

# АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ МОДУЛЯЦИИ И ДЕМОДУЛЯЦИИ В СИСТЕМЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

*Биюмен Е.А., Макареня Е.А., студенты гр. 361401*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники*

*г. Минск, Республика Беларусь*

*Фильченкова Т.М. – ст. преподаватель каф. ЗИ*

**Аннотация.** Анализ процессов модуляции и демодуляции в системе телекоммуникаций представляет собой исследование, в ходе которого были рассмотрены методы формирования, модуляции и последующей демодуляции радиоимпульса с целью выделения исходной огибающей сигнала. В работе использовалась программная реализация на языке Python, позволяющая смоделировать как спектральное преобразование, так и воздействие различных фильтров, что критически важно для задач цифровой обработки сигналов в телекоммуникационных системах.

**Ключевые слова.** Амплитудная модуляция, демодуляция, Python, спектр сигнала, фильтр Чебышева, фильтр Баттерворта, быстрое преобразование Фурье.

Математическое моделирование позволяет провести исследование модуляции и демодуляции сигналов в системах телекоммуникаций. Этот метод относится к теоретическим и характеризуется следующими достоинствами: 1) не нужна практическая реализация устройств для их осуществления (это сокращает экономические затраты); 2) есть возможность имитировать разные условия работы исследуемых устройств систем телекоммуникаций (это позволяет произвести оценку качества и эффективность системы).

Цель данной научно-исследовательской работы: провести анализ процессов модуляции и

демодуляции в системе телекоммуникаций посредством математического моделирования. Задачи данной работы: 1) провести теоретическое исследование процесса модуляции по схеме, представленной на рисунке 1; 2) выполнить математическое моделирование процесса демодуляции.

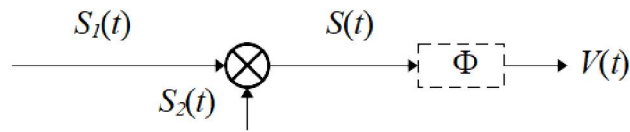


Рисунок 1 – Схема амплитудной модуляции

Исходные данные для моделирования:

– сигнал  $S_1(t)$  – полезный информационный сигнал:

$$S_1(t) = \begin{cases} A, & |t| \leq \frac{T}{2} \\ 0, & |t| > \frac{T}{2} \end{cases} \quad 1)$$

где  $A$  – амплитуда радиоимпульса;  $T$  – период радиоимпульса.

– сигнал  $S_2(t)$  – несущее колебание:

$$S_2(t) = \cos(2\pi f_0 t) \quad 2)$$

где  $f_0$  – частота несущего колебания.

– выполнение условия  $2f_0 \gg 1/T$ ,

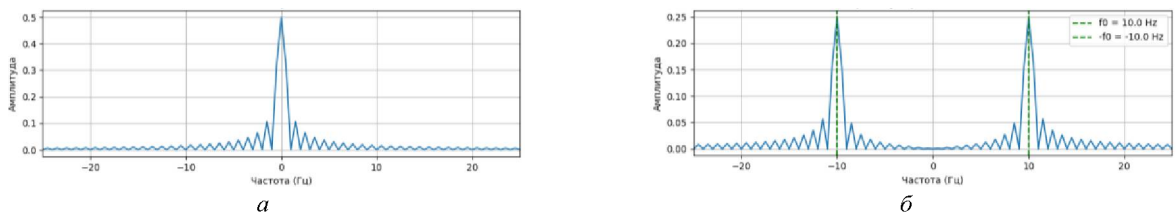
–  $f_0 = 10$  Гц (частота несущего сигнала);

–  $A = 1$  В (амплитуда радиоимпульса);

–  $T = 1$  с (период радиоимпульса);

–  $f_s = 1000$  Гц (частота дискретизации, для преобразований Фурье).

Такой метод модуляции должен, согласно теории, приводить к расщеплению спектральной плотности импульса на две части, которые смещаются на частоты  $\pm f_0$ , что подтверждается полученной нами визуализацией спектров, построенных с помощью быстрого преобразования Фурье (FFT) (рисунок 2) [1].



