

Глава 5. Усилители с гальванической связью

Теоретическая часть

§1. Дрейф нуля усилителей с гальванической связью

Гальваническая связь в усилителе обеспечивается при использовании проводников в качестве цепей связи между каскадами. Такая связь одинаково хорошо пропускает все гармоники спектра усиливаемого сигнала, включая нулевую гармонику – постоянную составляющую. Достоинствами усилителя с гальваническими связями (УГС) являются универсальность при использовании для усиления сигналов с широким спектром, включая нулевую частоту; простота построения многокаскадных схем, высокая технологичность при интегральном исполнении.

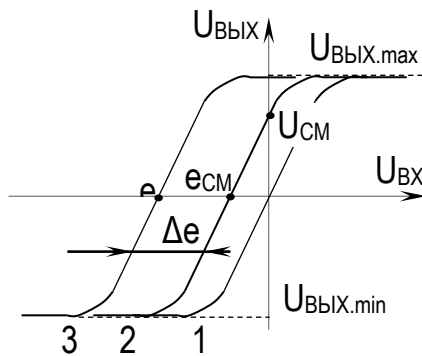


Рис. 5.1. Передаточные характеристики усилителей с гальванической связью

Однако, УГС имеют серьезный недостаток. В этих усилителях возникает смещение и дрейф нуля.

Усиление сигналов, содержащих нулевую гармонику, обычно выполняется посредством сбалансированных усилителей. Передаточная характеристика идеального сбалансированного усилителя (зависимость $U_{ВЫХ}=F(U_{ВХ})$) проходит через начало координат (график 1 на рис. 5.1). Реальный усилитель имеет смещение нуля, его передаточная характеристика (график 2) имеет смещение нуля. Изготовить усилитель, имеющий $e_{СМ} = 0$ невозможно. Современная интегральная технология использует различные методы коррекции параметров компонентов, позволяющие уменьшить

$e_{СМ}$.

Параметры реальной характеристики определяют точки ее пересечения с осями координат.

Напряжение начального смещения нуля на выходе $U_{СМ}$ измеряется при $U_{ВХ} = 0$, как показывает график 2.

Величину $e_{СМ}$ называют: приведенным к входу напряжением смещения нуля и определяют как перемещение передаточной характеристики по горизонтали. Эта величина показывает, какое напряжение необходимо подать на вход, чтобы получить на выходе ноль.

. Если обе точки расположены на активном участке характеристики, то напряжение смещения на выходе больше приведенного к входу напряжения в K раз, где K – коэффициент усиления усилителя: $U_{СМ} = e_{СМ} \cdot K$.

Однако, если усиление усилителя велико, то напряжение $U_{СМ}$ достигает максимального ($U_{ВЫХ.max}$) значения и не может корректно характеризовать смещение нуля, так как усилитель «зашкаливает» - его рабочая точка выходит за пределы линейного участка характеристики.

Поэтому приведенное к входу напряжение смещения нуля является универсальным параметром.

Дрейф нуля – медленное самопроизвольное изменение выходного напряжения усилителя при постоянном входном напряжении. Дрейф нуля возникает в результате влияния различных факторов. Это изменения температуры, изменение параметров элементов $Вов$ во времени (временной дрейф), влияние различных полей (электрическое, или магнитное поле, радиация). Для

полупроводниковых схем самый большой (самый неприятный) – это температурный дрейф, вызванный перемещением характеристик транзистора при изменении температуры.

Суммарное напряжение смещения и температурного дрейфа нуля, приведенное ко входу (e), показанное на графике 3, определяется выражением:

$$e = e_{см} + \frac{\partial e}{\partial t} \cdot \Delta t$$
, в котором первое слагаемое характеризует начальное смещение нуля, а второе – температурный дрейф. Частная производная определяет чувствительность напряжения к изменениям температуры, имеет размерность [мкВ/°С].

§ 5.2. Проектирование схемы усилителя с гальванической связью

Все каскады в УГС передают постоянную составляющую, потому режим транзистора в каждом каскаде зависит от параметров соседних каскадов. Должно обеспечиваться согласование постоянных составляющих сигналов, для которых в литературе используют термины «пьедестал» или «уровень». Согласование уровней в УГС обеспечивает процесс проектирования схемы.

