

Семинар №17 по дисциплине «Электроника»

Тема: Знакомство с операционным усилителем

Теоретическое введение

1. Общая характеристика ОУ

Операционные усилители (ОУ) (как самостоятельные электронные компоненты или как элементы ИС) часто используются в составе аналоговых электронных схем. Изначально такие устройства использовались для выполнения математических операций в аналоговых компьютерах, отсюда и название «операционный».

В современных схемах ОУ по-прежнему выполняют сложные математические операции, такие как интеграция и дифференцирование. Однако благодаря низкой стоимости, высокой производительности и широкой доступности эти универсальные компоненты используются во множестве потребительских, промышленных и научных приложений.

Например, ОУ в настоящее время используются в аудиоусилителях, видеоадаптерах, интерфейсах медицинских датчиков, регуляторах и стабилизаторах напряжения, приемниках основной полосы частот, аналого-цифровых преобразователях и так далее, – т. е. там, где есть необходимость в обработке сигнала в аналоговой (а не цифровой) форме.

Операционный усилитель представляет собой усилитель напряжения (с очень высоким коэффициентом усиления по напряжению K_U , для современных ОУ K_U лежит в интервале от 10^4 до 10^6) с двумя *дифференциальными* входами. При такой схеме входным сигналом называется *разность* напряжений двух входов, называемых прямым (или инвертирующим) V_+ и обратным (или неинвертирующим) V_- :

$$V_{\text{вх}} = V_+ - V_-.$$

За счёт использования глубокой обратной связи по напряжению (с дополнительными сопротивлениями, ёмкостями, индуктивностями в контурах обратной связи) можно управлять и варьировать коэффициент усиления схемы, что в итоге и даёт возможность выполнять различные операции над сигналами.

В целом, адаптируемость и универсальность этого устройства делает его популярным компонентом во многих схемах.

Различные варианты обозначения операционного усилителя приведены на рис. 1; в большинстве случаев в реальных ОУ имеются дополнительные выводы, предназначенные для коррекции характеристик. Для подключения питания имеются два контакта; схемы ОУ обычно могут работать как с двухполярным (подключение к $+E$ и $-E$), так и однополярным (подключение к $+E$ и земле) питанием. Полная схема подключения ОУ показана на рис. 2.

Из-за очень большого K_U входное напряжение должно быть очень маленьким (порядка нескольких микровольт). Кроме того, нельзя допускать, чтобы выходное напряжение приближалось к границам диапазона между двух напряжений питания – это чревато возникновением искажений (более подробно – см. характеристики).

