

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Легаев Александр Андреевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение амплитудных и фазовых характеристик узкополосного
фильтра**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа № 18309

Научный руководитель:

к.-ф.-м. н., с. н. с. Ермолаев Ю. Г.

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

доцент Костюрина А. Г.

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н., доцент Астрелин В.Т.

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск, 2019

Аннотация

Целью данной работы являлось определение характеристик узкополосного (селективного) фильтра с помощью двух различных методов. Для реализации первого метода была собрана цепь, состоящая из генератора переменного напряжения, усилителя, выступающего в качестве фильтра, и осциллографа. На вход усилителя подавался синусоидальный гармонический сигнал фиксированной амплитуды, а осциллограф регистрировал генерируемый и уже преобразованный сигналы. Для сигналов различной частоты проводилась запись осциллограмм. Путем сравнения амплитуд, а также с помощью спектрального анализа сигналов были построены амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики фильтра. Второй метод основан на моделировании дельта функции. На вход усилителя подавался короткий прямоугольный импульс (длительностью 1 мкс), записывалась осциллограмма и проводился спектральный анализ. На основе полученных данных была построена амплитудно-частотная характеристика фильтра. В работе использовался селективный усилитель У2-8. Спектральный анализ проводился с помощью программ, написанных в среде Python. Результаты измерений показали, что характеристики используемого усилителя отличаются от паспортных данных в худшую сторону. Это отличие обусловлено достаточно большим (более 30 лет) сроком эксплуатации прибора.

Ключевые слова: узкополосный фильтр, селективный усилитель, амплитудно-частотная характеристика, фазово-частотная характеристика, спектральный анализ сигнала.

Оглавление

1. Введение	4
2. Теоретическая часть	5
2.1. Фильтры	5
2.2. Обработка сигналов	7
3. Экспериментальная часть	10
3.1. Классический метод измерения АЧХ и ФЧХ	10
3.2. Метод измерения АЧХ с помощью импульсного сигнала.....	13
4. Анализ результатов измерений	14
5. Выводы	16
6. Список литературы	17

1. Введение

Количество цифровых устройств в доме человека с каждым годом увеличивается. Бытовая электроника, компьютеры, смартфоны – практически невозможно представить современную действительность без подобных устройств. Цифровые технологии – это уникальное явление, которое за последние десятилетия полностью поменяло образ жизни почти всех жителей планеты. Вместе с тем развивалась цифровая обработка сигналов (ЦОС). Это наука о представлении сигналов в цифровом виде и методах их обработки. Она охватывает множество предметных областей, таких как обработка изображений и биомедицинских данных, обработка звука и речи, обработка сигналов с сонаров, радаров и сенсоров. Практически в каждой из этих областей применяется фильтрация сигнала, за которую отвечает такое устройство, как частотный фильтр. Актуальность изучения работы фильтра определяется широтой его применения в различных областях науки.

Электрические фильтры характеризуются различными преимуществами. Они пропускают или не пропускают определенный диапазон частот, сохраняют необходимые показатели на выходе, обеспечивают высокую скорость обработки сигнала, а также имеют широкие технические возможности для применения. Из недостатков можно выделить лишь отсутствие универсальных моделей, т. е. для имеющихся требований необходимо выбирать фильтр с определенными характеристиками.

Цель работы заключается в определении основных характеристик узкополосного фильтра на примере селективного усилителя У2-8, сопоставлении полученных результатов с паспортными данными устройства, а также в знакомстве с особенностями цифровой обработки сигналов.

Для достижения цели необходимо было решить следующие задачи.

1. Ознакомиться с методами определения амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик фильтра.
2. Зарегистрировать осциллограммы генерируемого и преобразованного сигналов для различных частот.
3. Разработать алгоритм по обработке данных для определения амплитуды и фазы входного и выходного сигналов.
4. Используя разработанный алгоритм и экспериментально полученные данные, построить графики амплитудно-частотной и фазово-частотной зависимостей.
5. По полученным графикам определить полосу пропускания и добротность фильтра.

2. Теоретическая часть

2.1. Фильтры

Электронный фильтр – это частотно-избирательное устройство, которое служит для передачи (пропускания) сигналов в заданном диапазоне частот (полосе пропускания) и подавления сигналов в других диапазонах частот (полоса задерживания). Различают аналоговые фильтры, в которых обрабатываемый сигнал имеет аналоговую форму, и цифровые фильтры, предназначенные для обработки цифровых сигналов.

