

## Семинар 8

### Схемы на ОУ. Пример выполнения домашнего задания

№ вар.	Схема	Типы ОУ		R <sub>г</sub> , кОм	R1, кОм	R2, кОм	R3, кОм	R4, кОм	R5, кОм	R6, кОм	C1, мкФ
		DA1	DA2								
333	Рис.1, а	TL322C	TL081AC	3	47	1	13	3	3	27	0,1

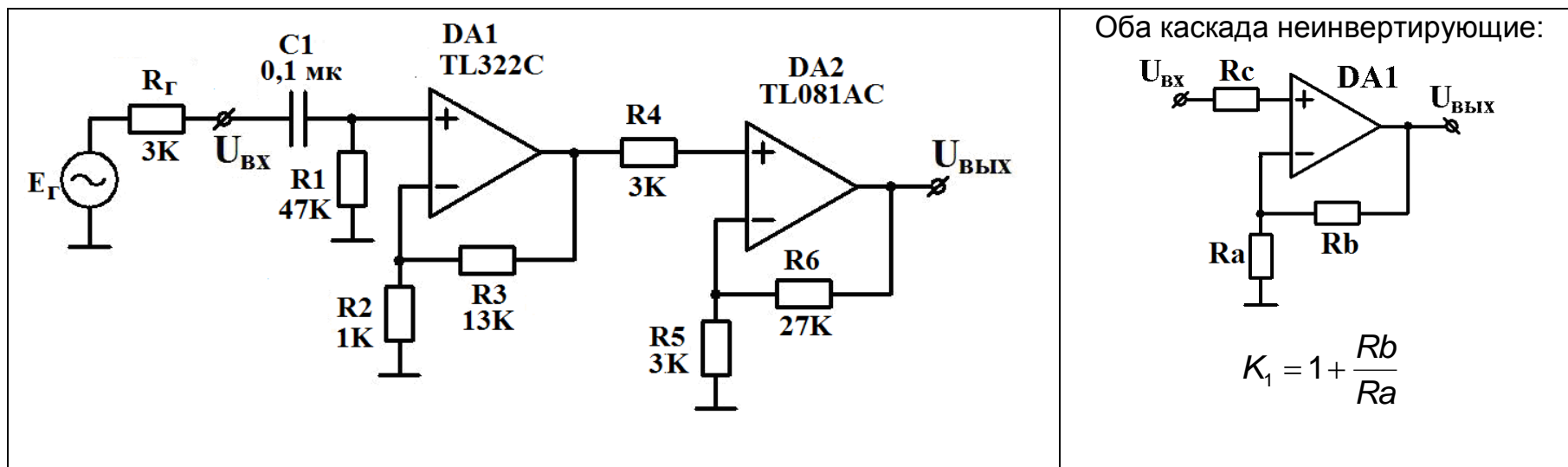
#### Параметры используемых ОУ

Обозн.	Тип	Особенности	U <sub>см</sub> , мВ		I <sub>вх</sub> , нА [ΔI <sub>вх</sub> , нА]		f <sub>1</sub> , МГц		V <sub>и</sub> , В/мкс		Диапазон U <sub>вых</sub> , В		K <sub>0</sub> , тыс.		КОСС, дБ		TKU <sub>см</sub> , мкВ/°С		R <sub>вх.диф</sub> , Ом
			Тип.	Макс.	Тип.	Макс.	Мин.	Тип.	Мин.	Тип.	Мин.	Тип.	Тип.	Макс.	Мин.	Тип.	Тип.	Тип.	
DA1	TL322C	Биполярный ОУ общего применения, 2 ОУ	2	10	50 [30]	500 [200]		1		0,6	±12	±13,5	20	200	70	90	10		10 <sup>6</sup>
DA2	TL081AC	Общего применения, ПТУП на входе	3	6	0,03 [0,005]	0,4 [0,2]		3	6	13	±12	±13,5	50	200	75	86	18		10 <sup>12</sup>