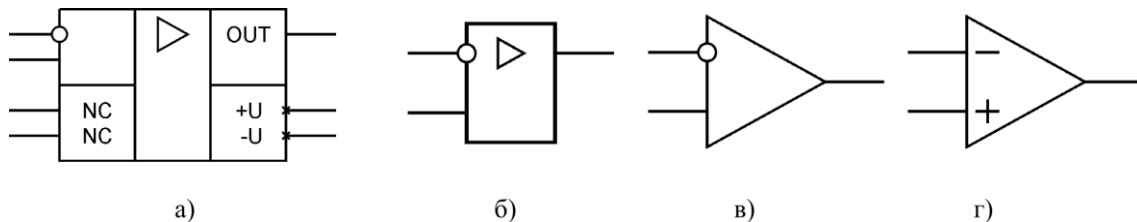


Рис. 1. Варианты обозначения операционного усилителя

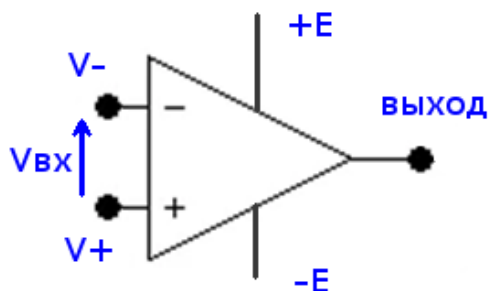


Рис. 2. Полная схема подключения операционного усилителя

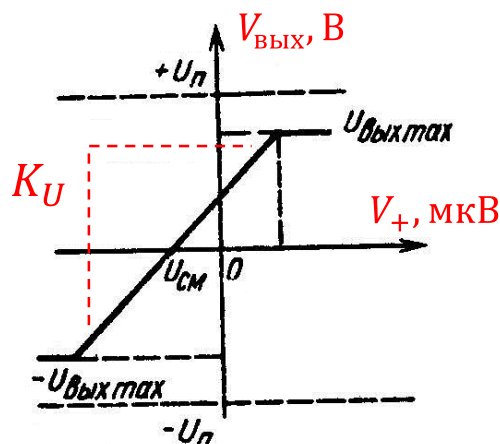


Рис. 3. Передаточная характеристика операционного усилителя без обратных связей

2. Идеализированный ОУ

При анализе электронных схем, содержащих ОУ, часто пользуются упрощённой, или идеализированной, моделью ОУ, которая обладает следующими свойствами:

1. бесконечно большое входное ($R_{вх} \rightarrow \infty$) и нулевое выходное ($R_{вых} \rightarrow 0$) сопротивление;
2. бесконечно большой коэффициент усиления по напряжению с разомкнутой петлей обратной связи K_U ;
3. равные нулю входные токи: $I_+ = I_- \rightarrow 0$;
4. одинаковые напряжения на неинвертирующем и инвертирующем входах, каждое из которых практически близко к нулю: $U_+ = U_- \rightarrow 0$;
5. со стороны выхода ОУ представляет собой идеальный управляемый источник напряжения с ЭДС $E = K_U(U_+ - U_-)$;
6. бесконечная ширина полосы пропускания и отсутствие задержки при прохождении сигнала через усилитель.

Характеристики реальных ОУ близки к идеальным.

3. Передаточная характеристики ОУ

Общий вид передаточной (амплитудной) характеристики ОУ без обратных связей показан на рис. 3 (на этом графике разные масштабы осей: входное напряжение $V_{вх}$ откладывается в милливольтках (или микровольтах), а выходное напряжение в вольтах!). Как видно из рисунка, передаточная характеристика имеет три участка: в центре линейный и по краям от него два участка с насыщением. В линейной области между входным и выходным напряжением

существует линейная зависимость, коэффициент наклона которой $K_U = V_{\text{вых}}/V_{\text{вх}}$ как раз и является коэффициентом усиления по напряжению. Если разность между V_+ и V_- больше ~ 1 мВ, то $V_{\text{вых}}$ достигает напряжения источника питания (+Е или –Е) и при дальнейшем увеличении разности входных напряжений входы теряют свои управляющие свойства – ОУ оказывается в области насыщения; при этом напряжение на выходе не зависит от разности напряжений на входе ОУ.

В усилительных устройствах на основе операционных усилителей рабочей областью передаточной характеристики ОУ является линейная область.

4. ОУ с обратными связями

Коэффициент усиления типичного ОУ очень большая величина, однако, она является чрезвычайно нестабильной, как в смысле разброса значений (даже в рамках одной партии), так и при изменении температуры. По этой причине ОУ, как правило, используются с отрицательными обратными связями, что позволяет обеспечить 1) бóльшую стабильность коэффициента усиления, 2) независимость от параметров конкретного экземпляра, 3) более удобную настройку параметров схемы на основе ОУ.

а) Инвертирующий усилитель. Принципиальная схема инвертирующего усилителя показана на рис. 4. Входной сигнал подключается к инверсному входу ОУ через резистор R_1 (в качестве R_1 часто рассматривают внутреннее сопротивление генератора сигнала). Напряжение обратной связи с выхода ОУ через сопротивление обратной связи R_2 также подаётся на инверсный вход. Прямой вход ОУ заземляется.

