

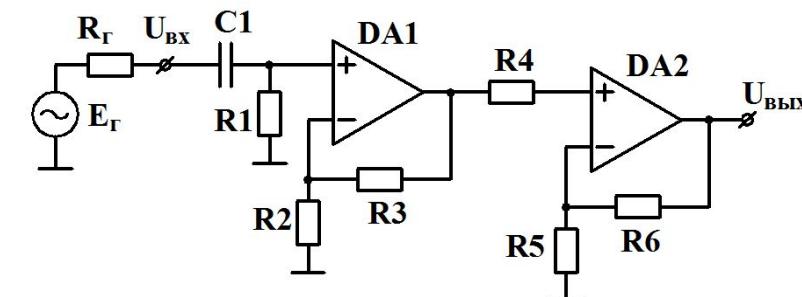
Домашнее задание по модулю 2
дисциплины «Электроника и микроэлектроника», спец. ПС2, ПС4, ИУ2
(упрощенная версия, 2020/2021 уч. год, 1 семестр)

Дана схема усилителя на двух ОУ с указанием типов ОУ и номиналов элементов схемы (см. рис. 1 и табл. 1).

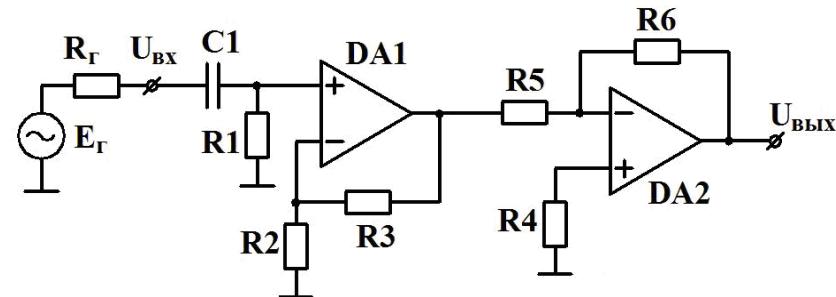
1. Для данной схемы определить: нижнюю и верхнюю граничные частоты $f_n \dots f_v$ по уровню -3 дБ; коэффициент усиления; максимальную амплитуду выходного напряжения на частотах $0,5f_v$ и f_v ; сдвиг выходного напряжения. Параметры ОУ указаны в табл. 2.

2. Повторить расчеты п. 1 для случаев, когда в усилителе используется 2 ОУ одного типа (рассмотреть 2 случая). Сравнить полученные результаты.

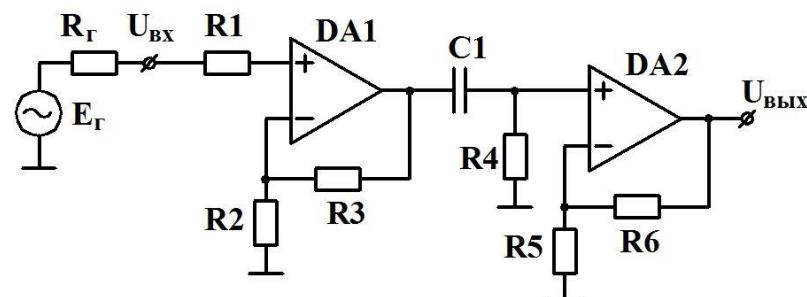
3. Дополнительное задание. Провести моделирование трёх вариантов схемы в программе Microcap. Сравнить результаты расчета и моделирования.



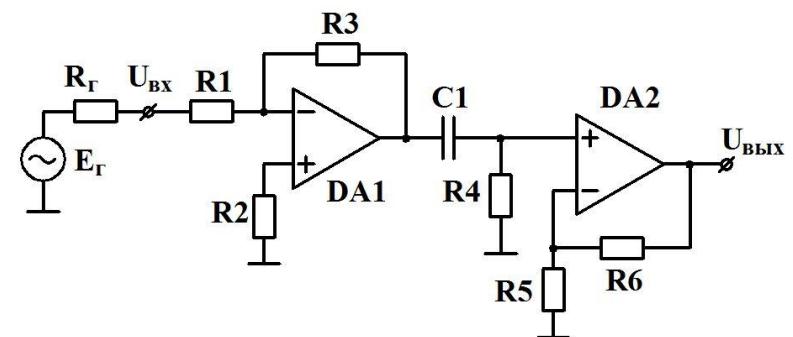
a)



б)



в)



г)

