

**Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Физико-технический факультет
Кафедра оптоэлектроники**

**Методическое пособие к лабораторной работе
ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ В РЕЖИМЕ
КОМПАРАТОРА**

Краснодар 2019

Цель работы: Ознакомиться с принципом действия операционного усилителя, с его применением в качестве компаратора и триггера Шмита.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Операционный усилитель (**ОУ**, *OpAmp* от *operational amplifier*) - усилитель постоянного тока с дифференциальным входом и, как правило, единственным выходом, имеющий высокий коэффициент усиления.

ОУ почти всегда используются в схемах с отрицательной обратной связью, которая, благодаря высокому коэффициенту усиления ОУ, полностью определяет коэффициент передачи полученной схемы.

В настоящее время ОУ получили широкое применение, как в виде отдельных чипов, так и в виде функциональных блоков в составе более сложных интегральных схем. Такая популярность обусловлена тем, что ОУ является универсальным блоком с характеристиками, близкими к идеальным, на основе которого можно построить множество различных электронных узлов.

Применение ОУ в электронике чрезвычайно широко — операционный усилитель, вероятно, наиболее часто встречающийся элемент в аналоговой схемотехнике. Добавление лишь нескольких внешних компонентов делает из ОУ конкретную схему аналоговой обработки сигналов. Многие стандартные ОУ стоят всего несколько центов в крупных партиях (1000шт), но усилители с нестандартными характеристиками (в интегральном или дискретном исполнении) могут стоить \$100 и выше.

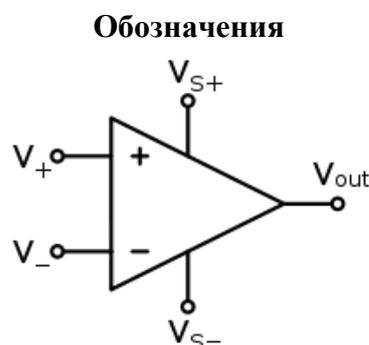


Рис. 1. Обозначение операционного усилителя на схемах

На рисунке 1 показано схематичное изображение операционного усилителя. Выводы имеют следующее значение:

V_+ – неинвертирующий вход;

V_- – инвертирующий вход;

V_{out} – выход;

V_{S+} – плюс источника питания;

V_{S-} – минус источника питания.

Выводы питания (V_{S+} и V_{S-}) могут быть обозначены по-разному. **Часто выводы питания не рисуют на схеме, чтобы не загромождать её несущественными деталями**, при этом способ подключения этих выводов явно не указывается или считается очевидным. При обозначении ОУ на схемах можно менять местами инвертирующий и неинвертирующий входы, если это удобно; выводы питания, как правило, всегда располагают единственным способом (положительный вверху).

Указанные пять выводов присутствуют в любом ОУ, они необходимы для его функционирования.

ОСНОВЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОУ

ПИТАНИЕ

В общем случае ОУ использует двуполярное питание, то есть источник питания имеет три вывода с потенциалами:

- U_+ (к нему подключается V_{S+});
- 0 (аналоговый ноль);
- U_- (к нему подключается V_{S-})

Вывод источника питания с нулевым потенциалом непосредственно к ОУ обычно не подключается, но, как правило, является сигнальной землёй и используется для создания обратной связи. Часто вместо двуполярного используется более простое однополярное, а общая точка создаётся искусственно резисторным делителем или совмещается с отрицательной шиной питания.

ОУ способны работать в широком диапазоне напряжений источников питания, типичное значение для ОУ общего применения от $\pm 1,5$ В до ± 15 В при двуполярном питании (то есть $U_+ = 1,5 \dots 15$ В, $U_- = -15 \dots -1,5$ В, допускается значительный переко).

