

ЧАСТЬ I

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

И.А. РУБИНШТЕЙН

1. ВВЕДЕНИЕ

Операционные усилители представляют собой широкий класс аналоговых микросхем, которые позволяют производить усиление аналоговых сигналов, придавать им различную форму, складывать и вычитать сигналы, производить операции дифференцирования и интегрирования, создавать источники стабильного напряжения и генераторы колебаний различной формы.

Операционный усилитель (ОУ) – это многокаскадный транзисторный усилитель, выполненный в виде микросхемы.

Все каскады его связаны между собой гальванически, без применения разделительных конденсаторов. ОУ имеет два входа: инвертирующий (вход «-») и неинвертирующий (вход «+»). Если подать положительный (относительно другого входа) сигнал на вход «-», сигнал на выходе ОУ будет отрицательным. Если же подать положительный сигнал на вход «+», сигнал на выходе ОУ будет положительным. При отсутствии сигналов оба входа и выход ОУ находятся под нулевым потенциалом.

2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОУ

Многочисленные типы ОУ, выпускаемые промышленностью, подразделяются на ОУ общего назначения и специализированные ОУ (например, низкошумящие, микромощные, быстродействующие и некоторые другие). Для описания свойств тех и других используются следующие основные характеристики.

Коэффициент усиления напряжения (K_U) – это отношение амплитуды сигнала на выходе к амплитуде сигнала на одном из входов, когда другой вход соединён с «землёй» (или к разности сигналов на обоих входах $\Delta U_{вх}$, если источник сигнала включён между ними). Типовые значения K_U находятся в пределах $2 \cdot 10^3$ - $5 \cdot 10^4$.

Каждый усилительный каскад ОУ обладает инерционностью, которая приводит к тому, что, начиная с некоторой частоты, усиление каскада уменьшается. Чем больше число каскадов, тем больше общая инерционность ОУ, тем меньше усиление на высоких

частотах. При некоторой частоте входного сигнала усиление ОУ снижается до 1. Эта частота называется частотой единичного усиления и обозначается f_1 . Для низкочастотных ОУ $f_1=1$ МГц, для быстродействующих высокочастотных $f_1=15-100$ МГц.

Скорость нарастания (V_U) характеризует время установления выходного сигнала большой амплитуды. Она зависит и от f_1 и от свойств выходных каскадов ОУ при передаче большого сигнала. Для низкочастотных ОУ $V_U=0,2$ В/мкс, для быстродействующих $V_U=20$ В/мкс и более.

Входное сопротивление ($R_{вх}$) – отношение изменения напряжения на входе ОУ к изменению входного тока. При отсутствии обратных связей $R_{вх}$ неинвертирующего и инвертирующего входов одинаковы. Величина $R_{вх}$ зависит от типа транзисторов, применяемых во входном балансном усилителе. Если это биполярные транзисторы, то $R_{вх}$ составляет десятки-сотни кОм, а если во входном каскаде полевые транзисторы, то $R_{вх}$ – единицы-десятки) Мом.

Выходное сопротивление ($R_{вых}$) – отношение изменения напряжения на выходе ОУ к изменению выходного тока. Для большинства типов ОУ (кроме усилителей мощности) $R_{вых} \sim 100-200$ Ом.

Коэффициент ослабления синфазного сигнала ($K_{оссф}$) – отношение амплитуды выходного сигнала ОУ к амплитуде сигнала, поданного одновременно на оба входа. При подаче сигнала на вход «+» на выходе возникает сигнал той же полярности; при подаче сигнала на вход «-» - противоположный. Следовательно, при подаче одинакового сигнала на оба входа выходные сигналы вычитаются. Если бы оба входа были совершенно симметричными, результирующий сигнал на выходе был бы равен нулю. Вследствие некоторой асимметрии выходной сигнал отличается от нуля, но он значительно меньше, чем входной. Коэффициент ослабления этого сигнала $K_{оссф}$ для различных типов ОУ составляет 50-70 дБ.

Существуют и некоторые другие, менее существенные характеристики ОУ, такие как напряжение смещения нуля, входной ток и т.д., которые в данной работе не рассматриваются.

Идеализация характеристик ОУ. Идеальный ОУ имел бы следующие значения основных характеристик: $K_U \rightarrow \infty$, $f_1 \rightarrow \infty$, $V \rightarrow \infty$, $R_{вх} \rightarrow \infty$, $R_{вых} \rightarrow 0$, $K_{оссф} \rightarrow \infty$, что в реальных ОУ недостижимо. Однако в большинстве применений стараются так подобрать тип ОУ и характеристики связанного с ним устройства, чтобы ОУ выступал по отношению к этому устройству, как идеальный. Это существенно упрощает расчёты. Так, например, импеданс цепи обратной связи ОУ выбирают значительно большим, чем $R_{вых}$, и значительно

меньшим, чем $R_{вх}$, что позволяет в расчётах этими величинами пренебречь. Из тех же соображений выбирают ОУ, обладающий собственной скоростью нарастания значительно большей, чем скорость нарастания усиливаемого сигнала, и так далее.

3. ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ОУ ТИПА 544УД2

Каждый ОУ содержит входной балансный каскад (дифференциальный усилитель на биполярных или полевых транзисторах), каскад дополнительного усиления и выходной каскад усиления мощности. Таким же образом выполнен и ОУ типа 544УД2 (см. рис. 1). Это быстродействующий ОУ с полевыми триодами во входном каскаде ($f_1 \geq 15$ МГц, $V \geq 20$ В/мкс). Его полная принципиальная схема содержит многочисленные триодные и диодные цепи, обеспечивающие усиление, режимы каскадов в постоянном токе, температурную стабильность, защиту от перегрузки. Рассмотрим работу этого усилителя по упрощенной схеме, содержащей только усилительные каскады.