Рис. 1 Варианты схем усилителей

Таблица 1. Варианты домашнего задания

№ вар.	Схема	Типы ОУ		R _r , кОм	R1, кОм	R2, кОм	R3, кОм	R4, кОм	R5, кОм	R6, кОм	C1, мкФ
		DA1	DA2								
1	Рис.1, а	LM741C	LF411	1	47	1	15	3	1	10	0,1
2		OP07E	LM308A	0,3	22	3	24	0	2	18	1
3		TL322C	LF356	1	10	2	68	10	3	51	0,33
4		LM1458	TL081AC	3	100	1	13	3	1	10	0,1
5		LF353	LT1055CH	10	100	2	15	1	3	27	0,33
6	Рис.1, б	TL081AC	LT1022CH	0,1	7,5	3,6	47	4,7	2	18	2,2
7		LT1001AC	LM308A	0,3	15	10	150	0	3,3	47	1
8		LT1055CH	TL081AC	1	10	3,3	51	10	5,1	20	0,33
9		LM741C	LF353	0,3	4,7	5,6	100	10	1	24	1
10		OP07E	LF441	1	15	22	150	0	2	22	0,33
11	Рис.1, в	LM308A	LF411A	20	10	2	30	12	3	27	0,33
12		OP07C	LM1458	0,3	1	3	39	20	2,4	30	0,47
13		TL322C	LF356	1	3,3	2	22	30	2	16	0,1
14		LT1001AC	LF355	3	0	4,3	100	15	1	20	0,33
15		LF441A	LT1055CH	10	2	2	24	12	1	11	1
16	Рис.1, г	LF356	LT1022CH	0,1	1	5,6	15	47	3	27	0,1
17		TL061AC	LF353	0,3	2	10	30	33	1	15	0,47
18		LF441	LT1022CH	1	10	33	120	15	2	15	1
19		OP07C	LM741C	3	20	0	200	10	2	18	0,33
20		LM308	LM833	1	10	47	330	47	3	51	0,47

Таблица 2. Основные параметры некоторых типов операционных усилителей

Тип	Особенности	U _{CM} , мВ		I _{BX} , нА [ΔI _{BX} , нА]		f ₁ , МГц		V _u , В/мкС		Диапазон U _{вых} , В		K ₀ , тыс.		КОСС, дБ		TKU _{CM} , мкВ/°C	R _{BX,диф} , Ом
		Тип.	Макс.	Тип.	Макс.	Мин.	Тип.	Мин.	Тип.	Мин.	Тип.	Тип.	Макс.	Мин.	Тип.	Тип.	
LM308	Биполярный ОУ общего применения (устар.)	2	7,5	1,5	7		1		0,3	±13	±14	25	300	80	100	6	4x10 ⁷
LM308A		0,3	0,5	[0,2]	[1]		1		0,3	±13	±14	80	300	96	110	2	4x10 ⁷
LF353	Общего применения, ПТУП на входе	5	10	0,05 [0,025]	0,2 [0,1]		3	8	13	±12	±13,5	25	100	70	100	5	10 ¹²
LF355	ПТУП на входе	3	5	0,03 [0,003]	0,1 [0,02]		2,5		5	±12	±13	50	200	85	100	5	10 ¹²
LF356		3	5	[0,003]	[0,02]		5	7,5	12	±12	±13	50	200	85	100	5	10 ¹²
LF411	ПТУП на входе	0,8	2	0,05 [0,025]	0,2 [0,1]	2,7	4	8	15	±12	±13,5	25	200	70	100	7	10 ¹²
LF411A		0,3	0,5	[0,025]	[0,1]	3	4	10	15	±12	±13,5	50	200	80	100	7	10 ¹²
LF441	Общего применения, ПТУП на входе	1	5	0,01 [0,005]	0,1 [0,05]	0,6	1	0,6	1	±12	±13	25	100	70	95	10	10 ¹²
LF441A		0,3	0,5	0,01 [0,005]	0,05 [0,025]	0,8	1	0,8	1	±12	±13	50	100	80	100	7	10 ¹²
LM741C	Биполярный ОУ общего применения.	2	6	200 [80]	500 [200]	0,7	1	0,25	0,5	±10	±13	20	200	70	90		2x10 ⁶
LM833	Биполярный 2ОУ, для аудио	0,3	5	500 [10]	1000 [200]	10	15	5	7	±12	±13,5	90	110	80	100	2	
LM1458	Биполярный ОУ общего применения. 2ОУ	1	6	200 [80]	500 [200]		1		0,5	±10	±13	20	160	70	90		10 ⁶
LT1001AC	Прецизионный	0,01	0,025	0,5 [0,3]	2 [2]	0,4	0,8	0,1	0,25	±12	±13,5	450	800	114	126	0,6 (макс.)	10 ⁸
LT1001C	Прецизионный	0,018	0,06	0,7 [0,4]	4 [3,8]	0,4	0,8	0,1	0,25	±12	±13,5	400	800	110	126	1 (макс.)	10 ⁸
LT1022CH	Прецизионный, ПТ-вход, быстродействующий	0,1	0,6	0,01 [0,002]	0,05 [0,02]		8,5	18	24	±12	±13,2	120	400	82	92	1,8 (макс.)	10 ¹²
LT1055CH	Прецизионный, ПТ-вход, повышенного быстродействия	0,12	0,7	0,01 [0,002]	0,05 [0,02]		4,5	7,5	12	±12	±13,2	120	400	83	98		10 ¹²
OP07C	Прецизионный	0,06	0,15	1,8 [0,8]	7 [6]	0,4	0,6	0,1	0,3	±11,5	±12,6	120	400	100	120	0,4	33x10 ⁶
OP07E		0,03	0,075	1,2 [0,5]	3,8 [1,5]	0,4	0,6	0,1	0,3	±12	±12,8	200	500	106	123	0,3	50x10 ⁶
TL061AC	Общего применения, ПТУП на входе	3	6	0,03 [0,005]	0,2 [0,1]		1	1,5	3,5	±10	±13,5	3	6	80	86	10	10 ¹²
TL081AC		3	6	0,03 [0,005]	0,4 [0,2]		3	6	13	±12	±13,5	50	200	75	86	18	10 ¹²
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 ⁶

