

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
Московский авиационный институт  
(Национальный исследовательский университет)

Институт № 4  
«Радиоэлектроника, инфокоммуникации и информационная  
безопасность» Кафедра  
«Радиофизика, антенны и микроволновая техника»

Расчетная графическая работа  
20 вариант  
по дисциплине  
«Радиотехнические цепи и сигналы»

Проверил:

Баев А.Б. \_\_\_\_\_

Выполнил: студент гр. М4О-307Б-18

Лушников Н.А. \_\_\_\_\_

## Аннотация.

Цель работы:

- формирование дискретных радиосигналов;
- синтез цифрового фильтра;
- анализ прохождения дискретного радиосигнала со сложной модуляцией через цифровой фильтр;
- детектирование дискретного радиосигнала на выходе фильтра с использованием комплексной огибающей сигнала;
- исследование влияния параметров цифрового фильтра на искажения сигналов на выходе детекторов.

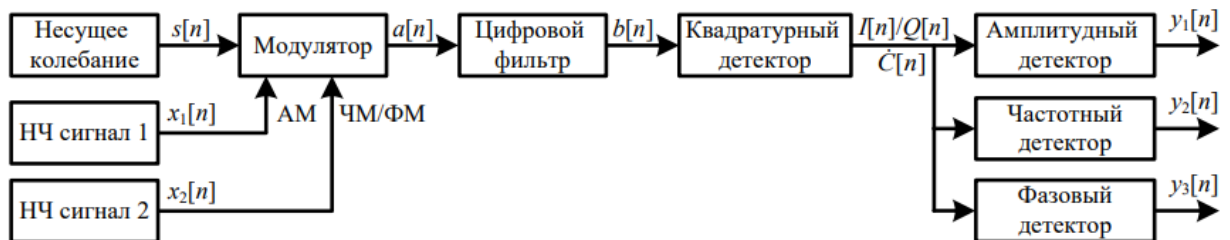


Рисунок 1 - Структурная схема обработки сигнала

## Задание.

Вариант	$x_1(t)$	$x_2(t)$	$k_1$	$k_2$ , Гц	$k_3$ , рад	$T_1$ , мс	$T_2$ , мс
20	10	6	0.6	0	$\pi/2$	20	25

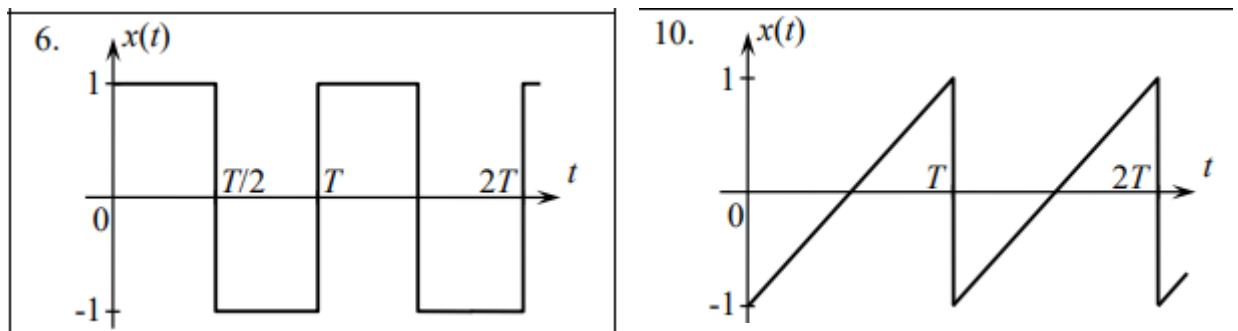


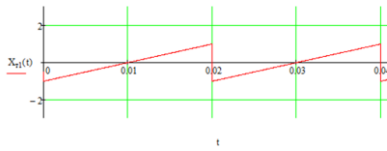
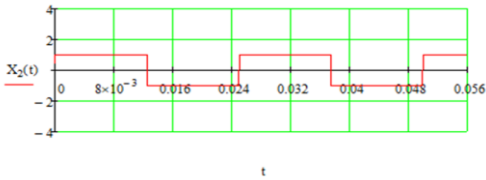
Рисунок 2 – Сигналы из задания

## Содержание.

1. Синтез низкочастотных модулирующих сигналов. ....	4
1.1 Для низкочастотных (НЧ) сигналов $x_1(t)$ и $x_2(t)$ , выданных преподавателем, записать их аналитические выражения. ....	4
1.2 С помощью свойств преобразования Фурье найти спектры сигналов $x_1(t)$ и $x_2(t)$ , изобразить их.....	4
1.3 Сформировать дискретные сигналы $x_1[n]$ и $x_2[n]$ . ....	7
1.4 Изобразить сигналы $x_1[n]$ и $x_2[n]$ и их амплитудные спектры $X_1[m]$ и $X_2[m]$ . ....	7
2. Формирование радиосигнала со сложной модуляцией. ....	10
2.1 Согласно варианту задания сформировать дискретный радиосигнал $a[n]$ со сложной модуляцией. ....	10
3. Синтез цифрового фильтра. ....	12
3.1 Согласно заданию, выданному преподавателем, синтезировать цифровой фильтр...	12
3.2 Определить и изобразить характеристики цифрового фильтра.....	14
4. Фильтрация сигнала .....	18
5. Нахождение комплексной огибающей радиосигнала. ....	22
6. Детектирование радиосигнала. ....	25

# 1. Синтез низкочастотных модулирующих сигналов.

1.1 Для низкочастотных (НЧ) сигналов  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$ , выданных преподавателем, записать их аналитические выражения.

Импульсные сигналы	$x_{1и}(t) = (k \cdot t - 1) \cdot \text{rect}_{\Delta}\left(\frac{t - T_1/2}{20}\right)$	$x_{2и}(t) = \text{rect}_{\Delta}\left(\frac{t - T_2/4}{12.5}\right) - \text{rect}_{\Delta}\left(\frac{t - 3 \cdot T_2/4}{12.5}\right)$
Периодические сигналы	$x_1(t) = \sum_{n=0}^{\infty} x_{1и}(t - n \cdot T_1)$	$x_2(t) = \sum_{n=0}^{\infty} x_{2и}(t - n \cdot T_2)$
Графики mathcad		

где  $\text{rect}_{\Delta}(t) = U\left(t + \frac{\Delta}{2}\right) - U\left(t - \frac{\Delta}{2}\right)$

$$\Delta = 10^{-3} \text{ с}$$

$$k = 100$$

1.2 С помощью свойств преобразования Фурье найти спектры сигналов  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$ , изобразить их.

Для получения спектра сигналов воспользуемся свойством дифференцирования и интегрирования сигнала по времени:

$$\int_{-\infty}^t S(\tau) d\tau \Leftrightarrow \frac{S(f)}{j2\pi f} + \frac{S(0)}{2} \cdot \delta(f)$$

Для  $x_{1и}(t)$  получим (продифференцировав один раз):

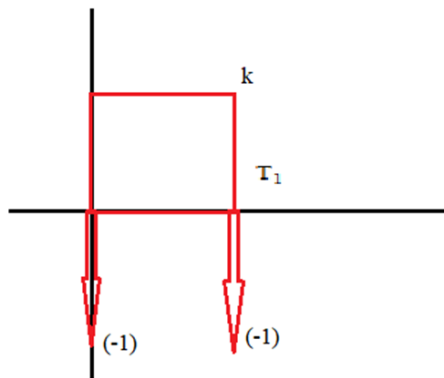


Рисунок 2 – Дифференциальный сигнал  $x_{1и}'(t)$

Спектр дифференцированного сигнала:

$$S'_1(f) = 2\text{sinc}(\pi f T_1) e^{-i\pi f T_1} - e^{-2i\pi f T_1} - 1$$

Спектр исходного сигнала:

$$S_1(f) = \frac{S'_1(f)}{j2\pi f} + \frac{S'_1(0)}{2} \cdot \delta(f) = \frac{S'_1(f)}{j2\pi f}$$

$$S_1(f) = \frac{2\text{sinc}(\pi f T_1) e^{-i\pi f T_1} - e^{-2i\pi f T_1} - 1}{i2\pi f}$$

$$C_1(n) = \frac{1}{T_1} \cdot S_1\left(\frac{n}{T_1}\right)$$

Проверим правильность результата в Mathcad:

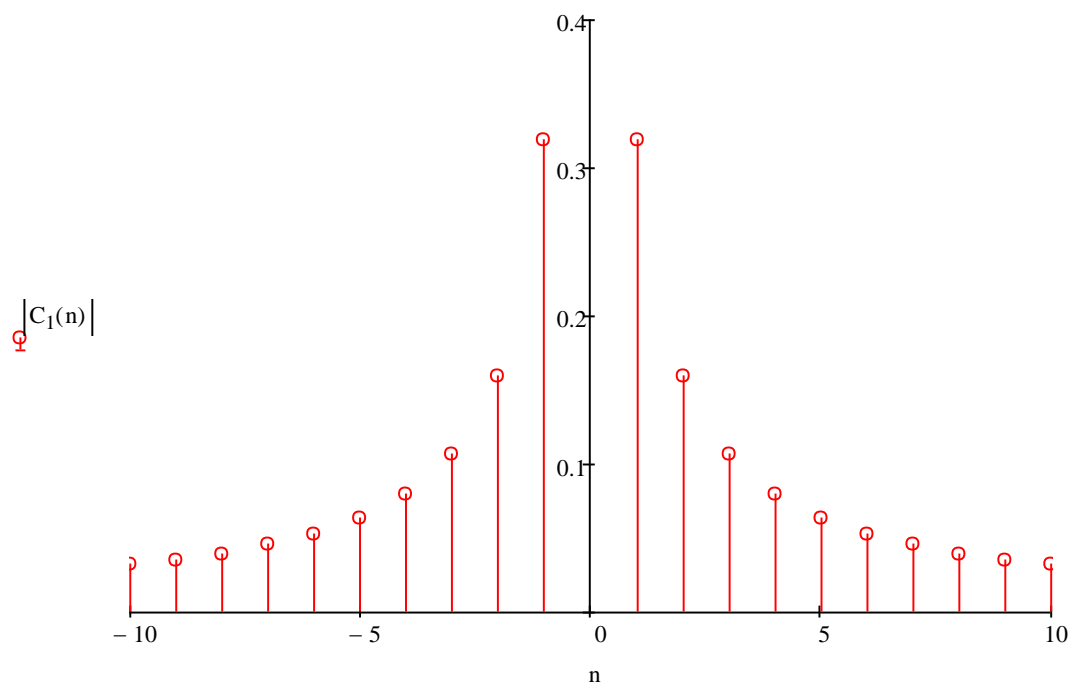


Рисунок 3 - Амплитудный спектр сигнала  $x_1(t)$

Для  $x_{2n}(t)$  получим (продифференцировав один раз):