Входной балансный каскад содержит триоды Т(1) и Т(2), источники которых подключены к генератору постоянного тока I, затворы являются входами ОУ, а стоки соединены с генераторами постоянного тока I/2. Сигнал со стока Т2 поступает в базу усилителя с общим эмиттером Т4, инвертируется и с коллектора Т4 подаётся на затвор истокового повторителя Т6. Сигнал со стока Т1 поступает в базу усилителя с общим эмиттером Т3, инвертируется и с коллектора Т3 поступает в базу усилителя с общим эмиттером Т5 с местной обратной связью ($R_{зб}$), снова инвертируется и с коллектора Т5 также поступает на затвор Т6, складываясь с сигналом с коллектора Т4. Так как сигналы на стоках Т1 и Т2 противофазны, то за счёт различного количества инверсий на затворе Т6 они оказываются в одинаковой фазе, то есть складываются, увеличивая тем самым K_U .

Последующие каскады (Т6, Т7, Т8 и Т9) являются повторителями усиленного сигнала. Истоковый повторитель Т6 обладает большим входным сопротивлением, что позволяет передавать без искажений сигналы из высокоомной цепи коллекторов Т4 и Т5 и уменьшить выходное сопротивление. Эмиттерный повторитель Т7 ещё больше снижает выходное сопротивление цепи сигнала, а включение в его эмиттерную цепь двух диодов и генератора постоянного тока позволяет задать требуемую разность потенциалов между базами Т8 и Т9, обеспечивающую линейную работу этих триодов в режиме малого

выходного сигнала. Наличие в оконечном повторителе двух триодов различной проводимости (ПРП и РПР) позволяет при малых значениях тока покоя Т8, Т9 передавать максимальные сигналы обеих полярностей.

544 УД2 имеют следующие основные характеристики: $K_U 10^4$ (на частотах до ≤ 1 кГц), $f_1 \geq 15$ МГц, $V \geq 20$ В/мкс, $R_{вх} \approx 10^9$ Ом, $R_{вых} \approx 200$ Ом, $K_{осцф} \approx 70$ дБ.

4. СХЕМЫ С ОПЕРАЦИОННЫМ УСИЛИТЕЛЕМ

В ядерно-физических экспериментах часто приходится проводить различные операции с аналоговыми сигналами, такие как усиление, инвертирование, сложение и ряд других. Эти операции проводятся, главным образом, с помощью ОУ. Для обеспечения точности выполнения операций, временной и температурной стабильности ОУ охватывают отрицательной обратной связью – включают некоторую пассивную электрическую цепь между выходом ОУ и его входом «-».

Рассмотрим наиболее распространённые схемы с применением ОУ, осуществляющие эти операции.

4.1. Неинвертирующий усилитель. Применяется в тех случаях, когда требуется усилить сигнал, сохранив его полярность. Усиливаемый сигнал $U_{вх}$ подаётся на вход «+». Часть выходного сигнала через резистор обратной связи $R_{ос}$ поступает на вход «-» в виде сигнала обратной связи $U_{ос}$.

$$U_{ос} = U_{вх} \cdot R_1 / (R_1 + R_{ос}).$$

Так как $U_{ос}$ поступает на вход «-» той же полярности, что и $U_{вх}$ на вход «+», разностный сигнал $\Delta U_{вх} - U_{вх} \cdot R_1 / (R_1 + R_{ос})$ оказывается меньше $U_{вх}$, что ведёт к уменьшению усиления. Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя с обратной связью:

$$K_{ос} = \frac{K_U}{1 + \beta K_U} = \frac{K_U}{1 + \frac{R_1}{R_1 + R_{ос}} \cdot K_U}, \quad (1)$$

где β - коэффициент передачи сигнала с выхода усилителя на вход по цепи обратной связи.

Произведение βK_U называется глубиной обратной связи. Если $\beta K_U \gg 1$, обратная связь считается глубокой и $K_{ос} \approx 1/\beta$. Для

неинвертирующего усилителя с глубокой обратной связью:

$$K_{oc} \approx \frac{R_1 + R_{oc}}{R_1}. \quad (2)$$

Равенство (2) выполняется, и усилитель устойчив к возбуждению, если выходное сопротивление источника сигнала (генератора) мало по сравнению с входным сопротивлением операционного усилителя ($R_{г} \ll R_{вх}$).

Обратная связь приводит к увеличению входного сопротивления и уменьшению выходного сопротивления неинвертирующего усилителя примерно в βK_U раз.

Действительно, поскольку сигнал, действующий между входами ОУ ($\Delta U_{вх}$), в βK_U раз меньше, чем $U_{вх}$ «+», во входной цепи протекает в βK_U раз меньший ток, чем в отсутствие обратной связи. Следовательно, входное сопротивление увеличивается.

С другой стороны, уменьшение выходного сигнала (например, при подключении дополнительной нагрузки) уменьшает и сигнал обратной связи U_{oc} , а это, в свою очередь, вызывает увеличение выходного сигнала, так как $\Delta U_{вх}$ увеличивается. Следовательно, выходное сопротивление уменьшается.

В неинвертирующем усилителе обратная связь является обратной связью со сложением напряжений во входной цепи.

Балансировка ОУ. Чтобы иметь возможность в некоторых пределах менять уровень постоянного напряжения на выходе ОУ, в них предусмотрена балансировка. Она осуществляется путём небольшого изменения токов покоя первого или второго каскадов ОУ. Балансировка 544 УД2 производится переменным резистором R_3 . Резисторы R_2 и R_4 , включённые между контактами 1 и 5 усилителя, ограничивают пределы нарушения баланса.

4.2. Инвертирующий усилитель применяется в тех случаях, когда требуется усилить сигнал, изменив его полярность, или сложить несколько аналоговых сигналов. Входной сигнал подаётся на вход «-» через резистор R_1 , а часть выходного сигнала поступает так же, как и в неинвертирующем усилителе, на вход «-» - через делитель $R_{oc}R_1$.

