

Дифференциальные усилители на ОУ

По определению операционный усилитель есть дифференциальный усилитель с бесконечным коэффициентом усиления. Однако непосредственное применение ОУ в качестве дифференциального практически исключено из-за большого и неконтролируемого коэффициента усиления.

Поэтому используются схемы с обратной связью. Основу простейшего ДУ на ОУ составляет схема комбинированного включения ОУ, модифицированная так, чтобы выровнять абсолютные значения коэффициентов усиления относительно инвертирующего и неинвертирующего входов (рис. 1а).

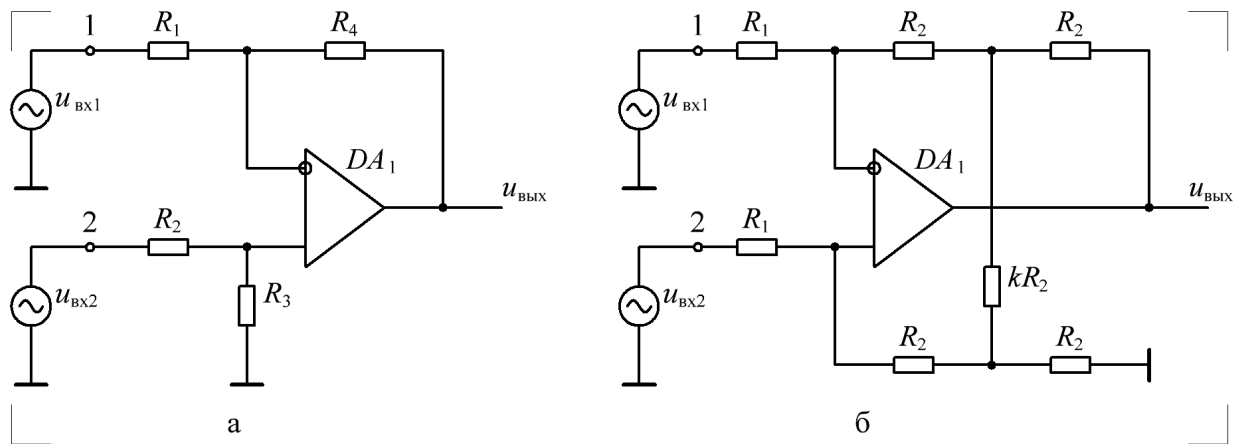


Рис. 1

Напряжение на выходе находится как сумма двух составляющих, обусловленных сигналами на входах 1 и 2

$$u_{\text{ВЫХ}} = u_{\text{ВХ2}} \frac{R_3}{R_2 + R_3} \left(1 + \frac{R_4}{R_1} \right) - u_{\text{ВХ1}} \frac{R_4}{R_1} = u_{\text{ВХ2}} \left(\frac{1 + \frac{R_4}{R_1}}{1 + \frac{R_2}{R_3}} \right) - u_{\text{ВХ1}} \frac{R_4}{R_1} .$$

Если $\frac{R_3}{R_2} = \frac{R_4}{R_1}$, то $u_{\text{ВЫХ}} = (u_{\text{ВХ2}} - u_{\text{ВХ1}}) \frac{R_4}{R_1}$ и усиливается разность

входных сигналов с дифференциальным коэффициентом усиления, равным

$$K_{\text{д}} = \frac{R_4}{R_1} .$$

Недостатки простейшего ДУ на ОУ:

- необходимость точного выдерживания соотношения между резисторами;
- низкое входное сопротивление;

- сложность регулировки усиления за счет одновременного изменения номиналов двух резисторов.

