

# Узкополосный фильтр, резонансный синтез

Шмаков Владимир ФФКЭ - группа Б04-105

МФТИ - декабрь 2022

## Аннотация

В работе описана и исследована схема полосового усилителя, которую можно использовать в более сложных схемах синтезаторов в качестве полосового фильтра.

Так - же схема может выступать в роли генератора частот.

## Введение

Для синтеза звука придумано большое количество электрических схем. И существует множество техник аналогового синтеза. Самыми популярными техниками являются субтрактивный и аддитивный синтез.

Основным элементом субтрактивного синтезатора является фильтр. Благодаря ему из сложного колебания осциллятора(обычно используется пилообразная форма волны или меандр) выделяется нужный сигнал.

В аддитивных синтезаторах - наоборот - сигнал осциллятора не богатый гармонически(синусоида/треугольная форма волны). Гармоники добавляются сложением колебаний множества осцилляторов, либо пропусканием одного осциллятора через специальные схемы(например схему вейвфолдера).

Все вышеописанные типы синтеза невозможны без одной составляющей - генератора огибающей. Именно благодаря ней можно варьировать спектральный состав сигнала во времени, а также задавать зависимость амплитуды(громкости) колебаний от времени.

В 20е-50е годы сборка генератора огибающей была сложной задачей. Однако даже без этой схемы в СССР выпускались фильмы с электронным звуковым сопровождением(например «Человек - Амфибия», мультфильм «Вор»).

О чем идет речь? Рассмотрим звук, издаваемый каким-либо объектом из нашего мира. Например - постучим по чашке. Чашка начинает звучать всего на определённом наборе частот, которые обуславливаются геометрией и граничными условиями. Другими словами, из большого спектра стука чашка «выбирает» лишь определённые частоты.

Именно на этом принципе и построен «резонансный» синтез звука:

- На вход узкополосного фильтра подаётся богатый гармониками сигнал
- Фильтр выделяет из сигнала узкий диапазон гармоник
- Чтобы сузить спектр выделяемых частот используется петля обратной связи
- На выходе получаем(в идеале) единственную гармонику

- Собрав схему из нескольких фильтров, и сложив их сигналы можем получить желаемый тембр

Для такого типа синтеза не обязательно использовать огибающую. Если подобрать параметры обратной связи правильно, то колебания в цепи будут затухающими. То есть «сама природа подберет зависимость громкости звука от времени» - как это и происходит в акустических инструментах.

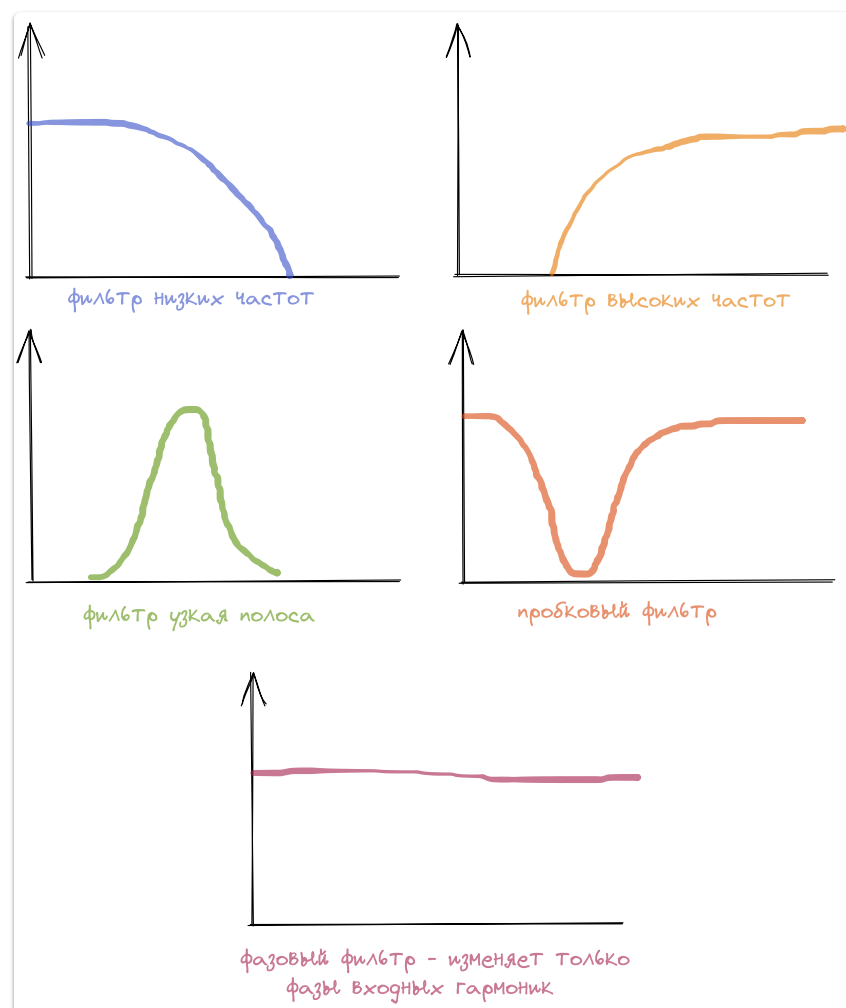
## Цель работы

- Создать узкополосный фильтр.
- Составить математическую модель, описывающую работу устройства.
- Исследовать устройство в разных ключах его использования.

## Теоретические сведения

### Линейная фильтрация

**Фильтр** - устройство для выделения желаемого диапазона частот из спектра входного сигнала. Аналоговые фильтры делят на несколько основных типов, как показано на рисунке ниже:



классификация фильтров по типу амплитудно - частотной характеристики

Пусть:

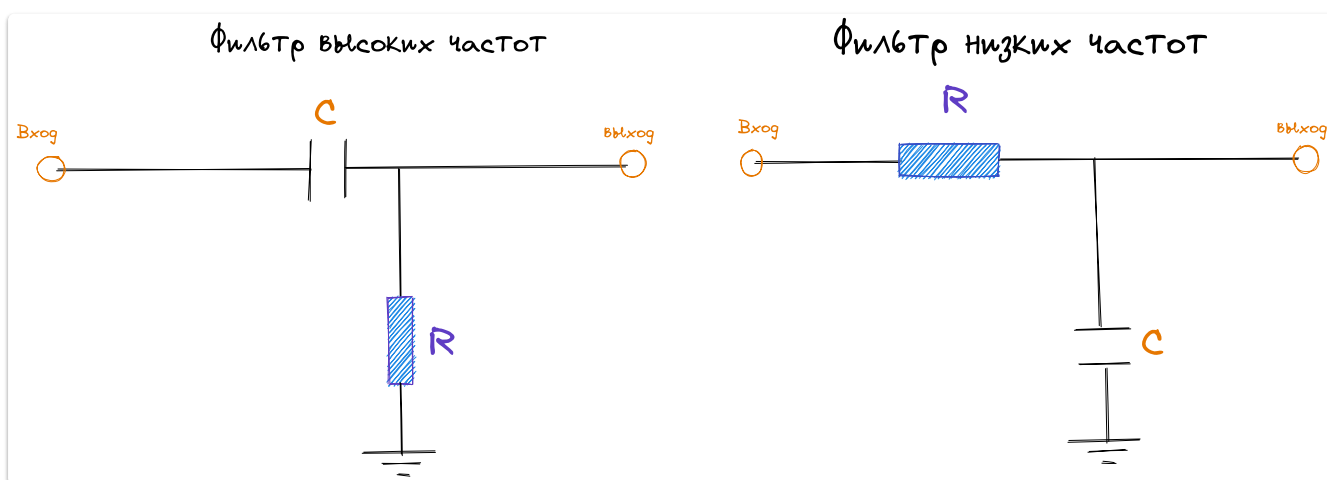
- $f(t)$  - непрерывная функция - входной сигнал
- $\hat{L}$  - оператор, действующий на пространстве непрерывных функций - описывает работу фильтра
- $g(t)$  - отклик фильтра - результат оператора  $\hat{L}$  на функции  $f$ :  $g(t) = \hat{L}f(t)$

Назовём фильтр **линейным**, если для оператора  $\hat{L}$  верно свойство линейности:

$$\hat{L}(c_1 f_1 + c_2 f_2) = c_1 \hat{L}f_1 + c_2 \hat{L}f_2$$

Таким образом, для расчета отклика линейного фильтра нужно знать только гармонический состав входного сигнала  $f(t)$

### RC цепь - фильтры высоких и низких частот



Эти фильтры состоят из последовательно соединенных резистора и конденсатора. В случае  $RC$  фильтра высоких частот напряжение снимается с резистора. В фильтре низких частот напряжение снимаем с конденсатора.