Фильтры принято классифицировать по следующим признакам.

1. По виду амплитудно-частотной характеристики (АЧХ): фильтры нижних частот (ФНЧ), фильтры верхних частот (ФВЧ), полосно-пропускающие (ПП) или полосовые фильтры и полосно-задерживающие (ПЗ) или режекторные фильтры.
2. По типам элементов, используемых для реализации: пассивные LC-фильтры, активные RC-фильтры, и фильтры, использующие различные физиче-

ские эффекты в твердых телах (пьезоэлектрические, магнитострикционные, акустооптические и т. п.).

3. По схемам звеньев: линейные и нелинейные.

4. По наличию обратной связи: рекурсивные и нерекурсивные.

К характеристикам фильтров относят: передаточную функцию, амплитудно-частотную и фазово-частотную зависимости, резонансную частоту, полосу пропускания, частоту среза, и добротность.

Передаточная функция $W(p)$ линейной цепи является дробно-рациональной функцией, т. е. представляет отношение двух полиномов от комплексной переменной p :

$$W(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{a_m p^m + a_{m-1} p^{m-1} + \dots + a_1 p + a_0}{b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \dots + b_1 p + b_0},$$

где $U_1(p)$ и $U_2(p)$ – входное и выходное напряжение в операторной форме; a_m и b_n – вещественные постоянные величины; m, n – натуральные числа, определяющие порядок фильтра. В физически реализуемых системах порядок полинома числителя передаточной функции m не может превышать порядка полинома её знаменателя n , то есть $m \leq n$. Полагая $p = i\omega$ (комплексная частота), получаем комплексную передаточную функцию, определяющую реакцию фильтра на гармоническое воздействие. Представим её в следующей форме:

$$W(i\omega) = \frac{U_2(i\omega)}{U_1(i\omega)} = A(\omega) + iB(\omega).$$

Амплитудно-частотная характеристика – это зависимость амплитуды выходного сигнала некоторой системы от частоты её входного гармонического сигнала. В математической теории линейных стационарных систем АЧХ описывает зависимость модуля комплексной передаточной функции линейной системы от частоты:

$$|W(i\omega)| = \sqrt{A^2(\omega) + B^2(\omega)}.$$

Фазово-частотная характеристика – это зависимость сдвига по фазе между гармоническими колебаниями на выходе и входе линейной электрической цепи от частоты гармонических колебаний на входе. Другими словами – аргумент передаточной функции:

$$\arg(W(i\omega)) = \arctg \frac{B(\omega)}{A(\omega)}.$$

Резонансная частота f_p – это частота, на которой коэффициент передачи (передаточная функция) фильтра имеет максимальное или минимальное значение (для полосовых и заграждающих фильтров соответственно).

Частота среза – это частота, на которой наблюдается спад коэффициента передачи на 3 дБ по сравнению с коэффициентом передачи на нулевой (для ФНЧ), бесконечной (для ФВЧ) или резонансной (для ПП или ПЗ фильтра) частоте.

Полоса пропускания (подавления) Δf – это ширина диапазона частот, на границах которого коэффициент передачи на 3 дБ ниже (выше) максимального (минимального) значения.

Добротность Q – это отношение резонансной частоты к ширине полосы пропускания:

$$Q = \frac{f_p}{\Delta f}.$$

В данной работе определяются характеристики селективного аналогового активного усилителя У2-8 с паспортной добротностью $Q = 100$.

2.2. Обработка сигналов

Дискретные и непрерывные сигналы

Большинство реальных сигналов (например, звуковых) являются непрерывными функциями. Для обработки таких сигналов на компьютере требуется перевести их в цифровую форму. Один из способов сделать это – равномерно по времени измерить значения сигнала на определенном промежутке времени.

Этот процесс называется равномерной (по времени) *дискретизацией*. В результате непрерывный (аналоговый) сигнал переводится в последовательность чисел. Устройство, выполняющее этот процесс, называется аналогово-цифровым преобразователем (АЦП). Частота, с которой АЦП производит замеры аналогового сигнала и выдает его цифровые значения, называется *частотой дискретизации*.

