

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Факультет систем управления и робототехники

## Лабораторная работа № 2 "Преобразование Фурье"

по дисциплине Частотные методы

Выполнила: студентка гр. **R3238**

**Нечаева А. А.**

Преподаватель: *Перегудин Алексей Алексеевич*

Санкт-Петербург, 2024

В заданиях 1 и 2 используется унитарное преобразование Фурье к угловой частоте  $\omega$ .

## 1 Задание. Вещественное.

Все функции ниже  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ .

### 1.1 Прямоугольная функция

$$f(t) = \begin{cases} a, & |t| \leq b, \\ 0, & |t| > b \end{cases} \quad (1)$$

#### 1.1.1 Аналитическое выражение Фурье-образа

Фурье-образ функции  $f(t)$  будем находить по формуле:

$$\hat{f}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2)$$

$$\hat{f}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-b}^b a e^{-i\omega t} dt = \frac{a(e^{-i\omega b} - e^{i\omega b})}{-i\omega\sqrt{2\pi}} \quad (3)$$

### 1.1.2 Построение графиков функции $f(t)$

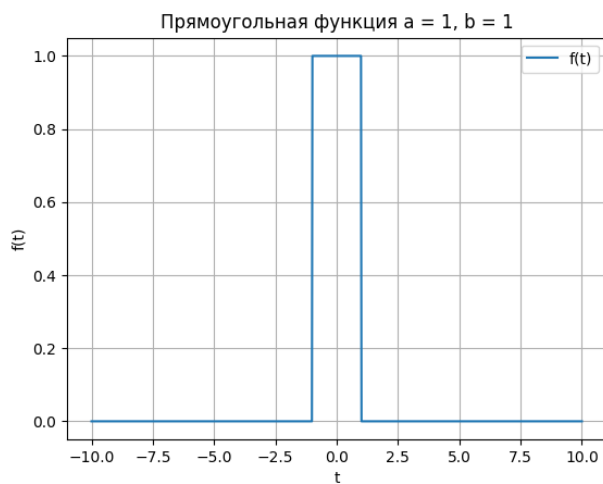


Рис. 1. График  $f(t)$  при  $a = 1, b = 1$ .

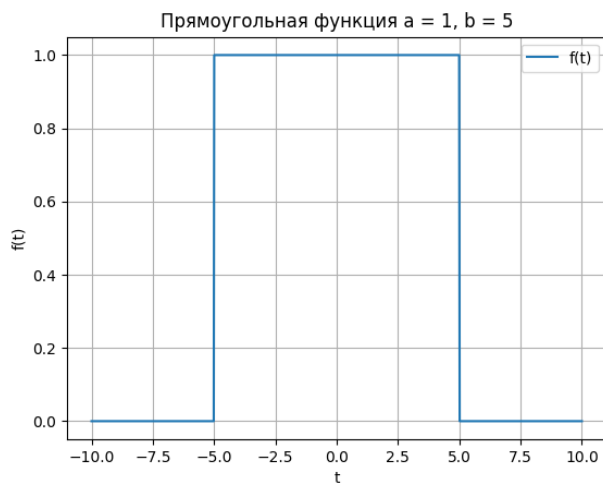


Рис. 2. График  $f(t)$  при  $a = 1, b = 5$ .

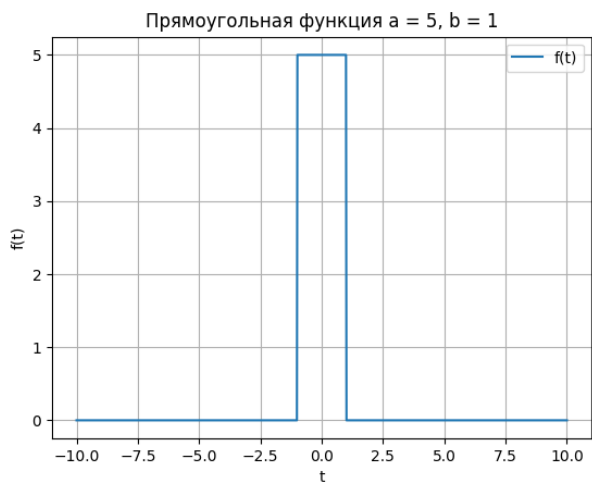


Рис. 3. График  $f(t)$  при  $a = 5, b = 1$ .

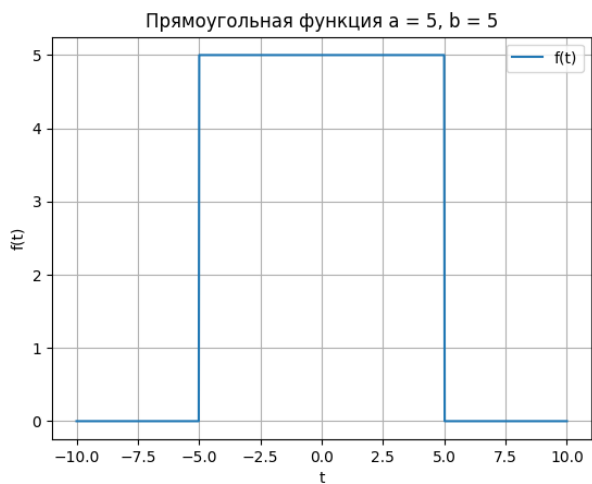


Рис. 4. График  $f(t)$  при  $a = 5, b = 5$ .

### 1.1.3 Построение графиков Фурье-образа $\hat{f}(\omega)$

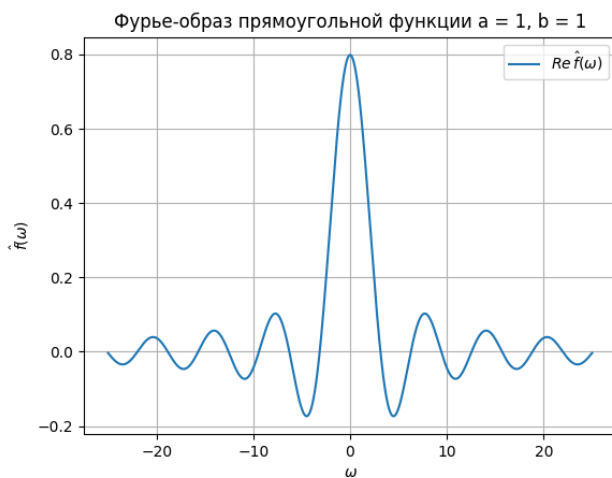


Рис. 5. График  $\hat{f}(\omega)$  при  $a = 1, b = 1$ .

