

**Задание.** Реализовать заданную функцию на основе операционного усилителя с ООС:  $U_{\text{ВЫХ}} = k_1 \cdot U_1 + k_2 \cdot U_2 + k_3 \cdot U_3$ .

**Пример.**

Исходные данные:

- реализовать функцию  $U_{\text{ВЫХ}} = -6U_1 - 8U_2 + 10U_3$ , (1)

- минимально допустимое сопротивление нагрузки:  $R_{\text{Ндоп}} = 2 \text{ кОм}$ ,

- сопротивление нагрузки:  $R_{\text{Н}} = 4 \text{ кОм}$ .

1) Нарисуем схему, реализующую заданную функцию. Схема усилителя, реализующего функцию (1) представлена на рис. 1.

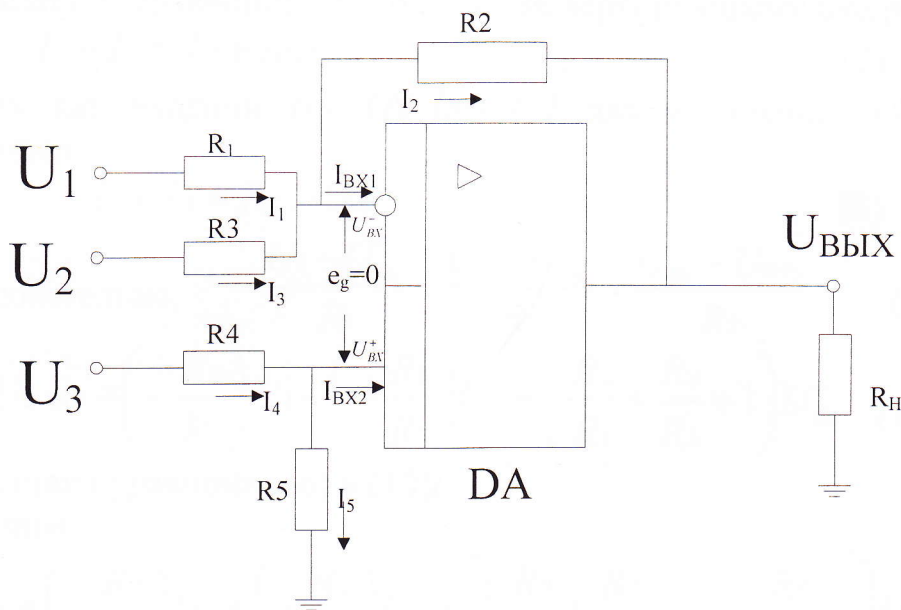


Рис. 1

Два входа ( $U_1$  и  $U_2$ ) обеспечивают получение отрицательного коэффициента усиления.

Один вход ( $U_3$ ) обеспечивает получение положительного коэффициента усиления.

Произведем расчет элементов электрической схемы.

2) Определим  $U_{\text{ВХ}}^+$ :

Запишем уравнение для токов по неинвертирующему входу:

$$I_4 = I_5 + I_{BX2}. \quad (2)$$

Так как входной ток ОУ  $I_{BX2} = 0$  для идеального ОУ, то получим

$$I_4 = I_5. \quad (3)$$

Следовательно, 
$$\frac{U_3 - U_{BX}^+}{R_4} = \frac{U_{BX}^+ - 0}{R_5}. \quad (4)$$

Или 
$$U_{BX}^+ = U_3 \frac{R_5}{R_4 + R_5}. \quad (5)$$

3) Определим  $U_{BX}^-$ :

Так как  $e_{\partial} = U_{BX}^+ - U_{BX}^- = 0$ , то с учетом (5) получим

$$U_{BX}^- = U_{BX}^+ = U_3 \frac{R_5}{R_4 + R_5}. \quad (6)$$

4) Определим  $U_{ВЫХ}$ :

Запишем уравнение для токов по инвертирующему входу:

$$I_1 + I_3 = I_2 + I_{BX1}. \quad (7)$$

Так как входной ток ОУ  $I_{BX1} = 0$  для идеального ОУ, то получим

$$I_1 + I_3 = I_2. \quad (8)$$

Следовательно, 
$$\frac{U_1 - U_{BX}^-}{R_1} + \frac{U_2 - U_{BX}^-}{R_3} = \frac{U_{BX}^- - U_{ВЫХ}}{R_2} \quad (9)$$

или 
$$U_{ВЫХ} = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right)U_1 + \left(-\frac{R_2}{R_3}\right)U_2 + \left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_3} + 1\right)U_{BX}^-. \quad (10)$$

Подставив уравнение (6) в (10), получим

$$U_{ВЫХ} = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right)U_1 + \left(-\frac{R_2}{R_3}\right)U_2 + \left[\left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_3} + 1\right)\frac{R_5}{R_4 + R_5}\right]U_3. \quad (11)$$

5) Сравним коэффициенты уравнения (11) для выходного напряжения с исходными данными заданной функции по уравнению (1):  $U_{ВЫХ} = -6U_1 - 8U_2 + 10U_3$ .

