

Лекция 8

Тема: Интегральные усилители

1 Усилители постоянного тока

Усилителями постоянного тока (УПТ) или усилителями медленно изменяющихся сигналов называются усилители, которые способны усиливать электрические колебания с частотами от нулевой до высшей граничной частоты, определяемой назначением усилителя.

Частотная характеристика УПТ представлена на рисунке 1. УПТ широко применяются в различных электронных устройствах – схемах автоматической регулировки усиления, осциллографах, приборах для измерения различных неэлектрических величин, устройствах управляющих и следящих систем и т. п.

На основе УПТ строятся операционные усилители, которые в настоящее время выпускаются промышленностью в интегральном исполнении и нашли самое широкое применение в электронной технике.

По принципу действия усилители постоянного тока делятся на два типа: усилители постоянного тока прямого усиления и усилители, в которых осуществляется предварительное преобразование усиливаемого сигнала в переменный на несущей частоте, обычно называемые усилителями постоянного тока с преобразованием.

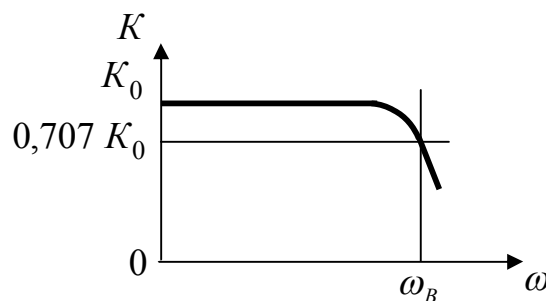


Рисунок 1– Частотная характеристика УПТ

Какими основными особенностями характеризуется усилитель постоянного тока? Укажите правильные ответы?

1 УПТ должен иметь полосу пропускания с нижней граничной частотой $\omega_H = 0$.

2 В УПТ исключается возможность применения емкостной и трансформаторной связи между отдельными каскадами усиления, а поэтому имеет место непосредственная или гальваническая связь между ними.

3 Напряжение на выходе УПТ $U_{ВЫХ}$ должно быть прямо пропорционально входному напряжению $U_{ВХ}$, а полярность – совпадать с полярность последнего, что определяет вид амплитудной характеристики УПТ.

4 В УПТ прямого усиления необходима компенсация постоянной составляющей на его выходе.

5 УПТ, как правило, характеризуется наличием глубокой отрицательной обратной связи.

6 Для УПТ характерен дрейф нуля.

Так как практически во всех схемах УПТ между соседними каскадами используют непосредственную (гальваническую связь), в схемах УПТ наблюдается явление дрейфа нуля. Дрейф нуля это самопроизвольное изменение выходного сигнала при отсутствии входного сигнала, т. е. на выходе УПТ появляется выходное напряжение, которое можно представить в виде монотонно возрастающей составляющей и беспорядочных колебаний относительно этой составляющей. В связи с этим, даже небольшое самопроизвольное изменение постоянного тока транзистора в первом каскаде УПТ создает приращение напряжения на его выходе, которое затем усиливается другими каскадами и выделяется на нагрузке как полезный сигнал. Применение дифференциальных усилительных каскадов позволяет устранить данный недостаток.

2 Дифференциальные усилительные каскады

Радикальным средством уменьшения дрейфа УПТ является применение параллельно-балансных каскадов, которые называются дифференциальными усилителями. Дифференциальный усилитель (рисунок 2) выполняют по принципу уравновешенного моста, образованного двумя идентичными транзисторами T_1 и T_2 и резисторами R_{K1} и R_{K2} . В одну диагональ моста введены два источника питания $+E_{K1} = |-E_{K2}|$ и источник стабильного тока I_{Σ} . Источник стабильного тока создает в общей цепи эмиттеров транзисторов неизменный суммарный ток $I_{\Sigma} = I_{\Sigma 1} + I_{\Sigma 2} = const$. При отсутствии входных сигналов мост уравновешен, и выходное напряжение усилительного каскада $U_{ВЫХ} = 0$.