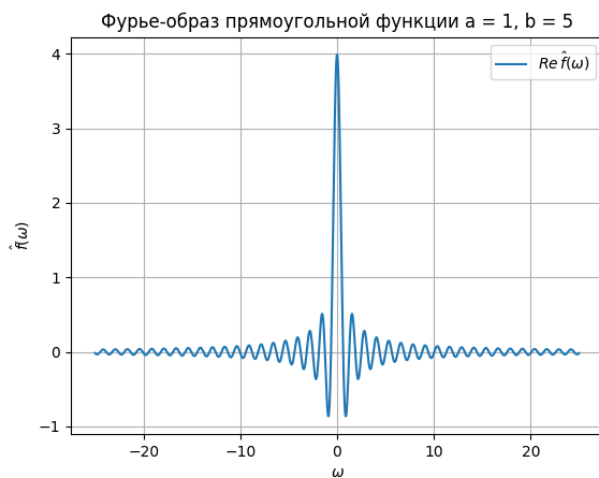


Рис. 6. График  $\hat{f}(\omega)$  при  $a = 1, b = 5$ .

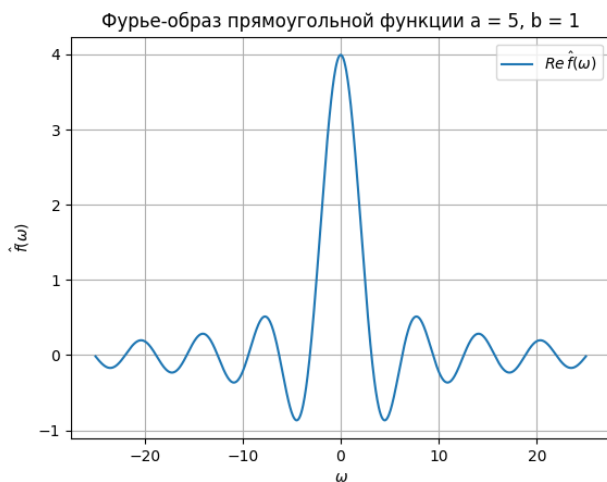


Рис. 7. График  $\hat{f}(\omega)$  при  $a = 5, b = 1$ .

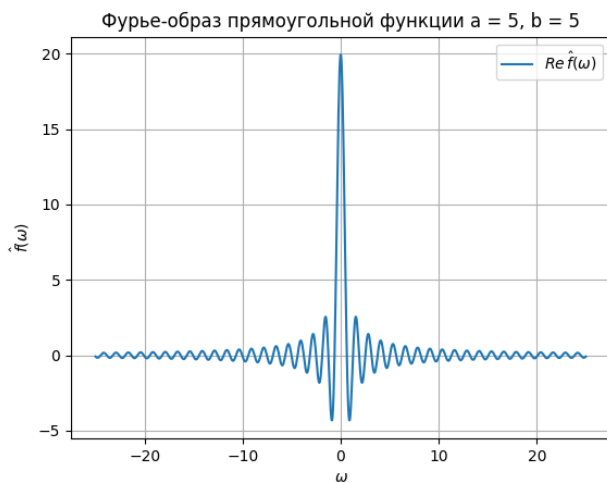


Рис. 8. График  $\hat{f}(\omega)$  при  $a = 5, b = 5$ .

### 1.1.4 Проверка равенства Парсеваля

Таблица 1. Равенство Парсеваля для прямоугольной функции.

n	a	b	$\ f\ ^2 = \int_{-d}^d  f(t) ^2 dt$	$\ \hat{f}\ ^2 = \int_{-d}^d  \hat{f}(\omega) ^2 d\omega$
1	1	1	2.000	2.018
2	1	5	10.000	10.001
3	5	1	50.000	50.445
4	5	5	250.000	250.037

Для вычисления квадратов норм функции и ее образа интегрирование велось от  $-100$  до  $100$ , то есть константа  $d = 100$  из таблицы 1. Заметим, что с точностью до целых равенства Парсеваля выполнены для всех рассматриваемых значений параметров  $a$  и  $b$ .

### 1.1.5 Анализ результатов

Параметр  $a$  влияет на максимум функции, при  $a = 1$  максимальное значение функции 1, при  $a = 5$  – аналогично, максимум равен 5. Параметр  $b$  влияет на ширину "прямоугольной" области графика исходной функции, при  $b = 1$  максимальное значение функция принимает на отрезке  $[-1; 1]$ , при  $b = 5$  – аналогично, максимум будет на отрезке  $[-5; 5]$ .

На графиках Фурье-образа заметно, что параметр  $b$  влияет на частоту колебаний функции и на ширину центрального всплеска: при  $b = 1$  частота ниже и ширина больше, чем при  $b = 5$ . Вместе параметры  $a$  и  $b$  влияют на амплитуду колебаний функции, при увеличении суммы  $a$  и  $b$  амплитуда возрастает, причем для двух разных наборов  $a = 1, b = 5$  и  $a = 5, b = 1$  амплитуда одинакова.

Принцип неопределенности Гейзенберга о том, что невозможно одновременно точно определить координату и импульс электрона в атоме, здесь заключается в том, графикам исходной функции с наименьшими промежутками максимума соответствуют Фурье-образы с наименьшей частотой колебаний.

## 1.2 Треугольная функция

$$f(t) = \begin{cases} a - |at/b|, & |t| \leq b, \\ 0, & |t| > b \end{cases} \quad (4)$$

### 1.2.1 Аналитическое выражение Фурье-образа

$$\begin{aligned} \hat{f}(\omega) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-b}^b (a - |at/b|) e^{-i\omega t} dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-b}^b a e^{-i\omega t} dt - \\ &- \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-b}^b |at/b| e^{-i\omega t} dt = \frac{a(e^{-i\omega b} - e^{i\omega b})}{-i\omega\sqrt{2\pi}} + \frac{a}{b\sqrt{2\pi}} \left( \int_{-b}^0 t e^{-i\omega t} dt - \int_0^b t e^{-i\omega t} dt \right) \equiv \end{aligned}$$

Отдельно вычислим неопределенный интеграл:

$$\begin{aligned} \int t e^{-i\omega t} dt &= \| u = t, dv = e^{-i\omega t} dt, du = dt, v = -\frac{e^{-i\omega t}}{i\omega} \| = \\ &= -\frac{t e^{-i\omega t}}{i\omega} + \int \frac{e^{-i\omega t}}{i\omega} dt = -\frac{t e^{-i\omega t}}{i\omega} + \frac{e^{-i\omega t}}{\omega^2} + C = \frac{1 + i\omega t}{\omega^2 e^{i\omega t}} + C \end{aligned} \quad (5)$$

