



**Кафедра конструирования  
и производства радиоаппаратуры**

---

**А.П. КУЛИНИЧ**

**СХЕМОТЕХНИКА ЭЛЕКТРОННЫХ  
СРЕДСТВ. СХЕМОТЕХНИКА**

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УЗЛЫ НА ОСНОВЕ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ**

Методические указания к выполнению лабораторной работы

**ТОМСК 2015**

## 1 ВВЕДЕНИЕ

В ходе выполнения работы предусматривается:

- 1) изучение структуры и основных параметров операционных усилителей (ОУ);
- 2) исследование основных характеристик функциональных узлов (ФУ) на основе ОУ.

## 2 КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ И ИХ ПРИМЕНЕНИИ

Наименование "операционный" по традиции присваивается усилителю, с помощью которого можно решать операторные уравнения, если выход ОУ через соответствующие пассивные цепи отрицательной обратной связи (ООС) замкнуть на инвертирующий вход. В этом случае передаточная характеристика замкнутой системы с большой точностью соответствует передаточной характеристике цепи ООС и практически не зависит от параметров самого ОУ. Для точного и быстрого решения операторных уравнений требуются усилители с большим запасом параметров:

- бесконечно большой коэффициент усиления по напряжению  $-A$ ;
- бесконечно большое полное входное сопротивление  $-Z_{вх}$ ;
- бесконечно малое выходное сопротивление  $-Z_{вых}$ ;
- равенство нулю выходного напряжения  $U_{вых}$  при равных напряжениях на входах  $U_{вх1} = U_{вх2}$ ;
- бесконечно большая полоса пропускания (отсутствие задержки при прохождении сигналов через ОУ).

У реального ОУ все параметры имеют конечное значение и зависят от частоты и амплитуды подаваемых сигналов. Аналоговая функциональная система любой сложности может быть построена из ряда простых функциональных блоков, к которым относятся инвертирующие, не инвертирующие, суммирующие и дифференциальные усилители, интеграторы, дифференциаторы, активные фильтры а также различные функциональные преобразователи с нелинейной зависимостью выходного напряжения от входного. Некоторые структурные схемы этих узлов приведены на рисунке 1.

**ИНВЕРТИРУЮЩИЙ** усилитель (рис.1 а) использует отрицательную обратную связь по напряжению с выхода на инвертирующий вход ОУ. Неинвертирующий вход ОУ может быть заземлен непосредственно или через резистор сопротивлением  $R1 = R2 || R3$  (для симметрирования входных токов ОУ). Коэффициент усиления по напряжению  $K_u$  и длительность фронта переходной характеристики  $t_f$  (по уровням 0,1...0,9) при малых входных сигналах равны, соответственно:

$$K_u = - \frac{R3}{R2 \cdot \left(1 + \frac{1}{B \cdot A}\right)}, \quad (1)$$

$$t_{\phi} = \frac{0,35 \cdot R3}{R2 \cdot f_{\tau}}, \quad (2)$$

где  $A$  - коэффициент усиления ОУ по напряжению малых сигналов;

$$B = \frac{R2}{R2 + R3}; \quad (3)$$

$f_{\tau}$  - частота единичного усиления ОУ.

НЕИНВЕРТИРУЮЩИЙ усилитель (рис.1,б) использует параллельную обратную связь по напряжению с выхода на инвертирующий вход ОУ, но входной сигнал подается на неинвертирующий вход. Коэффициент усиления по напряжению  $K_u$  и длительность фронта переходной характеристики  $t_{\phi}$  (по уровням 0,1...0,9) при малых входных сигналах равны, соответственно:

$$K_u = -\frac{1 + \frac{R3}{R2}}{1 + \frac{1}{A \cdot B}}, \quad t_{\phi} = \frac{0,35}{B \cdot f_{\tau}} \quad (4), (5)$$

Напряжение на выходе идеального ИНТЕГРАТОРА (рис.1,в) прямо пропорционально интегралу от входного напряжения. Передаточная функция реального инвертирующего интегратора имеет вид

$$K_u = \frac{A}{[1 + p \cdot T_{\gamma}] \cdot (1 + A)}, \quad (6)$$

где  $T_{\gamma} = R2 \cdot C2$  - постоянная времени цепи  $R2, C2$ ;  $p = i\omega$  - оператор

