

Конец этой методички как раз будет в чистом виде третий аналоговый прак.

Что такое усилители и зачем они вообще нужны?

Веками музыка была акустической. Певцы пели серенады под окнами на гитаре – ах, эта прекрасная культура романсов! Но акустическая гитара – штука негромкая. Хочется погромче – приходи на концерт классической музыки, где только количеством музыкальных инструментов становилось громко.

Но всё изменилось, когда пришёл ОН

УСИЛИТЕЛЬ

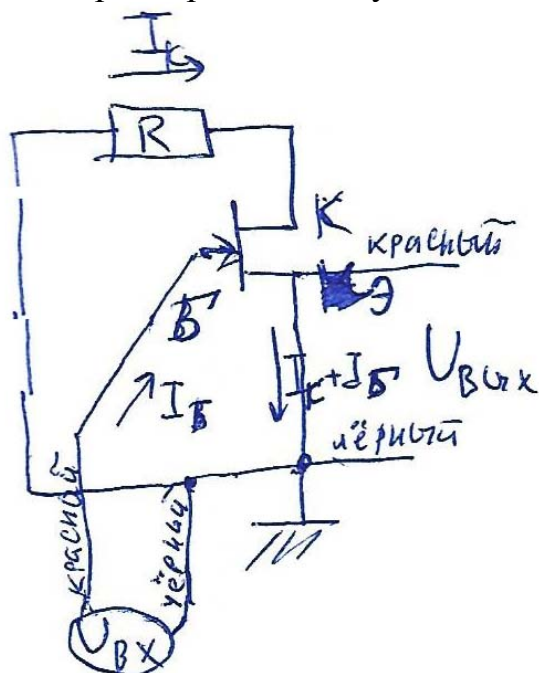
Основной компонент электронных гитар

И вот тут вылезли эти ваши Джиммы Пейджи, Джимми Хендрикс, и зародилась рок-музыка. Желающие могут посмотреть подробно отличное <https://www.youtube.com/watch?v=MnRLfA4HO1M> видео про историю электрогитары.

Заканчивая разговор о музыке, хотелось упомянуть два вида усилителей – ламповые и транзисторы (знаете словосочетание «ламповый звук»)? Очень рекомендую видео на эту тему <https://www.youtube.com/watch?v=85p-ahEWByU>. Нет, оно вам не заменит подготовку к КР, но оно действительно очень интересное с целью саморазвития.

Про прекрасную музыку можно говорить много, но мы ж физики, а точнее – радиофизики. Погнали смотреть электрические схемы.

Рассмотрим простейший усилитель – безынертный:



(периодическое
сигнальное)

Заземление не обязательно, я его нарисовал для понимания того, что по одному контакту входного и выходного напряжения – чёрные и идут на землю.

Иногда биполярный транзистор заменяют полевым, ничего от этого не меняется, кроме того, что база, коллектор, эмиттер заменяются на сток, исток, затвор.

Давайте посмотрим на схему. Если бы внешней цепи (содержащей ЭДС) не было, то напряжение на выходе было бы просто равно напряжению на входе (логично) и никакого усиления не было. Но мы добавили внешнюю цепь, и помимо старого тока I_B у нас возник дополнительный ток I_K . Найдём коэффициент усиления. Получим (1) – первое уравнение: закон Ома для полной цепи:

$$0 = I_K R + U_{KЭ} \quad (1)$$

И второе – из свойства усилителя. S – крутизна, характеристика транзистора. Характеризует, какой сильный ток возникает в транзисторе при маленьком приложенном напряжении к базе.

$$I_K = U_{БЭ} \cdot S + \frac{U_{KЭ}}{R_{KЭ}} \quad (2)$$

Нам нужно подсчитать коэффициент усиления K

$$K = \frac{U_{ВЭх}}{U_{Бх}} = \frac{U_{KЭ}}{U_{БЭ}}$$

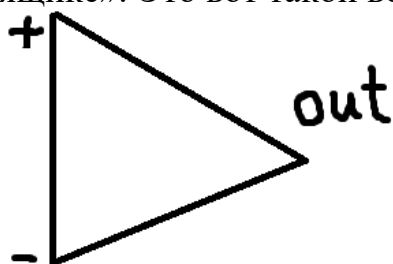
Из (1) и (2) он однозначно находится и равен он $\frac{S}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_{KЭ}}}$.

Достаточно интересный результат. То, что чем больше крутизна S , тем больше коэффициент усиления, это вполне понятно. Но вот оказывается, что чем больше наши сопротивления, тем также больше коэф усиления.

