

Московский государственный университет

им М.В. Ломоносова

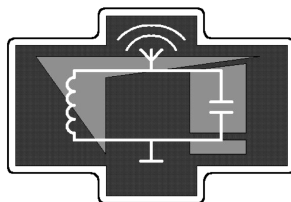
Физический факультет

---

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.

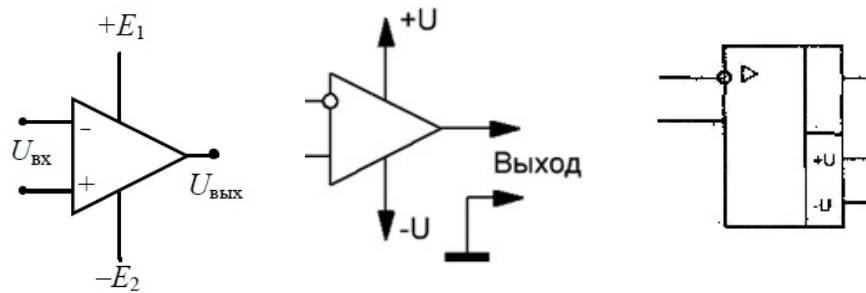


Рис. 1: Обозначения операционных усилителей

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  $\pi$  (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-

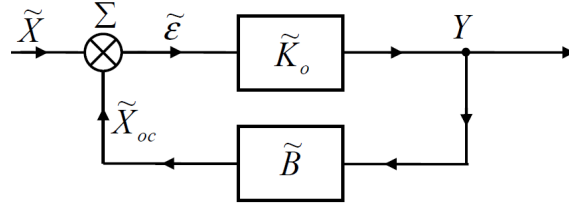


Рис. 2: Усилитель, охваченный цепью обратной связи

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. Подробней о применении положительной обратной связи в генераторах будет рассказано в лабораторной работе „РС-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.

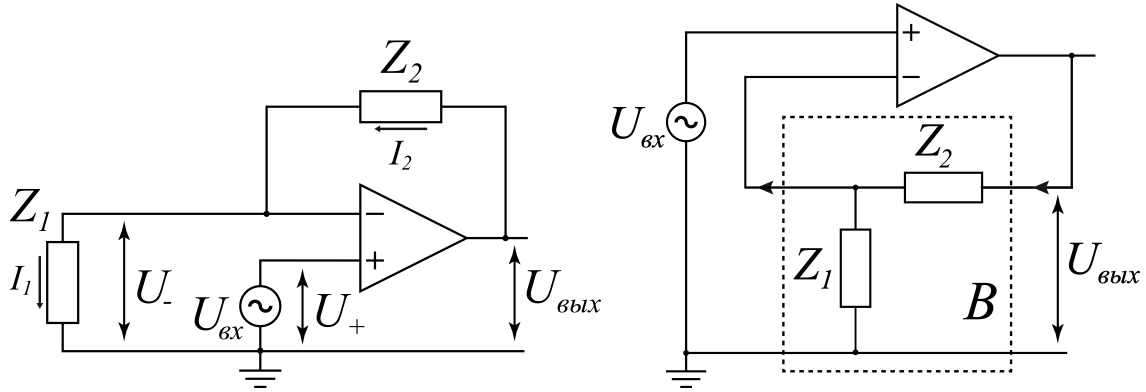


Рис. 3: Неинвертирующий усилитель на основе ОУ: (а) принципиальная схема, (б) та же схема с более наглядным обозначением обратной связи

## 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:  $\tilde{B} = -\frac{\tilde{Z}_1}{\tilde{Z}_2 + \tilde{Z}_1}$ .