ПРОСТЕЙШЕЕ ВКЛЮЧЕНИЕ ОУ

Рассмотрим работу ОУ как отдельного дифференциального усилителя, то есть без включения в рассмотрение каких-либо внешних компонентов. В этом случае ОУ ведёт себя как обычный усилитель с дифференциальным входом, то есть поведение ОУ описывается следующим образом:

$$V_{\text{out}} = (V_+ - V_-) \cdot K_U \quad (1)$$

где V_{out} – напряжение на выходе;

V_+ – напряжение на неинвертирующем входе;

V_- – напряжение на инвертирующем входе;

K_U – коэффициент усиления ОУ по напряжению с разомкнутой петлёй обратной связи.

Все напряжения отсчитываются относительно общей точки схемы.

Коэффициент усиления с разомкнутой петлёй обратной связи K_U нормируется в очень широких пределах и может изменяться в тысячи раз (зависит сильнее всего от частоты сигнала и температуры). Коэффициент усиления очень велик (типичное значение 10^6 по постоянному току) и не поддаётся регулировке.

Идеальный операционный усилитель

Для того, чтобы рассматривать функционирование ОУ в режиме с обратной связью, необходимо вначале ввести понятие *идеального операционного усилителя*. Идеальный ОУ является физической абстракцией, то есть не может реально существовать, однако позволяет существенно упростить рассмотрение работы схем на ОУ благодаря использованию простых математических моделей.

Идеальный ОУ описывается формулой (1) и обладает следующими характеристиками:

- 1) Бесконечно большой коэффициент усиления с разомкнутой петлей обратной связи K_U .
- 2) Нулевое усиление синфазного сигнала.
- 3) Бесконечно большое входное сопротивление входов V_- и V_+ . Другими словами, ток, протекающий через эти входы, равен нулю.

- 4) Нулевое выходное сопротивление выхода ОУ.
- 5) Способность выставить на выходе любое значение напряжения.
- 6) Бесконечно большая скорость нарастания напряжения на выходе ОУ.

ОТЛИЧИЯ РЕАЛЬНЫХ ОУ ОТ ИДЕАЛЬНОГО

Параметры ОУ, характеризующие его неидеальность, можно разбить на группы:

Ограниченное усиление: коэффициент K_U не бесконечен (типичное значение $10^5 \div 10^6$ на постоянном токе). Этот эффект заметно проявляется только в случаях, когда коэффициент передачи каскада с ОУ отличается от параметра K_U в небольшое число раз (усиление каскада отличается от $G_{openloop}$ на $1 \div 2$ порядка или еще меньше).

Ненулевой входной ток (или, что почти то же самое, **ограниченное входное сопротивление**): типичные значения входного тока составляют $10^{-9} \div 10^{-12}$ А. Это накладывает ограничения на максимальное значение сопротивлений в цепи обратной связи, а также на возможности согласования по напряжению с источником сигнала. Некоторые ОУ имеют на входе дополнительные цепи для защиты входа от чрезмерного напряжения — эти цепи могут значительно ухудшить входное сопротивление. Поэтому некоторые ОУ выпускаются в защищенной и незащищенной версии.

Ненулевое выходное сопротивление. Данное ограничение не имеет большого значения на низких частотах или при небольшой ёмкости нагрузки, так как наличие обратной связи эффективно уменьшает выходное сопротивление каскада на ОУ (практически до сколь угодно малых значений).

Ненулевое усиление синфазного сигнала. Идеальный ОУ усиливает только разницу входных напряжений, сами же напряжения значения не имеют. В реальных ОУ значение входного синфазного напряжения оказывает некоторое влияние на выходное напряжение. Данный эффект определяется параметром «коэффициент ослабления синфазного сигнала» (КОСС, англ. *common-mode rejection ratio, CMRR*), который показывает, во сколько раз приращение напряжения на выходе меньше, чем вызвавшее его приращение синфазного напряжения на входе ОУ. Типичные значения: $10^4 \div 10^6$.

Насыщение — ограничение диапазона возможных значений выходного напряжения. Обычно выходное напряжение не может выйти за пределы напряжения питания. Насыщение имеет место в случае, когда выходное напряжение «должно быть» больше максимального или меньше минимального выходного напряжения. ОУ не может выйти за пределы, и выступающие части выходного сигнала «срезаются» (то есть ограничиваются).