DA1 TL322C U <sub>см</sub> =2 мВ I <sub>вх</sub> =50 нА ΔI <sub>вх</sub> =30 нА f <sub>1</sub> =1 МГц V <sub>и</sub> =0,6 В/мкс Диапазон U <sub>вых</sub> ±13,5 В	DA2 TL081AC U <sub>см</sub> =3 мВ I <sub>вх</sub> =0,03 нА ΔI <sub>вх</sub> =0,005 нА f <sub>1</sub> =3 МГц V <sub>и</sub> =13 В/мкс Диапазон U <sub>вых</sub> ±13,5 В		
---	--	--	--

# 1. Исходный вариант схемы: DA1 – TL322C, DA2 – TL081AC

## 1.1. Расчёт коэффициента усиления



Входная цепь:  $K_{BX} = \frac{R1}{R_r + R1} = \frac{47 \times 10^3}{3 \times 10^3 + 47 \times 10^3} = 0,94$

Каскад 1.  $Ra=R2=1 \text{ кОм}$ ,  $Rb=R3=13 \text{ кОм}$   $K_1 = 1 + \frac{R3}{R2} = 1 + \frac{13 \times 10^3}{1 \times 10^3} = 14$

Каскад 2.  $Ra=R5=3 \text{ кОм}$ ,  $Rb=R6=27 \text{ кОм}$   $K_2 = 1 + \frac{R6}{R5} = 1 + \frac{27 \times 10^3}{3 \times 10^3} = 10$

Результирующий коэффициент усиления усилителя:  $K = K_{BX} K_1 K_2 = 0,94 \times 14 \times 10 = 131,6$

## 1.2. Расчёт нижней граничной частоты $f_H$

$$f_H = \frac{1}{2\pi C_1 (R_e + R1)} = \frac{1}{2\pi \times 0,1 \times 10^{-6} (3 \times 10^3 + 47 \times 10^3)} \approx 31,8 \text{ Гц}$$

### 1.3. Расчёт верхней граничной частоты $f_B$

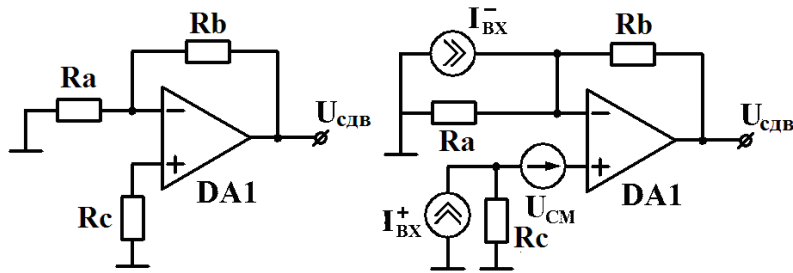
Каскад 1.  $f_{B1} = \frac{f_1^{TL322C}}{K_1} = \frac{1 \times 10^6}{14} \approx 7,14 \times 10^4 = 71,4 \text{ кГц}$

Каскад 2.  $f_{B2} = \frac{f_1^{TL081AC}}{K_2} = \frac{3 \times 10^6}{10} = 300 \text{ кГц}$

**Резльтирующее значение верхней граничной частоты  $f_B$ :**

$$f_B \approx \frac{f_{B1} f_{B2}}{\sqrt{f_{B1}^2 + f_{B2}^2}} = \frac{71,4 \times 10^3 \times 300 \times 10^3}{\sqrt{(71,4 \times 10^3)^2 + (300 \times 10^3)^2}} \approx 69,4 \text{ кГц}$$

#### 1.4. Расчёт выходного напряжения сдвига $U_{сдв}$



$$U_{сдв} = \frac{Ra + Rb}{Ra} \left[ U_{CM} + I_{BX+} R_c - I_{BX-} \frac{Ra Rb}{Ra + Rb} \right]$$

$I_{BX+} = I_{BX}$  из справочных данных на ОУ;

$I_{BX-} = I_{BX} - \Delta I_{BX}$ ,  $\Delta I_{BX}$  из справочных данных на ОУ

$$U_{сдв1} = \frac{R2 + R3}{R2} \left[ U_{CM TL322C} + I_{BX+ TL322C} R1 - I_{BX- TL322C} \frac{R2 R3}{R2 + R3} \right] =$$

$$= \frac{1 \times 10^3 + 13 \times 10^3}{1 \times 10^3} \left[ 2 \times 10^{-3} + 50 \times 10^{-9} \times 47 \times 10^3 - 20 \times 10^{-9} \times \frac{1 \times 10^3 \times 13 \times 10^3}{1 \times 10^3 + 13 \times 10^3} \right] \approx 60,6 \times 10^{-3} B = 60,6 mB$$

