

Резонансный синтез

Шмаков Владимир ФФКЭ - группа Б04-105

МФТИ - декабрь 2022

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 пропуская одним осциллятором через специальные схемы(например схему вейвфолдера).

Все эти 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 было сложной задачей. Однако даже без этой схемы в СССР выпускались фильмы с электронным звуковым сопровождением(например «Человек - Амфибия», мультфильм «Вор»). Одно из устройств, использовавшихся для синтеза звука в те годы и рассмотрено в работе(схема не идентична схемам тех лет).

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.

Именно на этом принципе и построен

Цель работы

- Создать устройство для синтеза звуков. Сигналы устройства могут быть использованы для синтеза ударных и мелодических инструментов. Устройство может являться частью большого инструмента и выступать в роли фильтра/генератора.
- Описать работу устройства, и составить математическую модель. Модель может быть полезна для настройки схемы с помощью цифровых технологий.

Оборудование

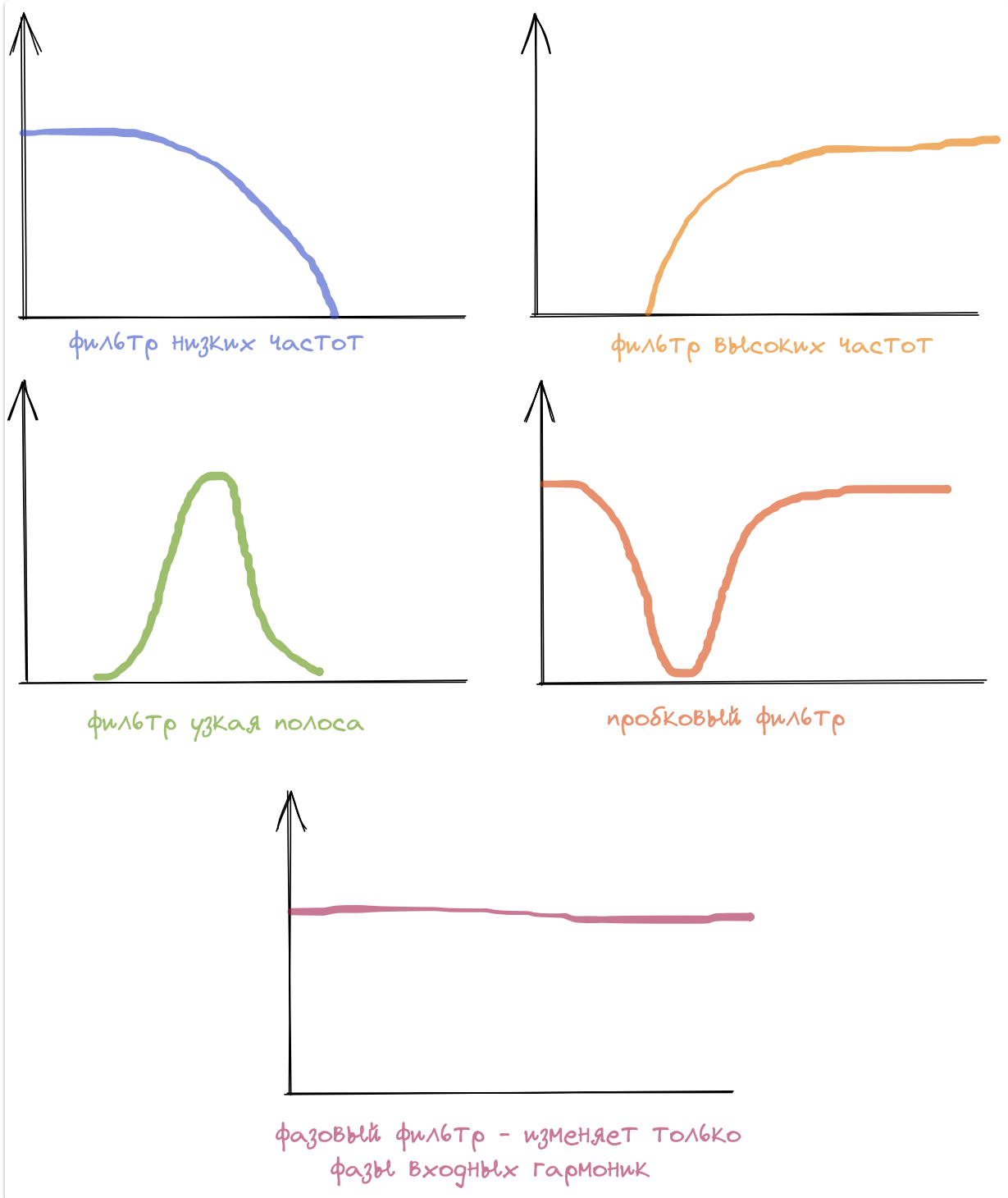
- Радиодетали:
 - Два конденсатора ёмкостью $0.1 \mu F$
 - Конденсатор небольшой ёмкости(для сглаживания сигнала кнопки) - я использовал керамический конденсатор ёмкостью $22 pF$
 - Два потенциометра на $10 k\Omega$
 - Резисторы:

- 100 кОм - 4 штуки
- 4.7 кОм - 2 штуки
- Кнопка
- Источник питания - использовалась батарейка «крона» с напряжением 9V
- Операционный усилитель TL071 - использовал «половинку» TL072
- Приборы:
 - Диктофон
 - Мультиметр(для измерения сопротивления)
 - Компьютер(для подачи сигнала на цепь и обработки результатов)
- Программное обеспечение:
 - Интерпретатор языка Python
 - Библиотека numpy - для вычислений и построения графиков
 - 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

Теоретические сведения

Линейная фильтрация

Фильтр - устройство для выделения желаемого диапазона спектра из спектра входного сигнала. Аналоговые фильтры делят на несколько основных категорий:



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 : $g(t) = \hat{L}f(t)$

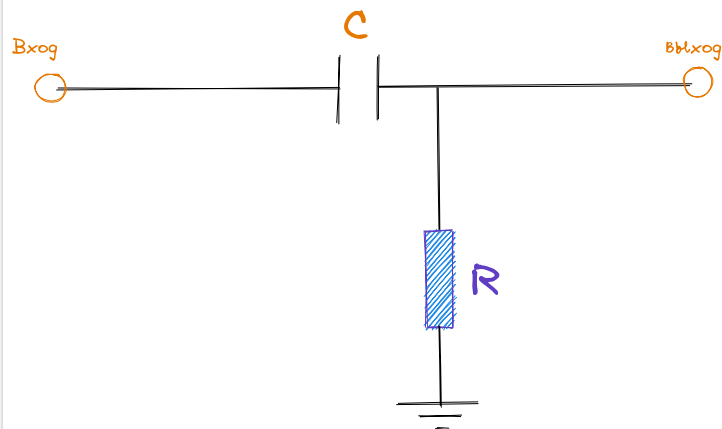
Назовём фильтр **линейным**, если для оператора \hat{L} верно свойство линейности:

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

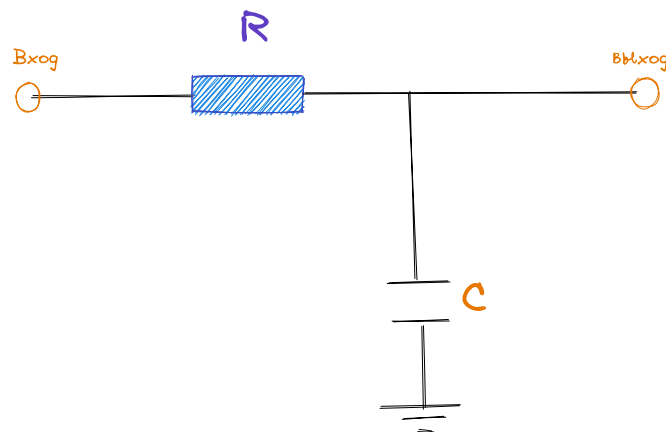
Таким образом, для расчета отклика линейного фильтра нужно знать только гармонический состав входного сигнала $f(t)$

RC цепь - фильтр высоких и низких частот

Фильтр высоких частот



Фильтр низких частот



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 фильтра высоких и низких частот.