В моменты насыщения усилитель не действует в соответствии с формулой (1), что вызывает отказ в работе ООС и появлению разности напряжений на его входах, что обычно является признаком неисправности схемы (и это легко обнаруживаемый наладчиком признак проблем). Исключение - работа **ОУ** в режиме компаратора.

Ограниченная скорость нарастания. Выходное напряжение ОУ не может измениться мгновенно (рис. 2). Скорость изменения выходного напряжения измеряется в вольтах за микросекунду, типичные значения $1 \div 100$ В/мкс. Параметр обусловлен временем, необходимым для перезаряда внутренних ёмкостей.

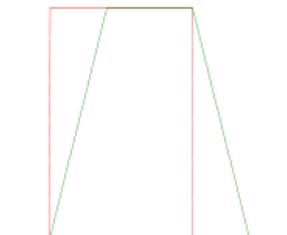


Рис. 2. Искажение входного П-образного сигнала при ограниченной скорости нарастания выходного сигнала ОУ.

Ограничения тока и напряжения

Ограниченное выходное напряжение. У любого ОУ потенциал на выходе не может быть выше, чем потенциал положительной шины питания и не может быть ниже, чем потенциал отрицательной шины питания (в случае, если нагрузка отсутствует, или является резистивной и не содержит источник тока). Другими словами, выходное напряжение не может выйти за пределы питающего напряжения.

Ограниченный выходной ток. Большинство ОУ широкого применения имеют встроенную защиту от превышения выходного тока — типичное значение максимального тока 25 мА. Защита предотвращает перегрев и выход ОУ из строя.

Ограниченная выходная мощность. Большинство ОУ предназначено для применений, не требовательных к мощности: сопротивление нагрузки не должно быть менее 2 кОм.

КЛАССИФИКАЦИЯ ОУ

По типу элементной базы:

- на полевых транзисторах;
- на биполярных транзисторах
- на электронных лампах (для общего применения устарели, применяются только в специальных схемах).

По области применения:

Выпускаемые промышленностью операционные усилители постоянно совершенствуются, параметры ОУ приближаются к идеальным. Однако улучшить все параметры одновременно технически невозможно или нецелесообразно из-за дороговизны полученного чипа. Для того, чтобы расширить область применения ОУ, выпускаются различные их типы, в каждом из которых один или несколько параметров являются выдающимися, а остальные на обычном уровне (или даже чуть хуже). Это оправдано, так как в зависимости от сферы применения от ОУ требуется высокое значение того или иного параметра, но не всех сразу. Отсюда вытекает классификация ОУ по областям применения.

– **Индустриальный стандарт.** Так называют широко применяемые, очень дешевые ОУ общего применения со средними характеристиками.

– **Прецизионные** ОУ имеют очень малые напряжения смещения, применяются в точных измерительных схемах. Обычно ОУ на биполярных транзисторах по этому показателю несколько лучше, чем на полевых. Также от прецизионных ОУ требуется долговременная стабильность параметров.

– **С малым входным током (электрометрические)** ОУ. Все ОУ, имеющие полевые транзисторы на входе, обладают малым входным током. Но среди них существуют специальные ОУ с исключительно малым входным током. Чтобы полностью реализовать их преимущества, при проектировании устройств с их использованием необходимо даже учитывать утечку тока по печатной плате.

– **Микроомные и программируемые** ОУ потребляют малый ток на собственное питание. Такие ОУ не могут быть быстродействующими, так как малый потребляемый ток и высокое быстродействие — взаимоисключающие требования. Программируемыми называются ОУ, для которых все внутренние токи покоя можно задать с помощью внешнего тока, подаваемого на специальный вывод ОУ.

– **Мощные (сильноточные)** ОУ могут отдавать большой ток в нагрузку, то есть допустимое сопротивление нагрузки меньше стандартных 2 кОм, и может составлять до 50 Ом.

– **Низковольтные** ОУ работоспособны при напряжении питания 3 В и даже ниже. Как правило, они имеют *rail-to-rail* выход (т.е. выходной сигнал может изменяться «от шины до шины»).