Это был простой усилитель на базе транзисторов. Но в радиофизике, как правило, рассматриваются усилители на основе операционных треугольников. Перейдём к ним.

Простейший *безынертный усилитель* на базе ОУ.

Треугольник – это батарея из обычных усилителей, зашита в одном «чёрном ящике». Это вот такой вот чёрный ящик с тремя концами:



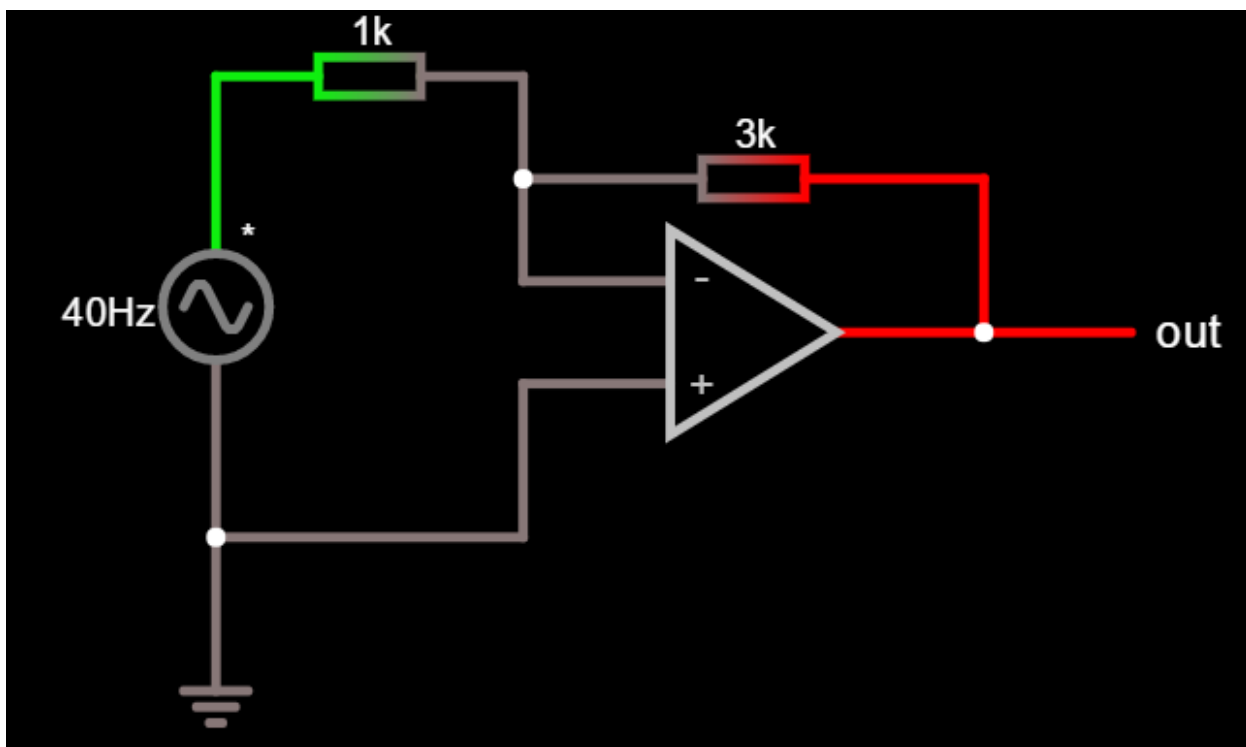
Я его называю «треугольник», хотя он на самом деле называется ОУ. Тут небольшая путаница в терминах – мы на базе треугольника ОУ будем конструировать также усилитель, но с гораздо меньшим коэфом усиления. Замечание: плюсом обозначают т.н. неинвентирующий конец треугольника, а минусом - инвентирующий конец. Это НЕ значит, что на плюсовой конец треугольника надо подавать положительный потенциал, а на минусовой отрицательный. Тут никакой связи нет.

НЕ надо рассматривать ОУ как «так, это батарея из транзисторов, значит, она обладает свойствами транзисторов, просто на максималках». У ОУ-треугольника совершенно другой принцип работы, который мы сейчас изучим.

Главное правило работы треугольника: потенциалы на плюсе и минусе он уравнивает (т.е. U_{+} всегда 0).

(Замечание – это справедливо лишь для идеальных ОУ, которые мы будем рассматривать. У реальных ОУ U_{+} может быть чуть-чуть, но отличным от нуля). Мы искусственно, конечно, можем присоединить к плюсу и минусу треугольника батарейку, где U_{+} будет не 0. Ничем хорошим это не закончится, по батарейке пойдёт гигантский ток короткого замыкания, чтобы она побыстрее разрядилась и напряжение U_{+} таки стало ноль.