Пусть на оба входа ДУ подаются одинаковые (синфазные) сигналы. При одновременном увеличении или уменьшении амплитуд синфазных сигналов на входах усилителя коллекторные токи обоих транзисторов и напряжения на их коллекторах изменятся соответственно на одни и те же величины. Выходное же напряжение $U_{ВЫХ}$, определяемое разностью коллекторных напряжений транзисторов, будет по-прежнему равным нулю. Значит, дифференциальный усилитель не усиливает (подавляет) синфазные сигналы.

Проанализируем реакцию ДУ на дифференциальные (разностные) сигналы. Пусть сигнал на входе $U_{ВХ1}$ получил положительное приращение, а сигнал на входе $U_{ВХ2}$ – равное, но отрицательное приращение. В этом случае коллекторный ток транзистора T_1 увеличится, а коллекторный ток транзи-

стора T_2 уменьшится точно на такую же величину. Соответствующим образом изменятся и потенциалы на коллекторах транзисторов, что приведет к изменению напряжения на выходе ДУ.

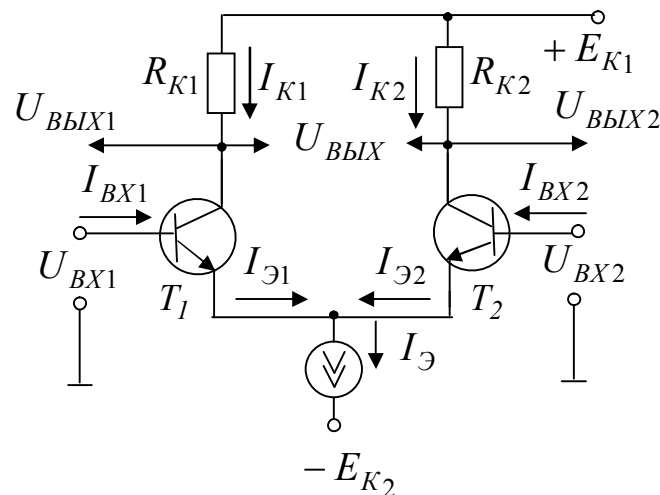


Рисунок 2– Дифференциальный усилитель

Пусть выходной сигнал в схеме рисунка 2 снимается с выхода $U_{ВЫХ2}$, входной сигнал подключен к входу $U_{ВХ2}$, а вход $U_{ВХ1}$ заземлен. При подаче на вход $U_{ВХ2}$ положительного приращения усиливаемого напряжения $\Delta U_{ВХ2}$ увеличится коллекторный ток $I_{К2}$ и падение напряжения $\Delta U_K = I_{К2} R_{K2}$ на резисторе R_{K2} . Выходное (коллекторное) напряжение $U_{ВЫХ2} = E_{K1} - I_{К2} R_{K2}$ при этом уменьшится и окажется в противофазе с входным. Поэтому вход $U_{ВХ2}$ по отношению к выходу $U_{ВЫХ2}$ называют инвертирующим.

Теперь допустим, что входной сигнал подается на вход $U_{ВХ1}$, а вход $U_{ВХ2}$ дифференциального усилителя заземлен. При увеличении входного сигнала возрастет ток эмиттера $I_{Э1}$ транзистора T_1 , а ток эмиттера $I_{Э2}$ транзистора T_2 уменьшится (ведь $I_{Э} = I_{Э1} + I_{Э2} = const I_{Э}$). При этом ток коллектора $I_{К2}$ транзистора T_2 и падение напряжения на сопротивлении R_{K2} уменьшатся, а выходное напряжение $U_{ВЫХ2}$ увеличится. Таким образом, выходное напряжение $U_{ВЫХ2}$ оказалось в фазе с входным $U_{ВХ1}$, вследствие чего вход $U_{ВХ1}$ является неинвертирующим для выходного сигнала.

ДУ как правило, применяют для сравнения с высокой точностью значений или разности двух напряжений. Это в частности объясняет название «дифференциальный» усилитель.

3 Операционные усилители

Операционным усилителем (ОУ) называют усилитель электрических сигналов, предназначенный для выполнения различных операций над аналоговыми и импульсными величинами при работе с обратными связями.