И два соответствующих определенных интеграла:

$$\int_{-b}^0 t e^{-i\omega t} dt = \left. \frac{1 + i\omega t}{\omega^2 e^{i\omega t}} \right|_{-b}^0 = \frac{1}{\omega^2} - \frac{1 - i\omega b}{\omega^2 e^{-i\omega b}} \quad (6)$$

$$\int_0^b t e^{-i\omega t} dt = \left. \frac{1 + i\omega t}{\omega^2 e^{i\omega t}} \right|_0^b = \frac{1 + i\omega b}{\omega^2 e^{i\omega b}} - \frac{1}{\omega^2} \quad (7)$$

$$\int_{-b}^0 t e^{-i\omega t} dt - \int_0^b t e^{-i\omega t} dt = \frac{2}{\omega^2} - \frac{1 - i\omega b}{\omega^2 e^{-i\omega b}} - \frac{1 + i\omega b}{\omega^2 e^{i\omega b}} \quad (8)$$



$$\begin{aligned}
&= \frac{a(e^{-i\omega b} - e^{i\omega b})}{-i\omega\sqrt{2\pi}} + \frac{a}{b\sqrt{2\pi}} \left( \frac{2}{\omega^2} - \frac{1-i\omega b}{\omega^2 e^{-i\omega b}} - \frac{1+i\omega b}{\omega^2 e^{i\omega b}} \right) = \\
&= \frac{a}{b\omega^2\sqrt{2\pi}} (i\omega b(e^{-i\omega b} - e^{i\omega b}) + 2 - e^{i\omega b} + i\omega b e^{i\omega b} - e^{-i\omega b} - i\omega b e^{-i\omega b}) = \\
&= \frac{a}{b\omega^2\sqrt{2\pi}} (i\omega b e^{-i\omega b} - i\omega b e^{i\omega b} + 2 - e^{i\omega b} + i\omega b e^{i\omega b} - e^{-i\omega b} - i\omega b e^{-i\omega b}) = \\
&= \frac{a}{b\omega^2\sqrt{2\pi}} (2 - e^{i\omega b} - e^{-i\omega b}) \quad (9)
\end{aligned}$$

### 1.2.2 Построение графиков функции $f(t)$

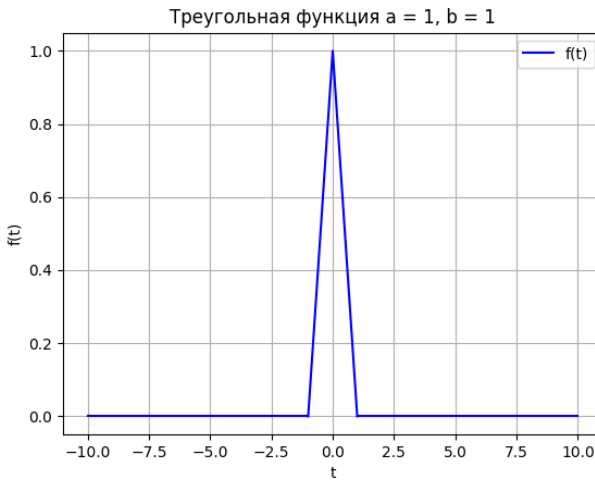


Рис. 9. График  $f(t)$  при  $a = 1, b = 1$ .

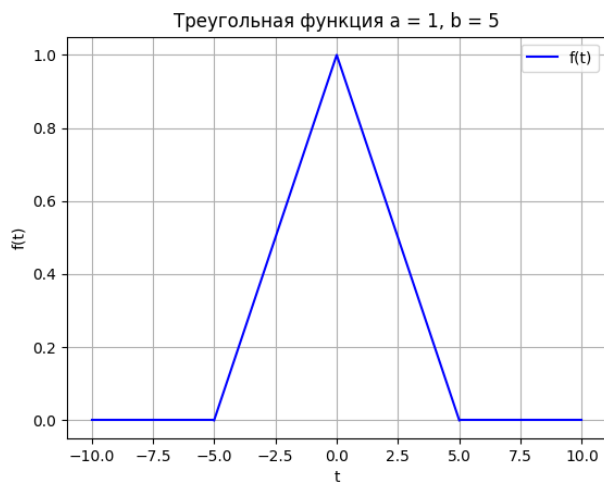


Рис. 10. График  $f(t)$  при  $a = 1, b = 5$ .

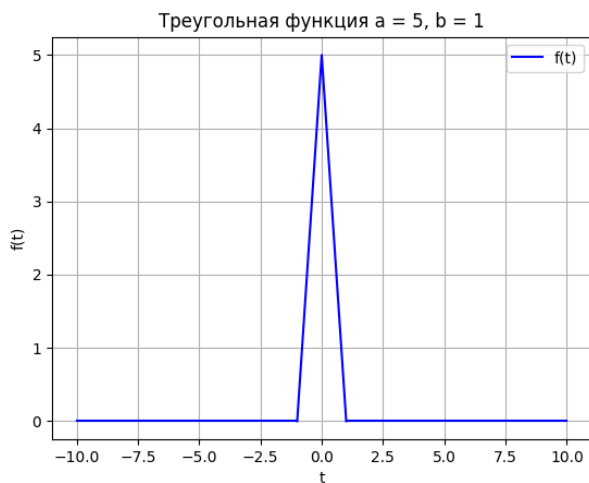


Рис. 11. График  $f(t)$  при  $a = 5, b = 1$ .

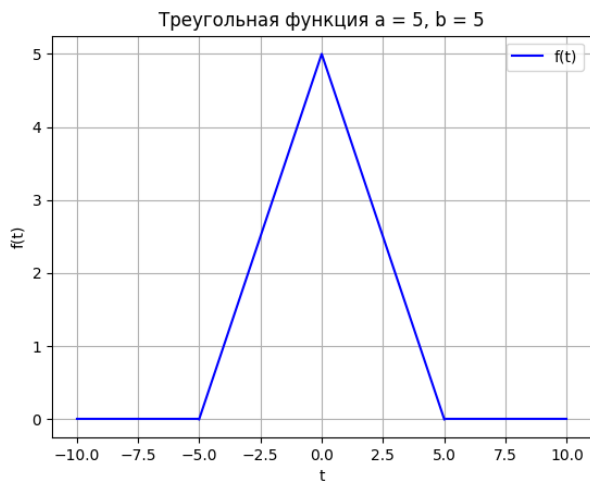


Рис. 12. График  $f(t)$  при  $a = 5, b = 5$ .

### 1.2.3 Построение графиков Фурье-образа $\hat{f}(\omega)$



Рис. 13. График  $\hat{f}(t)$  при  $a = 1, b = 1$ .