Так что будем рассматривать нормальные ситуации. Очень важной для понимания является следующая картинка:



Слева стоит источник переменного тока на 40 Гц, но на самом деле тут у нас стоит $U_{вх}$, которое мы будем усиливать. Это может быть как переменный синусоидальный ток, как и постоянный, так и переменный ток произвольной формы. Наш безынертный усилитель его усилит, сохранив форму.

Так как треугольник уравнивает потенциал на + и -, то раз между ними возник источник входного напряжения, то через верхний резистор (R_1) потечёт ток. Напряжение на нём будет $U_{вх}$, а сила тока через него $U_{вх}/R_1$ (соотношение 1). Будем считать, что сила тока течёт по часовой стрелке. Она достигнет минуса треугольника. И после этого не пойдёт на + треугольника, а побежит на второй резистор. На нём возникнет напряжение. Далее сила тока прибежит на out треугольника, после чего вернётся на землю по нижнему правому ребру треугольника (его сопротивление подгоняется внутренним устройством треугольника в каждой конкретной цепи так, чтобы U_+ было ноль). Таким образом, ток бежит лишь по одному из трёх рёбер треугольника.

Таким образом, путь тока будет:

Земля – потенциал 0

Прохождение сигнала – повышение потенциала до $U_{вх}=I*R_1$

Прохождение R_1 – потенциал вновь 0

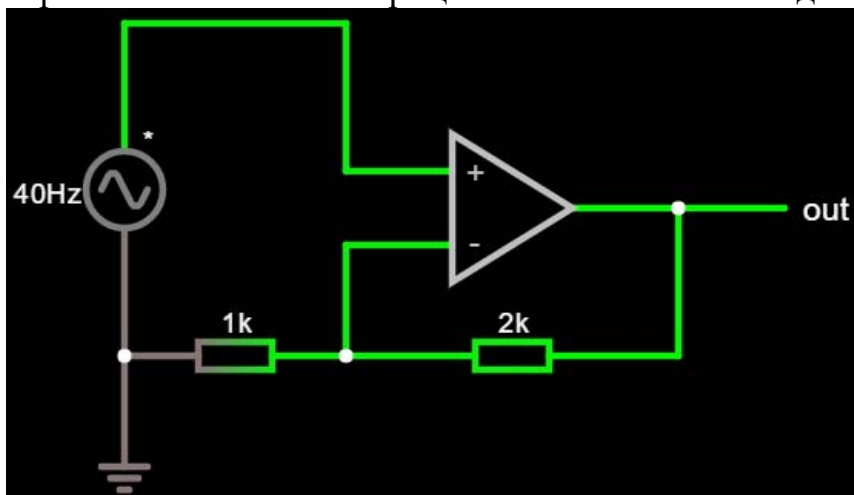
Прохождение R_2 – потенциал опускается до $-I*R_2$

Прохождение правого нижнего ребра треугольника – вновь 0.

Разность минимального и максимального потенциала в цепи оказывается $I(R_1+R_2)$. А т.к. $I*R_1=U_{вх}$ (соотношение 1), то разность минимального и максимального потенциала в цепи будет $U_{вх}*(1+R_2/R_1)$. Выбирая сколь угодно большое R_2 и малое R_1 , будем получать произвольные коэффициенты усиления. Формула: $K=1+R_2/R_1$.

Из неё, в частности, следует $R_2=R_1*(K-1)$.

Резистор R_2 соединяет out и один из двух входных концов треугольника. Это т.н. **обратная связь**. Если R_2 идёт на инвентирующий конец (как на схеме), то обратная связь наз-ся отрицательной. Он может идти и на неинвентирующий



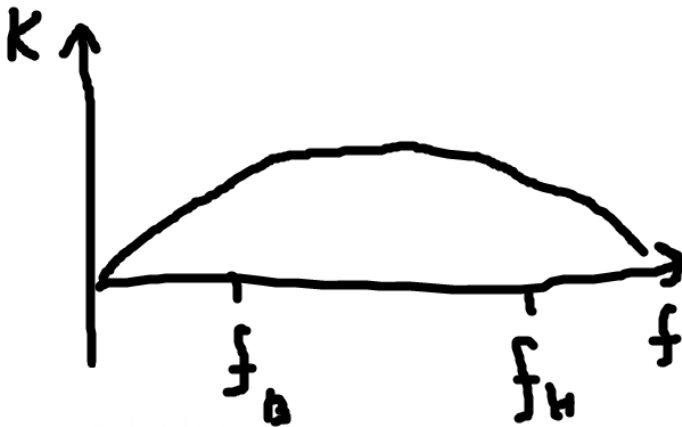
Будет положительная обратная связь. А так ничего особо не меняется, за исключением того, что ток теперь будет течь по другому ребру треугольника – с outa на +. Отношение напряжений выходного напряжения к входному будет при данном соотношении сопротивлений, как на рисунке, 3:1. Формула та же: $K=1+R_2/R_1$.