Возникает вопрос: при каких условиях на исходный сигнал и на частоту дискретизации можно с необходимой степенью точности восстановить исходный сигнал по его цифровым значениям? Согласно теореме Котельникова, если непрерывный сигнал имеет спектр, ограниченный частотой F_{max} , то он может быть полностью и однозначно восстановлен по его дискретным отсчетам, взятым через интервалы времени:

$$T = \frac{1}{2F_{max}}.$$

т. е. с частотой $F_d \geq 2F_{max}$, где F_d — частота дискретизации; F_{max} — максимальная частота спектра сигнала. Другими словами частота оцифровки сигнала (частота дискретизации АЦП) должна как минимум в 2 раза превышать максимальную частоту сигнала, который мы хотим измерить.

Дискретное преобразование Фурье

Преобразование Фурье является операцией, которая ставит в соответствие сигналу $s(t)$, заданному во времени, его функцию $S(\omega)$. При этом осуществляется переход из временной области в частотную:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)e^{-i\omega t} dt.$$

Эта функция представляет собой спектр сигнала — совокупность гармонических составляющих с конкретными значениями частот, амплитуд и начальных фаз, образующих в сумме сигнал.

Для того чтобы вычислить спектр оцифрованного сигнала используется дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Этот оператор обладает теми же свойствами, что и непрерывное преобразование Фурье, но так как невозможно измерить бесконечные сигналы, вычисление спектра сводится от бесконечной суммы к ряду по N :

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-i \frac{2\pi nk}{N}}.$$

Быстрое преобразование Фурье

ДПФ для своей реализации требует выполнения N^2 умножений комплексных чисел. ДПФ может быть сильно упрощено, если использовать свойства симметрии и периодичности коэффициентов. Результатом переработки выражений для ДПФ является быстрое преобразование Фурье (БПФ).

В настоящей работе используется быстрое преобразование Фурье с прореживанием по времени. Этот способ требует операций почти вдвое меньше, чем просто прямое дискретное преобразование Фурье. Таким образом, разбивая последовательность на максимальное количество частей, мы можем эффективно вычислять преобразование. Наибольшая степень ускорения вычислений может быть достигнута при $N = 2^k$, тогда разбиение последовательности на две части можно продолжать до тех пор, пока не получим двухэлементные последовательности. В таком случае число операций уменьшается в $N/\log_2(N)$ раз.

Фильтр как дискретная система

Дискретный сигнал представляет собой последовательность чисел. В общем случае произвольную последовательность $x(n)$ можно записать в виде:

$$x(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) \delta(n - k),$$

где $\delta(n - k)$ – это единичный импульс со сдвигом k .

Система определяется математически как однозначное преобразование или оператор, отображающий входную последовательность $x(n)$ в выходную последовательность $y(n)$, что математически записывается так: $y(n) = T[x(n)]$. Фильтр можно представить в виде дискретной линейной системы. Для нее:

$$y(n) = T \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) \delta(n-k) \right] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) T[\delta(n-k)] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) h_k(n),$$

где h_k – отклик системы на единичный импульс. Кроме того, фильтр – это система, которая инвариантна к сдвигу. Отсюда следует, что откликом на $\delta(n-k)$ будет $h(n-k)$:

$$y(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) h(n-k).$$

Это выражение называется сверткой и обозначается так:

$$y(n) = h(n) * x(n).$$

Когда индекс n связывается со временем, свойству инвариантности к сдвигу соответствует свойство инвариантности во времени. Таким образом, любая инвариантная к сдвигу система полностью характеризуется импульсной характеристикой $h(n)$.

3. Экспериментальная часть

3.1. Классический метод измерения АЧХ и ФЧХ

Описание метода

Идея данного метода заключается в измерении отношения модулей амплитуд генерируемого и преобразованного усилителем сигналов на разных частотах. На вход исследуемого прибора подается синусоидальный гармонический сигнал фиксированной амплитуды. На осциллографе наблюдаются входной и выходной гармонические сигналы, спектры которых содержат только одну значимую гармонику.

Измерения АЧХ и ФЧХ проводились следующим образом. Устанавливался определенный уровень генерируемого сигнала, который в процессе измерения оставался постоянным. Частота входного сигнала устанавливалась вручную. Осциллограммы сигналов в режиме единичного измерения записывались в текстовый файл. После записи на генераторе устанавливалась другая частота и измерения повторялись. Таким образом, результатом измерений был набор файлов, состоящий из осциллограмм входного и выходного синусоидальных сигналов с определенной частотой.

