

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Конспект лекций

ПЕНЗА 2004

УДК 621.38

Предложен конспект лекций, рассчитанный как на самостоятельное освоение основных теоретических положений дисциплины «Электротехника и электроника», так и в качестве дополнительного материала при проведении занятий по электротехнике и электронике.

Конспект лекций подготовлен на кафедре «Вычислительная техника» и предназначен для студентов специальности 22.01.00 (Вычислительные машины, комплексы, системы и сети).

Составитель: **Л.А.Брякин**

Под редакцией **Н.П.Вашкевича**

Рецензент **М.М.Бутаев**, кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, учёный секретарь
НТС ФГУП НИИ «Рубин»

5 Лине́йные усилители электрических сигналов

5.1 Общие сведения

Усилитель - это схема, предназначенная для увеличения амплитуды входного сигнала. Усилители характеризуются коэффициентами усиления по напряжению K_u , по току K_I , по мощности K_P .

$$U_{\text{ВЫХ.}} = K_u U_{\text{ВХ.}}$$

$$\Delta U_{\text{ВЫХ.}} = K_u \cdot \Delta U_{\text{ВХ.}}$$

Коэффициент усиления часто выражается в децибеллах. При этом коэффициент усиления определяется следующим образом:

$$K_u(\text{дБ}) = 20 \lg K_u,$$

$$K_P(\text{дБ}) = 10 \lg K_P.$$

Частотные свойства усилителя описывают с помощью амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик.

- Амплитудно-частотная характеристика - это зависимость коэффициента усиления от частоты. Амплитудно-частотная характеристика для усилителя переменного тока предложена на рисунке 5.1.

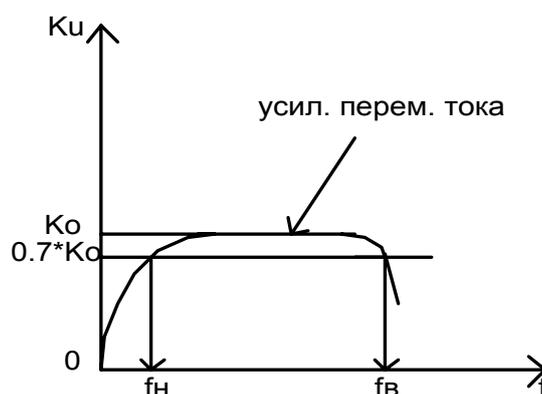


Рисунок 5.1

Отмеченные на рисунке частоты f_H и f_B определяют нижнюю и верхнюю граничные частоты усиления, а их разность определяет полосу пропускания усилителя. В зависимости от полосы пропускания усилители различают:

- усилители постоянного тока;
- усилители переменного тока;
- усилители низкой частоты;
- усилители высокой частоты;
- усилители узкополосные;
- усилители резонансные;
- усилители широкополосные.

На рисунке 5.2 предложена амплитудно-частотная характеристика усилителя постоянного тока, отличие которой заключается в том, что на частотах, близких к нулю коэффициент усиления велик.

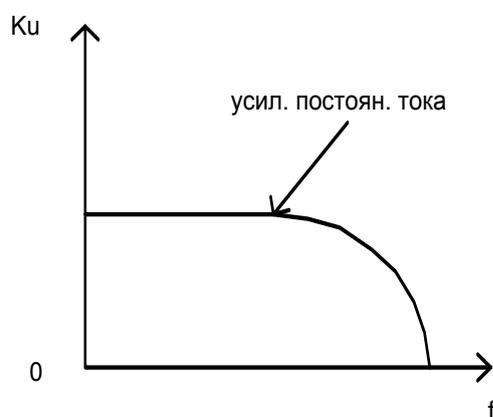


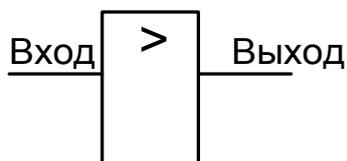
Рисунок 5.2

- Фазо-частотная характеристика - это зависимость фазового сдвига (задержка синусоидального сигнала) от частоты.

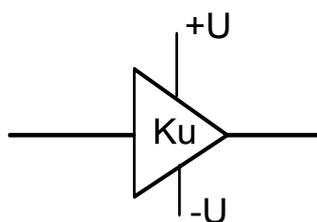
Усилители характеризуют также входным и выходным сопротивлением, выходной мощностью на заданном сопротивлении нагрузки, коэффициентом полезного действия, коэффициентом нелинейных искажений и другими параметрами.

Усилитель изображается в виде прямоугольника с символом функции в верхней строке условного обозначения (рисунок 5.3а). В средствах автоматизации усили-

тель изображается в виде треугольника (рисунок 5.3б), к которому могут быть подведены изображения проводов питания.