Методом комплексных амплитуд можем вывести АЧХ и ФЧХ фильтров.

АЧХ и ФЧХ фильтра низких частот представлено формулой ниже:

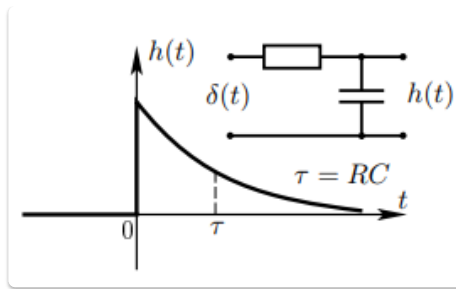
$$U_{out} = U_{in} \frac{X_c}{\sqrt{R^2 + X_c^2}}, X_c = \frac{1}{2\pi\nu C}, \phi(\omega) = -\arctg(\omega RC)$$

Для фильтра высоких частот:

$$U_{out} = U_{in} \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_c^2}}, X_c = \frac{1}{2\pi\nu C}, \phi(\omega) = \arctg\left(\frac{1}{\omega RC}\right)$$

### Отклик фильтров на $\delta$ импульс

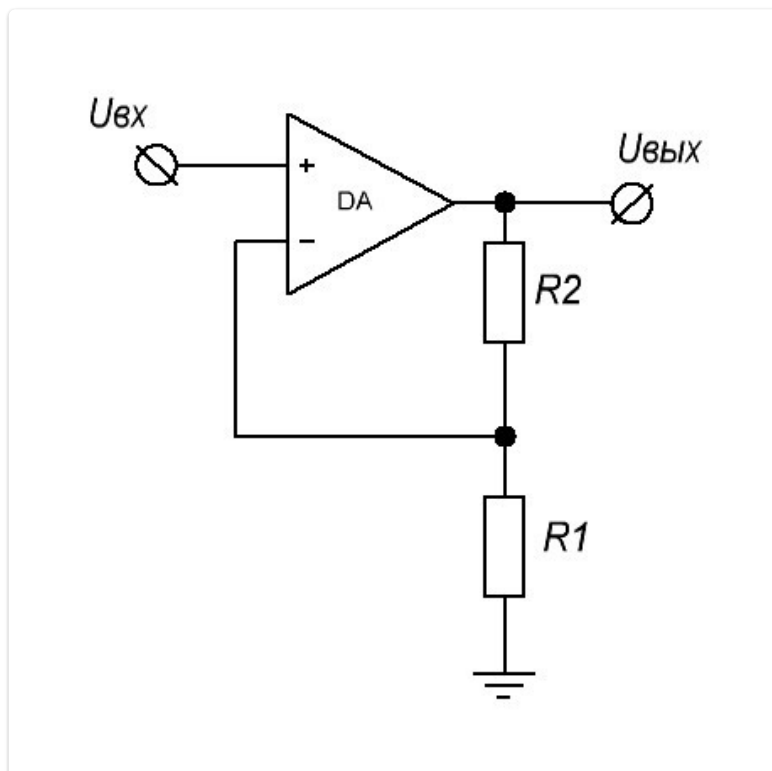
Свободные колебания в  $RC$  цепочках затухают на 99% за время  $t = 5\tau = 5RC$ :



Полоса пропускания(на уровне  $-3\text{Db}$ ):  $\Delta\omega = 1/RC$ .

## Операционный усилитель в режиме неинвертирующего усилителя

Рассмотрим схему, изображенную на рисунке ниже:



Коэффициент усиления ОУ в таком режиме работы находится по формуле:

$$k = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

## Методика

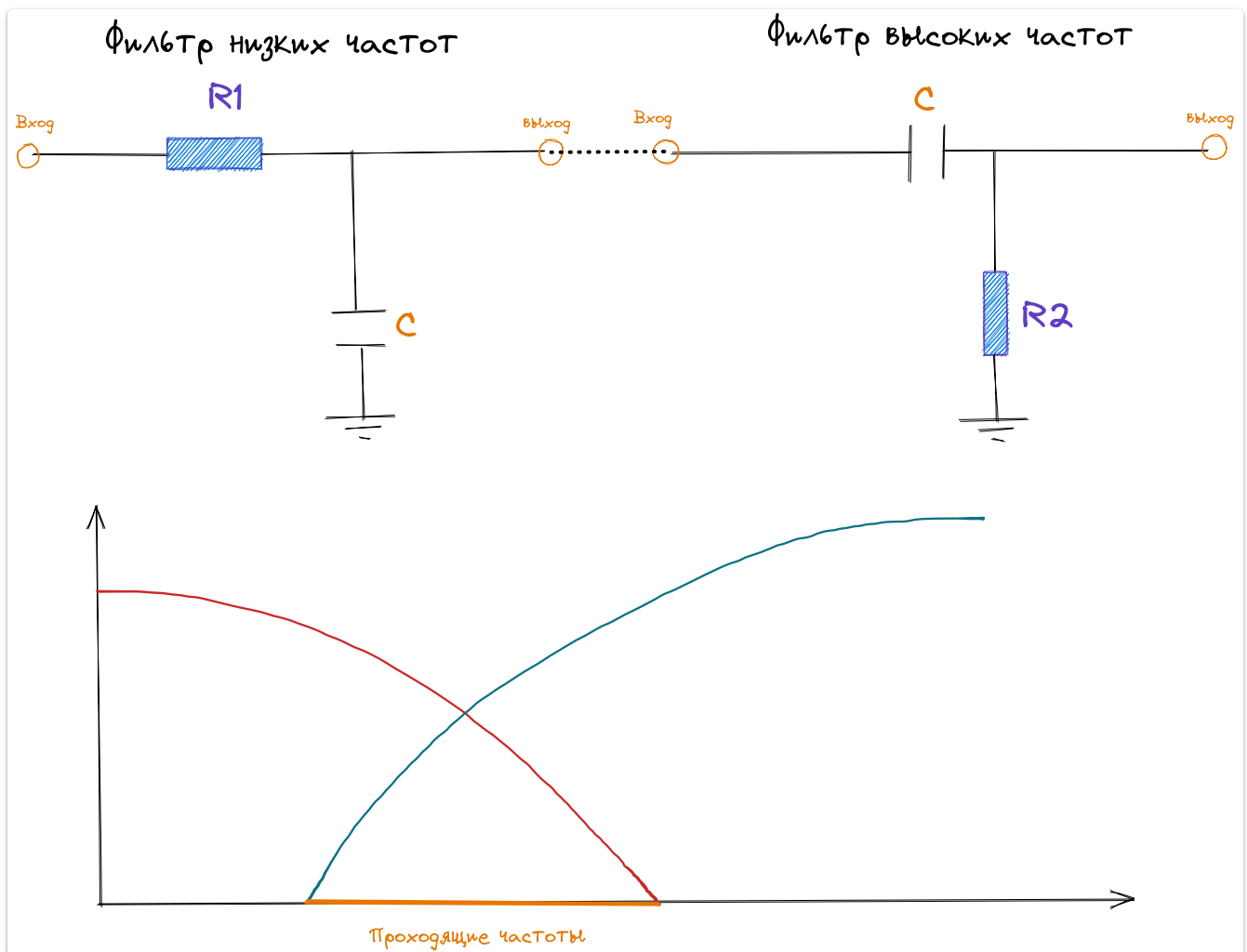
### Оборудование

- Радиодетали:
  - Два конденсатора ёмкостью  $0.1 \mu\text{F}$
  - Конденсатор небольшой ёмкости(для сглаживания сигнала кнопки) - я использовал керамический конденсатор ёмкостью  $22 \text{ pF}$
  - Два потенциометра на  $10 \text{ k}\Omega$
  - Резисторы:
    - $100 \text{ k}\Omega$  - 4 штуки
    - $4.7 \text{ k}\Omega$  - 2 штуки

- Кнопка
- Источник питания - использовалась батарейка «крона» с напряжением 9V
- Операционный усилитель *TL071* - использовал «половинку» *TL072*
- Макетная плата
- Приборы:
  - Диктофон
  - Мультиметр(для измерения сопротивления)
  - Компьютер(для подачи сигнала на цепь и обработки результатов)
- Программное обеспечение:
  - Интерпретатор языка Python
  - Библиотека `numpy` - для вычислений
  - Библиотека `matplotlib` - построение графиков
  - Библиотека `scipy` - чтение `wav` файлов, разложение сигналов в ряд Фурье с помощью алгоритма `fft`(fast forier transform)
  - Сайт <https://www.circuit-diagram.org> - для разведения схемы
  - Плагин `bogaudio noise` - для генерации белого шума