АЧХ и ФЧХ фильтра низких частот представлено формулой ниже:

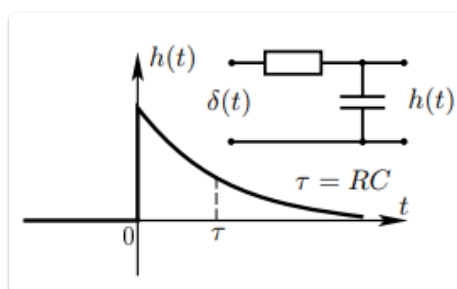
$$U_{out} = U_{in} \frac{X_c}{\sqrt{R^2 + X_c^2}}, X_c = \frac{1}{2\pi\nu C}, \phi(\omega) = -\arctg(\omega RC)$$

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 δ импульс

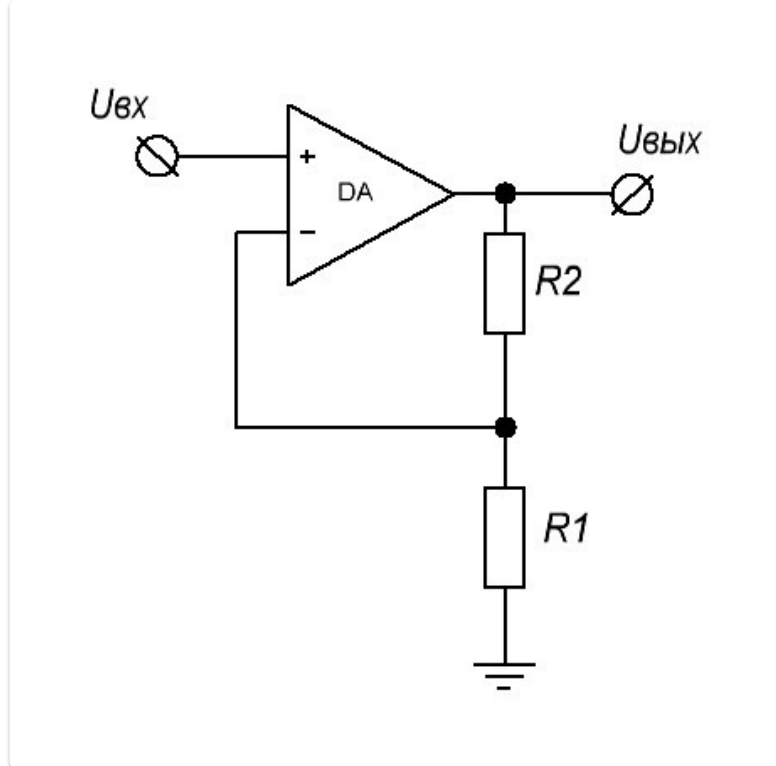
Свободные колебания в RC цепочках затухают на 99% за время $t = 5\tau = 5RC$:



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

Операционный усилитель в режиме неинвертирующего усилителя

Операционный усилитель - достаточно сложное устройство, для описания которого требуется немало времени. В этой работе нам пригодится схема, изображенная на рисунке ниже:



Коэффициент усиления ОУ в таком режиме работы находится по формуле:

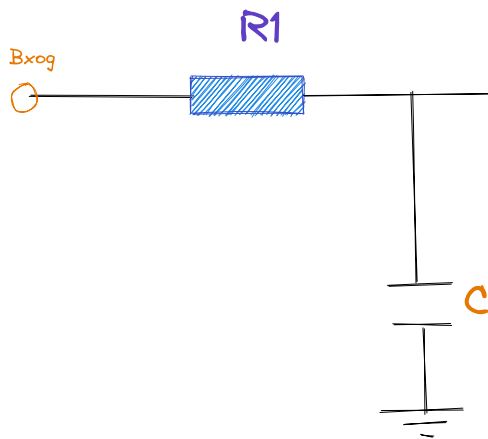
$$k = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Методика

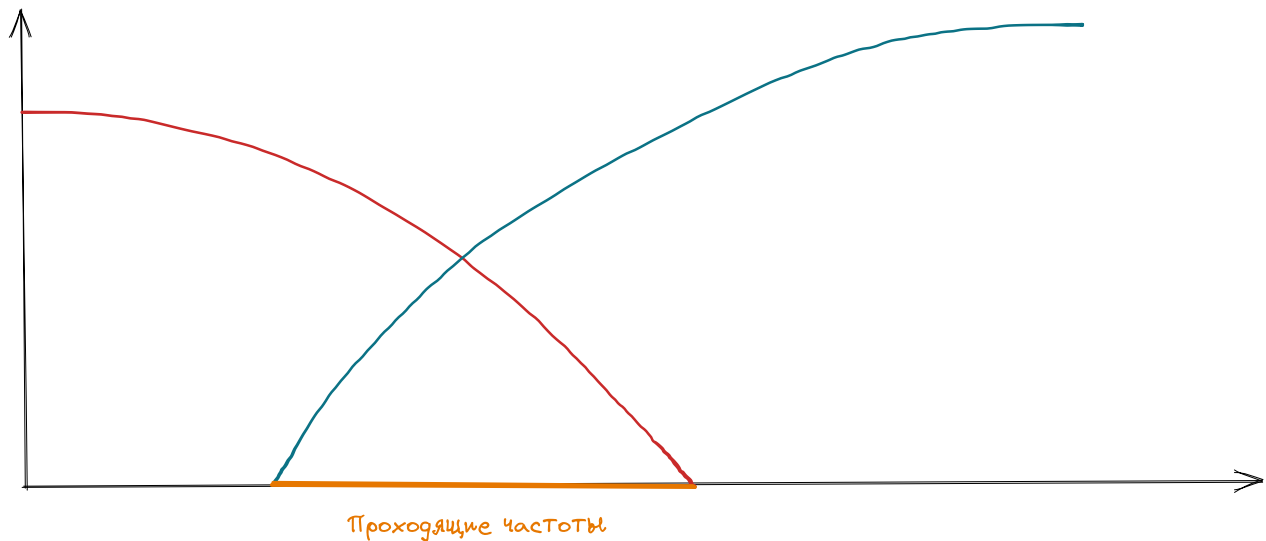
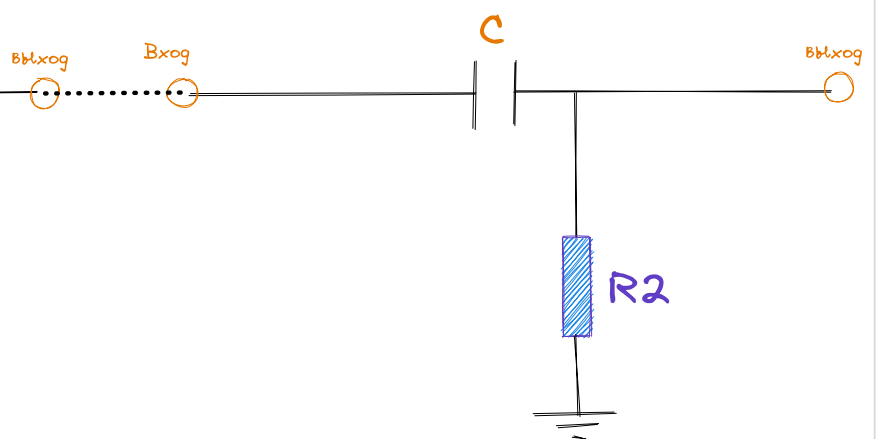
Описание экспериментальной установки

Для получения нужной АЧХ совместим интегрирующую и дифференцирующую RC цепочки:

Фильтр низких частот

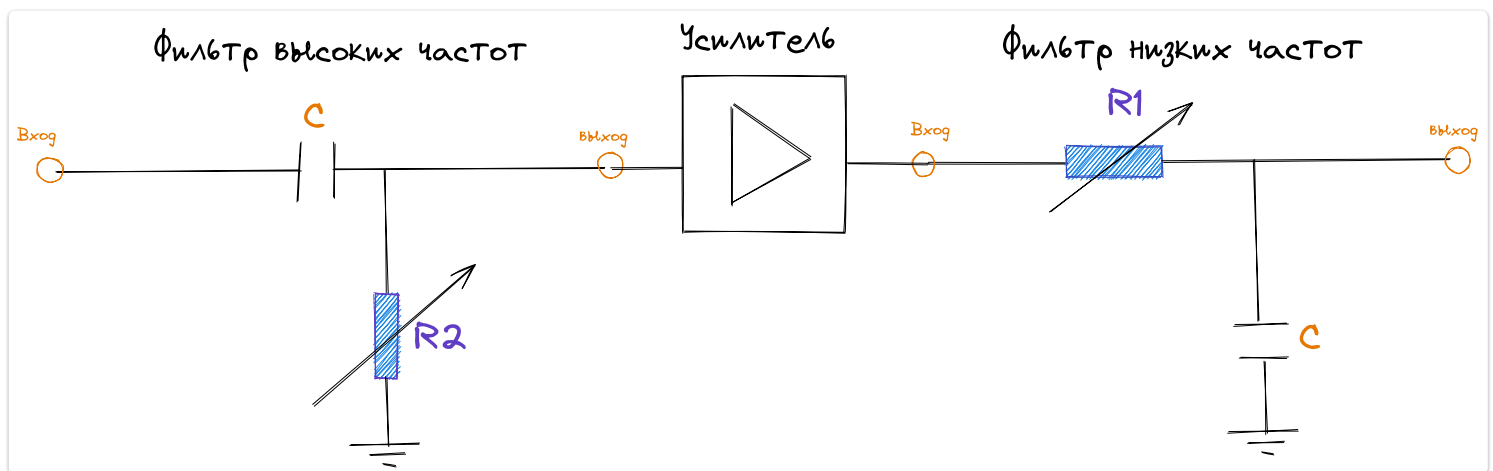


Фильтр высоких частот



Так, мы получили пассивный фильтр узкой полосы. Его главный минус заключается в маленькой амплитуде выходного сигнала (в силу падения напряжения на элементах). Так же данная схема не может поддерживать колебания самостоятельно.