В отличие от неинвертирующего усилителя, где на вход «+» подаётся весь входной сигнал, а на вход «-» - сигнал обратной связи, в инвертирующем усилителе вход «+» заземлён, а на входе «-» - лишь незначительная часть входного сигнала (разность между входным сигналом и сигналом обратной связи), которая тем меньше, чем глубже обратная связь. Действительно, из схемы видно, что

$U_{\text{вых}} = K_U \cdot U_{\text{вх}}^{\text{"-"}}$. В то же время, для усилителя с обратной связью $U_{\text{вых}} = -K_{\text{ос}} \cdot U_{\text{вх}}$. Поскольку при глубокой обратной связи $K_{\text{ос}} \ll K_U$, то $U_{\text{вх}}^{\text{"-"}} \ll U_{\text{вх}}$.

Это свойство инвертирующего усилителя с глубокой обратной связью позволяет с достаточной для практики точностью считать напряжение сигнала на входе «-» ($U_{\text{вх}}^{\text{"-"}}$) близким к нулю. Вход «-» в этом случае называют «виртуальной землёй». Происхождение «виртуальной земли» - точки с низким сопротивлением – можно пояснить из схемы. Ток источника сигнала i_1 течёт через R_1 и разветвляется на $i_{\text{вх}}$ и $i_{\text{ос}}$. $i_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}^{\text{"-"}}/R_{\text{вх}}^{\text{"-"}}$, $i_{\text{ос}} = (-K_U U_{\text{вх}}^{\text{"-"}} - U_{\text{вх}}^{\text{"-"}})R_{\text{ос}}$. Так как $(-K_U U_{\text{вх}}^{\text{"-"}} - U_{\text{вх}}^{\text{"-"}})U_{\text{вх}} = K_U + 1$, а $K_{\text{ос}}$ обычно выбирают меньше, чем $R_{\text{вх}}/OY$, то $L_{\text{ос}}/U_{\text{вх}} \simeq KU$ и более. То есть практически весь ток источника сигнала течёт через $R_{\text{ос}}$, а сопротивление «виртуальной земли» $R_{\text{вз}} \simeq R_{\text{ос}}/K_U$.

Если выбрать $R_1 \gg R_{\text{ос}}/K_U$ (с учётом частотной зависимости K_U), а сопротивление источника сигнала $R_1 \ll R_1$, то выходной сигнал находится из выражения: $U_{\text{вых}} \simeq (U_{\text{вх}}/R_1)R_{\text{ос}}$, т.е. $K_{\text{ос}} \simeq R_{\text{ос}}/R_1$.

В частном случае, если источником входного сигнала является генератор тока $i_{\text{вх}}$, выходной сигнал $U_{\text{вых}} = i_{\text{вх}} R_{\text{ос}}$.

Рассмотренная схема позволяет суммировать сигналы, поступающие от различных источников. Для этого каждый из источников сигналов подключаются ко входу «-» через резистор $R \gg R_{\text{ос}}/K_U$. При таком включении сигналы всех генераторов преобразуются в соответствующие практически независимые друг от друга токи, и в резисторе $R_{\text{ос}}$ происходит их линейное сложение. Следовательно, выходное напряжение является линейной комбинацией входных сигналов:

$$U_{\text{вых}} = -R_{\text{ос}} (U_1 / R_1 + \dots + U_n / R_n). \quad (6)$$

В инвертирующем усилителе обратная связь является обратной связью со сложением токов во входной цепи.

4.3. Дифференциальный усилитель. Применяется в том случае, когда требуется получить разность двух сигналов. Этот усилитель представляет собой сочетание неинвертирующего и инвертирующего усилителей. Так как сигнал, поданный на вход «+», не инвертируется, а сигнал, поданный на вход «-», инвертируется, то при подаче сигналов на оба входа, на выходе образуется их разность.

Если бы в схеме отсутствовал делитель входного сигнала $R_2 \div R_3$, то коэффициент передачи сигнала, поданного на вход «+», был бы несколько больше, чем коэффициент передачи сигнала, поданного на вход «-» (выражения 2 и 5). Чтобы уравнивать

коэффициенты передачи по обоим входам, перед входом «+» включается делитель $R_2 \div R_3$, коэффициент передачи которого $R_3/(R_2+R_3)$ находится из условия:

$$\frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot \frac{R_{oc} + R_1}{R_1} = \frac{R_{oc}}{R_1}, \text{ т.е. } \frac{R_3}{R_2 + R_3} = \frac{R_{oc}}{R_{oc} + R_1}. \quad (7)$$

Здесь также предполагается, что выходные сопротивления источников сигналов очень малы по сравнению с R_1 и R_2 . Для изменения полярности разностного выходного сигнала достаточно поменять местами источники входных сигналов.

4.4. Интегрирующий и дифференцирующий усилители.

В предыдущих разделах рассматривались различные схемы ОУ с резистивной обратной связью. Такая связь является частотно-независимой (если пренебречь входной ёмкостью усилителя). Наряду с резистивной может применяться резистивно-ёмкостная обратная связь, которая позволяет создавать усилители, изменяющие форму сигнала. В качестве примеров таких операций рассмотрим применение двух простейших RC-цепей, приводящих к интегрированию и дифференцированию усиливаемого сигнала.

4.4.1. Интегрирующий усилитель. Применяется в том случае, когда требуется усилить сигнал и одновременно исключить из его спектра высокие частоты. Наличие в цепи обратной связи конденсатора O_{oc} приводит к тому, что коэффициент передачи сигнала с выхода на вход β становится частотно-зависимым: для высоких частот $\beta \rightarrow 1$, а для низких $\beta \approx R_1 / R_{oc} + R_1$. В соответствии с (1) коэффициент передачи K_{oc} также становится частотно-зависимым: для высоких частот $K_{oc} \simeq 1$, а для низких частот $K_{oc} \simeq (R_1 + R_{oc})/R_1$ при подаче сигнала на вход «+» и $K_{oc} \simeq R_{oc}/R_1$ при подаче сигнала на вход «-».