Основу всех операционных усилителей составляют дифференциальные каскады. Первый каскад обеспечивает коэффициент усиления, достигающий – нескольких сотен тысяч и единиц миллионов. Входной каскад, в котором часто используются полевые транзисторы, обеспечивает входные характеристики ОУ, в частности его высокое входное сопротивление. Выходным каскадом является бестрансформаторный двухтактный усилитель мощности (эмиттерный повторитель, работающий в режиме усиления В или АВ), он служит для согласования высокого выходного сопротивления первого дифференциального каскада ОУ с низкоомным нагрузочным устройством. Поэтому ОУ имеет низкое выходное сопротивление. Кроме того, в состав современных ОУ входят цепи защиты по входу от перенапряжений и по выходу от превышения выходного тока.

На рисунке 3, а) приведено условное обозначение операционного усилителя. Как видно, ОУ имеет два входа и один выход. Вход, напряжение на котором сдвинуто по фазе на 180° относительно выходного напряжения, называют инвертирующим U_{II} и обозначают кружком. Вторым входом является неинвертирующим U_{IH} , так как напряжение на нем и выходное напряжение совпадают по фазе.

Питание ОУ осуществляется от двух одинаковых разнополярных источников $+U_{II}$, и $-U_{II}$ (на графических обозначениях источники питания обычно не показывают). При таком питании входные и выходные сигналы могут быть двуполярными, а нулевым входным сигналам соответствует нулевой выходной сигнал. Выходной сигнал ОУ пропорционален дифференциальному входному сигналу – разности входных $U_O = U_{IH} - U_{II}$.

Операционные усилители характеризуются усилительными, входными, выходными, энергетическими, дрейфовыми, частотными и скоростными параметрами.

Наиболее важными характеристиками операционных усилителей является его амплитудные (передаточные) характеристики (рисунок 3, б)), представляющие собой зависимость $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$ при нулевой частоте. Их представляют в виде двух кривых, относящихся к инвертирующему и неинвертирующему входам.

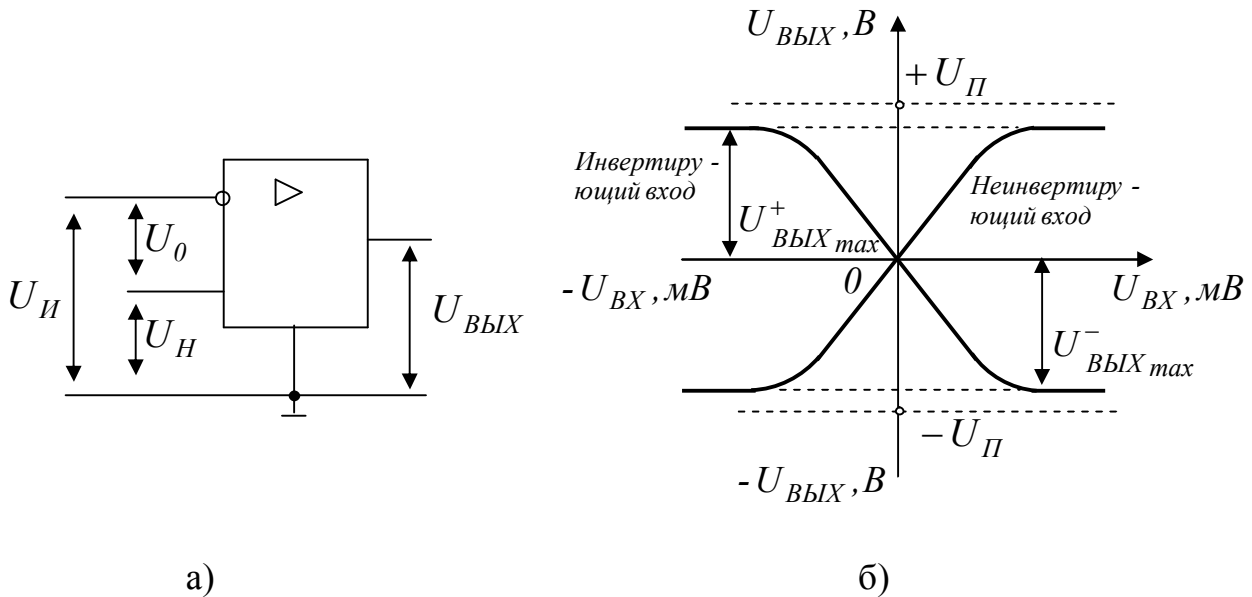


Рисунок 3 – Операционный усилитель: а) – условное графическое изображения; б) – передаточные характеристики