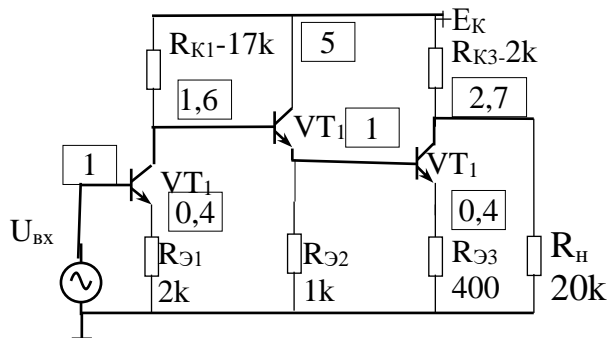


Рис.5.2. Усилитель с гальванической связью

1. Составление схемы.

Изображаются и соединяются проводниками каскады выбранных типов (из изображенных на рис. 4.14), например, ОЭ + ОК + ОЭ на транзисторах n-p-n. Ко входу первого каскада подключается источник сигнала, а к выходу последнего каскада – нагрузка (рис. 5.2). Целесообразно выделить цепь прохождения усиленного сигнала -

ступенчатую линию, которая отображает изменение постоянной составляющей (уровня) сигнала. Все токи в схеме имеют направление «сверху вниз», а потенциалы узлов в этом направлении уменьшаются..

2. Выбор потенциалов узлов, при которых обеспечивается активный режим транзисторов во всех каскадах. На схемах они отображаются в рамках. Анализ характеристик каскада ОЭ (рис. 4.15) позволяет сделать выводы, что активный режим обеспечивается при $U_{бэ} = 0,6$ В, как показывает точка 3 на входной характеристике транзистора. Передаточная характеристика показывает, что напряжение $U_{кэ}$, при котором режим транзистора активный, можно выбирать в широком диапазоне, соответствующем наклонному участку передаточной характеристики. Минимальное значение ограничено насыщением транзистора ($U_{кэ.н} = 0,2$ В), а максимальное – напряжением питания.

Задаем потенциал входного сигнала $U_{б1} = 1$ В, вычисляем: $U_{э1} = U_{б1} - 0,6 = 0,4$ В. Выбираем $U_{к1} = 1,6$ В.

Это напряжение, в соответствии со схемой, определяет $U_{б2} = 1,6$ В, $U_{э2} = U_{б2} - 0,6 = 1$ В. Подобным образом $U_{э3} = U_{б3} - 0,6 = 0,4$ В.

Напряжение на коллекторе выходного каскада, которое при усилении сигнала будет изменяться с большой амплитудой, выбирается на середине активного участка передаточной характеристики: $U_{к3} = U_{э3} + U_{кэ3} = U_{э3} + (E - U_{э3})/2 = 2,7$ В

3. Выбор токов в транзисторах. Во входном каскаде выбирают режим микротоков $I_k = 0,2 \text{ Ма}$. В остальных каскадах выбирают номинальные значения токов коллектора 1 мА (см. рис. 4.6). Для упрощения расчета можно принять $I_k = I_\varepsilon = 1 \text{ мА}$.

4. Расчет сопротивлений резисторов выполняется по закону Ома для участка цепи. Для резисторов в цепи коллекторов $R_k = (E - U_k) / I$, резисторов в цепи эмиттеров $R_\varepsilon = U_\varepsilon / I_\varepsilon$. Сопротивления резисторов приведены на схеме. $R_{\text{н}} = 20 \text{ кОм}$.

5. Оценка усиления выполняется по приближенным формулам $K_{u\varepsilon} = -R_k / (r_\varepsilon + R_\varepsilon)$, $K_{u\text{ок}} = 1$.

Рассмотренный пример показывает эскизное проектирование, предназначенное для приближенной оценки параметров схемы. Более точные результаты получают, используя моделирование.

