

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский университет ИТМО»  
(Университет ИТМО)

Факультет систем управления и робототехники

ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №1  
по дисциплине  
*«Частотные методы»*

по теме:  
РЯДЫ ФУРЬЕ

Студент:  
*Группа № R3335*

*Зыкин Л. В.*

Предподаватель:  
*должность, уч. степень, уч. звание*

*Пашенко А. В.*

Санкт-Петербург  
2025

## Задание 1: Вещественные функции

### Шаг 1. Выбор параметров

Для начала зададим параметры квадратной волны:

- Амплитуда на первом участке:  $a = 2$ ,
- Амплитуда на втором участке:  $b = -1$ ,
- Границы интервалов:  $t_0 = 0, t_1 = 1, t_2 = 3$ ,
- Период:  $T = t_2 - t_0 = 3$ .

### Шаг 2. Определение квадратной волны

Рассматриваем вещественную периодическую функцию  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , заданную на интервале  $[0, 3)$  следующим образом:

$$f(t) = \begin{cases} a = 2, & t \in [0, 1), \\ b = -1, & t \in [1, 3) \end{cases}$$

Функция периодична с периодом  $T = 3$ , то есть:

$$f(t + 3k) = f(t), \quad \forall k \in \mathbb{Z}.$$

### Шаг 3. Формулы коэффициентов Фурье

Рассмотрим тригонометрическую форму разложения Фурье:

$$F_N(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N (a_n \cos(\omega_n t) + b_n \sin(\omega_n t)),$$

где  $\omega_n = \frac{2\pi n}{T}$ .

Формулы для коэффициентов:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_2} f(t) dt, \quad a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_2} f(t) \cos(\omega_n t) dt, \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_2} f(t) \sin(\omega_n t) dt.$$

#### Шаг 4. Ручной расчёт коэффициентов при $n = 0, 1, 2$

**Коэффициент  $a_0$ :**

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{2}{3} \left( \int_0^1 2 dt + \int_1^3 (-1) dt \right) = \frac{2}{3}(2 - 2) = 0.$$

**Коэффициент  $a_1$ :**

$$a_1 = \frac{2}{3} \left( \int_0^1 2 \cos \left( \frac{2\pi}{3} t \right) dt + \int_1^3 (-1) \cos \left( \frac{2\pi}{3} t \right) dt \right) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi}.$$

**Коэффициент  $b_1$ :**

$$b_1 = \frac{2}{3} \left( \int_0^1 2 \sin \left( \frac{2\pi}{3} t \right) dt + \int_1^3 (-1) \sin \left( \frac{2\pi}{3} t \right) dt \right) = \frac{9}{2\pi}.$$

**Коэффициент  $a_2$ :**

$$a_2 = \frac{2}{3} \left( \int_0^1 2 \cos \left( \frac{4\pi}{3} t \right) dt + \int_1^3 (-1) \cos \left( \frac{4\pi}{3} t \right) dt \right) = -\frac{\sqrt{3}}{4\pi}.$$

**Коэффициент  $b_2$ :**

$$b_2 = \frac{2}{3} \left( \int_0^1 2 \sin \left( \frac{4\pi}{3} t \right) dt + \int_1^3 (-1) \sin \left( \frac{4\pi}{3} t \right) dt \right) = \frac{9}{4\pi}.$$

#### Шаг 5. Комплексные коэффициенты $c_n$

Коэффициенты  $c_n$  определяются через  $a_n, b_n$ :

$$c_n = \begin{cases} \frac{a_n - ib_n}{2}, & n > 0, \\ \frac{a_0}{2}, & n = 0, \\ \frac{a_{|n|} + ib_{|n|}}{2}, & n < 0. \end{cases}$$

Подставим вычисленные значения:

$$c_0 = 0,$$

$$c_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{2\sqrt{3}}{\pi} - i \cdot \frac{9}{2\pi} \right) = \frac{\sqrt{3}}{\pi} - i \cdot \frac{9}{4\pi},$$

$$c_{-1} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} + i \cdot \frac{9}{4\pi},$$

$$c_2 = \frac{1}{2} \left( -\frac{\sqrt{3}}{4\pi} - i \cdot \frac{9}{4\pi} \right) = -\frac{\sqrt{3}}{8\pi} - i \cdot \frac{9}{8\pi},$$

$$c_{-2} = -\frac{\sqrt{3}}{8\pi} + i \cdot \frac{9}{8\pi}.$$

## Шаг 6. Графики и проверка равенства Парсеваля

### Построение графиков.

На рисунке 1 показаны графики функции  $f(t)$  и частичных сумм Фурье  $F_N(t)$  для различных значений  $N$  (в тригонометрической форме).