а)



б)

Рисунок 5.3

Чтобы усилитель обладал требуемым коэффициентом усиления, его строят с использованием последовательно включенных усилительных каскадов. Каскад - простейший усилитель, организованный по функционально законченной схеме. Каскад может строиться на одном или нескольких транзисторах. По месту положения в усилителе различают: входные, выходные, промежуточные каскады.

Входные каскады решают проблему сопряжения усилителя с источником сигналов и обычно обладают большим входным сопротивлением.

Выходные каскады обеспечивают заданную нагрузочную способность и часто обладают большим коэффициентом усиления по току при небольшом коэффициенте усиления по напряжению. Расчёт усилителя ведут, начиная с выходных каскадов, чем обеспечивается требуемая нагрузочная способность. Структура многокаскадного усилителя показана на рисунке 5.4.

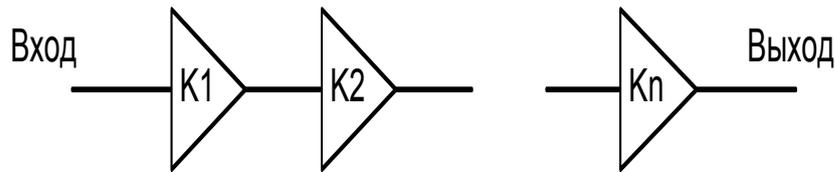


Рисунок 5.4

Общий коэффициент усиления усилителя определяется произведением коэффициентов усиления всех последовательно включенных каскадов:

$$K_u = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n .$$

Заметим, что при действии на усилитель помехи наиболее опасна та помеха, которая действует на входы первых каскадов, поскольку она усиливается всеми каскадами усилителя. Поэтому часто входные цепи первого каскада экранируют, пытаясь тем самым защитить их от воздействия наведённых из внешней среды электромагнитных помех.

5.2 Некоторые положения теории обратной связи

Обратная связь - это подача выходного сигнала или его части на вход усилителя.

В зависимости от того, повышает сигнал обратной связи суммарный коэффициент усиления схемы или уменьшает его, различают положительную и отрицательную обратную связь.

В зависимости от способа введения сигнала обратной связи различают обратную связь по напряжению, обратную связь по току и смешанную обратную связь.

В первом случае сигнал обратной связи зависит от амплитуды выходного напряжения, во втором случае от величины потребляемого нагрузкой тока.

Различают также обратную связь по постоянному и переменному току. Отрицательная обратная связь по постоянному току позволяет стабилизировать положение рабочей точки усилительного каскада и усилителя в целом. При анализе свойств усилителя с обратной связью используют предложенную на рисунке 5.5 структуру.

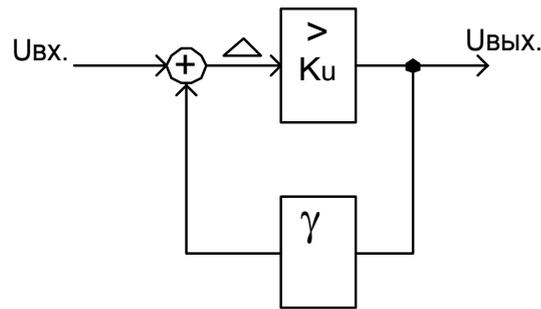


Рисунок 5.5

Для этой схемы справедливы следующие соотношения:

$$\Delta = U_{\text{вх.}} + \gamma U_{\text{вых.}},$$

$$U_{\text{вых.}} = K_u \Delta,$$

$$U_{\text{вых.}} = K_u (U_{\text{вх.}} + \gamma U_{\text{вых.}}),$$

$$U_{\text{вых.}} (1 - \gamma K_u) = K_u U_{\text{вх.}},$$

$$K_{\text{ос}} = U_{\text{вых.}} / U_{\text{вх.}} = K_u / (1 - \gamma K_u),$$

где K_u – коэффициент усиления усилителя без обратной связи, γ – коэффициент передачи цепи обратной связи, $K_{\text{ос}}$ – коэффициент усиления усилителя с обратной связью.

Обычно цепь обратной связи не инвертирует полярность сигнала.

Если коэффициент усиления усилителя $K_u > 0$, то имеем дело с положительной обратной связью. При приближении γK_u к единице коэффициент усиления схемы бесконечно растёт и усилитель превращается в генератор электрических сигналов или подобно триггеру формирует на выходе усилителя максимально возможное граничное значение напряжения. В зависимости от условий генерируется или гармонический сигнал, или импульсный.

Если коэффициент усиления усилителя отрицательный ($K_u < 0$), т.е. усилитель инвертирует полярность сигнала, то в знаменателе окажется сумма: $1 + \gamma |K_u|$ и имеем дело с отрицательной обратной связью. Можно заметить, что коэффициент усиления схемы с обратной связью при стремящемся к бесконечности коэффициенте усиления используемого усилителя стремится к величине, зависящей только от коэффициента передачи цепи обратной связи, то есть справедливо:

$$K_{oc}=(K_u/(1+\gamma K_u))|_{K_u \rightarrow \infty} = -1/\gamma.$$

Отрицательная обратная связь, как видно из сказанного, позволяет стабилизировать коэффициент усиления по напряжению, т.е. сделать его зависимым только от параметров внешних компонентов. Кроме того, отрицательная обратная связь позволяет расширить полосу пропускания схемы, повысить или понизить входное сопротивление, существенно понизить выходное сопротивление.

