

Московский государственный университет

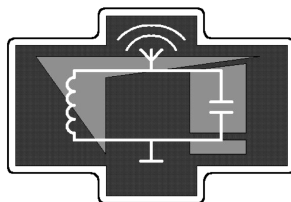
им М.В. Ломоносова

Физический факультет

Л.Г. Прохоров, С.Е. Стрыгин

ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Методическая разработка для „Практикума по радиофизике“



Москва 2016 г.

УДК 621.375.123:621.382.333

Печатается по решению кафедры физики колебаний
физического факультета МГУ

Л.Г. Прохоров, С.Е. Стрыгин

Операционный усилитель. Методическая разработка для „Практикума по радиофизике“. - М., изд. физического факультета МГУ, 2016, с. 23

Методическая разработка предназначена для студентов 3 курса физического факультета МГУ, выполняющих задачи в „Практикуме по радиофизике“. В разработке изучаются характеристики операционных усилителей, типы обратных связей в усилителях, исследуются усилители с разными частотными характеристиками и полосами усиления на основе операционных усилителей.

Объем 1.3 п.л.

Тираж 50 экз.

Заказ №

Отпечатано в отделе оперативной печати физического факультета
МГУ им. М.В.Ломоносова

1 Введение

Задача усиления электрических сигналов часто встречается в самых различных устройствах — от мобильных телефонов до сверхчувствительных измерительных установок. В большом числе случаев для решения таких задач не нужно собирать усилитель самостоятельно (как это делалось в лабораторной работе „Усилитель низкой частоты на транзисторе“), а можно использовать уже готовый. Часто самым разумным вариантом является использование усилителя в виде микросхемы. Обычно такой усилитель имеет достаточно сложную внутреннюю схему, содержит несколько десятков транзисторов и оптимизирован для различных применений. Сочетание минимального веса и габаритов, а также простота использования делают применение микросхем гораздо более предпочтительным, чем самостоятельное изготовление усилителя на транзисторах. Наиболее часто используемый тип усилительных микросхем — операционные усилители. Название «операционный» возникло исторически, так как изначально они использовались в аналоговых вычислительных машинах для осуществления математических операций.

2 Операционные усилители

Операционным усилителем (ОУ) называют дифференциальный усилитель постоянного тока с очень большим собственным коэффициентом усиления и несимметричным выходом. Почти всегда имеется в виду исполнение такого усилителя в виде микросхемы.

Разберем это определение подробнее. «**Дифференциальный**» означает, что у такого усилителя есть два входа, а усиливаемым сигналом является разность потенциалов между этими входами. Один из входов обознача-

ется знаком '+' и называется неинвертирующим, другой обозначается '-' и называется инвертирующим (иногда инвертирующий вход обозначается кружочком). Входное напряжение усилителя определяется как разность потенциалов между неинвертирующим и инвертирующим входами. Соответственно, при постоянном положительном потенциале на неинвертирующем входе при заземленном другом входе выходное напряжение также положительно, а при положительном потенциале на инвертирующем входе при заземленном неинвертирующем входе – выходное напряжение отрицательно. **«Усилителем постоянного тока»** называется усилитель, который может работать как с переменными, так и с постоянными сигналами (не „обрезает“ постоянную составляющую). Усилителями с **«несимметричным выходом»** называют усилители, у которых выходное напряжение снимается между единственной выходной клеммой и «землей». Отметим, что кроме уже упомянутых двух входов, одного выхода и „земли“ к операционному усилителю необходимо подключать питание (обычно двухполярное), которое необходимо для преобразования энергии источника питания в энергию сигнала.

Рассмотрим типичные характеристики операционных усилителей.

Собственный коэффициент усиления операционного усилителя $\tilde{K}_o(f)$ (см. определение в лабораторной работе „УНЧ на транзисторе“) обычно составляет $10^4 - 10^7$ на низких частотах (до 100 Гц) и уменьшается с увеличением частоты. Столь большой коэффициент усиления приводит к тому, что операционные усилители почти всегда используются с цепью обратной связи. Введение обратной связи позволяет создать усилитель с нужным коэффициентом усиления, при необходимости — с частотно-зависимым или переменным (обратные связи будут подробно разобраны в следующем разделе).

Входным сопротивлением усилителя называют отношение приложенного к входу напряжения к силе тока на входе усилителя. В большинстве применений желательно иметь максимально большое входное сопротивление, как у идеального вольтметра. Типичное значение входного сопротивления ОУ — от 100 МОм и выше. Входное сопротивление электронных ОУ может достигать 10^{15} Ом. Из-за столь большого входного сопротивления в большинстве случаев входной ток ОУ можно считать нулевым.

Выходное сопротивление определяется как отношение изменения выходного напряжения к изменению силы выходного тока (аналогично внутреннему сопротивлению батареи или источника напряжения). Крайне желательно чтобы выходное напряжение не менялось при изменении нагрузки, поэтому в ОУ выходное сопротивление делается достаточно малым. Типичное выходное сопротивление ОУ составляет 10 – 100 Ом. Кроме выходного сопротивления, для описания мощности выходного сигнала, которую может обеспечить операционный усилитель, может использоваться **максимальный выходной ток операционного усилителя** и **минимальное допустимое сопротивление нагрузки**.

Предельная скорость изменения выходного напряжения составляет обычно 1 – 1000 В/мкс. Она может приводить к искажениям высокочастотных сигналов большой амплитуды.

У идеального операционного усилителя: собственный коэффициент усиления \tilde{K}_o и входное сопротивление $R_{вх}$ стремятся к бесконечности, выходное сопротивление $R_{вых} = 0$, скорость нарастания напряжения бесконечно большая.

