

Лабораторная работа № 4

Исследование операционных усилителей и схем на их основе

Цель работы – изучение принципа работы, основных параметров и характеристик операционного усилителя; измерение основных параметров операционного усилителя; исследование масштабных усилителей на операционных усилителях.

4.1. Краткие теоретические сведения

Операционный усилитель (ОУ) – многокаскадный усилитель постоянного тока (УПТ) с дифференциальным входом, обладающий большим коэффициентом усиления, высоким входным и малым выходным сопротивлениями.

ОУ выполняется в виде интегральной микросхемы и является одним из основных элементов аналоговой схемотехники, на основе которого можно создавать самые разнообразные электронные устройства: усилители, генераторы, сумматоры, интеграторы, дифференциаторы, активные фильтры и др. Реализация различных устройств на базе ОУ значительно проще, чем на отдельных транзисторах.

Операционные усилители имеют один выход и два входа: *инвертирующий* и *неинвертирующий*. В большинстве случаев сигнал подается на один из входов, а второй вход соединяется с нулевым проводом. При этом, если сигнал подается на инвертирующий вход, то помимо усиления осуществляется его инвертирование (изменение знака). Питание ОУ обычно осуществляется *двухполярным (биполярным) напряжением*, которое подводится к соответствующим выводам ($+U_{п}$ и $-U_{п}$). Кроме того, ОУ может иметь выводы *FC* для подключения цепей частотной коррекции и выводы *NC* – для подключения элементов начальной балансировки (установки нуля на выходе при нулевом входном сигнале).

Условное графическое обозначение ОУ на принципиальных схемах приведено на рис. 4.1а. Его выполняют в виде прямоугольника с дополнительными полями, в которых указывают назначение выводов. Инвертирующий вход обозначается знаком «0» или «-».

При построении конкретного электронного устройства различаются только способы подключения входов и выхода ОУ. Поэтому на функциональных схемах используется упрощенное обозначение, содержащее только три указанных вывода (рис. 4.1б,в). Подключение остальных выводов, как правило, соответствует типовой схеме включения, т.е. цепи коррекции и балансировки для конкретного ОУ являются типовыми и приводятся в справочниках. В качестве примера на рисунке 4.2 приведена одна из схем включения операционного усилителя К140УД6. Некоторые типы ОУ не требуют внешних цепей коррекции и балансировки.

Внутренняя структура ОУ обычно представлена тремя составными частями, имеющими определенное функциональное назначение. Входным каскадом является дифференциальный усилитель. Он обладает высоким входным сопротивлением, имеет

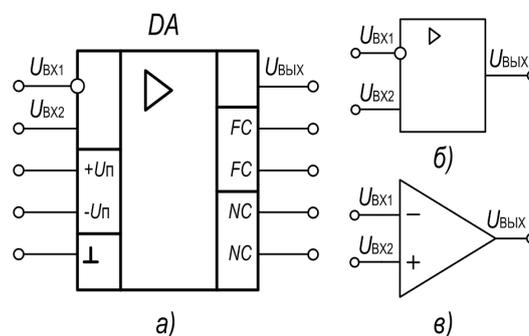


Рис. 4.1 Условное графическое обозначение ОУ на схемах.

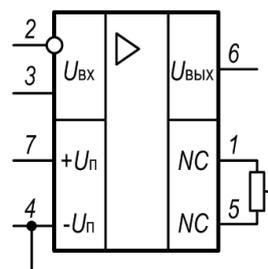


Рис.4.2 Схема включения ОУ К140УД6

большой коэффициент усиления по отношению к разности входных сигналов и низкий коэффициент усиления по отношению к одинаковым (синфазным) сигналам на входах. Он также в значительной степени ослабляет влияние изменений температуры и напряжения питания на выходной сигнал. *Промежуточные каскады* (один или несколько) обеспечивают необходимое усиление сигнала по току и напряжению, а также согласование выходного и входного сопротивлений предыдущего и последующего каскадов. *Выходной каскад*, который, как правило, выполняется по двухтактной схеме, обеспечивает требуемое усиление сигнала по мощности.

В зависимости от типа ОУ схемы построения каскадов могут иметь свои особенности, а число промежуточных каскадов может быть различным. Однако внутренняя структура ОУ и функциональное назначение отдельных каскадов при этом не изменяются. На рисунке 4.3 приведен один из типовых вариантов схемы ОУ.