Коэффициент усиления по напряжению K_0 собственно ОУ равен отношению выходного напряжения к дифференциальному входному напряжению:

$$K_0 = U_{ВЫХ} / U_0$$

В теории интегральной усилительной техники с целью упрощения анализа и расчета схем на операционных усилителях вводят понятие «идеальный» ОУ, для которого справедливы следующие допущения: бесконечно большие коэффициент усиления $K_0 = \infty$ и входное сопротивление $R_{ВХ0} = \infty$ и нулевое выходное сопротивление $R_{ВЫХ0} = 0$.

Из этих упушений вытекают два основных свойства (правила анализа) ОУ:

1. Дифференциальный входной сигнал равен нулю

$$U_0 = \frac{U_{ВЫХ}}{K_0} = \frac{U_{ВЫХ}}{\infty} = 0$$

2. Входы ОУ не потребляют ток от источника входного сигнала

$$I_0 = \frac{U_{ВХ}}{R_{ВХ0}} = \frac{U_{ВХ}}{\infty} = 0$$

Изложенное выше понятие идеального ОУ соответствует так называемому принципу «виртуального» (кажущегося) замыкания его инвертирующего и неинвертирующего входов. При виртуальном замыкании, как и при физическом (обычном), напряжение между соединенными зажимами равно нулю. Вместе с тем, в отличие от физического замыкания, ток между виртуально замкнутыми зажимами не течет. Говоря другими словами, для тока виртуальное замыкание зажимов эквивалентно разрыву электрической цепи.

В зависимости от условий подачи усиливаемого сигнала на входы ОУ и

подключения к нему внешних элементов можно получить две фундаментальные схемы включения – инвертирующую и неинвертирующую. Фактически любое схмотехническое решение с применением ОУ базируется на этих включениях.

Инвертирующий усилитель. В схеме инвертирующего усилителя (рисунок 4) входное напряжение через резистор R_1 подается на инвертирующий вход, который с помощью резистора обратной связи R_{OC} охвачен параллельной ООС по напряжению. Неинвертирующий вход усилительного каскада заземлен.

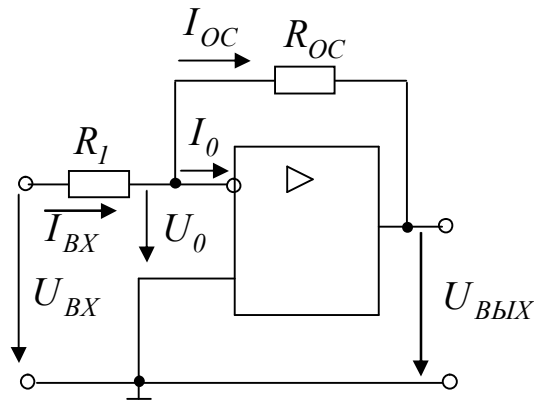


Рисунок 4 – Инвертирующий усилитель на операционном усилителе

Для определения параметров инвертирующего усилителя воспользуемся первым правилом Кирхгофа для токов инвертирующего входа: $I_{BX} = I_0 + I_{OC}$. Поскольку по второму свойству идеального ОУ ток $I_0 = 0$, то $I_{BX} = I_{OC}$. Выразив токи через соответствующие им входные напряжения, получим:

$$\frac{U_{BX} - U_0}{R_1} = \frac{U_0 - U_{BЫX}}{R_{OC}}$$

По первому свойству идеального ОУ напряжение $U_0 = 0$, поэтому

$$\frac{U_{BX}}{R_1} = -\frac{U_{BЫX}}{R_{OC}} \text{ с.}$$

Тогда коэффициент усиления инвертирующего усилителя:

$$K_U = \frac{U_{BЫX}}{U_{BX}} = -\frac{R_{OC}}{R_1}$$

Согласно формуле (31), изменением величины сопротивления обратной связи R_{oc} можно регулировать коэффициент усиления.