Операционный усилитель обозначается треугольником. Несколько вариантов того, как это может выглядеть в схеме, приведено на рис. 1. Инвер-

тирующий вход обозначается знаком '-' или кружочком, неинвертирующий вход обозначается знаком '+' или не подписывается. Выход всегда расположен справа, обычно — в вершине треугольника. Питание усилителя обычно расположено сверху и снизу и обозначается $\pm U$ или $\pm E$. Часто на принципиальных схемах провода питания и заземления ОУ не изображаются, предполагается, что они подключены к источнику питания.

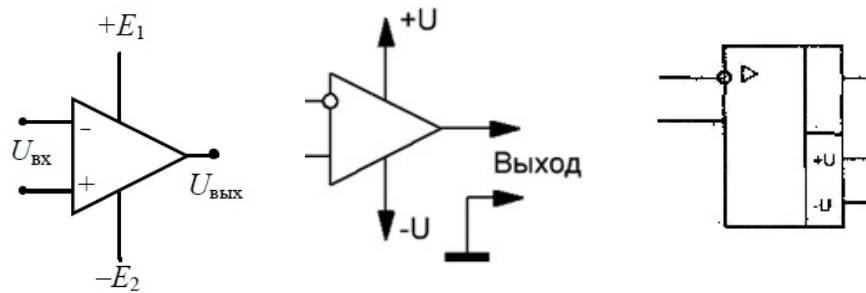


Рис. 1: Обозначения операционных усилителей

Стоит отметить, что ОУ обладает нелинейностью, то есть существует нелинейная зависимость выходного напряжения от входного. Поэтому коэффициент усиления зависит также и от амплитуды напряжения входного сигнала, что необходимо учитывать при усилении сигналов([3], с.109).

3 Обратные связи в усилителях

Обратной связью в усилителях называют передачу части энергии выходного сигнала (напряжения или тока) на вход усилителя. Использование обратных связей позволяет создать на основе ОУ схему с необходимыми свойствами: усилитель с выбранным коэффициентом усиления и определенной частотной зависимостью, генератор переменного напряжения, активный фильтр и многое другое.

Рассмотрим усилитель с собственным коэффициентом усиления $\tilde{K}_o(\omega)$, охваченный цепью обратной связи с коэффициентом передачи $\tilde{B}(\omega)$ (рис. 2). Здесь $\tilde{X}(\omega)$ – входной сигнал, $\tilde{Y}(\omega)$ – выходной, $\tilde{X}_{oc}(\omega)$ – сигнал обратной связи, $\tilde{\varepsilon}(\omega)$ – сигнал на входе в усилитель. Если сигнал обратной связи при сложении с входным сигналом уменьшает сигнал воздействия $\tilde{\varepsilon}$, то обратная связь называется отрицательной, а если увеличивает – то положительной. Для гармонических сигналов это может быть сформулировано через разность фаз $\delta\phi$ между входным сигналом \tilde{X} и сигналом на выходе цепи обратной связи \tilde{X}_{oc} . Сигналы \tilde{X}_{oc} и \tilde{X} складываются синфазно, если разность фаз между ними $\delta\phi$ близка к нулю (т.е. когда \tilde{X}_{oc} и \tilde{X} „в фазе“), и вычитаются, если $\delta\phi$ близка к π (т.е. когда \tilde{X}_{oc} и \tilde{X} „в противофазе“). Соответственно, обратная связь является положительной, если $0 \leq |\delta\phi| < \pi/2$, и отрицательной, если $\pi/2 < |\delta\phi| \leq \pi$. Естественно, что для гармонических сигналов эти условия должны выполняться с точностью до $\pm 2\pi n$ ($n = 0, 1, 2, \dots$). **Вообще, обратная связь, увеличивающая коэффициент усиления, считается положительной, в противном случае — отрицательной.**

Найдем коэффициент передачи $\tilde{K}_B(\omega)$ усилителя с отрицательной обратной связью, изображенного на рис. 2. Отметим, что $\tilde{K}_B(\omega)$ — коэффициент усиления для всей схемы — является отношением выходного напряжения к входному напряжению **схемы** $\tilde{K}_B = \tilde{Y}/\tilde{X}$. Зависимость модуля коэффициента усиления $|\tilde{K}_B(\omega)|$ от частоты называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) усилителя, а $\arg\tilde{K}_B(\omega)$ — фазо-частотной характеристикой (ФЧХ) усилителя. Собственный же коэффициент усиления $\tilde{K}_o(\omega)$ усилителя, охваченного обратной связью, равен отношению выходного сигнала и сигнала на входе **усилителя** $\tilde{K}_o = \tilde{Y}/\tilde{\varepsilon}$.

Для приведенной на рисунке схемы будут выполняться следующие урав-

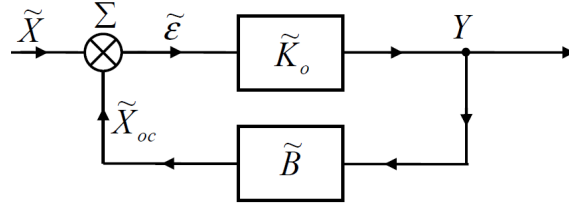


Рис. 2: Усилитель, охваченный цепью обратной связи

нения: $\tilde{\varepsilon} = \tilde{X} + \tilde{X}_{oc}$, $\tilde{Y} = \tilde{K}_o \cdot \tilde{\varepsilon}$, $\tilde{X}_{oc} = \tilde{B}\tilde{Y}$.