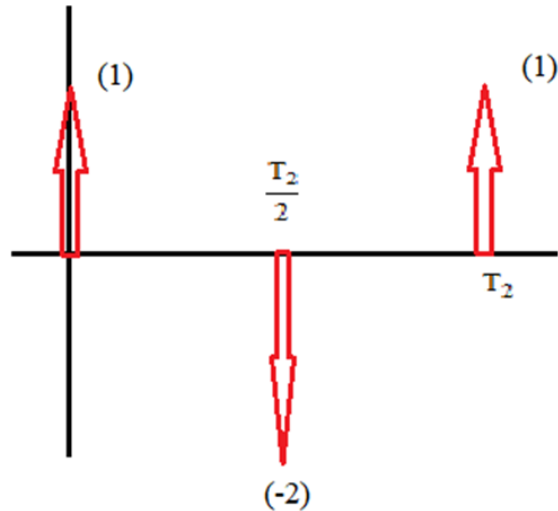


Рисунок 4 - Дифференциальный сигнал  $x_{2n}'(t)$

Спектр дифференцированного сигнала:

$$S'_2(f) = \left( 2\cos\left(2\pi f \cdot \frac{T_2}{2}\right) - 2 \right) e^{-i\pi f \cdot T_2}$$

$$S'_2(f) = -4\sin^2\left(\pi f \cdot \frac{T_2}{2}\right) e^{-i\pi f \cdot T_2}$$

Спектр исходного сигнала:

$$S_2(f) = \frac{S'_2(f)}{j2\pi f} + \frac{S'_2(0)}{2} \cdot \delta(f) = \frac{S'_2(f)}{j2\pi f}$$

$$S_2(f) = \frac{-2\sin^2\left(\pi f \cdot \frac{T_2}{2}\right) e^{-i\pi f \cdot T_2}}{i\pi f} \cdot \left\{ \frac{\left(\pi f \cdot \frac{T_2}{2}\right)}{\left(\pi f \cdot \frac{T_2}{2}\right)} \right\} = -\left(\frac{T_2}{2}\right)^2 \cdot i2\pi f \cdot \text{sinc}^2\left(\pi f \cdot \frac{T_2}{2}\right) e^{-i\pi f \cdot T_2}$$

$$C_2(n) = \frac{1}{T_2} \cdot S_2\left(\frac{n}{T_1}\right)$$

Проверим правильность результата в Mathcad:

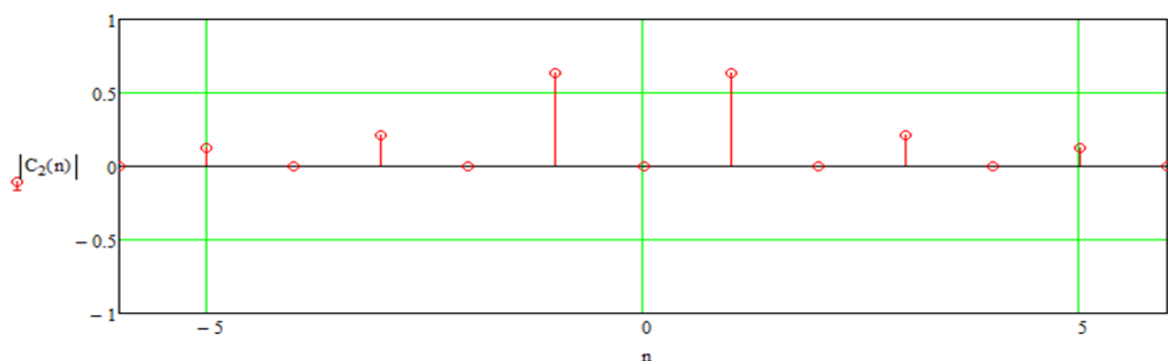


Рисунок 5 - Амплитудный спектр сигнала  $x_2(t)$

### 1.3 Сформировать дискретные сигналы $x_1[n]$ и $x_2[n]$ .

$F_d = 10^5$  Гц – частота дискретизации

$\Delta = \frac{1}{F_d} = 10^{-5}$  с = 10 мкс – период дискретизации

$N = 10^5$  – кол-во отсчетов

$n = N$

$x_1[n] = \Delta \cdot x_1(n \cdot \Delta)$	$x_2[n] = \Delta \cdot x_2(n \cdot \Delta)$
---	---

### 1.4 Изобразить сигналы $x_1[n]$ и $x_2[n]$ и их амплитудные спектры $X_1[m]$ и $X_2[m]$ .

$N = 10^5$	$F_d = 100$ кГц
------------	-----------------

Код MATLAB:

```
Fd = 1e5; %Частота дискретизации
Td = 1/Fd; %Период Дискретизации
N = 1e5; %Кол-во отсчетов сигнала
t = 0:Td:N*Td-Td; %Дискретное нормированное время
fd = 1/(N*Td); %шаг по частоте
f = (0:N-1)*fd; %Дискретная частота

% Сигнал x1[n]
T1 = 20 *1e-3;
F1 = 1/T1;
x1 = Td*sawtooth(2*pi*t*F1);

% Сигнал x2[n]
T2 = 25*1e-3;
F2 = 1/T2;
x2 = Td*square(2*pi*t*F2);

% Амплитудный спектр X1[m]
X1 = fft(x1);
Tn1 = T1/Td; % Период в отсчетах
C1 = (2/Tn1)*abs(X1);
C1(1) = (1/Tn1)*abs(X1(1));

% Амплитудный спектр X2[m]
X2 = fft(x2);
Tn2 = T2/Td;
C2 = (2/Tn2)*abs(X2);
C2(1) = (1/Tn2)*abs(X2(1));

% Построение графиков
figure('Name','Вариант 20','NumberTitle','off');
subplot(2,2,1),stem(t*N,x1,'.'),grid on,xlim([0 2*N*T1]),title('Сигнал x1[n]'),xlabel('n'),ylabel('x1[n] [В * c]');
```

```

subplot(2,2,3),stem(t*N,x2,'. '),grid on,xlim([0 2*N*T2]),title('Сигнал
x2[n]'),xlabel('n'),ylabel('x2[n] [B * c]');
subplot(2,2,2),stem(f/F1,C1),grid on,xlim([0 10]),ylim([0 3.5e-
4]),title('Спектр X1[m]'),xlabel('m'),ylabel('X1[m] [B]');
subplot(2,2,4),stem(f/F2,C2),grid on,xlim([0 10]),title('Спектр
X2[m]'),xlabel('m'),ylabel('X2[m] [B]');

figure('Name','Вариант 20','NumberTitle','off');
subplot(2,2,1),stem(f/F1,C1),grid on,xlim([1980 Tn1]),ylim([0 3.5e-
4]),title('Спектр X1[m]'),xlabel('m'),ylabel('X1[m] [B]');
subplot(2,2,3),stem(f/F2,C2),grid on,xlim([2450 Tn2]),title('Спектр
X2[m]'),xlabel('m'),ylabel('X2[m] [B]');

```

Ссылка на скрипт git: [https://github.com/Kikah8t/RGRCOS/blob/main/RGR\\_Zad1.m](https://github.com/Kikah8t/RGRCOS/blob/main/RGR_Zad1.m)