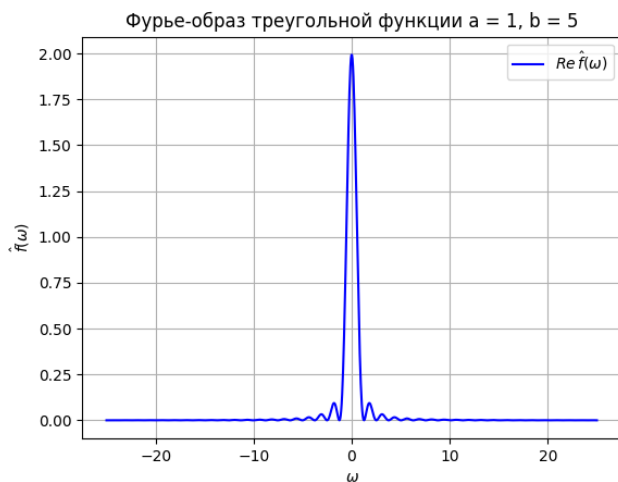


Рис. 14. График  $\hat{f}(t)$  при  $a = 1, b = 5$ .



Рис. 15. График  $\hat{f}(t)$  при  $a = 5, b = 1$ .

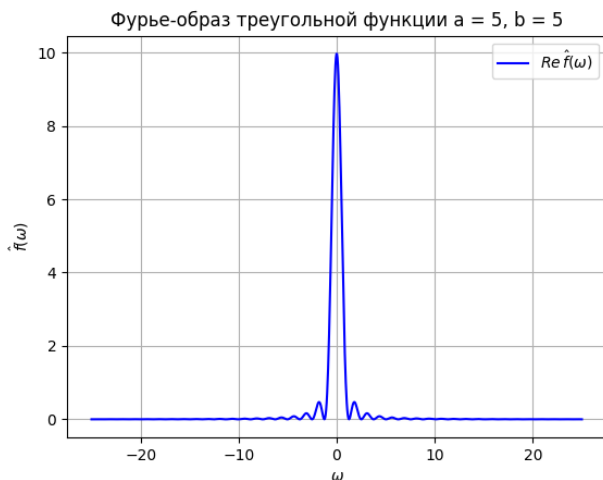


Рис. 16. График  $\hat{f}(t)$  при  $a = 5, b = 5$ .

### 1.2.4 Проверка равенства Парсеваля

Таблица 2. Равенство Парсеваля для треугольной функции.

n	a	b	$\ f\ ^2 = \int_{-d}^d  f(t) ^2 dt$	$\ \hat{f}\ ^2 = \int_{-d}^d  \hat{f}(\omega) ^2 d\omega$
1	1	1	0.6659	0.6641
2	1	5	3.329	3.323
3	5	1	16.65	16.60
4	5	5	83.25	83.08

Заметим, что числа так же сходятся с точностью до целых, для небольших значений, с точностью до сотых (см. наборы  $(1, 1)$ ,  $(1, 5)$  вида  $(a, b)$  в таблице 2).

### 1.2.5 Анализ результатов

Параметр  $b$  соответствует отрезку, на котором расположено основание треугольника, образованного функцией: при  $b = 1$  основание  $[-1; 1]$ , при  $b = 5$  – аналогично  $[-5; 5]$ . Параметр  $a$  отвечает за максимум функции: при  $a = 1$  – максимум 1, при  $a = 5$ , соответственно, в 5.

Для графика Фурье-образа параметр  $b$  определяет частоту колебаний графика, при  $b = 1$  частота ниже, чем при  $b = 5$ . Вместе параметры  $a$  и  $b$  влияют на амплитуду колебаний функции, при увеличении суммы  $a$  и  $b$  амплитуда возрастает, причем для двух разных наборов  $a = 1, b = 5$  и  $a = 5, b = 1$  амплитуда одинакова.

Принцип неопределенности Гейзенберга о том, что невозможно одновременно точно определить координату и импульс электрона в атоме, здесь заключается в том, графикам исходной функции с наименьшими промежутками максимума соответствуют Фурье-образы с наименьшей частотой колебаний.

### 1.3 Кардинальный синус

$$f(t) = \text{sinc}(bt) \quad (10)$$

#### 1.3.1 Аналитическое выражение Фурье-образа

Результат получен с помощью калькулятора *Wolfram*.

$$\hat{f}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \text{sinc}(bt) e^{-i\omega t} dt = \frac{a}{|b|} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \begin{cases} 0, & (\frac{b}{\omega})^2 \leq 1 \\ 1 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (11)$$

#### 1.3.2 Построение графиков функции $f(t)$



Рис. 17. График  $f(t)$  при  $a = 1$ ,  $b = 1$ .

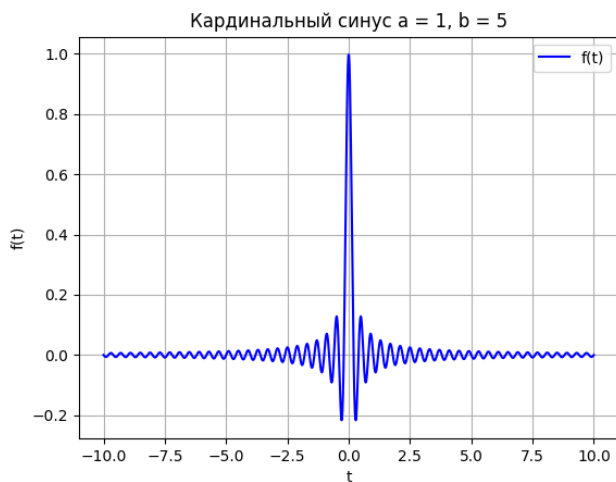


Рис. 18. График  $f(t)$  при  $a = 1, b = 5$ .



Рис. 19. График  $f(t)$  при  $a = 5, b = 1$ .



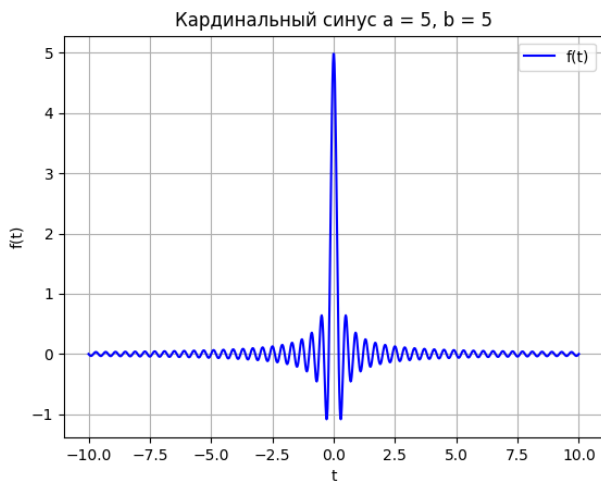


Рис. 20. График  $f(t)$  при  $a = 5, b = 5$ .