Для определения постоянной времени τ переходных процессов в усилителях с частотно-зависимой обратной связью можно воспользоваться следующим приближённым выражением:

$$\tau \approx \frac{\tau_{oc}}{K_{oc}(t=0)}, \quad (8)$$

где τ_{oc} – постоянная времени цепи обратной связи, $K_{oc}(t=0)$ – коэффициент передачи усилителем сигнала в момент поступления его на вход (для высоких частот).

В случае интегрирующего усилителя $K_{oc}(t=0) \simeq 1$, так как для высоких частот выход усилителя накоротко соединён со входом «-»

через ёмкость C_{oc} . Следовательно:

$$\tau \simeq \tau_{oc} \simeq C_{oc} R_{oc}. \quad (9)$$

4.4.2. Дифференцирующий усилитель. Применяется в том случае, когда требуется усилить сигнал и одновременно устранить из его спектра низкие частоты. Резисторы $R_{oc}/2$ образуют цепь отрицательной обратной связи по постоянному току и низким частотам. Высокие частоты не проходят через цепь обратной связи благодаря конденсатору C , в результате чего и достигается преимущественное усиление высоких частот. Включение последовательно с конденсатором C резистора $R_2 \ll R_{oc}/2$ стабилизирует коэффициент передачи на высоких частотах, ограничивая усиление, и делает схему устойчивой к возбуждению.

Постоянная времени определяется так же, как и для интегрирующего усилителя, формулой (8). В этой схеме $\tau_{oc} \simeq C \cdot R_{oc} / 4$ (с учётом того, что $R_2 \ll R_{oc} / 2$). Коэффициент обратной связи в момент поступления входного сигнала определяется двумя последовательными делителями $R_{oc}/2$, R и $R_{oc}/2$, R_1 :

$$\beta(t=0) \simeq \frac{R_2}{R_{oc} / 2} \cdot \frac{R_1}{R_{oc} / 2 + R_1}.$$

Для усилителя с глубокой обратной связью

$$K_{oc}(t=0) \cong 1 / \beta(t=0) \text{ и} \\ \tau \approx (CR_1 \cdot R_2 \cdot R_{oc} / 4) / [R_{oc} / 2 + 1)R_{oc} / 2]. \quad (10)$$

Когда сигнал на выходе дифференцирующего усилителя установится ($\tau \ll t < T_{И}$), коэффициент передачи $K_{oc} = (R_{oc} + R_1) / R_1$ при подаче сигнала на вход «+» и $K_{oc} = R_{oc} / R_1$ при подаче сигнала на вход «-».

5. ЗАДАНИЕ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – Ознакомление со структурой и основными характеристиками ОУ; овладение навыками выполнения ряда операций с аналоговыми сигналами.

5.1. Неинвертирующий усилитель. Собрать схему неинвертирующего усилителя (рис. 2), выбрав сопротивление R_1 в пределах от 0.5 до 1.5 кОм, вычислить величину сопротивления R_{oc} по заданному значению K_{oc} . Подключить R_1 и R_{oc} к ОУ.

5.1.1. Временно подключить ко входу «+» ОУ резистор $R_1^1 = R_1$. Подать питание $E_{\text{пит}} = \pm 6.3$ В. Произвести балансировку ОУ с точностью до ± 50 мВ (на выходе). Для этого подключить к ОУ резисторы R_2, R_3, R_4 так, как показано на рис. 2. Резисторы R_2, R_4 выбрать по 5 – 10 кОм, переменный резистор R_3 10 – 15 кОм.

5.1.2. Вместо резистора R_1^1 ко входу «+» ОУ подключить генератор импульсов. Длительность импульсов $t_{\text{и}} \approx 2$ мкс, частота следования 10 кГц. При выполнении этого и последующих пунктов задания к выходу генератора импульсов подключить нагрузку 500 Ом. Измерить амплитудную характеристику неинвертирующего усилителя $U^{\text{ввых}}(U^{\text{вх}})$, т.е. зависимость амплитуды сигнала на выходе $U^{\text{ввых}}$ от амплитуды импульса на входе $U^{\text{вх}}$ во всем диапазоне амплитуд выходных сигналов (т.е. от $-E_{\text{пит}}$ до $+E_{\text{пит}}$). По графику амплитудной характеристики измерить значение $K_{\text{ос}}$ при положительной и отрицательной полярности входных импульсов и сравнить его с расчётным.

Увеличить напряжение питания ОУ до $E_{\text{пит}} = \pm 15$ В. Повторить измерение амплитудной характеристики, определить $K_{\text{ос}}$. Определить, есть ли зависимость $K_{\text{ос}}$ от величины питающих напряжений.

Измерить величины максимальных амплитуд положительных и отрицательных импульсов на выходе при напряжении питания ± 15 В и ± 6.3 В. Определить, как относится максимальная амплитуда к величине питающего напряжения.

Примечание. При измерении амплитудных характеристик в случае, если выходной сигнал начинает ограничиваться, т.е. его амплитуда перестает расти при увеличении амплитуды входного импульса, дальнейшее увеличение амплитуды входного импульса не производить! Можно сжечь микросхему!

5.1.3. Измерить входное сопротивление $R^{\text{вх}}$ неинвертирующего усилителя. Для этого собрать схему, изображенную на рис. 2а. Эта схема может быть представлена в виде эквивалентного делителя из двух последовательных сопротивлений R^* и $R^{\text{вх}}$ (см. рис. 2а). Тогда амплитуда сигнала в точке А:

$$U_A = U_{\text{вх}} \frac{R_{\text{вх}}}{R^* + R_{\text{вх}}}, \quad (11)$$

где $U_{\text{вх}}$ – амплитуда импульса на входе схемы (выходе генератора). Зная сопротивление пробного резистора R^* и амплитуду импульса генератора и измеряя амплитуду сигнала в точке А - U_A , по формуле (11) можно рассчитать величину входного сопротивления $R^{\text{вх}}$.