Выходное напряжение идеального ДИФФЕРЕНЦИАТОРА (рис.1,г) прямо пропорционально производной от напряжения на входе устройства. Передаточная функция реального инвертирующего дифференциатора имеет вид:

$$K_u = \frac{-p \cdot T_{\delta}}{1 + p \cdot T_{\eta}} \quad (7)$$

где постоянные времени  $T_{\delta}$  и  $T_{\eta}$  RC цепей равны, соответственно,

$$T_{\delta} = R3 \cdot C1 \text{ и } T_{\eta} = R5 \cdot C1.$$

Напряжение на выходе идеального ЛОГАРИФМИРУЮЩЕГО (рис.1,д) и АНТИЛОГАРИФМИРУЮЩЕГО (рис.1,е) усилителей определяется соответствующей функциональной зависимостью от входного напряжения.

### 3 ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования функциональных узлов на основе операционных усилителей выполняются на левом нижнем поле сменной панели макета №2. Точки подключения питания и контрольных приборов выведены на специальные гнезда с пояснительными надписями. Инвертирующий и неинвертирующий входы ОУ подключены к гнездам с обозначением, соответственно,  $X1$  и  $X2$ , выход ОУ - к гнезду  $Y$ . На гнездах подключения питания ОУ указаны величина и полярность подаваемого напряжения. Кроме того, на панели макета выведены гнезда цепей ООС, позволяющие с помощью внешних соединений моделировать функциональные узлы различного назначения.

Обозначения элементов на схеме рис.1 соответствует их позиционному обозначению на панели макета. Элементы, используемые в схеме макета, имеют следующие номиналы:

$$R1 = R2 = R5 = 4,3 \text{ k}\Omega; \quad R3 = R4 = 30 \text{ k}\Omega;$$

$$C1 = 2,2 \text{ нф}; \quad C2 = 68 \text{ нф}.$$

В данной серии лабораторных работ исследуются функциональные узлы на основе ОУ серии 153УД2, принципиальная электрическая схема которого приведена на рис.2.

Входной каскад ОУ состоит из двух комплементарных пар  $T1, T4$  (правое плечо дифференциального каскада ДК) и  $T2, T3$  (левое плечо ДК), нагрузкой которых является двойное токовое зеркало на транзисторах  $T5, T6, T7$ . Выход ДК (коллекторы  $T4, T6$ ) соединен с двухкаскадным усилителем  $T10, T15$ , коллекторы этих транзисторов -со входами двухтактного выходного каскада ( базами  $T20, T21$ ).

Для формирования стабильных токов выходного каскада ОУ наряду с двойным зеркалом  $T5, T6, T7$  используется также структура на транзисторах  $T11, T12, T13$ , вырабатывающая стабильный ток коллектора  $T9$ . Величина этого тока определяется напряжением база-эмиттер транзисторов  $T12, T13$  и остается практически постоянной при изменении питающих напряжений от  $+3В$  до  $+22В$ . Ток коллектора  $T9$  поступает в объединенную базовую цепь  $T3, T4$  транзисторов ДК и делится поровну так, что в каждой из коллекторных цепей  $T5, T6$  (при короткозамкнутой нагрузке) протекают равные токи, не зависящие от разброса синфазного коэффициента усиления по току транзисторов  $T3, T4$ . В конечном итоге стабилизируются коэффициент усиления первого каскада. Кроме того, через цепь  $R1, R2$  осуществляется отрицательная обратная связь, стабилизирующая усиление ОУ.

Двухтактный выходной каскад состоит из эмиттерного повторителя  $T20$  и эмиттерного повторителя  $T21, T22$ . Для защиты выходного каскада от короткого замыкания нагрузки применяются транзисторы  $T19, T21$  и резисторы  $R4, R5$  с номиналами 25 и 50 Ом. Питание базовой цепи  $T20$  (плечо выходного каскада) осуществляется через коллекторную цепь транзистора  $T16$ . Транзистор  $T17$  в диодном включении использован для уменьшения нелинейных искажений в выходном каскаде.