- **Высоковольтные ОУ.** Все напряжения для них (питания, синфазное входное, максимальное выходное) значительно больше, чем для ОУ широкого применения.
 - **Быстродействующие ОУ** имеют высокую скорость нарастания и частоту единичного усиления. Такие ОУ не могут быть микромощными, и как правило выполнены на биполярных транзисторах.
 - **Малощумящие ОУ.**
 - **Звуковые ОУ.** Имеют минимально возможный коэффициент гармоник (*THD*).
 - **Для однополярного питания.** CMOS ОУ обеспечивают выходное напряжение, практически равное напряжению питания (rail-to-rail, R2R), биполярные ОУ - примерно на 1.2 В меньше, что существенно при небольших значениях $U_{сс}$.
 - **Специализированные ОУ.** Обычно разработаны для конкретных задач (подключение фотодатчика, магнитной головки, и др.). Могут содержать в себе готовые цепи ООС или отдельные необходимые для этого прецизионные резисторы.
- Возможны также комбинации данных категорий, например, *прецизионный быстродействующий ОУ*.

АНАЛОГОВЫЙ КОМПАРАТОР НА ОПЕРАЦИОННОМ УСИЛИТЕЛЕ

Компаратор (аналоговых сигналов) (англ. comparator — сравнивающее устройство) — электронная схема, принимающая на свои входы два аналоговых сигнала и выдающая логическую «1», если сигнал на прямом входе («+») больше, чем на инверсном входе («-»), и логический «0», если сигнал на прямом входе меньше, чем на инверсном входе (рис. 3).

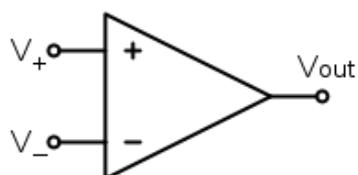


Рис. 3. Компаратор

Одно напряжение сравнения двоичного компаратора делит весь диапазон входных напряжений на два поддиапазона. Двоичный логический сигнал (бит) на выходе двоичного компаратора указывает, в каком из двух поддиапазонов находится входное напряжение.

Компаратор сравнивает два напряжения и выдает на выходе одно из двух состояний в зависимости от того, какое из входных напряжений больше.

$$V_{out} = \begin{cases} V_{S+} & V_1 > V_2 \\ V_{S-} & V_1 < V_2 \end{cases}$$

где V_{S+} – положительное напряжение питания;

V_{S-} – отрицательное напряжение питания.

Простейший компаратор представляет собой дифференциальный усилитель.

ТРИГГЕР ШМИТТА

Триггер Шмитта (не Шмидта) — электронный двухпозиционный релейный (переключающий) элемент, статическая характеристика которого имеет зону неоднозначности (петлю гистерезиса). Триггер Шмитта используется для восстановления цифрового сигнала, искаженного в линиях связи, фильтрах дребезга, в качестве двухпозиционного регулятора в системах автоматического регулирования, в двухпозиционных стабилизаторах-регуляторах напряжения. Этот триггер стоит особняком в семействе триггеров: он имеет один аналоговый вход и цифровой выход.

Для формирования гистерезисной передаточной характеристики компараторы охватывают положительной обратной связью (рис. 4). Эта мера позволяет избежать быстрых нежелательных переключений состояния выхода, обусловленном шумами во входном сигнале, при медленно изменяющемся входном сигнале.

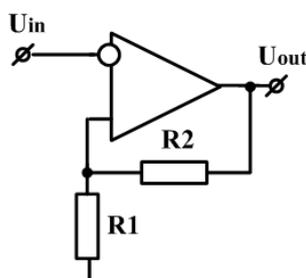


Рис. 4. Инвертирующий триггер Шмита

При подаче эталонного напряжения сравнения на инвертирующий вход входной сигнал подаётся на неинвертирующий вход, и компаратор является неинвертирующим.

При подаче эталонного напряжения сравнения на неинвертирующий вход входной сигнал подаётся на инвертирующий вход, и компаратор является инвертирующим.

Статическая характеристика триггера Шмитта представляет собой характеристику переключателя, но с прямоугольной петлёй гистерезиса (рис.5).

