

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И
ИННОВАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

МИКРОСХЕМОТЕХНИКА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

УДК 621.314

Абдурахмонов Б.А., Умарходжаева З.Н. Микросхемотехника. Методические указания к курсовой работе. – Т.: ТашГТУ, 2023. –34 с.

Данные указания включают в себя теоретическую и расчётную части для выполнения курсовой работы, а также содержат образец для её решения. Методические указания предназначены для студентов направлений “Электроника и приборостроение (электроника в промышленности)” и “Лазерно-световые технологии и оптоэлектроника”.

*Печатается по решению научно-методического совета
Ташкентского государственного технического университета.
Протокол № 5 от 30 марта 2023 года.*

Рецензенты: доц., к.ф.-м.н. Комилов Ш.Х. (НУУз);
проф., д.т.н. Алимова Н.Б. (ТашГТУ)

Введение

Кроме лекционных, лабораторных занятий важную роль в подготовке технических специалистов играют также и схематический расчёт схем различных электронных устройств. В настоящее время в технике повсеместно используются разнообразные усилительные устройства. Характерной особенностью современных электронных усилителей является исключительное многообразие схем, по которым они могут быть построены. Усилители различаются по характеру усиливаемых сигналов: усилители гармонических сигналов, импульсные усилители и т. д. Также они различаются по назначению, числу каскадов, роду электропитания и другим показателям.

Однако одним из наиболее существенных классификационных признаков является диапазон частот электрических сигналов, в пределах которого данный усилитель может удовлетворительно работать. По этому признаку различают следующие основные типы усилителей:

➤ Усилители низкой частоты, предназначенные для усиления непрерывных периодических сигналов, частотный диапазон которых лежит в пределах от десятков герц до десятков килогерц. Характерной особенностью УНЧ является то, что отношение верхней усиливаемой частоты к нижней велико и обычно составляет не менее нескольких десятков.

➤ Усилители постоянного тока – усиливающие электрические сигналы в диапазоне частот от нуля до высшей рабочей частоты. Они позволяют усиливать как переменные составляющие сигнала, так и его постоянную составляющую.

➤ Избирательные усилители – усиливающие сигналы в очень узкой полосе частот. Для них характерна небольшая величина отношения верхней частоты к нижней. Эти усилители могут использоваться как на низких, так и на высоких частотах и выступают в качестве своеобразных частотных фильтров, позволяющих выделить заданный диапазон частот электрических колебаний. Узкая полоса частотного диапазона во многих случаях обеспечивается применением в качестве нагрузки таких усилителей колебательного контура. В связи с этим избирательные усилители часто называют резонансными.

➤ Широкополосные усилители, усиливающие очень широкую полосу частот. Эти усилители предназначены для усиления сигналов

в устройствах импульсной связи, радиолокации и телевидения. Часто широкополосные усилители называют видеоусилителями. Помимо своего основного назначения, эти усилители используются в устройствах автоматики и вычислительной техники.

В данном курсовом проекте содержится описание усилителя низких частот на основе операционных усилителей, основные параметры, применение, а также основные технические решения. Также разработана электрическая принципиальная схема усилителя низкой частоты, имеющий в своем составе два операционных усилителя, и произведен расчет схемы. А также решается задача проектирования усилителя низкой частоты. Используется типовая схема двухкаскадного усилителя частоты, с усилением мощности на выходе второго каскада. В целях повышения входного сопротивления спроектирован предварительный каскад, выполненный на операционном усилителе (ОУ).

В задачу входит расчет основных параметров усилителя низкой частоты, а также выбор электронных компонентов схемы, входящих в состав.

Выбор активных и пассивных элементов является важным этапом в обеспечении высокой надежности и устойчивости работы схемы. Оптимизация выбора составных компонентов состоит в том, что при проектировании следует использовать такие элементы, чтобы их параметры обеспечивали максимальную эффективность устройства по заданным характеристикам.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1. Операционный усилитель

Операционный усилитель—универсальный функциональный элемент, широко используемый в современных схемах формирования и преобразования информационных сигналов различного назначения, как в аналоговой, так и в цифровой технике.

Наименование «операционный усилитель» обусловлено тем, что, прежде всего такие усилители получили применение для выполнения операций суммирования сигналов, их дифференцирования, интегрирования, инвертирования и т. д. Операционные усилители были разработаны как усовершенствованные балансные схемы усиления. Усложнение схем операционных усилителей (современные операционные усилители включают десятки, а иногда и сотни элементарных ячеек: регистров, диодов, транзисторов, конденсаторов), использование генераторов стабильных токов и ряд других усовершенствований существенно расширили сферу возможных применений операционных усилителей. Операционный усилитель (ОУ) предназначен для выполнения математических операций в аналоговых вычислительных машинах. Первый ламповый ОУ K2W был разработан в 1942 году Л. Джули (США). Первые ОУ на транзисторах появились в продаже в 1959 году. Р. Малтер (США) разработал ОУ P2, включавший семь германиевых транзисторов и варикапный мостик. Требования к увеличению надежности, улучшению характеристик, снижению стоимости и размеров способствовали развитию интегральных микросхем, которые были разработаны в лаборатории фирмы TexasInstruments (США) в 1958 г. Первый интегральный ОУ $\mu A702$, имевший рыночный успех, был разработан Р. Уидларом (США) в 1963 году. В настоящее время номенклатура ОУ насчитывает сотни наименований. Эти усилители выпускаются в малогабаритных корпусах и очень дешевы, что способствует их массовому распространению. ОУ представляют собой усилители медленно изменяющихся сигналов с низкими значениями напряжения смещения нуля и входных токов и с высоким коэффициентом усиления. По размерам и цене они практически не отличаются от отдельного транзистора. В то же время, преобразование сигнала схемой на ОУ почти исключительно определяется свойствами цепей обратных связей усилителя и отличается высокой стабильностью и воспроизводимостью. Кроме

того, благодаря практически идеальным характеристикам ОУ реализация различных электронных схем на их основе оказывается значительно проще, чем на дискретных элементах. ОУ почти полностью вытеснили отдельные транзисторы в качестве элементов схем ("кирпичиков") во многих областях аналоговой схемотехники.

Обозначение ОУ на принципиальных схемах. Любой ОУ имеет не менее пяти выводов: два входных (инвертирующий и неинвертирующий), два вывода для подключения питания и один выходной вывод. Варианты обозначения операционных усилителей на принципиальных схемах представлены на рис. 1.1 (1 – инвертирующий вход, 2 – неинвертирующий вход, 3 – выход, 4 и 5 – выводы для подключения источника питания).

Многие ОУ дополнительно имеют несколько выводов, не несущих функциональной нагрузки (вспомогательные), к которым подключаются цепи коррекции АЧХ (метки FC), цепи для подключения элементов балансировки по постоянному току (метки NC), а также вывод металлического корпуса (\perp) для соединения с общим проводом устройства, в которое входит ОУ.

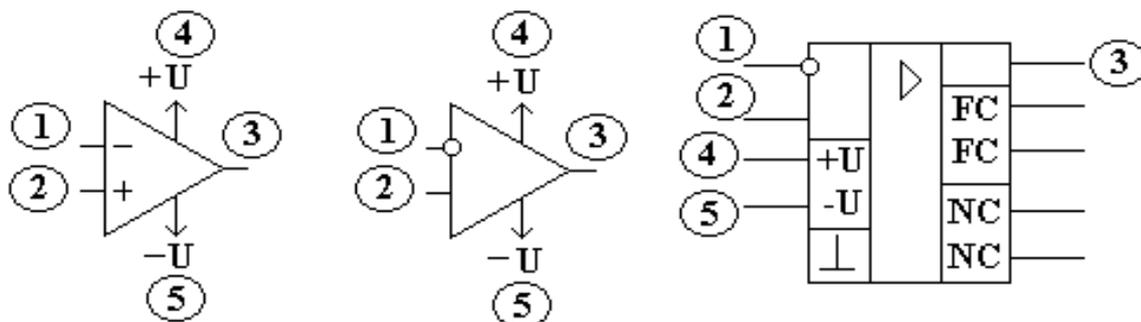


Рис. 1.1. Обозначение ОУ на принципиальных электрических схемах

1.2. Типы операционных усилителей.

В настоящее время в мире изготавливаются сотни наименований интегральных ОУ. Все это многообразие можно разделить на группы, объединенные общей технологией и схемотехникой, точностными, динамическими или эксплуатационными характеристиками, причем эти группы могут пересекаться, т.е. включать общие элементы.

С точки зрения внутренней схемотехники операционные усилители можно разделить на биполярные, биполярно-полевые и КМОП (на комплементарных полевых транзисторах с изолированным затвором). В биполярно-полевых ОУ полевые транзисторы с управляющим p-n переходом или МОП-транзисторы обычно

используются в качестве входных в дифференциальном входном каскаде. За счет этого достигается высокое входное сопротивление и малые входные токи.

Большая часть номенклатуры ОУ относится к усилителям общего назначения. Это дешевые усилители среднего быстродействия, невысокой точности и малой выходной мощности. Обычные параметры: $KU = 20\ 000 - 200\ 000$; $U_{см} = 0,1 - 20\ мВ$; $f_t = 0,1 - 10\ МГц$. Типичные примеры: 140УД6, 140УД8, 153УД6, LF411.

Быстродействующие усилители при средних точностных параметрах имеют высокие динамические характеристики ($f_t = 20 - 1000\ МГц$, $r = 10 - 1000\ В/мкс$). Быстродействие ОУ ограничивает два обстоятельства. Во-первых, в состав входного дифференциального усилителя входят р-п-р-транзисторы, относительно низкочастотные из-за меньшей подвижности дырок по сравнению со свободными электронами. Во-вторых, скорость нарастания ограничена скоростью заряда корректирующего конденсатора S_k . Влияние первого фактора устраняют, используя во входном каскаде более быстродействующие р-канальные полевые транзисторы. Увеличить скорость заряда S_k можно либо увеличив ток дифференциального каскада, либо уменьшив емкость S_k . В первом случае увеличивается ток потребления ОУ, а во втором ухудшается устойчивость. Повысить устойчивость можно, вводя дополнительные фазопережающие звенья в схему усилителя или вне его. Как следствие, быстродействующие ОУ склонны к неустойчивости. Типичные примеры: 140УД10, 574УД3, 154УД4, ОРА634.

Прецизионные усилители имеют высокий дифференциальный коэффициент усиления по напряжению, малое напряжение смещения нуля и малый входной ток обычно при низком или среднем быстродействии. Увеличение KU возможно путем усовершенствования каскадов усиления по напряжению или применением трехкаскадной схемы (например, 551УД1), что усложняет частотную коррекцию. Радикально уменьшить смещение нуля позволяет применение модуляции-демодуляции (МДМ), либо периодическая компенсация дрейфа (прерывание). Типичные примеры: 140УД26, МАХ400М, ОРА227 (без прерывания), ICL7652, 140УД24, МАХ430 (с прерыванием).