На рис. 1б приведена схема, позволяющая регулировать усиление одним резистором. Эту схему можно рассматривать как обобщение схемы с 3-полюсником в цепи обратной связи. При условии, что пары резисторов, обозначенные одинаковым индексом, имеют одинаковые номиналы, выходное напряжение находится по формуле

$u_{\text{ВЫХ}} = (u_{\text{ВХ}2} - u_{\text{ВХ}1}) 2 \frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{1}{k}\right)$, а дифференциальный

коэффициент усиления равен $K_{\text{д}} = 2 \frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{1}{k}\right)$. При $R_2 = R_1$ зависимость

дифференциального коэффициента усиления от k приведена на рис. 2.

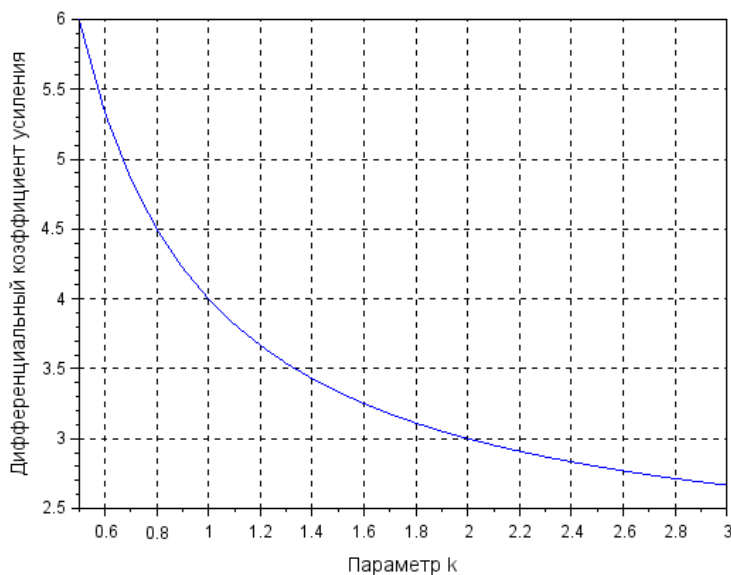


Рис. 2

Результат моделирования данной схемы приведен на рис. 3.

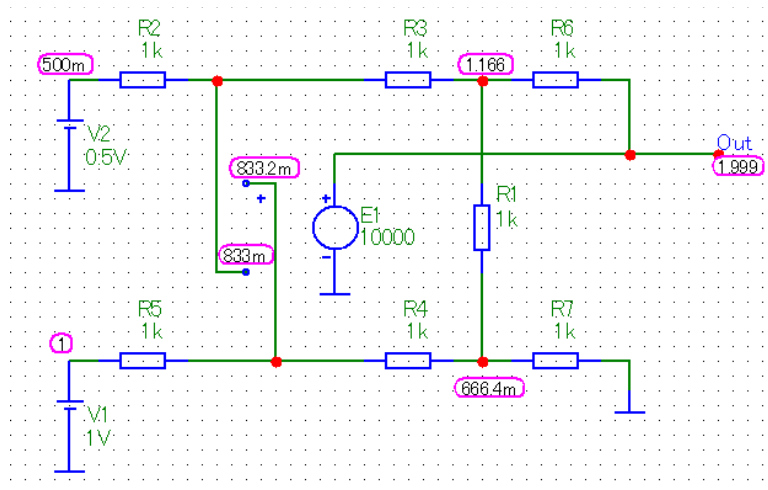


Рис. 3

Здесь в качестве модели ОУ использован источник напряжения, управляемый напряжением с коэффициентом передачи 10000. Номинальные значения всех резисторов выбраны равными. В этом случае теоретический коэффициент усиления равен 4. Из рисунка видно, что при разности входных сигналов 0,5 В выходное напряжение составляет 1,999, что почти в 4 раза больше входного дифференциального сигнала. При $k = 2$ теоретический коэффициент равен 3. В результате моделирования этого случая (рис. 4) выходное напряжение составляет 1,499 В, что почти в 3 раза больше дифференциального входного напряжения.