Отсюда получаем:

$$\tilde{K}_B(\omega) = \frac{\tilde{Y}}{\tilde{X}} = \frac{\tilde{K}_o \tilde{\varepsilon}}{\tilde{\varepsilon} - \tilde{B}\tilde{Y}} = \frac{\tilde{K}_o(\omega)}{1 - \tilde{B}(\omega)\tilde{K}_o(\omega)}. \quad (1)$$

В случае отрицательной обратной связи (считая $\arg(\tilde{B}) = \pi$ и $\arg(\tilde{K}_o) = 0$) можно записать это уравнение в виде:

$$\tilde{K}_B(\omega) = \frac{\tilde{K}_o(\omega)}{1 + |\tilde{B}(\omega)\tilde{K}_o(\omega)|}. \quad (2)$$

Из этого уравнения видно, что при наличии отрицательной обратной связи(ООС) коэффициент передачи уменьшается. Причем, если $|\tilde{B}\tilde{K}_o| \gg 1$ (в этом случае обратная связь называется **глубокой**), коэффициент передачи $\tilde{K}_B \simeq 1/|\tilde{B}|$ зависит от параметров цепи обратной связи. Отметим, что в результате этого коэффициент передачи усилителя становится существенно более стабильным. *Для примера рассмотрим усилитель на основе ОУ МСР6022 с отрицательной обратной связью $\tilde{B} = -0,1$. Коэффициент усиления ОУ в диапазоне от 10 Гц до 10 кГц меняется на три порядка: от $\tilde{K}_o = 10^6$ (10 Гц) до $\tilde{K}_o = 10^3$ (10 кГц). Коэффициент передачи у этого усилителя с обратной связью будет изменяться в этом диапазоне частот всего на 1%.*

В ряде случаев необходимо учитывать, что наличие обратной связи меняет входное и выходное сопротивления усилителя ([1], с.145; [3], с. 95).

Использование ООС вместе с операционными усилителями позволяет относительно просто создавать усилитель с заданным коэффициентом усиления и желаемой частотной характеристикой, при необходимости – изменяемыми за счет переменных элементов в цепи обратной связи (обычно – подстроечных резисторов).

Обратим внимание на то, что приближенное соотношение $|\tilde{K}_B| \simeq 1/|\tilde{B}|$ формально будет справедливо и при положительной обратной связи. Однако оно не будет иметь физического смысла, поскольку при $|\tilde{K}_o\tilde{B}| > 1$ в случае положительной обратной связи состояние усилителя неустойчивое. В таком режиме усилитель превращается в генератор. Подробнее о применении положительной обратной связи в генераторах будет рассказано в лабораторной работе „RC-генератор“.

Интересно отметить следующее обстоятельство. Так как сдвиг фаз, вносимый системой и цепью обратной связи, в общем случае зависит от частоты, то возможны ситуации, когда для одной и той же системы в одном частотном интервале обратная связь может быть отрицательной, в другом интервале - положительной.

4 Схемы на основе операционных усилителей

При расчете усилителей на основе ОУ будем считать ОУ по своим свойствам близким к идеальному, то есть его коэффициент передачи $K_o(0) \rightarrow \infty$, $R_{вх} \rightarrow \infty$, $R_{вых} \rightarrow 0$. В подавляющем числе случаев это предположение выполняется с высокой точностью. В зависимости от способа подачи усиливаемого сигнала и сигнала обратной связи возможно инвертирующее и неинвертирующее включение ОУ.

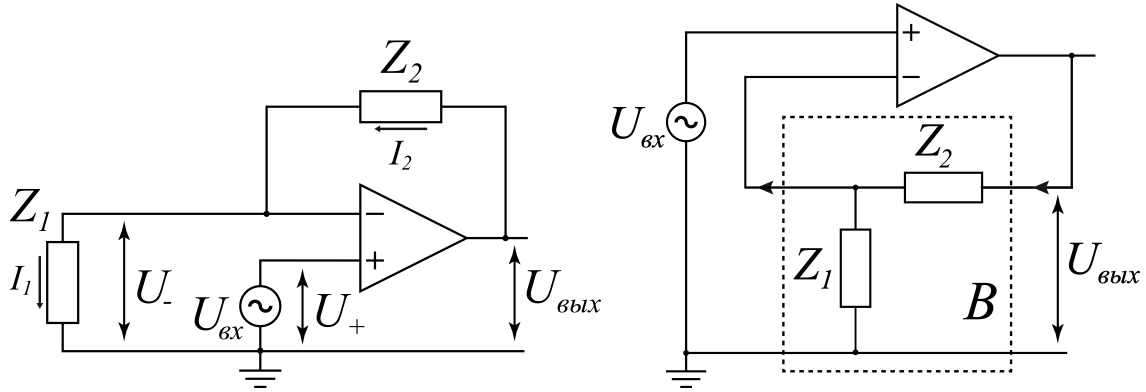


Рис. 3: Неинвертирующий усилитель на основе ОУ: (а) принципиальная схема, (б) та же схема с более наглядным обозначением обратной связи

Неинвертирующий усилитель на основе ОУ

Неинвертирующим называют такой усилитель, у которого сигнал на выходе совпадает по фазе с входным сигналом. Обычно, для усилителей на основе ОУ с ООС усиливаемый сигнал подается на неинвертирующий вход. Схема неинвертирующего усилителя на основе ОУ с ООС приведена на рис. 3. Здесь и везде далее на схемах не показаны цепи подключения ОУ к источникам питания.