Микромощные усилители используются в приборах, получающих питание от гальванических или аккумуляторных батарей. Эти усилители потребляют очень малый ток от источников питания

(например, ОУ МАХ406 потребляет ток не более 1,2 мкА). Все другие параметры (особенно быстродействие) у них обычно невысокие. Для того, чтобы дать возможность проектировщику найти компромисс между малым потреблением и низким быстродействием некоторые модели микромощных ОУ выполняются программируемыми. Программируемый ОУ имеет специальный вывод, который через внешний резистор соединяется с общей точкой или источником питания определенной полярности. Сопротивление резистора задает ток системы токовых зеркал усилителя, которые выполняют функции генераторов стабильного тока и динамической нагрузки каскадов усилителя. Уменьшение этого резистора приводит к увеличению быстродействия ОУ и увеличению потребляемого тока. Увеличение - к обратному результату. Типичные примеры: 140УД12, 1407УД2, ОР22. Обычная величина тока потребления для микромощных и программируемых ОУ - десятки микроампер. Микромощные ОУ, как правило, допускают питание от весьма низких напряжений. Например, ОУ типа МАХ480 допускает работу от источников с напряжением от +/-0,8 до +/-18 В при токе потребления 15 мкА. Если источник сигнала - однополярный (например, фотодиод), целесообразно использовать операционный усилитель с однополярным питанием. Это позволит питать усилитель от одной батареи или даже элемента, например, от литиевого элемента напряжением 3 вольта. Основное требование, предъявляемое к ОУ с однополярным питанием, - диапазон входного синфазного сигнала должен простираться ниже отрицательного напряжения питания (обычно привязанного к потенциалу земли), а размах выходного напряжения должен быть ограничен снизу практически напряжением питания (потенциалом земли). Существуют усилители, диапазоны входных и выходных напряжений которых почти достигают и верхней и нижней границы питания (так называемые, rail-to-rail вход и выход), причем входные напряжения могут даже заходить за эти границы. Типичные примеры: МАХ495, потребляющий от однополярного источника ток 150 мкА, LMV321, потребляющий ток 145 мкА, от источника 1,8 В.

Многие фирмы выпускают многоканальные усилители. Это микросхемы, имеющие на одном кристалле два, три или четыре однотипных ОУ. Например, ИМС типа 140УД20 имеет в своем составе два ОУ 140УД7. Микросхемы МАХ406/407/409 и

ОРА227/2227/4227 включают, соответственно, один, два и четыре однотипных усилителя.

Мощные и высоковольтные операционные усилители. Большинство типов ОУ рассчитаны на напряжение питания ± 15 В. Некоторые допускают питание от источников вплоть до ± 22 В. Этого недостаточно для управления, например, пьезоэлектрическими преобразователями, для некоторых физических и биологических исследований. Поэтому промышленность производит высоковольтные ОУ, допускающие более высокие питающее и выходное напряжения. К высоковольтным относят операционные усилители, имеющие разность положительного и отрицательного питающих напряжений свыше 50 вольт. Проблема повышения напряжений в интегральных полупроводниковых (монокристаллических) ОУ связана с трудностью создания интегральных высоковольтных транзисторов и прочной изоляции между элементами в кристалле. Поэтому большинство ОУ с напряжением питания свыше 100 В изготавливаются в виде гибридных ИМС. В то же время, фирма Arre Microtechnology (США) производит полупроводниковые интегральные ОУ RA90, RA92 и RA94, с номинальным напряжением питания ± 200 В, выходным напряжением ± 170 В и выходным током до 14 А.

Операционные усилители общего применения обычно допускают выходной ток до 5 мА. Для управления мощной нагрузкой применяются мощные ОУ. К мощным обычно относят усилители, допускающие выходной ток свыше 500 мА. Примером полупроводникового интегрального мощного ОУ может служить LM12 с выходным током до 10 А и рассеиваемой мощностью до 90 Вт. Фирма Arre Microtechnology выпускает сверхмощный гибридный ОУ RA30, допускающий выходной ток до 100 А и способный отдать в нагрузку мощность до 2000 Вт при жидкостном охлаждении. Дальнейшее увеличение выходной мощности усилителей возможно путем использования режима класса D. Рекордными являются характеристики гибридного усилителя фирмы Arre SA08 с широтно-импульсной модуляцией на частоте 22 кГц: 10 кВт при напряжении до 500 В и токе до 20 А. При этом КПД усилителя достигает 98%.

1.3. Основные параметры и характеристики ОУ

Основным параметром ОУ коэффициент усиления по напряжению без обратной связи $K_{и ОУ}$, называемый также полным коэффициентом

усиления по напряжению. В области НЧ и СЧ он иногда обозначается $K_{u\text{ ОУ}0}$ и может достигать нескольких десятков и сотен тысяч .

Важными параметрами ОУ являются его точностные параметры:

- напряжение смещения нуля $U_{см}$;
- температурная чувствительность напряжения смещения нуля $dU_{см}/dT$;
- ток смещения $\Delta I_{вх}$;
- средний входной ток $I_{вх\text{ ср}}$.

Входные и выходные цепи ОУ представляются входным $R_{вх\text{ ОУ}}$ и выходным $R_{вых\text{ ОУ}}$ сопротивлениями, приводимыми для ОУ без цепей ООС. Для выходной цепи даются также такие параметры, как максимальный выходной ток $I_{вых\text{ ОУ}}$ и минимальное сопротивление нагрузки $R_{н\text{ min}}$, а иногда и максимальная емкость нагрузки. Входная цепь ОУ может включать емкость между входами и общей шиной. Упрощенные эквивалентные схемы входной и выходной цепи ОУ представлены на рисунке 1.2.

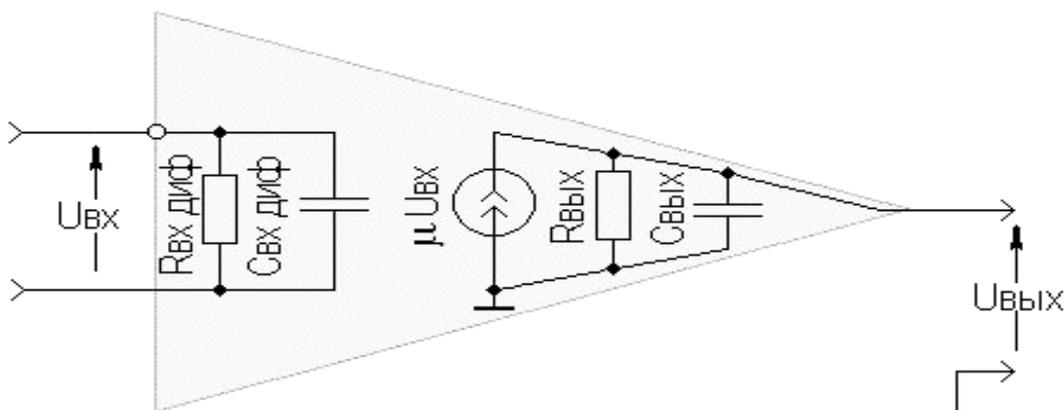


Рис. 1.2. Простая линейная макромодель ОУ

Среди параметров ОУ следует отметить КОСС и коэффициент ослабления влияния нестабильности источника питания $КОВНП=20\lg\cdot(\Delta E/\Delta U_{вх})$. Оба этих параметра в современных ОУ имеют свои значения в пределах (60...120)дБ.

К энергетическим параметрам ОУ относятся напряжение источников питания $\pm E$, ток потребления (покоя) $I_{п}$ и потребляемая мощность. Как правило, $I_{п}$ составляет десятые доли — десятки миллиампер, а потребляемая мощность, однозначно определяемая $I_{п}$, единицы — десятки милливатт.

К максимально допустимым параметрам ОУ относятся:

- максимально возможное (неискаженное) выходное напряжение сигнала $U_{вых\text{ max}}$ (обычно чуть меньше E);

- максимально допустимая мощность рассеивания;
- рабочий диапазон температур;
- максимальное напряжение питания;
- максимальное входное дифференциальное напряжение и др.

К частотным параметрам относится абсолютная граничная частота или частота единичного усиления f_T (F_1), т.е. частота, на которой $K_{uOY}=1$. Иногда используется понятие скорости нарастания и времени установления выходного напряжения, определяемые по реакции ОУ на воздействие скачка напряжения на его входе. Для некоторых ОУ приводятся также дополнительные параметры, отражающие специфическую область их применения.

Амплитудные (передаточные) характеристики ОУ представлены на рис.1.3. в виде двух зависимостей $U_{вых}=f(U_{вх})$ для инвертирующего и неинвертирующего входов.

Когда на обоих входах ОУ $U_{вх}=0$, то на выходе будет присутствовать напряжение ошибки $U_{ош}$, определяемое точностными параметрами ОУ (на рисунке 1.3. $U_{ош}$ не показано ввиду его малости).

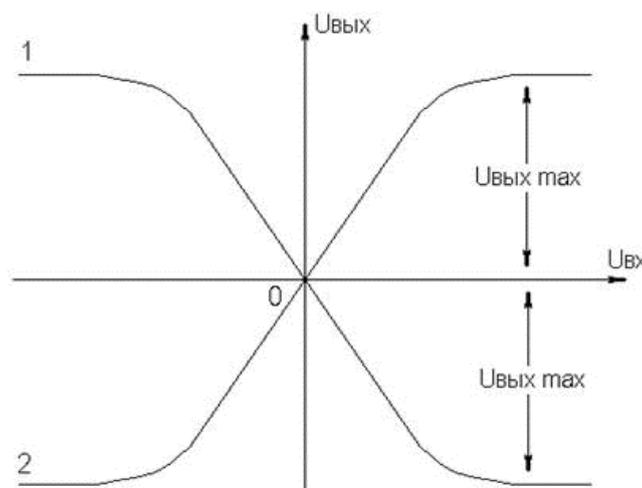


Рис. 1.3. Амплитудная характеристика ОУ

Частотные свойства ОУ представляются его АЧХ, выполненной в логарифмическом масштабе, $K_{uOY}=\varphi(\lg f)$. Такая АЧХ называется логарифмической (ЛАЧХ), ее типовой вид приведен на рисунке 1.4. (для ОУ К140УД10). Частотную зависимость K_{uOY} можно представить в виде: $K_{uOY} = K_{uOY0} / \sqrt{1+(\omega\tau_B)^2}$. Здесь τ_B постоянная времени ОУ, которая при $M_B=3$ дБ определяет частоту сопряжения (среза) ОУ (см. рис. 1.4.); $\omega_B = 1/\tau_B = 2\pi f_B$. Заменив в выражении для K_{uOY} τ_B на $1/\omega_B$, получим запись ЛАЧХ: $K_{uOY} = 20\lg K_{uOY0} - 20\lg \sqrt{1+(\omega/\omega_B)^2}$.