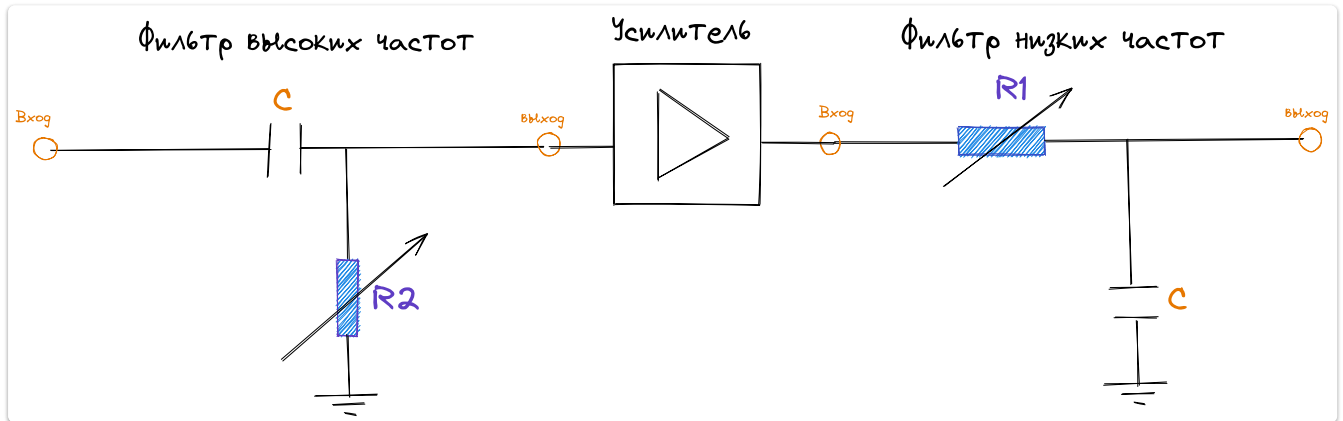
## Описание экспериментальной установки

Для получения нужной АЧХ совместим интегрирующую и дифференцирующую *RC* цепочки:



Так, мы получили пассивный фильтр узкой полосы. Его главный недостаток заключается в маленькой амплитуде выходного сигнала(в силу падения напряжения на элементах).

Чтобы убрать этот недостаток, добавим в схему операционный усилитель(в режиме неинвертирующего усилителя):

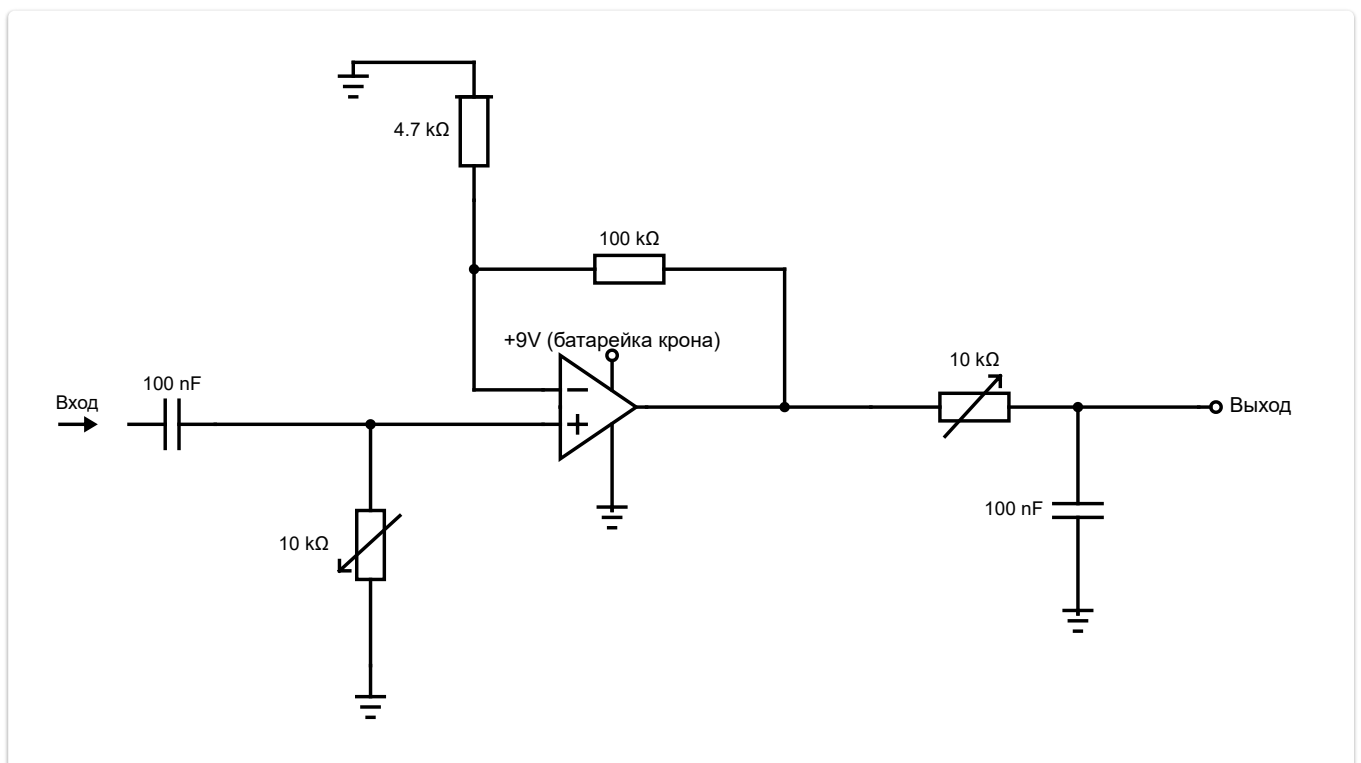


### блок-схема устройства

Будем использовать переменные резисторы с максимальным сопротивлением 10 кОм. Нужно подобрать ёмкость конденсатора так, чтобы частота среза( $1/2\pi RC$ ) удобно регулировалась на интервале слышимых частот(см. блокнот). Наилучшим образом подходит емкость 100 нФ.

Также необходимо подобрать коэффициент усиления так, чтобы колебания системы были различимы на фоне шума. Остановимся на коэффициенте  $k = 1 + 100/4.7 = 22.3$ .

Окончательная схема устройства:

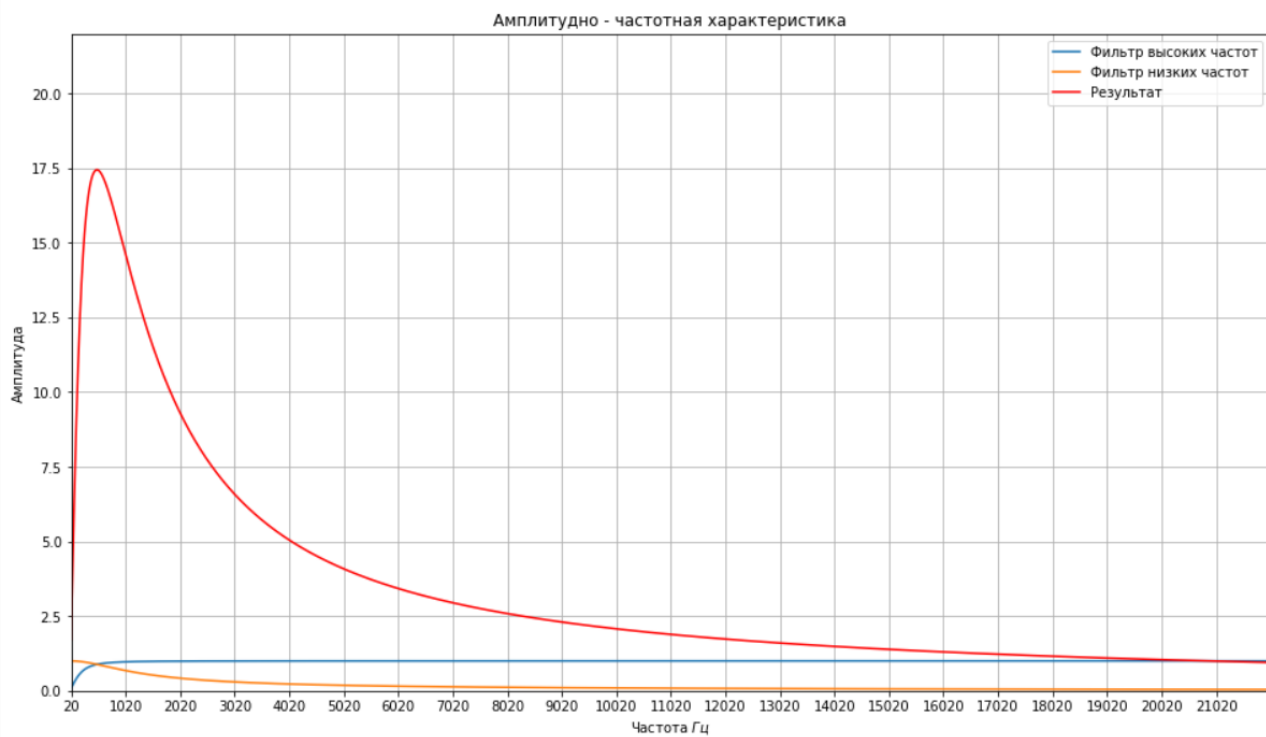


### итоговая схема

Для схемы построена теоретическая модель(см. блокнот):