Чтобы убрать вышеперечисленные недостатки, добавим в схему операционный усилитель (в режиме неинвертирующего усилителя):

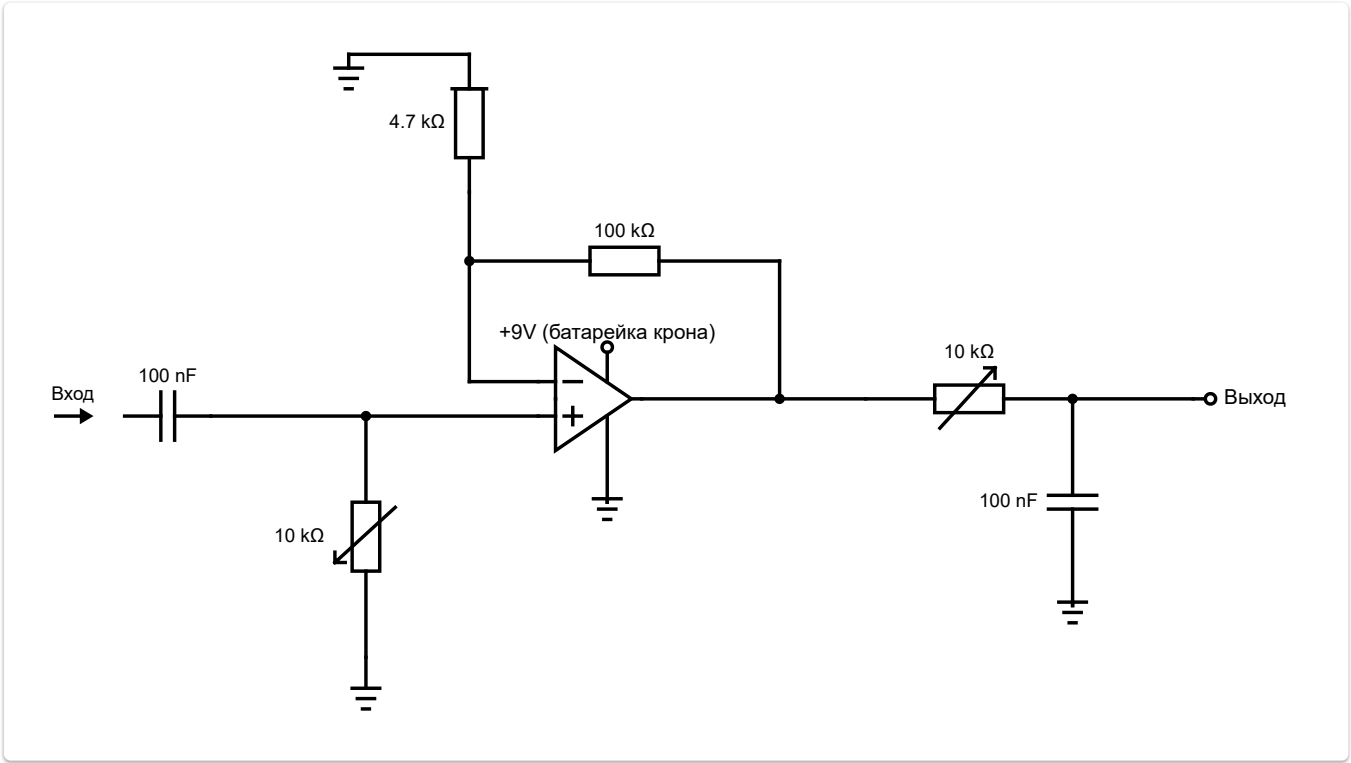


блок-схема устройства

Будем использовать переменные резисторы с максимальным сопротивлением. Нужно подобрать ёмкость конденсатора так, чтобы частота среза ($1/2\pi RC$) удобно регулировалась на интервале слышимых частот (см. блокнот). Наилучшим образом подходит ёмкость 50 nF . Ближайшее к этому значению ёмкости (из доступных мне) - 100 nF .

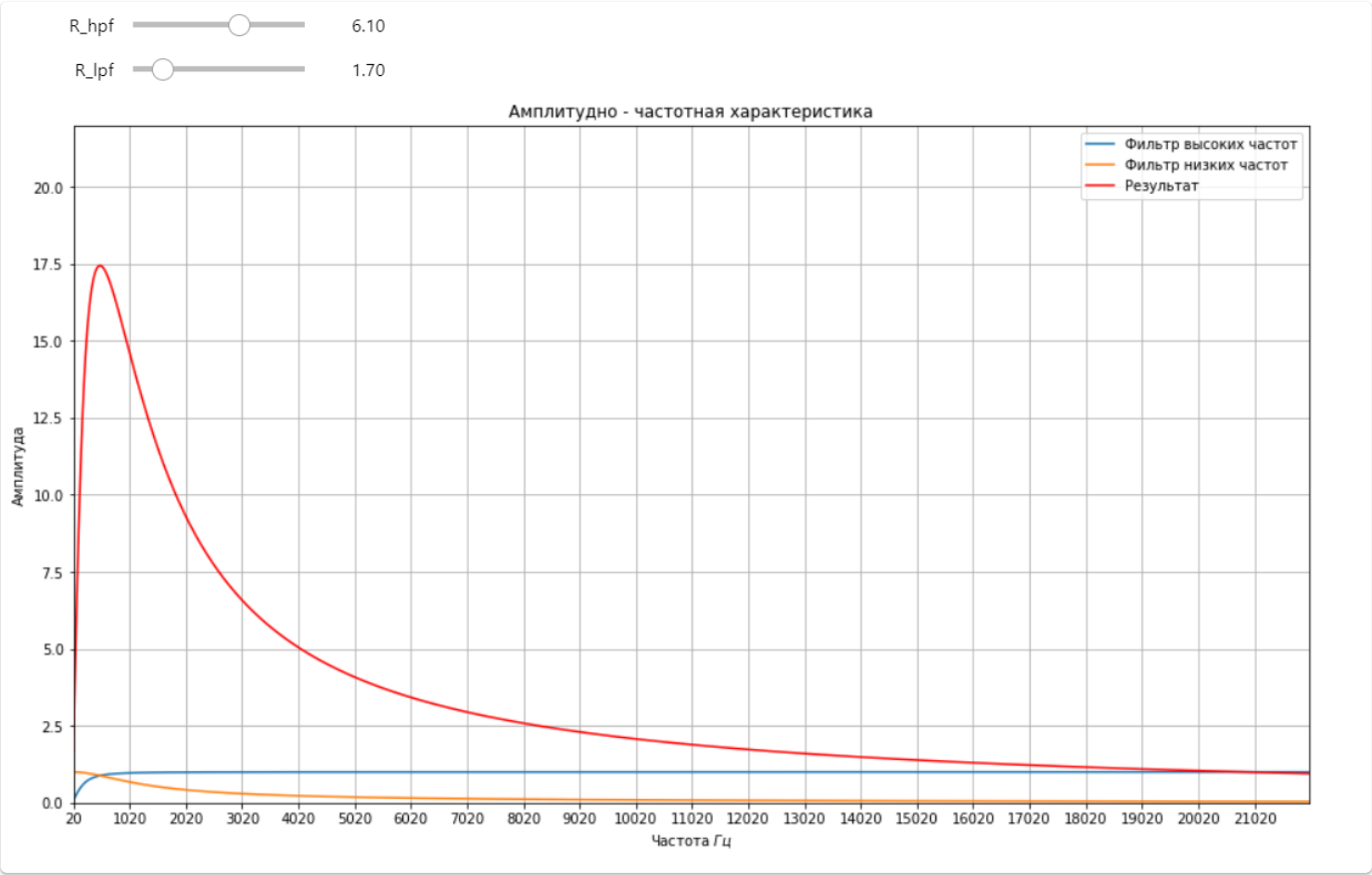
Также необходимо подобрать коэффициент усиления так, чтобы колебания системы были различимы на фоне шума. Остановимся на коэффициенте $k = 1 + 100/4.7 = 22.3$.