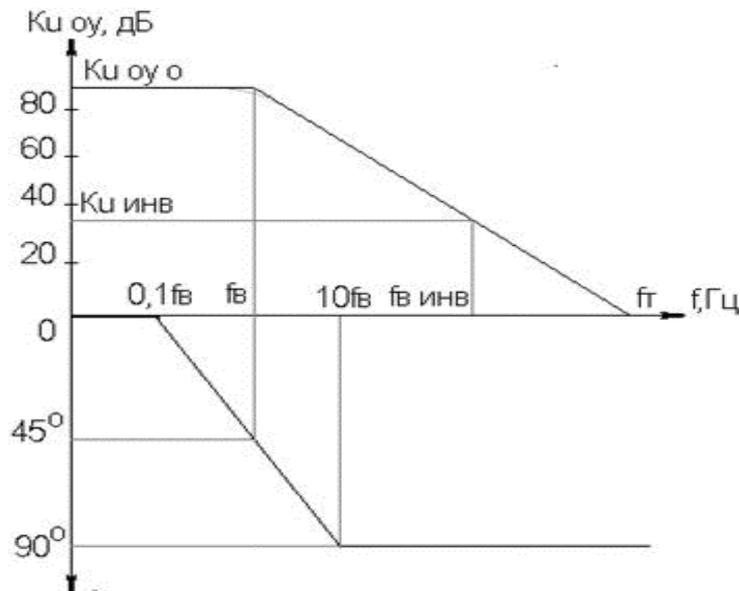


Рис.1.4. ЛАЧХ и ЛФЧХ ОУ К140УД10

На НЧ и СЧ $K_{uOY} = 20 \lg K_{uOY0}$, т.е. ЛАЧХ представляет собой прямую, параллельную оси частот. С некоторым приближением можем считать, что в области ВЧ спад K_{uOY} происходит со скоростью 20дБ на декаду (6дБ на октаву). Тогда при $\omega \gg \omega_B$ можно упростить выражение для ЛАЧХ: $K_{uOY} = 20 \lg K_{uOY0} - 20 \lg(\omega / \omega_B)$. Таким образом, ЛАЧХ в области ВЧ представляется прямой линией с наклоном к оси частот 20дБ/дек. Точка пересечения рассмотренных прямых, представляющих ЛАЧХ, соответствует частоте сопряжения $\omega_e (f_e)$. Разница между реальной ЛАЧХ и идеальной на частоте f_e составляет порядка 3дБ (см. рисунок 1.4.), однако для удобства анализа с этим мирятся, и такие графики принято называть **диаграммами Бодэ**.

Следует заметить, что скорость спада ЛАЧХ 20дБ/дек характерна для скорректированных ОУ с внешней или внутренней коррекцией, основные принципы которой будут рассмотрены ниже. Для скорректированного ОУ можно рассчитать K_{uOY} на любой частоте f как $K_{uOY} = f_T / f$, а $K_{uOY0} = f_T / f_B$.

На рисунке 1.4. представлена также логарифмическая ФЧХ (ЛФЧХ), представляющая собой зависимость фазового сдвига j выходного сигнала относительно входного от частоты. Реальная ЛФЧХ отличается от представленной не более чем на 6° . Отметим, что и для реального ОУ $j=45^\circ$ на частоте f_e , а на частоте f_T — 90° . Таким образом, собственный фазовый сдвиг рабочего сигнала в скорректированном ОУ в области ВЧ может достигнуть 90° . Рассмотренные выше параметры и характеристики ОУ описывают его при отсутствии цепей ООС. Однако, как отмечалось, ОУ

практически всегда используется с цепями ООС, которые существенно влияют на все его показатели.

1.4. Отрицательная обратная связь в усилителе

Обратная связь – процесс передачи сигнала с выхода усилителя обратно на его вход, а также цепь, осуществляющая эту передачу.

Обратная связь (ОС) называется **отрицательной (ООС)**, если выходной сигнал усилителя вычитается из входного. Для простоты будем рассматривать установившийся режим работы всей системы, причем усилитель работает в активном режиме (т.е. нормально усиливает сигнал без перегрузок). Структурная схема усилителя, охваченного ООС, показана на рис.1.5.

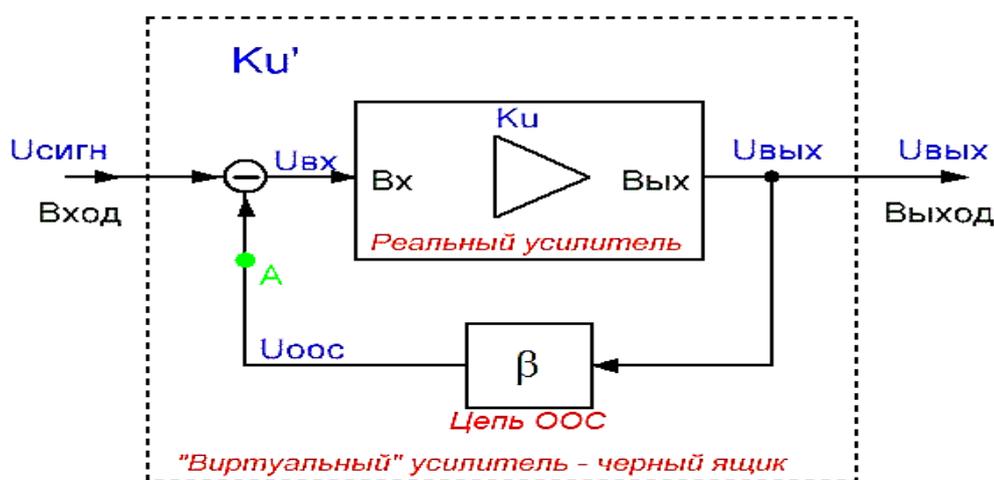


Рис.1.5. Структурная схема усилителя, охваченного ООС.

Здесь некоторый «виртуальный» усилитель с коэффициентом усиления по напряжению K_u' получается из исходного «реального» усилителя, имеющего коэффициент усиления K_u , и охваченного цепью ООС. На самом деле термин «виртуальный» не совсем корректен, но будем пользоваться им, потому что с точки зрения внешних устройств, подключенных к системе в целом, она представляет собой усилитель с параметрами, отличающимися от параметров реального исходного усилителя без ООС.

С выхода реального усилителя напряжение передается на его вход через цепь ООС с коэффициентом передачи β :

$$\beta = \frac{U_{\text{оос}}}{U_{\text{вых}}} \quad (1.1)$$

Обычно цепь ООС является пассивной, и $\beta \leq 1$. Если цепь ООС усиливает, то это принципиально ничего не меняет, и все формулы в

этом случае выводятся аналогично. Если $\beta = 0$, то это означает, что $U_{оос}=0$ и обратная связь отсутствует. Обратите внимание, что совершенно безразлично, какую именно схему имеет цепь ООС. Главное – это насколько (во сколько раз) она ослабляет напряжение.

В данной системе присутствует два разных входных напряжения, и чтобы не путаться, зададим различные наименования:

1. Напряжение, подаваемое на вход «виртуального» усилителя от источника сигнала. Его будем обозначать $U_{сигн}$.

2. Напряжение, приходящее на вход реального усилителя – $U_{вх}$.

Итак, выходное напряжение усилителя $U_{вых}$ превращается цепью ООС в напряжение обратной связи $U_{оос}$ и вычитается из входного напряжения. Результат – входное напряжение реального усилителя:

$$U_{вх} = U_{сигн} - U_{оос} = U_{сигн} - \beta \cdot U_{вых} . \quad (1.2)$$

Важный момент: $U_{оос}$ всегда меньше $U_{сигн}$, поэтому $U_{вх}$ всегда больше нуля. Реальный усилитель усиливает свой входной сигнал в K_u раз:

$$U_{вых} = U_{вх} \cdot K_u = (U_{сигн} - \beta \cdot U_{вых}) \cdot K_u . \quad (1.3)$$

Преобразуем формулу (1.3): $U_{вых} = U_{сигн} \cdot K_u - \beta K_u \cdot U_{вых} \Rightarrow U_{вых} + \beta K_u \cdot U_{вых} = U_{сигн} \cdot K_u, U_{вых} \cdot (1 + \beta \cdot K_u) = U_{сигн} \cdot K_u \Rightarrow \frac{U_{вых}}{U_{сигн}} = \frac{K_u}{1 + \beta \cdot K_u} .$

Но $U_{вых}/U_{сигн}$ – это коэффициент усиления K'_u «виртуального» усилителя, как он проявляется для внешнего мира, поэтому:

$$\frac{U_{вых}}{U_{сигн}} = K'_u, K'_u = \frac{K_u}{1 + \beta \cdot K_u} . \quad (1.4)$$

Таким образом, мы получили формулу для вычисления коэффициента усиления для усилителя, охваченного ООС. Теперь можно объяснить, почему $U_{оос} < U_{сигн}$. Допустим, что $U_{оос} = U_{сигн}$. Тогда напряжение, приходящее на вход реального усилителя равно нулю: $U_{вх} = U_{сигн} - U_{оос} = 0$. А раз так, то и выходное напряжение усилителя равно нулю: $U_{вых} = U_{вх} \cdot K_u$. Но ведь $U_{оос}$ получается из выходного напряжения: $U_{оос} = U_{вых} \cdot \beta$, значит оно также будет равно нулю! Пришли к противоречию: предположив, что $U_{оос} = U_{сигн}$, получили, что $U_{оос} = 0$. Так происходит только при отсутствии сигнала на входе всей системы, когда все напряжения равны нулю. Что будет, если $U_{оос} > U_{сигн}$, рассмотрите самостоятельно. С точки зрения математики,

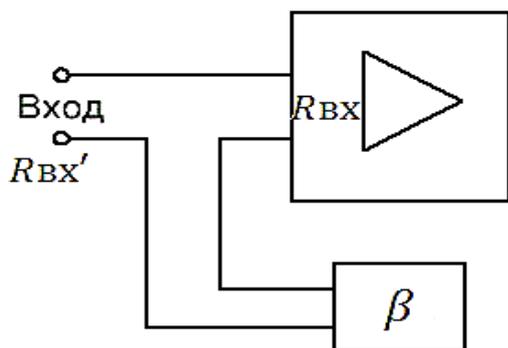
исходное утверждение доказывается элементарно: $U_{\text{сигн}} = U_{\text{вх}} + U_{\text{оос}}$, причём $U_{\text{вх}} > 0$.

Рассматривая физику процессов, следует помнить, что выходное напряжение усилителя появляется не само по себе, а является следствием его усиления и образуется из его входного напряжения: $U_{\text{вых}} = K_u \cdot U_{\text{вх}}$.

Итак, при охвате усилителя ООС, его коэффициент усиления уменьшается в $(1 + \beta \cdot K_u)$ раз. Но введение ООС изменяет и другие параметры усилителя.

1. Отрицательная обратная связь изменяет в $(1 + \beta \cdot K_u)$ раз входное и выходное сопротивления усилителя. При этом они могут как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от способа соединения цепи ООС со входом и выходом усилителя – последовательно или параллельно. Способы подключения цепи ООС ко входу усилителя показаны на рис. 1.6, а к выходу усилителя – на рис. 1.7.

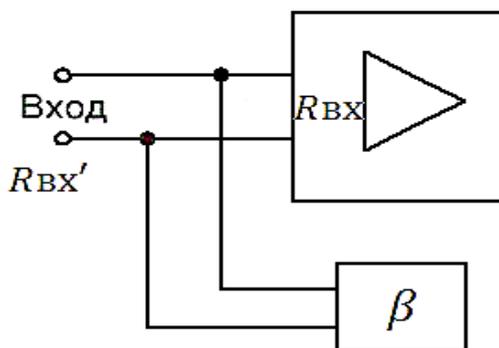
Последовательная по входу ООС



$$R_{\text{вх}}' = R_{\text{вх}} \cdot (1 + \beta \cdot K_u)$$

а)

Параллельная по входу ООС



$$R_{\text{вх}}' = \frac{R_{\text{вх}}}{1 + \beta \cdot K_u}$$

б)

Рис.1.6. Подключения цепи ООС ко входу усилителя: а) последовательно; б) параллельно.