§5.3. Симметричный дифференциальный каскад

В основу построения точных и стабильных систем, нечувствительных к помехам, положен принцип сбалансированного моста, выходное напряжение которого равно нулю при равенстве соседних компонентов и не зависит от изменений питающего напряжения. Баланс моста сохраняется при одинаковых изменениях параметров в зависимости от температуры. Схема симметричного дифференциального каскада представляет собой мост, содержащий два одинаковых резистора $R_{K1} = R_{K2}$, и два близких по параметрам транзистора (их называют дифференциальная пара) (Рис. 3.1). Если параметры соседних компонентов идентичны и одинаково изменяются при изменениях температуры, то мост будет

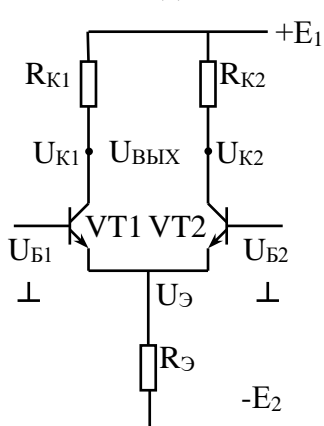


Рис5.3.Симметричный дифференциальный каскад

сбалансирован и напряжение на его диагонали будет равно нулю.

Дифференциальный каскад имеет два входных и два выходных зажима. Полезные входной и выходной сигналы являются дифференциальными (разностными или симметричными):

$$U_{\text{ВХ}} = U_{B1} - U_{B2}; \quad U_{\text{ВЫХ}} = U_{K1} - U_{K2}.$$

Кроме того, входной и выходной сигналы могут иметь синфазную составляющую (помеху):

$$U_{\text{ВХ.С}} = \frac{U_{B1} + U_{B2}}{2}; \quad U_{\text{ВЫХ.С}} = \frac{U_{K1} + U_{K2}}{2}.$$

Дифференциальный каскад обеспечивает усиление дифференциального сигнала. В этом случае напряжения на базах транзисторов изменяются в противоположные стороны, они имеют равные по величине и противоположные по знаку приращения. Аналогичным образом изменяются и токи через транзисторы. Суммарный ток, протекающий в этом случае через R_ε не изменяется, в результате не меняется и падение напряжения на резисторе R_ε , потенциал эмиттеров – постоянный $U_\varepsilon = \text{const}$.

В результате транзисторы VT1, VT2 работают как в каскаде ОЭ, который не содержит резистор в цепи эмиттера. Коэффициент усиления дифференциального сигнала определяется выражением:

$$K = -\frac{R_K \parallel r_K^*}{r_{\varepsilon}} \gg 1$$

При подаче на вход синфазного сигнала напряжения на базах транзисторов изменяются на одинаковую величину. Два транзистора работают как один эквивалентный, а два одинаковых коллекторных резистора – как один, равный $R_K/2$. Коэффициент усиления синфазной помехи запишем, используя формулу каскада ОЭ

$$K_C = -\frac{R_K \parallel r_K^*}{R_{\varepsilon} + r_{\varepsilon}}$$

Коэффициент подавления синфазной помехи показывает, во сколько раз (или на сколько децибел) усиление полезного сигнала превышает усиление е

$$\text{помех. } K_{\text{ПОД}} = \frac{K}{K_C}$$

Температурный дрейф симметричного дифференциального каскада зависит от степени идентичности параметров и характеристик транзисторов.

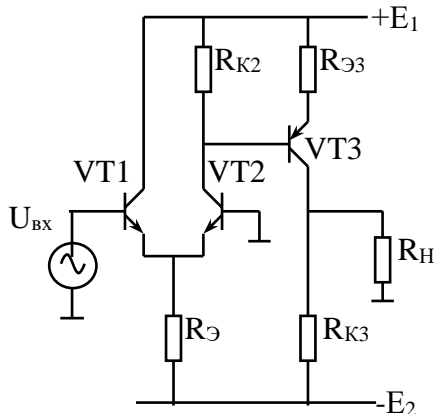


Рис5.4. Сбалансированный усилитель

§ 5.4. Сбалансированный усилитель с дифференциальным входом. Усилитель

называется сбалансированным, если его передаточная характеристика проходит через ноль и при $U_{BX} = 0$ формируется $U_{ВЫХ} = 0$. Выходное напряжение такого усилителя является знакопеременным, и для питания схемы требуется использовать два источника ЭДС (Рис. 5.4). С целью уменьшения дрейфа нуля в качестве входного каскада усилителя использован симметричный дифференциальный каскад. Для получения на выходе усилителя с гальваническими связями знакопеременного напряжения, необходимо использовать транзисторы различной проводимости. Дифференциальный каскад ОЭ на транзисторах VT1, VT2 типа n-p-n повышает постоянную составляющую сигнала. Для уменьшения постоянной составляющей сигнала в усилителе необходим транзистор VT3 типа p-n-p.