Описание установки

Установка для измерения АЧХ селективного усилителя У2-8 представляет собой цепь, состоящую из генератора переменного напряжения Г6-28, цифрового запоминающего осциллографа АКИП-4122/11 V и непосредственно самого усилителя. Блок-схема установки представлена на рис. 1. Гармонический сигнал с генератора поступал на вход усилителя и на первый канал осциллографа. Его амплитуда не превышала 0,025 В. С усилителя сигнал поступал на второй канал осциллографа. При проведении измерений коэффициент усиления фильтра менялся в диапазоне от 40 дБ до 90 дБ. Это необходимо для обеспечения большей точности записанных осциллограмм. В дальнейшем этот коэффициент учитывался при нормировке АЧХ усилителя.

Селективный усилитель У2-8 выполняет фильтрацию и усиление малых напряжений синусоидальной формы. У2-8 имеет два режима усиления: широкополосный и селективный (узкополосный). В селективном режиме усиления диапазон усиливаемых частот (от 20 Гц до 100 кГц) перекрывается поддиапазонами: 20–200 Гц; 200–2000 Гц; 2–20 кГц; 20–100 кГц. Коэффициент усиления имеет ступенчатую регулировку от 0 до 120 дБ с шагом в 10 дБ. В данной работе рассматривается диапазон 20–200 Гц. Исследуемый усилитель, согласно паспортным данным является 1% полосовым фильтром, т. е. его добротность равна 100.

Генератор сигналов специальной формы Г6-28 – это источник сигналов в диапазоне инфранизких, низких и высоких частот (0,001 Гц – 1 МГц). Он генерирует сигналы синусоидальной, треугольной, прямоугольной и пилообразно-импульсной формы и имеет высокую стабильность.

Цифровой запоминающий осциллограф АКИП-4122/11V, используемый в

данной работе, является двухканальным и имеет АЦП с максимальной частотой дискретизации 100 МГц. Прибор допускает одновременное подключение по двум каналам и позволяет записывать в текстовый файл осциллограммы длиной до 100000 точек по каждому каналу при разрядности 12 бит. Для большей длины временной развертки разрядность АЦП составляет 8 бит.

Программное обеспечение

Обработка полученных данных проводилась с помощью программы, написанной на языке программирования Python. Программа считывает данные из файлов в заданной директории, а затем выполняет проверку соответствия физических величин, значений пробников и вертикальных позиций на обоих каналах. Определение частоты проводится по входному сигналу, поскольку его амплитуда не зависит от частоты. Для улучшения точности преобразований сигналы обрезаются до целого количества периодов. С помощью БПФ находятся амплитудные спектры сигналов. Ищется гармоника, амплитуда которой максимальна. Далее с учетом нормировки определяются значения амплитуды и фазы для каждого сигнала. Рассчитываются коэффициент передачи и разность фаз, а затем строятся графики АЧХ и ФЧХ. Для более точного определения частот среза происходит интерполяция амплитудно-частотной зависимости кубиче-

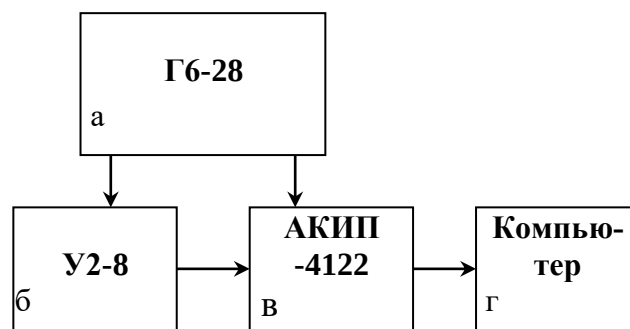


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: а – генератор сигналов специальной формы Г6-28; б – усилитель У2-8; в – осциллограф АКИП-4122/11 V; г – компьютер

ским сплайном. Строится график прямой, на которой коэффициент передачи имеет значение на 3 дБ ниже максимального. Частоты среза находятся в точках пересечения данной прямой с графиком АЧХ. Результатом работы программы являются значения основных характеристик фильтра, а также изображения графиков АЧХ и ФЧХ.