Эти формулы несложно вывести, но мы это делать не будем, а будем пользоваться готовыми. И объяснить их с точки зрения схемотехники также несложно. Например, на рис.1.6., а, напряжение на входе усилителя после замыкания цепи ООС возросло в $(1 + \beta \cdot K_u)$ раз: $U_{\text{сигн}} = U_{\text{вх}}(1 + \beta \cdot K_u)$, а входной ток остался прежним. Значит, по закону Ома ($R = U/I$) и сопротивление возросло в $(1 + \beta \cdot K_u)$ раз. При последовательной по выходу ООС через ее цепь проходит выходной

ток усилителя (ток нагрузки), поэтому ее часто называют обратной связью по току. Несколько примеров разных включений цепи ООС показано на рис.1.8. Цепь ООС является четырехполюсником, который обычно замыкается через «землю» цепи, явным образом это показано на рис. 1.8.,б.

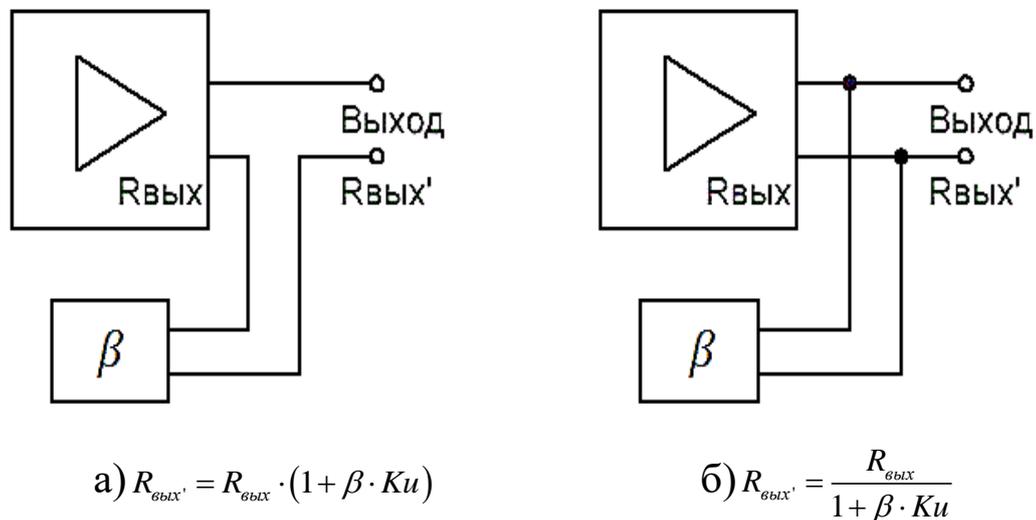


Рис.1.7. Подключения цепи ООС к выходу усилителя: а)последовательно; б)параллельно.

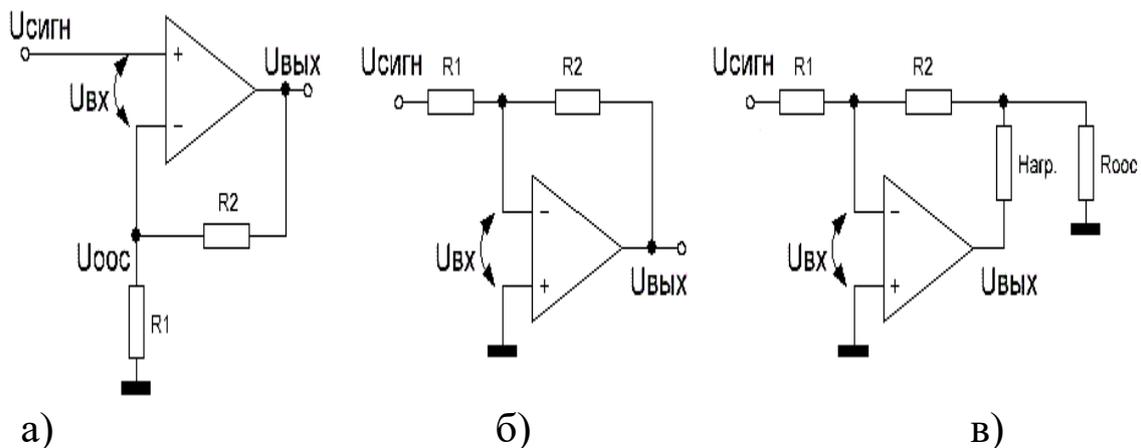


Рис.1.8.Примеры разных включений цепи ООС: а) последовательная по входу и параллельная по выходу ООС; б) параллельная по входу и выходу ООС; в) параллельная по входу и последовательная по выходу ООС

2. Отрицательная обратная связь расширяет частотный диапазон усилителя. Нижняя f_n и верхняя f_v граничные частоты увеличиваются примерно в $(1+\beta \cdot K_u)$, если усилитель имеет спад АЧХ 6 дБ/октаву. На самом деле, при охвате усилителя ООС могут происходить самые разные процессы, вплоть до превращения усилителя в генератор, но если все работает, то частотный диапазон обязательно расширяется. Это иллюстрируют АЧХ исходного усилителя (1) и усилителя, охваченного ООС (2) на рис. 1.9. Там же показаны границы

частотного диапазона без ООС и с ней. Следует отметить, что граничной частотой считается такая частота, где коэффициент усиления уменьшается в корень из двух (примерно 1,41) раз.

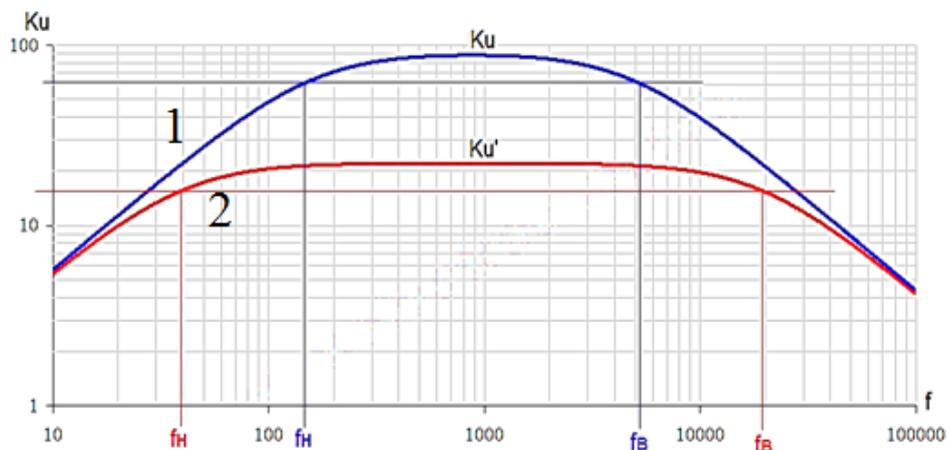


Рис.1.9. АЧХ исходного усилителя (1) и усилителя, охваченного ООС (2)

3. Введение ООС уменьшает нелинейные искажения усилителя (коэффициент гармоник) примерно в $(1 + \beta \cdot K_u)$ раз. Это происходит от того, что ООС линеаризует систему и уменьшает ее ошибки. Изменяется и амплитудная характеристика усилителя (рис.1.10.), на ней плавный переход к области насыщения превращается в довольно острый излом – ООС линеаризует этот участок и «пытается» вытянуть пропорциональное усиление даже там, где оно уже начинает уменьшаться.

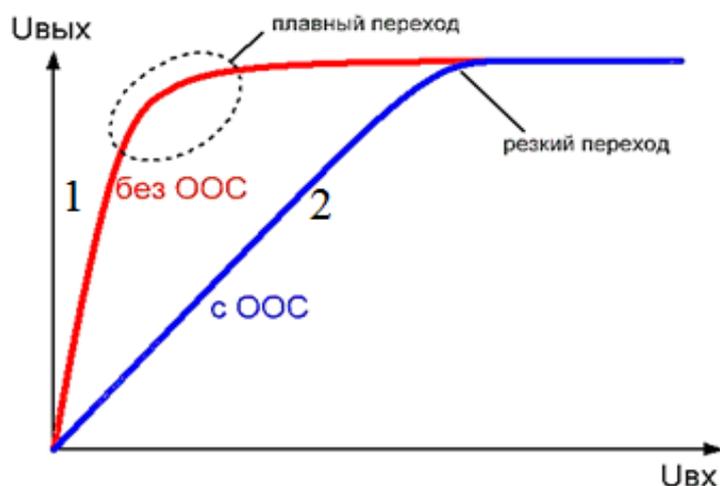


Рис.1.10. Амплитудная характеристика исходного усилителя (1) и усилителя, охваченного ООС (2)

На самом деле $(1 + \beta \cdot K_u)$ – это очень приблизительная оценка, поскольку для анализа нелинейных цепей используется уже совсем другая математика и там все очень сильно зависит от нелинейности

усилителя. Но, тем не менее, искажения усилителя снижаются тем сильнее, чем глубже ООС, и в «простых» случаях формула $1 + \beta \cdot K_u$ ($1 + \beta \cdot K_u$) работает достаточно хорошо.

Итак, мы видим, что охват усилителя отрицательной обратной связью изменяет ряд его основных параметров в $1 + \beta \cdot K_u$ раз. Проанализируем это выражение сначала чисто математически, не вникая пока в его физический смысл. Очевидно, что тут возможны три варианта:

а) $\beta \cdot K_u \ll 1$ и это слагаемое практически не влияет на результат. Это происходит при очень малой глубине ООС.

б) $\beta \cdot K_u \approx 1$. В этом случае можно считать, что глубина ООС становится достаточно большой, чтобы начать оказывать влияние на параметры усилителя.

г) $\beta \cdot K_u \gg 1$. Тут обратная связь очень глубока. Интересно, что для очень глубокой ООС формула (4) превращается вот во что:

$$K_u' = \frac{K_u}{1 + \beta \cdot K_u} \approx \frac{K_u}{\beta \cdot K_u} = \frac{1}{\beta}. \quad (1.5)$$

То есть, свойства усилителя (коэффициент усиления и АЧХ) определяются исключительно параметрами цепи ООС. При значении $\beta \cdot K_u = 100$, погрешность применения вместо формулы (4) упрощенной формулы (5) составляет 1%, такой погрешностью в большинстве случаев можно пренебречь. А в реальных схемах на операционных усилителях величина $\beta \cdot K_u$ может достигать десятков тысяч, делая погрешность «упрощения формулы» практически незначимой.

Обратите внимание, что в формуле присутствует величина $\beta \cdot K_u$, как произведение. При этом одинаковое значение этого произведения можно получить как при большой величине K_u и маленьком β , так и при большом β и небольшом K_u , так что в данном смысле эти два параметра равнозначны. Термин «глубина обратной связи» часто ассоциируется с термином «коэффициент передачи цепи ООС», который обозначает величину β , а хорошо было бы ввести некоторое понятие, отражающее именно величину $\beta \cdot K_u$, как более важную для применения. Так сейчас и поступим, только не забывайте, что у нас $\beta \leq 1$, так что понятие большое или маленькое β означает, например, такие значения: $\beta = 0,1$ или $\beta = 0,0001$.

Теперь давайте оценим степень влияния отрицательной обратной связи, исходя из физического смысла и электроники. Обратимся к рис. 1.8. Внутри усилителя присутствует два напряжения: $U_{вх}$ и $U_{оос}$.