Итоговую схема устройства:



итоговая схема

Для схемы построена теоретическая модель(см. блокнот):

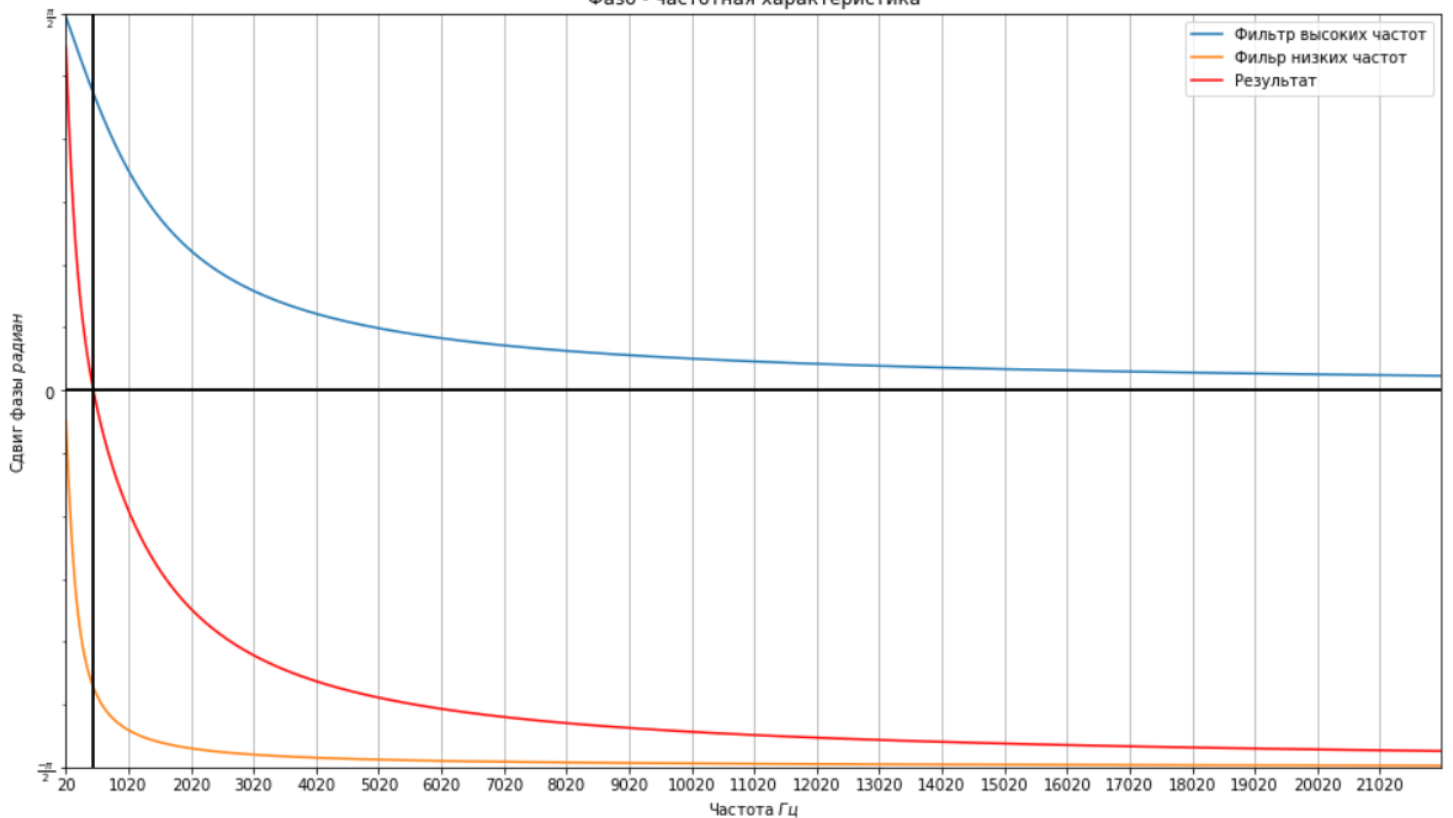


R_hpf

R_lpf

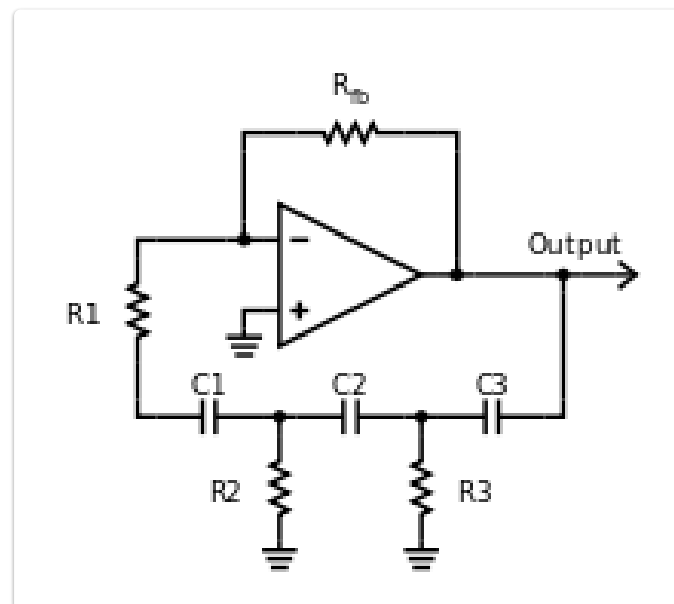
Совпадение фазы на частоте: 459.4407461848265

Фазо - частотная характеристика

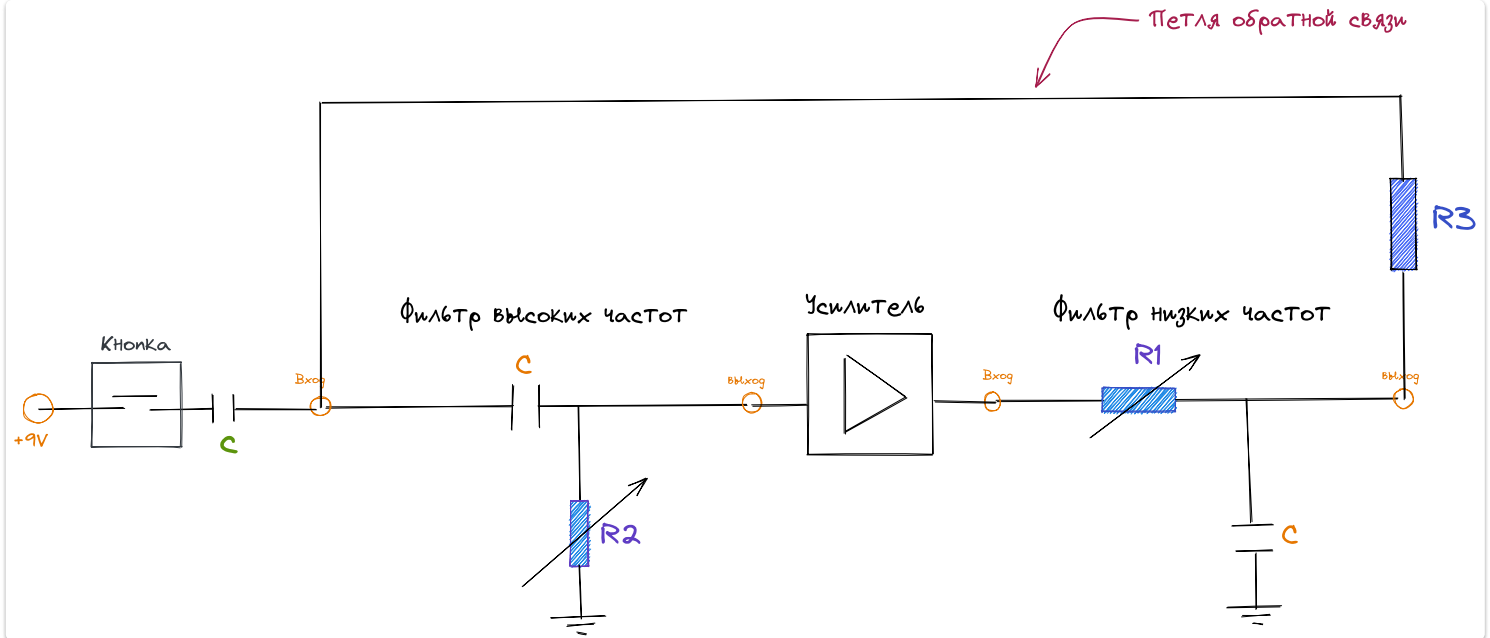


Эксперимент 1 - «режим самовозбуждения»