Входное сопротивление инвертирующего усилителя существенно меньше собственного входного сопротивления ОУ. В схеме рисунке 4 точка подключения инвертирующего входа ОУ является виртуальным нулем, т.е. по входному сигналу она заземлена. Можно показать, что входное и выходное сопротивления инвертирующего усилителя:

$$R_{BXИ} = \frac{U_{BX} - U_0}{I_{BX}} = \frac{U_{BX}}{I_{BX}} = R_1; \quad R_{ВЫХИ} = \frac{K_U}{K_0} = R_{ВЫХ0}. \quad (32)$$

Отметим, что при $R_1 = R_{OC}$, $K_{И} = -1$ схема рисунка 4 превращается в инвертирующий повторитель (инвертор).

Еще одним вариантом построения инвертирующего усилителя является преобразователь тока в напряжение. Это достигается при $R_1 = 0$. Тогда ток $I_{BX} = I_{OC} = -U_{ВЫХ} / R_{OC}$ и выходное напряжение $U_{ВЫХ} = -I_{BX} R_{OC}$.

Инвертирующий сумматор (суммирующий усилитель). Для суммирования нескольких напряжений можно использовать инвертирующее включение ОУ. На рисунке 5 в качестве примера показан трехвходовый инвертирующий сумматор.

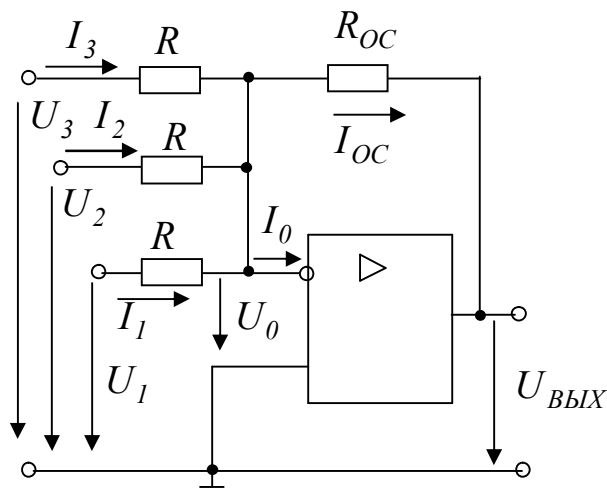


Рисунок 5 – Инвертирующий сумматор на операционном усилителе

Входные напряжения U_1 , U_2 и U_3 через резисторы с обычно одинаковыми сопротивлениями R подаются на инвертирующий вход ОУ. Учитывая, что напряжение на инвертирующем входе ОУ характеризуется виртуальным нулем, токи I_1 , I_2 и I_3 будут заданы только соответствующими им входными напряжениями U_1 , U_2 и U_3 и сопротивлением R :

$$I_1 = U_1 / R; \quad I_2 = U_2 / R; \quad I_3 = U_3 / R.$$

Поскольку, согласно второму свойству идеального ОУ, инвертирующий вход практически не потребляет ток, то сумма всех входных токов I_1 , I_2 и I_3 протекает только через резистор R_{OC} и создает на нем падение напряжения $U_{ВЫХ} = -(I_1 + I_2 + I_3) R_{OC}$. Подставив в эту формулу соответствующие значения токов, выраженные через входные напряжения, и положив $R = R_{OC}$, получим:

$$U_{ВЫХ} = -(U_1 + U_2 + U_3).$$

Итак, выходное напряжение равно алгебраической сумме входных напряжений, взятых с обратным знаком.