Но в реальности часто оказывается, что

А) сигнал имеет вид отдельных импульсов. Тогда конструируют особый, импульсный усилитель. Именно он стоит на атомных и ядерных праках. В курсе радиофизики он не рассматривается ☹

Б) Поступающий сигнал (входное напряжение) – модулировано, т.е. квазипериодическое, на разных частотах. И нам нужно, чтобы какие-то частоты усилились, а какие-то нет.

Приходит заказчик и просит сконструировать вот такой вот усилитель:

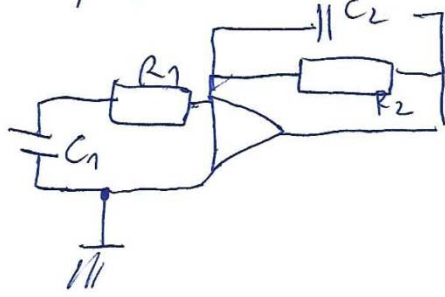


Зачем нам усиливать не все частоты?

Ну, например, мы хотим сконструировать микрофон. Человек слышит от 20 Гц до 20кГц. Всё остальное нам усиливать не надо: это даст лишь дополнительную нагрузку на сам микрофон, комбики и т.п. А какой-нибудь инфразвук, как пишут в этих ваших Интернетах, ещё и не совсем полезен (не знаю, не проверял – но в Интернетах пишут так) – так зачем нам и его усиливать?

В общем, надо провести даунгрейд усилителя: он должен усиливать лишь некоторые частоты. **Именно для этого для даунгрейда в цепь добавляются конденсаторы.**

Для этой цели радиофизики добавляют в цепь конденсаторы:



Конденсатор C_1 обрезает нижние частоты

C_2 обрезает верхние частоты

Почему это так?

Потому что $Z_1 = R_1 - \frac{i}{\omega C_1}$. При больших $\omega \downarrow$

$Z_1 \approx R_1$, и цепь работает, как будто конденса-

тора и нет. При $\omega_1 = \frac{1}{R_1 C_1}$ $R_1 = \frac{1}{\omega_1 C_1}$, и

при $\omega < \frac{1}{R_1 C_1} = \omega_1$ Z_1 уже сильно отличается от

R_1 и ~~все наши рассуждения~~

все наши рассуждения о безынерционном усилителе уже не будут верны \Rightarrow усиления не будет.

[Конденсатор, будучи подключенным последовательно, отсекает нижние частоты!]

$\frac{1}{Z_2} = \frac{1}{R_2} + i\omega C_2$. При малых $\omega (< \frac{1}{R_2 C_2})$ $\frac{1}{Z_2} \approx$