R\_hpf  6.10

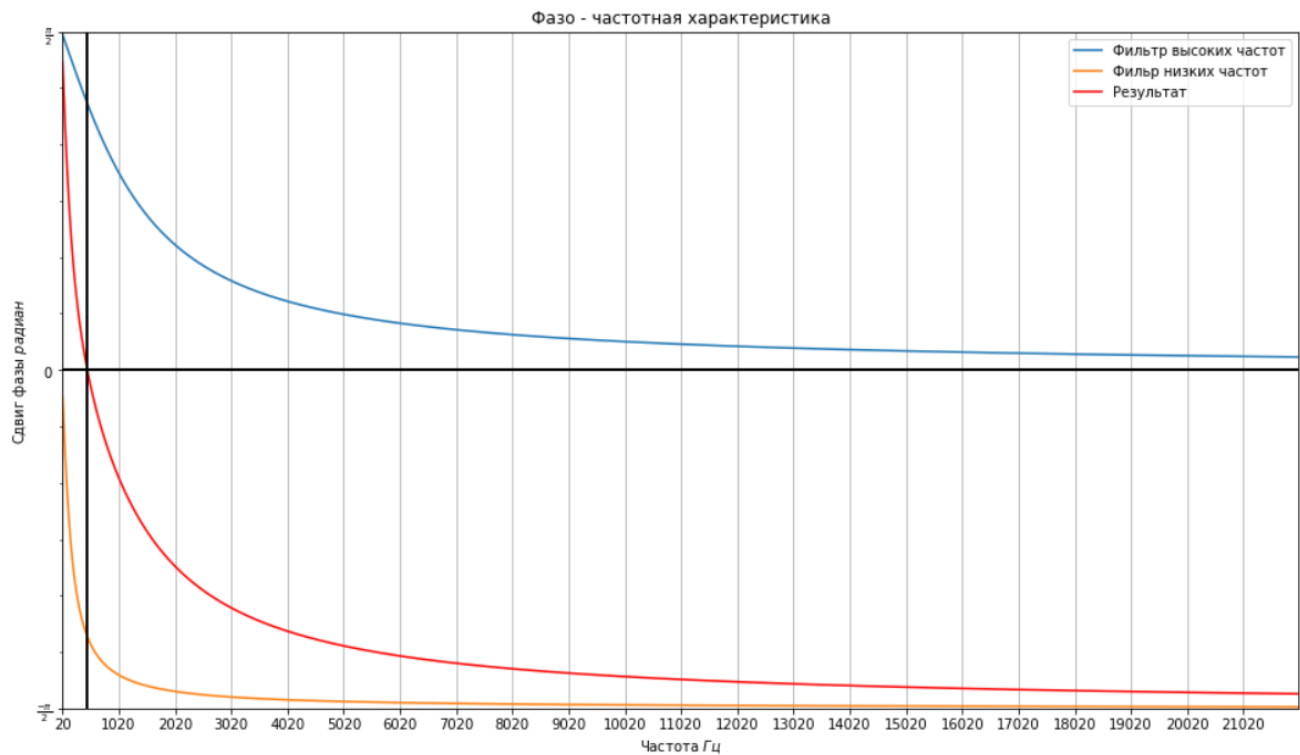
R\_lpf  1.70



R\_hpf  1.20

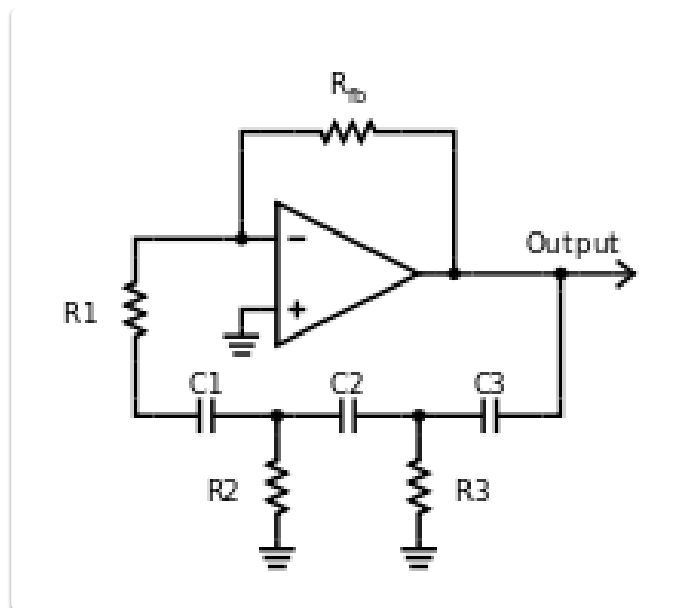
R\_lpf  10.00

Совпадение фазы на частоте: 459.4407461848265

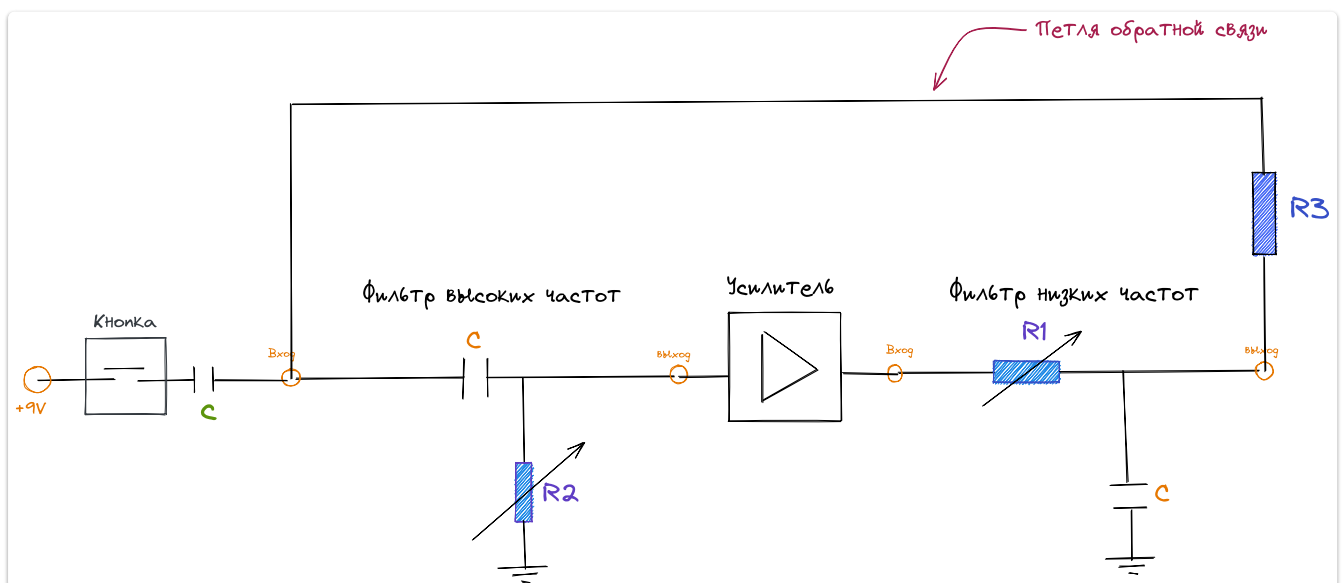


## Эксперимент 1 - «режим самовозбуждения»

В этом режиме устройство поддерживает колебания самостоятельно. Похожим образом устроены осцилляторы синтезаторов 70 – 80х годов. Например, схема осциллятора «Twin-T»:



Соединим выход устройства с входом, через небольшое сопротивление ( $R_3 = 220 \text{ Ом}$ ).  
Колебания будем возбуждать нажатием на кнопку (сигнал которой выведен на вход):