Методические указания по выполнению задания

Задание состоит в анализе усилительной схемы на двух ОУ: нахождении коэффициента усиления, диапазона рабочих частот, максимальной амплитуды выходного напряжения, сдвига выходного напряжения. Для каждого варианта задаются схема усилителя, типы используемых ОУ, номиналы элементов схемы. Изначально схема включает в себя ОУ разных типов. Расчет должен быть проведен для трёх вариантов схемы:

- 1) исходного (см. табл. 1);
- 2) схемы с ОУ одного типа, указанного в задании как тип ОУ DA1;
- 3) схемы с ОУ одного типа, указанного в задании как тип ОУ DA2.

Указанные в исходном варианте типы ОУ обладают различными параметрами, поэтому данные три варианта усилителя будут обладать различными частотными и точностными параметрами. Результаты расчетов приводятся в таблице по образцу табл. 3. Отметим, что некоторые варианты задания составлены так, что в исходной схеме ОУ выбраны неоптимально по точностным и частотным параметрам. В общем случае предусмотренная в задании замена ОУ может привести к улучшению одних параметров усилительного устройства и ухудшению других.

Внимание! При выполнении расчётов использовать типовые параметры ОУ.

Таблица 3. Результаты расчета

№ п/п	DA1	DA2	K	f _н	f _в	ΔU _{вых}	U _{твых.макс}	Примечания
1	<i>DA1</i>	<i>DA2</i>						<i>Исходный вариант</i>
2	<i>DA1</i>	<i>DA1</i>						<i>Оба ОУ типа DA1</i>
3	<i>DA2</i>	<i>DA2</i>						<i>Оба ОУ типа DA2</i>

При выполнении задания следует ознакомиться со справочными данными на используемые в схеме ОУ (см. файл pdf_opamp.rar).

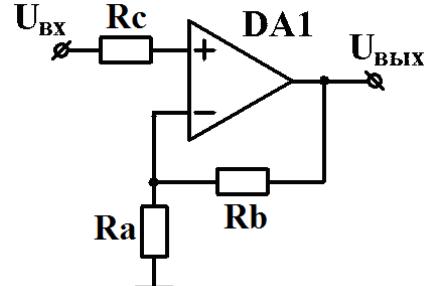
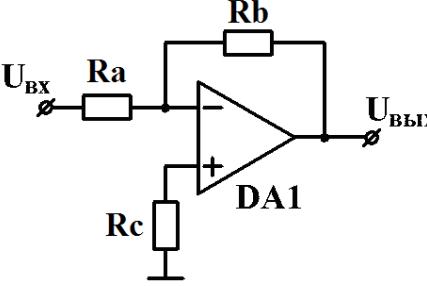
По результатам расчетов должно быть проведено сравнение рассмотренных вариантов схемы, выявлены преимущества использования ОУ заданных типов в первом или втором каскадах.

Необходимые расчеты достаточно просты и основаны на материале лекций и семинаров. Ниже приводятся некоторые дополнительные пояснения.