Положительная полуволна выходного тока ограничивается транзистором  $T19$ , при этом потеря выходного напряжения на защитном резисторе  $R4 = 25 \text{ Ом}$  не превышает  $0,6 \text{ В}$ . При отрицательной полуволне ток нагрузки протекает по цепи  $R4, R5, T22$  и часть его по цепи  $T21, R2$ . При коротком замыкании на выходе ток через выходные транзисторы резко возрастает, что приводит к открыванию защитных транзисторов через которые ответвляется часть базового тока выходных транзисторов ограничивая этим их эмиттерные токи и, в конечном итоге, выходной ток ОУ.

Частотная характеристика ОУ корректируется внешним конденсатором с номиналом от 3 до 30 пФ, подключаемым к выводам 1 и 8. *Балансировка* - установка нулевого потенциала на выходе ОУ, при входном напряжении равном нулю, осуществляется путем компенсации асимметрии ДК с помощью внешней цепи, подключаемой к выводу 5 ОУ.

Основные параметры ОУ153УД2 (типовое значение/граничное значение):

Коэффициент усиления  $A = 100000 / >25000$ .

Входное сопротивление,  $\text{кОм}$   $R_{вх} = 800 / >300$ .

Выходное сопротивление,  $\text{Ом}$   $R_{вых} = 30 / <50$ .

Входное напряжение смещения нуля,  $\text{мВ}$   $E_{см} = 4 / <6$

Коэффициент ослабления синфазного входного сигнала, дВ

$K_{осс} = 86 / >70$ .

Максимальное входное напряжение, В  $U_{вх}$

синфазное  $+U_c = +15$ .

дифференциальное  $+2U_d = +30$ .

Максимальное выходное напряжение, В  $U_{вых} = +12,5$ .

Полоса единичного усиления,  $\text{МГц}$   $f_T = 1$ .

Сопротивление нагрузки,  $\text{кОм}$   $R_{нагр}$  не менее 2.

Ток, потребляемый по цепи питания,  $\text{мА}$   $I_{пот} = 2 / <4$ .

#### 4 ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ПОДГОТОВКА

Изучить работу функциональных типовых узлов на основе операционных усилителей по материалам лекций и рекомендуемой в данном руководстве литературе.

Составить структурные схемы для исследования :

1) частотных характеристик ФУ;

2) временных характеристик ФУ;

3) проходных характеристик логарифмического и антилогарифмического усилителей.

Ознакомиться с лабораторным макетом. По приведенным на схеме параметрам элементов цепей обратных связей, рассчитать коэффициенты усиления, ширину полосы пропускания, длительности фронта переходной характеристики инвертирующего и не инвертирующего усилителей, оценить временные интервалы, в пределах которых можно считать справедливыми операции интегрирования и дифференцирования.

#### 5 ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

Провести исследования :

1) частотных характеристик инвертирующего и неинвертирующего усилителей;

2) временных характеристик инвертирующего и неинвертирующего усилителей;

3) частотных характеристик интегратора и дифференциатора;

4) временных характеристик интегратора и дифференциатора;

5) коэффициента передачи логарифмического и антилогарифмического усилителей;

6) влияния изменения напряжений питания на характеристики ОУ.

## 6 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

### 6.1 Исследование частотных характеристик масштабных усилителей.

Амплитудно-частотные характеристики линейных усилителей, выполненных по схемам рис.1.а и рис.1.б, определяются следующим образом. На вход исследуемого ФУ подают гармоническое напряжение постоянной амплитуды в анализируемом диапазоне частот. Выходное напряжение ОУ контролируют вольтметром и осциллографом по отсутствию нелинейных искажений. Отношение амплитуд выходного и входного напряжений и характеризует модуль коэффициента передачи амплитудно-частотной характеристики. Исследования проводить для двух значений сопротивления цепи обратной связи  $R_3$  и  $R_4$ .

Для измерения фазо-частотной характеристики ФУ необходимо использовать внешнюю синхронизацию осциллографа.

Сравнить площадь усиления (произведение коэффициента усиления на величину полосы пропускания на уровне 0,7) для разных коэффициентов усиления ФУ.

