

## Операционные усилители

Операционным усилителем (ОУ) называют дифференциальный усилитель постоянного тока, обладающий специальными частотными характеристиками, полученными за счёт внешней отрицательной обратной связи.

### Общие понятия

#### Виды операционных усилителей

1. Дифференцирующие.
2. Интегрирующие.
3. Суммирующие.
4. Избирательные и др.

На рис. 1 и рис. 2 представлено условное графическое обозначение ОУ. Значки  $\Delta$ ,  $\infty$  обозначают, что усилитель имеет значительный коэффициент усиления по напряжению ( $K_U \approx 10^6$ ), большое входное сопротивление ( $R_{ВХ} \approx 10^7$  Ом), при этом его выходное сопротивление весьма низкое ( $R_{ВЫХ} \approx 10^2$  Ом).

Операционные усилители изготавливаются в виде интегральных микросхем различных серий, например, К140УД14; К140УД17; К153УД5; КМ551УД1; К574УД3 и др. в многокаскадном варианте с двумя входными электродами и одним выходным. **Н** – неинвертирующий вход, **И** – инвертирующий вход.

При неинвертирующем входе сигнал выхода и сигнал входа находятся в одной фазе (сигналы синфазны).

При инвертирующем входе сигналы входа и выхода – противофазны.

Операционные усилители могут иметь дополнительные электроды для управления. Вывод «земля» может быть реализован либо физически (рис. 2а), либо потенциально (общий провод источника питания  $+U$ ;  $-U$ , рис. 2б).

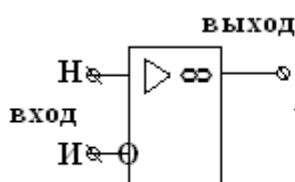


Рис. 1.

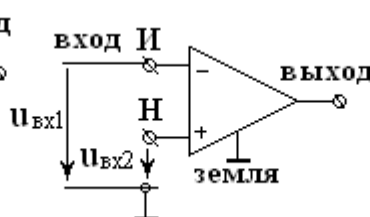


Рис. 2а.

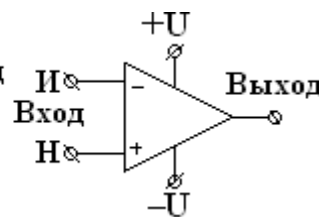


Рис. 2б.

Для конструирования инвертирующего ОУ (рис. 3. в редакции Multisim) напряжение входа (через резистор R1) и напряжение обратной связи (через резистор R2) подаются одновременно на инвертирующий вход. На рис. 4. представлены характеристики входа и выхода, где с учётом масштабных параметров можно рассчитать коэффициент усиления рассматриваемого ОУ.  $K_{УИ} = U_2 / U_1 = 5$  (масштаб для U1 – левая шкала, масштаб для U2 – правая шкала).

Инвертирующий ОУ

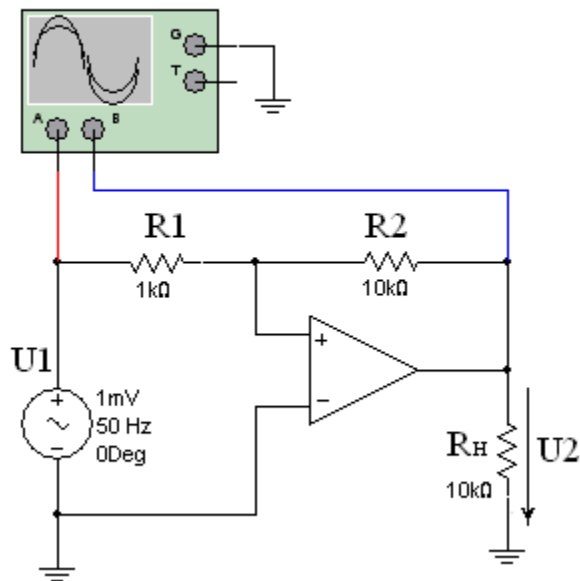


Рис. 3.