Коэффициент усиления усилителя на средних частотах K вычисляется как произведение коэффициентов усиления первого и второго каскадов и коэффициента передачи входной цепи усилителя:

$$K = U_{\text{вых}}/E_r = K_{\text{вх}} K_1 K_2$$

Коэффициенты усиления первого и второго каскадов K_1 , K_2 и их граничные частоты $f_{\text{в1}}$ и $f_{\text{в2}}$ вычисляются по известным формулам в зависимости от типа каскада (инвертирующий или неинвертирующий). Коэффициент усиления определяется коэффициентом передачи цепи ООС β ; верхняя граничная частота каскада на ОУ определяется частотой единичного усиления f_1 и коэффициентом передачи цепи ООС β :

	<p>Неинвертирующий усилитель: $\beta = Ra/(Ra+Rb)$. $K_{0\text{неинв}} = 1 + (Rb/Ra) \approx 1/\beta$; $f_{\text{в неинв}} = f_1 \beta \approx f_1 / K_{0\text{неинв}}$</p>		<p>Инвертирующий усилитель: $\beta = Ra/(Ra+Rb)$. $K_{0\text{инв}} = -(Rb/Ra) = 1 - (1/\beta)$ $f_{\text{в инв}} = f_1 \beta = f_1 Ra/(Ra+Rb) = f_1 / (1 + K_{0\text{инв}})$</p>
---	--	---	---

Пример. Для варианта схемы рис. 1, а: в первом неинвертирующем каскаде $R_a=R_2$, $R_b=R_3$, поэтому $K_1 = 1 + (R_3/R_2)$; во втором каскаде, также неинвертирующем, $R_a=R_5$, $R_b=R_6$ и $K_2=1+(R_6/R_5)$.

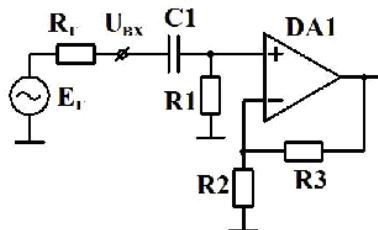
При расчете K необходимо учитывать сопротивление источника входного сигнала R_r . Так, для схем рис. 1, а-б на входе первого каскада образуется делитель напряжения $R_g - R_1$ с коэффициентом передачи $K_{\text{вх}} = R_1/(R_g + R_1)$,

Для схемы рис. 1, г, где входной каскад инвертирующий, R_g включено последовательно с R_1 , поэтому $K_{\text{вх}}$ не учитываем или полагаем $K_{\text{вх}}=1$, но рассчитываем K_1 с учётом R_g :

$$K_1 = -R_3/(R_g + R_1), \text{ т. к. } R_a=R_g+R_1, R_b=R_3.$$

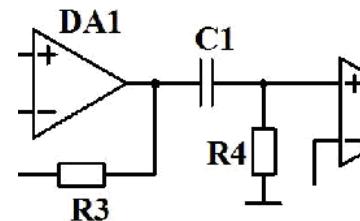
В схеме рис. 1, в, ОУ первого каскада находится в неинвертирующем включении. Поэтому из-за действия последовательной ООС входное сопротивление первого каскада оказывается минимум на 1-2 порядка больше собственного входного сопротивления ОУ (в худшем случае сотни кОм для ОУ на биполярных транзисторах, например для КР140УД708) и таким образом на 2-3 порядка превышает R_g . Для этого случая влиянием R_g можно пренебречь, полагая $K_{\text{вх}}=1$.

Нижняя граничная частота усилителя f_n зависит от емкости конденсатора C1 (см. лекции и семинары).



Варианты а), б):

$$f_n = \frac{1}{2\pi C_1 (R_e + R1)}$$



Варианты в), г):

$$f_n = \frac{1}{2\pi C_1 R4}$$

Верхняя граничная частота усилителя f_v зависит от частотных характеристик используемых ОУ. Все ОУ, используемые в задании, имеют внутреннюю частотную коррекцию, и поэтому f_v может быть приближенно определена из соотношения:

$$\frac{1}{f_v} \approx \sqrt{\frac{1}{f_{v1}^2} + \frac{1}{f_{v2}^2}} \text{ или } f_v \approx \frac{f_{v1} f_{v2}}{\sqrt{f_{v1}^2 + f_{v2}^2}}$$

где f_{v1} и f_{v2} - верхние граничные частоты первого и второго каскадов.