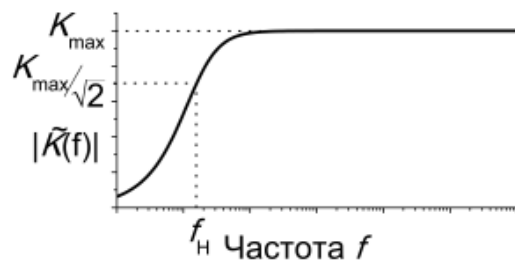
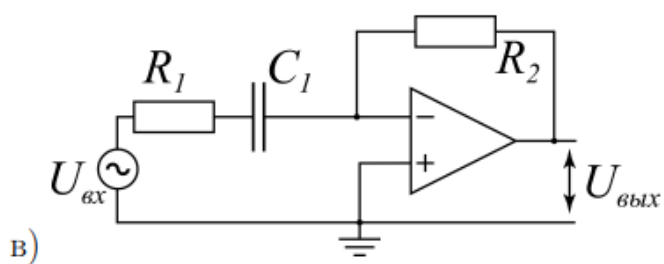
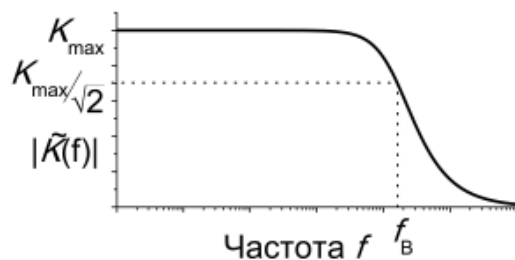
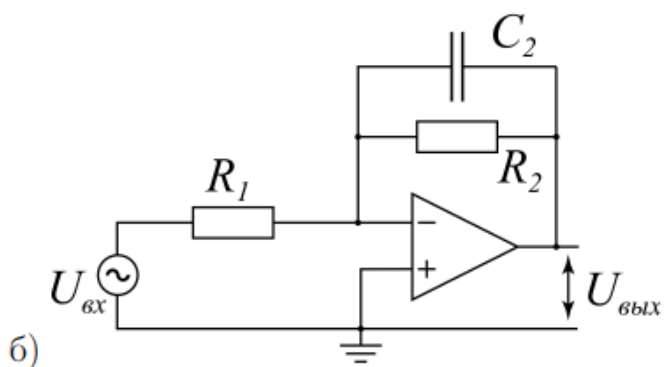
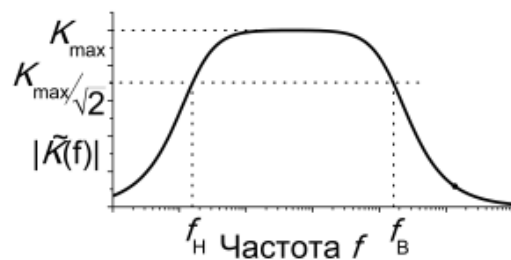
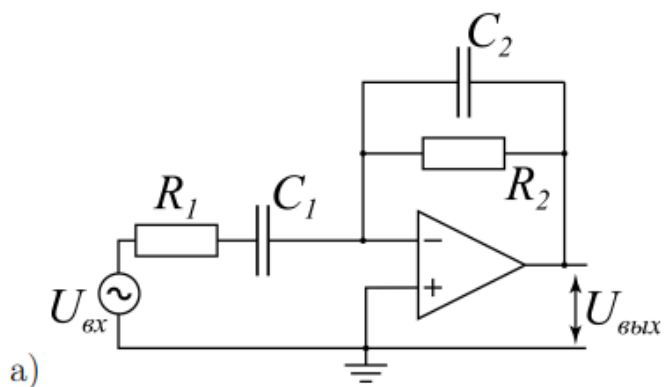
$\approx \frac{1}{R_2}$, и цепь работает как будто бы без C_2 . При

$\omega = \frac{1}{R_2 C_2}$ $\frac{1}{R_2}$ и $i\omega C_2$ сравниваются, и при $\omega > \frac{1}{R_2 C_2}$

$\frac{1}{Z_2}$ уже будет далек от $\frac{1}{R_2}$. ω_2 - верхняя частота!

[Параллельный конденсатор обрезает верхние частоты!]