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



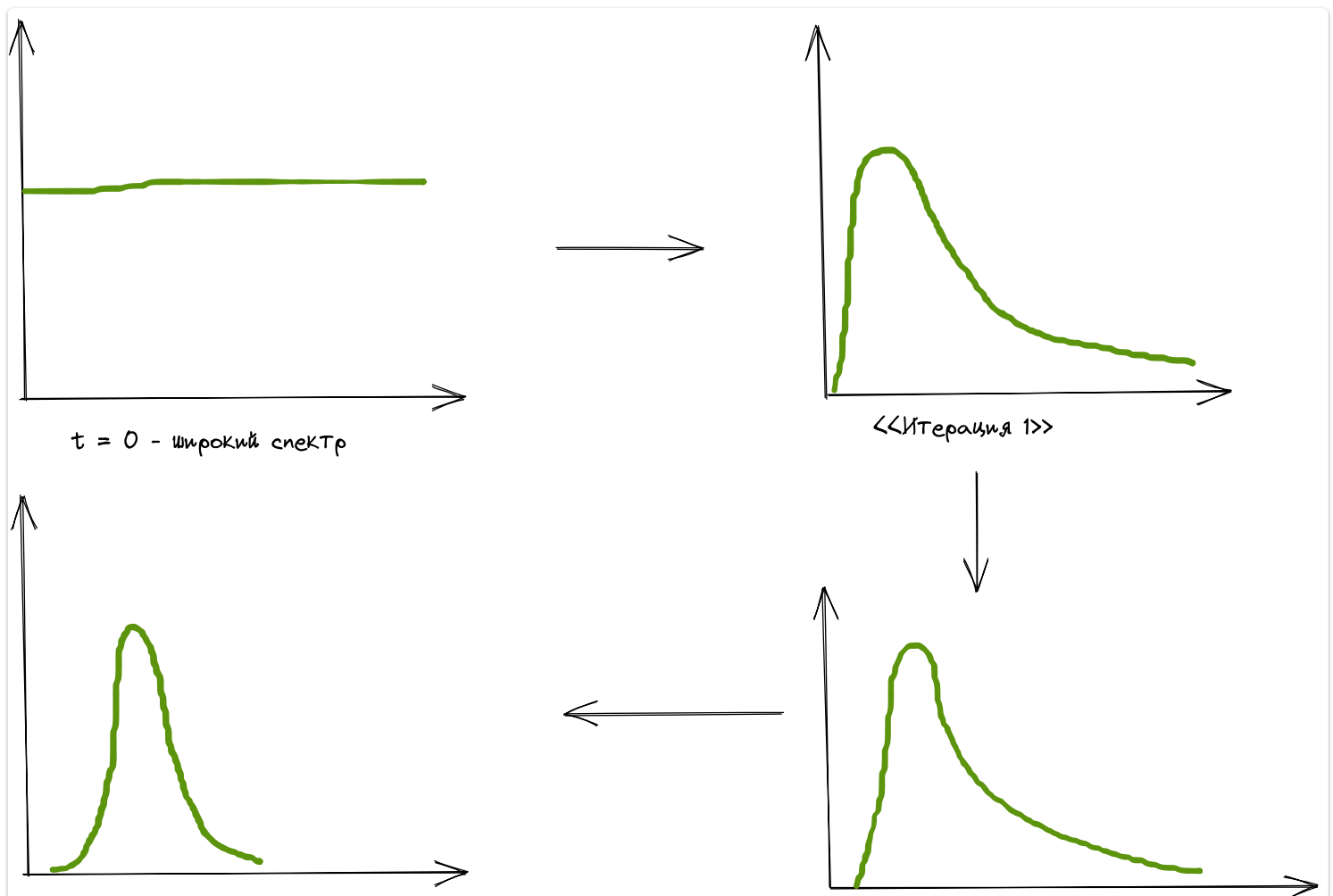
Соединим выход устройства с входом, через небольшое сопротивление ($R_3 = 220 \text{ Ом}$). Колебания будем возбуждать нажатием на кнопку (сигнал которой выведен на вход):



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

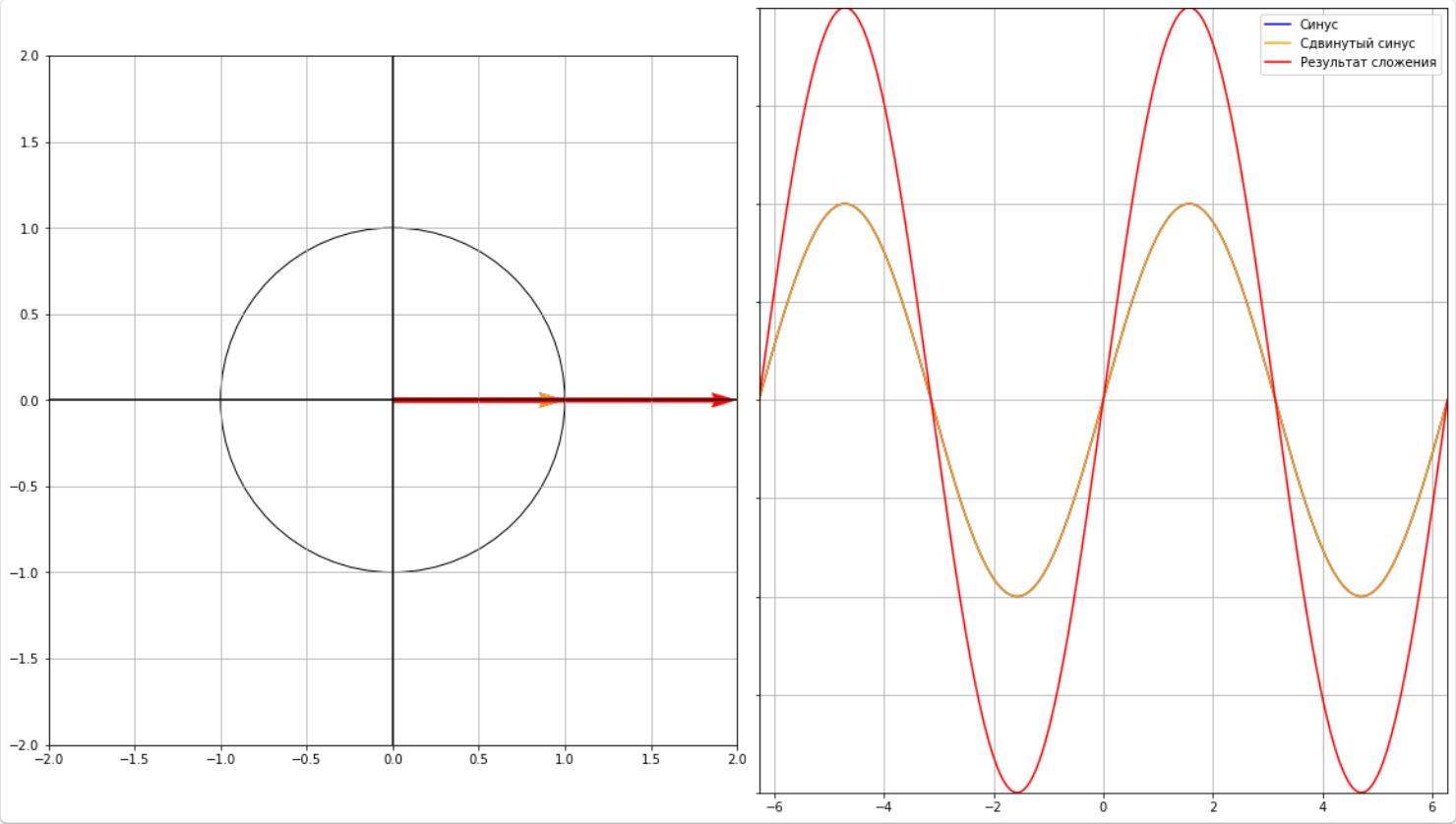
- При нажатии на кнопку, на вход цепи подаётся сигнал с широким спектром.(см. теоретическую часть)
- Из широкого спектра выделяется только узкий диапазон частот(ширина зависит от сопротивления R_2 и R_1) - их амплитуда возрастает. Амплитуда остальных гармоник падает
- Выходной сигнал смешивается с сигналом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

Изменение спектрального состава выходного сигнала можно продемонстрировать на схеме:



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

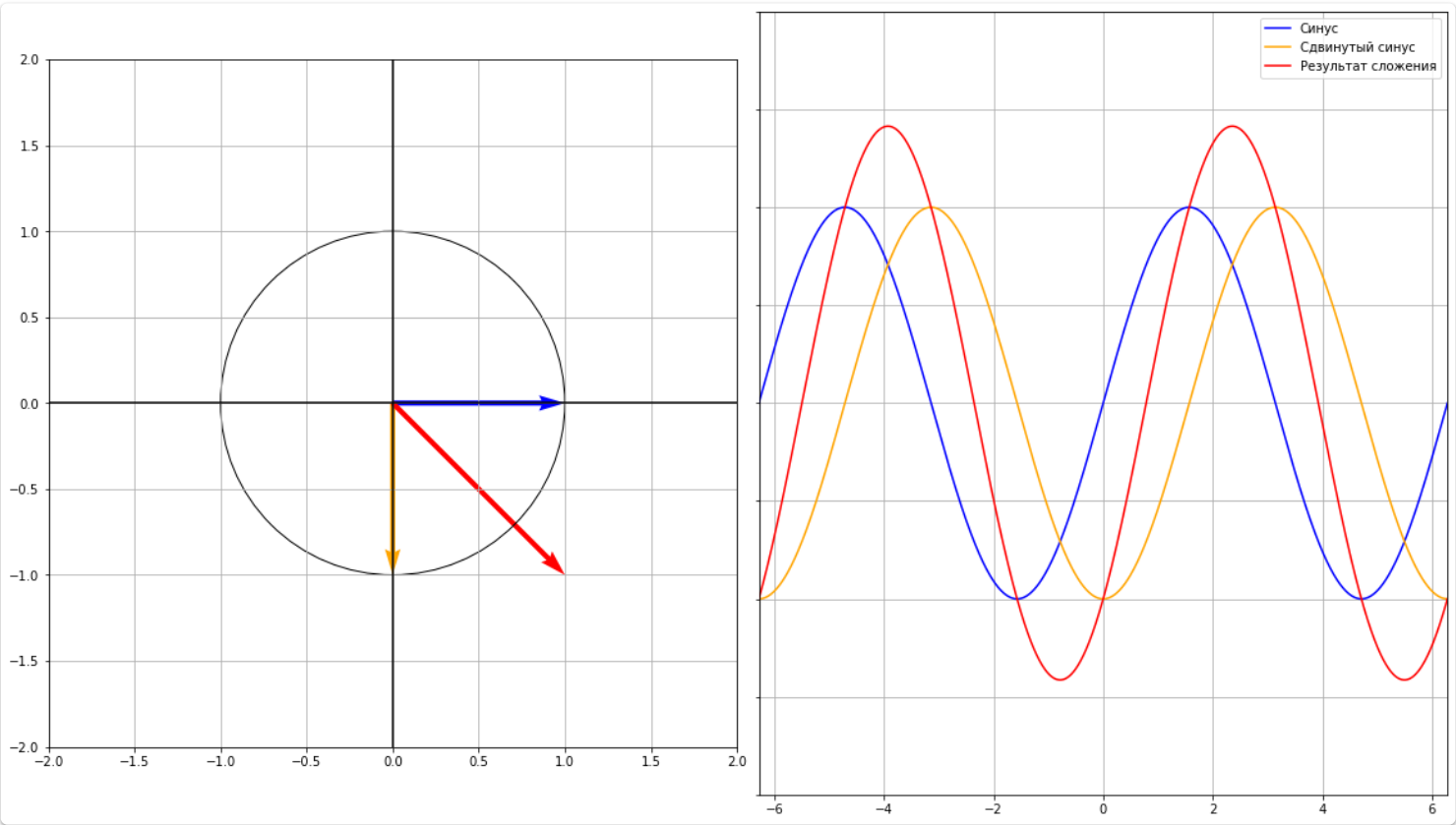
На входе сигналы цепи сигналы могут смешиваться в разных фазах. Увеличение амплитуды зависит от разности фаз сигналов. Наибольшая амплитуда получается в том случае, если разность фаз - 0°:



Такая разность достигается на частоте:

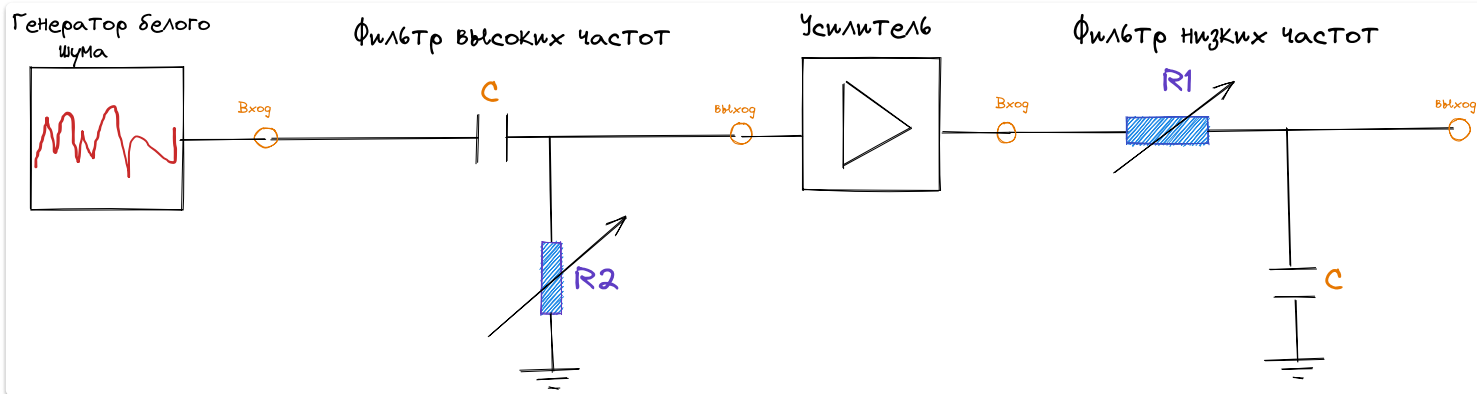
$$F = \frac{1}{2\pi C \sqrt{R_1} \sqrt{R_2}}$$

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».



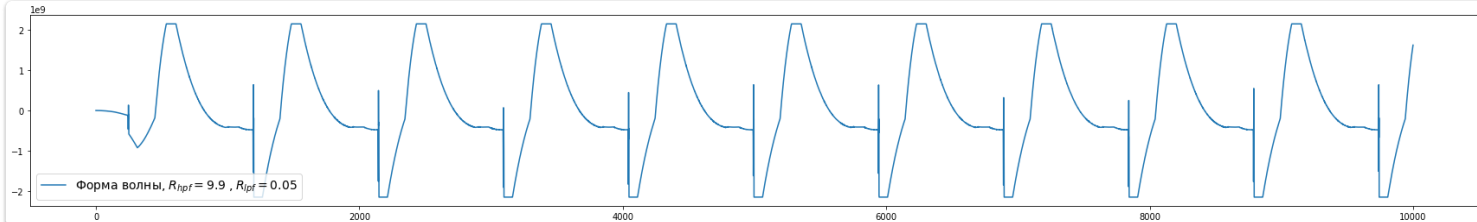
Обработка результатов

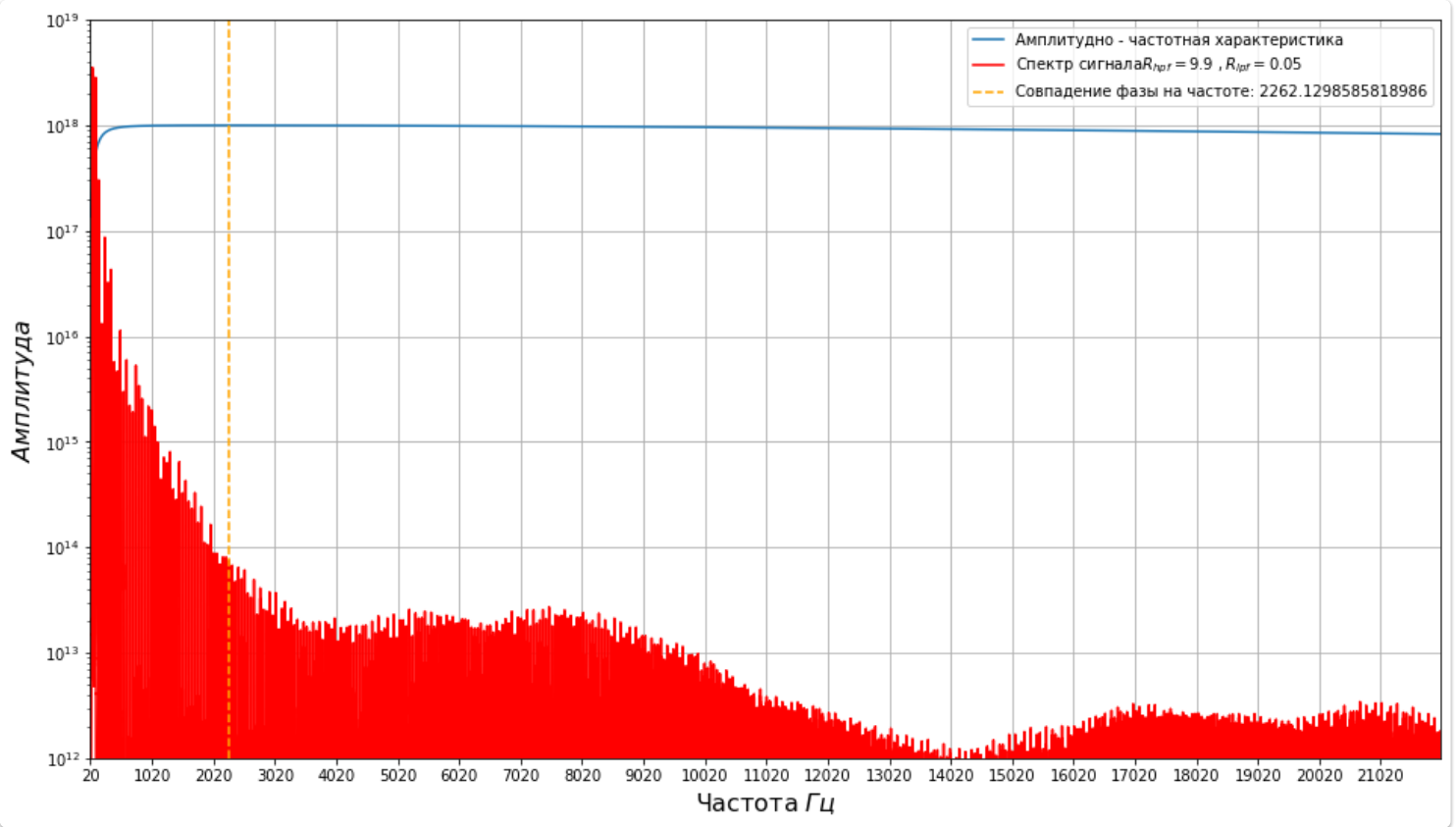
Для обработки результатов используем библиотеку «scipy», а именно её модуль «fft». Функции библиотеки позволяют раскладывать в ряд сигналы, записанные в wav файлах.