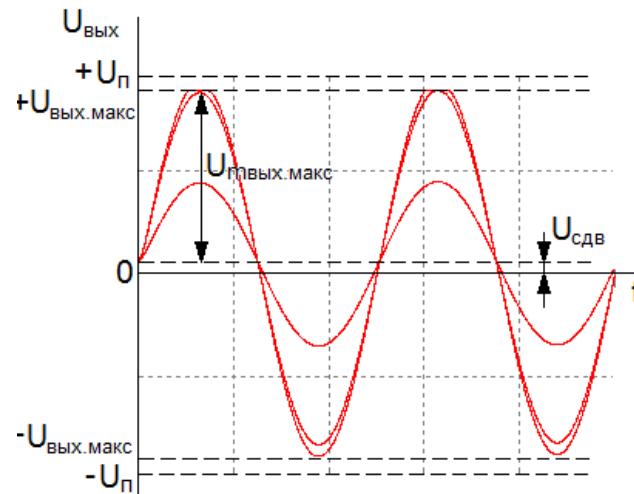
Может получиться так, что верхние граничные частоты обоих каскадов могут существенно различаться. В этом случае итоговое значение f_v в основном будет определяться более «низкочастотным» каскадом, а другой каскад будет иметь избыточно широкую полосу. Однако в ряде случаев подобным образом схему выполняют намеренно: например, первый каскад выполняют на сравнительно низкочастотном прецизионном ОУ, а второй каскад – на быстродействующем ОУ. В этом случае диапазон рабочих частот будет определяться ОУ первого каскада, однако за счет высокой скорости нарастания ОУ второго каскада (с избыточно широкой полосой частот) можно получить максимальную амплитуду неискаженного сигнала на высоких частотах значительно большую, чем в схеме на двух одинаковых прецизионных ОУ.

С другой стороны, в подобном случае для увеличения f_v без замены ОУ можно уменьшать K_1 и увеличивать K_2 , при этом сохраняя их произведение.

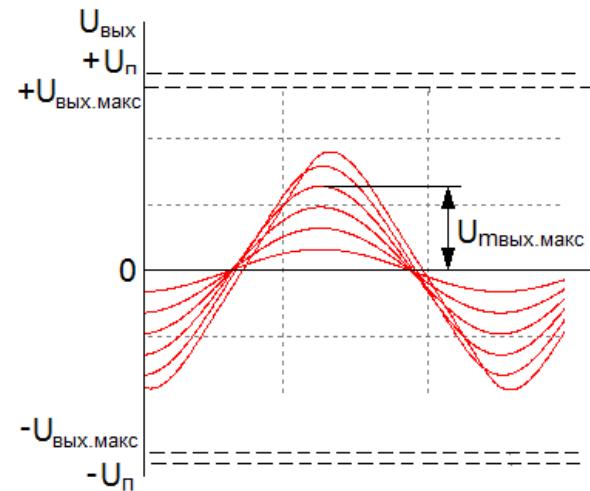
При расчёте схем на ОУ определяется **максимальная амплитуда выходного напряжения усилителя**, при превышении которой начинают проявляться нелинейные искажения выходного напряжения. При этом возможны два случая.

Ограничение выходного напряжения по уровням $\pm U_{\text{вых.макс}}$ – в основном типично для низких частот, но может проявляться и при работе на высоких частотах. С учетом того, что напряжение на выходе усилителя на ОУ будет изменяться не относительно нуля, а относительно напряжения сдвига $U_{\text{СДВ}}$ (рис. 3, а; вычисление $U_{\text{СДВ}}$ см. далее), максимальная амплитуда неискажённого выходного сигнала может быть определена как

$$U_{m \text{ вых.макс}} = U_{\text{вых.макс}} - U_{\text{СДВ}} .$$



а)



б)

Рис. 3. Нелинейные искажения из-за ограничения выходного напряжения (а); динамические искажения выходного напряжения ОУ (б)

Динамические искажения – обусловлены ограниченной скоростью изменения выходного напряжения ОУ второго каскада DA2. Чаще проявляются на высоких частотах – например, при увеличении амплитуды синусоидального входного сигнала выходной сигнал постепенно превращается из синусоидального в треугольный (рис. 3, б). Можно показать, что динамические искажения выходного сигнала с частотой f становятся заметными, если амплитуда выходного напряжения превышает значение $U_{m \text{ вых.макс}}$:

$$U_{m\text{ вых}} > U_{m\text{ вых.макс}} = V_{U2} / 2\pi f,$$

где V_{U2} - скорость нарастания выходного напряжения ОУ второго каскада. При выполнении задания для каждого варианта схемы усилителя следует определить $U_{m\text{ вых.макс}}$ на частотах f_b и $f_b/2$. *Однако при расчете может получиться, что определенное таким образом $U_{m\text{ вых.макс}}$ будет больше максимального выходного напряжения ОУ $U_{\text{вых.макс}}$ т. е. оказывается физически нереализуемым.* Это означает, что на частоте f_b динамические искажения не проявляются. В этом случае нелинейные искажения проявляются как ограничение выходного сигнала на уровне максимального выходного напряжения ОУ $U_{\text{вых.макс}}$ (см. выше).

