Определим напряжение U_0 : $U_0 = U_{Г3} \frac{R_5}{R_4 + R_5} = -1\text{В}.$

Учитывая, что сопротивления R_1 и R_2 включены параллельно, получаем эквивалентную схему для расчета представленную на рис. 4.4,б.

В данной схеме учтено, что $R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$

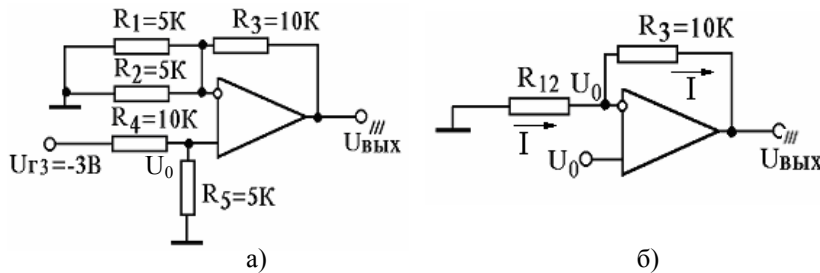


Рис. 4.4 Упрощенные схемы для расчета усилителя-сумматора для случая $U_{Г1}=U_{Г2}=0$.

3.2. На основании принципа “мнимой земли” напряжение на инвертирующем входе равно напряжению на неинвертирующем входе, т.к. напряжение между входами ОУ равно нулю. Отсюда можно поучить формулу для тока, протекающего по цепи обратной связи:

$$I = \frac{U'''_{\text{ВЫХ}}}{R_3 + R_{12}} = \frac{U_0}{R_{12}} \text{ или } U'''_{\text{ВЫХ}} = U_0 \left(1 + \frac{R_3}{R_{12}} \right) = 5U_0 = -5\text{В}.$$

4. Суммируя все полученные выходные напряжения, получаем результирующее выходное напряжение на выходе усилителя от воздействия всех источников напряжения:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U'_{\text{ВЫХ}} + U''_{\text{ВЫХ}} + U'''_{\text{ВЫХ}} = -2\text{В} + 4\text{В} - 5\text{В} = -3\text{В}.$$

Задача 4.2. Рассчитать ток в сопротивлении R_2 в схеме преобразователя напряжения в ток, приведенной на рис. 4.5. Определить условия, при которых ток не зависит от величины сопротивления R_2 . При расчете учесть, что $R_1=1 \text{ кОм}$, $R_2=2 \text{ кОм}$, $U_1=+1 \text{ В}$.

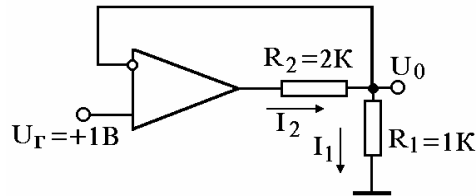


Рис. 4.5. Схема преобразователя напряжения в ток, выполненная на ОУ.

Решение. 1. Из принципа “мнимой земли” разность потенциалов между входами ОУ равна нулю. Отсюда $U_0 = U_Г$.

2. По сопротивлению R_1 протекает ток I_1 :

$$I_1 = \frac{U_0}{R_1} = \frac{U_Г}{R_1} = 1 \text{ мА}.$$

3. Поскольку ОУ идеален и его входные токи равны нулю, ток I_1 протекает по сопротивлению R_2 и при небольших значениях R_2 от него не зависит, т. е. $I_2 = I_1 = 1 \text{ мА}$.

4. Для определения ограничений тока I_2 найдем значения напряжения на выходе ОУ: $U_{\text{ВЫХ}} = I_1(R_1 + R_2)$.

5. Положим, что напряжение питания ОУ равно $+15 \text{ В}$ и -15 В , а также, что максимальное выходное напряжение ОУ равно $\pm 12 \text{ В}$. Отсюда получаем максимальное значение сопротивления R_2 , при котором ток I_2 не зависит от R_2 :

$$R_{2\text{ МАКС}} = \frac{U_{\text{ВЫХ, МАКС}} - IR_1}{I} \approx 11 \text{ кОм}.$$

Таким образом, ток в сопротивлении R_2 не зависит от его величины, пока выполняется следующее условие $0 < R_2 < 11 \text{ кОм}$.

Задача 4.3. Рассчитать коэффициент передачи инвертирующего усилителя, полагая, что ОУ идеален (схема приведена на рис.4.6).