На транзисторах $VT1, VT2$ выполнен дифференциальный усилитель. Для задания эмиттерного тока транзисторов $VT1, VT2$ используется источник стабильного тока на транзисторах $VT3$ и $VT4$, выполненный по схеме «токавого зеркала». Резисторы $R_{Э1}$ и $R_{Э2}$ компенсируют отличия входных характеристик транзисторов $VT1, VT2$ и увеличивают входное сопротивление усилителя за счет местной последовательной ООС по току нагрузки каждого из транзисторов.

В качестве промежуточных каскадов используются дифференциальный усилитель на транзисторах $VT5$ и $VT6$ и усилитель, выполненный по схеме ОЭ на транзисторе $VT7$. Они обеспечивают дальнейшее усиление сигнала по току, а также усиление по напряжению до требуемого уровня. Температурная стабилизация тока $VT7$ обеспечивается введением ООС по току нагрузки с помощью резистора $R_{Э4}$.

В выходном каскаде ОУ используется двухтактный усилитель мощности на транзисторах $VT8$ и $VT9$, работающий в режиме класса усиления AB . Начальный ток транзисторов задается напряжением смещения диодов $VD1$ и $VD2$. Эти же диоды обеспечивают и температурную стабилизацию тока покоя выходного усилителя. Резисторы $R_{Э5}$ и $R_{Э6}$ компенсируют влияние неидентичности параметров комплементарной пары транзисторов $VT8, VT9$.

Вывод $U_{КОР}$ используется для подключения элементов частотной коррекции.

Свойства ОУ определяются его статическими и динамическими характеристиками.

Статические передаточные характеристики ОУ представлены на рисунке 4.4. Они получены при подаче сигнала на один из входов и нулевом сигнале на

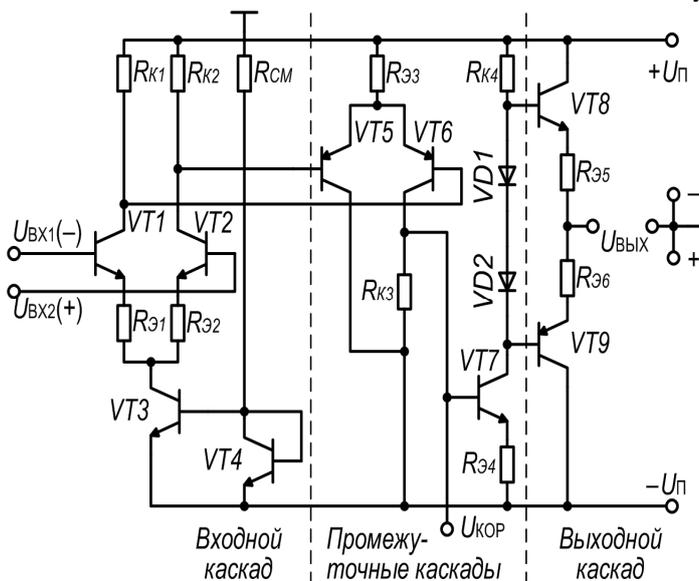


Рис. 4.3 Упрощённая схема трехкаскадного ОУ

Входной каскад

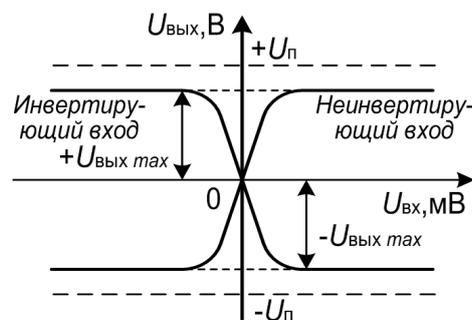


Рис. 4.4 Передаточные характеристики ОУ

другом входе. Характеристики имеют горизонтальный и наклонный участки.

Наклонный участок каждой кривой соответствует области линейного усиления сигнала. На этом участке выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}} = K_{\text{У0}} \cdot U_{\text{ВХ}}$, где $K_{\text{У0}}$ – коэффициент усиления ОУ без обратной связи, $U_{\text{ВХ}}$ – входное напряжение.