### 1.3.3 Построение графиков Фурье-образа $\hat{f}(\omega)$

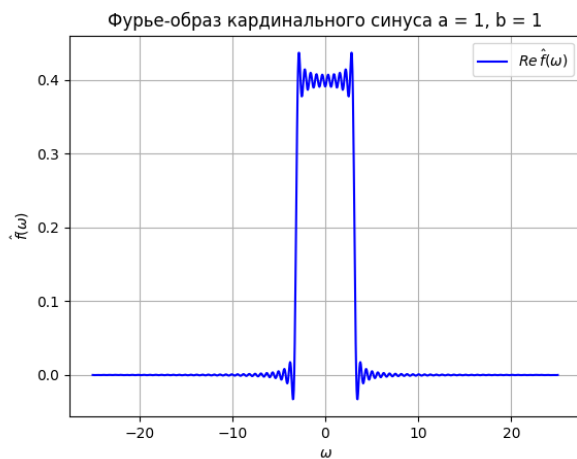


Рис. 21. График  $\hat{f}(t)$  при  $a = 1, b = 1$ .

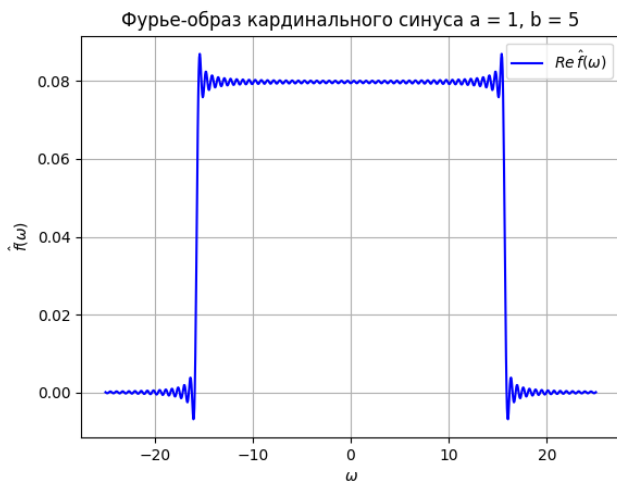


Рис. 22. График  $\hat{f}(t)$  при  $a = 1, b = 5$ .

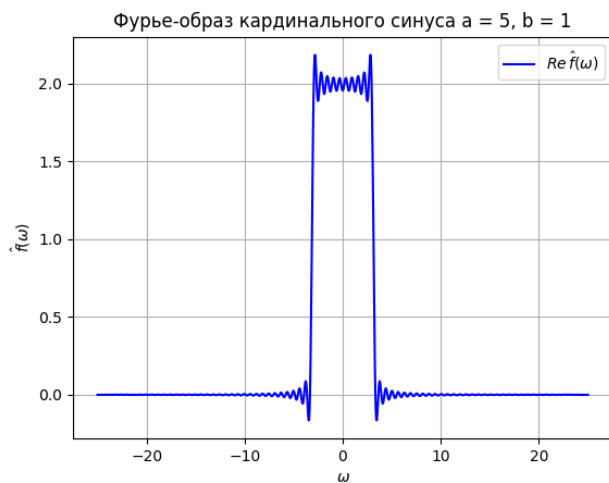


Рис. 23. График  $\hat{f}(t)$  при  $a = 5, b = 1$ .

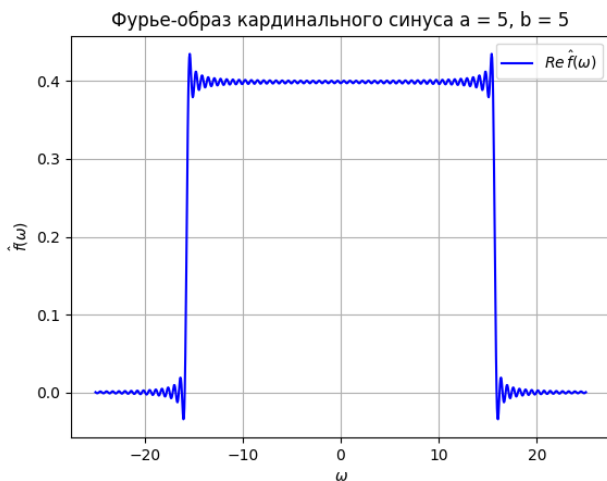


Рис. 24. График  $\hat{f}(t)$  при  $a = 5, b = 5$ .

### 1.3.4 Проверка равенства Парсеваля

Таблица 3. Равенство Парсеваля для кардинального синуса.

n	a	b	$\ f\ ^2 = \int_{-d}^d  f(t) ^2 dt$	$\ \hat{f}\ ^2 = \int_{-d}^d  \hat{f}(\omega) ^2 d\omega$
1	1	1	0.9979	0.9896
2	1	5	0.1994	0.1989
3	5	1	24.94	24.74
4	5	5	4.984	4.973

С точностью до целых значения совпадают, более малые – с точностью до десятых или сотых. Равенство Парсеваля выполнено для всех рассматриваемых наборов  $(a, b)$ .

### 1.3.5 Анализ результатов

Параметр  $a$  влияет на максимум исходной функции: при  $a = 1$  максимум 1, при  $a = 5$  – аналогично 5. Влияние параметра  $b$  сказывается на частоте колебаний графика исходной функции: при  $b = 1$  частота ниже, чем в случае  $b = 5$ .

Параметр  $b$  влияет на ширину скачка графика Фурье-образа: при  $b = 1$  она меньше, чем при  $b = 5$ . Соотношение параметров  $a$  и  $b$  влияют на высоту скачка на графике Фурье-образа, заметим, что при  $a = 1, b = 1$  и  $a = 5, b = 5$  высота одинакова и равна примерно 0.4 (см. рисунки 21 и 24), если  $b$  больше  $a$  (рисунок 22), то высота  $\sim 0.08$ , в обратном случае, (рисунок 23),  $\sim 2$ .

Принцип неопределенности Гейзенберга о том, что невозможно одновременно точно определить координату и импульс электрона в атоме, здесь заключается в том, графикам исходной функции с наименьшей частотой колебаний соответствуют Фурье-образы с наименьшими промежутками максимума.