Результаты первого эксперимента

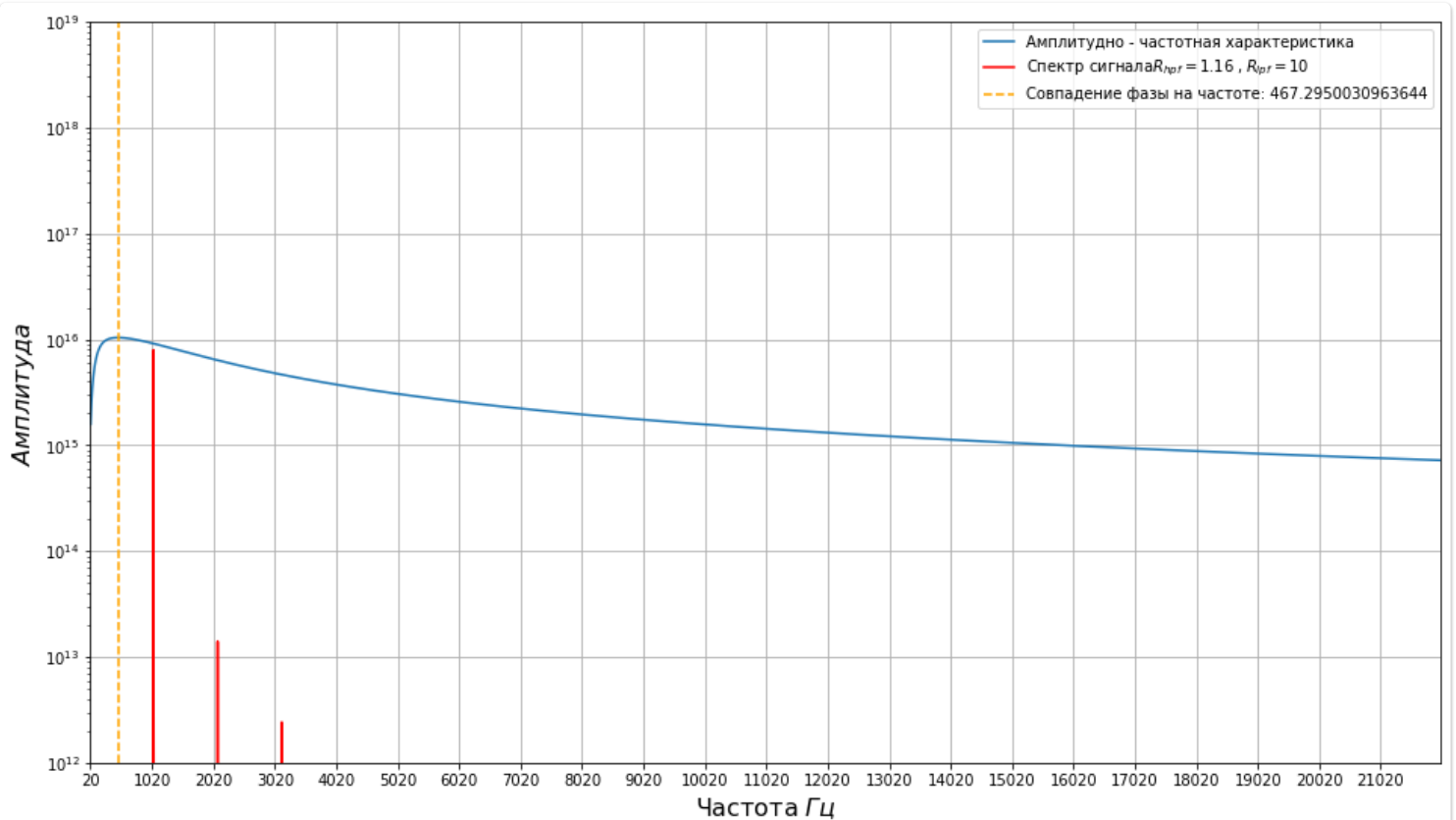
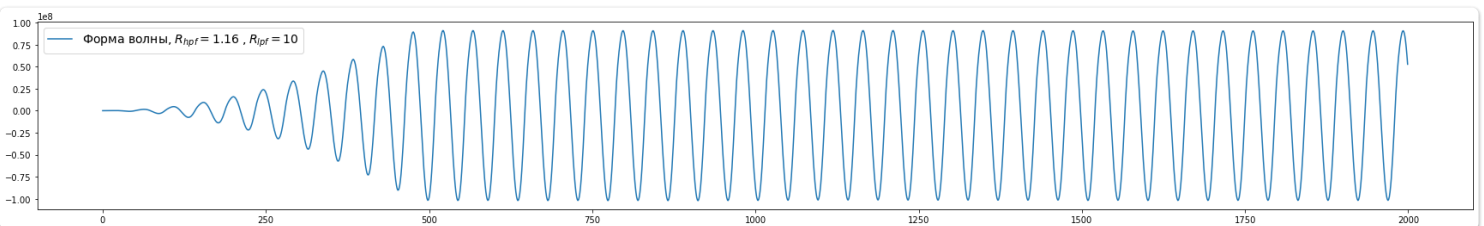
В первом эксперименте было зафиксировано три сигнала - «низкочастотная колебания с широким спектром», «синусоидальные колебания(узкий спектр вырезаемых частот)», «синусоидальное колебание и несколько обертонов».

Формы волны и спектры полученных сигналов представлены на графиках ниже:

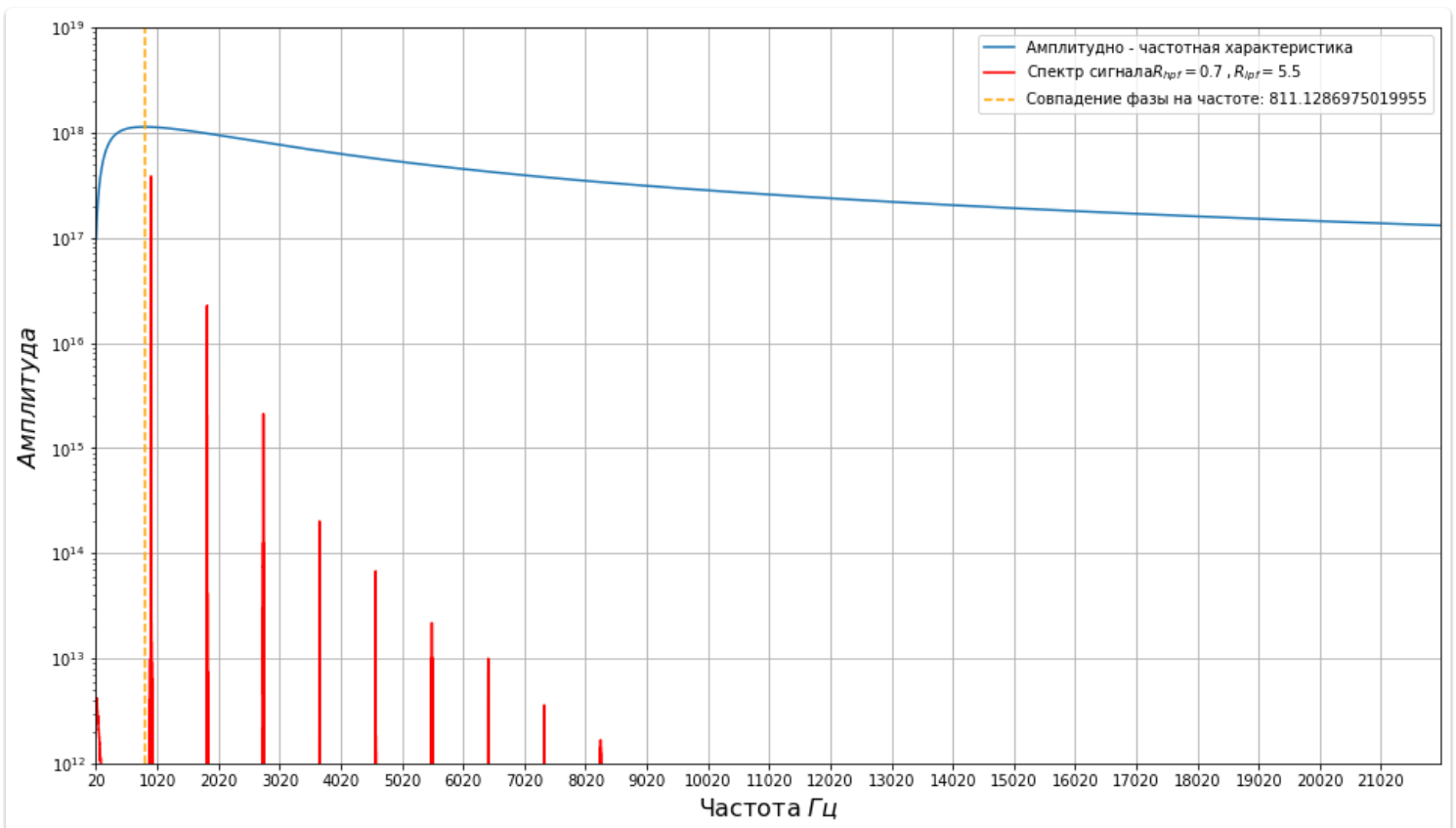
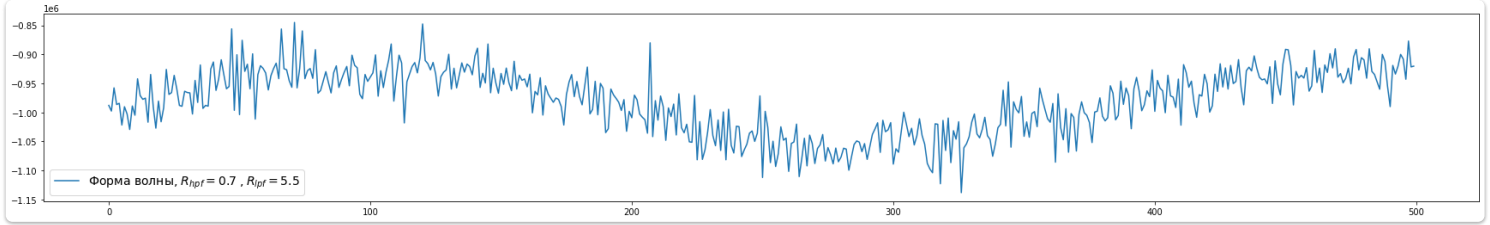




Форма волны и спектр первого сигнала



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.