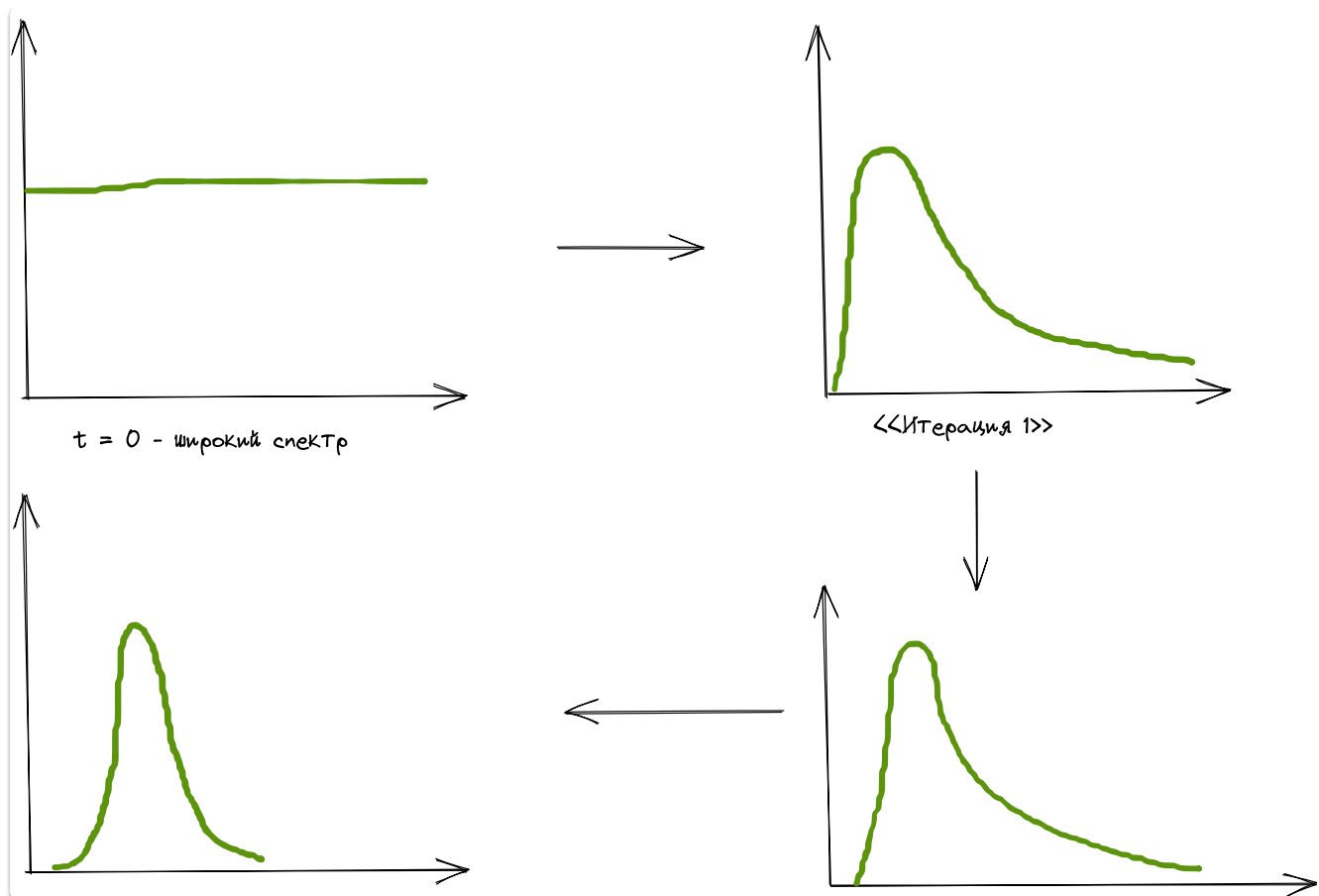


Получили так называемую петлю обратной связи. Теперь фильтр работает как осциллятор

- При нажатии на кнопку, на вход цепи подаётся сигнал с широким спектром. (см. теоретическую часть)
- Из широкого спектра выделяется только узкий диапазон частот (ширина зависит от сопротивлений  $R_2$  и  $R_1$ ) - их амплитуда возрастает. Амплитуда остальных гармоник падает
- Выходной сигнал смешивается с сигналом на входе (при этом стоит учитывать фазовый сдвиг гармоник)
- Итоговый сигнал опять пропускается через схему - амплитуда «нужных» гармоник возрастает.
- Таким образом, устанавливаются колебания определенного набора частот.

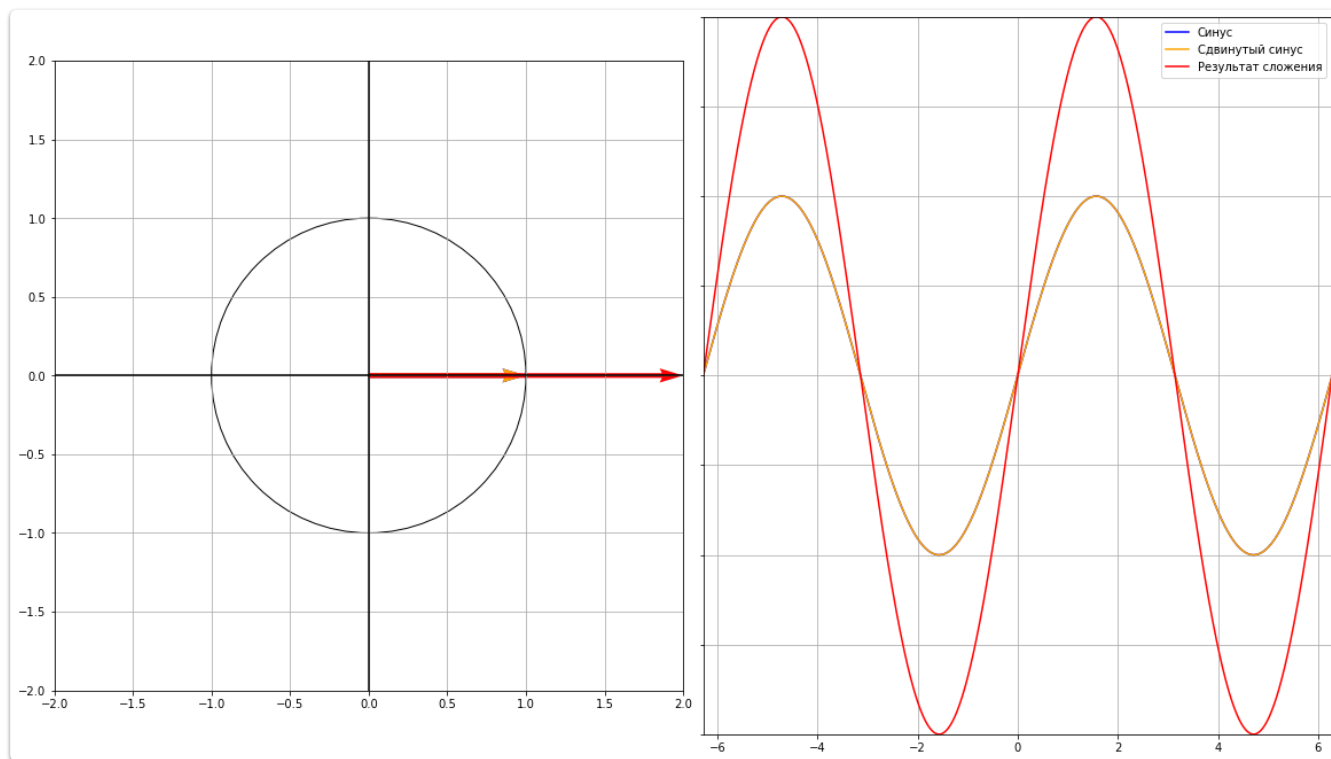
Изменение спектрального состава выходного сигнала можно продемонстрировать на схеме:





Из-за обратной связи изначальный АЧХ «сужается и вытягивается».