5.3 Схемные решения усилительных каскадов

Рассмотрим несколько вариантов схемных решений усилительных каскадов на биполярных транзисторах.

На рисунке 5.6 предложен усилительный каскад, выполненный по схеме с общим эмиттером.

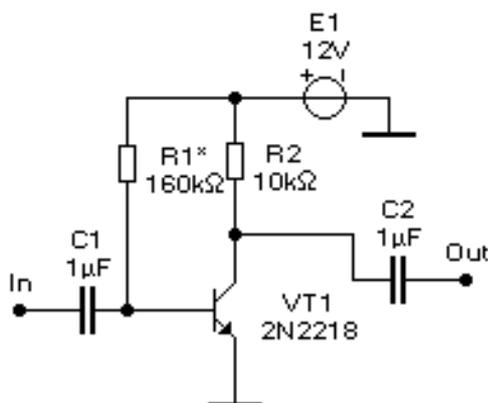


Рисунок 5.6

Каскад предназначен для усиления сигнала переменного тока, поскольку разделительные конденсаторы исключают постоянную составляющую сигнала. Если при заданном напряжении питания $E1$ определено сопротивление резистора в коллекторе $R2$ (например, задано) и известно начальное напряжение на коллекторе $U_{кэ=}$ (постоянная составляющая напряжения), то легко рассчитать начальный коллекторный ток $I_{к=}$ из выражения:

$$I_{к=}=(E1- U_{кэ=})/R2.$$

Зная коэффициент усиления тока в схеме с общим эмиттером ($\beta \approx h_{21э}$), легко рассчитать сопротивление резистора R1, которое гарантирует выбранный режим работы каскада по постоянному току:

$$R1 = (E1 - U_{бэ=}) / I_{б=},$$

$$I_{б=} = I_{к=} / \beta.$$

Начальное напряжение на коллекторе $U_{кэ=}$ можно задать равным $E1/2$, что позволит на выходе получить неискажённый сигнал с максимальной амплитудой.

Каскад усиливает сигнал по напряжению и току. Часто представляет интерес коэффициент усиления каскада по напряжению, который может быть оценён из выражения:

$$K_u = (R2 h_{21э}) / h_{11э},$$

где $h_{11э}$ – входное дифференциальное сопротивление транзистора в схеме с общим эмиттером.

Недостатком каскада является высокая чувствительность к параметрам транзистора и сопротивлению резистора R1. Обычно предполагается подстройка сопротивления резистора в процессе настройки схемы под выбранный транзистор. Незначительные изменения коэффициента усиления транзистора при его замене или при изменении температуры приводят к существенным изменениям начального напряжения на коллекторе, к изменению положения рабочей точки.

Чтобы существенно снизить нестабильность положения рабочей точки при изменении параметров деталей используют цепи стабилизации положения рабочей точки, которые предполагают применение отрицательной обратной связи. Для стабилизации положения рабочей точки можно ограничиться применением отрицательной обратной связи по постоянному току. Тогда на переменном токе сохраняется высокий коэффициент усиления сигнала.

На рисунке 5.7 предложено возможное схемное решение каскада со стабилизацией положения рабочей точки.

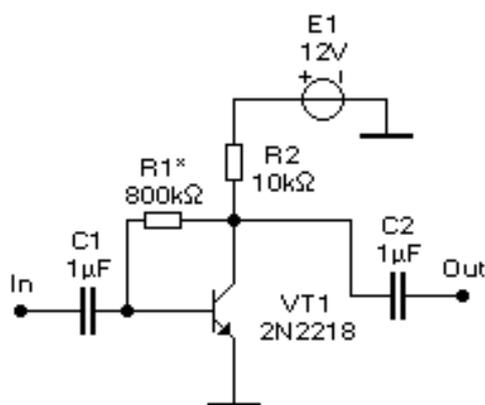


Рисунок 5.7

По постоянному току справедлива система из двух уравнений:

$$I_{R2} = I_{\text{б}} + I_{\text{к}},$$

$$I_{\text{б}} = I_{\text{к}} / \beta,$$

где I_{R2} – ток через резистор $R2$.

Эти равенства позволяют рассчитать при необходимости недостающие параметры схемы или входящих в схему компонентов. Например, если известен коэффициент усиления транзистора по току β и сопротивление коллекторного резистора $R2$ или ток через него, то, задав требуемое значение начального напряжения на коллекторе, легко рассчитать сопротивление в базовой цепи $R1$. Легко рассчитать и величину смещения положения рабочей точки каскада (напряжения на коллекторе) при изменении параметров деталей схемы.