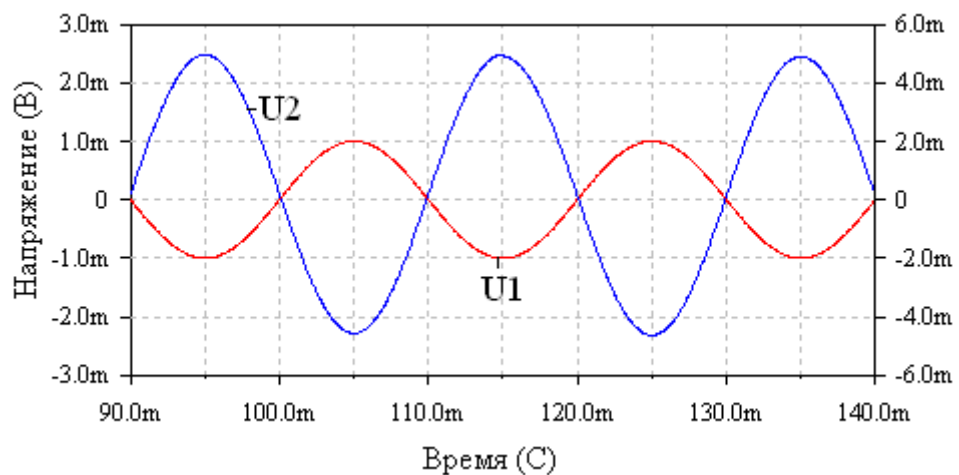


Рис. 4.

На рис. 5. рис. 6. представлены соответственно принципиальная схема и характеристики неинвертирующего операционного усилителя в редакторе Multisim.

### Неинвертирующий ОУ

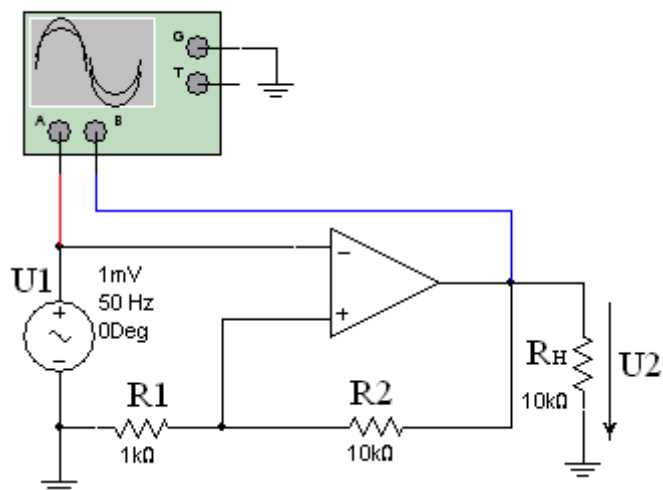


Рис. 5.

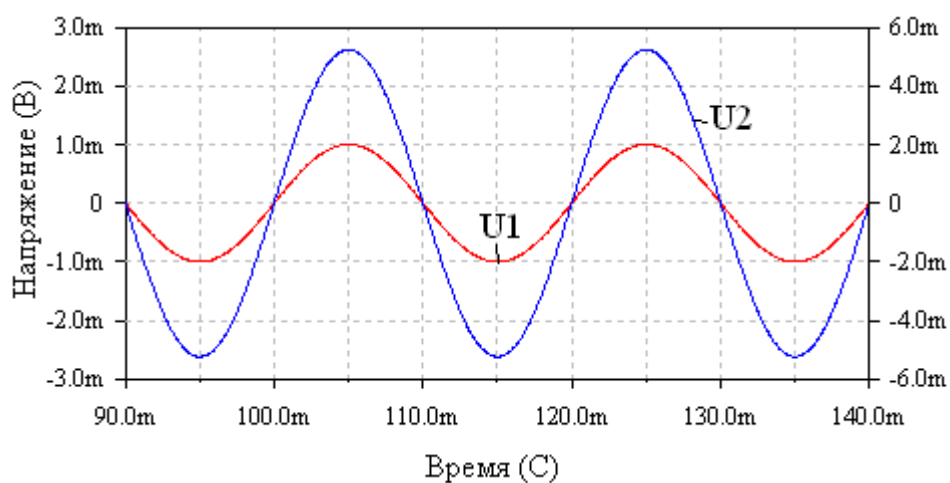


Рис. 6.

### 1. Обобщённая модель операционного усилителя

На рис. 1.1. схема обобщённого операционного усилителя операционного усилителя с отрицательной внешней параллельной обратной связью.

*Напоминаем!* При *инвертирующем* входе, напряжение на выходе ОУ противофазно напряжению входа. И, наоборот, при *неинвертирующем* входе напряжение на выходе ОУ синфазно входному напряжению.