3.2. Метод измерения АЧХ с помощью импульсного сигнала

Описание метода

Данный метод базируется на определении такой операции как свертка и ее свойствах. Для линейной инвариантной во времени системы выходной сигнал представляет собой свертку импульсной характеристики $h(n)$ и входного сигнала. Пользуясь свойством свертки функции с дельта-функцией $h(n) * \delta = h(n)$, можно определить импульсную характеристику прибора. Фурье преобразование этой характеристики является передаточной функцией фильтра.

На вход усилителя подавался прямоугольный импульс малой длительности (1 мкс). В результате, полученная осциллограмма, которая и является импульсной характеристикой усилителя, записывалась в текстовый файл. С помощью БПФ был получен ее спектр, и была построена АЧХ данного прибора.

Описание установки

На рис. 2. приведена блок-схема установки для измерения частотных характеристик се-

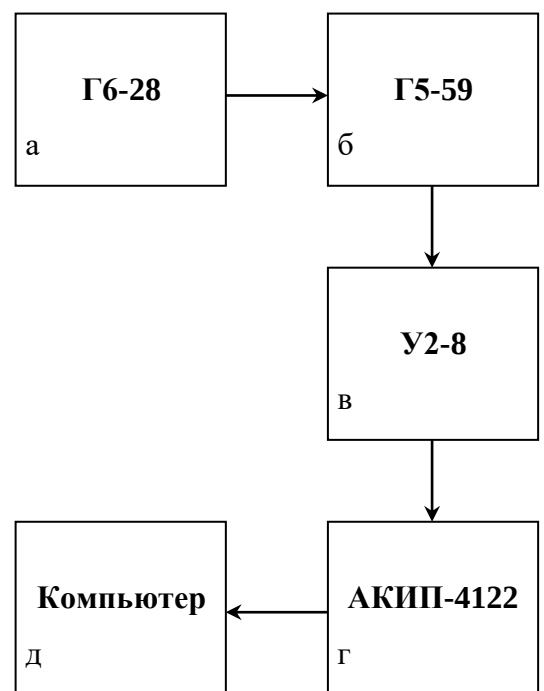


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки с генератором импульсных сигналов: а – генератор сигналов специальной формы Г6-28; б – генератор импульсов Г5-59; в – усилитель У2-8; г – осциллограф АКИП-4122/11 V; д – компьютер

лективного усилителя У2-8 с помощью импульсного сигнала. С генератора Г5-59 прямоугольный импульс подается на усилитель. Генерация импульса происходит согласованно с периодическим прямоугольным сигналом, поступающим с генератора сигналов Г6-28. Генератор импульсов Г5-59 производит генерацию импульса согласованно с поступающим на него сигналом. Такой способ работы с генератором вызван тем, что сам прибор неспособен генерировать сигналы с частотой менее 1 КГц.

Программное обеспечение

Обработка полученных данных проводится в программе, написанной на языке программирования Python. Программа считывает данные из файла в заданной директории. С помощью БПФ находится амплитудный спектр выходного сигнала. Для получения АЧХ берётся модуль каждого получившегося после БПФ комплексного значения. В случае, когда осциллограмма содержит 100000 точек отсчета, шаг по частоте между гармониками составляет $\Delta f = 60$ Гц. Это слишком много, для того, чтобы корректно разрешить амплитудно-частотную характеристику фильтра с добротностью $Q > 50$.

Данная проблема решается изменением длины реализации, т. е. увеличением количества точек дискретного сигнала, к которым мы применяем преобразование Фурье. Осциллограмма дополняется нулями. Это не изменяет спектральную характеристику, так как такое дополнение не изменяет энергии сигнала, но при этом происходит изменение шага между гармониками. Результатом работы программы является изображение графика АЧХ.

4. Анализ результатов измерений

Результаты измерения АЧХ классическим методом

Были произведены 85 измерений в диапазоне частот 0–500 Гц. Частота входного сигнала задавалась вручную. Шаг по частоте был переменным. Вблизи резонансной частоты фильтра он был минимальным: $\Delta f \approx 1$ Гц. Результаты из-

мерения амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик У2-8 представлены на рис. 3.