Амплитуду $U_{вх}$ следует выбрать таким образом, чтобы ОУ работал в линейной части амплитудной характеристики, длительность импульса генератора должна быть достаточно большой (не менее 1 мс), чтобы за время действия импульса сигнал в точке А успел полностью проинтегрироваться на паразитных емкостях. Сопротивление пробного резистора следует выбрать по порядку величины близким к $R^{вх}$, в этом случае, как следует из (11) $U_A \approx 0.5U_{Г}$.

5.2. Инвертирующий усилитель. Выбрав сопротивление R_1 в пределах от 1.5 до 3 кОм, вычислить величину сопротивления $R_{ос}$ по заданному значению $K_{ос}$. Собрать схему инвертирующего усилителя (см. рис. 3). Установить напряжение питания $E_{пит}$ в диапазоне от ± 6.3 до ± 15 В (при выполнении последующих упражнений напряжение питания не менять!).

5.2.1. Измерить амплитудную характеристику инвертирующего усилителя во всем диапазоне амплитуд выходных сигналов (т.е. от $-E_{пит}$ до $+E_{пит}$). По графику амплитудной характеристики измерить значение $K_{ос}$ и сравнить с расчётным.

5.2.2. Измерить амплитуду импульсов в точке «виртуальной земли» $U_{вх}^{"-"}$. Вычислить $R_{вз}$:

$$R_{вз} = U_{вх}^{"-"} \cdot R_1 / (U_{Г} - U_{вх}^{"-"}). \quad (11)$$

5.2.3. Измерить входное сопротивление $R^{вх}$ инвертирующего усилителя. Для этого собрать схему, изображенную на рис. 3а. Измерение входного сопротивления проводить аналогично п. 5.1.3.

5.2.4. Собрать схему, изображенную на рис. 3б. Сопротивления резисторов R_1, R_2 выбрать одинаковыми в пределах от 1.5 до 3 кОм, сопротивление $R_{ос}$ вычислить по заданному значению $K_{ос}$. Произвести масштабное суммирование двух импульсов с выходов (X и Y) схем, приведенных на рис. 7а и 7б, подключив эти выходы ко входам 1 и 2 схемы на рис. 3б. Амплитуду импульсов на выходе генератора установить в диапазоне 0.1 – 0.5 В, длительность – в диапазоне 1 - 20 мкс, полярность - положительная.

5.3. Дифференциальный усилитель. Собрать схему дифференциального усилителя с коэффициентом усиления $K_{ос} = 10$. Сопротивление делителя R_2, R_3 выбрать согласно (7), исходя из максимального ослабления синфазного сигнала ($K_{оссф} \sim 0.05$). Определить коэффициент ослабления синфазного сигнала, подавая на оба входа прямоугольный импульс амплитудой 4В, длительностью 10 мкс, частотой следования 1 кГц. Если $K_{оссф}$ окажется больше 0.05, уменьшить его до уровня 0.05 подбором резистора R_2 или R_3 .

Интегрирующий усилитель. Выбрав сопротивление R_1 , рассчитать значения R_{oc} и C_{oc} так, чтобы постоянная времени интегрирования была ~ 10 мкс, а коэффициент передачи в установившемся режиме был равен $\cong 10$. Собрать интегрирующий усилитель. Проверить правильность расчёта.

Дифференцирующий усилитель. Выбрав сопротивление R_1 , рассчитать значения $R_{oc}/2$, C_{oc} и R_2 так, чтобы постоянная времени дифференцирования была ~ 10 мкс, а коэффициент передачи в момент поступления сигнала был равен $\cong 10$. Собрать дифференцирующий усилитель. Проверить правильность расчёта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.Н. Дмитриева, А.С. Ковтюх, Б.А. Кривицкий. Ядерная электроника. – М.: Изд-во Московского университета, 1982.
2. А.П. Цитович. Ядерная электроника. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. В.Л. Шило. Линейные интегральные схемы в радиоэлектронной аппаратуре. М.: «Советское радио», 1979.
4. Дж.Рутковский. Интегральные операционные усилители. – М.: Мир, 1978.
5. Аналоговые интегральные микросхемы (справочник). – М.: «Радио и связь», 1981.