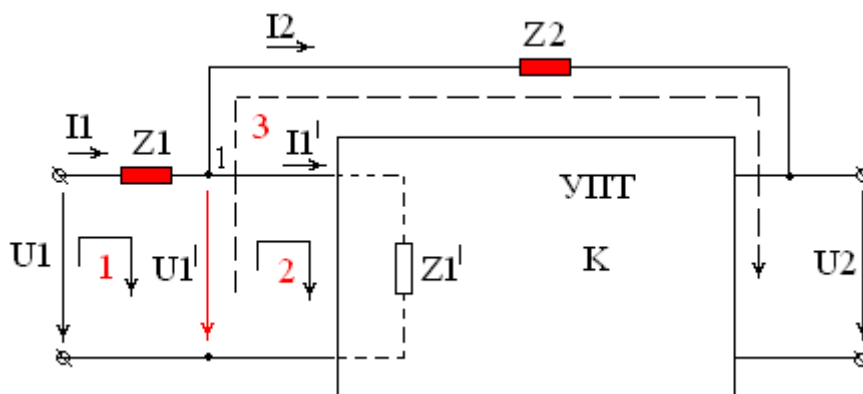


Рис. 1.1.

С учётом *инвертирующего* входа:

$$\underline{U}_2 = -K \cdot \underline{U}_1^| \quad (1),$$

где  $K$  – коэффициент усиления усилителя постоянного тока (УПТ).

для узла 1 имеем:  $\underline{I}_1 - \underline{I}_1^| - \underline{I}_2 = 0 \quad (2)$

Для контуров 1, 2, 3 – соответственно имеем:

$$\underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 + \underline{U}_1^| - \underline{U}_1 = 0; \quad (3)$$

$$\underline{I}_1^| \cdot \underline{Z}_1^| - \underline{U}_1^| = 0; \quad (4)$$

$$\underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_2 - \underline{U}_1^| + \underline{U}_2 = 0; \quad (5)$$

Подставив в уравнение (2) токи  $\underline{I}_1$ ,  $\underline{I}_1^|$ ,  $\underline{I}_2$  (из уравнений 3, 4, 5) с учётом уравнения (1), после преобразования, получим

$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_1} + \underline{U}_2 \cdot \left( \frac{1}{K \cdot \underline{Z}_1} + \frac{1}{K \cdot \underline{Z}_1^|} + \frac{1}{K \cdot \underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_2} \right) = 0.$$

Получим коэффициент усиления с учётом обратной связи

$$K_{oc} = - \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = - \frac{1}{\underline{Z}_1 \cdot \left( \frac{1}{K \cdot \underline{Z}_1} + \frac{1}{K \cdot \underline{Z}_1^|} + \frac{1}{K \cdot \underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_2} \right)}, \quad (6)$$

Т.к. коэффициент усиления УПТ велик ( $K > 10000$ ), то выражение (6) легко упростить.

$$K_{oc} \approx - \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1}. \quad (7)$$

В зависимости от характера сопротивлений  $\underline{Z}_2$  и  $\underline{Z}_1$  будет определяться и характер (название) операционного усилителя.

## 2. Дифференцирующий операционный усилитель

На рис. 2.1. представлена блок-схема дифференцирующего ОУ, здесь

$$\underline{Z}_2 = R, \text{ а } \underline{Z}_1 = -j/\omega \cdot C.$$

В этом случае  $K_{oc} = -j\omega \cdot R \cdot C.$  (смотри рис. 3.2 и рис. 3.3.)

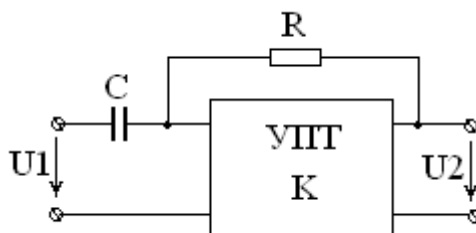


Рис. 2.1.

С увеличением частоты входного сигнала, растёт и коэффициент усиления.

## 3. Интегрирующий операционный усилитель

На рис. 3.1. представлена блок-схема интегрирующего ОУ, где

$$\underline{Z}_1 = R, \text{ а } \underline{Z}_2 = -j/\omega \cdot C.$$

В этом случае  $K_{oc} = j / \omega \cdot R \cdot C.$

С увеличением частоты входного сигнала, снижается коэффициент усиления.