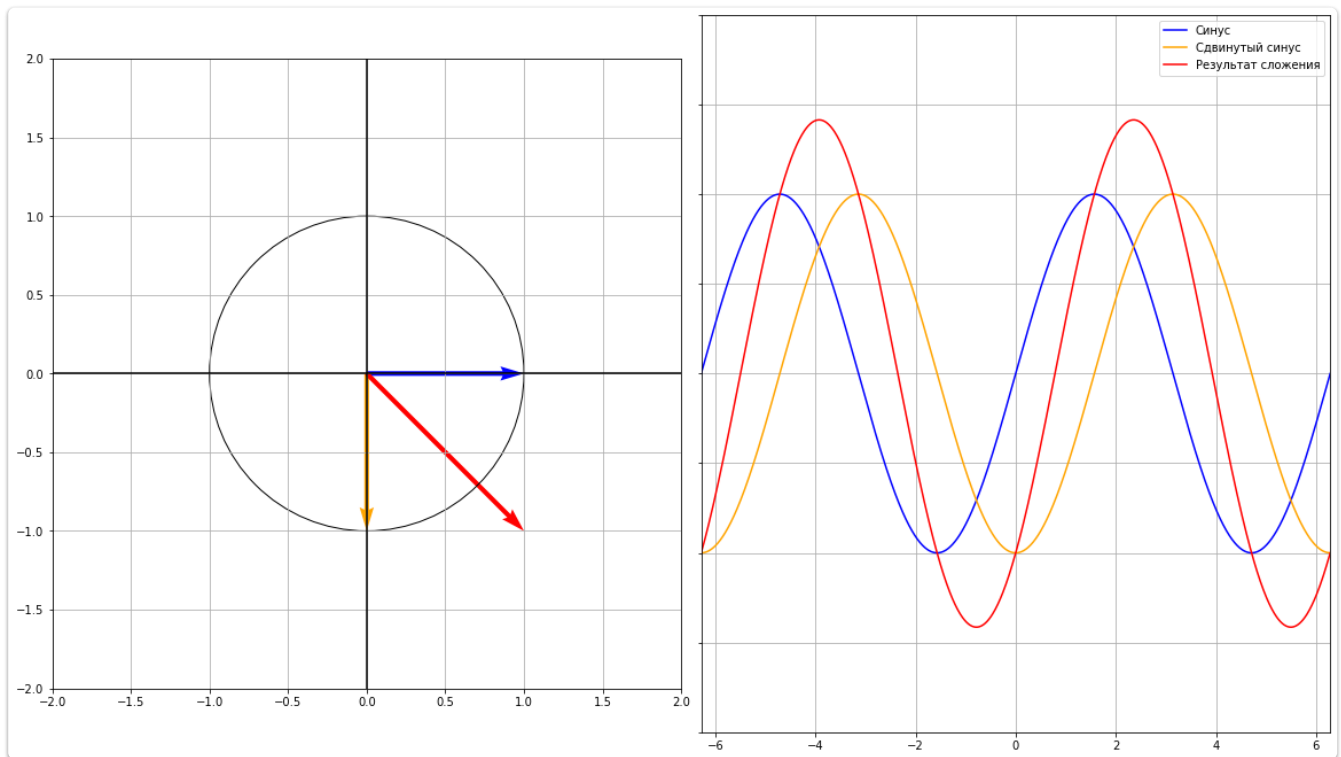
На входе сигналы цепи могут смешиваться в разных фазах. Увеличение амплитуды зависит от разности фаз сигналов. Наибольшая амплитуда получается в том случае, если разность фаз -  $0^\circ$ :



Такая разность достигается на частоте:

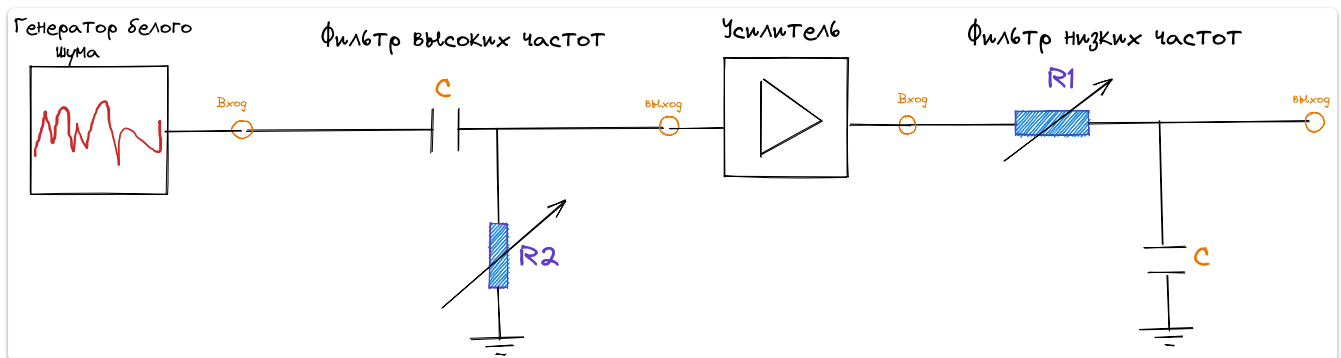
$$F = \frac{1}{2\pi C \sqrt{R_1} \sqrt{R_2}}$$

Чем больше сдвиг - тем меньше суммарная амплитуда:



## Эксперимент 2 - АЧХ фильтров

Будем использовать устройство в качестве фильтра. На вход цепи подадим белый шум. В качестве генератора используется аудиокарта компьютера и плагин «bogaudio noise».



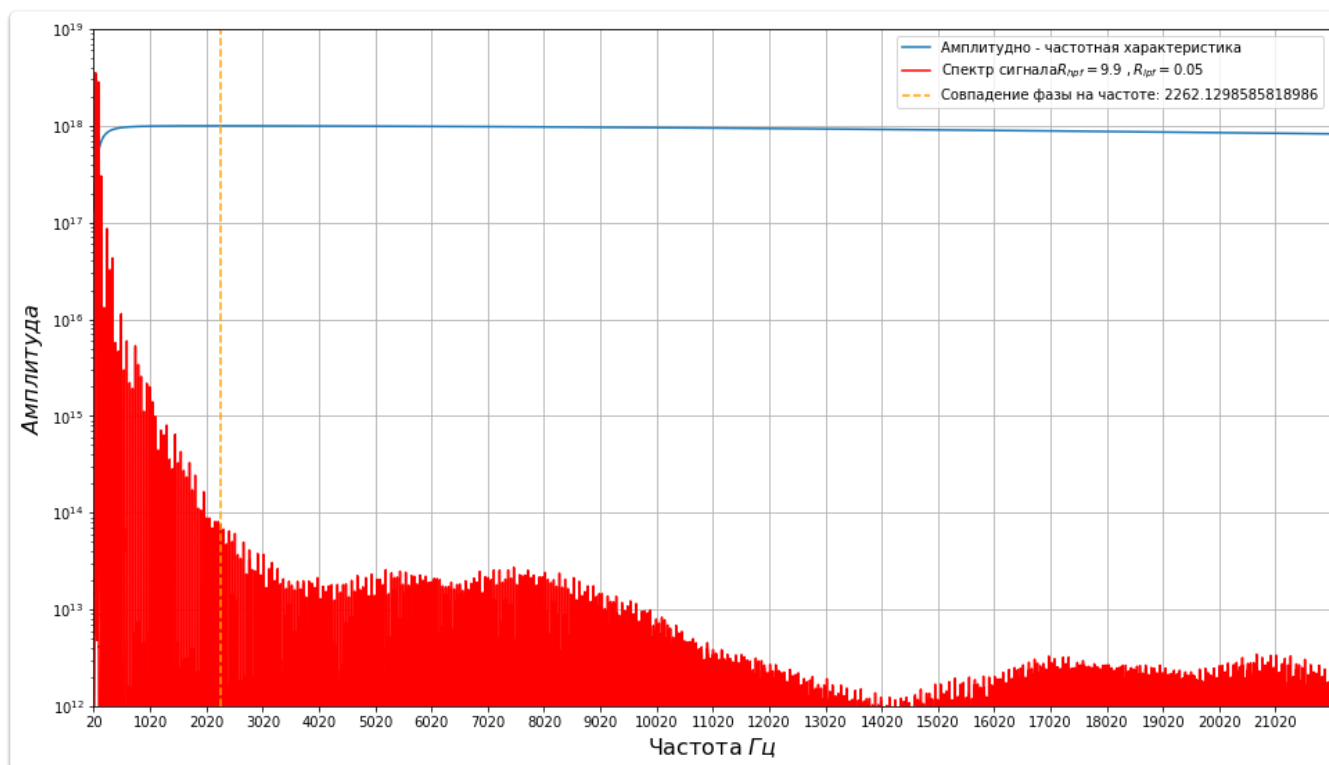
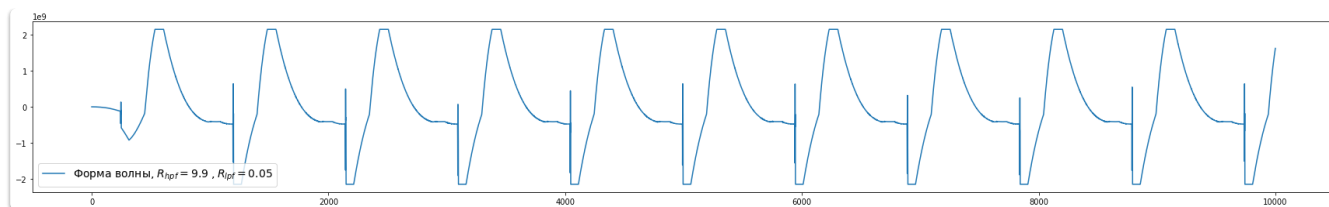
## Обработка результатов

Для обработки результатов используем библиотеку «scipy», а именно её модуль «fft». Функции библиотеки позволяют раскладывать в ряд Фурье сигналы, записанные в wav файлах.