Горизонтальные участки кривых соответствуют области насыщения, в которой $U_{\text{ВЫХ}}$ принимает одно из предельных значений $+U_{\text{ВЫХ max}}$ либо $-U_{\text{ВЫХ max}}$. Этими значениями ограничивается амплитуда выходного сигнала. Режим насыщения достигается при $K_{\text{У0}} \cdot U_{\text{ВХ}} > U_{\text{ВЫХ max}}$. По абсолютному значению $U_{\text{ВЫХ max}}$ обычно на 2...3 В меньше напряжений питания $U_{\text{П}}$. При $U_{\text{П}} = \pm 15$ В диапазон изменения $U_{\text{ВЫХ}}$ близок к ± 12 В. При расчёте обычно принимают $U_{\text{ВЫХ max}} = 2/3 U_{\text{П}}$, для того чтобы ОУ гарантированно работал в линейной области.

К динамическим относятся *переходные* и *частотные характеристики* ОУ.

На практике при выборе ОУ и расчёте построенных на их основе схем руководствуются основными параметрами, которые приводятся в справочниках. К ним относятся:

- коэффициент усиления по напряжению $K_{\text{У0}}$ характеризует способность ОУ усиливать подаваемый на его входы дифференциальный сигнал (обычно $10^3 \dots 10^6$);
- входное сопротивление $R_{\text{ВХ0}}$ – сопротивление ОУ по отношению к входному сигналу. Различают *дифференциальное входное сопротивление* $R_{\text{ВХ.диф.}}$, т.е. сопротивление между двумя входными выводами, и *синфазное входное сопротивление* $R_{\text{ВХ.синф.}}$, т.е. сопротивление между объединёнными входными выводами и «землёй». Обычно в справочниках приводится значение только дифференциального входного сопротивления, которое в 10...100 раз меньше синфазного и составляет $10^4 \dots 10^{10}$ Ом;
- выходное сопротивление $R_{\text{ВЫХ.0}}$ – внутреннее сопротивление ОУ, рассматриваемого по отношению к нагрузке как эквивалентный источник ЭДС (для большинства ОУ 10...1000 Ом);
- входное напряжение смещения $U_{\text{см}}$ характеризует разбаланс и несимметрию входного дифференциального каскада ОУ и численно равно постоянному напряжению, которое необходимо приложить к входу ОУ, чтобы его выходное напряжение стало равным нулю (как правило 1...10 мВ);
- входной ток $I_{\text{ВХ}}$ (входной ток смещения) – ток на входах ОУ, необходимый для работы входного каскада (менее 10 мкА);
- разность входных токов $\Delta I_{\text{ВХ}}$ (ток сдвига) – разность входных токов смещения, которая появляется вследствие неодинаковых коэффициентов передачи тока $h_{21э}$ транзисторов входного каскада ОУ (менее 1 мкА);
- коэффициент ослабления синфазного сигнала ($K_{\text{ос.сф.}}$) характеризует способность ослаблять синфазные (приложенные к двум входам одновременно) сигналы (обычно составляет 50...120 дБ).

Динамические свойства ОУ обычно характеризуются двумя параметрами:

- предельной частотой (F_{max}), на которой модуль коэффициента усиления равен 1 или частотой единичного усиления (F_1), что то же самое;
- максимальной скоростью нарастания выходного напряжения ($V_{U_{\text{ВЫХ.}}}$), которая измеряется при подаче на вход ОУ напряжения ступенчатой формы амплитудой более 0,1 В (для большинства ОУ $\sim 0,1 \dots 10$ В/мкс).

Применение ОУ весьма разнообразно. Однако следует отметить, что во всех случаях ОУ используется с цепями отрицательной обратной связи (ООС), снижающими его коэффициент усиления. Без этого нормальная работа устройства невозможна. Цепи ООС могут быть построены на резисторах, либо с использованием реактивных элементов. В последнем случае ООС является частотно зависимой. Таким образом, использование соответствующих цепей ООС позволяет обеспечить требуемую функциональную зависимость между входным и выходным сигналами.

Если параметры цепи ООС выбрать так, чтобы проходящие по ней токи были на 1...2 порядка больше входных токов ОУ, то влияние параметров последнего на свойства устройства будет незначительно, т.е. функциональная зависимость между входным и выходным сигналами будет определяться главным образом цепью ООС. Выбор параметров цепей ООС при построении устройств на ОУ обычно осуществляют с учетом указанного условия. Для этого принимают сопротивление в цепи ООС

$$R_{OC} \leq \frac{2\delta \cdot U_{II}}{3I_{BX}}, \quad (4.1)$$

где δ – допустимая погрешность от влияния входного тока ОУ (обычно $10^{-4} \dots 10^{-3}$).