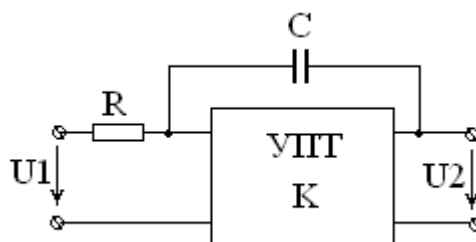


Рис. 3.1.

На рис. 3.2. представлена принципиальная схема, состоящая из двух схем операционных усилителей (дифференцирующего и интегрирующего) в редакторе Multisim.  $U1_d$ ,  $U2_d$  – соответственно напряжение входа и выхода дифференцирующего ОУ.  $U1_i$ ,  $U2_i$  – соответственно напряжение входа и выхода интегрирующего ОУ.

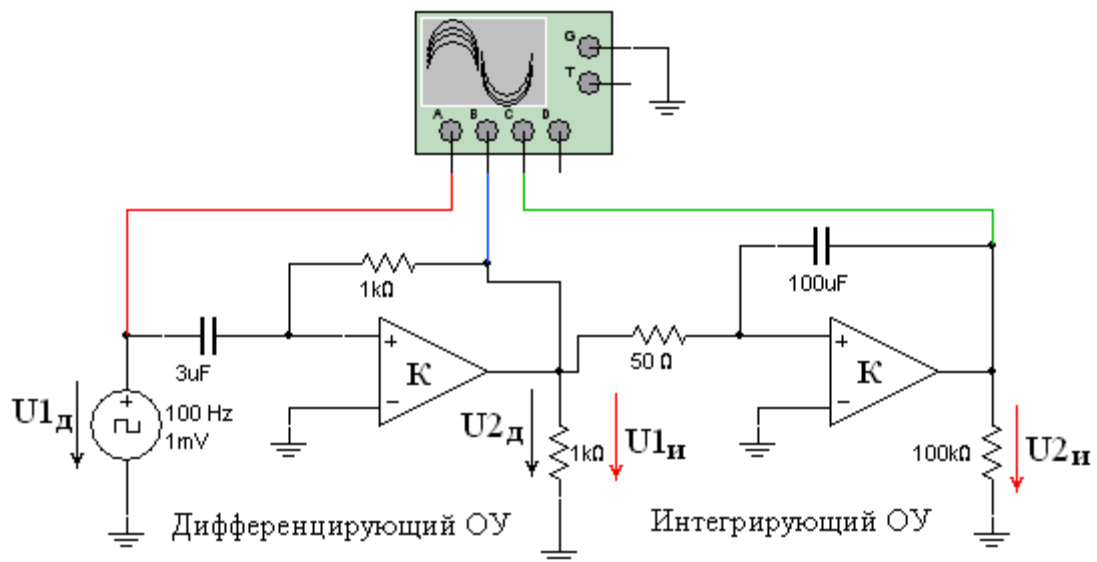


Рис. 3.2.

Здесь, сигнал выхода дифференцирующего ОУ является сигналом входом интегрирующего ОУ.

На рис. 3.3. представлены входные и выходные характеристики рассматриваемых операционных усилителей в редакторе Multisim. По характеру кривых  $U1_д$ ,  $U2_д$  и  $U2_и$  можно определить, какая операция выполнена.