Рассчитаем коэффициент усиления \tilde{K}_B такого усилителя. Поскольку входное сопротивление ОУ очень велико, токи через импедансы \tilde{Z}_1 и \tilde{Z}_2 можно считать одинаковыми:

$$\tilde{I}_1 \simeq \tilde{I}_2 = \tilde{I}.$$

Выходное напряжение может быть представлено как сумма падений напряжения на импедансах \tilde{Z}_1 и \tilde{Z}_2 :

$$\tilde{U}_{\text{вых}} = \tilde{I}\tilde{Z}_1 + \tilde{I}\tilde{Z}_2.$$

С другой стороны, напряжение на выходе работающего операционного усилителя связано с входными напряжениями \tilde{U}_+ и \tilde{U}_-

$$\tilde{U}_{\text{вых}} = \tilde{K}_o \cdot (\tilde{U}_+ - \tilde{U}_-).$$

При этом напряжение \tilde{U}_+ равно $\tilde{U}_{\text{вх}}$, а напряжение $\tilde{U}_- = \tilde{I}\tilde{Z}_1$.

Исходя из этих уравнений, получаем коэффициент усиления схемы

$$\tilde{K}_B = \frac{\tilde{U}_{\text{ВЫХ}}}{\tilde{U}_{\text{ВХ}}} = \frac{1}{\frac{\tilde{Z}_1}{\tilde{Z}_1 + \tilde{Z}_2} + \frac{1}{\tilde{K}_o}}. \quad (3)$$

При $|\tilde{K}_o| \gg |(\tilde{Z}_1 + \tilde{Z}_2)/\tilde{Z}_1|$ получаем:

$$\tilde{K}_B(\omega) = 1 + \frac{\tilde{Z}_2(\omega)}{\tilde{Z}_1(\omega)}. \quad (4)$$

Положительный знак у коэффициента усиления означает, что выходной сигнал будет в одной фазе со входным, т.е. усилитель будет неинвертирующим. Используя разные $\tilde{Z}_2(\omega)$ и $\tilde{Z}_1(\omega)$, можно создать усилители с различными зависимостями коэффициента усиления $\tilde{K}_B(\omega)$ от частоты. Во-первых, взяв в качестве $\tilde{Z}_2(\omega)$ и $\tilde{Z}_1(\omega)$ резисторы, можно получить усилитель, коэффициент усиления которого не будет зависеть от частоты. Выбрав в качестве импедансов различные комбинации сопротивлений R и емкостей C , можно получить фильтр низких частот (ФНЧ), который пропускает низкие частоты и подавляет высокие, фильтр высоких частот (ФВЧ), полосовой усилитель и другие виды частотной зависимости коэффициента усиления. Примеры схем и соответствующих им частотных зависимостей коэффициента передачи \tilde{K}_B приведены на рисунках 4.

Стоит заметить, что тот же расчет коэффициента усиления можно провести, рассматривая импедансы \tilde{Z}_2 и \tilde{Z}_1 как цепь обратной связи. Для наглядности перерисуем ту же схему усилителя, выделив цепь обратной связи \tilde{B} (см. рис. 3б). Входным напряжением для цепи обратной связи является выходное напряжение усилителя $\tilde{U}_{\text{ВЫХ}}$. Коэффициент передачи для такой цепочки из двух импедансов равен $\frac{\tilde{Z}_1}{\tilde{Z}_2 + \tilde{Z}_1}$. Поскольку сигнал с цепи обратной связи подается на инвертирующий вход, коэффициент передачи цепи обратной связи меняет знак: $\tilde{B} = -\frac{\tilde{Z}_1}{\tilde{Z}_2 + \tilde{Z}_1}$.