Схема имеет дифференциальный вход, она усиливает разность двух входных напряжений. $U_{K3} = U_{B2} - U_{B1}$. База транзистора VT1- инвертирующий вход, а база а VT2 - неинвертирующий вход.

§ 5.5. Операционный усилитель

Операционный усилитель – высокостабильный усилитель с дифференциальным входом и гальванической связью каскадов, предназначенный для построения устройств математической обработки аналоговых сигналов. Это универсальный усилительный элемент, который находит исключительно широкое применение в устройствах обработки аналоговых сигналов..

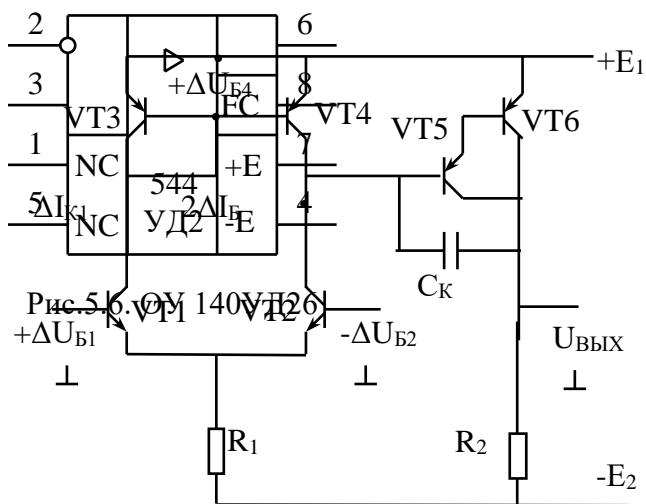


Рис 5.5. Схема операционного усилителя

Упрощенный вариант схемы ОУ (рис. 5.5) содержит симметричный дифференциальный каскад на транзисторах VT1, VT2. Преобразование симметричного сигнала в несимметричный выполняет токовое зеркало на транзисторах VT3, VT4. Вторую ступень усиления образует каскад с общим эмиттером на транзисторах VT5, VT6, включенных по схеме составного транзистора для повышения входного сопротивления этого каскада.

Конденсатор C_k обеспечивает

частотную коррекцию ОУ.

В более сложных схемах выходной каскад дополнительно содержит двухтактный повторитель и цепи защиты от короткого замыкания выхода, а вместо резисторов – схемы источников стабильного тока на транзисторах. В результате увеличивается усиление, уменьшается выходное сопротивление и дрейф нуля.

Определим, какой из входов инвертирует, а какой – нет. При подаче на входы дифференциального каскада дифференциального сигнала

$$\Delta U_{B1} > 0; \quad \Delta U_{B2} < 0 \quad |\Delta U_{B1}| = |\Delta U_{B2}|$$

произойдет уменьшение U_{K1} и увеличение U_{K2} , так как транзисторы VT1, VT2 работают подобно каскаду ОЭ, поэтому инвертируют сигнал. Транзистор VT3 (в диодной включении) передает изменение напряжения на базу VT4, который инвертирует сигнал (это ОЭ) $\Delta U_{K4} > 0$. Приращения напряжений на коллекторах VT2 и VT4 имеют одинаковые знаки ($>$), они суммируются, при этом увеличивается усиление. Выходной каскад (ОЭ) инвертирует, поэтому $\Delta U_{K4\text{э}6} < 0$. Результат база 1 – инвертирующий вход, а база 2 – неинвертирующий вход.

Выпускается большое количество интегральных ОУ различных типов: быстродействующие, прецизионные, микромощные. В настоящее время одним из широко используемых является быстродействующий ОУ 140УД26, выполненный на 20 транзисторах, входной каскад на полевых транзисторах. Конструктивно он имеет металлический корпус диаметром 8 мм с 8 выводами, условное графическое обозначение приведено на рис. 5.6.

Назначение выводов. Входы: 2 – инвертирующий, 3 – неинвертирующий. Выход – 6. Коррекция нуля (NC) – выводы 1, 5. Частотная коррекция 8. Питающие напряжения 7, 4.

Основные параметры ОУ 140УД26.