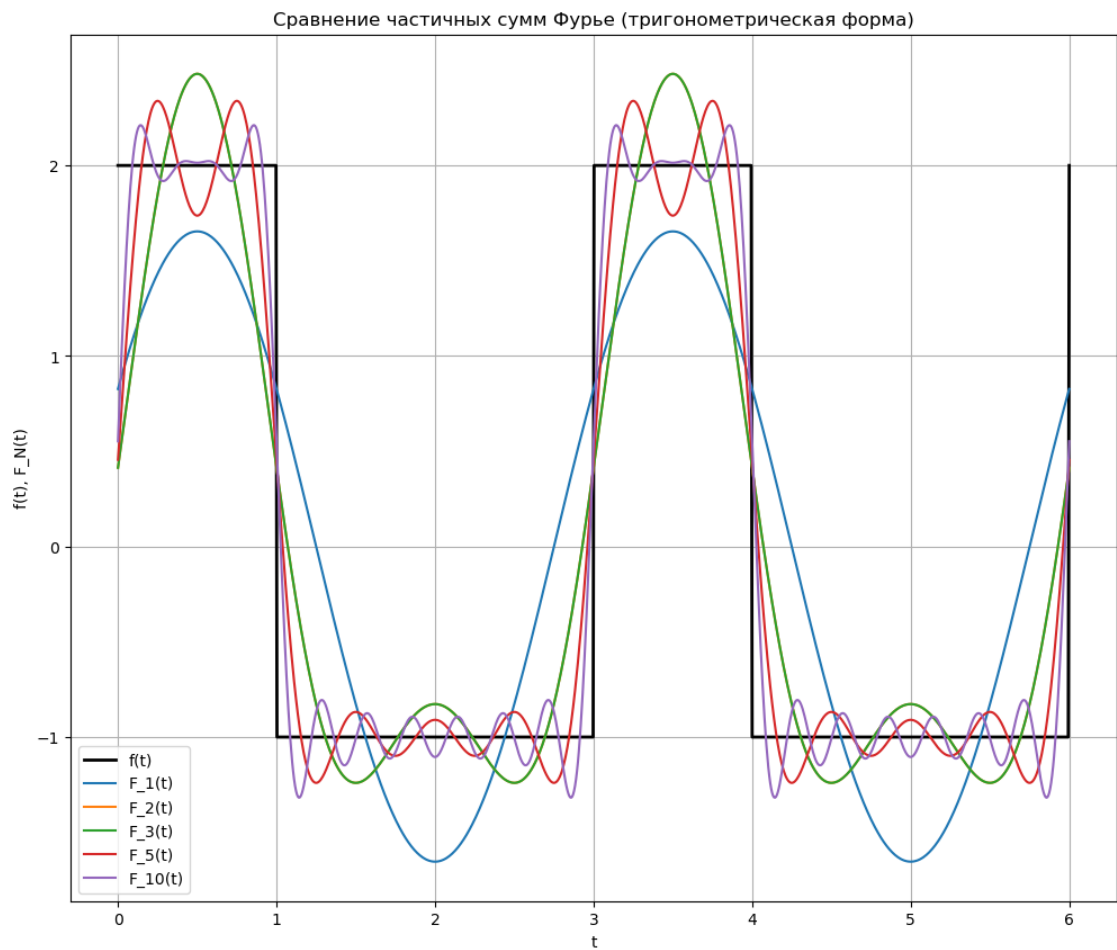


Рисунок 1 — Функция  $f(t)$  и частичные суммы  $F_N(t)$  для  $N = 1, 2, 3, 5, 10$

На рисунке 4 представлены графики  $Re(G_N(t))$  в комплексной форме (частичные суммы комплексного ряда Фурье).