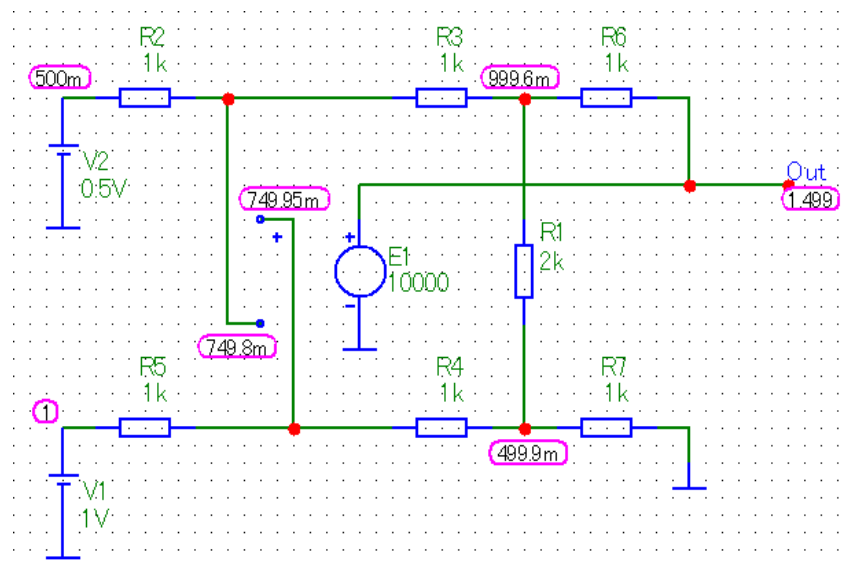


Рис. 4

Повышение входного сопротивления обеспечивается схемами, изображенными на рис. 5.