Решение. 1. ОУ охвачен отрицательной обратной связью, поэтому можно использовать принцип “мнимой земли”.

$$\text{Отсюда } I_1 = \frac{U_Г}{R_1}, \quad I_1 = I_4, \quad U_0 = -I_1 R_4 = -U_Г \frac{R_4}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U_0}{R_2} = -U_Г \frac{R_4}{R_2 R_1}.$$

2. Ток I_3 является суммой токов I_1 и I_2 и равен:

$$I_3 = \frac{U_Г}{R_1} + U_Г \frac{R_4}{R_2 R_1} = \frac{U_Г}{R_1} \left(1 + \frac{R_4}{R_2} \right).$$

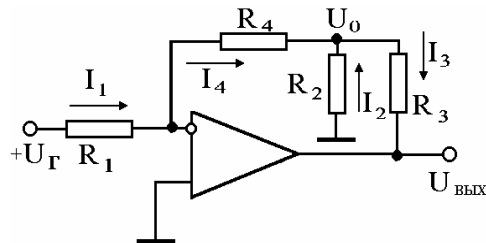


Рис. 4.6. Схема инвертирующего усилителя.

3. Учитывая это, можно выразить $U_{\text{ВЫХ}}$:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -U_0 - I_3 R_3 = -\frac{U_{\Gamma}}{R_1} (R_4 + R_3) \left(1 + \frac{R_4 R_3}{(R_4 + R_3) R_2} \right).$$

4. Отсюда коэффициент передачи инвертирующего усилителя равен:

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\Gamma}} = -\frac{(R_4 + R_3)}{R_1} \left(1 + \frac{R_4 R_3}{(R_4 + R_3) R_2} \right).$$

Замечание: Данная схема используется в случае, если сопротивление R_2 в простейшей схеме усилителя-инвертора на ОУ получается чрезмерно большой величины, что может привести к большим погрешностям из-за входных токов ОУ, шума резистора R_2 и влияния шумовых токов ОУ.

Задача 4.4. Найти коэффициент усиления $K(j\omega)$ схемы, приведённой на рис. 4.7, при подаче на вход синусоидального напряжения.

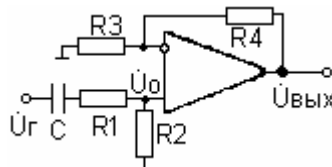


Рис. 4.7. Схема неинвертирующего усилителя переменного тока

Решение. 1. Определим передачу входного напряжения на неинвертирующий вход ОУ. Поскольку ОУ идеален, в данном случае требуется рассчитать коэффициент передачи пассивной цепи, состоящей из резисторов R_1 , R_2 и конденсатора C . Используя материал раздела «Пассивные RC-цепи», получаем:

$$\dot{U}_0 = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + \frac{1}{j\omega C}} \dot{U}_{\Gamma} = \frac{j\omega C R_2}{1 + j\omega C (R_1 + R_2)} \dot{U}_{\Gamma}.$$

Учитывая, что напряжение U_0 усиливается неинвертирующим усилителем в $\left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)$ раз, получаем:

$$K(j\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\Gamma}} = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \frac{j\omega CR_2}{1 + j\omega C(R_1 + R_2)}.$$

Контрольные вопросы

1. В чем заключается метод наложений?
 2. Для каких электрических цепей справедлив этот метод?
 3. Чем ограничено напряжение на выходе ОУ?
 4. Что такое идеальный ОУ?
 5. В чем заключается принцип “мнимой земли”?
 6. Какие ограничения использования принципа “мнимой земли” Вам известны?
 7. Какие усилительные каскады используют на входе интегральных ОУ?
 8. Какие усилительные каскады используют на выходе ОУ?
 9. Почему для питания ОУ используют напряжение двух полярностей?
 10. Какое напряжение будет на выходе ОУ без обратной связи, если на инвертирующий вход подать напряжение +1В, а неинвертирующий вход заземлить?
 11. Какое напряжение будет на выходе ОУ без обратной связи, если на инвертирующий вход подать напряжение -1В, а на неинвертирующий вход подать напряжение -2В?
 12. В чем отличие реального ОУ от идеального?
 13. Какой вид будет иметь АЧХ усилителя, выполненного на идеальном ОУ?
 14. Какое напряжение будет на выходе ОУ, если включить питание, а оба входа ОУ заземлить?
 15. Какими должны быть входные и выходные сопротивления у идеального ОУ?
 16. Что такое напряжение смещения?
 17. Почему входные токи в микросхемах ОУ не равны?
- Для ответа на вопросы, воспользуйтесь литературой, рекомендованной в конце учебного пособия [1-7, 10, 11].