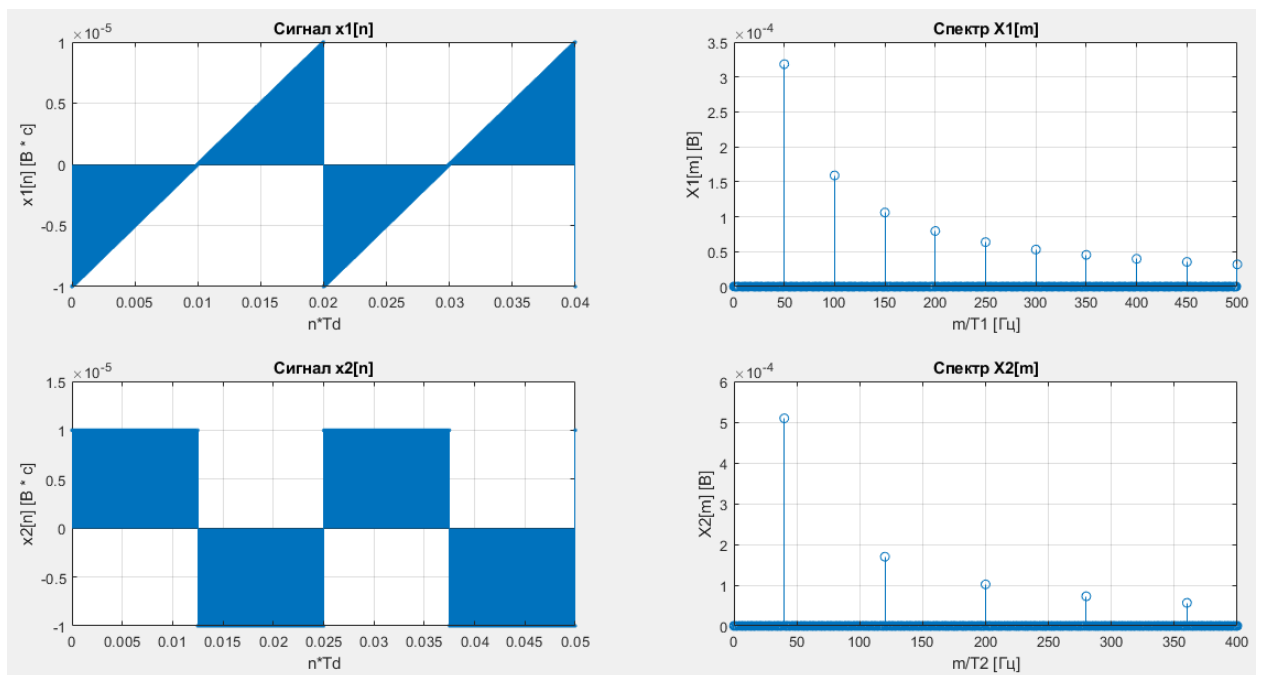


Рисунок 6 – Графики задания



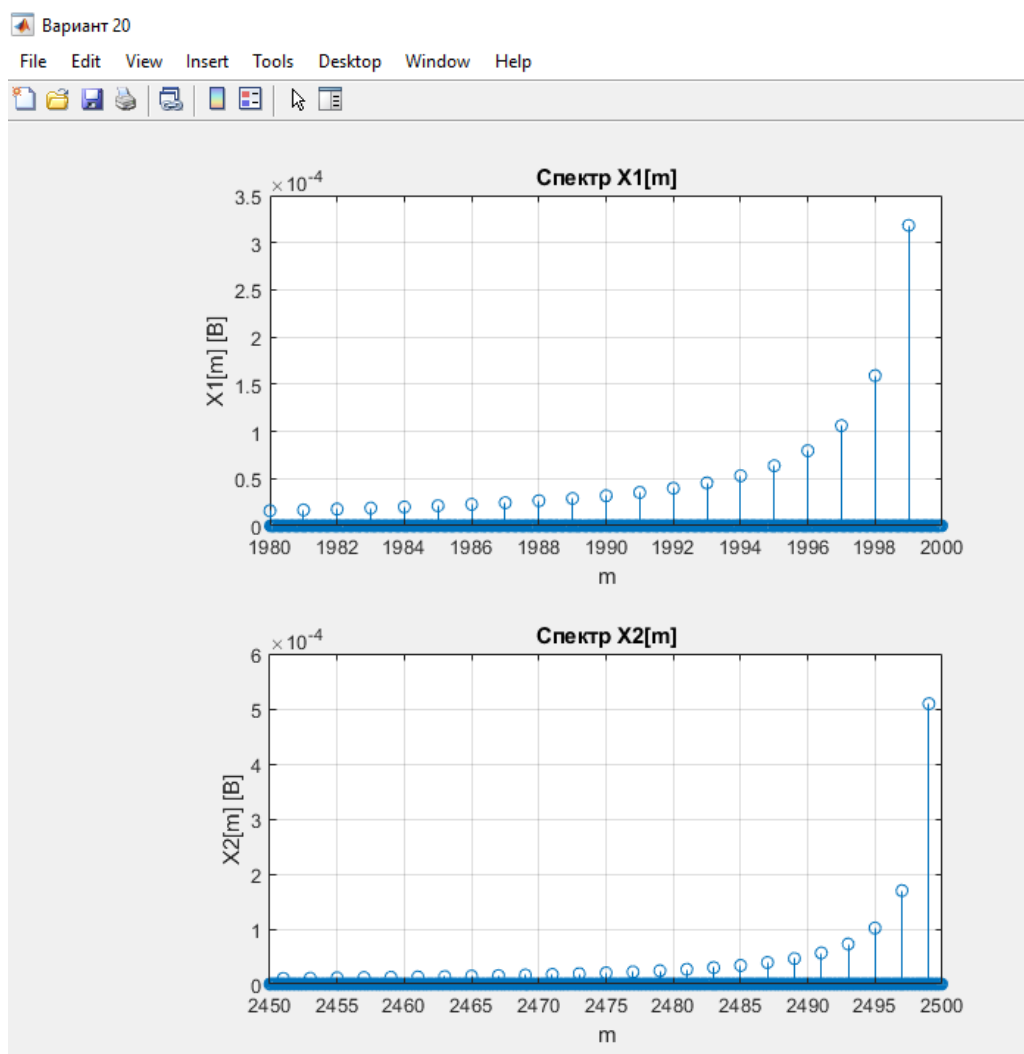


Рисунок 7 – Гармоники вблизи частоты дискретизации

## 2. Формирование радиосигнала со сложной модуляцией.

### 2.1 Согласно варианту задания сформировать дискретный радиосигнал $a[n]$ со сложной модуляцией.

$$a(t) = A_0 \cdot (1 + k_1 \cdot x_1(t)) \cdot \cos[2\pi(f_0 + k_2 \cdot x_2(t))t + k_3 \cdot x_2(t)]$$

$A_0 = 2 \text{ В}$	$f_0 = 20 \text{ кГц}$
---------------------	------------------------

$$a(t) = 2 \cdot (1 + 0.6 \cdot x_1(t)) \cdot \cos[2\pi f_0 t + \frac{\pi}{2} \cdot x_2(t)]$$

Код скрипта:

```
A0 = 2;
k1 = 0.6;
k3 = pi/2;
f0 = 20*1e+3;
Fd = 1e5; %Частота дискретизации
Td = 1/Fd; %Период Дискретизации
N = 1e5; %Кол-во отсчетов сигнала
t = 0:Td:N*Td-Td; %Дискретное нормированное время
fd = 1/(N*Td); %шаг по частоте
fshift = (-N/2:N/2-1)*fd; %Дискретная частота

% Сигнал x1[n]
T1 = 20 *1e-3;
F1 = 1/T1;
x1 = sawtooth(2*pi*t*F1);

% Сигнал x2[n]
T2 = 25*1e-3;
F2 = 1/T2;
x2 = square(2*pi*t*F2);

%Сигнал со сложной модуляцией
Dif = 2 *(1 + 0.6.*x1).*cos((2*pi*f0).*t + k3 .* x2)*Td;

%Спектр сигнала
X = fft(Dif);
C = fftshift(abs(X));

figure('Name','Вариант 20','NumberTitle','off');
subplot(2,1,1);
plot(t, Dif);
xlim([0 0.06]);
title('Сигнал со сложной модуляцией');
xlabel('Td*n [c]');
ylabel('a(t) [B*c]');
grid on;

subplot(2,1,2);
stem(fshift,C,'.');
title('Спектр сигнала');
xlim([-2.5*1e4 2.5*1e4]);
ylim([0 0.7]);
xlabel('f [Гц]');
ylabel('A(m) [B]');
grid on;
```

```
figure();
stem(fshift,C,'.');
xlim([1.96*1e4 2.04*1e4]);
grid on;
```

Ссылка на скрипт git: [https://github.com/Kikah8t/RGRCOS/blob/main/RGR\\_Zad2.m](https://github.com/Kikah8t/RGRCOS/blob/main/RGR_Zad2.m)

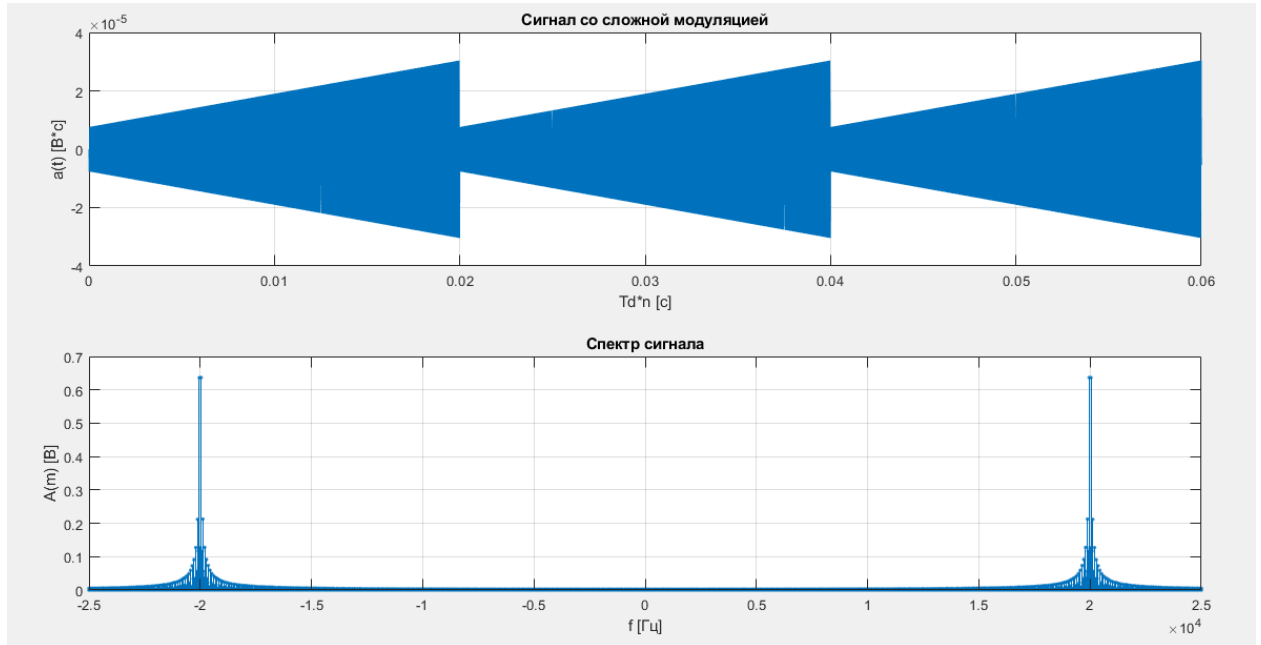


Рисунок 8 – График задания

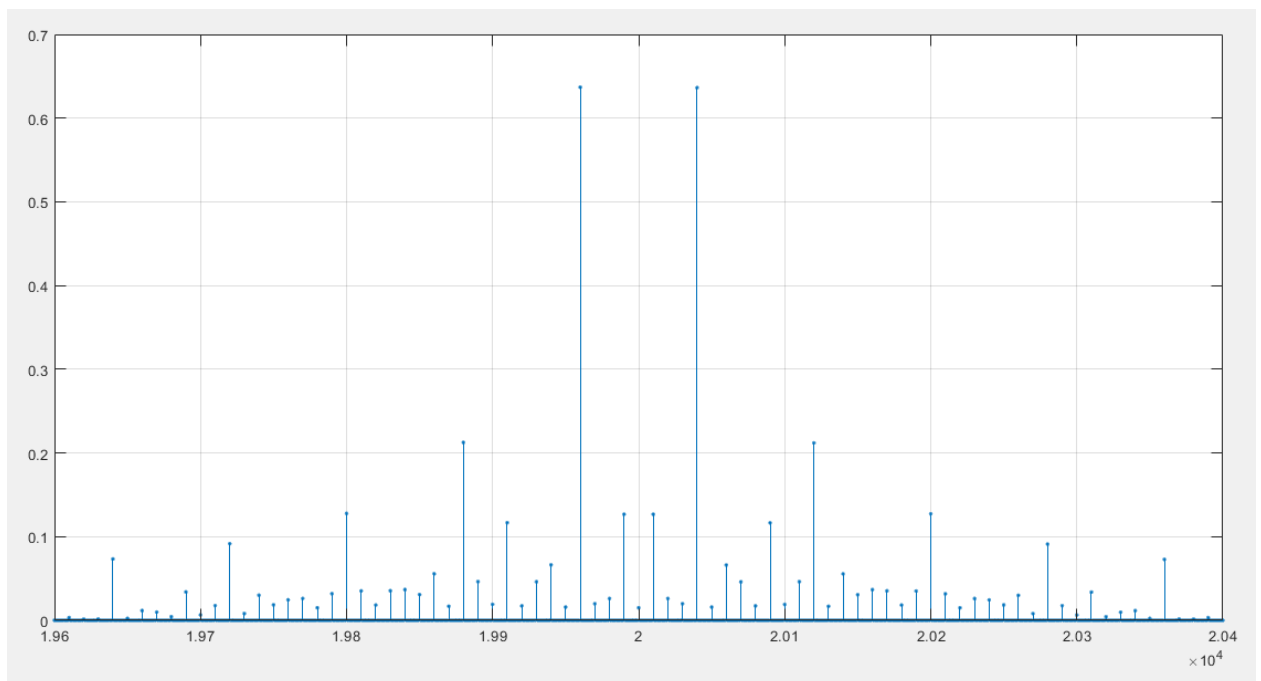


Рисунок 9 – Спектр сигнала в приближении

### 3. Синтез цифрового фильтра.

#### 3.1 Согласно заданию, выданному преподавателем, синтезировать цифровой фильтр.

$$H(p) = \frac{w_0 p}{p^2 + 2\alpha p + w_0^2}$$
$$f_p = 20 \text{ кГц} \quad Q = 7$$

*Метод билинейного преобразования*

Для начала определим характеристики аналогового фильтра прототипа:

1. Полюса на  $p$  плоскости:

$$\omega_0 = 2\pi f_p = 1.257 \cdot 10^5 \text{ Гц} \quad \alpha = \frac{\omega_0}{2Q} = 8.976 \cdot 10^3 \text{ Гц}$$

$$p_{п1,п2} = -\alpha \pm j\omega_0 = -8.976 \cdot 10^3 \pm j1.257 \cdot 10^5 \text{ Гц}$$

2. С помощью метода вычетов упростим системную функцию:

$$H(p) = \frac{w_0 p}{p^2 + 2\alpha p + w_0^2} = \frac{A}{p - p_{п1}} + \frac{A^*}{p - p_{п2}}$$