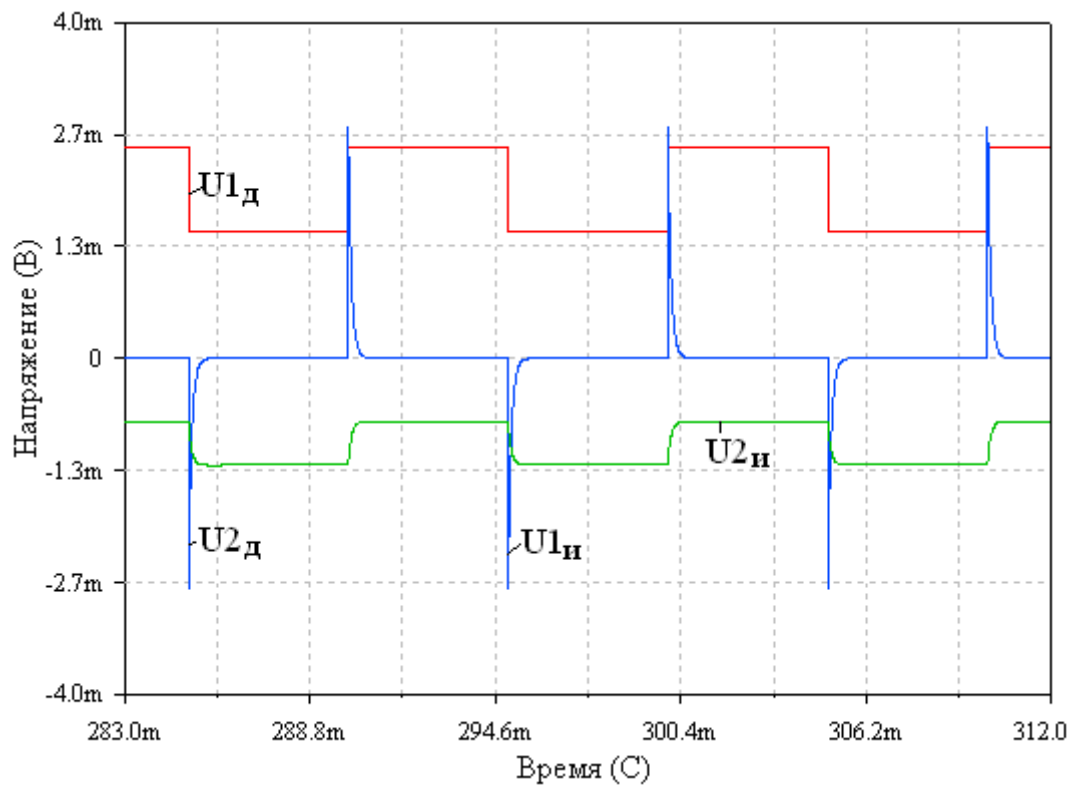


Рис. 3.3.

#### 4. Суммирующий операционный усилитель

На рис. 4.1. представлена блок-схема суммирующего ОУ, где

$$\underline{Z}_1 = R1, \quad \underline{Z}_2 = R2, \quad K_{oc} = -R2 / R1.$$

В этом случае  $\underline{U2} = -(\underline{U11} + \underline{U12} + \underline{U13}) \cdot R2 / R1$ .

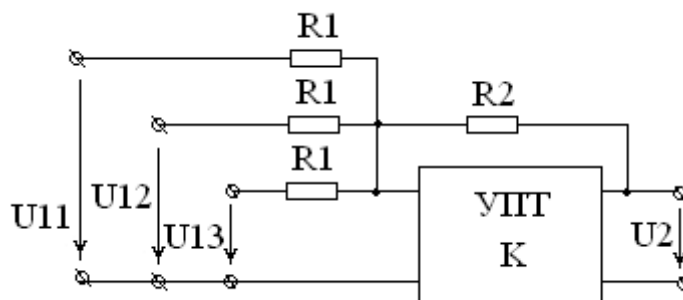


Рис. 4.1.

Т. о. напряжение выхода суммирующего ОУ пропорционально сумме напряжений входа. При этом напряжения входа могут иметь различную конфигурацию и величину.

На рис. 4.2. представлена принципиальная схема суммирующего ОУ в редакции Multisim. Здесь, входной источник  $U1_A$  имеет синусоидальную форму сигнала, с частотой 100 Гц. Входной источник  $U1_B$  имеет прямоугольную форму сигнала, с частотой 50 Гц. Напряжение выхода  $U2$  усилителя пропорционально сумме двух входных сигналов, рис. 4.3. Рассмотренный, суммирующий ОУ имеет *инвертирующие* свойства.

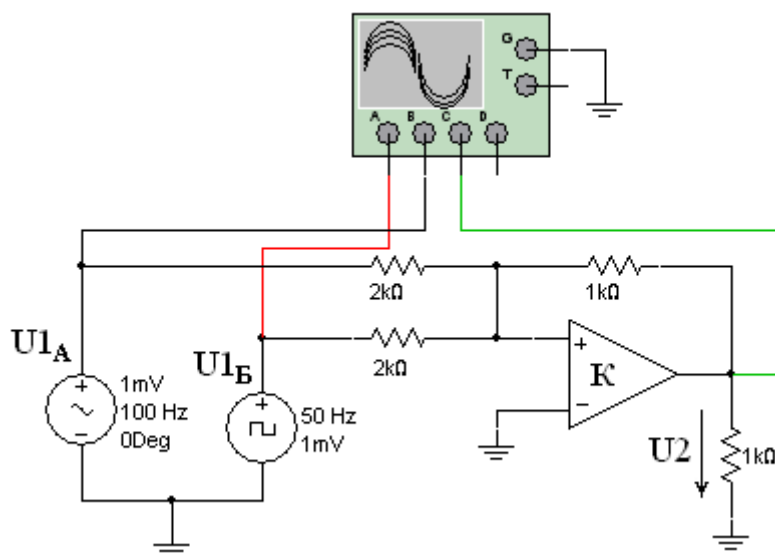


Рис. 4.2.