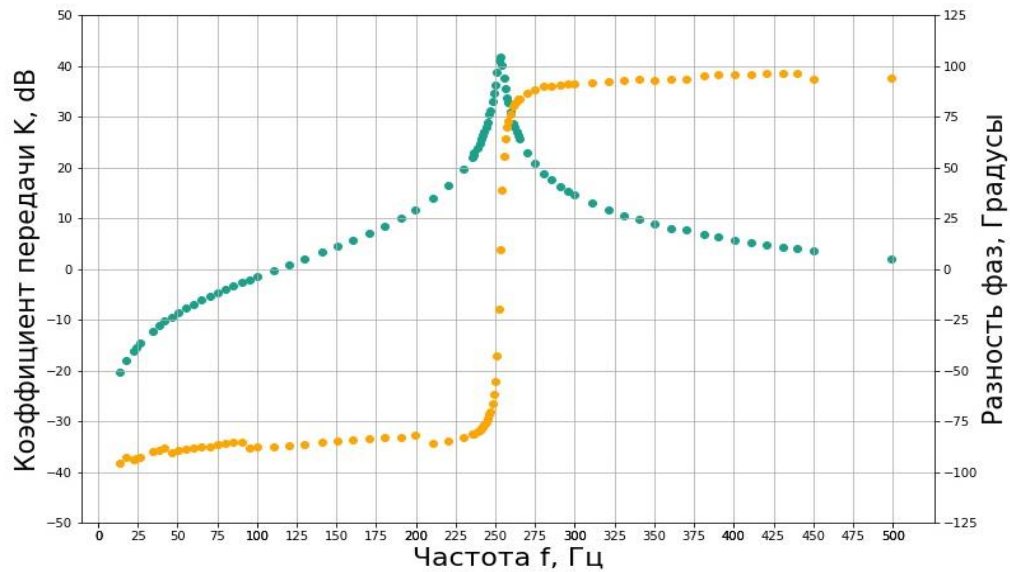


Рис. 3. АЧХ и ФЧХ узкополосного фильтра в диапазоне 0–500 Гц

По графику АЧХ находим резонансную частоту f_p , которая соответствует нулевой разнице фаз. Далее по АЧХ определяем частоты среза f_1 и f_2 .

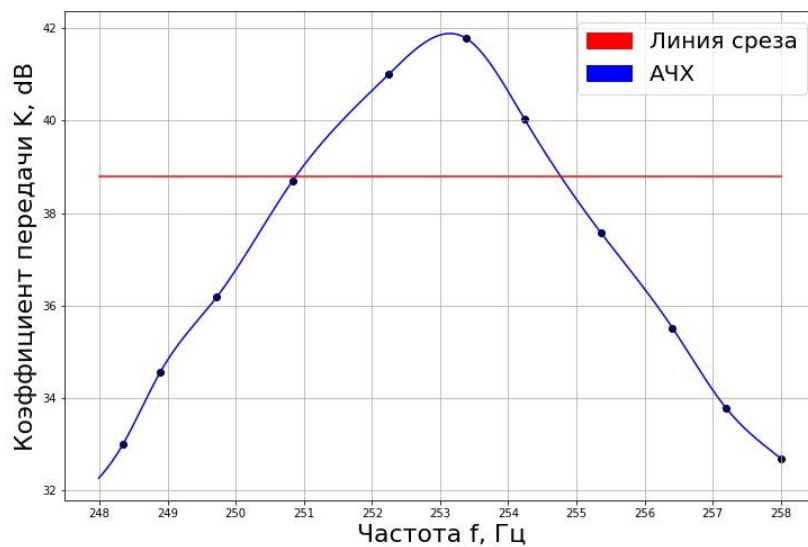


Рис. 4. АЧХ узкополосного фильтра вблизи резонанса

Полученные результаты: $f_p = 253 \pm 0,5$ Гц; $f_1 = 251 \pm 0,5$ Гц; $f_2 = 255 \pm 0,5$ Гц; полоса пропускания $\Delta f = 4 \pm 0,5$ Гц. Отсюда получаем добротность:

$$Q = \frac{f_p}{\Delta f} = 65 \pm 8.$$

Результаты измерения АЧХ с помощью импульсного сигнала

С помощью метода, описанного в п. 3.2., была построена АЧХ фильтра (рис. 5.). По графику зависимости коэффициента передачи от частоты были определены резонансная частота и частоты среза: $f_p = 247 \pm 3$ Гц; $f_1 = 225 \pm 3$ Гц; $f_2 = 276 \pm 3$ Гц. Отсюда определили добротность:

$$Q = 5 \pm 0,2.$$

Значительные расхождения полученного значения добротности с паспортными данными обусловлено недостаточной длительностью записанной осциллограммы (порядка 20 мс).