В данной схеме инвертирующего сумматора все входные токи полностью протекают через резистор обратной связи R_{OC} . При этом токи практически не влияют друг на друга, следовательно, и входные напряжения не взаимодействуют друге другом, т.е. все три входа усилителя полностью развязаны. Последнее свойство инвертирующего сумматора исключительно полезно для смешивания (микширования) сигналов низкой (звуковой) частоты.

Неинвертирующий усилитель. В неинвертирующем усилителе входной сигнал поступает на неинвертирующий вход, а инвертирующий – с помощью резистивного делителя R_1 , R_{OC} охвачен последовательной ООС по напряжению (рисунок 6).

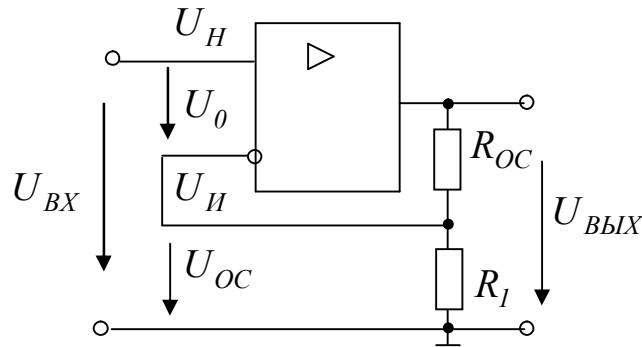


Рисунок 6 – Неинвертирующий усилитель на операционном усилителе

В схеме $U_{BX} = U_0 - U_{OC}$. Поскольку $U_0 = 0$, то $U_{BX} = U_{OC} = U_{BVIK} R_1 / (R_1 + R_{OC})$. Отсюда коэффициент усиления неинвертирующего усилителя:

$$K_U = \frac{U_{BVIK}}{U_{BX}} = 1 + \frac{R_{OC}}{R_1}$$

С помощью несложных математических выкладок можно показать, что входное сопротивление неинвертирующего усилителя велико и равно входному сопротивлению ОУ по неинвертирующему входу, а выходное сопротивление близко к нулю.

Если сопротивление обратной связи $R_{OC} = 0$, $K_{И} = -1$, то $U_{BVIK} = U_{BX}$, и неинвертирующий усилитель превращается в повторитель напряжения, который часто используют в радиоэлектронных устройствах для гальванической развязки различных схем.

Неинвертирующий сумматор. Неинвертирующее включение операционного усилителя можно использовать для суммирования n (здесь n — число входных сигналов) входных напряжений. Простейшая схема трехвходового неинвертирующего сумматора представлена на рисунке 7. Как правило, все входные напряжения источников подключены к неинвертирующему входу ОУ через резисторы R с одинаковым сопротивлением.

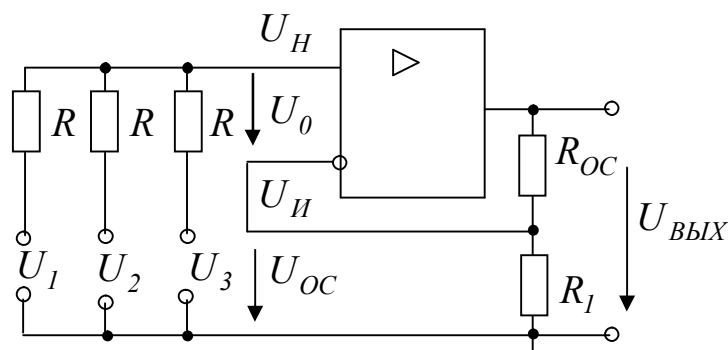


Рисунок 7 – Неинвертирующий сумматор на операционном усилителе

С помощью несложных вычислений, которые приведены в специальной литературе по ОУ, можно показать, что выходное напряжение n -входового сумматора при выборе сопротивлений $R_{OC} = R(n - 1)$ определяется по формуле:

$$U_{BВIX} = (U_1 + U_2 + \dots + U_n).$$

Таким образом, выходное напряжение неинвертирующего сумматора равно алгебраической сумме входных напряжений. Отметим, что с целью получения минимальных погрешностей при суммировании напряжений необходимо выбирать источники входных сигналов с достаточно малыми выходными сопротивлениями.