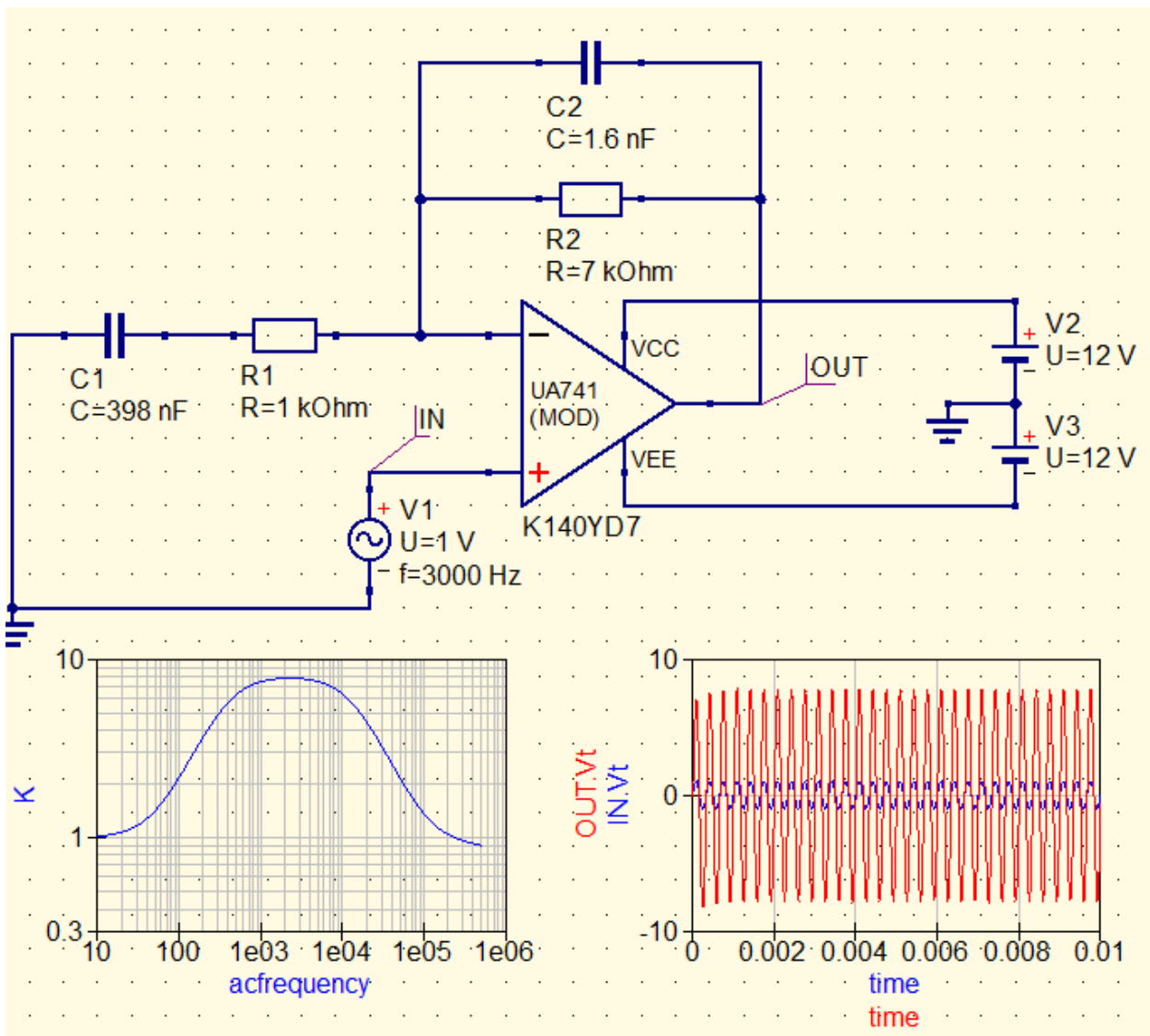
Смотрим иллюстрации:



В случае б) есть C_2 , но нет C_1 . Как итог, верхние частоты срезаются, а нижние нет.

В случае в) есть C_1 , но нет C_2 . Как итог, нижние частоты срезаются, а верхние нет.

В случае а) есть C_1 и $C_2 \Rightarrow$ срезаются как верхние, так и нижние частоты.