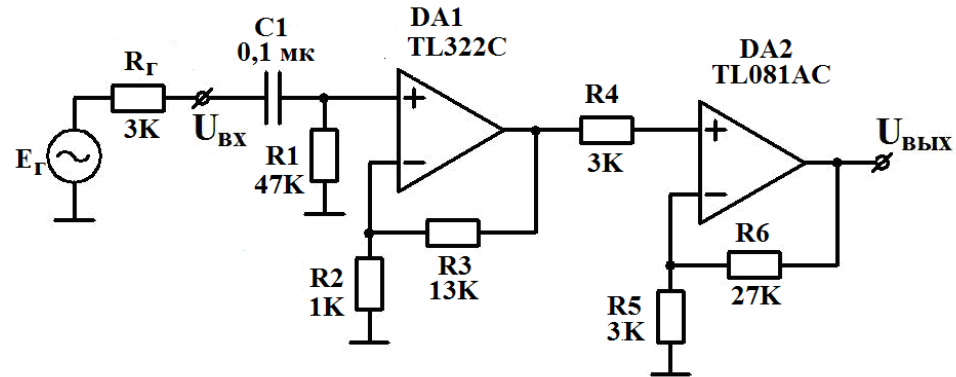
**Каскад 2:**  $Ra=R5=3$  кОм,  $Rb=R6=27$  кОм,  $Rc=R4=3$  кОм. Для DA2 (TL081AC)  $U_{CM}=3$  мВ,  $I_{BX}=0,03$  нА,  $\Delta I_{BX}=0,005$  нА, тогда

$I_{BX+} = I_{BX TL081AC} = 0,03 \times 10^{-9} A = 0,03 нА = 30 пА$ ,  $I_{BX-} = I_{BX TL081AC} - \Delta I_{BX TL081AC} = (0,03 - 0,005) \times 10^{-9} A = 0,025 \times 10^{-9} A = 0,025 нА = 25 пА$

$$U_{сдв2} = \frac{R5 + R6}{R5} \left[ U_{CM TL081AC} + I_{BX+ TL081AC} R4 - I_{BX- TL081AC} \frac{R5 R6}{R5 + R6} \right] =$$

$$= \frac{3 \times 10^3 + 27 \times 10^3}{3 \times 10^3} \left[ 3 \times 10^{-3} + 0,03 \times 10^{-9} \times 3 \times 10^3 - 0,025 \times 10^{-9} \times \frac{3 \times 10^3 \times 27 \times 10^3}{3 \times 10^3 + 27 \times 10^3} \right] \approx 30 \times 10^{-3} = 30 mB$$

$$U_{сдв} = K_2 U_{сдв1} + U_{сдв2} = 10 \times 60,6 \times 10^{-3} + 30 \times 10^{-3} = 636 \times 10^{-3} = 636 mB$$



**Каскад 1:**  $Ra=R2=1$  кОм,  $Rb=R3=13$  кОм,  $Rc=R1=47$  кОм.

Для DA1 (TL322C)

$U_{CM}=2$  мВ,  $I_{BX}=50$  нА,  $\Delta I_{BX}=30$  нА, тогда

$I_{BX+} = I_{BX TL322C} = 50 \times 10^{-9} A = 50 нА$ ,

$I_{BX-} = I_{BX TL322C} - \Delta I_{BX TL322C} = (50 - 30) \times 10^{-9} A = 20 \times 10^{-9} A = 20 нА$

## 1.5 Максимальная амплитуда неискажённого выходного напряжения

2 вида нелинейных искажений:

- ограничение выходного напряжения по уровням  $\pm U_{\text{вых.макс}}$  – проявляются в основном на НЧ
- динамические искажения из-за ограниченной скорости изменения выходного напряжения ОУ (могут проявляться на ВЧ)

Сначала схема проверяется на динамические искажения: для заданной частоты  $f$  рассчитывается  $U_{m \text{ Вых МАКС}} = \frac{V_U}{2\pi f}$  (где

$V_U$  – скорость нарастания ОУ **второго** каскада) и сравнивается с максимальным выходным напряжением ОУ  $U_{\text{вых.макс}}$ . В нашем случае для обоих типов ОУ  $U_{\text{вых.макс}} = 13,5 \text{ В}$ .