где  $A^*$  — комплексно-сопряженное  $A$

$$A = H(p)(p - p_{п1}) \Big|_{p=p_{п1}}$$

$$A = \frac{w_0(-\alpha + j\omega_0)}{-\alpha + j\omega_0 + \alpha + j\omega_0} = \frac{-\alpha w_0}{2j\omega_0} + \frac{j\omega_0^2}{2j\omega_0} = -\frac{8.976 \cdot 10^3}{2j} + \frac{1.257 \cdot 10^5}{2} =$$
$$= 6.283 \cdot 10^4 + j4.488 \cdot 10^3$$

$$H(p) = \frac{6.283 \cdot 10^4 + j4.488 \cdot 10^3}{p + 8.976 \cdot 10^3 - j1.257 \cdot 10^5} + \frac{6.283 \cdot 10^4 - j4.488 \cdot 10^3}{p + 8.976 \cdot 10^3 + j1.257 \cdot 10^5}$$

3. КЧХ фильтра:

$$K(f) = H(p) \Big|_{p=j2\pi f}$$

$$K(f) = \frac{j2\pi f w_0}{-4\pi^2 f^2 + j4\pi f \alpha + w_0^2}$$

АЧХ:

$$|K(f)| = \frac{2\pi f w_0}{\sqrt{(-4\pi^2 f^2 + w_0^2)^2 + (4\pi f \alpha)^2}}$$

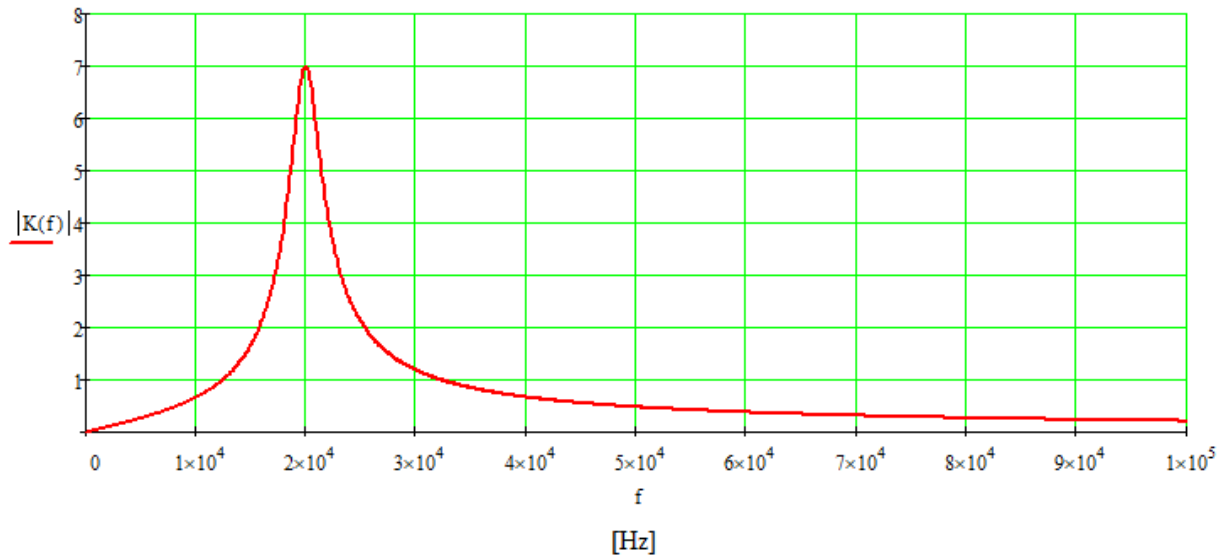


Рисунок 10 – АЧХ фильтра

ФЧХ:

$$\arg(K(f)) = \frac{\pi}{2} - \arctg\left(\frac{4\pi f \alpha}{-4\pi^2 f^2 + w_0^2}\right)$$

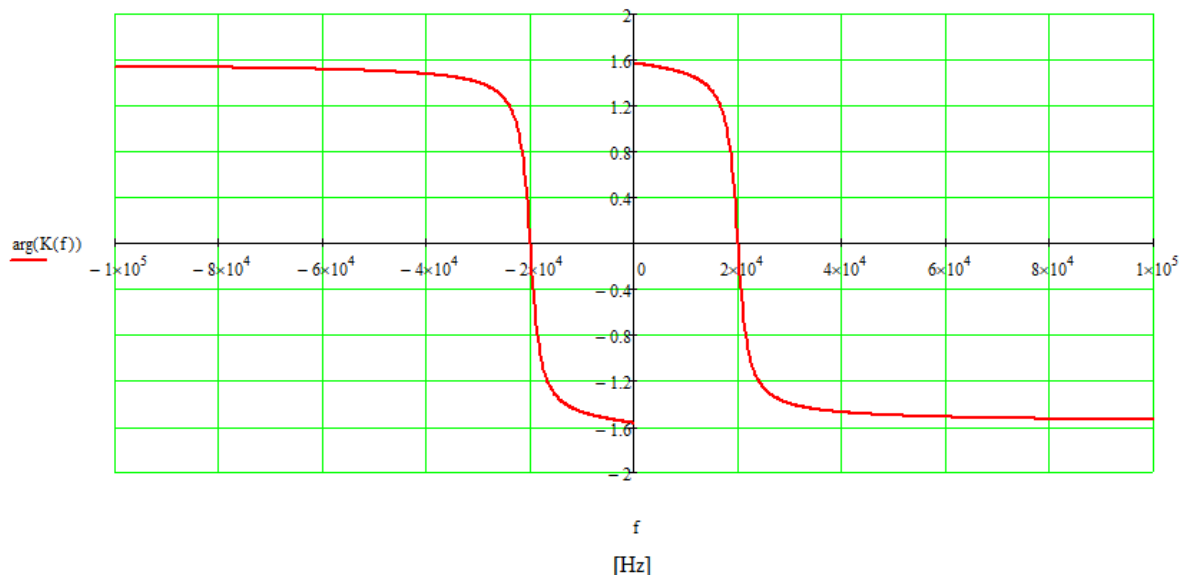


Рисунок 11 – КЧХ фильтра

#### 4. Импульсная характеристика

$$h(t) = L^{-1}\{H(p)\}$$

$$H(p) = \frac{6.283 \cdot 10^4 + j4.488 \cdot 10^3}{p + 8.976 \cdot 10^3 - j1.257 \cdot 10^5} + \frac{6.283 \cdot 10^4 - j4.488 \cdot 10^3}{p + 8.976 \cdot 10^3 + j1.257 \cdot 10^5}$$

$$A = b + jk$$

$$A^* = b - jk$$

$$b = 6.283 \cdot 10^4$$

$$k = 4.488 \cdot 10^3$$

$$\begin{aligned} h(t) &= (b + jk)e^{(-\alpha + j\omega_0)t} + (b - jk)e^{(-\alpha - j\omega_0)t} = \\ &= e^{-\alpha t} \left( b(e^{j\omega_0 t} + e^{-j\omega_0 t}) + jk(e^{j\omega_0 t} - e^{-j\omega_0 t}) \right) = \\ &= e^{-\alpha t} [2b \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) - 2k \cdot \sin(\omega_0 \cdot t)] \cdot U(t) = \\ &= e^{-8.976 \cdot 10^3 t} \cdot [1.257 \cdot 10^5 \cdot \cos(1.257 \cdot 10^5 \cdot t) - 8.976 \cdot 10^3 \cdot \sin(1.257 \cdot 10^5 \cdot t)] \cdot U(t) \end{aligned}$$

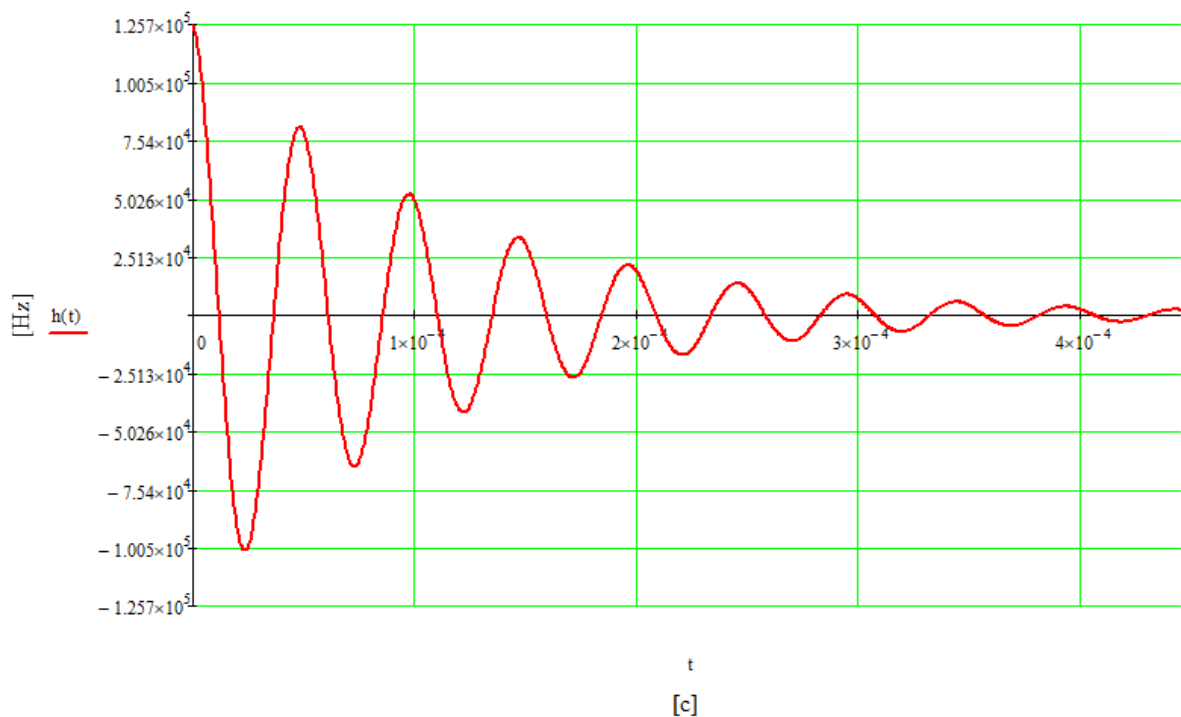


Рисунок 12 – Импульсная характеристика фильтра

### 3.2 Определить и изобразить характеристики цифрового фильтра

$F_d = 10^5$  Гц – частота дискретизации

$\Delta = \frac{1}{F_d} = 10^{-5}$  с = 10 мкс – период дискретизации

$N = 10^5$  – кол-во отсчетов

$n = N$

- Системная функция цифрового фильтра:

$$H(z) = H(p) \Big|_{p = \frac{2}{\Delta} \cdot \frac{z-1}{z+1}}$$

$$f_1 = \frac{\operatorname{tg}(\pi f_0 \Delta)}{\pi \Delta}$$

$$\omega_0 = f_1 \cdot 2\pi$$

$$\begin{aligned} H(z) &= \frac{\omega_0 \cdot \frac{2}{\Delta} \cdot \frac{z-1}{z+1}}{\frac{4}{\Delta^2} \cdot \left(\frac{z-1}{z+1}\right)^2 + \frac{2\omega_0}{\Delta Q} \cdot \frac{z-1}{z+1} + w_0^2} \cdot \Delta^2 \left(\frac{z+1}{z+1}\right)^2 = \\ &= \frac{2\Delta\omega_0 \cdot (z+1)(z-1)}{4(z-1)^2 + \frac{2\omega_0}{\Delta Q} \cdot (z+1)(z-1) + w_0^2 \Delta^2 (z+1)^2} = \\ &= \frac{2\Delta\omega_0 \cdot (z^2 - 1)}{4z^2 - 8z + 4 + \frac{2\omega_0}{\Delta Q} z^2 - \frac{2\omega_0}{\Delta Q} + w_0^2 \Delta^2 z^2 + 2w_0^2 \Delta^2 z + w_0^2 \Delta^2} = \\ &= \frac{2\Delta\omega_0 \cdot (z+1)(z-1)}{z^2 \left(4 + \frac{2\omega_0}{\Delta Q} + w_0^2 \Delta^2\right) + z(2w_0^2 \Delta^2 - 8) + \left(4 - \frac{2\omega_0}{\Delta Q} + w_0^2 \Delta^2\right)} = \\ &= \frac{\frac{2\Delta\omega_0(z+1)(z-1)}{\left(4 + \frac{2\omega_0}{\Delta Q} + w_0^2 \Delta^2\right)}}{z^2 + z \frac{(2w_0^2 \Delta^2 - 8)}{\left(4 + \frac{2\omega_0}{\Delta Q} + w_0^2 \Delta^2\right)} + \frac{\left(4 - \frac{2\omega_0}{\Delta Q} + w_0^2 \Delta^2\right)}{\left(4 + \frac{2\omega_0}{\Delta Q} + w_0^2 \Delta^2\right)}} = \\ &= \frac{K_0 \cdot (z+1)(z-1)}{z^2 + zb + c} \end{aligned}$$

$$\Delta := \frac{1}{10^5} \quad f_0 := 20 \cdot 10^3 \quad Q := 7$$

$$f_1 := \frac{\operatorname{tg}(\pi \cdot f_0 \cdot \Delta)}{\pi \cdot \Delta} = 23126,5669$$

$$w_0 := f_1 \cdot 2 \cdot \pi = 1,4531 \cdot 10^5$$

$$b := \frac{2 \cdot w_0^2 \cdot \Delta^2 - 8}{4 + \frac{2 \cdot w_0 \cdot \Delta}{Q} + w_0^2 \cdot \Delta^2} \quad c := \frac{4 - \frac{2 \cdot w_0 \cdot \Delta}{Q} + w_0^2 \cdot \Delta^2}{4 + \frac{2 \cdot w_0 \cdot \Delta}{Q} + w_0^2 \cdot \Delta^2} \quad a := 1$$

$$D := b^2 - 4 \cdot a \cdot c$$

$$z_{1\pi} := \frac{-b + \sqrt{D}}{2} = 0,2894 + 0,8883 \cdot i$$

$$z_{2\pi} := \frac{-b - \sqrt{D}}{2} = 0,2894 - 0,8883 \cdot i$$

$$K_0 := \frac{2 \cdot \Delta \cdot w_0}{4 + \frac{2 \cdot w_0 \cdot \Delta}{Q} + w_0^2 \cdot \Delta^2} = 0,4453$$

Найдем вычеты:

$$\begin{aligned} H(z) &= \frac{K_0 \cdot (z+1)(z-1)}{(z-z_{\pi 1})(z-z_{\pi 2})} = \\ &= \frac{K_0 \cdot (z^2 - 1)}{z^2 - z(z_{\pi 1} + z_{\pi 2}) + z_{\pi 1}z_{\pi 2}} = \\ &= K_0 \cdot \frac{z^2 - z(z_{\pi 1} + z_{\pi 2}) + z_{\pi 1}z_{\pi 2} + z(z_{\pi 1} + z_{\pi 2}) - z_{\pi 1}z_{\pi 2} - 1}{z^2 - z(z_{\pi 1} + z_{\pi 2}) + z_{\pi 1}z_{\pi 2}} = \\ &= K_0 \cdot \left( 1 + \frac{z(z_{\pi 1} + z_{\pi 2}) - z_{\pi 1}z_{\pi 2} - 1}{z^2 - z(z_{\pi 1} + z_{\pi 2}) + z_{\pi 1}z_{\pi 2}} \right) \end{aligned}$$

$$r_1 := \frac{z_{1\pi} \cdot (z_{1\pi} + z_{2\pi}) - z_{2\pi} \cdot z_{1\pi} - 1}{z_{1\pi} - z_{2\pi}} = 0,2894 + 0,9599 \cdot i$$

$$r_2 := \frac{z_{2\pi} \cdot (z_{1\pi} + z_{2\pi}) - z_{2\pi} \cdot z_{1\pi} - 1}{z_{2\pi} - z_{1\pi}} = 0,2894 - 0,9599 \cdot i$$



- Импульсная характеристика:

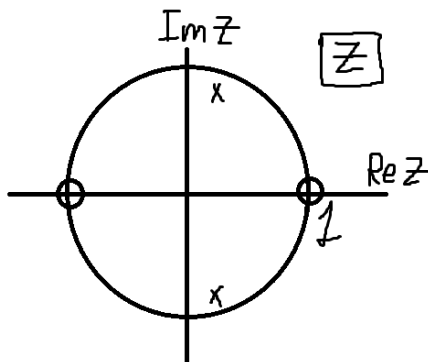
$$= K_0 \left( 1 + \frac{r_1}{z - z_{п1}} + \frac{r_2}{z - z_{п2}} \right)$$

$$h[n] = Z^{-1}\{H(z)\}$$

$$h[n] = K_0(\delta[n] + r_1 z_{п1}^{n-1} + r_2 z_{п2}^{n-1}) \cdot U[n-1]$$

где  $r_1 = 0.2894 + j0.9599$ ,  $r_2 = r_1^*$ ,  $K_0 = 0.4453$

- Диаграмма нулей и полюсов на z плоскости:



$$z_{01,2} = \pm 1$$

$$z_{п1,п2} = 0.2894 \pm j0.8883$$

- Частотная характеристика:

$$K(\varphi) = H(z) \Big|_{z=e^{j2\pi\varphi}}$$

$$K(\varphi) = K_0 \cdot \frac{e^{j4\pi\varphi} - 1}{(e^{j2\pi\varphi} - z_{п1})(e^{j2\pi\varphi} - z_{п2})}$$

АЧХ в коде

- Структурная схема фильтра в каноническом виде:

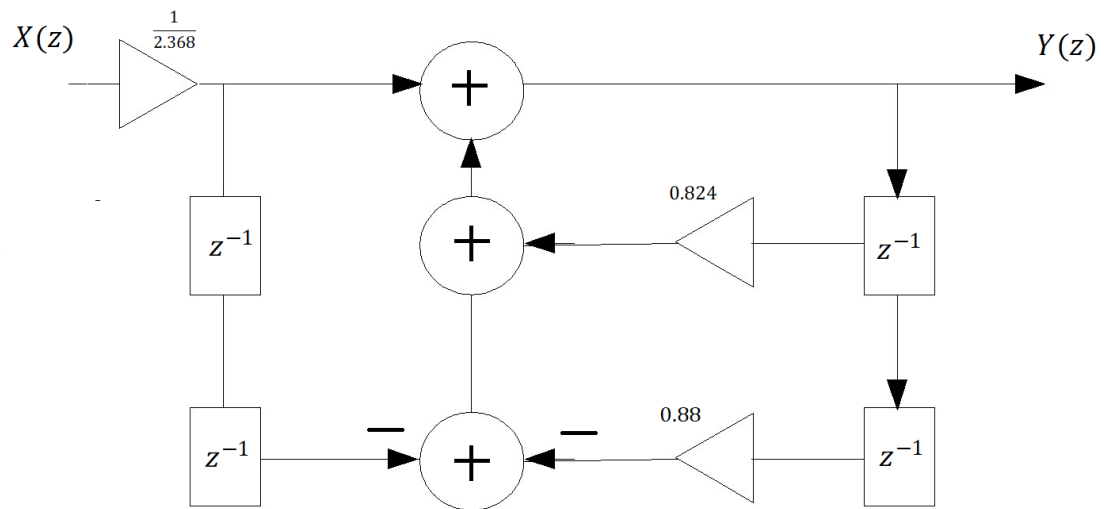


Рисунок 13 – Структурная схема фильтра

- Разностное уравнение:

$$X(z)(1 - z^{-2}) = 2.368 \cdot (Y(z) - 0.824 \cdot Y(z)z^{-1} + 0.88 \cdot Y(z)z^{-2})$$

$$x[n] - x[n - 2] = 2.368 \cdot (y[n] - 0.824 \cdot y[n - 1] + 0.88 \cdot y[n - 2])$$

$$y[n] = \frac{x[n] - x[n - 2]}{2.368} + 0.824 \cdot y[n - 1] - 0.88 \cdot y[n - 2]$$

## 4. Фильтрация сигнала

Код скрипта:

```
A0 = 2;
k0 = 0.4453;
k1 = 0.6;
k3 = pi/2;
f0 = 20*1e+3;
Fd = 1e5; %Частота дискретизации
Td = 1/Fd; %Период Дискретизации
N = 1e5; %Кол-во отсчетов сигнала
t = 0:Td:N*Td-Td; %Дискретное нормированное время
fd = 1/(N*Td); %шаг по частоте
fshift = (-N/2:N/2-1)*fd; %Дискретная частота
ffi = (0:N-1)/ Fd;
n = 0:N;
r1 = 0.2894+0.9599*1i;
r2 = 0.2894-0.9599*1i; %Найденные вычеты
pp1 = 0.2894+0.8883*1i;
pp2 = 0.2894-0.8883*1i; %Полюса фильтра

% Сигнал x1[n]
T1 = 20 *1e-3;
F1 = 1/T1;
x1 = sawtooth(2*pi*t*F1);

% Сигнал x2[n]
```

```

T2 = 25*1e-3;
F2 = 1/T2;
x2 = square(2*pi*t*F2);

%Сигнал со сложной модуляцией
Dif = 2 * (1 + 0.6.*x1).*cos((2*pi*f0).*t + k3 .* x2)*Td;

%Спектр сигнала
X = fft(Dif);
C = fftshift(abs(X));

%АЧХ цифрового фильтра
k = exp(1i*2*pi.*ffi);
K = k0 .* (k.*k - 1)./((k - pp1).*(k - pp2));
Ka = abs(K);

%Спектр выходного сигнала
B = K .* X;

%Выходной сигнал
b = real(ifft(B));

%ИХ цифрового фильтра
dir = dirac(n); %Дельта-функция Дирака
idx = dir == Inf;
dir(idx) = 1;
h = k0 .* (dir + (r1 .* pp1.^(n-1) + r2 .* pp2.^(n-1)) .* heaviside(n-1));

figure(1);
subplot(2,1,1);
plot(ffi,Ka);
title('АЧХ цифрового фильтра');
xlabel('\phi');
ylabel('K(\phi)');
grid on;

subplot(2,1,2);
stem(n,h);
title('ИХ цифрового фильтра')
xlim([0 40]);
xlabel('n');
ylabel('h[n]');
grid on;

figure(2)
subplot(2,1,1);
stem(t,b, '.');
title('Сигнал на выходе фильтра');
xlim([0 0.07]);
xlabel('n*Td [c]');
ylabel('b[n] [B*c]');
grid on;

subplot(2,1,2);
stem(fshift,fftshift(abs(B)), '.');
title('Спектр сигнала B[m*f]')
xlim([-4*10^4 4*10^4]);
xlabel('m*f');
ylabel('B[m*f]');
grid on;