Очевидно, что степень влияния ООС на усилитель зависит от соотношения этих напряжений. Если $U_{оос} \ll U_{вх}$, то сигнал обратной связи незначителен на фоне входного сигнала усилителя, и ООС влияет слабо. И наоборот, если $U_{оос} \gg U_{вх}$, то главную роль во входном сигнале «реального» усилителя играет именно ООС (т.к. $U_{сигн} = U_{оос} + U_{вх}$ и значит входной сигнал «виртуального» усилителя практически равен $U_{оос}$). С другой стороны, $U_{оос}$ получается из напряжения $U_{вх}$, после усиления его усилителем и ослабления цепью ООС. Как оно получается? Мысленно разомкнем петлю обратной связи в точке А (разрывать цепь электрически можно не всегда – иногда от этого изменяется величина β), рис. 1.11. Со стороны точки приложения сигнала ООС (это точка А), входной сигнал проходит два элемента – усилитель и цепь ООС. Общий коэффициент передачи последовательно соединенных устройств равен произведению их коэффициентов передачи: $K_u \cdot \beta$. Эта величина является коэффициентом усиления сигнала в петле обратной связи и называется **петлевым усилением**:

$$A = \beta \cdot K_u . \quad (1.6)$$

С другой стороны:

$$A = \frac{U_{оос}}{U_{вх}} = \beta \cdot K_u . \quad (1.7)$$

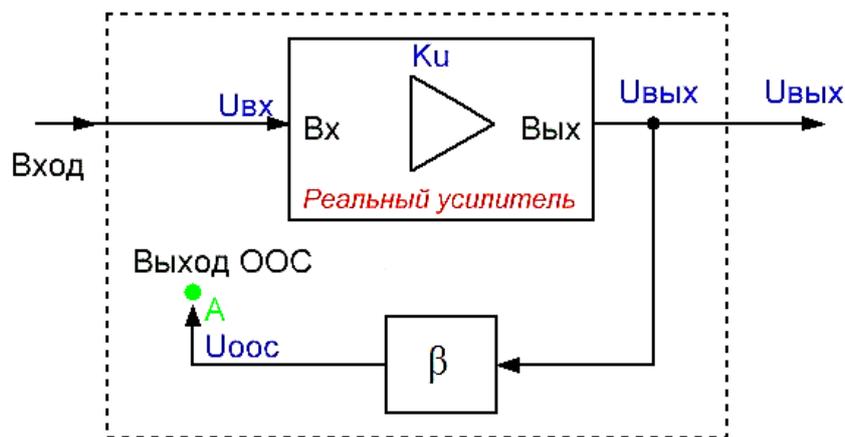


Рис.1.11. Цепь с разорванной ООС

Это то самое взаимоотношение между напряжением ООС и входным напряжением «реального» усилителя, которое показывает степень влияния обратной связи. Кроме того, оно полностью соответствует выражению, которое мы вывели, математически анализируя формулу коэффициента усиления усилителя с замкнутой

ООС. Так что глубину обратной связи характеризует именно петлевое усиление, и именно его имеют в виду, когда говорят о глубине ООС. Хотя иногда под глубиной ООС подразумевают коэффициент передачи цепи обратной связи β – в случаях, когда K_u велико, и величину $A = \beta \cdot K_u$ определяет в основном β .

Таким образом, именно петлевое усиление определяет свойства усилителя, которые он проявляет для внешнего мира. Именно на эту величину изменяются коэффициент усиления, входное и выходное сопротивления, граничные частоты и коэффициент гармоник. В некоторых случаях вычисление петлевого усиления по формуле (6) может быть затруднено, тогда можно найти его из изменения коэффициента усиления усилителя при охвате его ООС:

$$K_u' = \frac{K_u}{1 + \beta \cdot K_u} = \frac{K_u}{1 + A} \Rightarrow A = \frac{K_u}{K_u'} - 1 \approx \frac{K_u}{K_u'} \quad (1.8)$$

Последнее выражение достаточно точно, при $A \geq 100$. Проще всего определять таким способом петлевое усиление по логарифмической АЧХ усилителя (диаграмме Боде). На рис. 1.12. петлевое усиление $A = 100 - 60 = 40$ дБ, т.е. 100 раз. На самом деле $A = 100 - 1 = 99$ раз (39,9 дБ), но этим зачастую можно пренебречь, поэтому обычно в таких случаях говорят, что петлевое усиление равно 40 дБ.

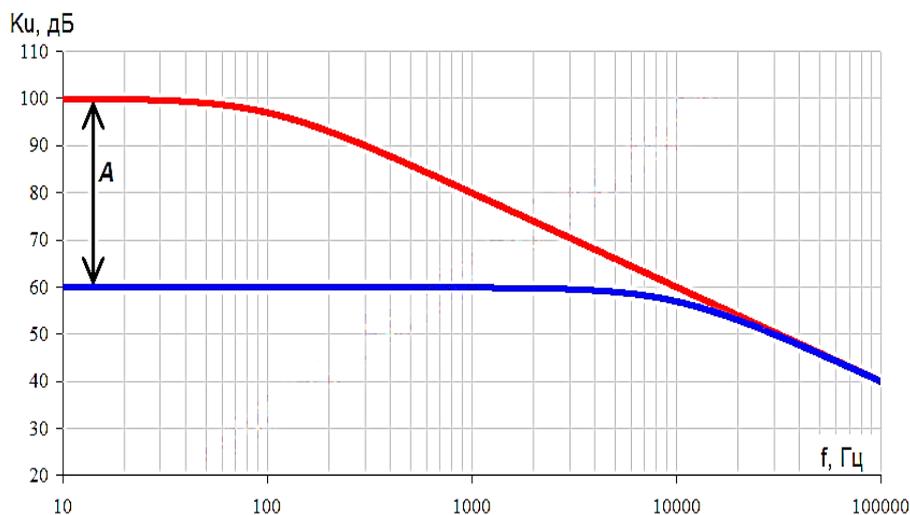


Рис.1.12. Логарифмическая АЧХ усилителя (диаграмме Боде)

Пока что ничего не говорили о свойствах и схеме самой цепи ООС. На самом деле, значение ее коэффициента передачи не обязательно являются константой. Эта цепь может быть частотнозависимой, тогда величина β меняется с частотой. Такое свойственно современным усилителям сигналов, когда для постоянного тока стремятся получить стопроцентную обратную связь

($\beta=1$), дающую максимальную стабильность режима работы усилителя, а для переменного тока глубину ООС выбирают такой, чтобы K_u для него (усиливаемого сигнала) был равен 10...1000 ($\beta \approx 0,1 \dots 0,001$). На самом деле при снижении частоты f ниже определенного значения, β начинает расти, доходя до единицы при $f = 0$, т.е. на постоянном токе. Но это все происходит ниже рабочего диапазона частот усилителя, поэтому в таких случаях глубину ООС принято оценивать двумя значениями: для постоянного тока, и для переменного тока (в рабочем диапазоне частот).

Если вернуться к формуле (5) для коэффициента усиления с замкнутой цепью ООС, то видно, что при достаточно большом значении петлевого усиления, свойства усилителя – это обратная величина от свойств цепи обратной связи. Такая ситуация лучше всего получается, если усилитель имеет очень большой коэффициент усиления без ООС – десятки-сотни тысяч и миллионы. Для работы в таких условиях созданы специальные микросхемы, называемые операционными усилителями (ОУ).

Понятие операционного усилителя появилось во второй половине XX века, когда получили широкое распространение аналоговые электронно-вычислительные машины (АВМ). Принцип их применения был основан на том, что подбиралась соответствующая электрическая цепь, описываемая теми же уравнениями, что и исследуемый неэлектрический процесс. Измеряя напряжения и токи в цепи, получали значения параметров исследуемого процесса. Для АВМ требовались блоки (функциональные узлы), выполняющие определенные математические операции: масштабирование (усиление), сложение, вычитание, интегрирование, дифференцирование и др. Довольно быстро пришли к выводу, что вместо того, чтобы разрабатывать каждый такой блок по отдельности, проще получить их все из одинаковых усилителей, охваченных цепью ООС – так и появились ОУ. В настоящее время возможности цифровых вычислительных машин настолько велики, что моделирование (и управление) проще и точнее выполнять на них, и АВМ практически исчезли, а операционные усилители остались – они оказались очень удобными для применения, ведь из них можно получить практически любое устройство, всего лишь охватив их соответствующей ООС.

Так что получить, например, усилитель с нужной АЧХ достаточно просто, достаточно охватить его ООС, имеющей АЧХ «зеркальной» к требуемой (рис. 1.13).

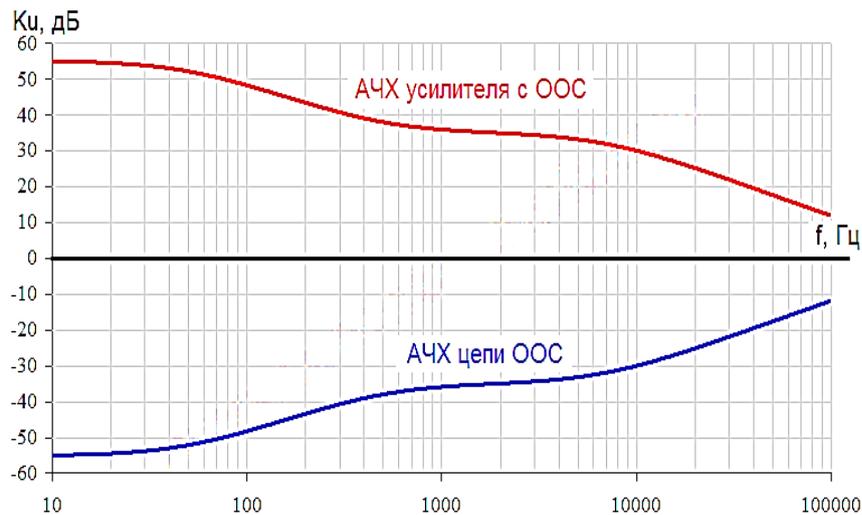


Рис.1.13. Логарифмическая АЧХ усилителя

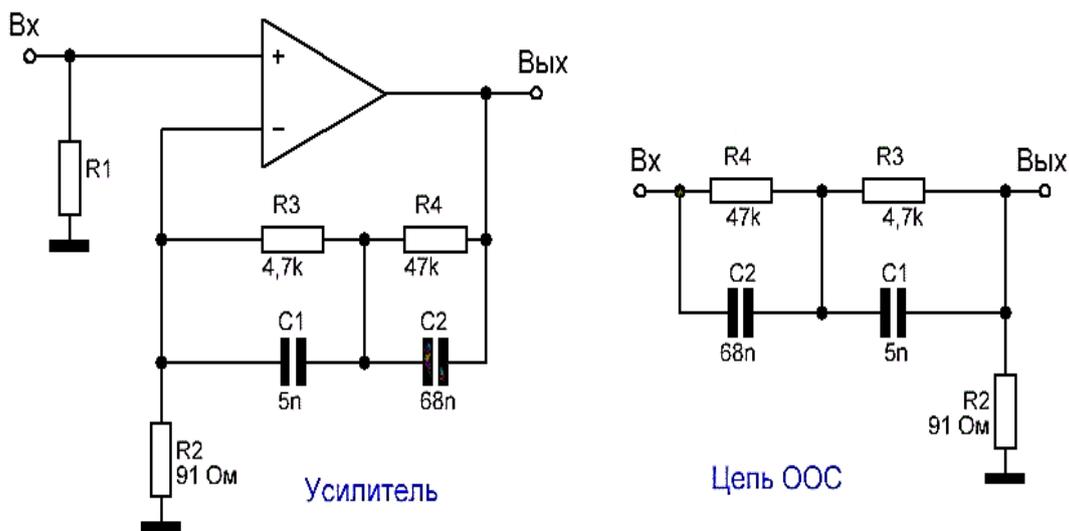


Рис.1.14. Схемы, реализующие АЧХ, зеркальные к требуемой

Схемы, реализующие данные АЧХ показаны на рис. 1.13. Однако, конструируя схемы на операционных усилителях, следует помнить, что их огромный коэффициент усиления сохраняется только на очень низких частотах, а потом начинает падать со скоростью 20 дБ/декада. У большинства ОУ широкого применения спад АЧХ начинается с частоты порядка 10 Гц. Поэтому на частотах в десятки килогерц K_u может быть довольно мал, и при попытке получить на такой частоте большое усиление, глубина обратной связи (петлевое усиление) может оказаться слишком маленьким. При этом возрастет погрешность выполняемой функции, и повышаются нелинейные