Коэффициент усиления дифференциального сигнала $K = 10^6$. Смещение нуля $e = 10 \text{ мВ}$. Входные токи $i_1, i_2 = 40 \text{ нА}$. Дифференциальное входное сопротивление $R_d = 10 \text{ Мом}$, синфазное входное сопротивление $R_c = 50 \text{ Мом}$. Выходное сопротивление $R_{\text{вых}} = 200 \text{ Ом}$.

Экспериментальная часть.

Задание 5.1. Исследование дифференциального усилителя.

Для схемы дифференциального усилителя (рис.5.2) постройте теоретическую передаточную характеристику усилителя.

$$U_{K4} = F_1(U_{B1}) \quad \text{при} \quad U_{B2} = 0$$

Снимите экспериментальную характеристику в режиме DC. В окне параметров анализа, в строке «X Range» установите: 0.2, - 0.2. Для выходного сигнала в строке «Y Range» установке 15, -15, а для сигналов на коллекторах 15.

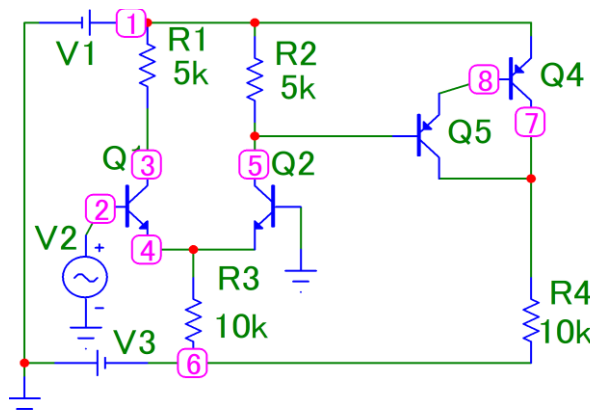


Рис.5.2. Дифференциальный усилитель

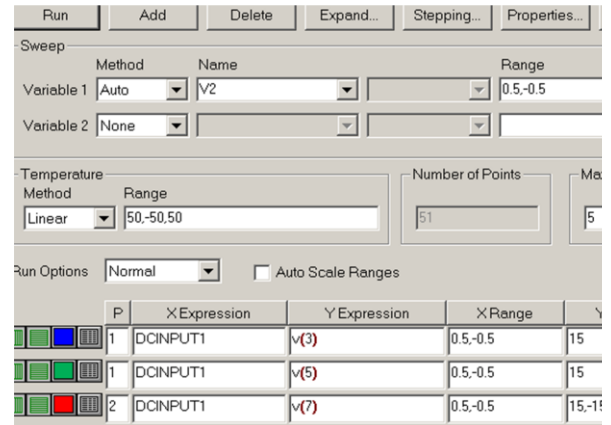


Рис.5.3. Настройка режима DC

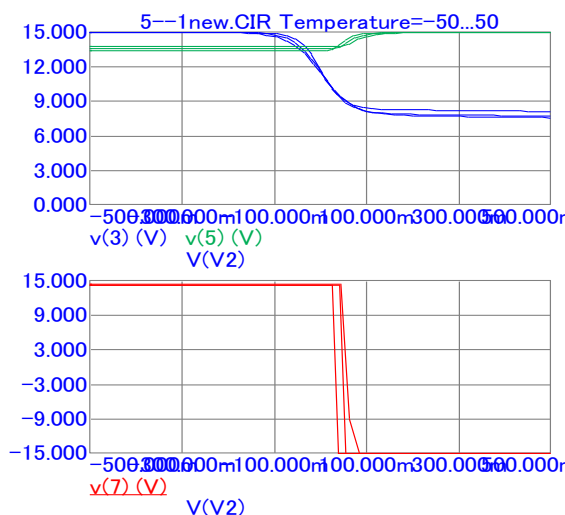


Рис.5.4. Результат DC-анализа

По экспериментальной характеристике определите коэффициент усиления усилителя по напряжению для активного участка характеристики, используя режим «Cursor Mode» (F8). Исследуемая функция должна быть выбрана двойным щелчком из списка в нижней части окна. В столбце «Slope» будем иметь производную, вычисленную через отношение конечных разностей. Для данного графика она определяет коэффициент усиления по напряжению. Обратите внимание на знак коэффициента усиления. Объясните результат.