```

```

figure(3);
stem(fshift,fftshift(abs(B)),'.','-r');
xlim([-4*10^4 4*10^4]);
xlabel('m*f');
grid on;
ylabel('B[m*f] red, C[m*f] blue');
title('Спектр сигнала до и после фильтрации')
hold on;
stem(fshift,C, '.','-b');
hold off;

```

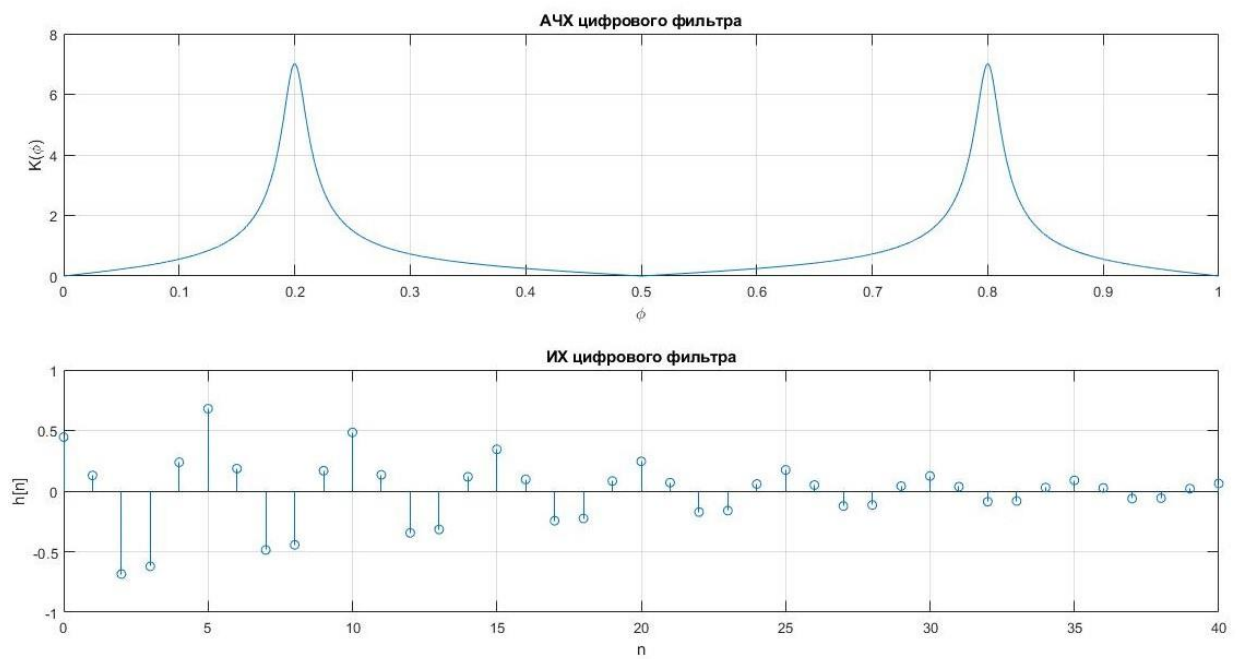


Рисунок 14 – Характеристики фильтра

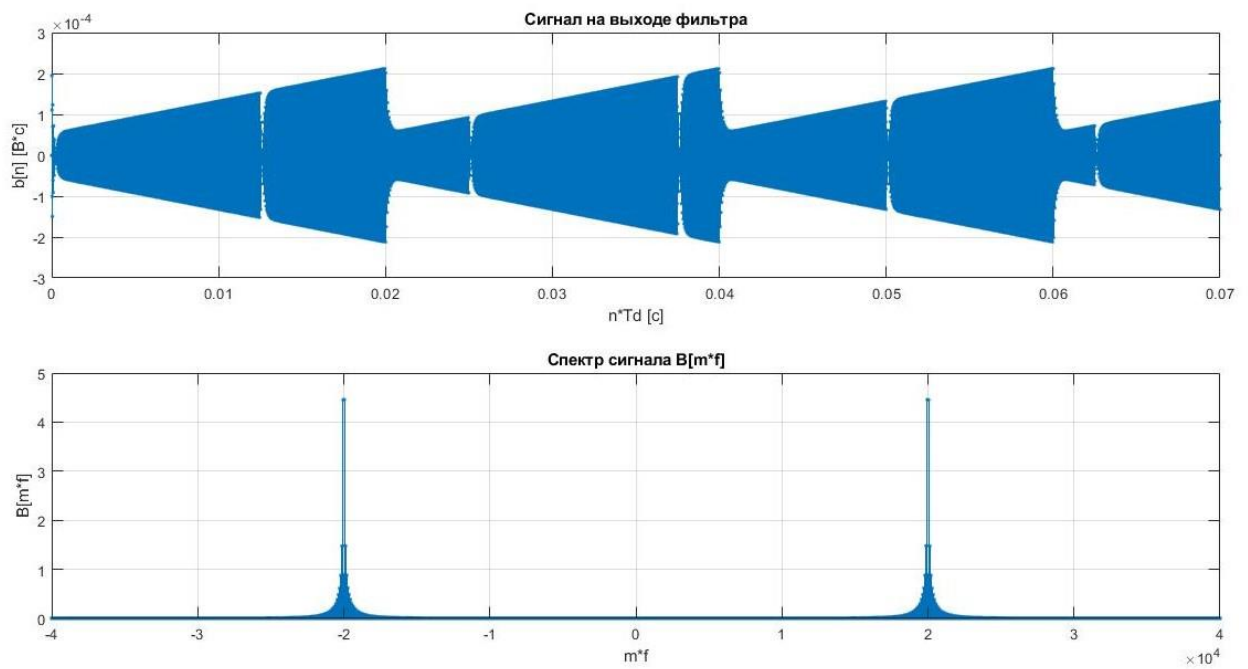


Рисунок 15 – Сигнал на выходе и его спектр

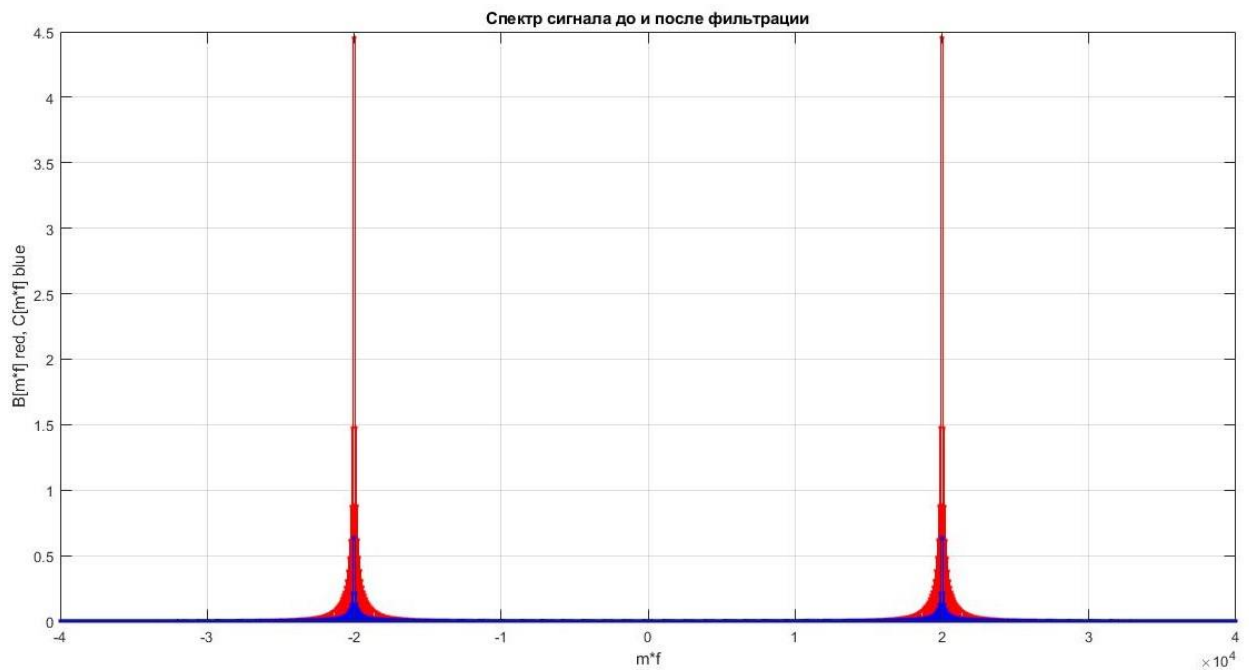


Рисунок 16 – Спектр сигнала до и после фильтрации

## 5. Нахождение комплексной огибающей радиосигнала.

Код скрипта:

```
A0 = 2;
k0 = 0.4453;
k1 = 0.6;
k3 = pi/2;
f0 = 20*1e+3;
Fd = 1e5; %Частота дискретизации
Td = 1/Fd; %Период Дискретизации
N = 1e5; %Кол-во отсчетов сигнала
t = 0:Td:N*Td-Td; %Дискретное нормированное время
fd = 1/(N*Td); %шаг по частоте
f = (0:N-1);
fshift = (-N/2:N/2-1)*fd; %Дискретная частота
ffi = (0:N-1)/ Fd;
n = (-N/2:N/2-1);
pp1 = 0.2894+0.8883*1i;
pp2 = 0.2894-0.8883*1i; %Полюса фильтра

% Сигнал x1[n]
T1 = 20 *1e-3;
F1 = 1/T1;
x1 = sawtooth(2*pi*t*F1);

% Сигнал x2[n]
T2 = 25*1e-3;
F2 = 1/T2;
```

```

x2 = square(2*pi*t*F2);

%Сигнал со сложной модуляцией
Dif = 2 *(1 + 0.6.*x1).*cos((2*pi*f0).*t + k3 .* x2)*Td;

%Спектр сигнала
X = fft(Dif);
C = fftshift(abs(X));

%АЧХ цифрового фильтра
k = exp(1i*2*pi.*ffi);
K = k0 .* (k.*k - 1)./((k - pp1).*(k - pp2));
Ka = abs(K);

%Спектр выходного сигнала
B = K .* X;

%Выходной сигнал
b = real(ifft(B));

%Алгоритм преобразователя Гилберта
Cg = hilbert(b).*exp((-1i*2*pi*Td).*n);
ReC = real(Cg);
ImC = imag(Cg);
FC =imag(fft(abs(Cg)));

figure(1);
subplot(2,1,1);
plot(t,ReC);
title('Действительная часть комплексной огибающей');
xlabel('n*Td [c]');
ylabel('b[n] [B*c]');
xlim([0 0.001]);
grid on;

subplot(2,1,2);
plot(t,ImC);
title('Мнимая часть комплексной огибающей');
xlabel('n*Td [c]');
ylabel('b[n] [B*c]');
xlim([0 0.001]);
grid on;

figure(2);
subplot(2,1,1);
stem(fshift,fftshift(abs(FC)),'.');
title('Амплитудный спектр комплексной огибающей');
xlabel('m*f');
ylabel('C[m*f] В');
xlim([-1000 1000]);
grid on;

subplot(2,1,2);
stem(fshift,fftshift(angle(FC)),'.');
title('Фазовый спектр комплексной огибающей');
xlabel('m*f');
ylabel('arg(C[m*f]) рад');
xlim([-100 100]);
grid on;