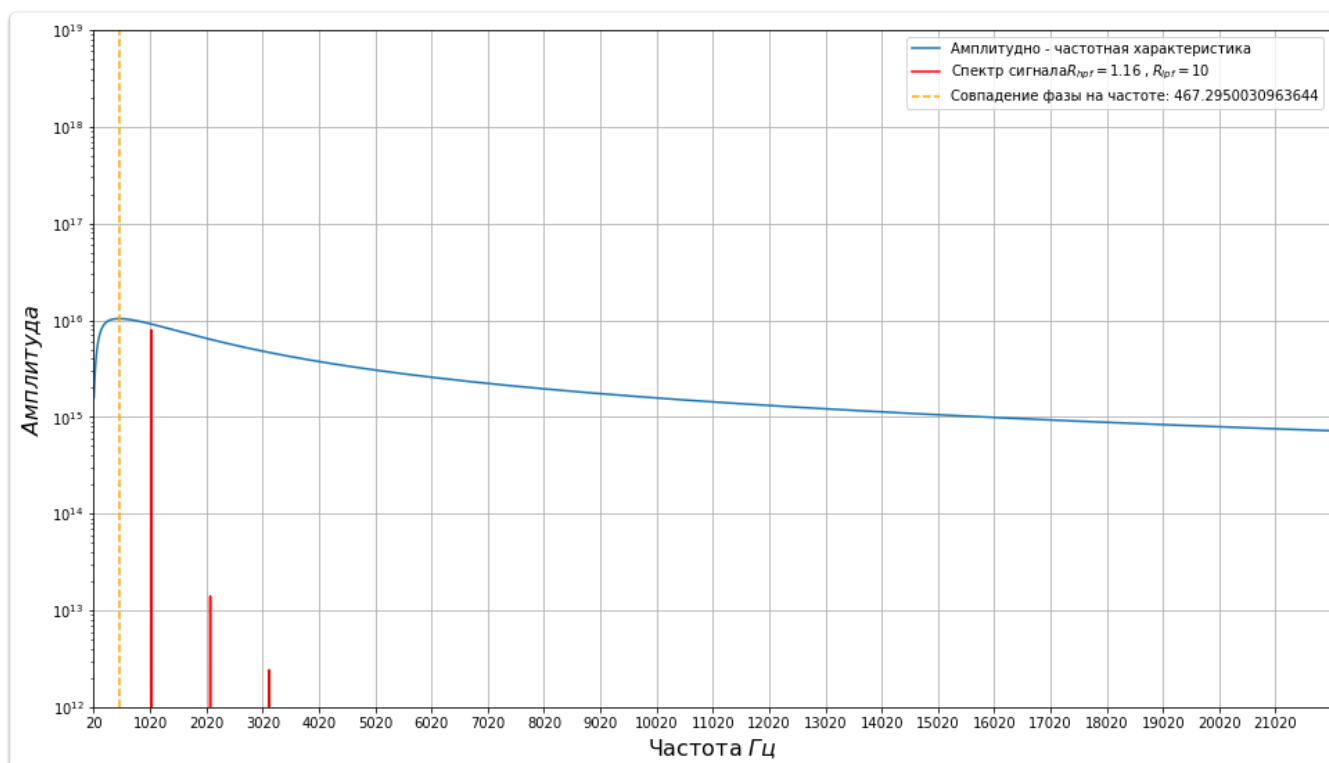
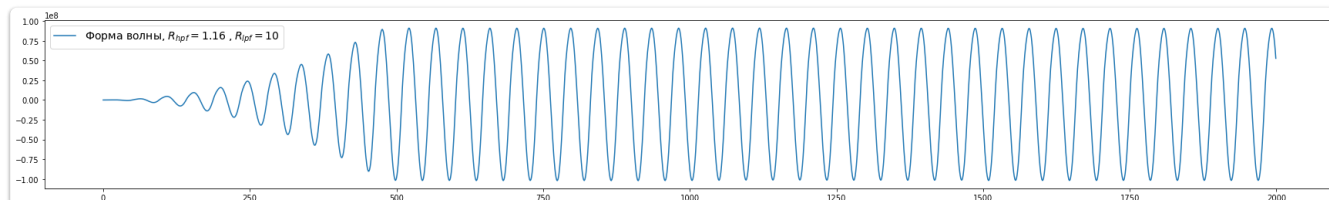
## Результаты первого эксперимента

В первом эксперименте было зафиксировано три сигнала - «низкочастотные колебания с широким спектром», «синусоидальные колебания(узкий спектр вырезаемых частот)», «синусоидальное колебание и несколько обертонов».

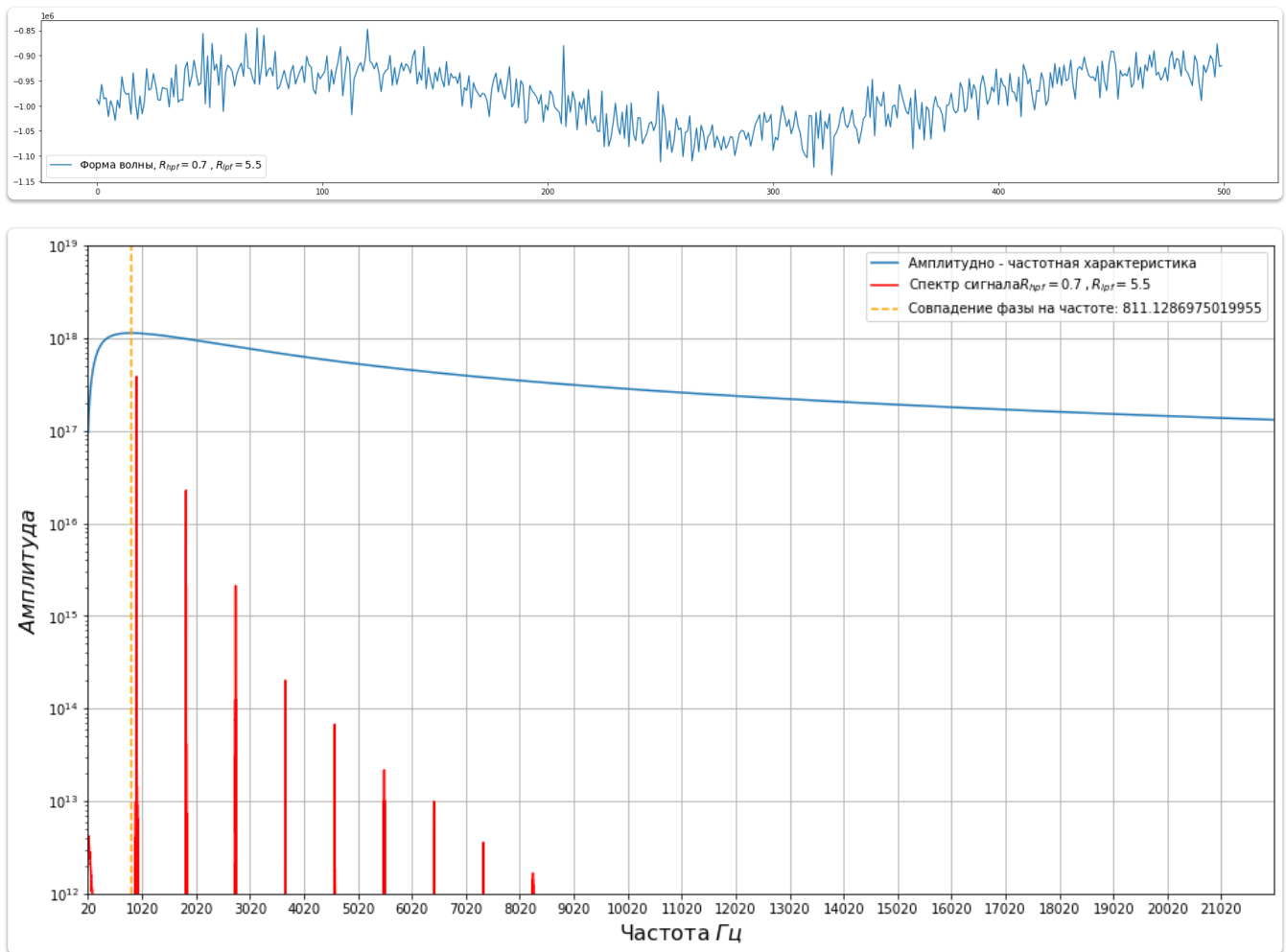
Формы волны и спектры полученных сигналов представлены на графиках ниже:



### Форма волны и спектр первого сигнала



### форма волны и спектр второго сигнала



### форма волны и спектр третьего сигнала

Спектры полученных сигналов коррелируют с амплитудно - частотной характеристикой цепи. Из-за обратной связи АЧХ сигнала на выходе «вытягивается» по сравнению с АЧХ фильтра.