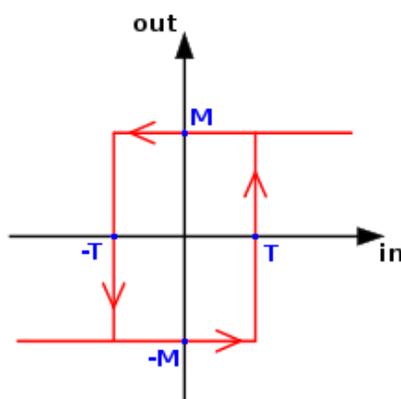


Рис. 4. Петля гистерезиса идеального триггера Шмитта.

Неоднозначность статической характеристики позволяет утверждать, что триггер Шмитта, как и другие триггеры обладает свойством памяти — его состояние в зоне неоднозначности определяется предысторией — ранее действовавшим входным сигналом.

Триггеры Шмитта применяются там, где нужно исключить «дребезг» напряжения (хаотическое изменение, вызванное неустойчивым контактом, помехой, механическим переключением и т.п.). Например, механический выключатель в момент включения или выключения может быть причиной кратковременных замыканий и размыканий цепи, пока, наконец, переключение не будет выполнено окончательно. Такой дребезг длится микро- или даже наносекунды, но некоторые схемы (особенно цифровые) могут быть чувствительны к нему. Триггер Шмитта позволяет устранить это явление.

Другим примером может быть включение / выключение какого-либо прибора на основании данных датчика. Пусть нужно включать нагреватель при понижении температуры, и выключать его, когда температура нормализовалась. Применение простого компаратора (устройства, выдающего на выход напряжение в зависимости от соотношения

двух входных) приводит к своеобразному дребезгу, если температура находится вблизи точки переключения.

Компараторы в чистом виде вообще очень редко используются в схемах из-за переходных процессов при напряжении, близком к напряжению переключения. Чтобы исключить эти процессы, вводится небольшая положительная обратная связь, которая превращает компаратор в триггер Шмитта с небольшим гистерезисом.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

ВНИМАНИЕ!!! Питание операционного усилителя (+/- 15 В) ВСЕГДА ВКЛЮЧАЕТСЯ ПЕРВЫМ А ВЫКЛЮЧАЕТСЯ ПОСЛЕДНИМ! Несоблюдение этого правила ведет к выходу ОУ из строя.

Под руководством преподавателя соберите и исследуйте работу следующих схем:

- 1. Неинвертирующий компаратор.**
- 2. Инвертирующий компаратор.**
- 3. Неинвертирующий компаратор с заданным порогом переключения.**
- 4. Инвертирующий триггер Шмитта.**
- 5. Неинвертирующий триггер Шмитта.**

Контрольные вопросы

1. Какие усилители называют операционными?
2. Что подразумевает понятие идеального ОУ?
3. Перечислите основные характеристики операционного усилителя.
4. Перечислите порядки величин основных параметров ОУ.
5. Как классифицируются операционные усилители?
6. Объясните вид передаточной характеристики компаратора.
7. Чем схема компаратора отличается от схемы усилителя?
8. Какие выходные напряжения могут формироваться на выходе компаратора?
9. Какую передаточную характеристику имеет гистерезисный компаратор?
10. Как можно изменить порог срабатывания однопорогового компаратора?
11. Как задается смещение передаточной характеристики в гистерезисных компараторах?

Основная литература

1. Кузовкин В.А., Филатов В. В. Электротехника и электроника : учебник для бакалавров : учебное пособие для студентов вузов. М.: Юрайт, 2013.
2. Шишкин Г.Г. Электроника: учебник для студентов вузов. М. : Дрофа, 2009.

Дополнительная литература

1. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. М.: «Мир». 1983.
2. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. М.: «Мир». 1982.
3. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.Л., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника: Полный курс. Учебник для высших учебных заведений. М: Горячая Линия - Телеком, - 2005 г., 768с
5. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. Ленинград.: Энергоатомиздат. 1988.