искажения. На рис. 1.15. показаны АЧХ усилителя (см. рис. 1.13 и рис. 1.14) без ООС и с ООС. На частотах 20 Гц, 1 кГц и 20 кГц глубина ООС (петлевое усиление) составляет 39 дБ, 24 дБ и 11 дБ соответственно. Вполне можно считать, что на частоте 20 кГц обратная связь имеет очень низкую глубину и практически не улучшает параметров усилителя.

В заключение хотелось бы отметить, что это только элементарная теория обратной связи. Здесь, например, не учтен тот факт, что на переменном токе и коэффициент усиления «реального» усилителя, и коэффициент передачи цепи обратной связи обычно величины комплексные (петлевое усиление также является комплексным). Поэтому формула (4) верна только для модулей, а «на все случаи жизни» ее надо записывать так:

$$\dot{K}_{u'} = \frac{\dot{K}_{вых}}{1 + \beta \cdot \dot{K}_u} \quad (1.9)$$

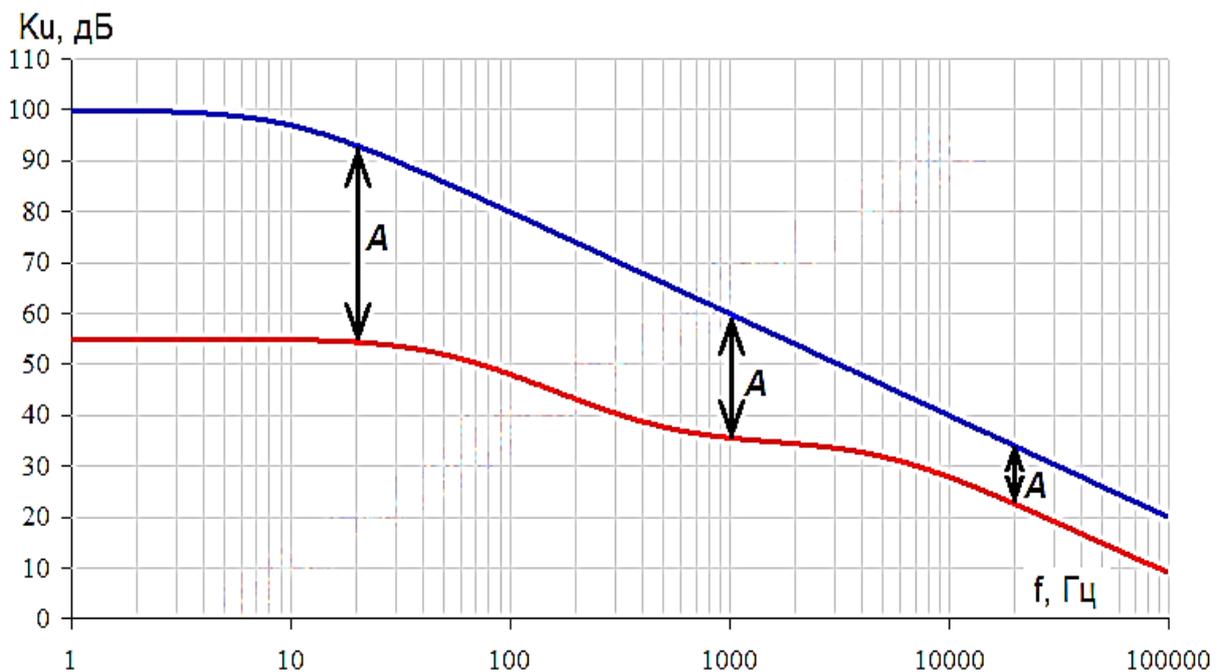


Рис.1.15. АЧХ усилителя без ООС и с ООС

При этом цепь ООС может изменять не только амплитуду сигнала, но и его фазу. Причем, если сдвиг фаз в петле ООС станет равным 180 градусам, то сигнал обратной связи будет не вычитаться из сигнала источника, а прибавляться к нему, и обратная связь из отрицательной превратится в положительную.

Глава 2. Расчетная часть

Рабочее задание.

Рассчитать усилитель низкой частоты для источника со следующими параметрами:

$$U_{\text{и}} = 0.11 \text{ В}$$

$$R_{\text{и}} = 80 \text{ кОм}$$

$$f_{\text{н}} = 30 \text{ Гц}$$

$$f_{\text{в}} = 20 \text{ кГц}$$

Усилитель должен иметь следующие характеристики:

$K_{\text{Г}}$ не более 0,8 %.

$M_{\text{н}}$ не более 1,8 дБ.

$M_{\text{в}}$ не более 1,5 дБ.

$$P_{\text{н}} = 10 \text{ Вт.}$$

$$R_{\text{н}} = 5,5 \text{ Ом.}$$

Температурный диапазон от -5°C до $+25^{\circ}\text{C}$.

2.1. Расчет оконечного каскада

1. Рассчитаем необходимый коэффициент усиления по мощности $K_{\text{р}}$

$$K_{\text{р}} = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}$$

Мощность источника сигнала

$$P_{\text{ист}} = \frac{U_{\text{и}}^2}{R_{\text{и}}} = \frac{0,11^2}{80 \cdot 10^3} = 0,15 \cdot 10^{-6} \text{ Вт.}$$

Выходная мощность по условию

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{н}} = 10 \text{ Вт.}$$

$$\text{Отсюда } K_{\text{р}} = \frac{10}{0,15 \cdot 10^{-6}} = 67 \cdot 10^6$$

Исходя из мощности на выходе и сопротивления нагрузки, ток нагрузки составит $I_{\text{н}} = \sqrt{\frac{P_{\text{н}}}{R_{\text{н}}}} = \sqrt{\frac{10}{5,5}} = 1,35 \text{ А}$

Тогда напряжение на нагрузке равно $U_{\text{н}} = I_{\text{н}} \cdot R_{\text{н}} = 1,35 \cdot 5,5 = 7,4 \text{ В}$ $P_{\text{н}}$, $R_{\text{н}}$, $U_{\text{н}}$, $I_{\text{н}}$ являются исходными данными для расчета оконечного каскада. По этим параметрам выбираем по справочнику микросхему типа **TDA2050**.

Эта микросхема имеет следующие электрические параметры:

1. Выходная мощность не менее 28 Вт.

2. Напряжение источника питания +25В.
3. Ток потребления не более 90 мА.
4. Сопротивление нагрузки 4 Ом.
5. Диапазон частот 20 Гц ÷ 80 кГц.
6. Коэффициент усиления по мощности не менее 10^6 .
7. Коэффициент гармоник не более 0,5%.

Предельные эксплуатационные параметры:

1. Напряжение источника, максимальное +25 В.
2. Ток нагрузки, максимальный 5 А.
3. Выходное напряжение, максимальное 20 В.
4. Входное напряжение, максимальное 15 В.

Схема включения микросхемы с цепями коррекции показана на рис.2.1. При таком включении **входное сопротивление** около 500 кОм. Характеристические зависимости показаны ниже. Зная коэффициент усиления по мощности, рассчитаем необходимые входные данные: $P_{ВХ.ОК} = \frac{P_{ВЫХ.ОК}}{K_p} = \frac{28}{10^6} = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}$. Отсюда видно, что если входная мощность оконечного каскада составит $2,8 \cdot 10^{-5}$ Вт, то на нагрузке мы получим 28 Вт, т.е. имеем запас по мощности для введения ООС.

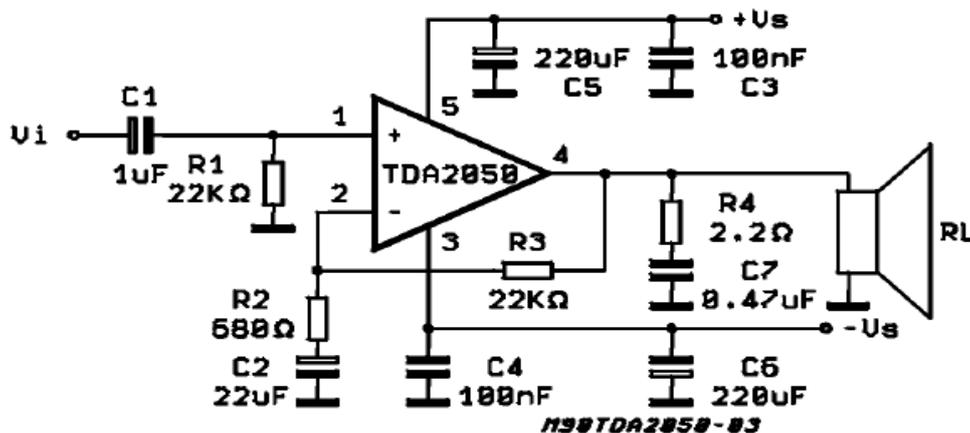


Рис.2.1. Схема подключения и цепи коррекции

Необходимое входное напряжение оконечного каскада $U_{ВХ.ОК} = \sqrt{P_{ВХ.ОК} \cdot R_{ВХ.ОК}} = \sqrt{2,8 \cdot 10^{-5} \cdot 500 \cdot 10^3} = 3,74 \text{ В}$. Входной ток оконечного каскада $I_{ВХ.ОК} = \frac{U_{ВХ.ОК}}{R_{ВХ.ОК}} = \frac{3,74}{5 \cdot 10^5} = 7,5 \text{ мкА}$. Коэффициент гармоник (K_T) на частотах 30 Гц ÷ 20 кГц не превышает 0,5%. Коэффициент частотных искажений на нижних и верхних частотах