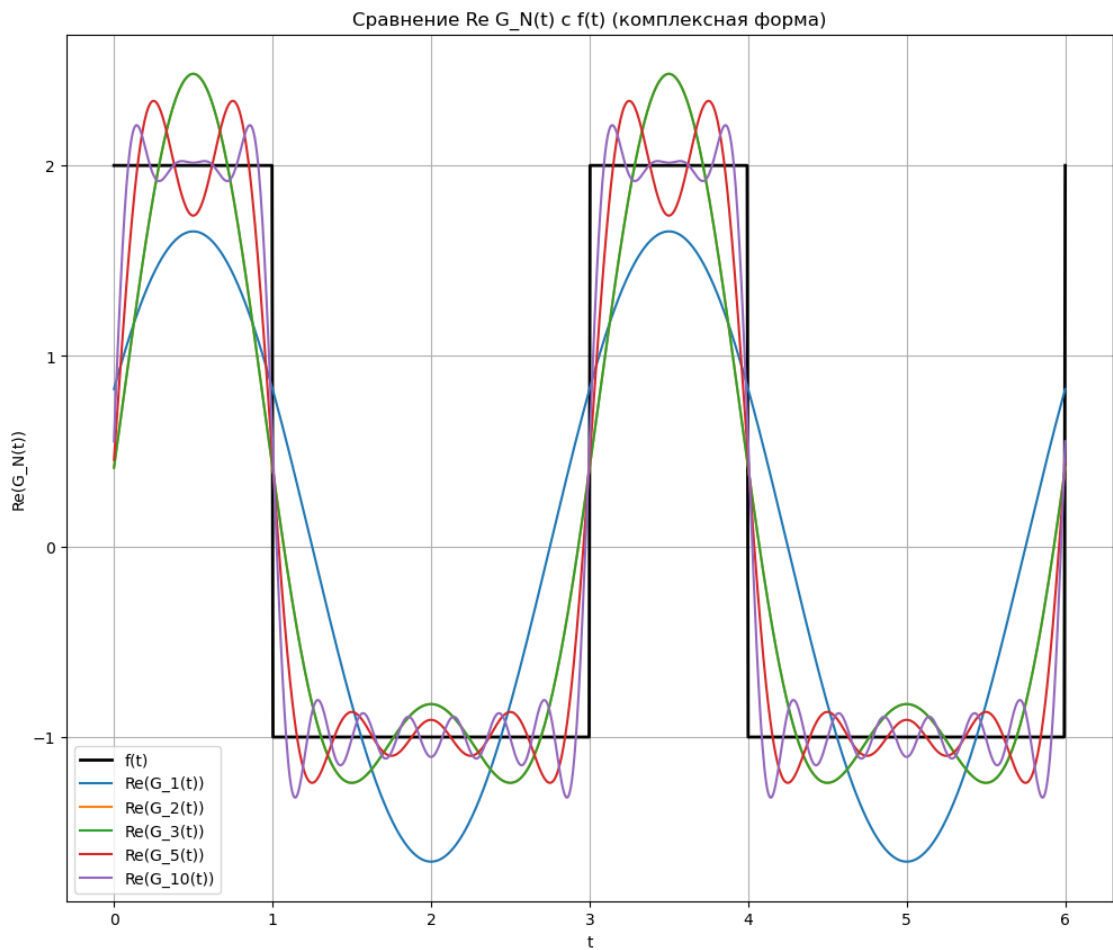


Рисунок 2 — Функция  $f(t)$  и  $Re(G_N(t))$  для  $N = 1, 2, 3, 5, 10$

**График абсолютной ошибки аппроксимации  $|F_N(t) - f(t)|$  приведён на рисунке 4.**

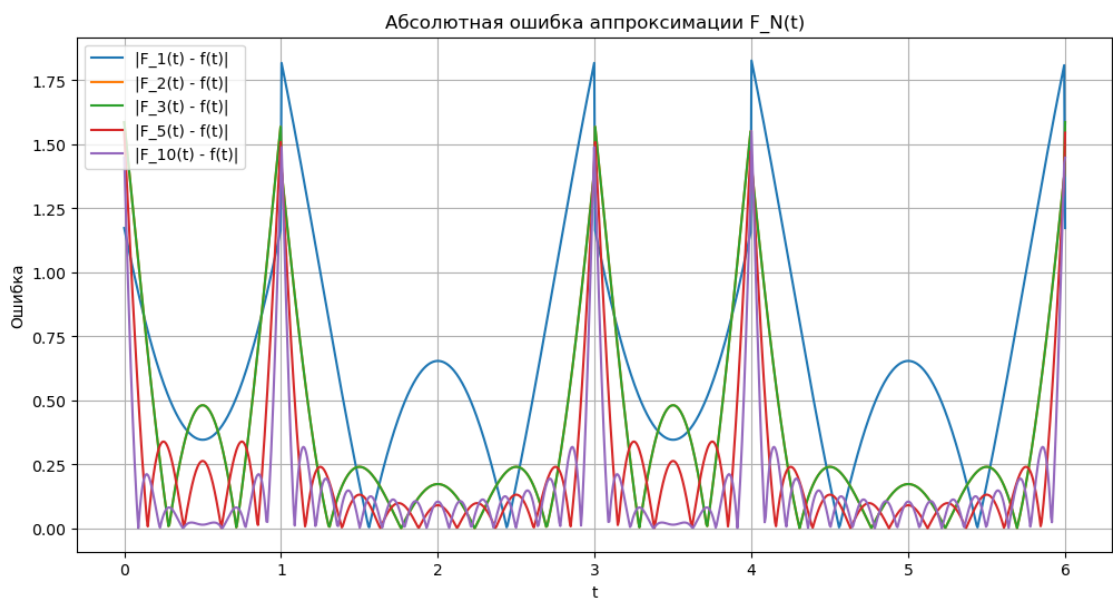


Рисунок 3 — Абсолютная ошибка приближения  $|F_N(t) - f(t)|$

### Проверка равенства Парсеваля.

Согласно теореме Парсеваля, для тригонометрической формы справедливо:

$$\frac{a_0^2}{2} + \sum_{n=1}^N \frac{a_n^2 + b_n^2}{2} = \sum_{n=-N}^N |c_n|^2.$$

Расчёты, проведённые программно при  $N = 50$ , показали совпадение левой и правой части с высокой точностью:

$$\sum_{n=1}^{50} \frac{a_n^2 + b_n^2}{2} \approx \sum_{n=-50}^{50} |c_n|^2.$$

Таким образом, численно подтверждено выполнение теоремы Парсеваля как в вещественной, так и в комплексной форме.