Инвертирующий усилитель обеспечивает усиление сигнала по мощности с изменением знака (инвертированием). Его схема приведена на рисунке 4.5. В этой схеме входной сигнал подаётся на инвертирующий вход ОУ, а его неинвертирующий вход соединен с нулевым проводом. При выполнении условия (4.1) с достаточной точностью можно считать, что коэффициент усиления по напряжению

$$K_U \approx -\frac{R_{OC}}{R_1}, \quad (4.2)$$

а выходное напряжение $U_{ВЫХ} = K_U \cdot U_{ВХ}$.

Включение резистора $R_{КОР}$, имеющего сопротивление

$$R_{КОР} = \frac{R_1 R_{OC}}{R_1 + R_{OC}}, \quad (4.3)$$

повышает точность работы схемы за счет компенсации влияния входных токов $I_{ВХ}$ ОУ.

Входное сопротивление инвертирующего усилителя $R_{ВХ} \approx R_1$.

Если $R_1 = R_{OC}$, то $K_U = -1$ и получаем схему инвертирующего повторителя напряжения (инвертора), у которого $U_{ВЫХ} = -U_{ВХ}$.

Неинвертирующий усилитель обеспечивает усиление сигнала без изменения знака (рис. 4.6а). В этой схеме входной сигнал подаётся на неинвертирующий вход ОУ, а на его инвертирующий вход с помощью делителя выходного напряжения, выполненного на резисторах R_1 и R_{OC} , подаётся напряжение ООС. Коэффициент усиления неинвер-

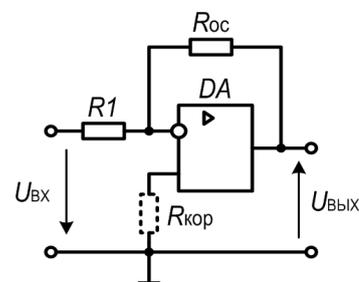


Рис. 4.5 Инвертирующая схема включения ОУ

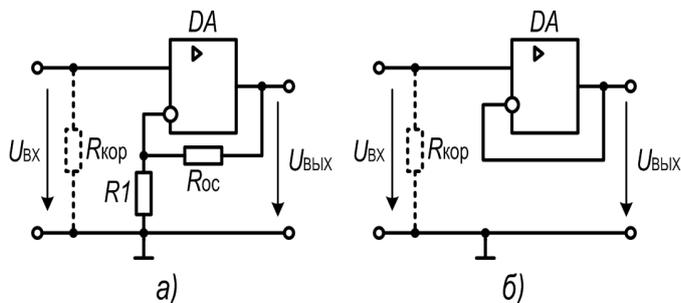


Рис. 4.6 Неинвертирующие схемы включения ОУ: а – усилитель; б – повторитель

тирующего усилителя по напряжению

$$K_U \approx 1 + \frac{R_{OC}}{R_1}, \quad (4.4)$$

при этом R_{OC} выбирается исходя из условия (4.1).

При выполнении условия $R_{OC} = 0$ и $R_1 \rightarrow \infty$ получаем схему неинвертирующего повторителя напряжения с $K_U \approx 1$, т.е. $U_{ВЫХ} \approx U_{ВХ}$ (рис. 4б). Входное сопротивление повторителя напряжения на ОУ может составлять $10^7 \dots 10^{12}$ Ом, а выходное – доли Ом.

Для повышения точности работы ОУ включают резистор $R_{КОР}$, сопротивление которого определяется по формуле (4.3), однако включение этого резистора приводит к уменьшению входного сопротивления усилителя, т.к. в этом случае $R_{ВХ} \approx R_{КОР}$.

Инвертирующий сумматор может быть построен на основе инвертирующего усилителя (рис. 4.7а) путем добавления соответствующего числа входов. При этом

$$U_{ВЫХ} = - \left(U_{ВХ1} \frac{R_{OC}}{R_1} + U_{ВХ2} \frac{R_{OC}}{R_2} + U_{ВХ3} \frac{R_{OC}}{R_3} \right), \quad (4.5)$$

если $R_1 = R_2 = R_3 = R_{OC}$, то $U_{ВЫХ} = -(U_{ВХ1} + U_{ВХ2} + U_{ВХ3})$.