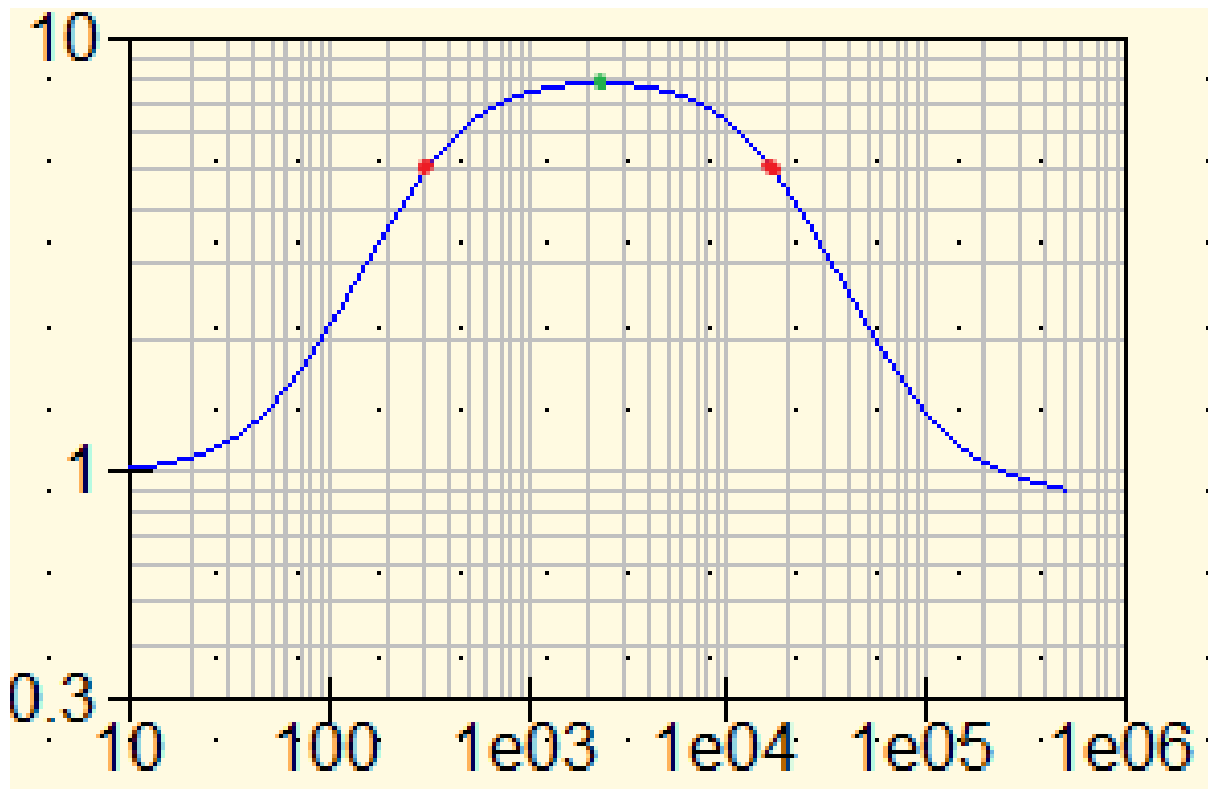


Тут ещё мы видим два дополнительных проводка к треугольнику. Это питание для него (24 В), необходимое для того, чтобы он вообще работал. С остальной целью это никак не связано.

Внизу графики. Слева мы видим зависимость коэффициента усиления K от частоты - отношение амплитуды сигнала на выходе к амплитуде сигнала на входе.

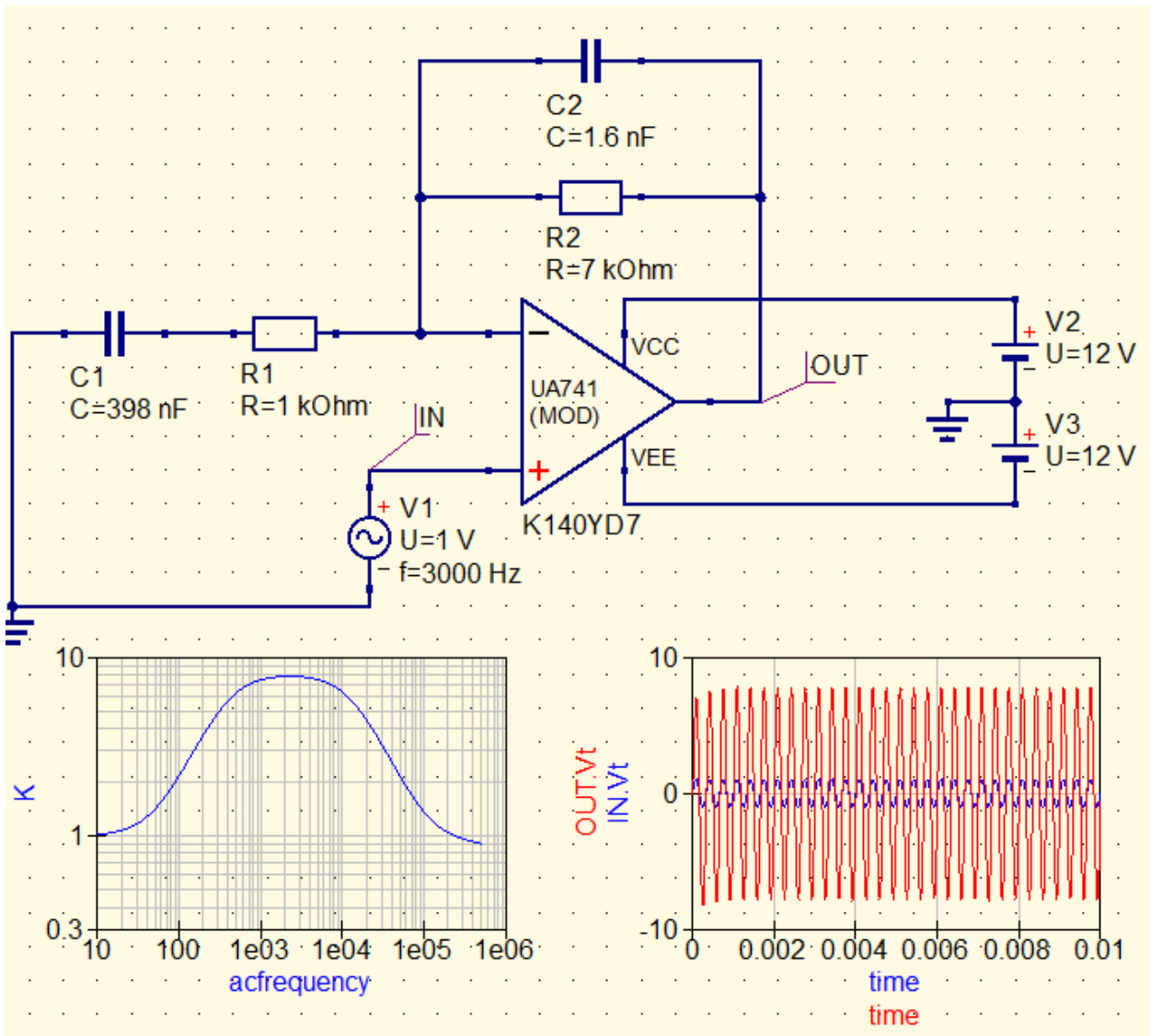
Как мы видим из графика, усиливаются амплитуд синусоид всех частот, но по-разному. Низкие и высокие частоты усиливаются слабо, а вот средние хорошо. Мы видим одну частоту $f_{\text{центр}}$, усиливающуюся больше всего. K на ней принимает максимальное значение – K_{max} .