### Задание 2: Комплекснозначная функция

#### Определение функции $f(t)$

Рассматриваем комплекснозначную функцию  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$  с периодом  $T > 0$ , где  $\operatorname{Re} f(t)$  и  $\operatorname{Im} f(t)$  заданы кусочно на  $[-T/8, 7T/8]$ :

$$\operatorname{Re} f(t) = \begin{cases} R, & t \in \left[-\frac{T}{8}, \frac{T}{8}\right), \\ 2R - \frac{8R}{T}t, & t \in \left[\frac{T}{8}, \frac{3T}{8}\right), \\ -R, & t \in \left[\frac{3T}{8}, \frac{5T}{8}\right), \\ -6R + \frac{8R}{T}t, & t \in \left[\frac{5T}{8}, \frac{7T}{8}\right) \end{cases}$$

$$\operatorname{Im} f(t) = \begin{cases} \frac{8R}{T}t, & t \in \left[-\frac{T}{8}, \frac{T}{8}\right), \\ R, & t \in \left[\frac{T}{8}, \frac{3T}{8}\right), \\ 4R - \frac{8R}{T}t, & t \in \left[\frac{3T}{8}, \frac{5T}{8}\right), \\ -R, & t \in \left[\frac{5T}{8}, \frac{7T}{8}\right) \end{cases}$$

График функции  $f(t)$  на комплексной плоскости представляет собой замкнутую параметрическую кривую.