Определить коэффициенты усиления усилителей при других значениях питающих напряжений. Токи потребления ОУ контролировать миллиамперметром, установленным на приборной панели.

Методика определения частотной характеристики интегратора и дифференциатора аналогична вышеизложенной.

### 6.2 Исследование временных характеристик ФУ

Временные характеристики линейных ФУ могут быть измерены при помощи осциллографа, путем подачи на вход устройства прямоугольных импульсов с пренебрежимо малой длительностью фронтов (длительность и период следования которых определены на этапе предварительной подготовки). Амплитуду сигналов, подаваемых на вход ФУ, контролировать по отсутствию искажений выходного сигнала при двух значениях сопротивления обратной связи  $R_3$ ,  $R_4$ .

Измерить с помощью осциллографа длительность фронта импульсного сигнала на выходе инвертирующего и неинвертирующего усилителей. Сравнить расчетные и экспериментальные данные полосы пропускания усилителей.

Для исследования временных характеристик интегратора и дифференциатора на вход соответствующего ФУ подавать прямоугольные импульсы, длительность которых обеспечивает нормальное функционирование исследуемого узла. Изменяя длительность и период следования входных импульсов, по отклонениям выходного напряжения ФУ от идеального, оценить полосу пропускания ФУ и сравнить с соответствующей характеристикой, определенной в п. 5.3.

6.3 Для исследования коэффициента передачи нелинейного усилителя на его вход подать постоянное напряжения с гнезда  $+E_{см}$  верхнего левого поля макета; выходное напряжение контролировать электронным вольтметром и осциллографом.

После снятия статической характеристики нелинейного усилителя подать на его вход гармонический сигнал частотой порядка 1 кГц. Изменяя амплитуду входного сигнала зафиксировать форму выходного сигнала и

сравнить полученные результаты с результатами измерения статической характеристики этого ФУ.

## 7 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

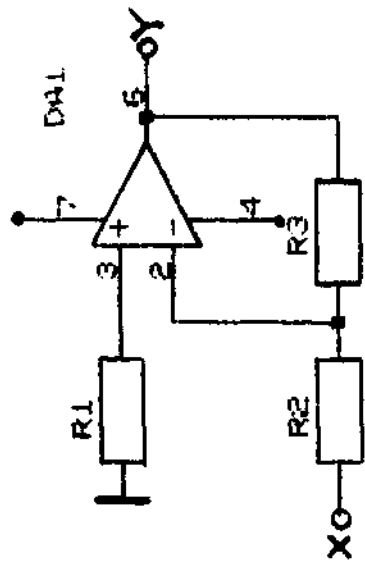
1. Основные каскады ОУ, их назначение.
2. Идеальный ОУ, его отличие от реального.
3. Назначение выводов внешней коррекции и балансировки ОУ.
4. Области применения ОУ. Типовые схемы функциональных узлов.
5. Как связаны временные и частотные характеристики линейных усилителей?
6. Какие ограничения должны быть наложены на входной сигнал для нормального функционирования: линейного усилителя, интегратора, дифференциатора, нелинейного усилителя.
7. Вывести формулы для определения: коэффициента передачи ФУ, входного сопротивления ФУ.

## 8 РЕЗУЛЬТАТЫ ОТЧЕТА

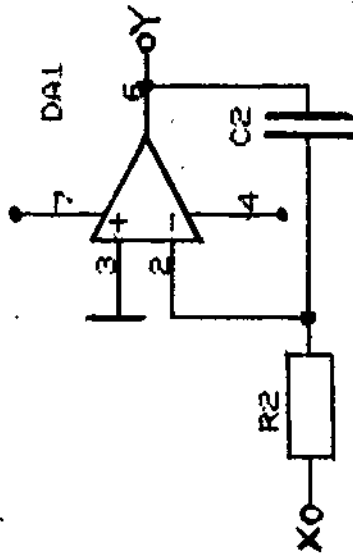
Результаты проведенных исследований оформляются в рабочей тетради. Отчет по лабораторной работе должен содержать: цель исследований, структурные схемы проводимых исследований, результаты исследований в виде таблиц и графиков, анализ полученных результатов