## 1.4 Функция Гаусса

$$f(t) = ae^{-bt^2} \quad (12)$$

### 1.4.1 Аналитическое выражение Фурье-образа

Результат получен с помощью калькулятора *Wolfram*.

$$\hat{f}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} ae^{-bt^2} e^{-i\omega t} dt = \frac{a}{\sqrt{2b}} e^{-\frac{\omega^2}{4b}} \quad (13)$$

### 1.4.2 Построение графиков функции $f(t)$

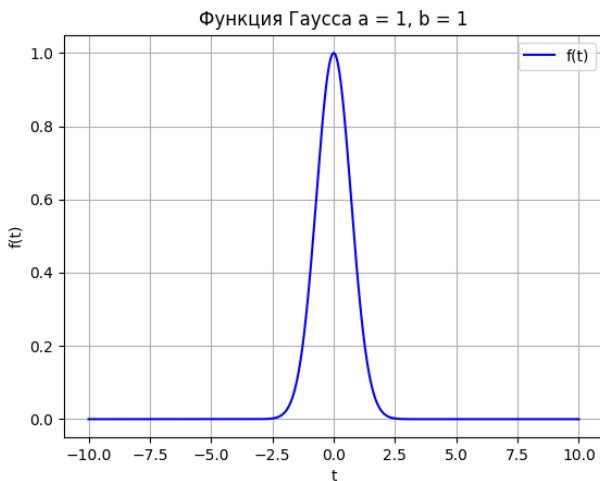


Рис. 25. График  $f(t)$  при  $a = 1$ ,  $b = 1$ .

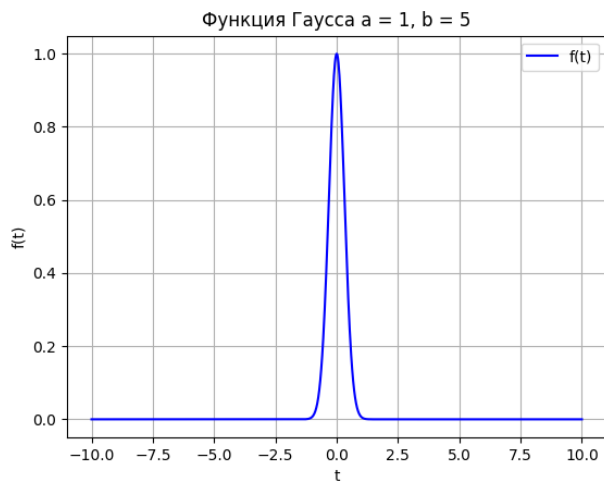


Рис. 26. График  $f(t)$  при  $a = 1, b = 5$ .

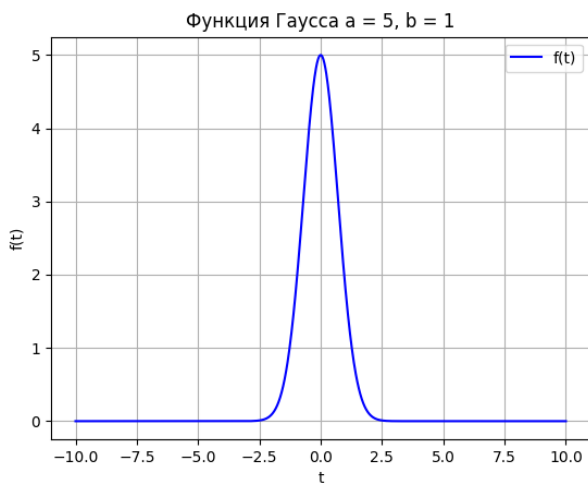


Рис. 27. График  $f(t)$  при  $a = 5, b = 1$ .

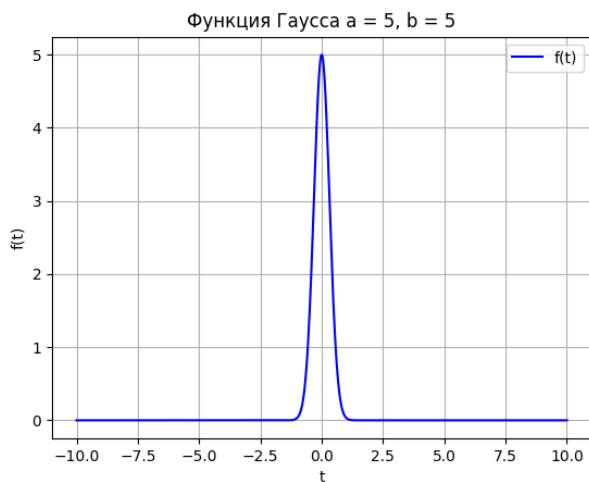


Рис. 28. График  $f(t)$  при  $a = 5, b = 5$ .

### 1.4.3 Построение графиков Фурье-образа $\hat{f}(\omega)$

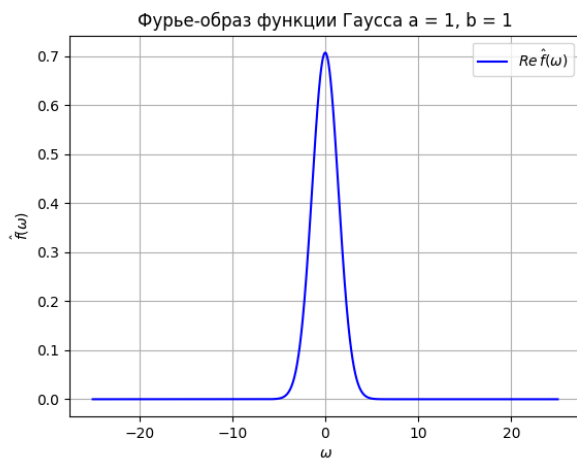


Рис. 29. График  $\hat{f}(t)$  при  $a = 1, b = 1$ .

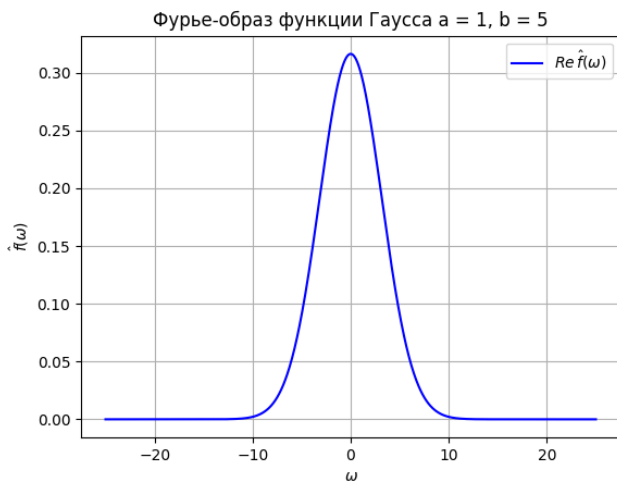


Рис. 30. График  $\hat{f}(t)$  при  $a = 1, b = 5$ .