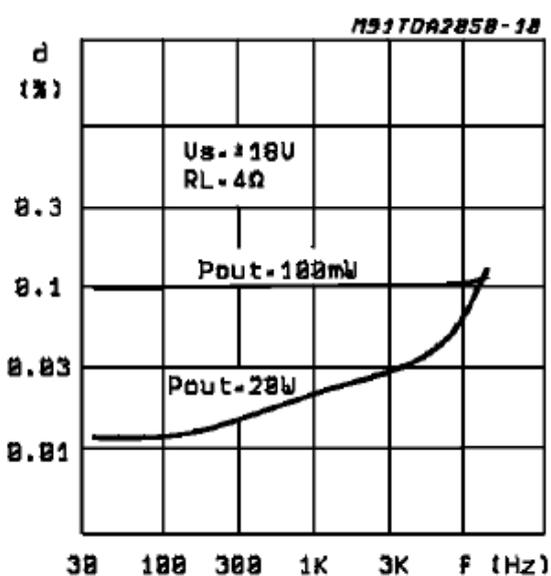


Рис.2.2. $K_T = f(f)$

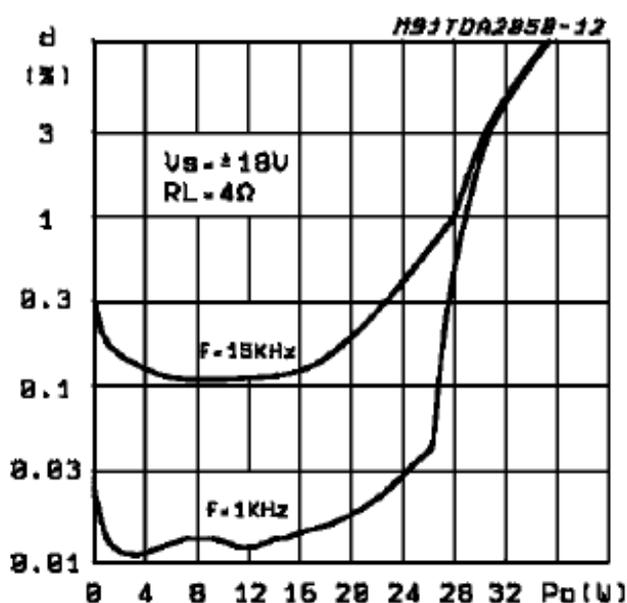


Рис.2.3. $K_T = f(P_H)$

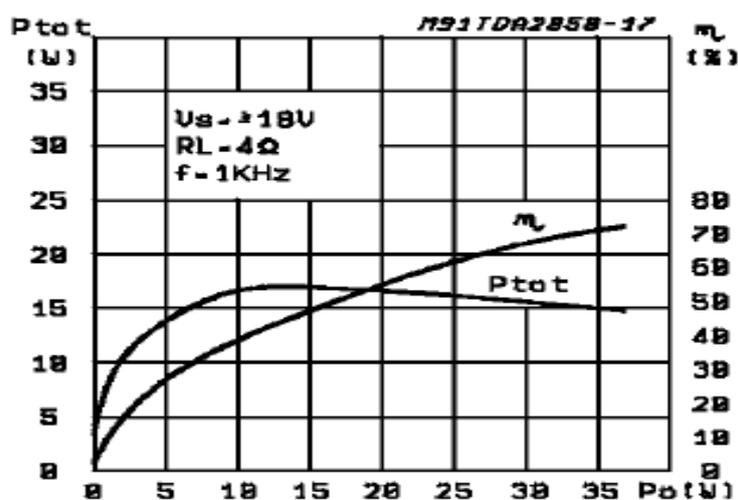


Рис.2.4. $\eta = f(P_H)$

$M_H = M_B \leq 106$. К.П.Д. (η) при выходной мощности 28 Вт составит 65%. ИМС типа TDA2050 может эксплуатироваться при температуре от -40°C до $+150^\circ\text{C}$. Для отвода тепла от корпуса ИМС необходимо использовать радиаторы с охлаждающей поверхностью.

2.2. Расчет предоконечного каскада

Как было показано K_p усилителя должен быть равен $K_p = 67 \cdot 10^6$, а $K_{p,OK}$ окончного каскада $K_{p,OK} = 10^6$, то есть $K_{p,OK} < K_p$. Таким образом, необходим еще один предоконечный каскад с коэффициентом усиления по мощности не менее 67 для «раскачки» окончного каскада.

Предоконечный каскад должен удовлетворить следующим требованиям:

1. K_{p2} не менее 67.
2. $U_{вх} = U_{и} = 0,11$ В.
3. $I_{вх} = I_{и} = U_{и} / R_{и} = 0,11 / 80 \cdot 10^3 = 1,38$ мкА
4. $U_{вых}$ не менее 3,74 В.
5. $I_{вых} = I_{вх.ок}$ не менее 7,5 мкА.

Входное сопротивление предоконечного каскада равно 500 кОм, а выходное сопротивление предоконечного каскада 20 кОм. Для согласования этих сопротивлений включается на выход операционного усилителя предоконечного каскада $R_{ш}$, величиной примерно равной выходному сопротивлению предоконечного каскада.

Исходя из вышеуказанных требований, микросхему предоконечного каскада типа К140УД1.

Электрические параметры микросхемы К140УД1:

1. Напряжение источника питания $\pm 12,6$ В.
2. Ток потребления, не более 10 мА.
3. Входное напряжение, не более $\pm 6,3$ В.
4. Выходное напряжение, не менее ± 6 В.
5. Ток выходной, не более 2 мА.
6. Входное сопротивление, номинальное 50 кОм.
7. Выходное сопротивление, номинальное 20 кОм.
8. Ток входной, не более 9 мкА.
9. Коэффициент усиления по напряжению 8000.
10. Коэффициент усиления по току 40.
11. Коэффициент усиления по мощности $32 \cdot 10^4$.
12. Диапазон частот $0 \div 0,1$ МГц.
13. Коэффициент гармоник 0,4%.

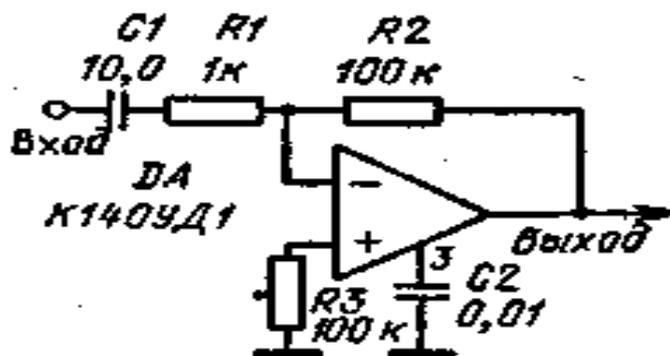


Рис.2.5. Схема предоконечного каскада

На рис.2.5. приведена схема подключения операционного усилителя предоконечного каскада.

Коэффициент усиления по напряжению предоконечного каскада равен: $K_{U2} = \frac{U_{BX1}}{U_{BX2}} = \frac{3,74}{0,11} = 34$. Зная K_{U2} и сопротивление по

неинвертирующему входу R_3 , равное $R_{и}$, можно определить сопротивление в цепи обратной связи усилителя R_4 . $R_4 = R_3 \cdot K_{U2} = 80 \cdot 10^3 \cdot 34 = 2,72 \text{ Мом}$. При использовании обратной связи выходное сопротивление несколько уменьшается и вычисляется по

формуле: $R'_{ВЫХ.ОС} = \frac{R_{ВЫХ}}{1 + \beta K_{и}}$, где $\beta = \frac{R_3}{R_3 + R_4} = \frac{80 \cdot 10^3}{80 \cdot 10^3 + 2720 \cdot 10^3} = 0,029$,

$$R'_{ВЫХ.ОС} = \frac{20 \cdot 10^3}{1 + 0,029 \cdot 34} = 10,07 \text{ кОм}.$$

Сопротивление шунта выбирается не менее чем в два раза больше, чем уточненное значение выходного сопротивления усилителя с учетом ОСС, т.е. $R'_{ВЫХ.ОС}$. Тогда сопротивление $R_{ш}$ выберем 20,14 кОм. С учетом этого, входное сопротивление окончного каскада

$$R'_{ВХ.ОК} = \frac{R_{ВХ} \cdot R_{ш}}{R_{ВХ} + R_{ш}} = \frac{500 \cdot 20,14}{500 + 20,14} = 19,36 \text{ кОм}.$$

$$I_{ш} = \frac{U_{ш}}{R_{ш}} = \frac{U_{ВХ.ОК}}{R_{ш}} = \frac{3,74}{19,36 \cdot 10^3} = 193 \text{ мкА}.$$

С учетом этого выходной ток ОУ предоконечного каскада определяется $I_{вх2} = I_{ш} + I_{вх.ок} = 193 \text{ мкА} + 7,5 \text{ мкА} = 200,5 \text{ мкА}$. Как видно, выходной ток не превышает максимально допустимого выходного тока ИМС К140УД1, сохраняет работоспособность при температуре $-45^\circ\text{C} \div +85^\circ\text{C}$.

Таким образом, после расчетов имеем усилитель низкой частоты со следующими параметрами:

$$P_{ВЫХ} = 28 \text{ Вт}.$$

$$U_{ВЫХ} = 10 \text{ В}.$$

$$K_{Г} = K_{Г2} + K_{Г1} = 0,9\%.$$

На низких частотах вносят частотные искажения разделительные конденсаторы на входе, выходе и между каскадами. На каждый конденсатор C_1, C_2, C_6 тогда добавится на низких частотах по 0,2 дБ.

$$M_{н} = M_{н1} + M_{н2} + M_{C1} + M_{C2} + M_{C6} = 1 + 0,5 + 0,2 + 0,2 + 0,2 = 2,1 \text{ дБ}$$

$$M_{в} = M_{в1} + M_{в1} = 1 + 0,5 = 1,5 \text{ дБ}$$

Из приведенных расчетов видно, что требуется снизить $K_{Г}$ и $M_{н}$, так как они больше, чем требуется в рабочем задании.

Снижение гармонических и частотных искажений можно добиться использованием цепи ООС в виде RC-цепочки.

2.3. Расчет цепи ООС

1. При введении ООС коэффициент усиления усилителя равен $K_{и.ос} = \frac{K_u}{1 + \beta K_u}$, где β – коэффициент передачи звена ОС, который определяется для последовательной обратной связи по напряжению $\beta = \frac{1}{K_{и.ос}} - \frac{1}{K_u}$. K_u определяем, при $P_{\text{ВЫХ}} = 28$ Вт, приняв $U'_{\text{ВЫХ}} = 10$ В (меньше $U_{\text{ВЫХ.макс}}$, но больше чем $U_{\text{и}}$). K_u при $P_{\text{ВЫХ}} = 10$ Вт и $U_{\text{и}} = 7,4$ В.

$$K_u = \frac{U'_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{и}}} = \frac{10}{0,11} = 91. \quad K_{и.ос} = \frac{U_{\text{и}}}{U_u} = \frac{7,4}{0,11} = 67. \quad \text{Тогда} \quad \beta = \frac{1}{67} - \frac{1}{91} = 0,004.$$

Определим глубину обратной связи $F = 1 + \beta \cdot K_u = 1 + 0,004 \cdot 91 = 1,36$.