Сдвиг выходного напряжения $U_{\text{СДВ}}$ в основном определяется сдвигом выходного напряжения ОУ первого каскада $U_{\text{СДВ1}}$ и в меньшей степени сдвигом выходного напряжения ОУ второго каскада $U_{\text{СДВ2}}$:

$$U_{\text{СДВ}} = K_2 U_{\text{СДВ1}} + U_{\text{СДВ2}}$$

Данная формула подходит для вычисления $U_{\text{СДВ}}$ усилителей постоянного тока ($f_h=0$) и усилителей переменного напряжения, у которых разделительный конденсатор включен во входной цепи первого каскада для гальванической развязки входа усилителя и источника входного сигнала (рис. 1, а, б). Очевидно, что если разделительный конденсатор C_1 включен между каскадами усилителя (рис. 1, в, г), образуя с $R4$ ФВЧ, то $U_{\text{СДВ}} = U_{\text{СДВ2}}$, т. е. существенно уменьшается. Наконец, включая разделительный конденсатор на выходе второго каскада усилителя, получаем на выходе усилителя $U_{\text{СДВ}} = 0$, однако следует учесть, что непосредственно на выходе ОУ DA2 все равно остается постоянное напряжение $U_{\text{СДВ2}}$.

$U_{\text{СДВ1}}$ и $U_{\text{СДВ2}}$ зависят от напряжений смещения нуля и входных токов используемых ОУ и определяются для каждого каскада отдельно. Из анализа эквивалентной схемы ОУ при отсутствии входного сигнала (рис. 4) сдвиг выходного напряжения схемы на ОУ может быть определен следующим образом:

$$U_{\text{СДВ}} = [(R_a + R_b)/R_a][U_{\text{см}} + I_{\text{вх}}^+ R_c - I_{\text{вх}}^- R_a R_b / (R_a + R_b)],$$

где $U_{\text{см}}$ – напряжение смещения нуля ОУ (приведенное ко входу), $I_{\text{вх}}^+$ и $I_{\text{вх}}^-$ – токи неинвертирующего и инвертирующего входов ОУ.

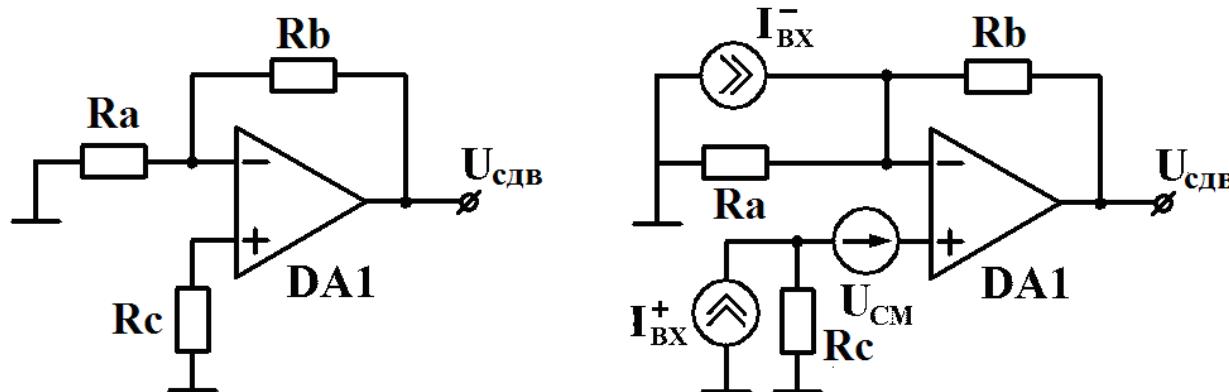


Рис. 4. К определению сдвига выходного напряжения

Следует учесть, что напряжение смещения нуля может быть как положительным, так и отрицательным. Кроме того, разность входных токов ОУ $\Delta I_{bx} = I_{bx}^+ - I_{bx}^-$ также может быть как положительной, так и отрицательной. Поэтому в исходном варианте домашнего задания расчет $U_{cдв}$ нужно было проводить для 4 случаев:

- 1) положительное U_{cm} ; $I_{bx}^+ = I_{bx}$ и $I_{bx}^- = I_{bx} + \Delta I_{bx}$;
- 2) положительное U_{cm} ; $I_{bx}^+ = I_{bx}$ и $I_{bx}^- = I_{bx} - \Delta I_{bx}$;
- 3) отрицательное U_{cm} ; $I_{bx}^+ = I_{bx}$ и $I_{bx}^- = I_{bx} + \Delta I_{bx}$;
- 4) отрицательное U_{cm} ; $I_{bx}^+ = I_{bx}$ и $I_{bx}^- = I_{bx} - \Delta I_{bx}$.

Далее как окончательный результат расчета $U_{cдв}$ выбирался наихудший случай (максимум модуля $U_{cдв}$).