```

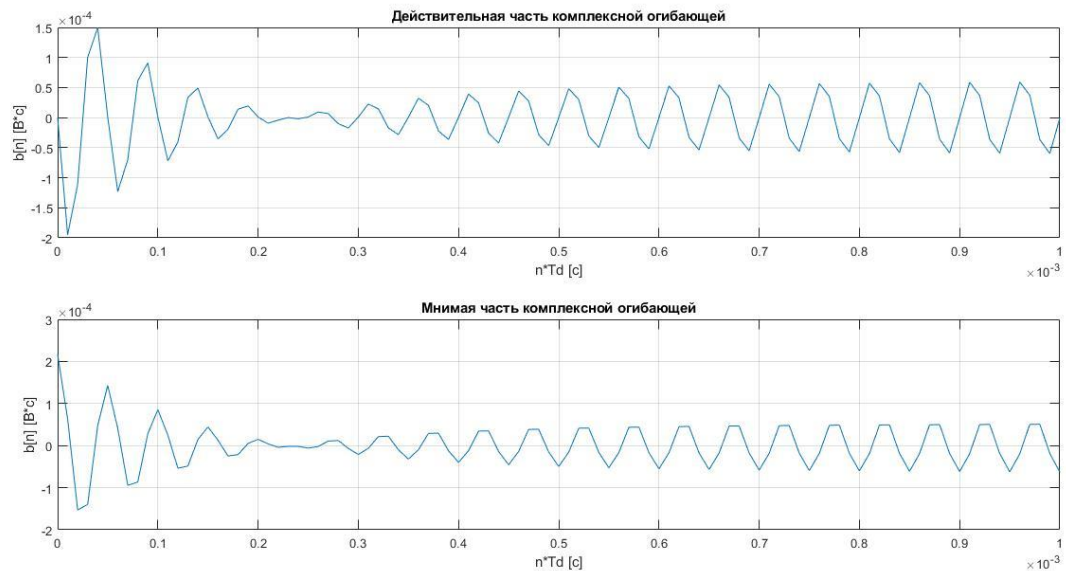


Рисунок 17 – Действительная и мнимая составляющие комплексной огибающей радиосигнала  $b[m]$

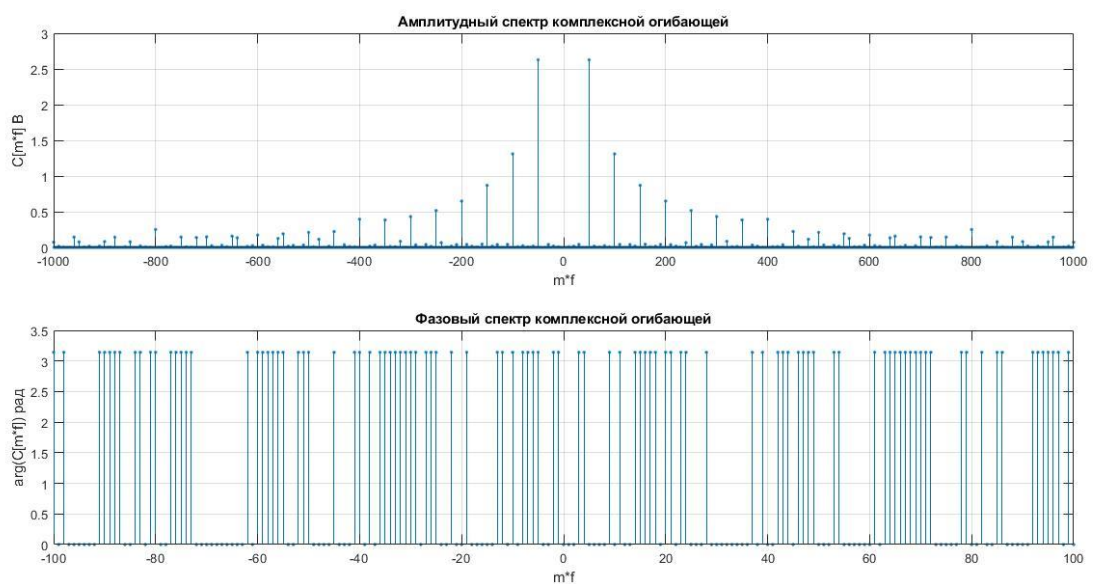


Рисунок 18 – Фазовый и амплитудный спектр комплексной огибающей



## 6. Детектирование радиосигнала.

Код скрипта:

```
A0 = 2;
k0 = 0.4453;
k1 = 0.6;
k3 = pi/2;
f0 = 20*1e+3;
Fd = 1e5; %Частота дискретизации
Td = 1/Fd; %Период Дискретизации
N = 1e5; %Кол-во отсчетов сигнала
t = 0:Td:N*Td-Td; %Дискретное нормированное время
fd = 1/(N*Td); %шаг по частоте
f = (0:N-1);
fshift = (-N/2:N/2-1)*fd; %Дискретная частота
ffi = (0:N-1)/ Fd;
n = (-N/2:N/2-1);
r1 = 0.2894+0.9599*1i;
r2 = 0.2894-0.9599*1i; %Найденные вычеты
pp1 = 0.2894+0.8883*1i;
pp2 = 0.2894-0.8883*1i; %Полюса фильтра

% Сигнал x1[n]
T1 = 20 *1e-3;
F1 = 1/T1;
x1 = sawtooth(2*pi*t*F1);

% Сигнал x2[n]
T2 = 25*1e-3;
F2 = 1/T2;
x2 = square(2*pi*t*F2);

%Сигнал со сложной модуляцией
Dif = A0 .* (1 + k1.*x1) .* cos((2*pi*f0).*t + k3 .* x2)*Td;

%Спектр сигнала
X = fft(Dif);
C = fftshift(abs(X));

%АЧХ цифрового фильтра
k = exp(1i*2*pi.*ffi);
K = k0 .* (k.*k - 1)./((k - pp1).*(k - pp2));
Ka = abs(K);

%Спектр выходного сигнала
B = K .* X;

%Выходной сигнал
b = real(ifft(B));

%Алгоритм преобразователя Гилберта
Cg = hilbert(b) .* exp((-1i*2*pi*Td).*n);
fc = diff(angle(Cg))*Fd;

figure(1);
subplot(2,1,1);
plot(t, A0.*(1+k1.*x1)*Td);
title('Амплитудная модуляция в радиосигнале a[n]');
xlabel('n*Td [c]');
```

```

ylabel('A0.*(1+k1.*x1)*Td [В]');
xlim([0 0.15]);
grid on;

subplot(2,1,2)
plot(t, abs(Cg));
title('Модуль комплексной огибающей сигнала b[n]');
xlim([0 0.15]);
xlabel('n*Td [с]');
ylabel('abs(C[n]) [В]');
grid on;

figure(2);
subplot(2,1,1);
plot(t, k3*Td.*x2);
title('Фазовая модуляция модуляция в радиосигнале a[n]');
xlabel('n*Td [с]');
ylabel('k3*Td.*x2 [рад]');
xlim([0 0.05]);
grid on;

subplot(2,1,2);
plot(t, angle(Cg));
title('Аргумент комплексной огибающей сигнала b[n]');
xlim([0 0.05]);
xlabel('n*Td [с]');
ylabel('arg(C[n]) [рад]');
grid on;

figure(3);
plot((0:N-2)*Td, fc/(2*pi));
xlim([0 0.0012]);
title('Мгновенное значение частоты');
xlabel('n*Td [с]');
ylabel('f[n] [Гц]');
grid on;

figure(4);
plot((0:N-2)*Td, fc/(2*pi));
xlim([0 0.014]);
title('Мгновенное значение частоты');
xlabel('n*Td [с]');
ylabel('f[n] [Гц]');
grid on;

figure(5);
plot(t, angle(Cg));
title('Аргумент комплексной огибающей сигнала b[n]');
xlim([0 0.0005]);
xlabel('n*Td [с]');
ylabel('arg(C[n]) [рад]');
grid on;