## ЛИТЕРАТУРА

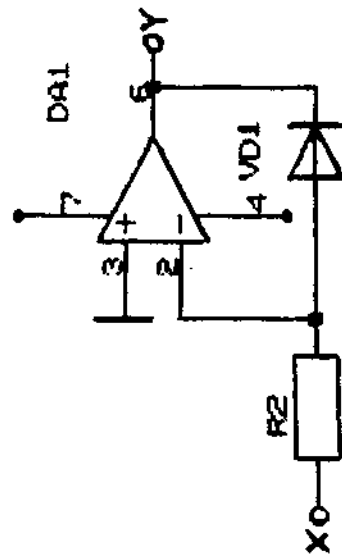
- 1 Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. - М.: Радио и связь, 1985.
- 2 Коломбет Е.А., Юркович К., Зодл Я. Применение аналоговых микросхем. - М.: Радио и связь, 1990.
- 3 Нестеренко Б.К. Интегральные операционные усилители. - М.: Энергоиздат, 1982.
- 4 Шило В.Л. Линейные интегральные схемы. - М.: Советское радио, 1979.
- 5 Алексенко А.Г., Шагурин И.Н. Микросхемотехника. - М.: Радио и связь, 1982.



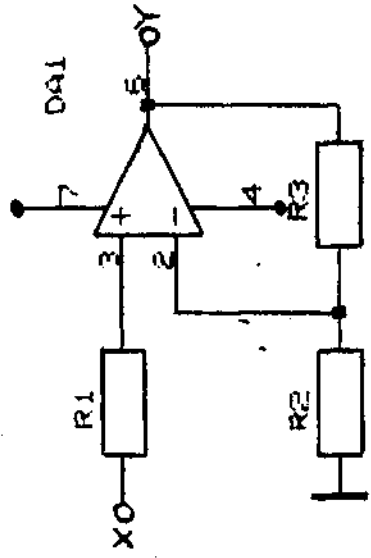
А) ИНВЕРТИРУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ



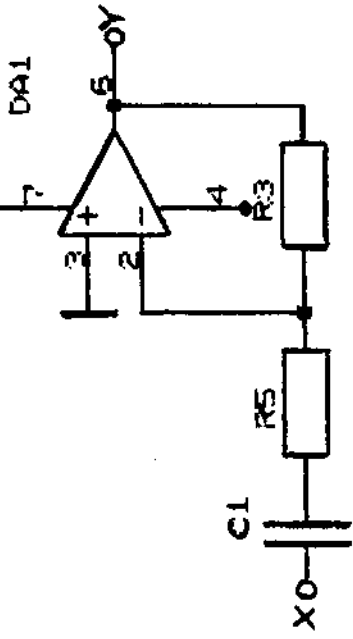
С) ИНТЕГРАТОР



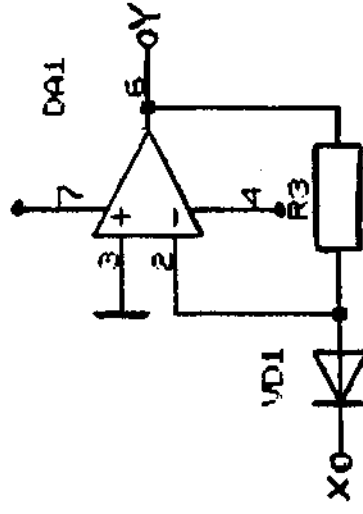
Е) ЛОГАРИФИКУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ



В) НЕИНВЕРТИРУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ



Д) ДИФФЕРЕНЦИАТОР



Ф) АНТИЛОГАРИФИКУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ



0У 153УА2

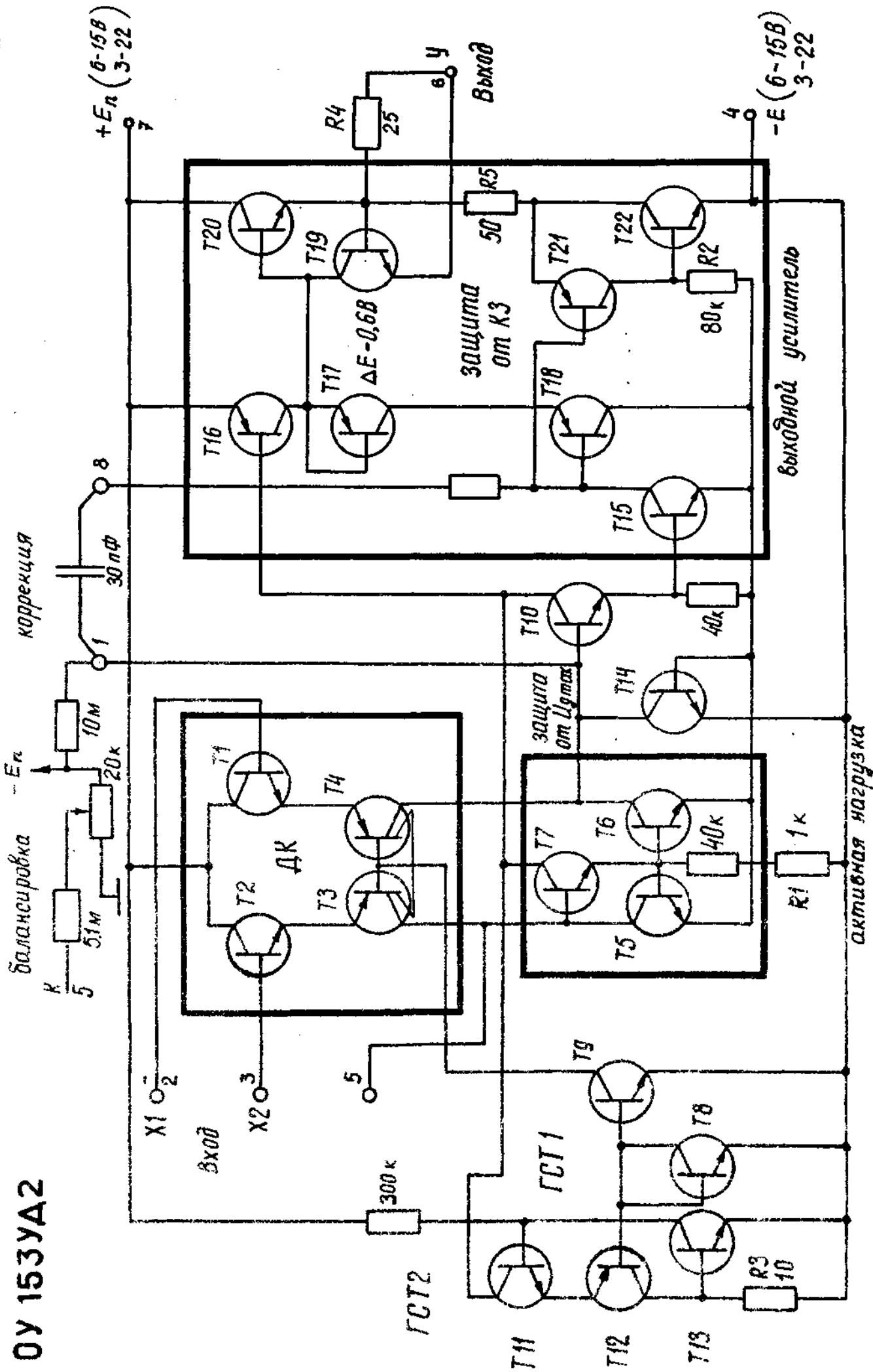
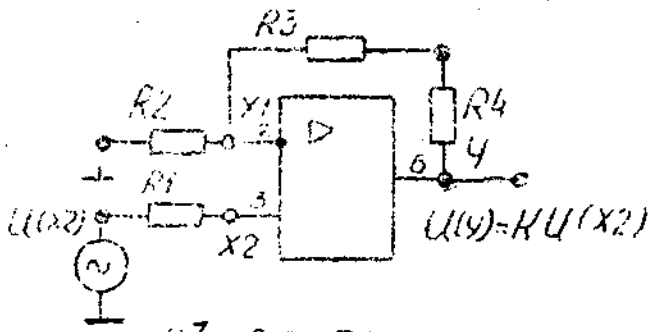
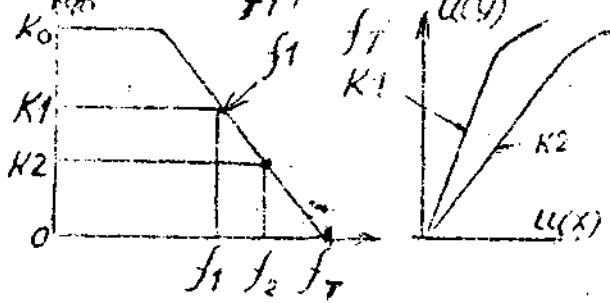