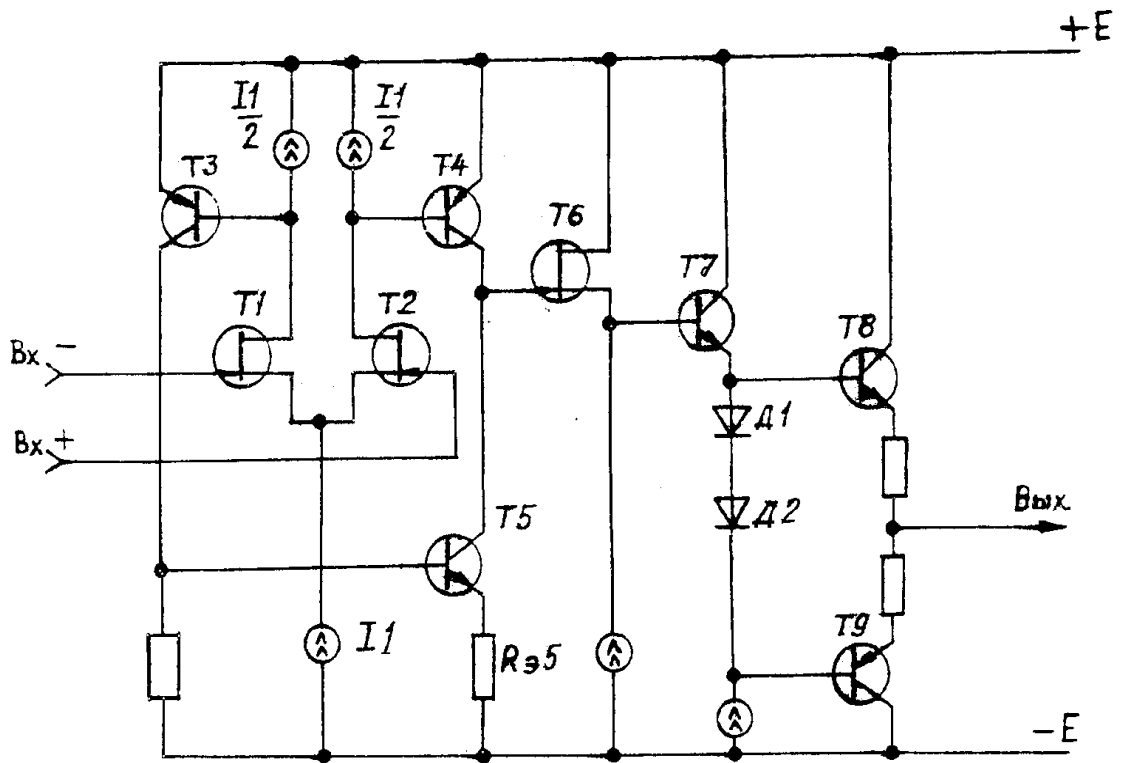


Рис. 1. Принципиальная схема операционного усилителя ОУ 544УД2.

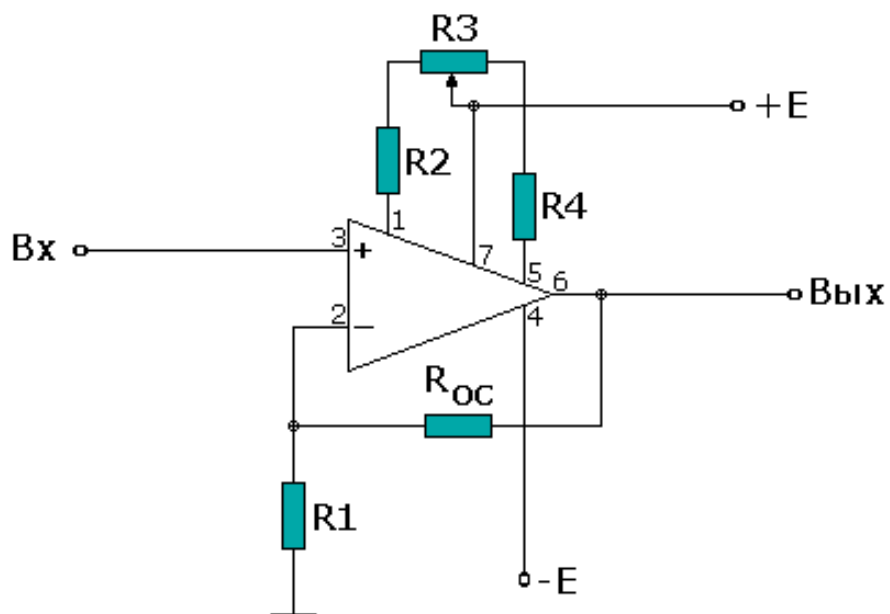


Рис. 2. Неинвертирующий усилитель

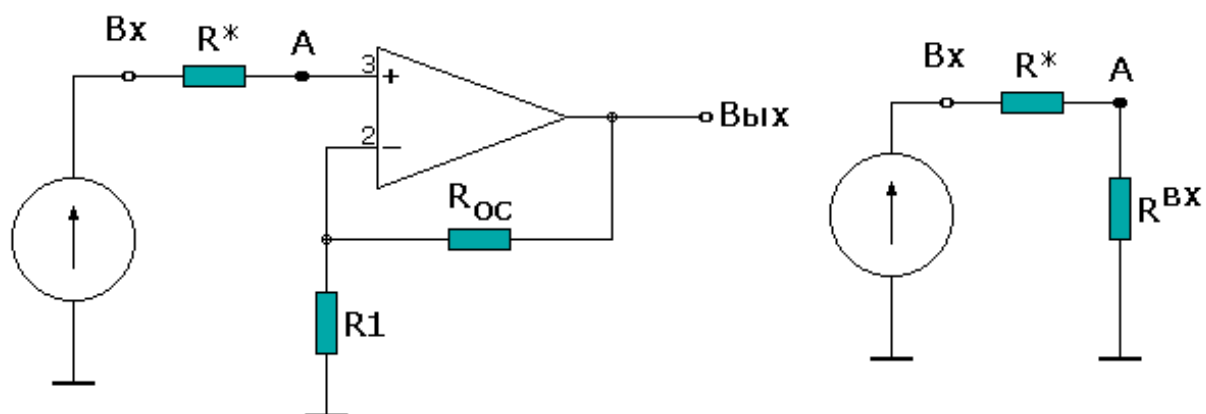


Рис. 2а. Схема измерения входного сопротивления неинвертирующего усилителя.

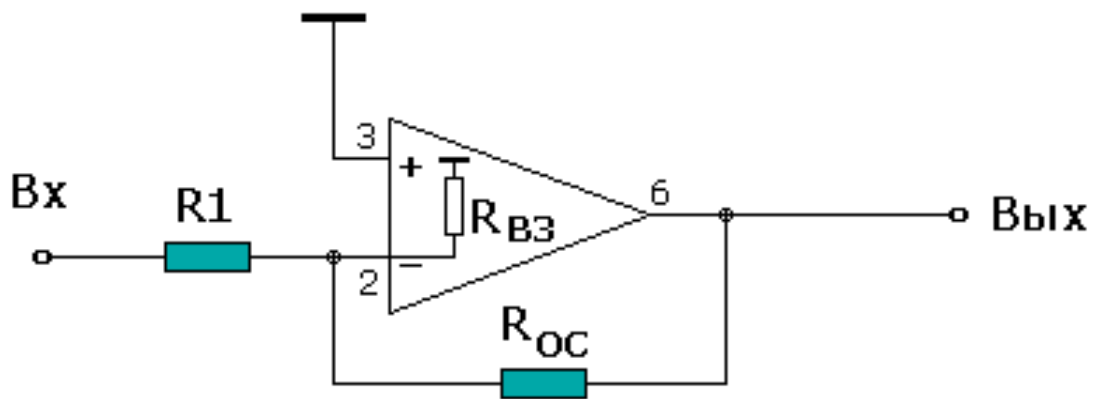


Рис. 3. Инвертирующий усилитель.