Поскольку резистор обратной связи $R1$ создаёт отрицательную обратную связь, которая действует на любой частоте, то коэффициент усиления этого каскада при одинаковых условиях с предыдущей схемой окажется ниже.

Широкое применение, особенно в составе операционных усилителей, находят так называемые дифференциальные или балансные каскады (рисунок 5.8). Особенности этих каскадов являются невысокий дрейф нуля благодаря симметрии и взаимной компенсации изменений параметров транзисторов, наличие прямого и инвертирующего входов (дифференциальный вход) и наличие двух выходов (дифференциальный выход). Входные сигналы U_+ и U_- формируются относительно потенциала общего провода. Каскад усиливает только разностный сигнал. Выходной дифференциальный сигнал каскада равен:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{out+}} - U_{\text{out-}} = K_u (U_+ - U_-),$$

где $K_u = (R_2 h_{21э}) / h_{11э}$ – коэффициент усиления каскада при условии $R_1 = R_2$.

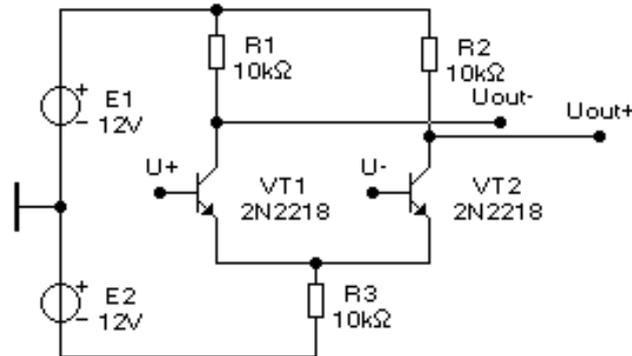


Рисунок 5.8

С целью повышения нагрузочной способности в выходных каскадах усилителей или с целью повышения входного сопротивления входных каскадов усилителей используются эмиттерные повторители (рисунок 5.9).

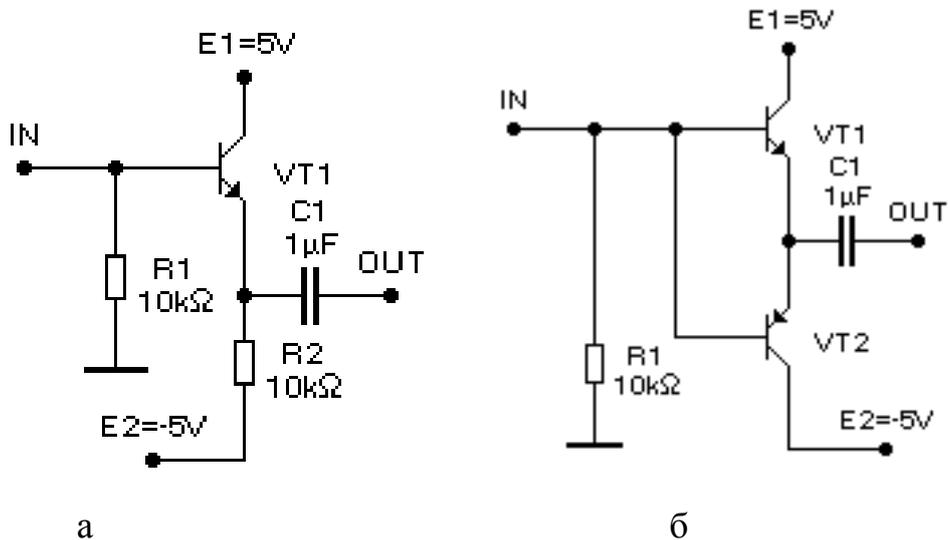


Рисунок 5.9

Предложенная на рисунке 5.9а схема использует линейный режим работы единственного транзистора, а в схеме рисунка 5.9 б транзисторы работают поочередно в зависимости от полярности передаваемого сигнала. При малых значениях напряжения на входе повторителя, выполненного по схеме рисунка

5.9б, проявляются нелинейные свойства каскада. Выходной сигнал окажется искажён, что видно из рисунка 5.10. При гармоническом входном сигнале выходной сигнал имеет нелинейную зависимость от входного вблизи нулевого уровня.

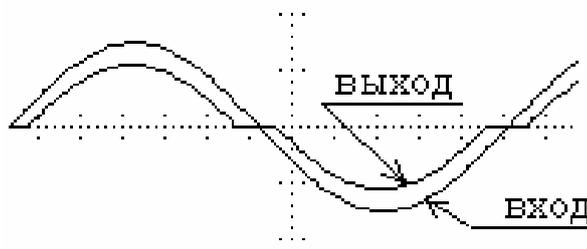


Рисунок 5.10

5.4 Операционные усилители

5.4.1 Общие сведения

Операционный усилитель (ОУ) это усилитель постоянного тока, приспособленный к работе с цепями отрицательной обратной связи. То есть, ОУ должен непременно иметь инвертирующий вход, подача на который выходного сигнала или его части соответствует определению отрицательной обратной связи. Современный ОУ имеет два входа: неинвертирующий или прямой и инвертирующий. Условное обозначение ОУ на принципиальных схемах предложено на рисунке 5.11.