В 1 семестре 2021/2022 уч. года с учётом общей ситуации достаточно провести расчёт $U_{cдв}$ только для случая 2: положительное U_{cm} ; $I_{bx}^+ = I_{bx}$ и $I_{bx}^- = I_{bx} - \Delta I_{bx}$. Результатирующее значение сдвига выходного напряжения определяется по формуле

$$U_{cдв} = K_2 |U_{cдв1}| + |U_{cдв2}| \quad (\text{подстановка модулей } U_{cдв1} \text{ и } U_{cдв2} \text{ дает результат для худшего из четырех вышеуказанных случаев}).$$

При расчете $U_{cдв}$ следует учитывать некоторые особенности схем рис. 1, а - г.

1. Необходимо помнить, что входные токи ОУ при отсутствии полезного входного сигнала являются **постоянными**. Поэтому, например, в схемах рис. 1, а-б входной ток I_{bx}^+ DA1 из-за наличия разделительной емкости $C1$ не протекает через R_g , а протекает только через $R1$. В схеме рис. 1, б также из-за разделительной емкости $C1$ не протекает через $R1$, а протекает только через $R3$.

2. Если во входных цепях ОУ нет гальванической развязки с помощью разделительной емкости, то при расчете $U_{СДВ}$ следует учитывать, что последовательно с резистором во входной цепи ОУ может быть включено сопротивление R_f (схемы рис. 1, в, г).

Учет $U_{СДВ}$ особенно важен при проектировании усилителей постоянного тока, для которых $U_{СДВ}$ по сути представляет собой аддитивную погрешность. Однако в усилителях переменного напряжения чем больше $U_{СДВ}$, тем при меньшей амплитуде выходного сигнала может наступать его ограничение. Поэтому если для всего усилителя сдвиг выходного напряжения оказывается более 0,3...0,5 В, то необходимо скорректировать $U_{твых.макс}$ (вычитая из него $U_{СДВ}$, см. выше).

Моделирование работы усилителей на ОУ в программе MicroCap

Основные сведения о моделировании схем на ОУ даны в методических указаниях по выполнению онлайн-варианта лабораторной работы № 4 «Исследование усилителей на ОУ». При выполнении домашнего задания вначале следует собрать в программе MicroCap исходный вариант схемы (DA1 и DA2 разных типов) и построить ее ЛАЧХ, по которой определить коэффициент усиления на средних частотах и граничные частоты f_H и f_B . Далее следует выполнить анализ по постоянному току **Dynamic DC...** для определения сдвига выходного напряжения. После этого выполняется анализ переходных процессов на частотах f_B и $f_B/2$. Изменяя амплитуду входного напряжения с помощью слайдера, можно определить такое ее значение, при котором начинают проявляться нелинейные искажения выходного напряжения (динамические или в форме ограничения сверху или снизу).

После моделирования исходного варианта схемы следует повторить моделирование для вариантов схем с ОУ одного типа. Желательно, чтобы все три схемы были собраны в одном файле .cig, который сохраняется и отправляется преподавателю (рис. 5).

*Следует отметить, что если расчёт параметров схемы проведён для типовых параметров ОУ, то при моделировании схемы в программе MicroCap обычно получаются значения K , f_H и f_B , близкие к расчётным. Выходное напряжение сдвига, определяемое в режиме **Dynamic DC...**, также может быть близко к расчётному значению, если в схеме используются ОУ с малыми входными токами (единицы – десятки пикоампер) и $U_{СДВ}$ в основном определяется напряжением смещения нуля ОУ. Однако, учёт влияния входных токов ОУ на $U_{СДВ}$ в MicroCap отличается от методики, применяемой при выполнении домашнего задания. Поэтому, если входные токи ОУ настолько велики, что их влияние на напряжение сдвига соизмеримо с влиянием напряжения смещения нуля ОУ, то результат измерения $U_{СДВ}$ в MicroCap может сильно отличаться от расчётного значения.*