Малые, по сравнению с максимальной, гармоники, наблюдающиеся на рис. 5. возникли ввиду недостаточной длины зарегистрированного отклика системы.

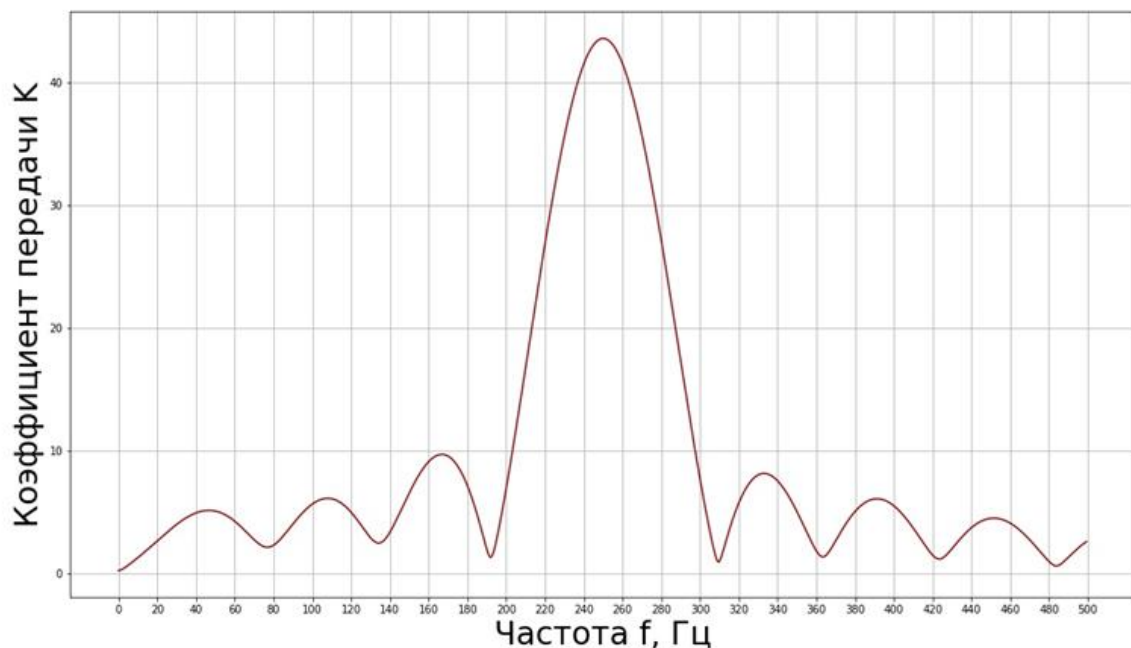


Рис. 5. АЧХ узкополосного фильтра

5. Выводы

В настоящей работе выполнены измерения амплитудных и фазовых характеристик узкополосного фильтра на примере усилителя У2-8 различными способами. В обоих случаях по АЧХ были определены резонансная частота и полоса пропускания прибора. Сделаны оценки добротности.

Первым способом получено, что добротность для диапазона 20–200 Гц имеет величину $Q = 65 \pm 8$. Это на 25–40 % хуже паспортного значения. Существенные расхождения значений с паспортными данными закономерны, т. к. исследуемый прибор отслужил свой гарантийный срок.

Первый метод измерения является простым, но при этом долгим в реализации. Длительность проведения эксперимента может привести к погрешности, связанной с температурным дрейфом исследуемого прибора.

Во втором способе добротность составила $Q = 5 \pm 0,2$. Слишком заниженное значение этой характеристики вызвано малой длительностью записанной осциллограммы. Возможно, увеличение длительности приведет к более точному результату.

Второй метод отличается быстротой реализации, но при этом может иметь достаточно весомые погрешности, которые зависят от длины записанных данных.

Проведя данные измерения, я получил опыт работы с селективным усилителем и научился обрабатывать оцифрованные сигналы, а также проводить их анализ с помощью преобразования Фурье.

6. Список литературы

1. Кривошеев В. И. Цифровая обработка сигналов: учебное пособие. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2006, 241 с.
2. Лукин А. Введение в цифровую обработку сигналов. Москва: Лаборатория компьютерной графики и мультимедиа, МГУ, 2007, 43 с.
3. Оппенгейм. Э. Применение цифровой обработки сигналов. – Москва: Мир, 1980, 413 с.
4. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2003, 604 с.