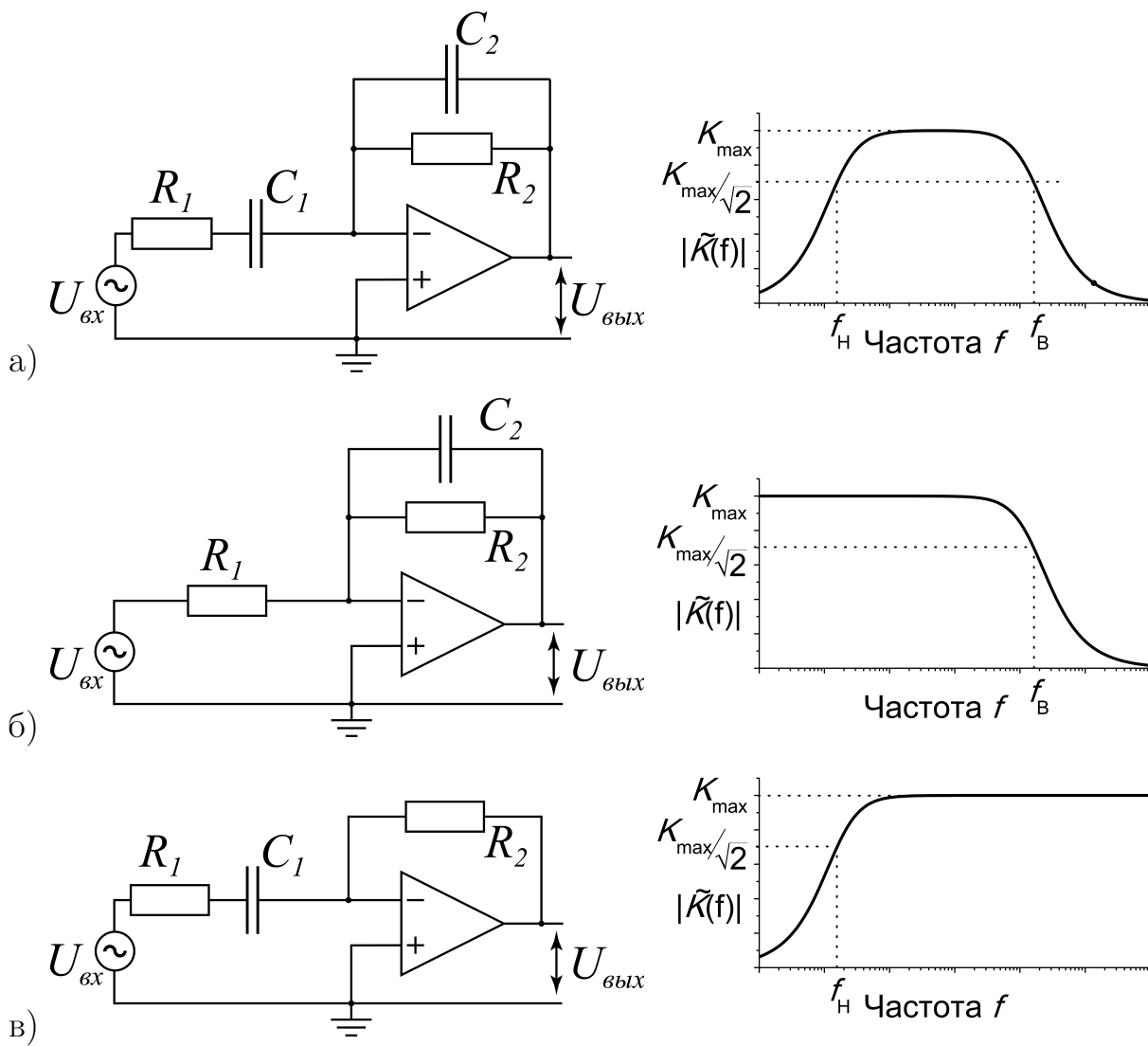


Рис. 4: Усилители с разными АЧХ на основе ОУ

Из формулы (1) для коэффициента усиления усилителя с обратной связью получаем:

$$\tilde{K}_B(\omega) = \frac{\tilde{K}_o}{1 - \tilde{B}\tilde{K}_o} = \frac{1}{\frac{1}{\tilde{K}_o} + \frac{\tilde{Z}_1}{\tilde{Z}_2 + \tilde{Z}_1}} \simeq 1 + \frac{\tilde{Z}_2}{\tilde{Z}_1}.$$

Инвертирующий усилитель на основе ОУ

Инвертирующим называют такой усилитель, у которого сигнал на выходе инвертирован относительно входного, т.е. $\tilde{U}_{\text{вых}} = -|\tilde{K}_B| \cdot \tilde{U}_{\text{вх}}$. Другими словами можно сказать, что в инвертирующем усилителе разность фаз между выходным и входным сигналами составляет π . Схема инвертирующего усилителя на основе ОУ с ООС приведена на рис. 5 (она похожа на схему неинвертирующего усилителя, только входной сигнал подается на инвертирующий вход ОУ). Рассчитаем коэффициент усиления \tilde{K}_B такого усилителя. Поскольку входное сопротивление ОУ очень велико, будем считать токи через импедансы \tilde{Z}_1 и \tilde{Z}_2 одинаковыми. Выходное напряжение представим в виде:

$$\tilde{U}_{\text{вых}} = \tilde{U}_{\text{вх}} + \tilde{I}\tilde{Z}_1 + \tilde{I}\tilde{Z}_2.$$

С другой стороны, напряжение на выходе работающего операционного усилителя связано с входными напряжениями \tilde{U}_+ и \tilde{U}_-

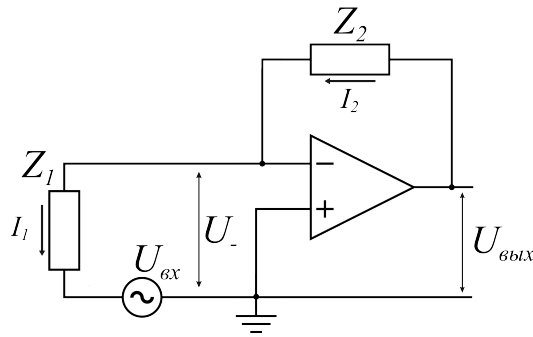


Рис. 5: Инвертирующий усилитель на основе ОУ

$$\tilde{U}_{\text{ВЫХ}} = \tilde{K}_o(\tilde{U}_+ - \tilde{U}_-).$$

При этом напряжение \tilde{U}_+ равно 0, а напряжение \tilde{U}_- рассчитывается из закона Кирхгофа:

$$\tilde{U}_- = \tilde{U}_{\text{ВХ}} + \tilde{I}\tilde{Z}_1.$$

Исходя из этих уравнений, получаем коэффициент усиления схемы

$$\tilde{K}_B(\omega) = \frac{\tilde{U}_{\text{ВЫХ}}}{\tilde{U}_{\text{ВХ}}} = -\frac{\tilde{Z}_2}{\tilde{Z}_1 + (\tilde{Z}_1 + \tilde{Z}_2)/\tilde{K}_o}. \quad (5)$$

При $|\tilde{K}_o| \gg |\tilde{Z}_2/\tilde{Z}_1|$ получаем:

$$\tilde{K}_B(\omega) = -\frac{\tilde{Z}_2(\omega)}{\tilde{Z}_1(\omega)}. \quad (6)$$

Отрицательный знак у коэффициента усиления означает, что выходной сигнал будет в противофазе со входным, т.е. будет инвертирован.

Используя разные $\tilde{Z}_2(\omega)$ и $\tilde{Z}_1(\omega)$, можно получать разные АЧХ инвертирующего усилителя(см. Рис. 4).