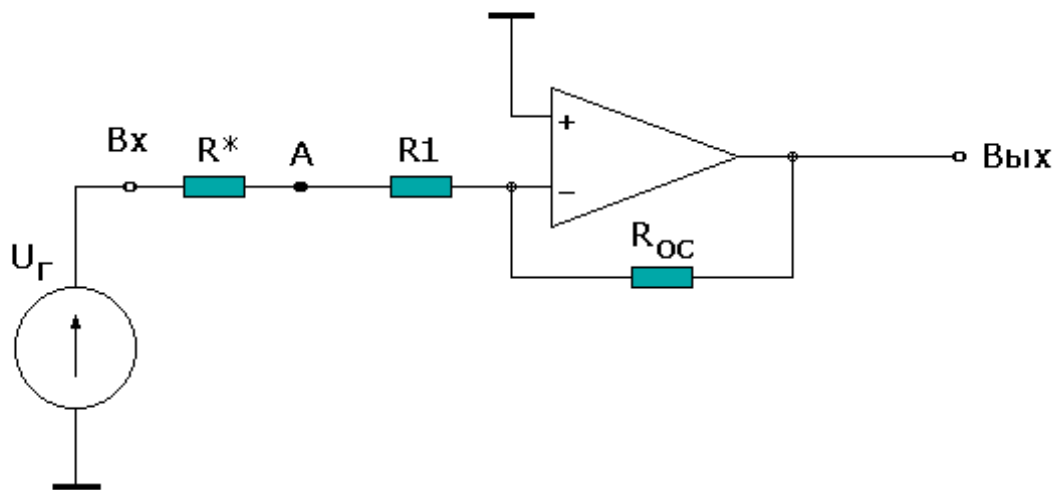


Рис. 3а Схема измерения входного сопротивления инвертирующего усилителя.

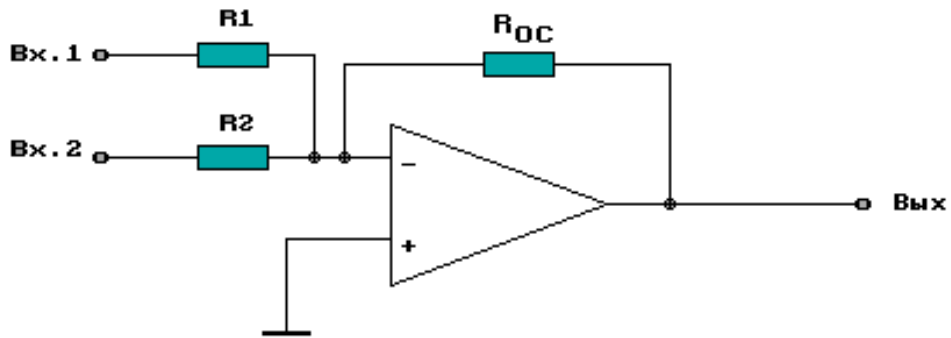


Рис. 3б. Схема аналогового суммирования сигналов.

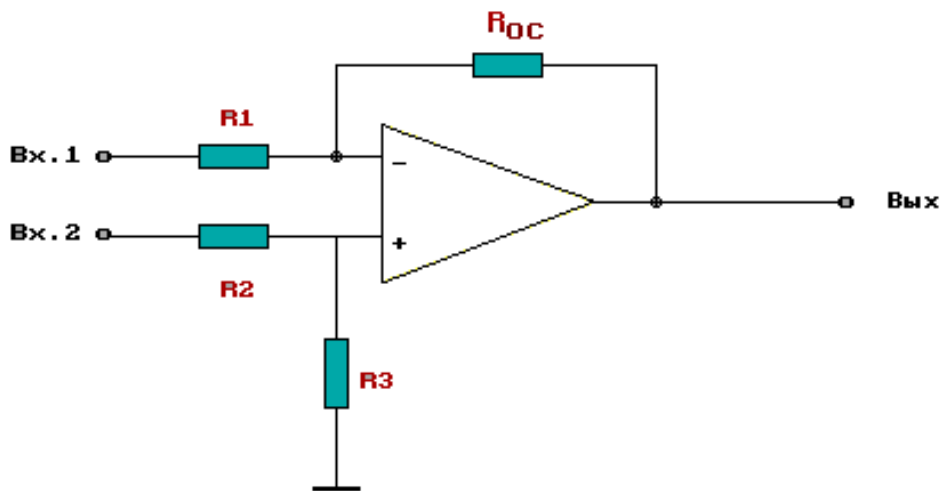


Рис. 4. Дифференциальный усилитель.