Если полученное значение  $U_{m \text{ Вых МАКС}}$  превышает  $U_{\text{вых.макс}}$ , т. е. является физически нереализуемым, то на заданной частоте динамических искажений не будет, а нелинейные искажения будут проявляться в виде ограничения выходного напряжения по уровням  $\pm U_{\text{вых.макс}}$ . Тогда максимальная амплитуда неискаженного выходного напряжения определяется с учётом напряжения сдвига:

$$U_{m \text{ Вых МАКС}} = U_{\text{Вых МАКС}} - U_{\text{сдв}}$$

Для рассматриваемого случая с учетом  $V_U = 13 \text{ В/мкс}$  (для TL081AC)

$$\text{При } f = f_{B1} = 69,4 \text{ кГц} \quad U_{m \text{ Вых МАКС}} = \frac{13 \times 10^6}{2\pi \times 69,4 \times 10^3} \approx 29,8 \text{ В}$$

$$\text{При } f = \frac{f_B}{2} = 34,7 \text{ кГц} \quad U_{m \text{ Вых МАКС}} = \frac{13 \times 10^6}{2\pi \times 34,7 \times 10^3} \approx 59,6 \text{ В}$$

Оба результата превышают  $U_{\text{вых.макс}} = 13,5 \text{ В}$ , поэтому **на данных частотах нелинейные искажения будут проявляться не в виде динамических искажений, а в виде ограничения выходного напряжения по уровням  $U_{\text{вых.макс}} = \pm 13,5 \text{ В}$ .**

С учётом напряжения сдвига максимальная амплитуда неискажённого выходного напряжения:

$$U_{m \text{ Вых МАКС}} = U_{\text{Вых МАКС}} - U_{\text{сдв}} = 13,5 - 0,636 = 12,864 \text{ В}$$

## 2. Вариант с двумя ОУ TL322C

### 2.1. Расчёт коэффициента усиления и нижней граничной частоты $f_H$

Коэффициент передачи входной цепи и коэффициенты усиления первого и второго каскада остаются неизменными:  $K_{BX} = 0,94$ ,  $K_1 = 14$ ,  $K_2 = 10$

**Результирующий коэффициент усиления усилителя:**  $K = K_{BX} K_1 K_2 = 0,94 \times 14 \times 10 = 131,6$

**Нижняя граничная частота**  $f_H = \frac{1}{2\pi C_1(R_e + R1)} \approx 31,8 \text{ Гц}$

### 2.2. Расчёт верхней граничной частоты $f_B$

**Каскад 1.**  $f_{B1} = \frac{f_1^{TL322C}}{K_1} = \frac{1 \times 10^6}{14} \approx 7,14 \times 10^4 = 71,4 \text{ кГц}$

**Каскад 2.**  $f_{B2} = \frac{f_1^{TL322C}}{K_2} = \frac{1 \times 10^6}{10} = 100 \text{ кГц}$

**Результирующее значение верхней граничной частоты  $f_B$ :**

$$f_B \approx \frac{f_{B1} f_{B2}}{\sqrt{f_{B1}^2 + f_{B2}^2}} = \frac{71,4 \times 10^3 \times 100 \times 10^3}{\sqrt{(71,4 \times 10^3)^2 + (100 \times 10^3)^2}} \approx 58,1 \text{ кГц}$$

### 2.3. Сдвиг выходного напряжения

**Каскад 1** – тот же, что в исходном варианте, поэтому  $U_{сдв1} = 60,6 \text{ мВ}$ .

**Каскад 2** - TL081AC заменён на TL322C:  $U_{CM}=2 \text{ мВ}$ ,  $I_{BX}=50 \text{ нА}$ ,  $\Delta I_{BX}=30 \text{ нА}$ ,