5 Частотные характеристики

5.1 Частотные характеристики ОУ

Для гармонических сигналов собственный коэффициент усиления операционного усилителя \tilde{K}_o зависит от частоты: являясь максимальным на низких частотах, он уменьшается с ростом частоты. Это обусловлено свойствами каскадов транзисторов, входящих в состав ОУ. Амплитудно-частотная характеристика ОУ подобна частотной характеристике (АЧХ) RC-цепи - простейшего фильтра низких частот (см. лабораторную работу „RC-цепи

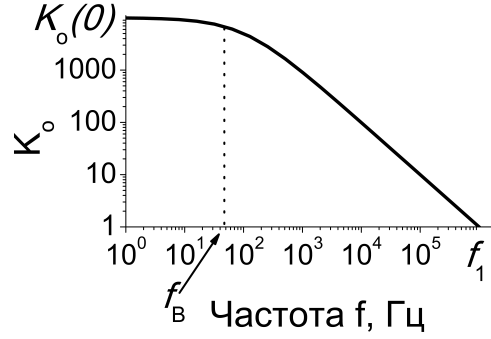


Рис. 6: Частотная зависимость собственного коэффициента усиления операционного усилителя(АЧХ).

первого порядка“) ([2], с.71)

$$\tilde{K}_o(f) = \frac{K_o(0)}{1 + if/f_B}, \quad (7)$$

где $K_o(0)$ - коэффициент передачи ОУ на нулевой частоте, f_B - верхняя граничная частота пропускания собственной АЧХ ОУ без обратной связи по уровню $1/\sqrt{2}$ (уменьшение коэффициента усиления на 3 дБ). Типичная амплитудно-частотная характеристика ОУ $|\tilde{K}_o(f)|$ показана на Рис. 6. Обозначив $f_1 = K_o(0)f_B$, получим:

$$|\tilde{K}_o(f)| = \frac{K_o(0)}{\sqrt{1 + (K_o(0)f/f_1)^2}}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что на некоторой частоте $f = f_1$ коэффициент усиления ОУ $|\tilde{K}_o(f)|$ становится примерно равным единице, так как $K_o(0) \gg 1$. Частота f_1 называется **частотой единичного усиления** и является важной характеристикой операционного усилителя. Обычно величина f_1 лежит в пределах от нескольких сотен кГц до нескольких МГц.

Из формулы (8) также видно, что на низких частотах $|\tilde{K}_o(f)|$ почти совпадает с $K_o(0)$. При $f = f_B$ коэффициент усиления уменьшается на 3дБ по сравнению с $K_o(0)$. На высоких частотах и при условии $K_o(0) \gg 1$

имеем:

$$|\tilde{K}_o(f)| = f_1/f. \quad (9)$$

Можно показать (см. Приложение А), что на высоких частотах $f \geq \bar{f}_B$ (где \bar{f}_B - верхняя частота усилителя с ООС) для усилителей с обратными связями (без частотно-зависимых элементов) собственный коэффициент усиления и коэффициент усиления с ООС практически совпадают, а частоту единичного усиления можно приближенно найти по формуле

$$f_1 \simeq f|\tilde{K}_B(f)|. \quad (10)$$

5.2 Полоса усиления и граничные частоты усилителей

На практике при усилении сигналов часто возникает необходимость использовать усилители с той или иной формой амплитудно-частотных характеристик. Для примера приведем расчет АЧХ инвертирующего усилителя на основе ОУ с использованием простых RC-цепей, изображенного на рис. 4а. Пусть в интересующем нас диапазоне частот $|\tilde{K}_o\tilde{B}| \gg 1$, то есть обратная связь является „глубокой“. В этом случае амплитудно-частотная характеристика имеет вид:

$$\tilde{K}_B(\omega) = \frac{\tilde{Z}_2(\omega)}{\tilde{Z}_1(\omega)} = \frac{R_2}{R_1} \times \frac{1}{1 + i\omega C_2 R_2} \times \frac{i\omega R_1 C_1}{1 + i\omega R_1 C_1}, \quad (11)$$

где $\tilde{Z}_1(\omega) = R_1 + 1/i\omega C_1$ и $\tilde{Z}_2(\omega) = \frac{R_2}{1+i\omega R_2 C_2}$ - импедансы обратной связи. Из качественного анализа выражения (11) следует, что при $\omega \rightarrow 0$ знаменатель $|\tilde{Z}_1(\omega)| \rightarrow \infty$ и $|\tilde{K}_B(\omega)| \rightarrow 0$; при $\omega \rightarrow \infty$ числитель $|\tilde{Z}_1(\omega)| \rightarrow 0$ и коэффициент усиления также будет стремиться к нулю.

В области низких частот определяющим будет последний множитель, а в области высоких частот - второй. Соответственно, при условии $R_2 C_2 \ll$

R_1C_1 нижняя и верхняя частоты такого усилителя будут (см. лабораторную работу „RC-цепи первого порядка“)

$$f_H = 1/2\pi R_1 C_1, \quad f_B = 1/2\pi R_2 C_2. \quad (12)$$

В расчетах предполагалось, что $|\tilde{B}\tilde{K}_o| \gg 1$. Если это условие не выполняется, то в этом случае следует учитывать зависимость \tilde{K}_o от частоты и использовать формулу (5).

Можно доказать, что и в случае неинвертирующего усилителя с теми же импедансами $\tilde{Z}_1(\omega) = R_1 + 1/i\omega C_1$ и $\tilde{Z}_2(\omega) = \frac{R_2}{1+i\omega R_2 C_2}$, верхняя и нижняя частоты будут определяться формулами (12) (см. [4], с. 62-67).