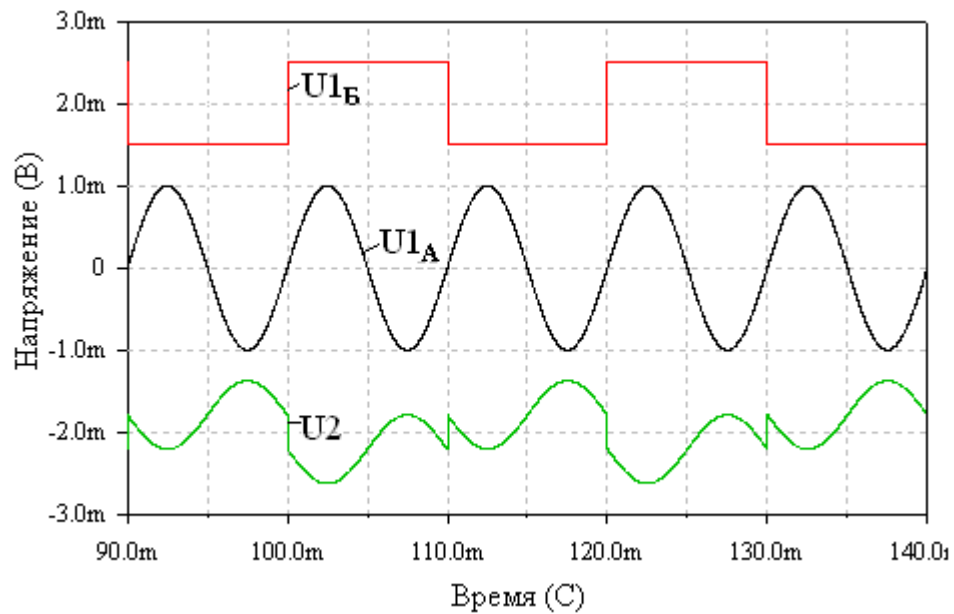


Рис. 4.3.

### 5. Избирательный операционный усилитель с RC – фильтром в цепи отрицательной обратной связи

Избирательные усилители (ИУ) – усилители, реагирующие на входной сигнал определённой частоты (спектра частот). При этом на выходе таких усилителей появляется максимальный выходной сигнал (максимальный коэффициент усиления). Избирательные усилители могут иметь различное схемное исполнение.

На рис. 5.1. представлена схема избирательного операционного усилителя с RC – фильтром в цепи отрицательной обратной связи. В качестве фильтра выбран двойной Т – образный мост, состоящий из элементов R, C. Элементы R, C подобраны с вполне определённым соотношением.

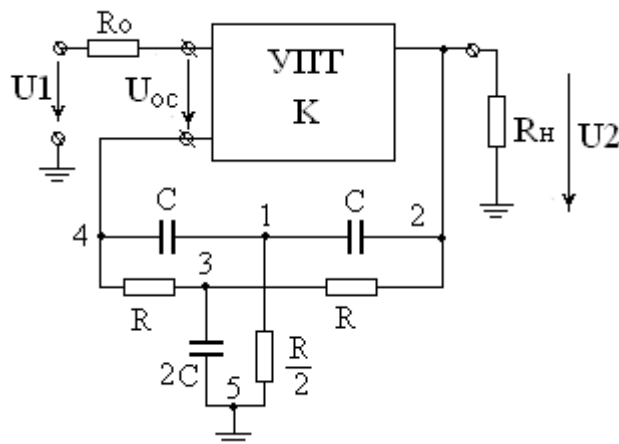


Рис. 5.1.



Коэффициент усиления с учётом обратной связи можно определить

$$\underline{K_{ос}} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{K}{1 + \underline{\beta} \cdot K}, \quad \text{где } \underline{\beta} = \frac{U_{ос}}{U_2} - \text{коэффициент передачи.}$$

$K$  - коэффициент усиления УПТ ( $K \geq 10000$ ).