Коэффициент усиления инвертирующего усилителя $K_{\text{о.с.}}$ (в данном случае имеется обратная связь):

$$K_{\text{о.с.}} = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = - R_2 / R_1. \quad (1)$$

Для его расчёта не требуется точно знать параметры ОУ, что весьма удобно. Знак «минус» в (1) означает лишь то, что фаза напряжения на выходе усилителя противоположна фазе входного напряжения.

Основной недостаток инвертирующих усилителей состоит в том, что они имеют малое входное сопротивление $R_{\text{вх}} = R_1$.

б) Неинвертирующий усилитель. Принципиальная схема неинвертирующего усилителя приведена на рис. 5. Здесь входной сигнал уже подаётся на прямой вход ОУ, а напряжение обратной связи на инвертирующий.

Коэффициент усиления инвертирующего усилителя $K_{\text{о.с.}}$ (в данном случае также имеется обратная связь):

$$K_{\text{о.с.}} = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = (R_2 + R_1) / R_1 = 1 + R_2/R_1. \quad (2)$$

Из (2) следует, что для этой схемы коэффициент усиления также определяется только параметрами цепи обратной связи и не зависит от параметров ОУ.

Входное сопротивление неинвертирующего усилителя весьма велико. На низких частотах оно имеет величину порядка 100 МОм. Выходное сопротивление, наоборот, очень мало и составляет доли Ома.

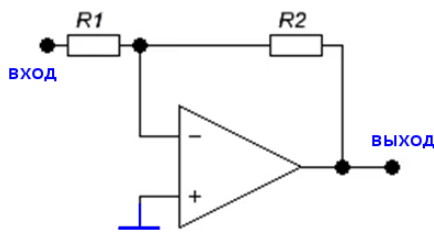


Рис. 4. Инвертирующий усилитель

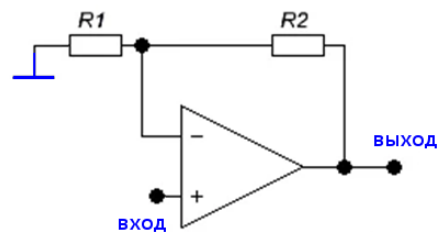


Рис. 5. Неинвертирующий усилитель

5. Искажения выходного сигнала

В случае, если входной сигнал выходит за пределы линейного участка на передаточной характеристике ОУ, форма выходного сигнала перестаёт соответствовать форме входного – т. о., возникают искажения выходного сигнала. Искажения в общем случае бывают различных видов (гармонические, интермодуляционные и др.); в этом задании исследуются гармонические, которые заключаются в появлении т. н. гармоник, т. е. сигналов с частотой, кратной основной, или фундаментальной частоте.

Для расчёта спектра сигнала можно использовать преобразование Фурье.

Запустить анализ Фурье в программе Spice можно следующим образом: в задание вставляется директива вида `.FOUR f v(out)`, где `f` – фундаментальная частота, а `v(out)` – анализируемый сигнал.

Пример директивы для анализа напряжения в точке out при фундаментальной частоте 10 Гц: `.FOUR 10Hz v(out)`. Результат такого анализа выводится в выходной файл (меню View—SPICE Error Log). Пример такой таблицы приведён на рис. 6. Она показывает, какие частотные составляющие и с какими амплитудами появляются в выходном сигнале.

В выходном файле Spice также появляется значение параметра THD (Total Harmonic Distortion) – полного коэффициента гармонических искажений. Его величина вычисляется как среднегеометрическое амплитуд гармоник.