Две частоты, где усиление равно $K_{\text{max}}/\sqrt{2}$, называются верхняя и нижняя.

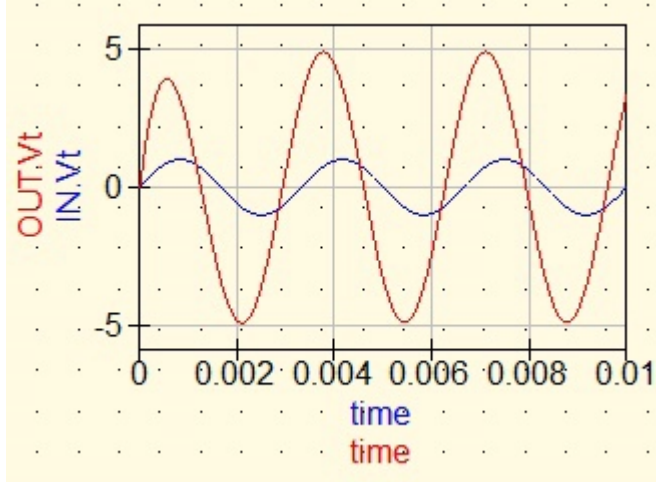


Отметил красным верхнюю и нижнюю частоту, зелёным – центральную.
 Справедлива следующая формула: центральная частота – среднее геометрическое из верхней и нижней.
 У автора на практике нижняя частота – 0,3 кГц, верхняя - 15 кГц (см. красные точки на графике).
 Среднее арифметическое, если его подсчитать, будет равно 2,1 кГц (как раз зелёная точка).

Посмотрим на второй график – справа.



Синее вошло, красное вышло. Усилитель и вправду неплохо усилил.
 Но если мы уменьшим частоту генератора до тех же 300 Гц



Усилитель уже не так будет классно усиливать (коэффициент усиления уменьшится), а также появится некий сдвиг фаз.

Факт: на центральной частоте сдвиг фазу между входом и выходом 0. В нижней и верхней частоте он равен плюс и минус $\pi/4$. Для частот ниже нижней и выше верхней сдвиг фаз по модулю будет, соответственно, $>\pi/4$.

Задание, которое будет у вас на третьем аналоговом праке :

Вам дали K_{\max} , $\omega_1=\omega_{\text{верхн}}$, $\omega_2=\omega_{\text{нижн}}$ (могут дать $f_{\text{верх}}$, $f_{\text{нижн}}$, тогда их надо будет пересчитать в циклические частоты).

Вам нужно подобрать нужные $R1$, $R2$, $C1$ и $C2$.

$$K=1+R2/R1 \Leftrightarrow R2=R1(K-1)$$

$$\omega_1 R1 C1=1 \text{ (условие обрезки нижних частот)}$$

$$\omega_2 R2 C2=1 \text{ (условие обрезки верхних частот)}$$

Три уравнения, четыре неизвестных. Одну неизвестную можно выбрать неизвестно. На третьем аналоговом праке вам для этого ещё фиксируют $R1$.

Тогда $R2$, $C1$ и $C2$ будут

$$R2=R1(K-1)$$

$$C1=1/(\omega_1 R1)$$

$$C2=1/(\omega_2 R2)$$