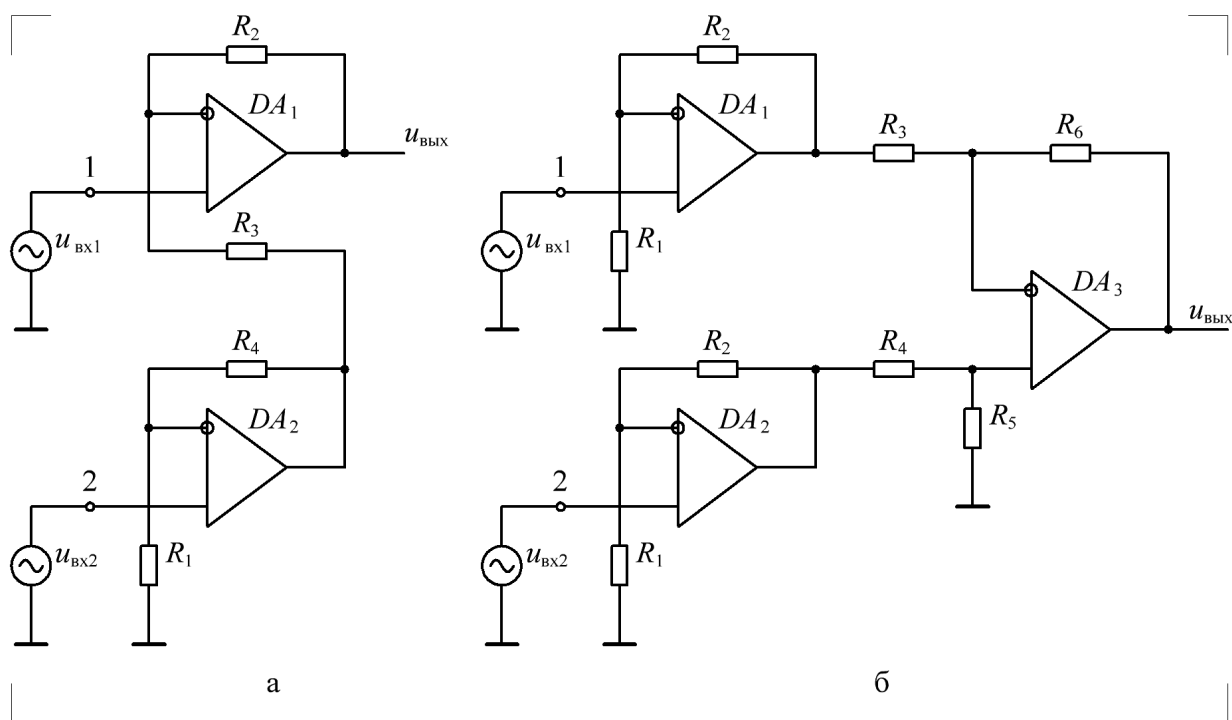


Рис. 5

В схеме рис. 5а сигнал от входа 1 поступает на выход через неинвертирующий усилитель DA_1 с коэффициентом передачи $K_1 = 1 + R_2/R_3$. Сигнал от входа 2 сначала усиливается неинвертирующим усилителем на DA_2 , а затем усилителем DA_1 в инвертирующем включении. Коэффициент усиления по отношению к входу 2 равен

$$K_2 = \left(1 + \frac{R_4}{R_1}\right) \cdot \left(-\frac{R_2}{R_3}\right) = -\left(\frac{R_2}{R_3} + \frac{R_2}{R_3} \cdot \frac{R_4}{R_1}\right). \text{ Если}$$

$\frac{R_3}{R_2} = \frac{R_4}{R_1}$, то коэффициенты усиления по отношению к входам 1 и 2 оказываются одинаковыми по модулям и противоположными по знаку. Дифференциальный коэффициент усиления $K_d = 1 + R_2/R_3$.

В схеме на рис. 5б DA_3 с резисторами $R_3...R_6$ – это простейший дифференциальный усилитель по схеме рис. 1а, ОУ DA_1 и DA_2 – неинвертирующие усилители с одинаковыми коэффициентами усиления. Фактически обе схемы повышают входное сопротивление простейшей схемы ДУ.

Дальнейшее совершенствование схем ДУ связано с обеспечением возможности регулировки усиления с помощью только одного резистора при высоком входном сопротивлении (рис. 6).

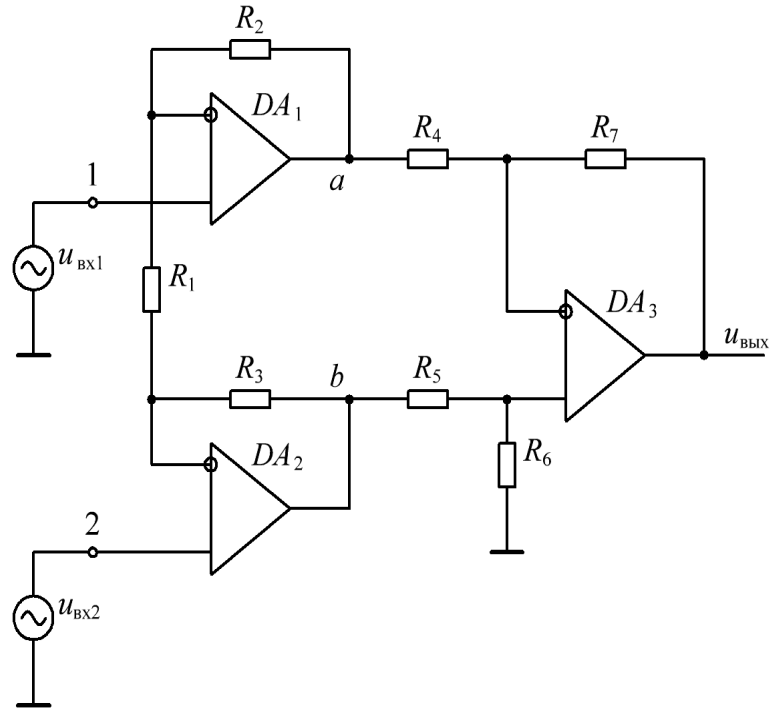


Рис. 6

В схеме рис. 6 влияние резистора R_1 можно рассматривать независимо по отношению ко входу 1 и ко входу 2. Найдем напряжения в точках a и b .