а – спектр радиоимпульса  $S_1(t)$ ; б – спектр модулированного сигнала  $S(t)$ ;

Рисунок 2 – Схема амплитудной модуляции

Демодуляция осуществляется посредством повторного умножения модулированного сигнала на несущий сигнал, что приводит к появлению как полезной составляющей, так и паразитных компонент (рисунок 3), их можно увидеть на частотах  $2f_0$  (в нашем случае  $\pm 20$  Гц). Для восстановления исходного сигнала применяется фильтрация с помощью фильтров нижних

частот.

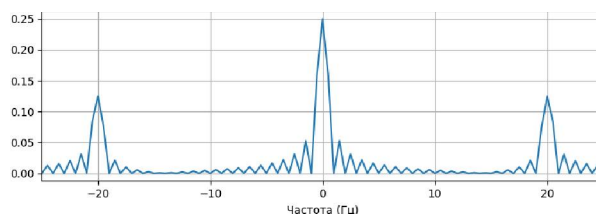


Рисунок 3 – Спектр сигнала после демодуляции

В работе были использованы два типа фильтров – фильтр Баттерворта и фильтр Чебышева первого рода – с порядком 4 и частотой среза, равной несущей  $f_0$ , АЧХ фильтров представлены на рисунке 4.

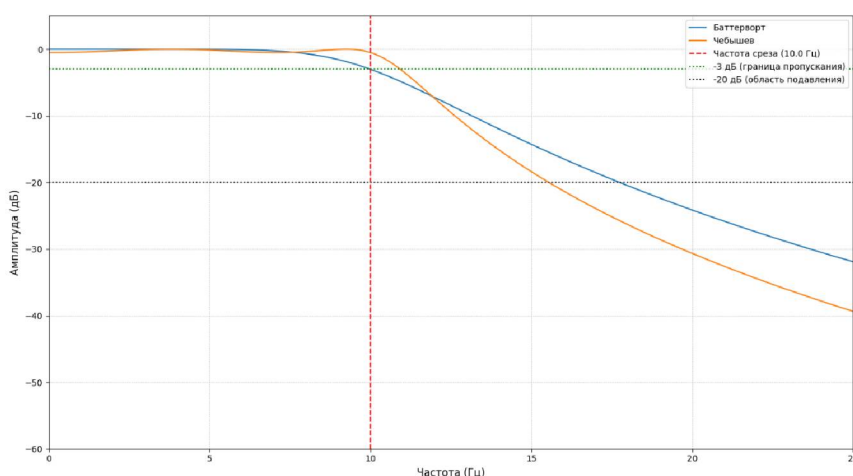
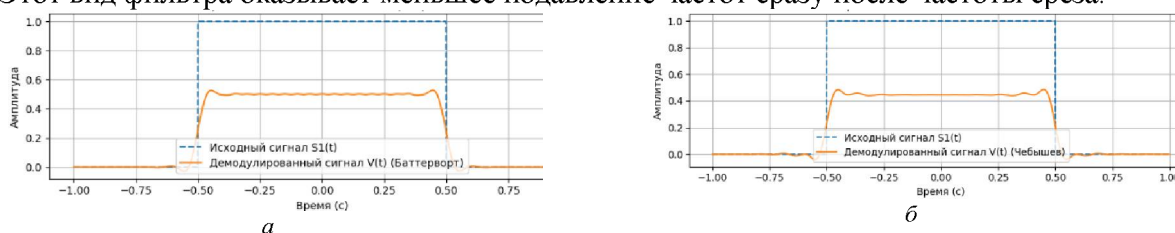


Рисунок 4 – АЧХ фильтров Баттерворта и Чебышева

Сигналы, полученные после демодуляции и фильтрации приведены на рисунке 5. Можно заметить, что восстановленный сигнал после фильтра Чебышева имеет большую рябь, по сравнению с фильтрацией Баттерворта. Это явление напрямую связано с АЧХ фильтров (рисунок 4). На графике АЧХ фильтра Чебышева есть незначительные колебания до частоты среза. Этот вид фильтра оказывает меньшее подавление частот сразу после частоты среза.