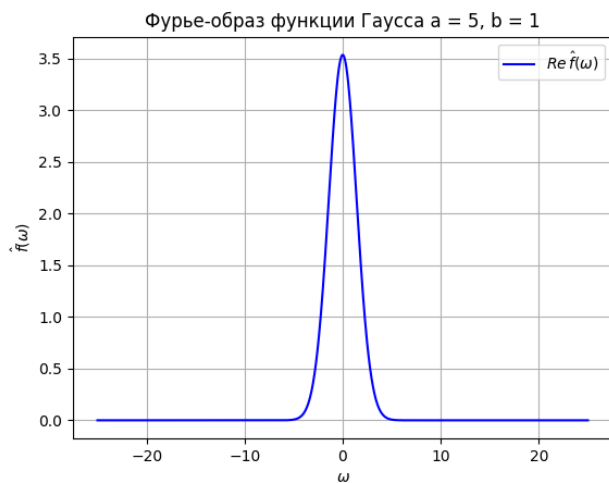


Рис. 31. График  $\hat{f}(t)$  при  $a = 5, b = 1$ .





Рис. 32. График  $\hat{f}(t)$  при  $a = 5, b = 5$ .

1.4.4 Проверка равенства Парсеваля

Таблица 4. Равенство Парсеваля для функции Гаусса.

n	a	b	$\ f\ ^2 = \int_{-d}^d  f(t) ^2 dt$	$\ \hat{f}\ ^2 = \int_{-d}^d  \hat{f}(\omega) ^2 d\omega$
1	1	1	1.252	1.250
2	1	5	0.5599	0.5588
3	5	1	31.30	31.24
4	5	5	13.99	13.97

Равенство Парсеваля выполнено с высокой степенью точности.

### 1.4.5 Анализ результатов

Параметр  $b$  влияет на ширину области всплеска графика исходной функции: при  $b = 1$  ширина больше, чем при  $b = 5$ . Параметр  $a$  в точности соответствует значению максимума исходной функции.

В случае с Фурье-образом параметр  $b$  также влияет на ширину всплеска, но при  $b = 1$  ширина меньше, чем при  $b = 5$ . Параметры  $a$  и  $b$  вместе влияют на максимум графика Фурье-образа.

Принцип неопределенности Гейзенберга о том, что невозможно одновременно точно определить координату и импульс электрона в атоме, здесь заключается в том, графикам исходной функции с наименьшей шириной всплеска соответствуют Фурье-образы с наибольшей шириной всплеска.

## 1.5 Двустороннее затухание

$$f(t) = ae^{-b|t|} \quad (14)$$

### 1.5.1 Аналитическое выражение Фурье-образа

$$\begin{aligned} \hat{f}(\omega) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} ae^{-b|t|} e^{-i\omega t} dt = \frac{a}{\sqrt{2\pi}} \left( \int_{-\infty}^0 e^{bt} e^{-i\omega t} dt + \int_0^{\infty} e^{-bt} e^{-i\omega t} dt \right) = \\ &= \frac{a}{\sqrt{2\pi}} \left( \int_{-\infty}^0 e^{(b-i\omega)t} dt + \int_0^{\infty} e^{-(b+i\omega)t} dt \right) = \frac{a}{\sqrt{2\pi}} \left( \left. \frac{e^{(b-i\omega)t}}{b-i\omega} \right|_{-\infty}^0 + \left. \frac{e^{-(b+i\omega)t}}{-(b+i\omega)} \right|_0^{\infty} \right) = \\ &= \frac{a}{\sqrt{2\pi}} \left( \frac{1}{b-i\omega} + \frac{1}{b+i\omega} \right) = \frac{a}{\sqrt{2\pi}} \frac{b+i\omega+b-i\omega}{b^2+\omega^2} = \frac{2ab}{\sqrt{2\pi}(b^2+\omega^2)} \quad (15) \end{aligned}$$

### 1.5.2 Построение графиков функции $f(t)$

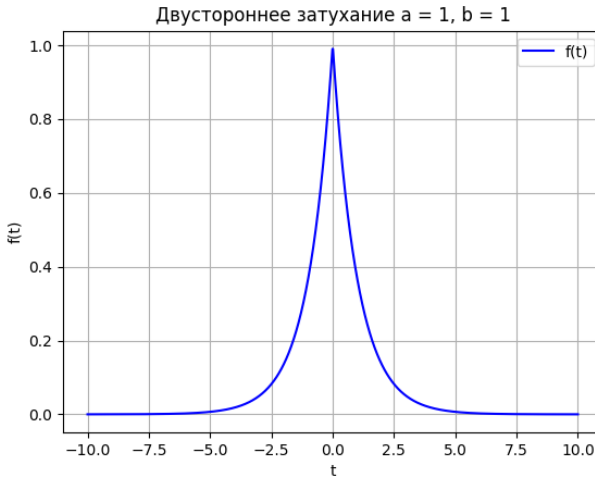


Рис. 33. График  $f(t)$  при  $a = 1, b = 1$ .

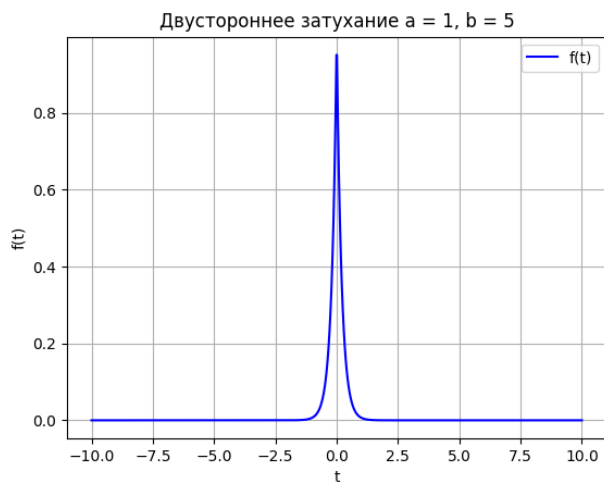


Рис. 34. График  $f(t)$  при  $a = 1, b = 5$ .

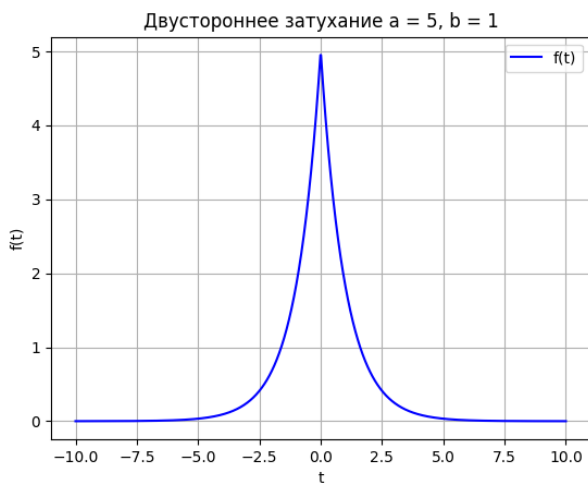


Рис. 35. График  $f(t)$  при  $a = 5, b = 1$ .