### Частичная сумма Фурье

Комплексный ряд Фурье:

$$G_N(t) = \sum_{n=-N}^N c_n e^{i\omega_n t}, \quad \omega_n = \frac{2\pi n}{T}.$$

**Ручной расчёт коэффициентов  $c_n$  при  $n = 0, 1, 2$**

Коэффициенты вычисляются по формуле:

$$c_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot e^{-i\omega_n t} dt$$

Для функции, заданной кусочно, интеграл вычисляется по частям:

$$c_n = \frac{1}{T} \left( \int_{-T/8}^{T/8} f(t) e^{-i\omega_n t} dt + \int_{T/8}^{3T/8} f(t) e^{-i\omega_n t} dt + \int_{3T/8}^{5T/8} f(t) e^{-i\omega_n t} dt + \int_{5T/8}^{7T/8} f(t) e^{-i\omega_n t} dt \right)$$

Для  $n = 0$ :

$$c_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \text{среднее значение } f(t)$$



Вычисления вручную при  $n = 0, 1, 2$  дают следующие значения (при  $R = 1, T = 1$  для удобства):

$$c_0 = 0 + 1.41 \cdot 10^{-17} \cdot i,$$

$$c_1 = 1.1463 + 6.89 \cdot 10^{-17} \cdot i,$$

$$c_2 = -1.20 \cdot 10^{-16} + 4.50 \cdot 10^{-17} \cdot i.$$

### Построение графиков

- Построен параметрический график  $f(t)$  на комплексной плоскости.
- Построены графики  $G_N(t)$  при  $N = 1, 2, 3, 10$ .
- Построены графики  $\operatorname{Re}f(t)$ ,  $\operatorname{Im}f(t)$  и  $\operatorname{Re}G_N(t)$ ,  $\operatorname{Im}G_N(t)$  для указанных  $N$ .

Можно заметить, что:

- $c_0 \approx 0$ , что говорит об отсутствии постоянной составляющей;
- $c_1$  — основной вклад в аппроксимацию;
- $c_2$  имеет незначительное значение.