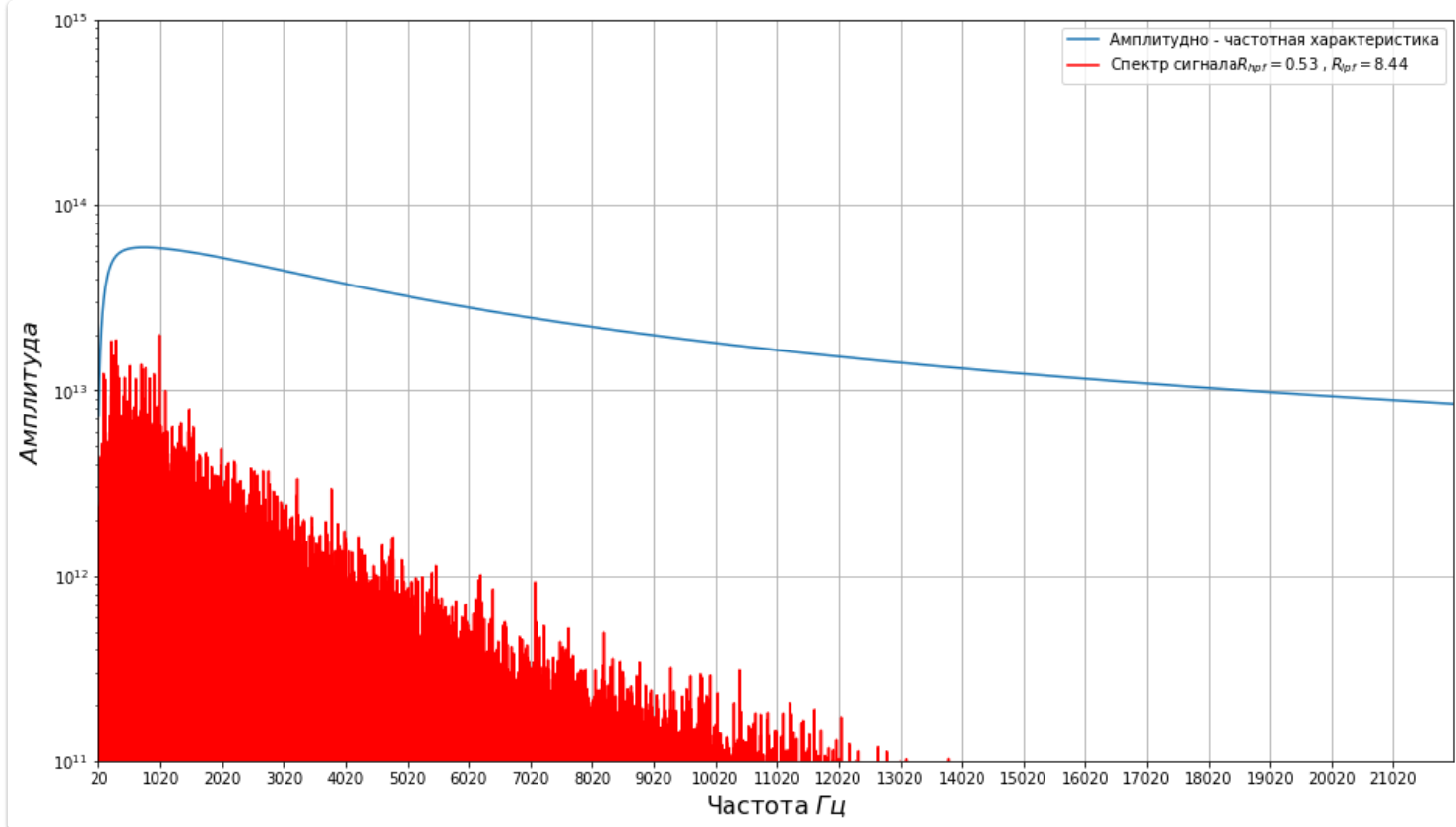
При большой добротности исходного пика ($Q > 1500$ - как в эксперименте 2) удастся получить на выходе «чистые» синусоидальные колебания.

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° .

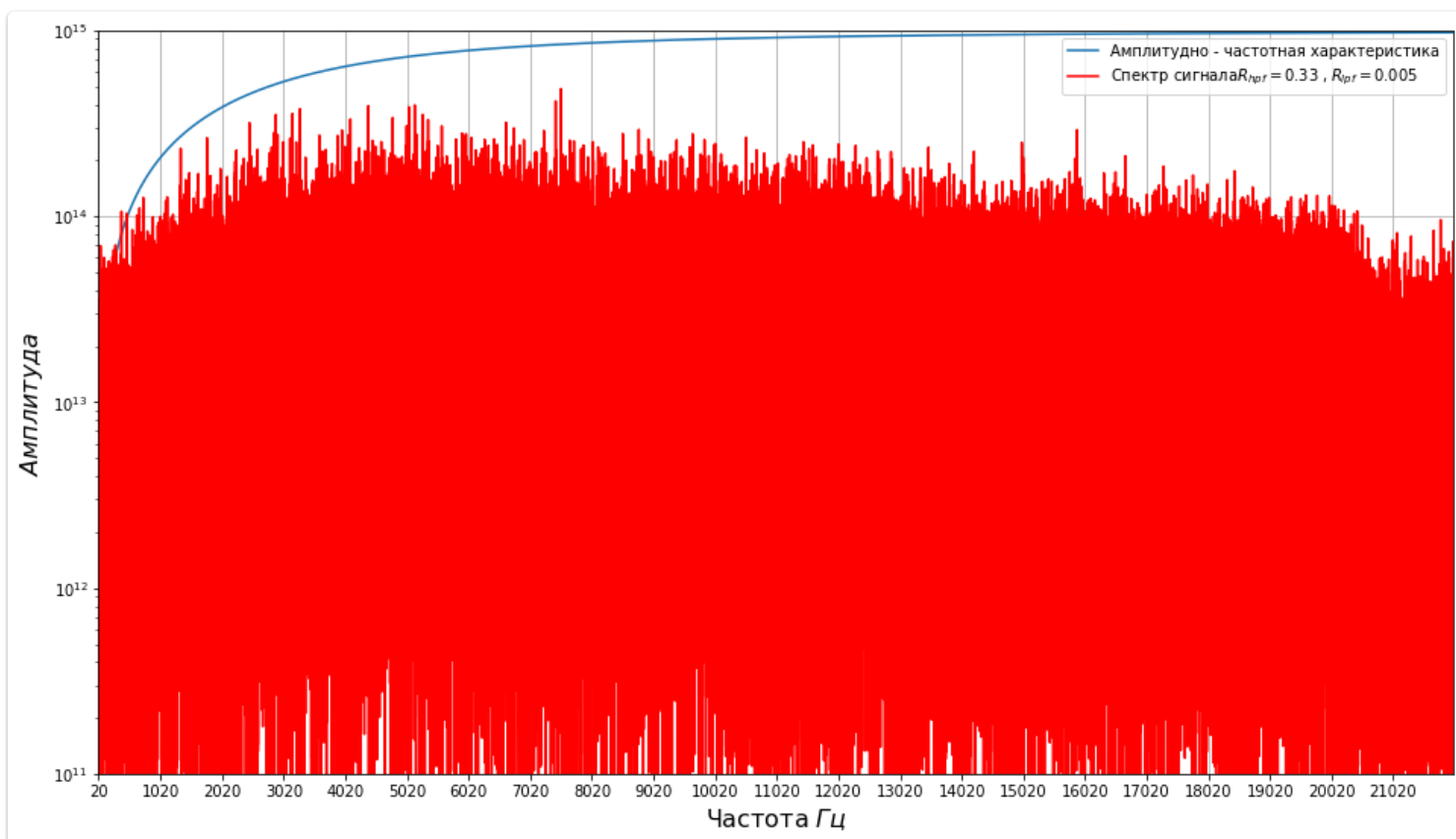
Результаты второго эксперимента - фильтрация шума

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

Приложение

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

Литература:

- Козел, Локшин - Модулированные колебания, Спектральный Анализ, Линейная фильтрация
- [Документация библиотеки scipy](#)
-