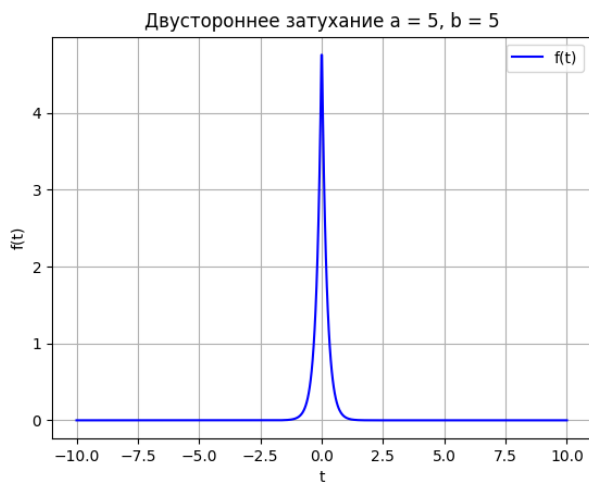


Рис. 36. График  $f(t)$  при  $a = 5, b = 5$ .

### 1.5.3 Построение графиков Фурье-образа $\hat{f}(\omega)$

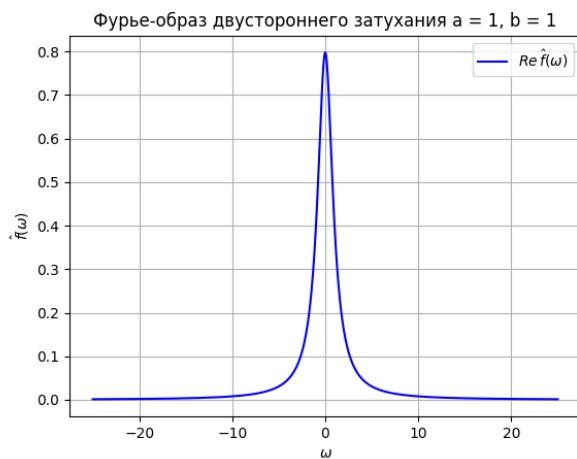


Рис. 37. График  $\hat{f}(t)$  при  $a = 1, b = 1$ .

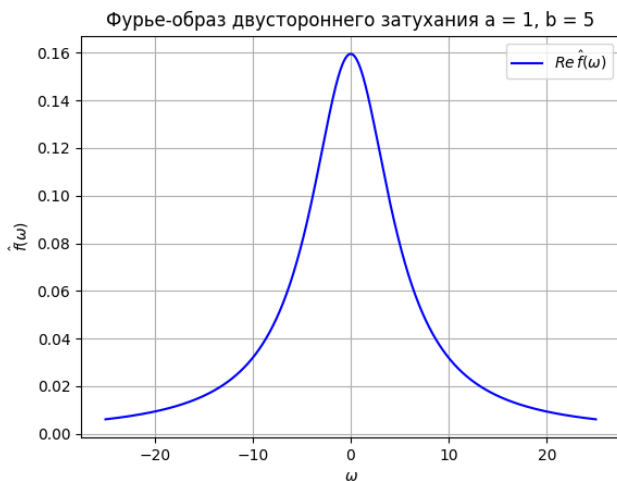


Рис. 38. График  $\hat{f}(t)$  при  $a = 1, b = 5$ .

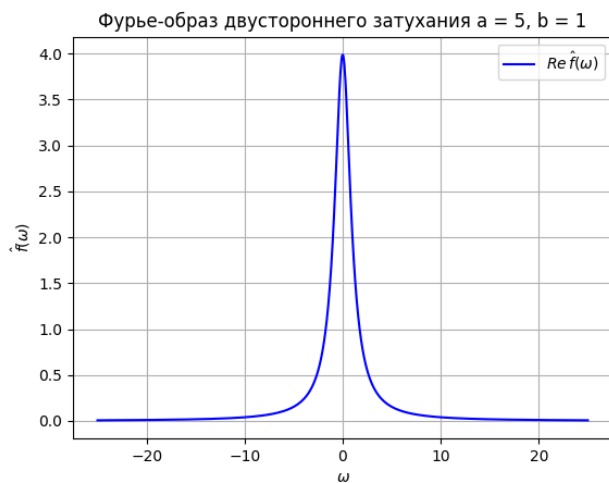


Рис. 39. График  $\hat{f}(t)$  при  $a = 5, b = 1$ .

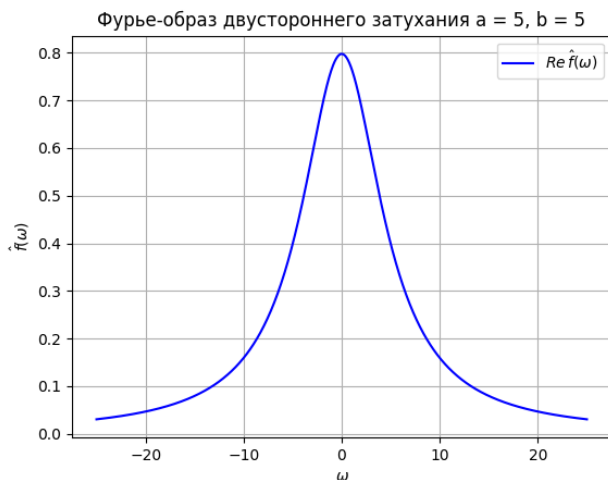


Рис. 40. График  $\hat{f}(t)$  при  $a = 5, b = 5$ .

#### 1.5.4 Проверка равенства Парсеваля

Таблица 5. Равенство Парсеваля для двустороннего затухания.

n	a	b	$\ f\ ^2 = \int_{-d}^d  f(t) ^2 dt$	$\ \hat{f}\ ^2 = \int_{-d}^d  \hat{f}(\omega) ^2 d\omega$
1	1	1	0.9924	0.9966
2	1	5	0.1700	0.1977
3	5	1	24.81	24.92
4	5	5	4.249	4.943

Как и в предыдущих случаях, значения норм оказались достаточно близки для того, чтобы считать равенство Парсеваля выполненным для всех рассматриваемых наборов значений параметров  $(a, b)$ .

### 1.5.5 Анализ результатов

Параметр  $b$  отвечает за ширину всплеска у графика исходной функции: при  $b = 1$  ширина больше, чем при  $b = 5$ . При  $b = 1$  параметр  $a$  в точности соответствует максимуму функции, в остальных случаях высота функции так же зависит от параметров  $a$  и  $b$ .

Для визуализации был написан код на языке *Python*.  
Код расположен на **GitHub**.