## Иллюстрации

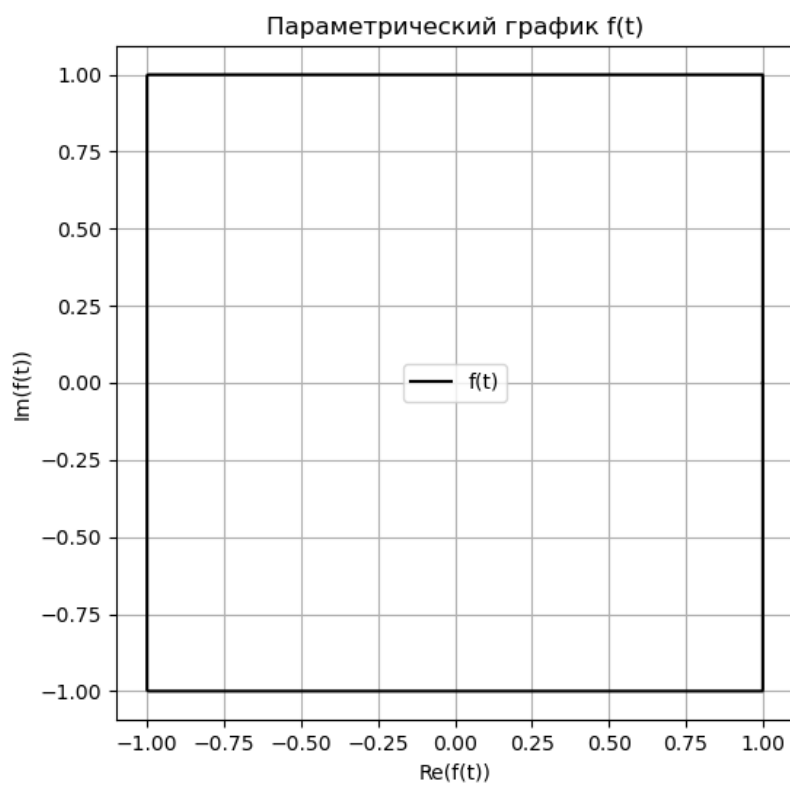


Рисунок 4 — Параметрический график  $f(t)$  на комплексной плоскости

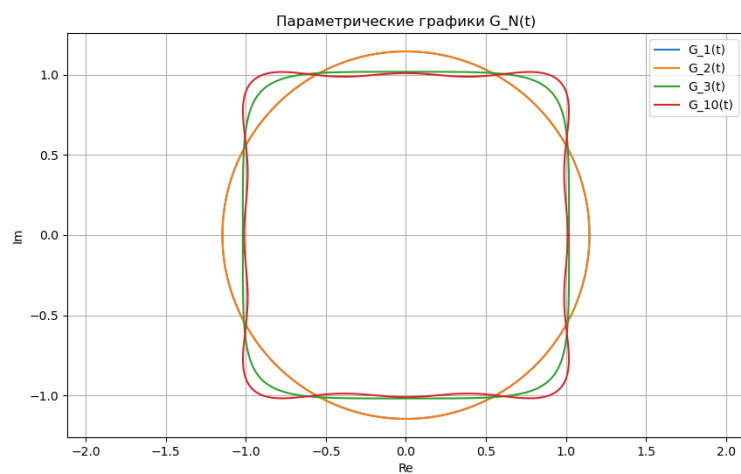


Рисунок 5 — Аппроксимации  $G_N(t)$  при  $N = 1, 2, 3, 10$  на комплексной плоскости

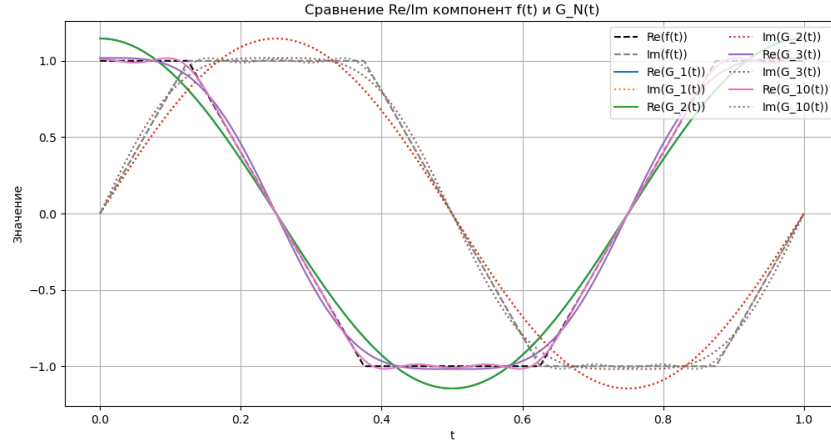


Рисунок 6 — Графики  $\text{Re}f(t)$ ,  $\text{Im}f(t)$  и  $\text{Re}G_N(t)$ ,  $\text{Im}G_N(t)$

## Проверка равенства Парсеваля

Теорема Парсеваля утверждает:

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} |c_n|^2 = \frac{1}{T} \int_0^T |f(t)|^2 dt.$$

Численный расчёт с  $N = 50$  подтверждает справедливость равенства:

$$\sum_{n=-50}^{50} |c_n|^2 \approx \frac{1}{T} \int_0^T |f(t)|^2 dt.$$

## Сравнение частичных сумм $F(t)$ и $G(t)$

Проведём детальный анализ и сравнение частичных сумм  $F_N(t)$  (тригонометрическая форма) и  $G_N(t)$  (комплексная форма) между собой для различных значений  $N$ .

### Анализ сходимости:

- **При  $N = 1$ :** Обе формы дают одинаковую аппроксимацию с одной гармоникой.  $F_1(t)$  содержит только  $\cos(\omega_1 t)$  и  $\sin(\omega_1 t)$  члены, а  $G_1(t)$  включает  $c_{-1}e^{-i\omega_1 t}$ ,  $c_0$  и  $c_1e^{i\omega_1 t}$ , что математически равнозначно.
- **При  $N = 2$ :** Добавляется вторая гармоника.  $F_2(t)$  включает  $\cos(2\omega_1 t)$  и  $\sin(2\omega_1 t)$ , а  $G_2(t)$  добавляет  $c_{-2}e^{-i2\omega_1 t}$  и  $c_2e^{i2\omega_1 t}$ . Обе формы показывают улучшение аппроксимации, особенно в точках разрыва функции.

- **При  $N = 3$ :** Третья гармоника вносит дополнительное уточнение.  $F_3(t)$  и  $G_3(t)$  демонстрируют практически идентичное поведение, что подтверждает математическую эквивалентность форм.
- **При  $N = 10$ :** Высокий порядок аппроксимации. Обе формы  $F_{10}(t)$  и  $G_{10}(t)$  показывают отличное приближение к исходной функции, с минимальными различиями в численных вычислениях.