2. Сопротивление делителя (рис.2.1.) равно

$$R_{\text{д}} = R_3 + R_4, \quad (2.1)$$

рассчитывается по формуле

$$R_{\text{д}} = \left[\frac{1 - \beta}{\sqrt{\beta}} \right] \sqrt{R'_{\text{ВХ}} \cdot R'_{\text{ВЫХ}}}, \quad (2.2)$$

$$R'_{\text{ВХ}} = R_{\text{ВХ}} + R_{\text{и}} = 50 \text{кОм} + 80 \text{кОм} = 130 \text{кОм}; \quad R'_{\text{ВХ}} = \frac{R_{\text{ВЫХ}} \cdot R_{\text{и}}}{R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{и}}}. \quad (2.3)$$

где $R_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}^2}{P_{\text{ВЫХ}}} = \frac{18^2}{28} = 12 \text{Ом}$, где $U_{\text{ВЫХ}} < U_{\text{ВЫХ.макс}}$. Тогда $R'_{\text{ВЫХ}} = \frac{12 \cdot 5,5}{12 + 5,5} = 3,8 \text{Ом}$

Отсюда следует, что $R_{\text{д}} = \left[\frac{1 - 0,004}{\sqrt{0,004}} \right] \sqrt{130 \cdot 10^3 \cdot 3,8} = 11,7 \text{кОм}$

3. Эквивалентное сопротивление верхнего плеча, шунтированного сопротивлением $R'_{\text{ВХ}}$, равно $R'_3 = \beta R_{\text{д}} = 0,004 \cdot 11,07 \cdot 10^3 = 44,3 \text{Ом}$. Тогда

$$R_3 = \frac{R'_3 \cdot R_{\text{ВХ}}}{R'_{\text{ВХ}} - R'_3} = \frac{44,3 \cdot 130 \cdot 10^3}{130 \cdot 10^3 - 44,3} \approx 44,3. \quad \text{Исходя из полученного значения}$$

сопротивления R_3 , подбираем соответствующий резистор МЛТ-0,25-8 Ом±10%. Сопротивление нижнего резистора

$R_4 = R_{\text{д}} - R_3 = 11,07 \text{кОм} - 44,3 \text{Ом} \approx 11,03 \text{кОм}$. Таким же образом подбираем R_4 , МЛТ-0,25-11 кОм±5%.

4. Определим относительные потери мощности в делителе

$$\frac{P_{\text{д}}}{P} = \frac{R_{\text{и}}}{R_{\text{д}}} = \frac{5,5}{11,07 \cdot 10^3} = 0,5 \cdot 10^{-3}.$$

5. Коэффициент усиления усилителя на низких, средних и высоких частотах с ООС равен

$$K_{u.c.p.ocs} = \frac{K_{u.c.p.}}{F} = \frac{91}{1,36} = 67.$$

6. Рассчитаем входное сопротивление усилителя с ООС

$$R_{вх.ocs} = R_{вх} \cdot F = 50 \cdot 10^3 \cdot 1,4 = 70 \text{ кОм}.$$

7. Определим коэффициент частотных искажений на нижних и верхних частотах:

$$M_{H.ocs} = M_H \frac{1 + \beta K_{ИН}}{1 + \beta K_{u.c.p.}}; \quad (2.4)$$

$$M_{B.ocs} = M_H \frac{1 + \beta K_{ИВ}}{1 + \beta K_{u.c.p.}}, \quad (2.5)$$

где $K_{ИН} = K_{u.c.p.} \cdot M_H = 91 \cdot 0,61 = 55,51$; $K_{ИВ} = K_{u.c.p.} \cdot M_B = 91 \cdot 0,59 = 53,69$.

Откуда

$$M_{H.ocs} = 1,8 \frac{1 + 0,004 \cdot 55,51}{1 + 0,004 \cdot 91} = 1,61 \text{ дБ};$$

$$M_{B.ocs} = 1,5 \frac{1 + 0,004 \cdot 53,69}{1 + 0,004 \cdot 91} = 1,34 \text{ дБ}.$$

8. Определим коэффициент гармоник с ООС $K_{Г.ocs} = \frac{K_{Г}}{F} = \frac{0,9}{1,36} = 0,66\%$

Таким образом, с введением ООС получили значения M_H , M_B , и $K_{Г}$ удовлетворяющих требованиям задания.

Заключение

Спроектированный усилитель работает на двухполярном питании $\pm 12\text{В}$ для предоконечного каскада и $\pm 25\text{В}$ для оконечного каскада, при температуре окружающей среды от -10°C до 50°C . Имеет полосу пропускания от 20 Гц до 80 кГц, а также коэффициент нелинейных искажений 0.66 %.

Достоинства усилителя – большой коэффициент усиления по мощности - $32 \cdot 10^{10}$. Также сравнительно большое входное сопротивление.

Недостатком спроектированного усилителя является сравнительно большое количество элементов, что приводит к трудностям при настройке схемы усилителя.

**Варианты заданий курсовой работы по предмету
«Микросхемотехника» на тему
«Расчёт усилителей низкой частоты на интегральных
микросхемах»**

№	$P_{\text{ВЫХ}}$ Вт	$R_{\text{Н}}$ Ом	$f_{\text{Н}}$ Гц	$f_{\text{В}}$, Гц	$M_{\text{Н}}$ дБ	$M_{\text{В}}$ дБ	$K_{\text{Г}}$ %	t_{min} , °С	t_{max} , °С	$U_{\text{ист}}$, В	$R_{\text{ист}}$, Ом
1	13,5	6,2	80	$20 \cdot 10^3$	1,2	1,6	0,7	- 10	+35	0,17	$130 \cdot 10^3$
2	10	4	50	$20 \cdot 10^3$	1,3	1,7	0,6	- 10	+35	0,5	$30 \cdot 10^3$
3	10,5	5,6	40	$20 \cdot 10^3$	1,5	1,5	0,65	- 10	+35	0,01	$85 \cdot 10^3$
4	9	5	70	$20 \cdot 10^3$	1,3	1,2	0,8	-5	+45	0,0095	$70 \cdot 10^3$
5	9,5	5,2	60	$18 \cdot 10^3$	1,4	1,3	0,6	-5	+45	$4 \cdot 10^{-5}$	$75 \cdot 10^3$
6	7,5	4,8	30	$20 \cdot 10^3$	1,8	1,6	0,5	-5	+45	0,1	$55 \cdot 10^3$
7	5,5	4,2	50	$20 \cdot 10^3$	1,8	1,6	0,7	-5	+45	0,06	$35 \cdot 10^3$
8	11,5	5,3	40	$20 \cdot 10^3$	1,4	1,4	0,9	-5	+25	1,4	$95 \cdot 10^3$
9	13	8	70	$20 \cdot 10^3$	2	1,3	1	-5	+25	$3,33 \cdot 10^{-3}$	$120 \cdot 10^3$
10	6,5	4,5	50	$18 \cdot 10^3$	1,8	1,5	0,5	-5	+25	0,07	$45 \cdot 10^3$
11	8	4,7	60	$20 \cdot 10^3$	2	1,6	0,6	-10	+25	0,005	$60 \cdot 10^3$
12	7	4,6	50	$20 \cdot 10^3$	1,5	1,3	0,8	-5	+35	0,75	$50 \cdot 10^3$
13	5,5	4,2	60	$20 \cdot 10^3$	1,2	1	0,6	-5	+35	0,006	$35 \cdot 10^3$
14	8	4,7	40	$20 \cdot 10^3$	2	1,6	1	-25	+45	$6,6 \cdot 10^{-6}$	$60 \cdot 10^3$
15	12,5	5,2	80	$20 \cdot 10^3$	1,4	1,2	1	-10	+35	1,55	$110 \cdot 10^3$
16	12	5	70	$20 \cdot 10^3$	2	1,5	1,2	-10	+35	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^5$
17	10	5,5	30	$20 \cdot 10^3$	1,8	1,5	0,8	-5	+25	0,11	$80 \cdot 10^3$
18	14	6,4	50	$19 \cdot 10^3$	1,6	1,3	1,2	-5	+45	0,018	$140 \cdot 10^3$
19	10,2	5,55	40	$20 \cdot 10^3$	2	2	0,9	-10	+25	0,115	$82 \cdot 10^3$
20	12	5,1	70	$18 \cdot 10^3$	1,8	1,6	1	-10	+45	0,15	$100 \cdot 10^3$
21	5	4	50	$20 \cdot 10^3$	1,6	1,4	0,7	-5	+45	0,5	$30 \cdot 10^3$
22	6	4,4	60	$18 \cdot 10^3$	1,7	1,5	0,6	-5	+35	0,0065	$40 \cdot 10^3$
23	9	4	60	$20 \cdot 10^3$	1,3	1,3	0,7	-10	+45	0,0095	$70 \cdot 10^3$
24	10	5,5	60	$20 \cdot 10^3$	1,8	1,5	0,6	-10	+35	0,11	$80 \cdot 10^3$
25	7	4,6	50	$20 \cdot 10^3$	1,5	1,5	0,8	-10	+35	0,075	$50 \cdot 10^3$
26	8	4,7	30	$18 \cdot 10^3$	1,6	1,4	0,7	-10	+45	0,005	$60 \cdot 10^3$
27	9	4	40	$20 \cdot 10^3$	1,4	1,4	0,8	-10	+35	0,095	$70 \cdot 10^5$
28	10	4	50	$20 \cdot 10^3$	1,5	1,3	1	-25	+45	0,5	$30 \cdot 10^3$
29	8	4,3	40	$20 \cdot 10^3$	1,8	1,5	0,6	-25	+45	6,6	$60 \cdot 10^3$
30	16	5,5	60	$20 \cdot 10^3$	1,8	1,6	1	-5	+45	0,1	$80 \cdot 10^3$

Литература

1. Основная литература

1. Paul Horowitz, Winfield Hill The art of electronics Third Edition Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-80926-9 Hardback, 2015 – 1225p
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники Издание 5-е, переработанное. -М: Мир 2001.- 608 с.
3. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12- изд. Том I, II: Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2008.
4. Павлов, В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств: Учебник для вузов. / В.Н. Павлов, В.Н. Ногин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 288 с.
5. Фролов В.А. Электронная техника. В двух частях. Часть 2. Схемотехника электронных схем. Учебное пособие – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015.

2. Дополнительная литература

1. Христич В.В. Лабораторный практикум по курсу “Электроника”. – Таганрог: ТТИ, 2009.
2. Панфилов Д.И. и др. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях (в 2-х томах). – 2001.
3. Шарапов А.В. Микроэлектроника: Учебное пособие. — Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2007. - 158 с.
4. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: учебник для вузов. 2-е издание. -М: Альянс, 2014.- 496 с.
5. Ларин А. Л. Аналоговая электроника. Учебное пособие. –М.: МФТИ, 2013. -268 с.
6. Уве Наундорф. Аналоговая электроника. Основы, расчет, моделирование. –М.: Техносфера, 2008.

3. Информационный источник

1. www.gov.uz – Правительственный портал Республики Узбекистан.
2. www.lex.uz – Национальная база данных законодательства Республики Узбекистан.
3. www.ziyoucom.uz
4. <http://www.Interactive.com>

Содержание

Введение.....	3
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	
1.1. Операционный усилитель.....	5
1.2. Типы операционных усилителей.....	6
1.3. Основные параметры и характеристики операционных усилителей.....	9
1.4. Отрицательная обратная связь в усилителях.....	13
ГЛАВА 2. РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ	
2.1. Расчет оконечного каскада.....	24
2.2. Расчет предоконечного каскада.....	26
2.3. Расчет цепи ООС.....	29
Заключение.....	31
Варианты заданий курсовой работы	32
Список литературы.....	33

Редактор Ахметжанова Г.М.

Для заметок

Для заметок