Если  $\underline{\beta} \approx 1$ , то  $\underline{K_{ос}} \approx 1$ .

Исследуем зависимость напряжения выхода  $U_2$  от частоты  $f$  напряжения входа для схемы двойного Т – образного моста, представленной на рис. 5.2.

Обозначим параметры:  $C = 1 \text{ мкФ}$ ;  $R = 1 \text{ кОм}$ .

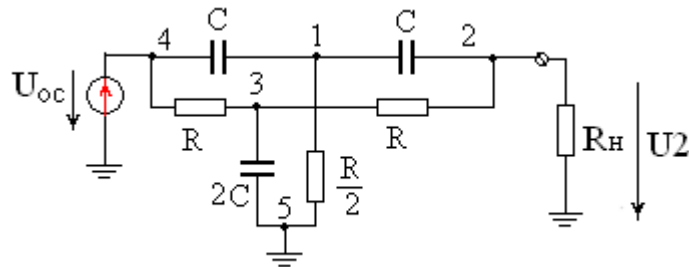


Рис. 5.2.

На рис. 5.3. представлены результаты расчёта, здесь  $|\underline{U}_2|$  - модуль напряжения выхода.

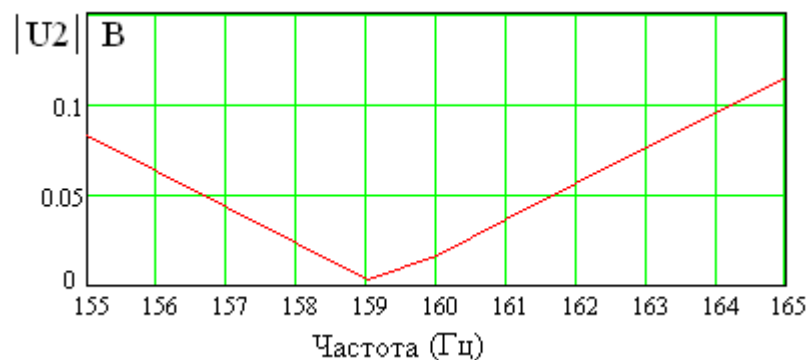


Рис. 5.3.

Квазирезонансная частота  $f_0$  определяется по выражению  $f_0 = 1 / 2 \cdot \pi \cdot R \cdot C$ .

В нашем случае  $f_0 = 159,155$  Гц.

В этой резонансной точке будет наблюдаться максимальный коэффициент усиления избирательного операционного усилителя. Так как в этой точке максимально ослаблен уровень его отрицательной обратной связи.

На рис. 5.4. представлена принципиальная схема избирательного усилителя с рассматриваемыми параметрами двойного Т – образного моста в качестве RC фильтра в цепи отрицательной обратной связи (в редакции Multisim).

На рис. 5.5. представлены напряжения входа и выхода с учётом неинвертирующего ИУ. Масштабные коэффициенты подобраны с учётом соразмерности кривых.