Если из схемы усилителя исключить емкость C_2 , то получим фильтр высоких частот, который пропускает только высокие частоты $f > f_H = 1/2\pi R_1 C_1$ (см. рис. 4в); если же исключить C_1 , то получим фильтр нижних частот, пропускающий только низкие частоты $f < f_B = 1/2\pi R_2 C_2$ (см. рис. 4б).

6 Практическая часть

6.1 Измерение частоты единичного усиления.

Измерение частоты единичного усиления f_1 проводится косвенным методом на падающем участке АЧХ неинвертирующего усилителя (см. рис. 3), на котором коэффициент усиления схемы с ООС $\tilde{K}_B(f)$ практически совпадает с собственным коэффициентом усиления ОУ $\tilde{K}_o(f)$.

Для этого соберите неинвертирующий усилитель с цепью обратной связи, имеющей параметры $\tilde{Z}_1 = R_1 = 1$ кОм и $\tilde{Z}_2 = R_2 = 100$ кОм. Настройте генератор сигналов так, чтобы амплитуда гармонического напряжения на его выходе составляла около 10мВ. Подключите источник питания к опера-

ционному усилителю. На неинвертирующий вход усилителя подайте сигнал с генератора. На один вход осциллографа подайте выходной сигнал собранного усилителя, другой вход осциллографа соедините с входом усилителя.

Измерьте зависимость модуля коэффициента усиления $|\tilde{K}_B(f)|$ от частоты сигнала, подаваемого на вход усилителя. Обычно удобно измерять зависимость, увеличивая частоту для каждой следующей измеряемой точки в 3 раза вплоть до частоты единичного усиления. Величину амплитуды входного сигнала на каждой частоте нужно выбрать такой, чтобы выходной сигнал не „обрезался“ и не имел нелинейных искажений.

Постройте график зависимости $|\tilde{K}_B(f)|$ в логарифмическом масштабе по обоим осям. Используя формулу (10), определите значение частоты единичного усиления f_1 для нескольких частот на падающем участке полученной кривой. Значения f_1 , полученные таким способом в указанном диапазоне частот, должны получаться примерно одинаковыми.

6.2 Расчет усилителя на основе ОУ

Типичное задание: Для конкретной схемы усилителя (см. рис. 4) преподавателем заданы: максимальный коэффициент усиления K_{\max} , f_H и(или) f_B , форма АЧХ усилителя, инвертирующий или неинвертирующий усилитель.

По заданной преподавателем АЧХ усилителя определите схему цепи отрицательной обратной связи. Используйте резисторы, имеющие сопротивления в пределах от 1 кОм до 300 кОм (много больше выходного сопротивления ОУ, но много меньше входного сопротивления осциллографа). Сопротивление R_1 выбирается произвольно в этом диапазоне, а $R_2 = K_{\max} \cdot R_1$ (для инвертирующего усилителя) или $R_2 = (K_{\max} - 1) \cdot R_1$ (для неинвертирующего).

Исходя из заданных значений верхней и(или) нижней частот, а также выбранных сопротивлений, рассчитайте емкости C_1 и(или) C_2 (см. формулы (12)). Проверьте, есть ли полученные вами значения емкостей в наличии, при необходимости скорректируйте расчет.

6.3 Измерение АЧХ и ФЧХ усилителя с обратной связью на основе ОУ

Перед сборкой схемы усилителя измерьте величины взятых вами сопротивлений и емкостей и запишите полученные значения. При расчете теоретических кривых используйте эти значения.

После сборки усилителя, подключите к нему питание, вход усилителя соедините с генератором гармонических сигналов и одним из каналов осциллографа, выход - с другим каналом осциллографа.

Проверьте, что усилитель действительно работает. Для этого подайте сигнал на частоте между верхней и нижней заданными частотами (для схем с единственной емкостью в частотных диапазонах $f > 10 \cdot f_H$ и $f < f_B/10$) и оцените коэффициент усиления: он должен быть близок к K_{\max} (см. рис. 4). Если в выходном сигнале появляются нелинейные искажения, то надо уменьшить амплитуду входного гармонического сигнала.

Измерьте зависимость коэффициента передачи $\tilde{K}_B(f)$ от частоты входного сигнала (АЧХ $|\tilde{K}_B(f)|$ и ФЧХ $\arg \tilde{K}_B(f)$) в диапазоне частот от $f_H/10$ до $f_B \cdot 10$ (для схем с единственной емкостью в диапазоне $f_H/10$ до выхода на плато и с плато до $f_B \cdot 10$). Преподаватель может задать любую другую цепь ООС для собираемого усилителя.

6.4 Сравнение экспериментальных данных с теоретическими

Постройте измеренные графики АЧХ $|\tilde{K}_B(f)|$ и ФЧХ $\arg \tilde{K}_B(f)$ усилителя в логарифмическом масштабе по обоим осям. Нанесите на график АЧХ теоретическую кривую, рассчитанную для ваших значений R и C по формулам (4) или (6).

Определите максимальный коэффициент усиления, найдите верхнюю и(или) нижнюю частоту для экспериментально измеренной АЧХ. Сравните экспериментально измеренные значения этих параметров с расчетными для взятых вами элементов. Объясните отличия.

7 Контрольные вопросы

1. Что такое операционный усилитель?
2. Что нужно подключить к операционному усилителю для его нормальной работы?
3. Какие характеристики операционного усилителя вы знаете? Расскажите, как их определить и каковы их типичные значения.
4. Что такое положительная и отрицательная обратная связь?
5. Нарисуйте схему инвертирующего (неинвертирующего) усилителя, выведите формулы их коэффициентов усиления.
6. Получите формулу для коэффициента усиления, нарисуйте АЧХ, найдите верхнюю/нижнюю частоту для схемы, заданной преподавателем (например, для схем на рис.4).