$$u_a = u_{\text{BX1}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + u_{\text{BX2}} \left(-\frac{R_2}{R_1} \right),$$

$$u_b = u_{\text{BX1}} \left(1 + \frac{R_3}{R_1} \right) + u_{\text{BX2}} \left(-\frac{R_3}{R_1} \right).$$

Вычитая второе уравнение из первого, получаем

$$u_a - u_b = (u_{\text{BX1}} - u_{\text{BX2}}) \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_3}{R_1} \right).$$

Разность $u_a - u_b$ усиливается дальше дифференциальным усилителем на DA_3 , для которого узел a является инвертирующим входом, а узел b – неинвертирующим. При единичном коэффициенте усиления этого каскада и при $R_2 = R_3 = R$ зависимость коэффициента усиления от отношения $k = R_1 / R$ показана на рис. 7.

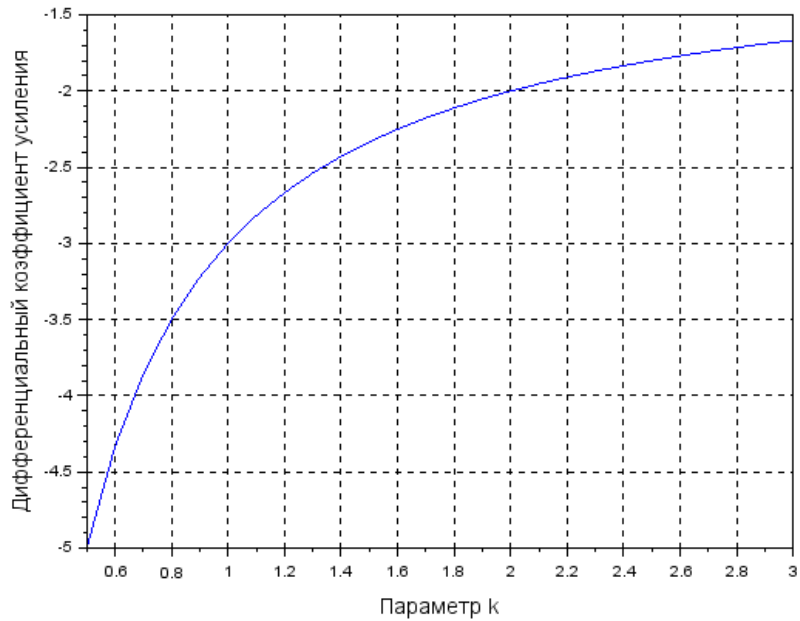


Рис. 7

Результат имитационного моделирования данной схемы при $k = 1$ (все резисторы одинаковы) приведен на рис. 8.