В окне режимов анализа укажите диапазон вариации температуры Temperature Range : 50, -50, 50, это максимум, минимум, шаг. Будут построены три характеристики для температур 50, 0, -50. Определите приведенный ко входу температурный дрейф усилителя.

Задание 5.3. Отключите элемент GND от базы транзистора Q2, и вместо него перенесите в эту точку источник V2. Заземлите базу транзистора Q1. Изменения в схеме следует делать при отключенном режиме «неразрывные проводники». Нумерация узлов может измениться.

$$\text{Снимите характеристику } U_{K4} = F_2(U_{B2})|_{U_{B1} = 0}$$

Определите коэффициент усиления усилителя по напряжению, приведенное к входу начальное смещение нуля усилителя и приведенный к входу температурный дрейф нуля.

Задание 5.4. Операционный усилитель.

В палитре компонентов ОУ называется «Opamp» - Operating Amplifier. Выберите модель «Generic». После установки символа усилителя на схему

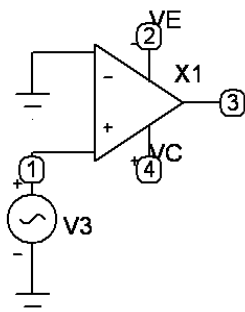


Рис.5.3.
Разомкнутый

появится сообщение о том, что источники питания подключены. После этого сообщения символ усилителя нельзя перемещать, так как питание может отключиться (рис.5.2).

Проведите моделирование в режиме DC. В окне параметров анализа в строке «X Range» установите: 0.1, - 0.1, а в строке «Y Range» установке 15, -15.

Снимите зависимость выходного напряжения от напряжения на неинвертирующем входе, который обозначен знаком плюс. Для приведенной схемы это $U(3) = f(U(1))$. По экспериментальной характеристике определите коэффициент усиления усилителя по напряжению для активного участка характеристики (при $U_3 = \pm 5$ В). Для этого необходимо клавишей F8 включить режим «Cursor Mode», и на активном участке характеристики установить два курсора левой и правой кнопками мыши. Исследуемая функция должна быть выбрана из списка в нижней части окна. В столбце «Slope» будем иметь производную, вычисленную через отношение конечных разностей. Для данного графика она определяет коэффициент усиления по напряжению. Обратите внимание на знак коэффициента усиления. По характеристике также определите $U_{\text{вых max}}$, $U_{\text{вых min}}$, $E_{\text{см}}$. Укажите диапазон вариации температуры 50, -50, 100. Будут построены две характеристики для температур 50 и -50 градусов. Определите напряжение приведенного к входу дрейфа.

Снимите зависимость выходного напряжения от напряжения на инвертирующем входе, для этого подключите источник к верхнему по схеме входу ОУ, а нижний заземлите. По экспериментальной характеристике определите коэффициент усиления усилителя по напряжению для активного участка характеристики (при, приведенное ко входу смещение нуля и температурный дрейф).

По экспериментальной характеристике определите коэффициент усиления усилителя по напряжению для активного участка характеристики (при $U_3 = \pm 1..5$ В). Для этого необходимо клавишей F8 включить режим «Cursor Mode», и на активном участке характеристики установить два курсора левой и правой кнопками мыши. Исследуемая функция должна быть выбрана из списка в нижней части окна. В столбце «Slope» будем иметь производную, вычисленную через отношение конечных разностей. Для данного графика она определяет коэффициент усиления по напряжению. Обратите внимание на знак коэффициента усиления.

По характеристике также определите $U_{\text{вых max}}$, $U_{\text{вых min}}$, $E_{\text{см}}$. Сравните экспериментальные данные с параметрами модели.

Задание 5.5. Компаратор.

Выполните экспериментальное исследование использования ОУ в качестве компаратора, выполняющего сравнение гармонического сигнала с нулем.

Выполните моделирование в режиме Transient. Для источника Sine Source установите $F = 1000$, $A = 1$, $DC = 0.5$. Объясните результаты.

Контрольные вопросы

1. Многокаскадные усилители. Типы связей.
2. Достоинства и недостатки усилителей с гальванической связью.
3. Дрейф нуля и способы его уменьшения.
4. Как определяется приведенное ко входу напряжение смещения нуля?
5. Как определить инвертирующий вход по схеме?
6. Симметричный дифференциальный каскад, передаточные характеристики.
7. Операционный усилитель, обозначение, назначение, параметры.