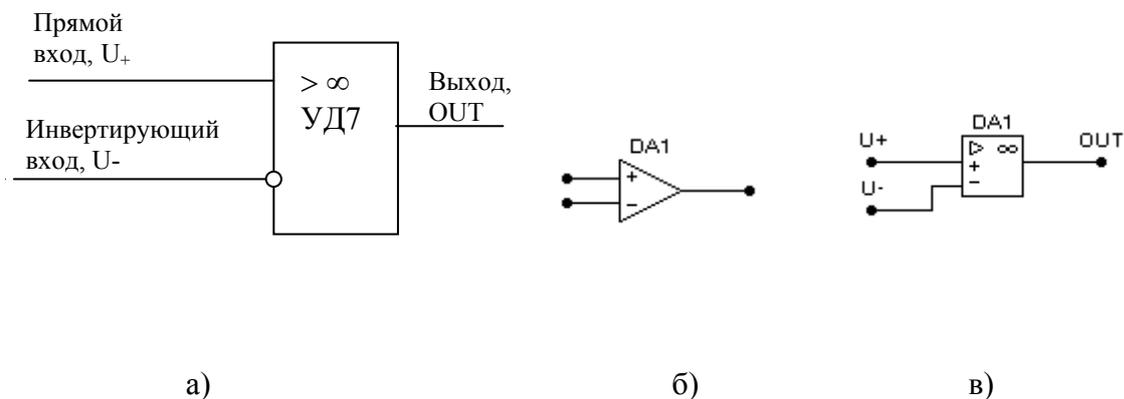


Рисунок 5.11

Обозначения ОУ, предложенные на рисунках 5.11б и 5.11в, соответствуют обозначениям, принятым в системе моделирования «Electronics Workbench» и часто используются в литературе.

Усилитель реагирует на разность входных сигналов, то есть справедливо:

$$U_{out} = K_u \cdot (U_+ - U_-),$$

где U_{out} - выходное напряжение, K_u - коэффициент усиления усилителя по напряжению, U_+ и U_- - напряжения на прямом и инвертирующем входах соответственно.

Кроме коэффициента усиления по напряжению ОУ характеризуют входным дифференциальным сопротивлением, входным током, напряжением смещения нуля, температурным дрейфом нуля, полосой пропускания, скоростью слежения, то есть максимальной скоростью изменения выходного сигнала, диапазоном изменения выходного напряжения. Идеальный ОУ должен обладать стремящимся к бесконечности коэффициентом усиления и высоким входным сопротивлением, полоса пропускания ОУ должна начинаться с нулевой частоты и простирается до бесконечности. Во многих применениях реальный усилитель имеет достаточно хорошие параметры, что позволяет пренебречь его входными токами и считать его коэффициент чрезвычайно большим. Это позволяет значительно упростить расчёт схем с операционными усилителями.

При использовании операционных усилителей с цепями отрицательной обратной связи в предположении, что выходной сигнал усилителя не достигает предельных своих значений, (то есть, ОУ работает в линейной области, когда справедлива линейная зависимость выходного сигнала от разности входных сигналов) для расчёта схемы можно пользоваться двумя простыми правилами:

- **входное сопротивление усилителя чрезвычайно велико, что позволяет не учитывать входной ток;**
- **усилитель за счёт обратной связи всегда обеспечивает равенство напряжений на своих входах:**

$$U_+ = U_-.$$

Чтобы иметь возможность формировать на выходе ОУ напряжение любой полярности, усилители питают от двух разнополярных источников напряжения, например, $\pm 15\text{В}$. Возможно питание и от однополярного напряжения с форми-

рованием среднего уровня на прямом входе ОУ с помощью, например, резисторного делителя.

Операционные усилители находят широкое применение в составе решающих усилителей аналоговых вычислительных устройств. Решающий усилитель - это усилитель, выполняющий в аналоговом виде какие-либо математические операции. Известным достоинством аналоговых устройств является возможность работы в реальном времени, теоретически исключительно высокое быстродействие. Но в настоящее время наибольшее применение ОУ находят в измерительной технике, в различных узлах и устройствах специального применения. Например, ОУ используются в аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователях, в составе стабилизаторов напряжения в источниках питания ЭВМ и других электронных устройств. Рассмотрим возможности ОУ при выполнении математических операций.