$I_{BX}^+ = I_{BX \text{ TL322C}} = 0,5 \times 10^{-9} \text{ А} = 0,5 \text{ нА}$ ,  $I_{BX}^- = I_{BX \text{ TL322C}} - \Delta I_{BX \text{ TL322C}} = (50 - 30) \times 10^{-9} \text{ А} = 20 \times 10^{-9} \text{ А} = 20 \text{ нА}$

$$U_{сдв2} = \frac{R5 + R6}{R5} \left[ U_{CM \text{ TL322C}} + I_{BX \text{ TL322C}}^+ R4 - I_{BX \text{ TL322C}}^- \frac{R5 R6}{R5 + R6} \right] =$$

$$= \frac{3 \times 10^3 + 27 \times 10^3}{3 \times 10^3} \left[ 2 \times 10^{-3} + 50 \times 10^{-9} \times 3 \times 10^3 - 20 \times 10^{-9} \times \frac{3 \times 10^3 \times 27 \times 10^3}{3 \times 10^3 + 27 \times 10^3} \right] \approx$$

$$\approx 14 \times (2 \times 10^{-3} + 1,5 \times 10^{-4} - 0,054 \times 10^{-3}) \approx 29,34 \text{ мВ}$$

**Итоговое выходное напряжение сдвига:**  $U_{\text{сдв}} = K_2 U_{\text{сдв1}} + U_{\text{сдв2}} = 10 \times 60,6 \div 10^{-3} + 29,34 \times 10^{-3} \approx 635,34 \text{ мВ}$

## 2.4 Максимальная амплитуда неискажённого выходного напряжения

Для рассматриваемого случая с учетом  $V_U = 0,6 \text{ В/мкс}$  (для TL322С)

При  $f = f_{B1} = 58,1 \text{ кГц}$   $U_{\text{т Вых макс}} = \frac{0,6 \times 10^6}{2\pi \times 58,1 \times 10^3} \approx 1,64 \text{ В}$

При  $f = \frac{f_B}{2} = 29,05 \text{ кГц}$   $U_{\text{т Вых макс}} = \frac{1 \times 10^6}{2\pi \times 29,09 \times 10^3} \approx 3,28 \text{ В}$

Оба результата меньше  $U_{\text{вых. макс}} = 13,5 \text{ В}$ , поэтому **на данных частотах при увеличении амплитуды выходного напряжения более рассчитанных значений будут проявляться динамические искажения.**

### 3. Вариант с двумя ОУ TL081AC

#### 3.1. Расчёт коэффициента усиления и нижней граничной частоты $f_H$

Коэффициент передачи входной цепи и коэффициенты усиления первого и второго каскада остаются неизменными:  $K_{BX} = 0,94$ ,  $K_1 = 14$ ,  $K_2 = 10$

**Результирующий коэффициент усиления усилителя:**  $K = K_{BX} K_1 K_2 = 0,94 \times 14 \times 10 = 131,6$

$$\text{Нижняя граничная частота } f_H = \frac{1}{2\pi C_1 (R_e + R1)} \approx 31,8 \text{ Гц}$$

#### 3.2. Расчёт верхней граничной частоты $f_B$

$$\text{Каскад 1. } f_{B1} = \frac{f_1^{TL081AC}}{K_1} = \frac{3 \times 10^6}{14} \approx 214,3 \text{ кГц}$$

$$\text{Каскад 2. } f_{B2} = \frac{f_1^{TL081AC}}{K_2} = \frac{3 \times 10^6}{10} = 300 \text{ кГц}$$

**Результирующее значение верхней граничной частоты  $f_B$ :**

$$f_B \approx \frac{f_{B1} f_{B2}}{\sqrt{f_{B1}^2 + f_{B2}^2}} = \frac{214,3 \times 10^3 \times 300 \times 10^3}{\sqrt{(214,3 \times 10^3)^2 + (300 \times 10^3)^2}} \approx 174,4 \text{ кГц}$$