Дифференциальный усилитель представляет собой сочетание инвертирующего и неинвертирующего включения ОУ (рис. 4.7б). Входные напряжения $U_{ВХ1}$ и $U_{ВХ2}$ подаются соответственно на инвертирующий и неинвертирующий входы.

Выходное напряжение данной схемы

$$U_{ВЫХ} = -U_{ВХ1} \frac{R_{OC}}{R_1} + U_{ВХ2} \frac{R_3}{R_2 + R_3} \left(1 + \frac{R_{OC}}{R_1} \right), \quad (4.6)$$

если $R_{OC}/R_1 = R_3/R_2$, то $U_{ВЫХ} = (-U_{ВХ1} + U_{ВХ2}) \frac{R_{OC}}{R_1}$.

Следовательно, выходное напряжение такого устройства прямо пропорционально разности входных напряжений.

Замечание: Вышеприведённые формулы расчёта коэффициентов усиления и выходных напряжений справедливы только в линейном режиме работы ОУ.

4.2. Порядок выполнения работы.

- ❶ Описание лабораторной установки приведено в Приложении 1 (рис.П1.1).
- ❷ Предназначенные для исследования схемы УК с перечнем используемых элементов приведены в Приложении 2.

Задание 1: Определение напряжения смещения $U_{СМ}$ операционного усилителя

При отключенном питании ЛОЭ установить исследуемую схему (рис. П2.1).

а) установить переключатели на панели «Коммутаторы» в положения **3, 5, 6, 9, 12**;

б) подключить мультиметр к гнездам **U2** и \perp ; включить питание ЛОЭ; изменяя напряжение источника питания **G1**, добиться нулевого значения выходного напряжения (измеряется постоянное напряжение в диапазоне до 200 мВ);

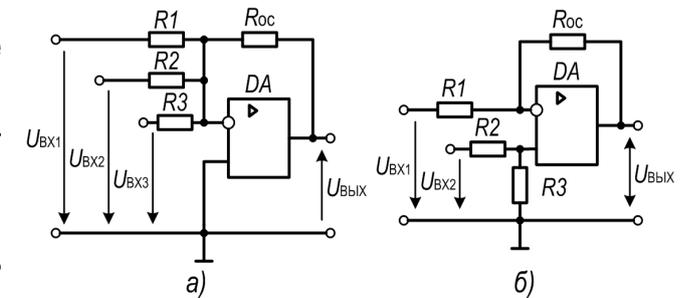


Рис. 4.7 Инвертирующий сумматор (а) и дифференциальный усилитель (вычитатель) (б)

в) подключить мультиметр к гнездам **U3** и \perp , записать установленное значение напряжения U_{G1} источника питания **G1**;

г) рассчитать значение напряжения смещения по формуле $U_{см} = U_{G1} \frac{R6 \parallel R7}{R4 + R6 \parallel R7}$.

Задание 2: Определение собственного коэффициента усиления ОУ

а) подключить генератор к входу ЛОЭ (гнезда $\ominus \leftrightarrow \perp$);

б) установить переключатели на панели «**Коммутаторы**» в положения **3, 5, 6, 9, 11**; подключить осциллограф к гнезду **2** на панели «**Контрольные точки**»;

в) установить амплитудное значение входного напряжения $U_{m\text{ вх.}} = 1$ В частотой 100 Гц; измерить и записать амплитудное значение выходного напряжения $U_{m\text{ вых.}}$;

г) рассчитать собственный коэффициент усиления операционного усилителя по формуле $K_{OY} \approx \frac{U_{m\text{ вых.}}}{U_{m\text{ вх.}}} \frac{R1}{R3}$.