7. В каких случаях необходимо учитывать нелинейность операционного усилителя?

8 Содержание отчета

- Принципиальные схемы неинвертирующего и инвертирующего усилителей на основе ОУ.
- Таблицы с данными для построения АЧХ и ФЧХ усилителей.
- Графики АЧХ и ФЧХ усилителей.
- Расчеты верхней и нижней частот, коэффициентов усиления, выполненные по результатам измерений.
- Анализ результатов расчета и эксперимента.

Приложение А: Расчет частотных характеристик усилителей с обратной связью

Теперь остановимся на частотных характеристиках усилителя, строящегося на основе ОУ с обратной связью. Как было показано, для частот $f \gg f_B$ выражение (9) принимает вид

$$|\tilde{K}_o(f)|f = K_o(0)f_B = \text{const.} \quad (13)$$

Коэффициент усиления при наличии цепи отрицательной обратной связи с коэффициентом передачи \tilde{B} имеет вид:

$$|\tilde{K}_B(\omega)| = \frac{\tilde{K}_o(\omega)}{1 - \tilde{B}(\omega)\tilde{K}_o(\omega)}. \quad (14)$$

При $|\tilde{B}\tilde{K}_o(\omega)| \ll 1$ амплитудно-частотная характеристика усилителя $\tilde{K}_B(f)$ совпадает с характеристикой ОУ $\tilde{K}_o(f)$ (см. Рис. 7).

Найдем верхнюю частоту $\bar{\omega}_B = 2\pi\bar{f}_B$ для неинвертирующего усилителя с цепью обратной связи, если $\tilde{Z}_1(\omega) = R_1$ и $\tilde{Z}_2(\omega) = R_2$.

Из соотношений (14,7), считая, что на частотах $\omega \gg \bar{\omega}_B$ $\tilde{B} = -R_1/(R_1 + R_2)$ и $|K_o(0)| \gg 1$, получим

$$|\tilde{K}_B(\omega)| \simeq \frac{1}{B\sqrt{1 + (\omega/\omega_B|\tilde{B}|K_o(0))^2}}. \quad (15)$$

Следовательно, верхняя частота усилителя будет равна

$$\bar{\omega}_B = \omega_B K_o(0)/K_m(\bar{\omega}_B), \quad (16)$$

где $K_m(\bar{\omega}_B) = 1 + R_2/R_1 = 1/|\tilde{B}|$ – коэффициент усиления неинвертирующего усилителя. Отсюда следует

$$\bar{f}_B K_m(\bar{f}_B) = f_B K_o(0) = \text{const}, \quad (17)$$

так как $K_o(0)$ и f_B являются характеристиками конкретного ОУ и не зависят от факта наличия цепи обратной связи. Видно, что при $K_m(\bar{f}_B) = 1$ верхняя частота \bar{f}_B есть частота единичного усиления f_1 . Выражение (17) при этом имеет вид:

$$K_m(\bar{f}_B)\bar{f}_B = f_1,$$

которое также справедливо и для частот $f > \bar{f}_B$.

Таким образом, произведение коэффициента передачи ОУ с обратной связью на полосу пропускания усилителя равно полосе единичного усиления. Например, при создании усилителя с полосой пропускания 20 кГц на основе ОУ, частота единичного усиления которого $f_1 \simeq 0.8\text{МГц}$, коэффициент передачи усилителя не может быть более величины

$$|K_m| = f_1/\bar{f}_B = 40. \quad (18)$$

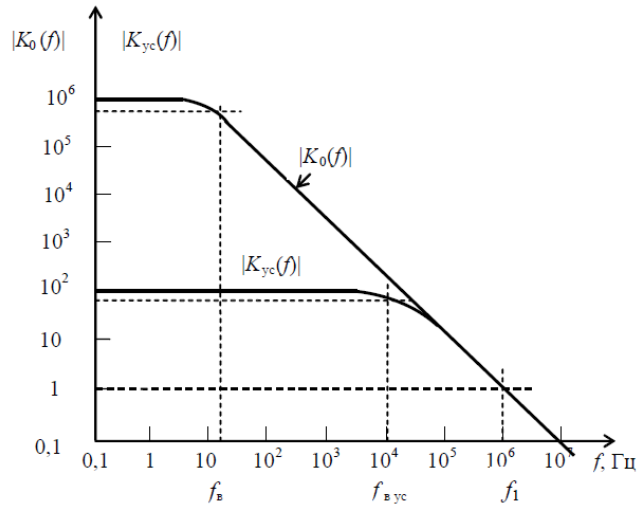


Рис. 7: Типичные зависимости собственного коэффициента передачи ОУ $\tilde{K}_o(f)$ и коэффициента передачи ОУ с цепью ООС $\tilde{K}_{yc}(f)$ от частоты

Список литературы

- [1] Основы радиофизики. А.А. Белов, Г.В. Белокопытов, Ю.И. Кузнецов, А.С. Логгинов, И.В. Иванов, К.С. Ржевкин; под ред. А.С. Логгинова.— М.: Изд-во УРСС, 1996.
- [2] И.Т. Трофименко, Е.В. Лебедева, Н.С. Седлецкая. Практикум по радиоэлектронике. Под ред. А.П. Сухорукова.— М.: Изд-во Мос. ун-та, 1997.
- [3] Краткое пособие по радиофизике. Ю.И. Воронцов, И.А. Биленко; под ред. А.С. Логгинова, Изд-во КДУ, 2007.
- [4] Ю.И. Кузнецов, А.С. Логгинов, В.П. Митрофанов. Усилители и РС-генераторы низкой частоты на транзисторах и интегральных схемах.— М.: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2009.