#### 3.3. Сдвиг выходного напряжения

**Каскад 1** – TL322C заменён на TL081AC:  $U_{CM}=3 \text{ мВ}$ ,  $I_{BX}=0,03 \text{ нА}$ ,  $\Delta I_{BX}=0,005 \text{ нА}$

$$I_{BX}^+ = I_{BX \text{ TL081AC}} = 0,03 \times 10^{-9} \text{ А} = 0,03 \text{ нА} = 30 \text{ пА}, \quad I_{BX}^- = I_{BX \text{ TL081AC}} - \Delta I_{BX \text{ TL081AC}} = (0,03 - 0,005) \times 10^{-9} \text{ А} = 0,025 \times 10^{-9} \text{ А} = 0,025 \text{ нА} = 25 \text{ пА}$$

$$\begin{aligned} U_{сдв1} &= \frac{R2 + R3}{R2} \left[ U_{CM \text{ TL081AC}} + I_{BX \text{ TL081AC}}^+ R1 - I_{BX \text{ TL081AC}}^- \frac{R2 R3}{R2 + R3} \right] = \\ &= \frac{1 \times 10^3 + 13 \times 10^3}{1 \times 10^3} \left[ 3 \times 10^{-3} + 0,03 \times 10^{-9} \times 47 \times 10^3 - 0,025 \times 10^{-9} \times \frac{1 \times 10^3 \times 13 \times 10^3}{1 \times 10^3 + 13 \times 10^3} \right] \approx \\ &\approx 14 \times (3 \times 10^{-3} + 1,41 \times 10^{-6} - 2,32 \times 10^{-8}) \approx 42 \text{ мВ} \end{aligned}$$

**Каскад 2** - тот же, что в исходном варианте, поэтому  $U_{сдв2} = 30 \text{ мВ}$ .



**Итоговое выходное напряжение сдвига:**  $U_{\text{сдв}} = K_2 U_{\text{сдв1}} + U_{\text{сдв2}} = 10 \times 42 \times 10^{-3} + 30 \times 10^{-3} \approx 450 \text{ мВ}$

### 3.4 Максимальная амплитуда неискажённого выходного напряжения

Для рассматриваемого случая с учетом  $V_U = 13 \text{ В/мкс}$  (для TL081AC)

При  $f = f_{B1} = 174,4 \text{ кГц}$   $U_{\text{т Вых МАКС}} = \frac{13 \times 10^6}{2\pi \times 174,4 \times 10^3} \approx 11,86 \text{ В} < U_{\text{Вых МАКС}} = 13,5 \text{ В}$ , поэтому на частоте 174,4 кГц при превышении рассчитанного значения начнут проявляться динамические искажения.

При  $f = \frac{f_B}{2} = 87,2 \text{ кГц}$   $U_{\text{т Вых МАКС}} = \frac{13 \times 10^6}{2\pi \times 87,2 \times 10^3} \approx 22,73 \text{ В} > U_{\text{Вых МАКС}} = 13,5 \text{ В}$ , поэтому на частоте 87,2 кГц

**нелинейные искажения будут проявляться не в виде динамических искажений, а в виде ограничения выходного напряжения по уровням  $U_{\text{вых.макс}} = \pm 13,5 \text{ В}$ .**

**С учётом  $U_{\text{сдв}} \approx 450 \text{ мВ}$**

$$U_{\text{т Вых МАКС}} = U_{\text{Вых МАКС}} - U_{\text{сдв}} = 13,5 - 0,45 = 13,05 \text{ В}$$

### Результаты расчета

№ п/п	DA1	DA2	K	$f_H$	$f_B$	$U_{\text{сдв}}$	$U_{\text{твых.макс}}$		Примечания
							при $f_B$	при $f_B/2$	
1	TL322C	TL081AC	131,6	31,8 Гц	69,4 кГц	636 мВ	12,864 В	12,864 В	Искажения в виде ограничения
2	TL322C	TL322C	131,6	31,8 Гц	58,1 кГц	635,34 мВ	2,74 В	5,48 В	Динамические искажения
3	TL081AC	TL081AC	131,6	31,8 Гц	174,4 кГц	450 мВ	11,86 В	13,05 В	Динамические искажения при $f_B$ ; искажения в виде ограничения при $f_B/2$

### Выводы по выполнению ДЗ

Сравнить три варианта схемы по результатам расчёта. Проанализировать, как и почему изменяются параметры схемы при замене ОУ.