Задание 3: Исследование усилительного каскада с неинвертирующим включением ОУ

а) подключить генератор к входу ЛОЭ (гнезда $\ominus \leftrightarrow \perp$);

б) подключить осциллограф к гнезду **2** на панели «**Контрольные точки**»; установить переключатели на панели «**Коммутаторы**» в положения **1, 5, 6, 10, 12**;

в) установить амплитудное значение входного напряжения $U_{m\text{ вх.}} = 10$ В частотой 3 кГц; измерить и записать амплитудное значение выходного напряжения $U_{m\text{ вых.}}$;

г) рассчитать коэффициент усиления по формуле $K_U^{np.} \approx \frac{U_{m\text{ вых.}}}{U_{m\text{ вх.}}} \frac{R1}{R3}$;

д) сравнить полученное значение $K_U^{np.}$ с теоретическим $K_U^{теор.} \approx 1 + \frac{R11}{R10}$;

е) установить переключатели на панели «**Коммутаторы**» в положения **1, 5, 7, 10, 12** и повторить пункты **в)** и **г)**;

ж) сравнить полученное значение $K_U^{np.}$ с теоретическим $K_U^{теор.} \approx 1 + \frac{R11}{R8 \parallel R10}$.

4.3. Контрольные вопросы

1. Какие выводы содержит ОУ и для чего они предназначены?
2. Из каких каскадов состоит операционный усилитель?
3. Какими основными параметрами характеризуется ОУ.
4. В чём причина возникновения напряжения смещения и входных токов в ОУ?
5. Чем ограничивается выходное напряжение ОУ?
6. Почему для работы ОУ необходимо наличие цепей ООС и в чем их назначение?
7. Как измеряются основные параметры ОУ?
8. Как рассчитываются коэффициенты усиления для различных схем включения ОУ?

Приложения

Приложение 1. Описание лабораторной установки ЛОЭ

Лабораторная работа выполняется на лабораторной установке ЛОЭ, которая предназначена для исследования различных электронных устройств, выполненных в отдельных корпусах. Общий вид установки показан на рис.П1.1.

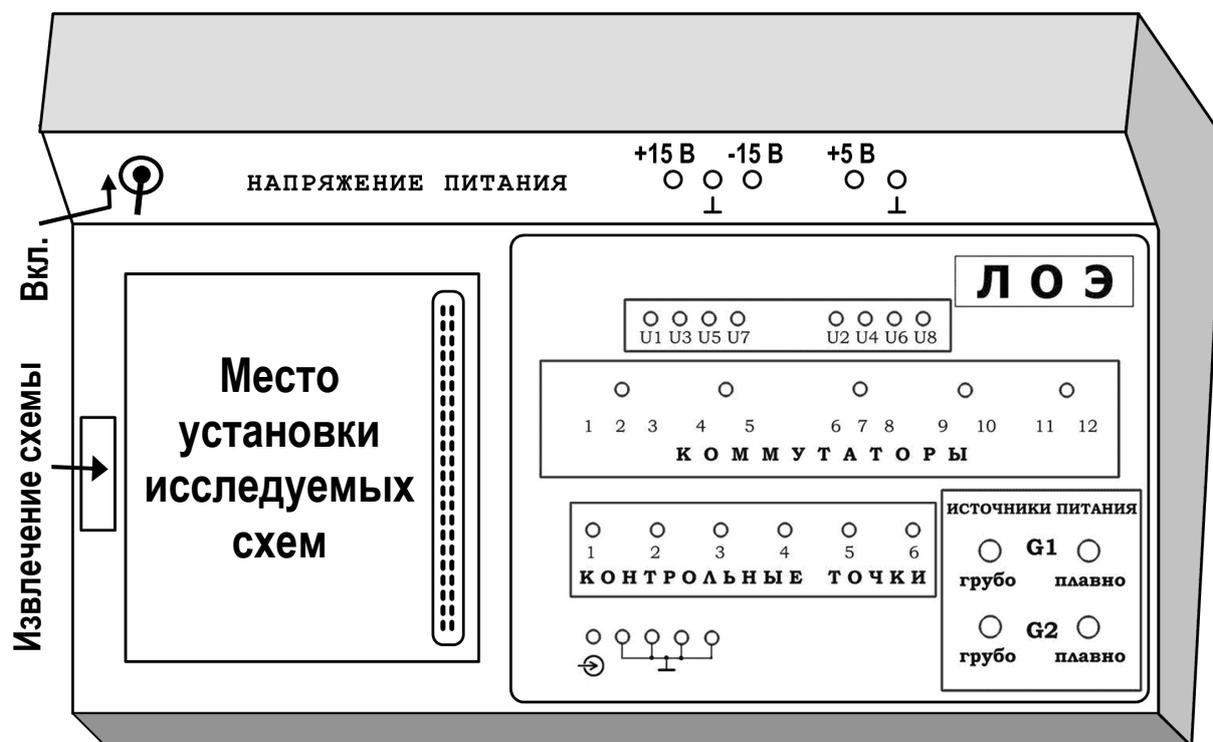


Рис.П1.1 Лабораторная установка ЛОЭ

Для исследования электронных устройств на лабораторной установке имеются следующие наборы переключателей и гнезд:

- **+15 В** – гнездо выхода напряжения питания положительной полярности +15 В;
- **-15 В** – гнездо выхода напряжения питания отрицательной полярности -15 В;
- **+5 В** – гнездо выхода напряжения питания положительной полярности +5 В;
- **U1...U8** – гнезда для измерения потенциалов (постоянных или переменных) соответствующих точек цепи относительно общей точки;
- **«Коммутаторы»** – служат для замыкания соответствующих контактов электрических цепей указанных на схеме электронного устройства;
- **«Контрольные точки»** – служат для подключения сигнального провода осциллографа к указанным на схеме электронного устройства точкам;
- **«Источники питания» G1 и G2** используются для установки определённого значения напряжения в соответствующих схемах;
- \oplus – гнездо для подключения сигнального провода с выхода генератора;
- \perp – гнезда для подключения проводов к общей точке.

➡ **Установка и извлечение исследуемых схем должны производиться при отключённом питании ЛОЭ!**

➡ **При извлечении схемы из ЛОЭ придерживайте схему рукой.**

Приложение 2. Практическая схема для исследования усилительного каскада на операционном усилителе

УСИЛИТЕЛЬ ПЕРЕМЕННОГО СИГНАЛА НА ОУ

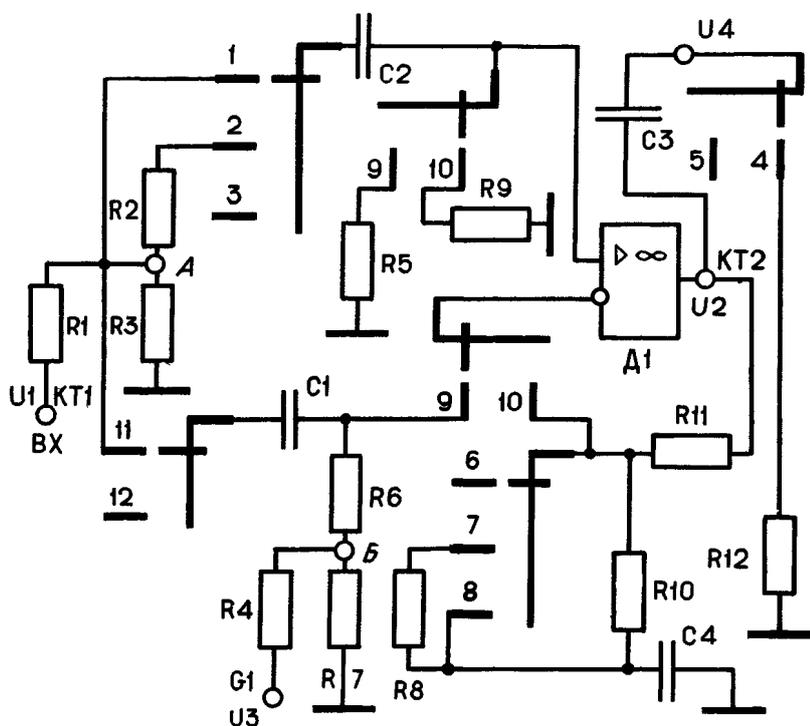


Рис.П2.1 Практическая схема для измерения характеристик и параметров усилительного каскада на операционном усилителе

Поз. обозн.	Наименование	Кол.
	<u>Микросхемы</u>	
Д1	КР140УД1А	1
	<u>Конденсаторы</u>	
С1,С2	30 мкФ	2
С3	0,1 мкФ	1
С4	1 мкФ	1
	<u>Резисторы</u>	
Р1	100 кОм	1
Р2	3 кОм	1
Р3	100 Ом	1
Р4	20 кОм	1
Р5,Р6	2 кОм	2
Р7	200 Ом	1
Р8	1 кОм	1
Р9	150 кОм	1
Р10	1 кОм	1
Р11	51 кОм	1
Р12	1 кОм	1