Запишем систему уравнений относительно неизвестных величин резисторов  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5$ . Следовательно, получим:

$$-\frac{R_2}{R_1} = -6. \quad (12)$$

$$-\frac{R_2}{R_3} = -8, \quad (13)$$

$$\left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_3} + 1\right) \frac{R_5}{R_4 + R_5} = 10. \quad (14)$$

Примечание. Дополнительный резистор  $R_5$  перед неинвертирующим входом вводится для уменьшения коэффициента усиления усилителя по неинвертирующему входу. (В рассматриваемой схеме при  $R_5 \rightarrow 0$   $k_3 = \left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_3} + 1\right) \cdot \frac{R_5}{R_4 + R_5} = 0$ ).

Подставив (12) и (13) в (14), получим:

$$6 + 8 + 1 \frac{R_5}{R_4 + R_5} = 10$$

или  $\frac{R_4}{R_5} = \frac{1}{2}.$  (15)

Примечание. Если получим  $\frac{R_4}{R_5} < 0$ , то это означает, что электрическая схема должна быть модифицирована введением дополнительного резистора перед инвертирующим входом, соединив его свободный вывод с землей.

б) Определим величину сопротивления  $R_2$  из ограничения на величину сопротивления допустимой нагрузки  $R_{H \text{ доп}}$  для ОУ. Для сопротивлений на выходе ОУ должно выполняться соотношение:

$$R_2 // R_H \geq R_{H \text{ доп}}$$

или  $\frac{R_2 R_H}{R_2 + R_H} > R_{H \text{ доп}}$

$$\Rightarrow R_2 R_H > R_2 R_{H \text{ доп}} + R_H R_{H \text{ доп}}.$$

Следовательно, получим:

$$R_2 \geq \frac{R_H \cdot R_{H \text{ доп}}}{R_H - R_{H \text{ доп}}}. \quad (16)$$

Подставив заданное значение  $R_H$  и  $R_{H \text{ доп}}$  для выбранного ОУ, получим:

$$R_2 \geq \frac{4 \cdot 2}{4 - 2} = 4 \text{ кОм}.$$

Выберем  $R_2 = 6 \text{ кОм} > 4 \text{ кОм}$ . (17)

Примечание. Чем больше величина сопротивления  $R_2$ , тем больше погрешность от разности входных токов  $\Delta I_{\text{вх}}$ .

7) определим  $R_1$  и  $R_3$  из уравнений (12) и (13) соответственно:

$$-\frac{R_2}{R_1} = -6 \quad \Rightarrow \quad R_1 = 1 \text{ кОм}, \quad (18)$$

$$-\frac{R_2}{R_3} = -8 \quad \Rightarrow \quad R_3 = 0,75 \text{ кОм}. \quad (19)$$

8) Для уменьшения погрешности от входных токов необходимо, чтобы проводимости по обоим входам были равны, т.е.:

$$Y_1 + Y_3 + Y_2 = Y_4 + Y_5 \quad (20)$$

или

$$R_1 \parallel R_3 \parallel R_2 = R_4 \parallel R_5$$

$$\Rightarrow \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \quad (21)$$

Так как определено в (15), что  $R_5 = 2R_4$ , (22)

то из (21) получим:

$$R_4 = 0,6 \text{ кОм}, \quad (23)$$

$$R_5 = 1,2 \text{ кОм}. \quad (24)$$

9) В результате получим значения сопротивлений:

$$R_1 = 1 \text{ кОм}, \quad R_4 = 0,6 \text{ кОм},$$

$$R_2 = 6 \text{ кОм}, \quad R_5 = 1,2 \text{ кОм},$$

$$R_3 = 0,75 \text{ кОм}.$$

10) Произведем проверку полученных значений сопротивлений, подставив их в уравнение (11):

$$U_{\text{в ых}} = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right)U_1 + \left(-\frac{R_2}{R_3}\right)U_2 + \left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_3} + 1\right)\frac{R_5}{R_4 + R_5}U_3.$$

Получим:

$$U_{\text{в ых}} = \left(-\frac{6}{1}\right)U_1 + \left(-\frac{6}{0,75}\right)U_2 + \left(\frac{6}{1} + \frac{6}{0,75} + 1\right)\frac{1,2}{0,6 + 1,2}U_3$$

или  $U_{\text{в ых}} = -6U_1 - 8U_2 + 10U_3.$

Следовательно, расчет сопротивлений произведен правильно; усилитель реализует заданную функцию (1).

Общие примечания к разработке электрической схемы усилителя на основе ОУ.

- 1) Для увеличения коэффициента усиления по неинвертирующему входу  $k_n$  следует ввести дополнительный резистор перед инвертирующим входом, соединив его свободный вывод с землей.
- 2) Для уменьшения коэффициента усиления по неинвертирующему входу  $k_n$  следует ввести дополнительный резистор перед неинвертирующим входом, соединив его свободный вывод с землей.

	Варианты заданий			Рн доп = 2 кОм
	К1	К2	К3	Рн, кОм
1	-6	-4	11	4
2	6	4	-4	3
3	8	-6	10	5
4	-4	6	-8	4
5	10	-8	6	3
6	4	-6	8	5
7	16	-4	-6	4
8	-4	-6	-8	3
9	5	10	-15	5
10	-10	-5	20	4
11	6	-4	6	4
12	6	4	-4	3
13	-10	-6	10	5
14	10	6	-8	4
15	-4	-8	-6	3
16	10	-6	8	5
17	4	-4	-6	4
18	15	-6	-8	3
19	-4	10	-15	5
20	5	-5	15	4
21	-4	-4	10	4
22	10	4	-4	3
23	4	-6	10	5