Fourier analysis for v(out):

No. Harmonics: 10, THD: 5.7116 %, Gridsize: 200, Interpolation Degree: 1

Harmonic	Frequency	Magnitude	Phase	Norm. Mag	Norm. Phase
0	0	4.91942	0	0	0
1	3000	2.57366	-178.92	1	0
2	6000	0.145903	79.9197	0.0566906	258.843
3	9000	0.0174992	-138.8	0.00679933	40.1225
4	12000	0.00350968	150.054	0.00136369	328.977
5	15000	0.00132934	54.0063	0.000516515	232.93
6	18000	0.000550078	-51.496	0.000213733	127.427
7	21000	0.000187626	-157.57	7.29022e-05	21.358
8	24000	7.55946e-05	79.2634	2.93724e-05	258.187
9	27000	3.78454e-05	3.827	1.47049e-05	182.75

Рис. 6. Пример результатов анализа Фурье: таблица гармоник и полный коэффициент искажений (THD)

Задание 1. Размещение. Поместите на рабочее поле (из встроенной библиотеки Oramps) операционный усилитель из библиотеки компонентов в соответствии с вариантом. Подключите питание E_+ , E_- и нагрузочное сопротивление R_H (по варианту). Дайте имена входным и выходным точкам.

Задание 2. Исследование ОУ без обратной связи.

- а) Соберите схему включения ОУ без обратной связи (см. рис. 7): подключите к обратному входу напряжение величиной ровно посередине между положительным и отрицательным напряжением: $V_- = (E_+ - E_-)/2$, подключите к прямому входу источник входного сигнала;
- б) смоделируйте статическую передаточную характеристику по дифференциальному сигналу $V_{\text{ВЫХ}}(V_{\text{ВХ}})$ в диапазоне $(E_- \dots E_+)$ с шагом 0,01 В; пример графика показан на рис. 3;
- в) отдельно смоделируйте участок резкого переключения с очень маленьким шагом 0,01 мкВ;
- г) по второму графику (пункт в)) определите статический коэффициент усиления по напряжению в точке с наибольшим коэффициентом наклона: $K_U = \max(dV_{\text{ВЫХ}}/dV_{\text{ВХ}})$
- д) установите на входном источнике напряжения синусоидальный сигнал с частотой f и амплитудой $V_{\text{ВХ1}}$ по варианту. Смоделируйте переходную характеристику (пропустив время установления сигнала). По графикам определите коэффициент усиления по переменному сигналу;
- е) в схеме пункта д) дополнительно проведите анализ Фурье на этой же частоте; найдите значение THD;
- ж) повторите пункты д), е), но при увеличенной амплитуде входного сигнала $V_{\text{ВХ2}}$ (по варианту). Сравните значение THD этого пункта и предыдущего; объясните причину различия между ними.

Задание 3. Исследование ОУ с обратной связью: инвертирующего усилителя.

- а) Рассчитайте аналитически сопротивление резистора обратной связи в схеме инвертирующего усилителя при заданном коэффициенте усиления K_U и сопротивлении генератора R_r (по варианту);
- б) соберите схему инвертирующего усилителя (см. рис. 8): используя источник величиной $(E_+ - E_-)/2$ как базу, подсоедините к нему прямой вход и $V_{\text{ВХ}}$;
- в) установите на входном источнике напряжения синусоидальный сигнал с частотой и амплитудой по варианту. Смоделируйте переходную характеристику (пропустив время установления сигнала) — в двух режимах: в режиме холостого хода и при заданном сопротив-

лении нагрузки по варианту. По графикам определите дифференциальное входное и выходное сопротивление:

$$R_{\text{вх}} = \frac{V_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}}, \quad R_{\text{вых}} = R_{\text{н}} \frac{(V_{\text{вых1}} - V_{\text{вых2}})}{V_{\text{вых2}}},$$

где $V_{\text{вых1}}, V_{\text{вых2}}$ – выходное напряжение в двух режимах нагрузки.