5.4.2 Масштабирующие усилители

Масштабирующие усилители используются для умножения аналогового входного сигнала на константу, определяемую соотношением применяемых для замыкания отрицательной обратной связи резисторов. Поскольку стабильность коэффициента определяется стабильностью отношения сопротивлений резисторов и практически не зависит от свойств ОУ, может быть достигнута высокая точность установки коэффициента усиления всего усилителя. Усилитель с точным и стабильным коэффициентом усиления будем считать измерительным.

Выделим две основные схемы масштабирующих усилителей: инвертирующую полярность и неинвертирующую полярность входного сигнала.

Схема инвертирующей полярности масштабирующего усилителя предложена на рисунке 5.13а.

Для этого усилителя справедливо равенство:

$$K_{oc} = -R_2/R_1,$$

где K_{oc} – коэффициент усиления по напряжению с замкнутой обратной связью. Докажем справедливость предложенного выражения.

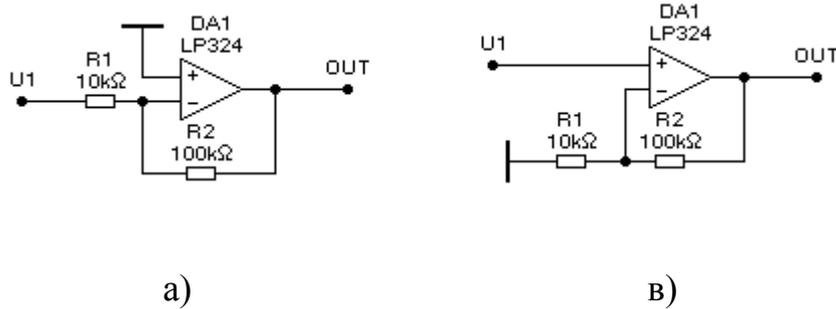


Рисунок 5.13

Поскольку справедливо равенство: $U_+ = U_-$, а $U_+ = 0$, потенциал инвертирующего входа U_- всегда равен нулю. А поскольку входные токи ОУ пренебрежимо малы, то справедливо равенства токов через резисторы $R1$ и $R2$. Выразим токи через напряжения и приравняем их. В результате получим равенство:

$$\frac{U_1 - U_-}{R1} = \frac{U_- - U_{out}}{R2},$$

где U_{out} - выходное напряжение усилителя. Учитывая равенство нулю напряжения U_- , получим:

$$\frac{U_1}{R1} = \frac{-U_{out}}{R2}.$$

Это позволяет определить коэффициент усиления схемы:

$$K_{oc} = \frac{U_{out}}{U_1} = -\frac{R2}{R1}.$$

Входное сопротивление схемы будет равно $R1$, что ограничивает применение её при высоком выходном сопротивлении источника сигнала.

Схема неинвертирующего полярность масштабирующего усилителя предложена на рисунке 5.13б.

Для этого усилителя справедливо равенство:

$$K_{oc} = (R1+R2)/R1.$$

Входное сопротивление усилителя в этом случае высокое. Оно определяется входным сопротивлением используемого ОУ. Используемые в предложенных схемах ОУ типа LP324 имеют коэффициент усиления по напряже-

нию с разорванной обратной связью 100000, входное сопротивление 100КОм, смещение нуля не выше 2 мВ, скорость слежения 50В/мкс, частоту единичного усиления 100КГц, диапазон выходных напряжений $\pm 3В$.

Полоса пропускания предложенных схем простирается от нуля до частоты, определяемой свойствами используемого ОУ. Недостатком схемы является умножение в K_{oc} раз начального смещения нуля ОУ. Если усиление частот, близких к нулю, не требуется, то последовательно с R1 в схемах ставится конденсатор, который исключает отмеченный недостаток. Но ёмкость этого конденсатора определяет нижнюю полосу пропускания схемы.

В измерительной аппаратуре часто возникает необходимость усиления дифференциального сигнала и подавления синфазной помехи. Схемные решения усилителей с дифференциальными входами предложены на рисунке 5.14.

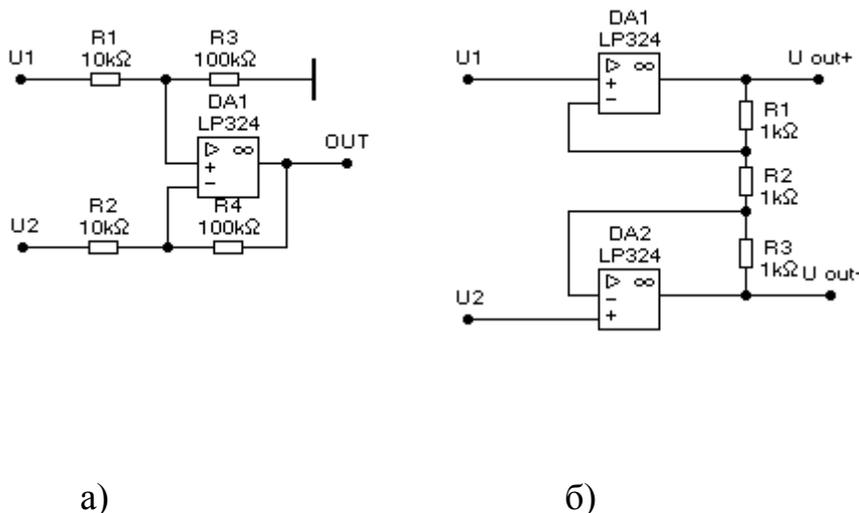


Рисунок 5.14

Для схемы, предложенной на рисунке 5.14а, входное сопротивление оказывается равным $(R1+R2)$. Кроме того, оказываются справедливы равенства:

$$R1=R2; R3=R4; U_{out}= K_{oc}(U1-U2);$$

$$K_{oc} = R3/R1,$$

где U_{out} – выходное напряжение усилителя.

Для схемы, предложенной на рисунке 5.14б, входное сопротивление оказывается высоким. Кроме того, оказываются справедливы равенства:

$$R1=R3; (U_{out+} - U_{out-})= K_{oc}(U1-U2);$$

$$K_{oc}=(2R1+R2)/R2.$$

Особенностью второй схемы является дифференциальный выходной сигнал, что создаёт неудобства в применении. Поэтому часто выходные цепи этой схемы нагружают на каскад, предложенный на рисунке 5.14а, чтобы получить сигнал относительно общего провода.

5.4.3 Суммирующие усилители

Построенный на основе ОУ суммирующий усилитель способен выполнять алгебраическое сложение входных аналоговых напряжений (рисунок 5.15). Выходное напряжение определяется из выражения:

$$U_{out}=-[(R3/R1)U1+(R3/R2)U2],$$

То есть, каждый входной сигнал передаётся на выход со своим коэффициентом. Эта схема может быть использована для смещения одного из сигналов с помощью второго входа на постоянную величину вверх или вниз по оси напряжений. Число суммирующих входов может быть другим.

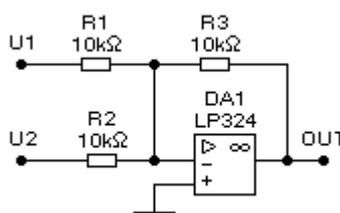


Рисунок 5.15

5.4.4 Интегрирующий усилитель

В общем случае сопротивления в цепи обратной связи и на входе операционного усилителя могут быть комплексными, т.е. могут содержать реактивные компоненты. Это позволяет составить аналоговую схему со сложной передаточной функцией, позволяет строить на операционных усилителях активные

фильтры, имеющие сложные, но необходимые для практики амплитудно-частотные зависимости.

В аналоговых вычислительных машинах широко используются интегрирующие усилители, которые строятся по схеме, предложенной на рисунке 5.16.

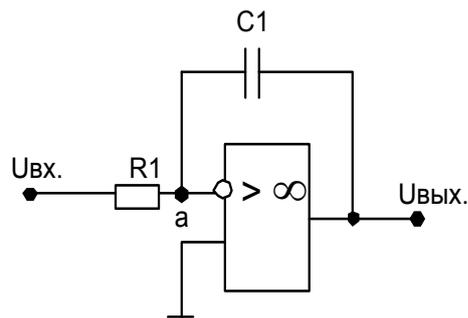


Рисунок 5.16

За счёт обратной связи справедливо: $U_a \approx 0$. Выходное напряжение связано с параметрами цепи обратной связи и с входным напряжением следующим выражением:

$$U_{\text{Вых}} = \frac{1}{R1 \cdot C1} \int_0^t U_{\text{вх}}(t) \cdot dt + U_c(0).$$

В предложенной схеме, чтобы иметь возможность задавать начальное значение напряжения на конденсаторе, с помощью электронных коммутаторов конденсатор заряжают до требуемого уровня, а в момент начала процесса интегрирования с помощью коммутаторов создают предложенную выше схему. Если к точке а подключены несколько резисторов, то схема реализует операцию интегрирования алгебраической суммы входных аналоговых сигналов, представленных в виде электрических напряжений.

5.4.5 Дифференцирующий усилитель

Если конденсатор и резистор поменять местами, то образуется дифференцирующий усилитель, который находит весьма ограниченное применение.

Объясняется это тем, что всякий сколь угодно малый сигнал помехи, имеющий крутой фронт, вызовет на выходе помеху с большой амплитудой.

5.4.5 Проблема дрейфа нуля и её решение

Поскольку операционный усилитель усиливает сигнал начиная с нулевой частоты, возникает проблема температурного дрейфа напряжения смещения нуля. Напряжение смещения нуля – разность входных напряжений, которая в реальном усилителе приводит к нулю на выходе. Это напряжение может быть компенсировано применением цепей балансировки нуля при настройке схемы. Но проблема состоит в том, что с изменением температуры это напряжение меняется, что приводит к разбалансу усилителя, к появлению паразитного сигнала на выходе.