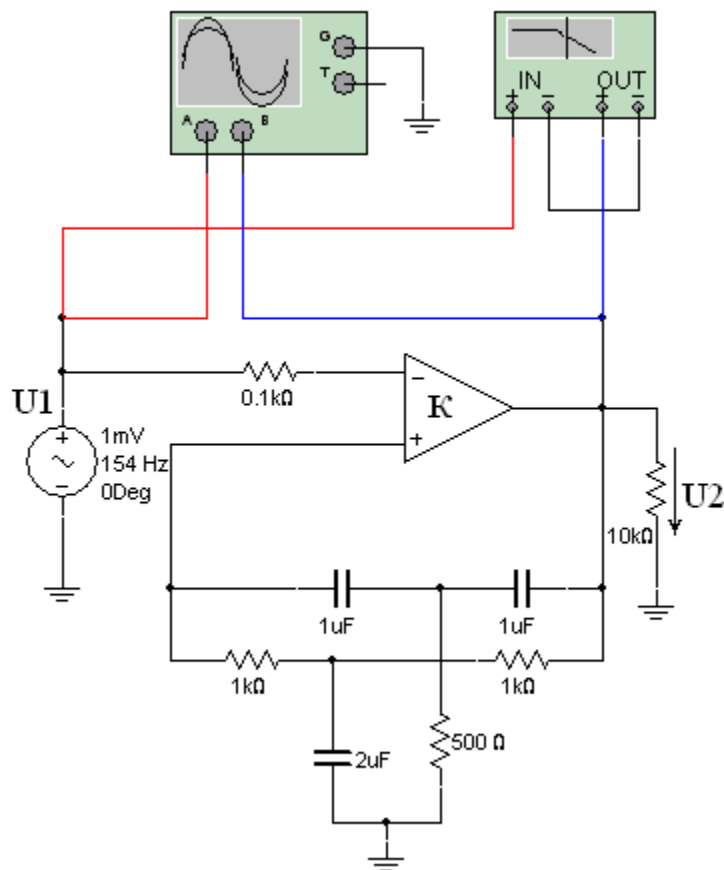


Рис. 5.4.

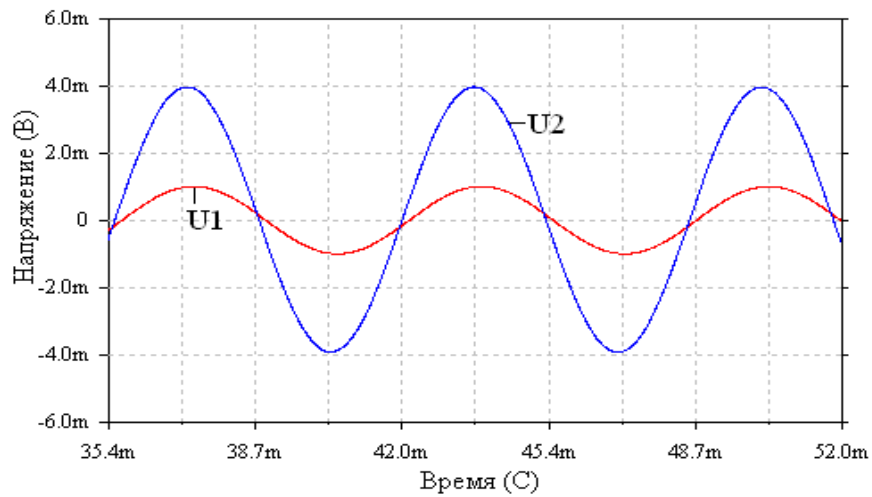


Рис. 5.5.

На рис. 5.6. и рис. 5.7. представлены соответственно амплитудно-частотная характеристика и фазово-частотная характеристика для коэффициента усиления с учётом отрицательной обратной связи ИУ. Характеристика выполнена графопостроителем в редакторе Multisim.

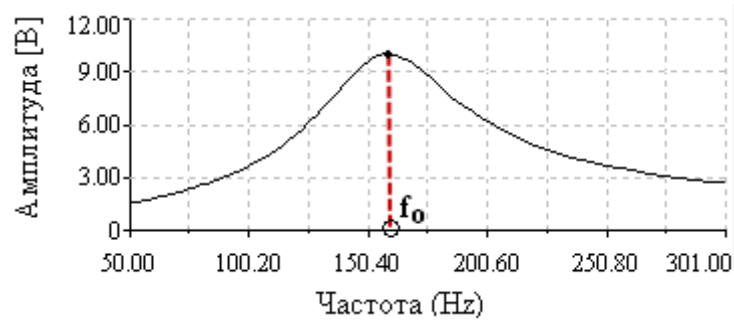


Рис. 5.6.

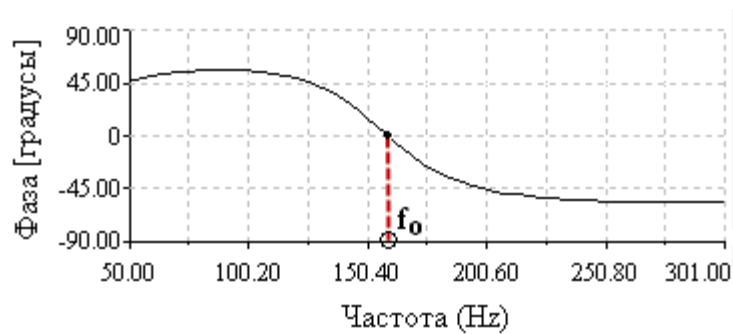


Рис. 5.7.

Операционные усилители широко применяются в радиоэлектронике, в вычислительных устройствах, в следящих системах военных и гражданских объектах и др.