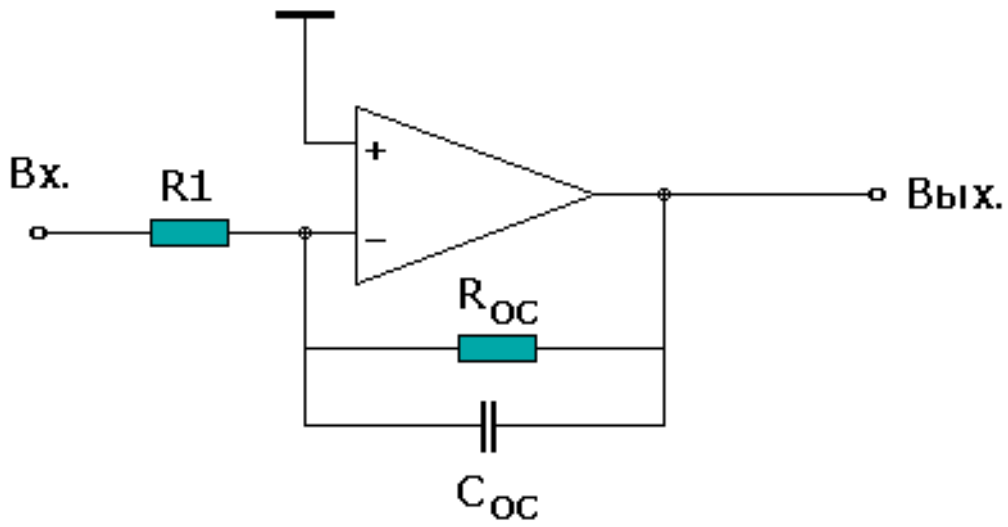


Рис. 5. Интегрирующий усилитель.

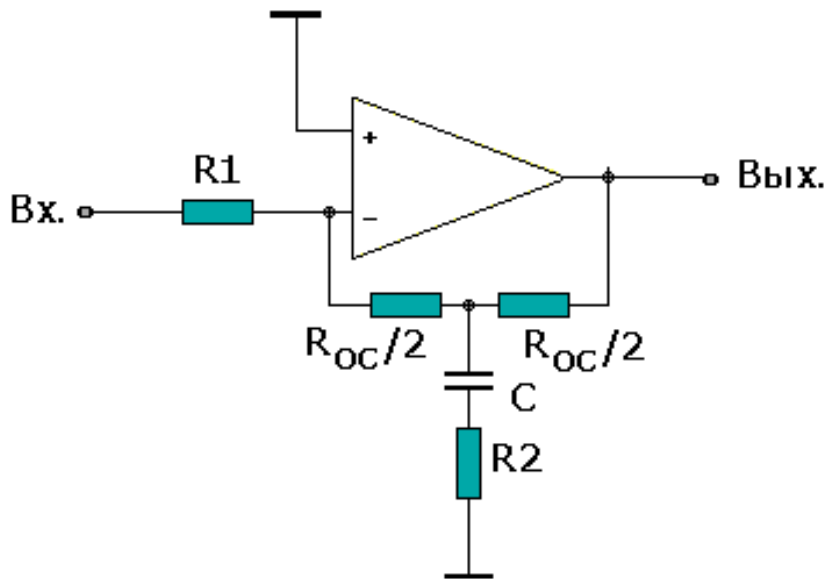


Рис. 6. Дифференцирующий усилитель.

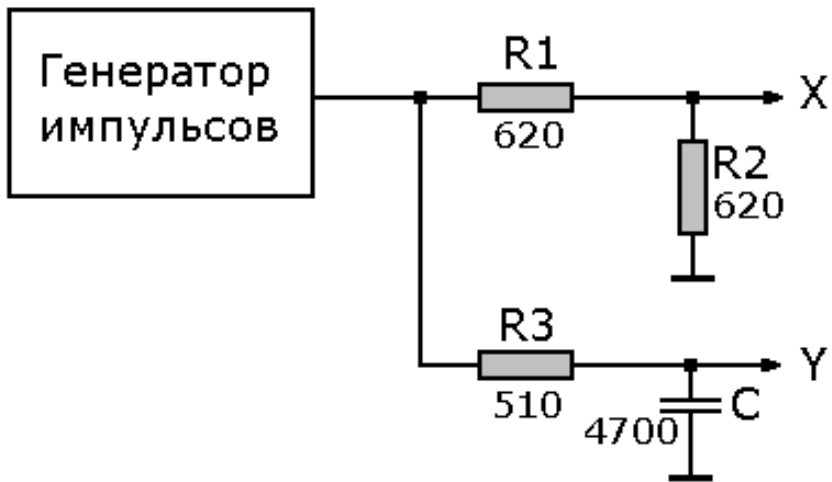


Рис. 7а. Схема №1 для аналогового суммирования.

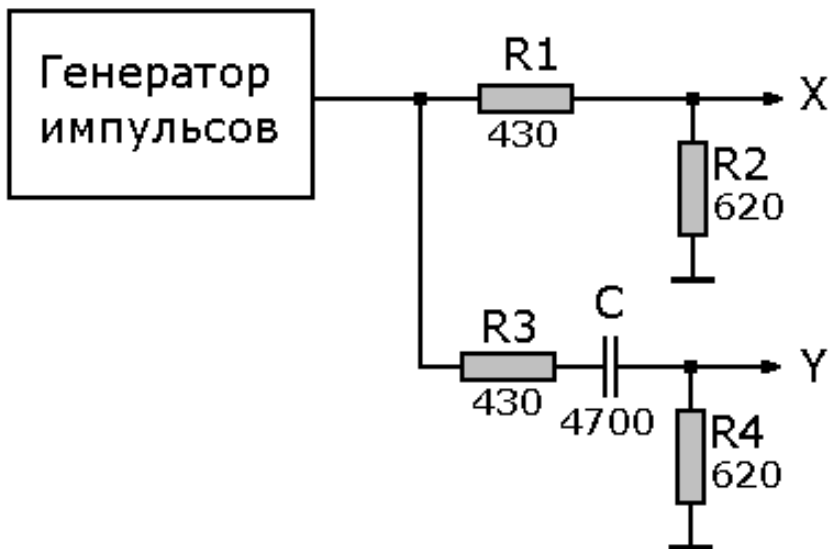


Рис. 7б. Схема №2 для аналогового суммирования.