```

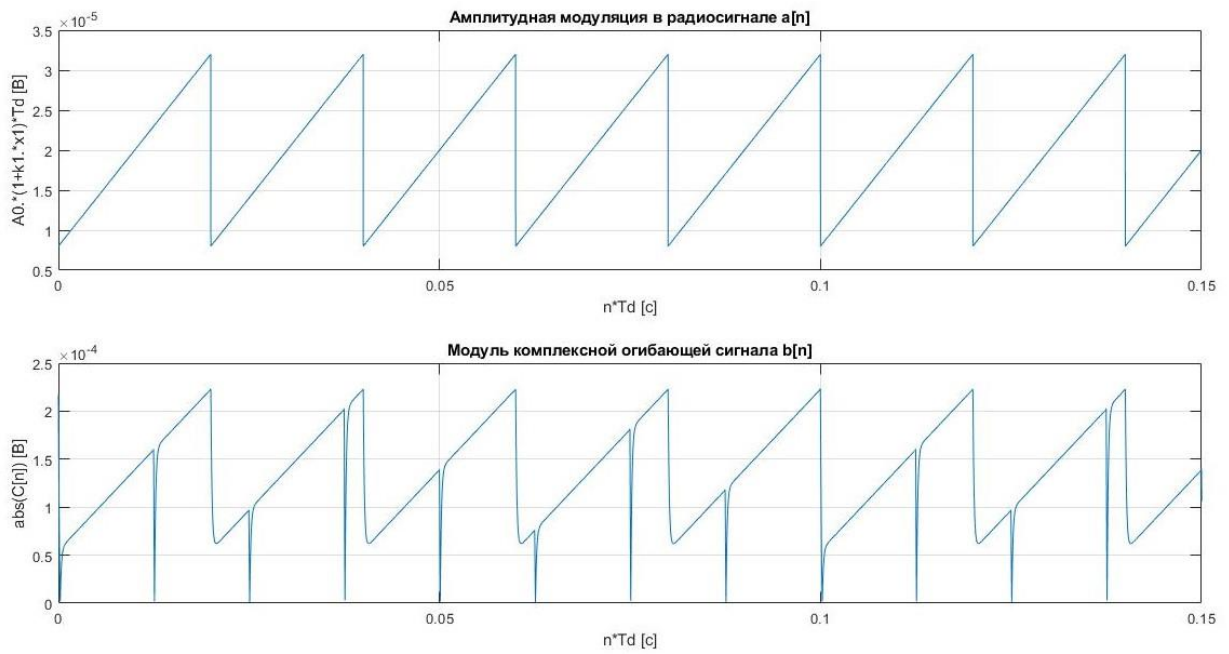


Рисунок 19 – Амплитудный детектор

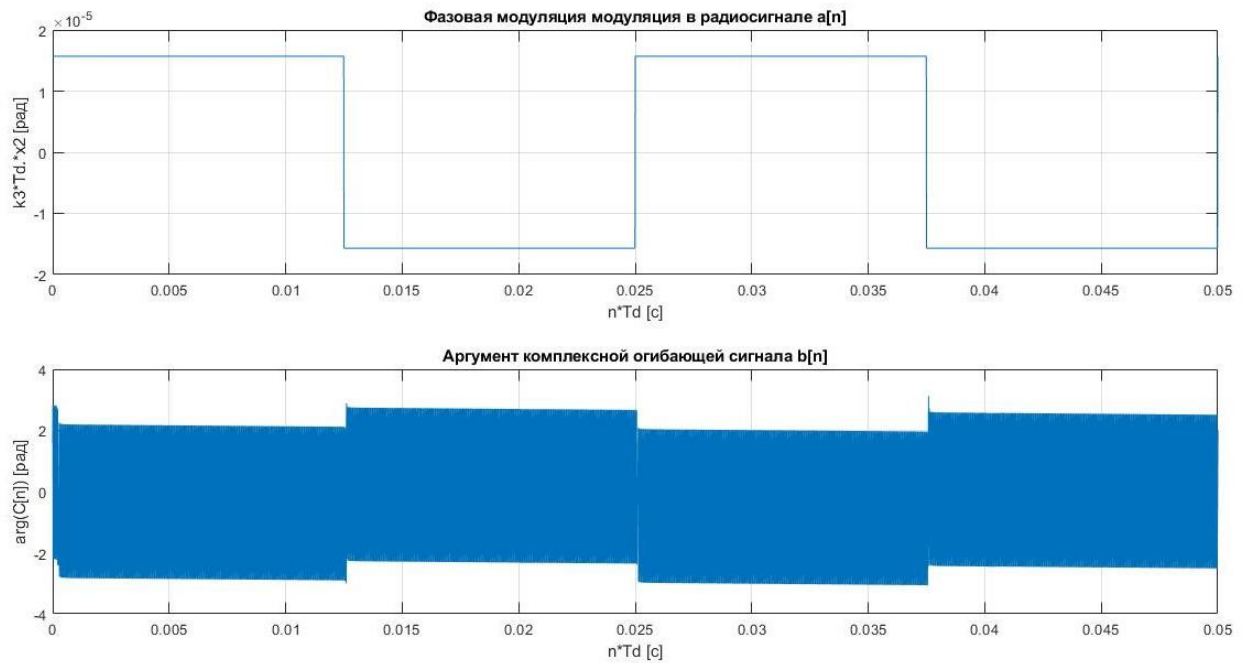


Рисунок 19 – Фазовый детектор

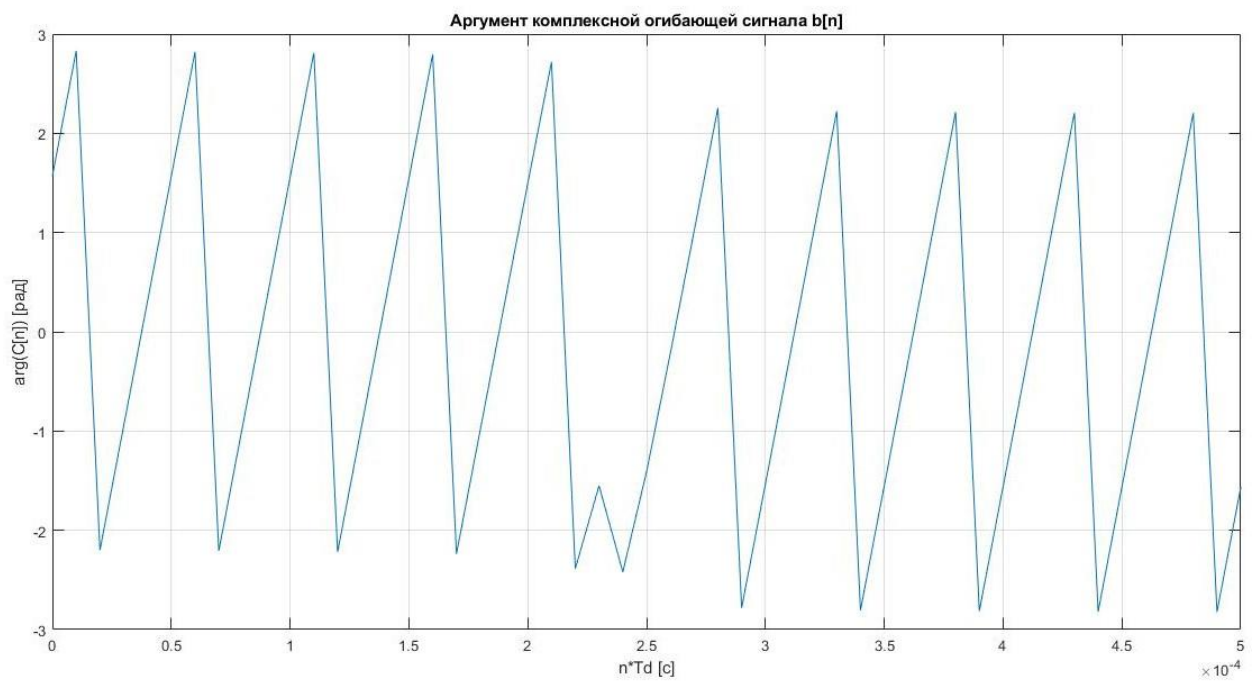


Рисунок 20 – Аргумент комплексной огибающей в приближении

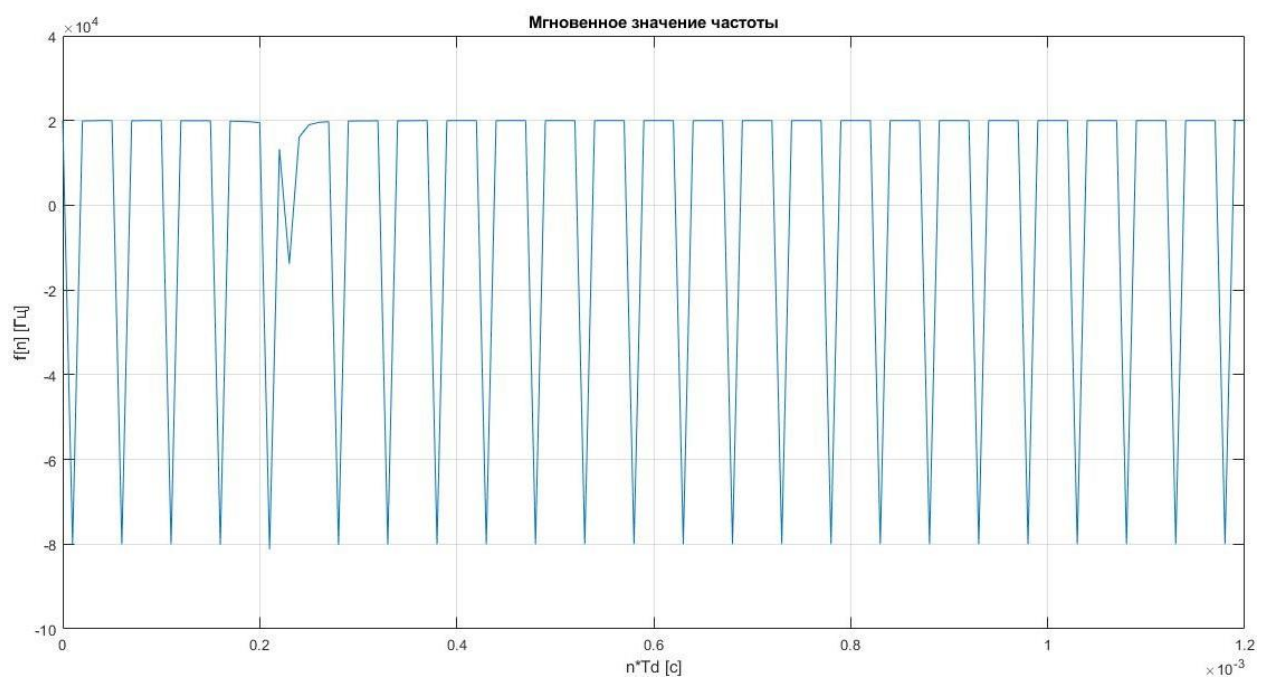


Рисунок 21 – Частотный детектор

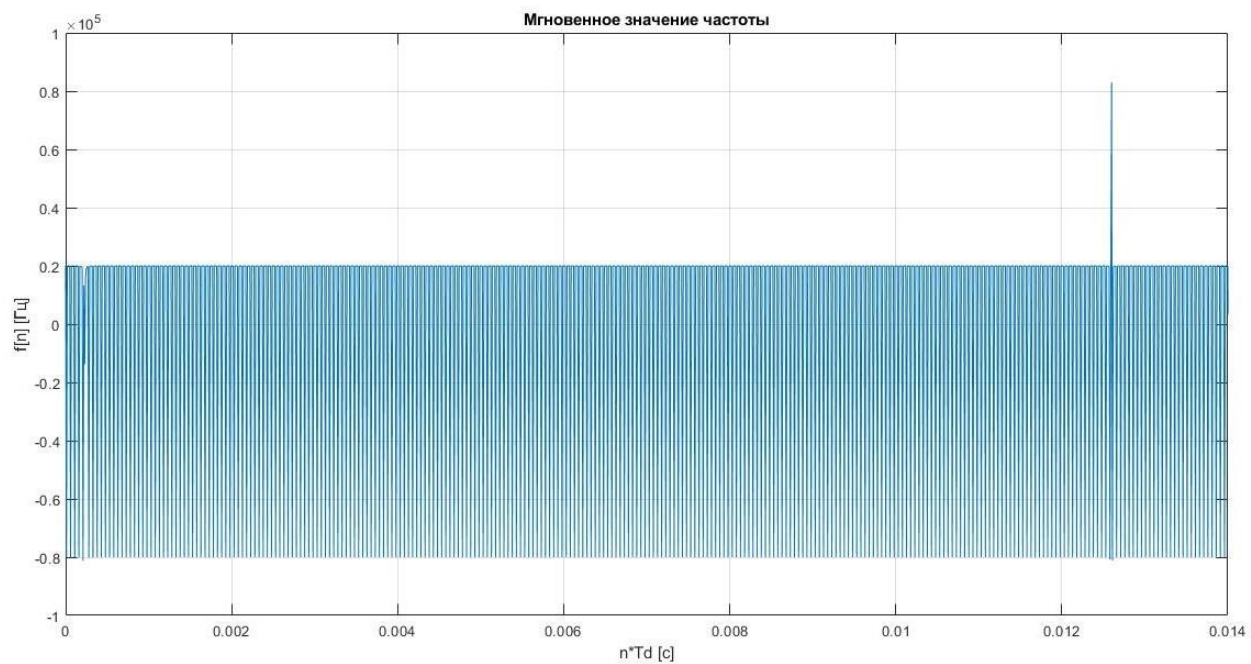


Рисунок 22 – Частотный детектор