Если входной каскад усилителя выполнен по схеме с общим эмиттером и на вход подаётся ноль, с помощью балансировки на выходе можем получить ноль. Но с изменением температуры на каждый 1°C прямое падение напряжения на переходе база-эмиттер изменится на 2-3мВ. Это изменение воспринимается как полезный входной сигнал, что делает невозможным построение операционного усилителя с использованием схемы с общим эмиттером.

Проблема температурного дрейфа нуля решается двумя способами:

- 1) Применением дифференциального каскада на входе ОУ. Дифференциальный каскад имеет два входа: прямой, инверсный и реагирует на разность входных сигналов. Его применение уменьшает дрейф нуля примерно в 700 раз.
- 2) Применением в операционном усилителе М-DM канала (модуляция и демодуляция). В этом случае входной сигнал с частотой, близкой к нулю, преобразуется в сигнал с частотой $f > 0$, усиливается усилителем переменного тока, который не чувствует температурный дрейф нуля, выходе которого осуществляется обратное преобразование сигнала. Такой приём позволяет значительно уменьшить температурный дрейф, но полоса пропускания схемы оказывается невысокой. Чаще всего проблема решается применением дифференциальных каскадов.

Заключение

В предложенном вашему вниманию конспекте лекций охвачена лишь малая часть материала, который следовало бы изложить для более глубокого изучения дисциплины. Некоторые теоретические вопросы, не представленные в этом конспекте, имеются в теоретическом обосновании лабораторных работ [18, 19], без которых освоение материала значительно бы усложнилось. В то же время дисциплина, предлагаемая вашему вниманию, может быть освоена только в том случае, если вы при изучении дисциплины приложите огромное желание и собственный труд. Полного понимания материала вы достигнете, если привлечёте к изучению материал из других, более полных учебников и поработаете руками, собирая с помощью паяльника рассчитанные схемы, на практике осознавая принципы их работы, или хотя бы смоделируете интересные на ваш взгляд схемы. Тогда на каком-то этапе вы вдруг ощутите всю прелесть материала, огромные возможности дисциплины при решении практических задач. Успехов вам!

Литература

1. Л.А.Бессонов. Теоретические основы электротехники. - М.: ВШ, 1973.- 752с., ил.
2. Сборник задач по теоретическим основам электротехники: Учеб. пособие. / Л.А.Бессонов, И.Г.Демидова, М.Е.Заруди и др.; Под ред. Л.А.Бессонова.- М.: ВШ, 1980 – 472с., ил.
3. Н.М.Белоусова, О.В.Толчеев. Преподавание электротехники. – М.: ВШ, 1988.- 191с., ил.
4. М.Ю.Анвельт, Ю.Х.Пухляков, М.А.Ушаков. Электротехника. – М.: Учпедгиз, 1963. – 240с., ил.
5. Л.Р.Нейман, К.С.Демирчян. Теоретические основы электротехники. В двух томах. Т.1. Л.: Энергия, 1975. – 524с., ил. Т.2. Л.: Энергия, 1975. – 408с., ил.
6. Г.Г.Рекус, А.И.Белоусов. Сборник задач по электротехнике и основам электроники. М.: ВШ, 1991. – 416с, ил.
7. В.В.Крылов, С.Я.Корсаков. Основы теории цепей для системотехников. – М.: ВШ, 1990.-224с. ил.
8. В.Г.Гусев, Ю.М.Гусев. Электроника.-М.: ВШ, 1991-622с., ил.
9. Е.П.Угрюмов. Элементы и узлы ЭЦВМ. М.: ВШ, 1976-232с., ил.
10. А.Г.Алексенко, И.И.Шагурин. Микросхемотехника: Учебное пособие для ВУЗов. Под ред. И.П.Степаненко. –М.: Радио и связь, 1982-416с., ил.
11. В.В.Пасынков, Л.К.Чиркин. Полупроводниковые приборы. –М.: ВШ, 1987-479с.
12. И.П.Степаненко. Основы микроэлектроники. М.: Сов. радио, 1980-424с.
13. Н.М.Соломатин. Логические элементы ЭВМ. 1990.
14. П.Хоровиц, У.Хилл. Искусство схемотехники. –М.: Мир, 1983. В двух томах. 598с. и 590с.
15. К.В.Шалимова. Физика полупроводников. –М.: Энергия, 1971-312с.
16. И.Е.Ефимов и др. Микроэлектроника.- М.: ВШ, 1987-416с.

17. В.И.Карлащук. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и её применение. – М.: Солон-Р, 1999.
18. Электротехника и электроника / Методические указания к лабораторным и самостоятельным работам. Составители: Л.А.Брякин, А.С.Бычков. Часть 1.- Издательство ПГУ, Пенза, 2003.-66с.
19. Электротехника и электроника / Методические указания к лабораторным занятиям и самостоятельной работе. Составитель Л.А.Брякин. Часть 2.- Издательство ПГУ, Пенза, 2003.-44с.