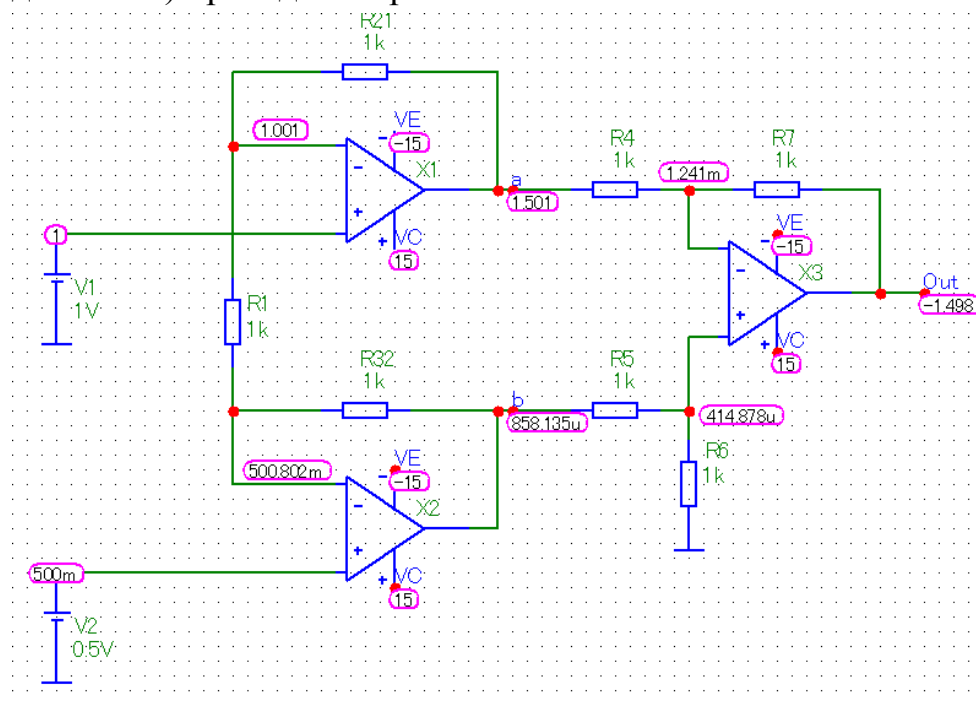


Рис. 8

В данном случае использованы модели операционных усилителей *LM741*, входящие в библиотеку моделей демонстрационной версии *MicroCAP*.

Как видно из графика рис. 7 и карты напряжений рис. 8 сквозной дифференциальный коэффициент усиления рассматриваемой схемы составляет минус 3. Результат моделирования схемы при $R_1 = 2$ кОм приведен на рис. 9.

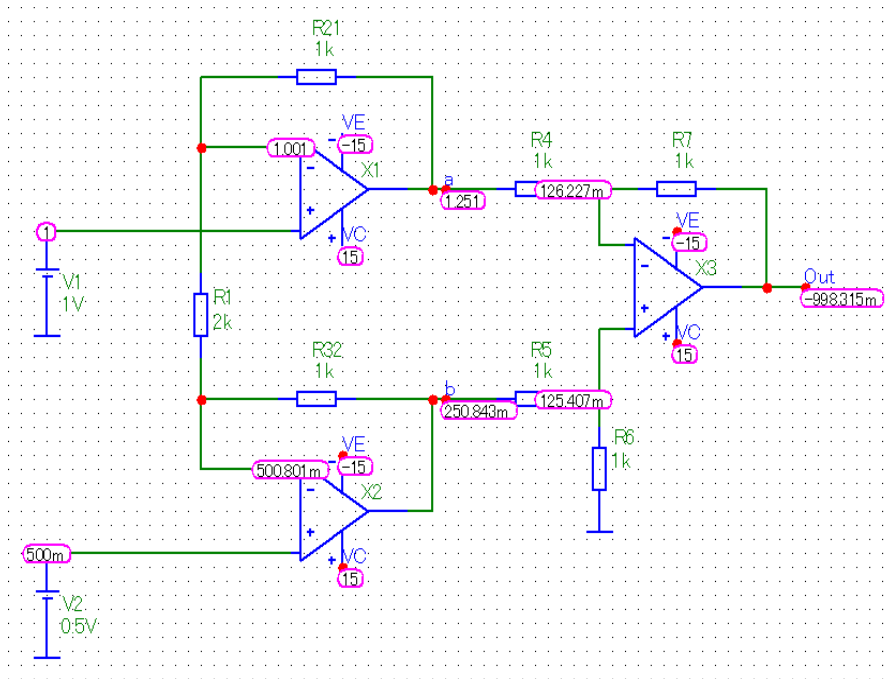


Рис. 9

Как видно из рисунка при $R_1 = 2 \text{ кОм}$ дифференциальный коэффициент усиления равен минус 2, что соответствует теоретическому (рис. 7).