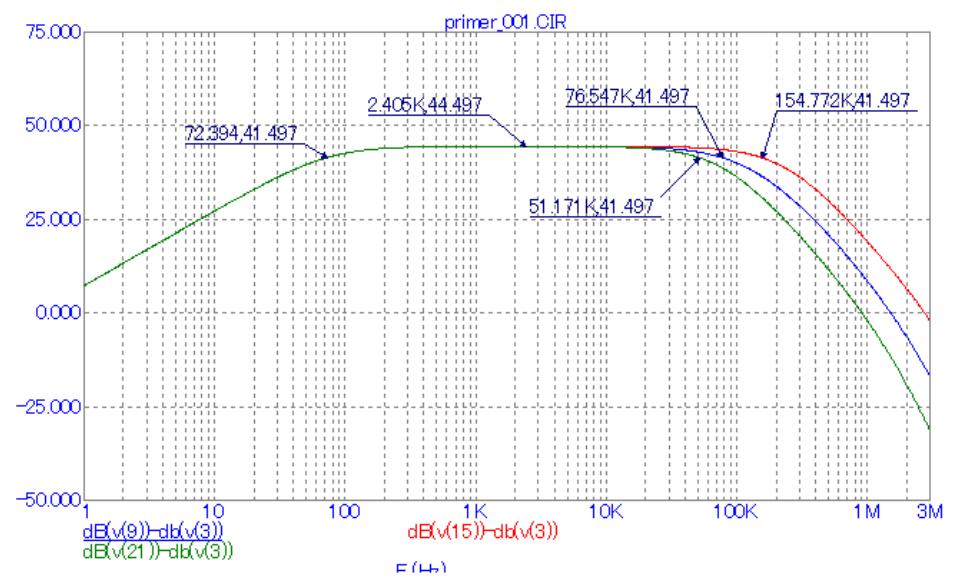
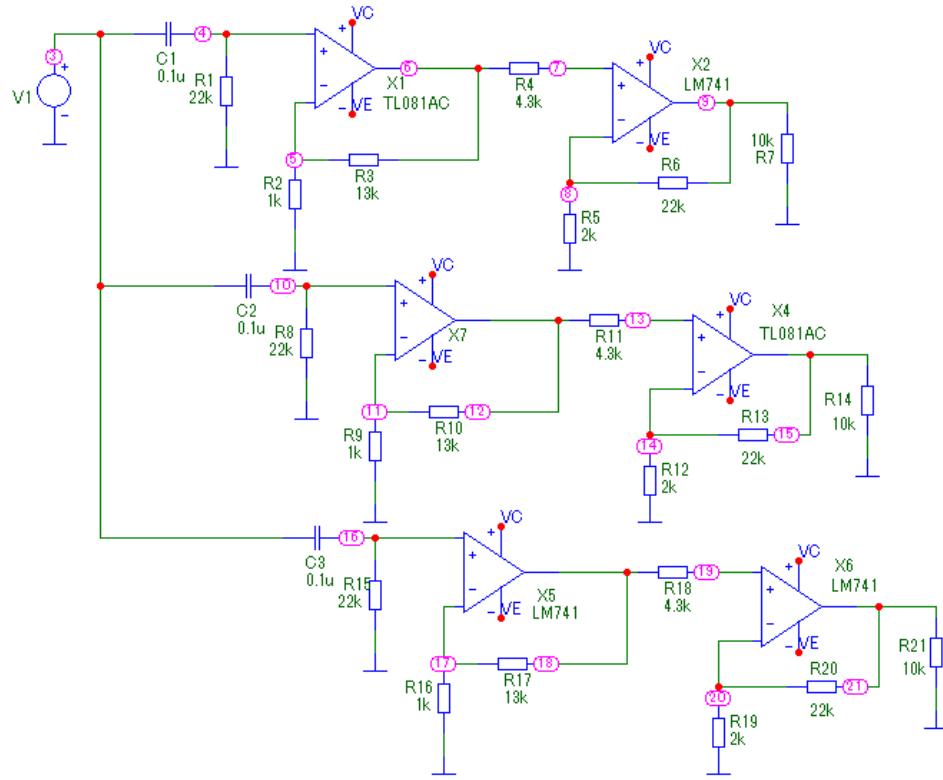


Рис. 5. Три варианта схемы усилителя и их ЛАЧХ, построенные в программе MicroCap

Оформление домашнего задания

Задание выполняется в виде файла в формате .doc (вариант - .pdf) и должно содержать:

- 1) условие задания;
- 2) исходный вариант схемы усилителя с указанием на схеме типов ОУ и номиналов резисторов и конденсаторов;
- 3) выписанные параметры использованных ОУ (можно в виде сокращенной таблицы по образцу табл. 2), их краткую сравнительную характеристику;
- 3) расчеты параметров исходной схемы и вариантов схем с заменой ОУ; **все расчеты представлять в виде «формула – подстановка значений – ответ» с соблюдением нумерации элементов схемы, указанной в задании;**
- 4) результаты расчетов (табл. 3), их сравнительный анализ;
- 5) схемы, выполненные в программе MicroCap, с результатами моделирования (ЛАЧХ с указанием K , f_H и f_B ; временные диаграммы, иллюстрирующие появление нелинейных искажений на частотах f_B и $f_B/2$);
- 6) выводы по результатам выполнения задания и возможные пути улучшения параметров усилителя (будут обсуждаться на защите).

Файл домашнего задания и файл схем высылается преподавателю. После проверки задания преподавателем проводится защита домашнего задания в форме веб-конференции или очно.