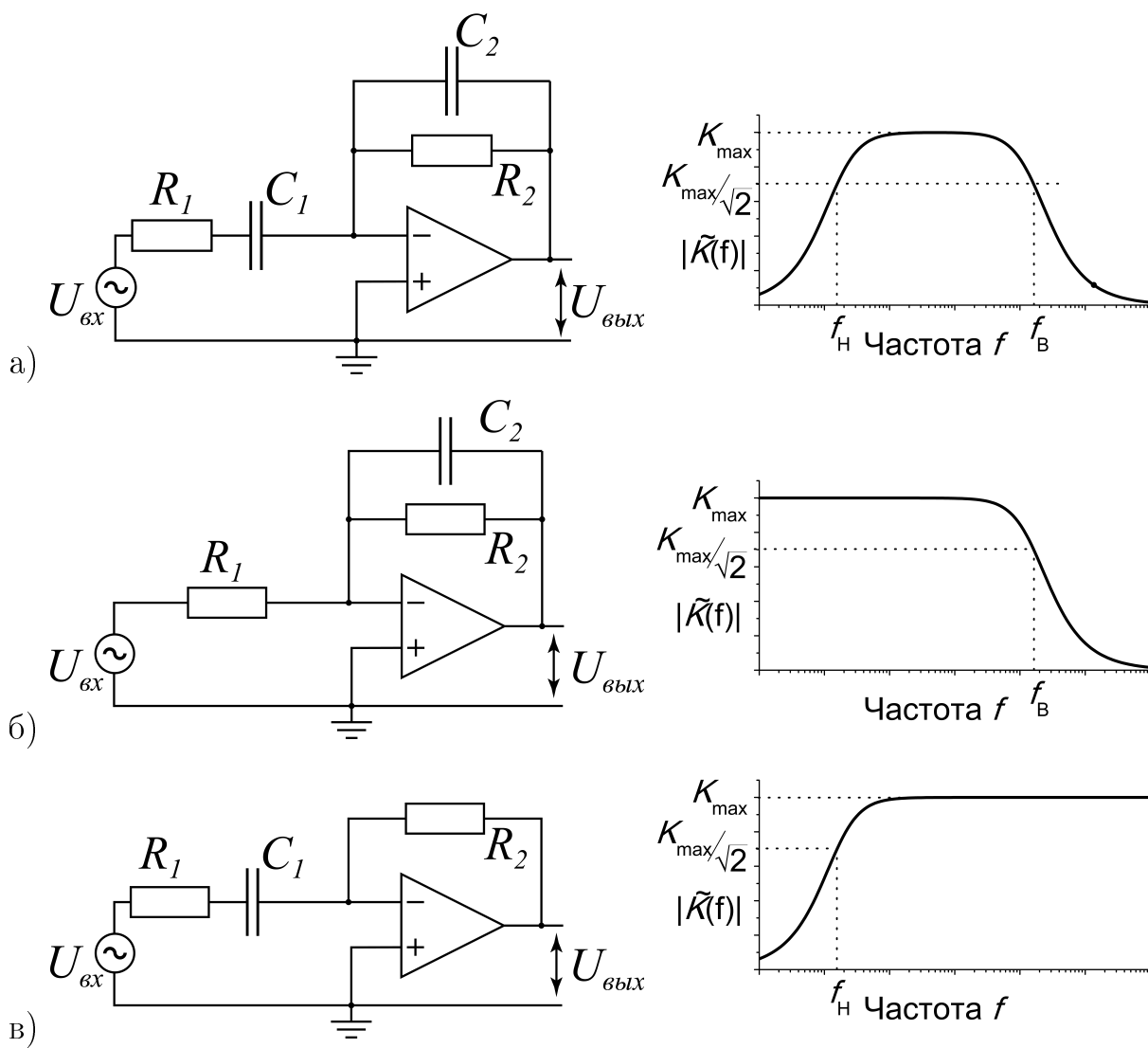


Рис. 4: Усилители с разными АЧХ на основе ОУ

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  $\pi$ . 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  $\tilde{U}_-$

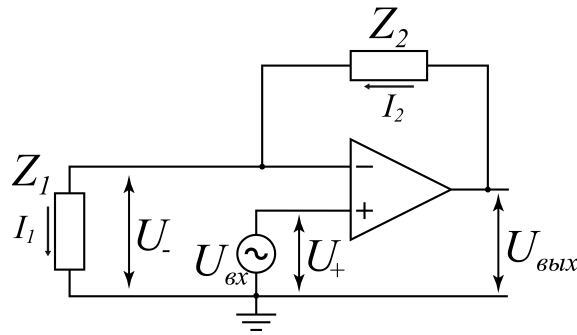


Рис. 5: Инвертирующий усилитель на основе ОУ

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

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

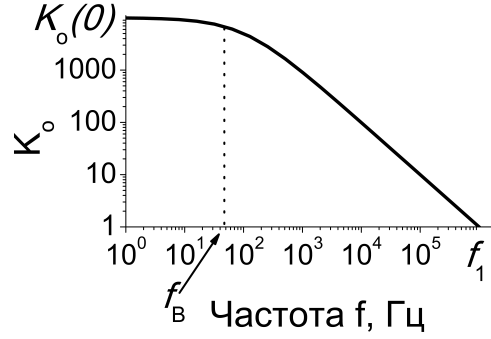


Рис. 6: Частотная зависимость собственного коэффициента усиления операционного усилителя(АЧХ).

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

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

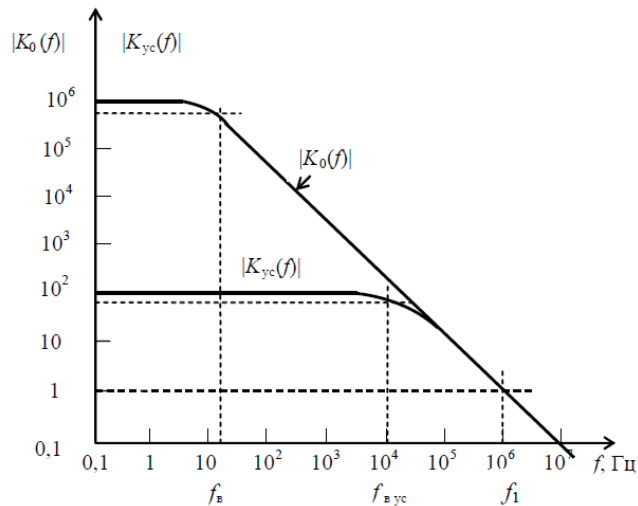


Рис. 7: Типичные зависимости собственного коэффициента передачи ОУ  $\tilde{K}_o(f)$  и коэффициента передачи ОУ с цепью ООС  $\tilde{K}_{yc}(f)$  от частоты

## 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.