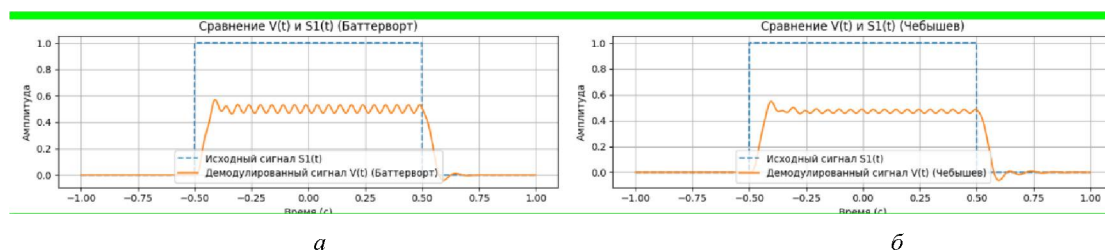
а – вид демодулированного сигнала с фильтром Баттерворта; б – вид демодулированного сигнала с фильтром Чебышева;

Рисунок 5 – Сигналы после демодуляции и фильтрации

В программной реализации все этапы – от формирования исходного прямоугольного импульса до вычисления спектральных плотностей и визуализации временных и частотных характеристик – были реализованы с использованием библиотеки NumPy и пакета matplotlib. Для анализа спектров использовалась быстрое преобразование Фурье (FFT), а вычисленные спектры корректно центрировались с помощью `fftshift` (построение спектра относительно нулевой частоты) [2].

Нами была установлена зависимость конечного результата демодуляции в случаях

использования функций `lfilter` и `filtfilt`. Первый вариант даёт фазовые искажения, но отражает реалистичную работу системы, второй – устраняет сдвиг фазы и даёт более гладкий результат, что позволяет лучше сравнивать сигналы (до и после демодуляции). В данной научно-исследовательской работе мы привели результаты для случая `filtfilt` на рисунке 5, а на рисунке 6 – для `lfilter`.



а – вид демодулированного сигнала с фильтром Баттерворта; б – вид демодулированного сигнала с фильтром Чебышева;

Рисунок 6 – Сигналы после демодуляции и фильтрации с использованием функции `lfilter`

Сравнительный анализ фильтрации проводился посредством вычисления среднеквадратичной ошибки (MSE) и максимальной ошибки между восстановленным сигналом и исходным прямоугольным импульсом. Полученные результаты показали, что оба фильтра – как Баттерворта, так и Чебышева – способны в достаточной мере выделить огибающую, однако фильтр Баттерворта продемонстрировал более гладкую амплитудно-частотную характеристику, что обеспечивает менее выраженные искажения формы импульса (рисунок 5, 6). Полученные значения ошибок:

- среднеквадратичная ошибка (MSE) для Баттерворта равна 0,129629;
- максимальная ошибка для Баттерворта равна 0,750481;
- среднеквадратичная ошибка (MSE) для Чебышева равна 0,156025;
- максимальная ошибка для Чебышева равна 0,778497.

Таким образом, выполненное исследование подтверждает, что выбранная схема модуляции и демодуляции является эффективной для задач выделения огибающей. Реализованный на Python код продемонстрировал возможность проведения комплексного анализа как во временной, так и в частотной областях, а также позволил оценить качество фильтрации с учётом влияния параметров фильтра.

### Список использованных источников

1. Смещение спектра сигнала [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://studfile.net/preview/8761054/page:7/>. Дата доступа: 10.03.2024.
2. `filtfilt` — SciPy v1.15.2 Manual [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.filtfilt.html>. Дата доступа: 10.03.2024.

UDC 621.376

## ANALYSIS OF MODULATION AND DEMODULATION PROCESSES IN TELECOMMUNICATION SYSTEM

Biyumen E.A., Makarenka E.A., students of gr.361401

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

**Annotation.** The analysis of modulation and demodulation processes in a telecommunication system is a study that examined the methods of formation, modulation and subsequent demodulation of a radio pulse in order to extract the original envelope of the signal. The work used a software implementation in the Python language, which allows modelling both the spectral transformation and the effects of various filters, which is critical for digital signal processing tasks in telecommunication systems.

**Keywords.** *Amplitude modulation, demodulation, Python, signal spectrum, Chebyshev filter, Butterworth filter, fast Fourier transform.*