Рис. 2

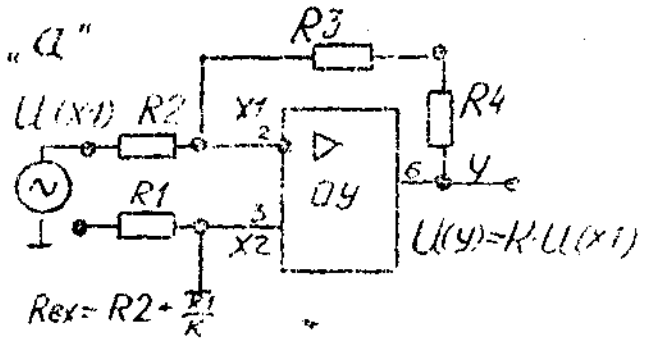
НЕИНВЕРТИРУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ "δ"



$$K1 = \frac{R3 + R2 + R4}{R2(1 + \frac{R4}{R3})} \quad R_{вх} = R_{вх0}(1 + \frac{R4}{R3})$$

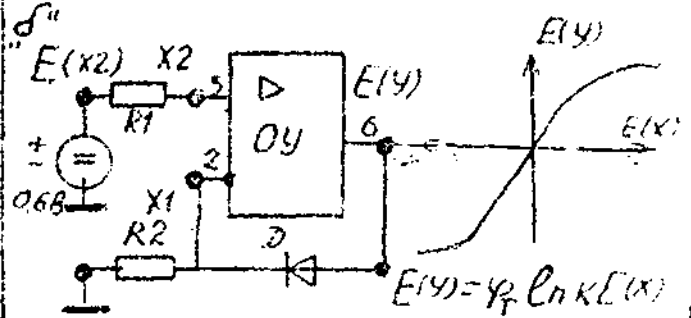


"α" ИНВЕРТИРУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ

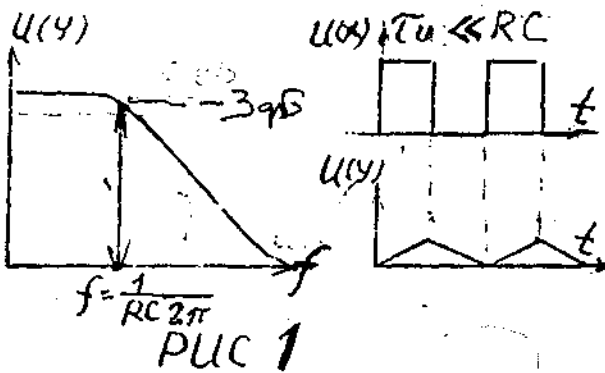
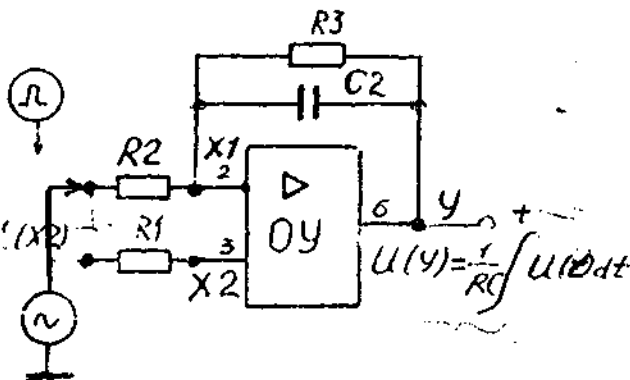


$$R_{вх} = R2 + \frac{R1}{K}$$

ЛОГАРИФИЗИРУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ "δ"



"β" ИНТЕГРИРУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ



"2" ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ