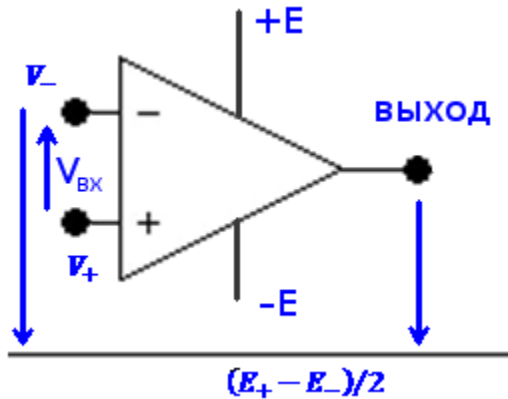


Рис. 7. Полная схема подключения ОУ при произвольном напряжении питания

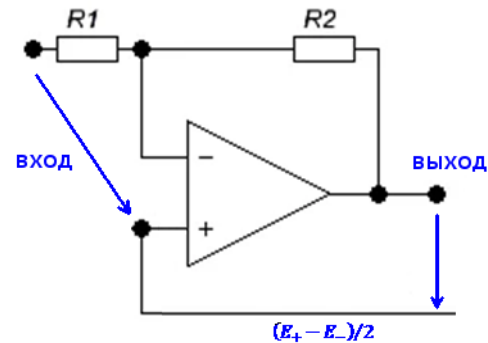


Рис. 8. Схема инвертирующего усилителя при произвольном напряжении питания (отличие от базовой схемы рис. 4 в том, что $V_{\text{вх}}$ и $V_{\text{вых}}$ отсчитываются не относительно земли)

Таблица вариантов

для БИТ-203		для задания 1				для задания 2, д-ж			3а		3в		
№		схема ОУ	E_+ , В	E_- , В	R_H , кОм	f , Гц	$V_{вх1}$, мкВ	$V_{вх2}$, мВ	K_U , ед.	R_H , Ом	f , Гц	$V_{вх1}$, мВ	R_H , кОм
1	1	LT1037A	25	-25	4	80	3	4,5	45	500	10	7	1,5
2	2	LT1057S	5	0	1	10	5	5	30	1000	80	2	0,5
3	3	LT1077A	10	0	10	90	10	15	75	500	70	4	2
4	4	LT1078A	10	-10	3	60	7	7	45	300	80	8	0,5
5	5	LT1126	15	-15	6	30	2	3	95	600	30	6	1
6	6	LT1024	5	-5	1	60	5	5	45	700	50	9	0,5
7	7	LT1057	5	-5	2	10	5	10	65	100	70	1	1,5
8	8	LT1057S	15	0	9	30	10	15	90	200	30	5	1
9	9	LT1128	5	-5	3	70	1	2	65	800	60	1	0,5
10	10	LT1012	30	-30	4	40	1	0,5	65	400	60	2	1
11	11	LT1024A	10	0	3	30	4	4	25	300	100	3	1,5
12	12	LT1056A	5	0	10	40	10	15	70	700	50	9	0,5
13	13	LT1127	15	0	9	10	6	6	65	500	60	2	1
14	14	LT1012D	20	-20	5	60	9	4,5	55	700	80	1	2
15	15	LT1012D	30	0	4	10	6	6	50	500	50	7	0,5
16	16	LT1006S8	25	0	1	90	1	1,5	55	400	50	2	1,5
17	17	LT1079A	25	-25	1	30	2	2	15	300	10	9	2
18	18	LT1058	15	0	2	40	1	1	60	600	20	7	1
19	19	LT1115	10	0	3	100	4	8	70	500	80	4	1
20	20	LT118A	10	0	1	60	4	4	70	500	100	10	2
21	21	LT1078A	5	0	10	90	10	5	85	200	50	9	1
22	22	LT1037A	10	0	3	50	10	10	70	400	100	6	1,5
23	23	LT1037A	10	-10	2	80	10	15	85	600	10	9	1
24	24	LT1001S8	5	0	10	50	10	20	100	400	100	4	2
25	25	LT1028A	15	-15	9	40	8	12	20	300	50	5	2
26	26	LT1078	30	0	4	90	5	10	5	900	70	3	1
27	27	LT1014	5	-5	10	80	3	1,5	45	200	30	7	2
28	28	LT1122	10	0	4	10	9	4,5	95	1000	40	7	1,5
29	29	LT1001	25	0	3	10	7	14	15	100	50	2	2
30	30	LT1127	30	-30	5	90	4	2	40	900	20	1	2