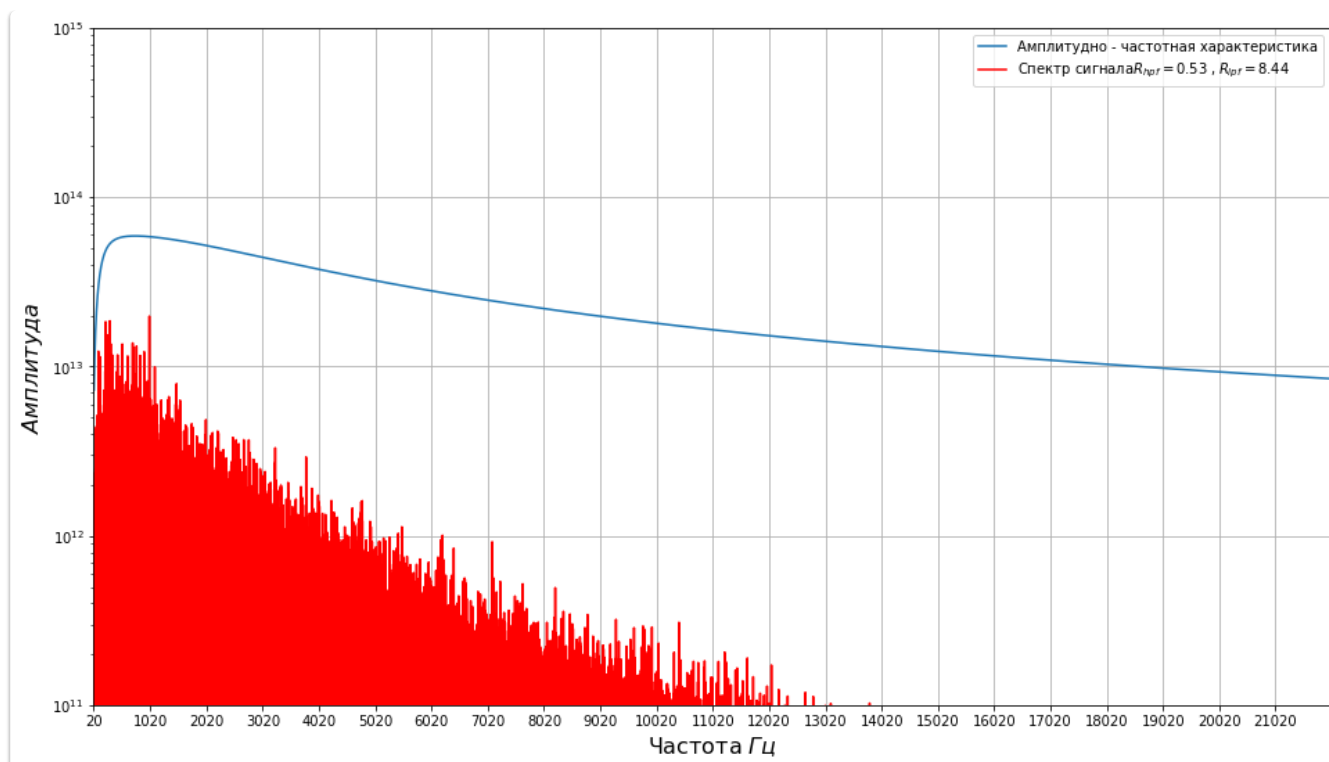
При большой добротности исходного пика ( $Q > 1500$  - как в эксперименте 2) удастся получить на выходе «чистые» синусоидальные колебания.

Фазо - частотная характеристика не так сильно влияет на спектральный состав выходного сигнала. Во втором эксперименте сдвиг по фазе гармоники с наибольшей амплитудой равен примерно  $-\pi/6$ . В третьем эксперименте максимальную амплитуду имеет гармоника, сдвинутая на  $0^\circ$ .

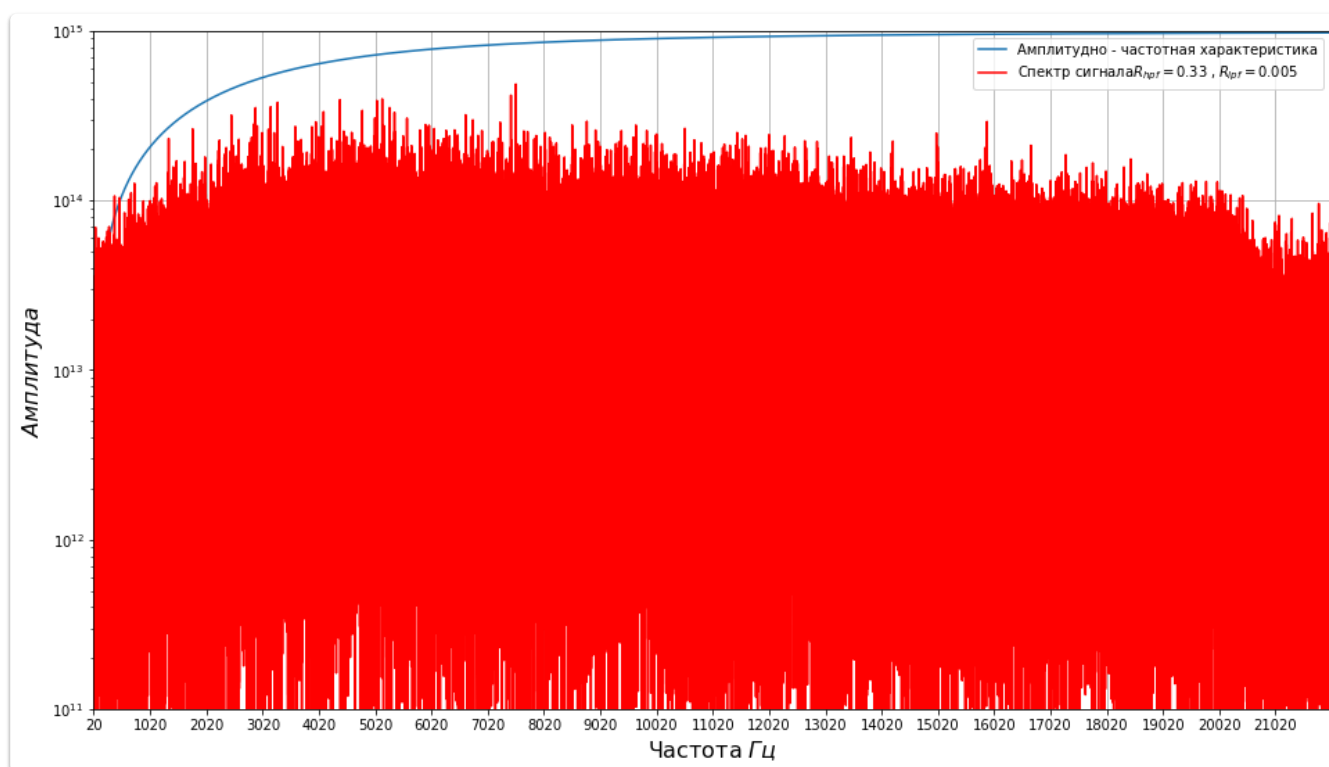
### Результаты второго эксперимента - фильтрация шума

В этом эксперименте обратная связь отсутствует, а на вход цепи подается белый шум. Устройство работает в качестве фильтра.

Как видим, АЧХ выходного сигнала совпадает с теоретической моделью (повторяет АЧХ цепи):



спектр шума в эксперименте 1 - получили розовый шум



результат второго эксперимента

## Вывод

Удалось собрать схему узкополосного фильтра.

Эксперимент 2 показывает, что модель описания работы устройства составлена верно.

Эксперимент 1 раскрывает возможности использования схемы. Благодаря обратной связи можем получить незатухающие колебания и использовать устройство в качестве генератора.

Устройство может быть усовершенствовано для последующего его использования в области синтеза звука. Потенциометры можем заменены на оптопары. Контролируя светодиоды оптопар при помощи ЦАП(предварительно сняв характеристику оптопар) можем настраивать устройство под определенные ноты.

На данный момент схема может быть полезна в качестве узкополосного фильтра, фильтра высоких частот и фильтра низких частот.

## Приложение

Код может быть найден по ссылке: <https://github.com/ShmakovVladimir/Labs>

Литература:

- Козел, Локшин - Модулированные колебания, Спектральный Анализ, Линейная фильтрация
- [Документация библиотеки scipy](#)
- Статья - [Операционные усилители: 10 схем на \(почти\) все случаи жизни](#)
- [Документация ОУ TL072\(071\)](#)
- [Serge resonant eq](#) - схема «резонантного» эквалайзера из синтезатора serge - в работе использована упрощенная версия части этой схемы