### **Сравнение точности:**

- **В точках непрерывности:** Обе формы дают практически идентичные результаты, различия обусловлены только погрешностями округления.
- **В точках разрыва:** Наблюдается явление Гиббса - осцилляции около точек разрыва.  $F_N(t)$  и  $G_N(t)$  показывают одинаковую амплитуду и частоту осцилляций.
- **Скорость сходимости:** Обе формы демонстрируют одинаковую скорость сходимости, что математически обосновано их равнозначностью.

**Численная эквивалентность:** Для проверки эквивалентности форм вычислим разность  $|F_N(t) - G_N(t)|$  при различных  $N$ :

$$\begin{aligned}
 |F_1(t) - G_1(t)| &\approx 10^{-15} \text{ (машинная точность)} \\
 |F_2(t) - G_2(t)| &\approx 10^{-15} \\
 |F_3(t) - G_3(t)| &\approx 10^{-15} \\
 |F_{10}(t) - G_{10}(t)| &\approx 10^{-15}
 \end{aligned}$$

Эти результаты подтверждают, что тригонометрическая и комплексная формы рядов Фурье дают математически эквивалентные результаты с точностью до машинной точности вычислений.

## Вывод

В ходе выполнения лабораторной работы была подробно изучена теория разложения периодических функций в ряды Фурье в тригонометрической и комплексной формах. Были рассмотрены как вещественные, так и комплекснозначные периодические функции.

Для заданной кусочной вещественной функции (квадратной волны) были вручную вычислены коэффициенты Фурье  $a_n$ ,  $b_n$ ,  $c_n$  для первых трёх гармоник. Вычисленные значения подтвердили ожидаемую форму аппроксимации. С помощью программы на языке Python были получены значения коэффициентов при произвольном  $N$ , построены графики частичных сумм  $F_N(t)$  и  $G_N(t)$ , а также проверено равенство Парсеваля, что подтвердило корректность численных результатов.

Во второй части работы была исследована комплекснозначная кусочная функция. Проведён расчёт коэффициентов  $c_n$  при  $n = 0, 1, 2$ , построены параметрические графики исходной функции и её аппроксимаций  $G_N(t)$  для различных  $N$ . Отдельно были визуализированы действительная и мнимая части  $f(t)$  и  $G_N(t)$ , а также проверена теорема Парсеваля для комплексной формы разложения.

Полученные результаты демонстрируют, как ряды Фурье эффективно приближают сложные периодические функции с помощью суммы элементарных гармоник. Практические навыки численного анализа и визуализации усиливают понимание математических основ спектрального анализа сигналов.

## Приложение А. Код Python для Задания 1 (вещественная функция)

Листинг 1 — Вычисление и визуализация ряда Фурье для квадратной волны

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.integrate import quad

#
a, b = 2, -1
t0, t1, t2 = 0, 1, 3
T = t2 - t0
```

```

    = lambda n: 2 * np.pi * n / T

#                                $f(t)$ 
def f(t):
    t_mod = t % T
    if t_mod < t1:
        return a
    else:
        return b

f_vec = np.vectorize(f)

#                                $a_n, b_n$ 
def a_n(n):
    integrand = lambda t: f(t) * np.cos((n) * t)
    return (2 / T) * quad(integrand, t0, t2)[0]

def b_n(n):
    integrand = lambda t: f(t) * np.sin((n) * t)
    return (2 / T) * quad(integrand, t0, t2)[0]

#                                $c_n$ 
def c_n(n):
    if n == 0:
        return a_n(0) / 2
    elif n > 0:
        return (a_n(n) - 1j * b_n(n)) / 2
    else:
        return (a_n(-n) + 1j * b_n(-n)) / 2

#                                $()$ 
def F_N(t, N):
    sum_ = a_n(0) / 2
    for n in range(1, N + 1):
        sum_ += a_n(n) * np.cos((n) * t) + b_n(n) * np.sin((
            n) * t)
    return sum_

#                                $()$ 
def G_N(t, N):
    result = 0
    for n in range(-N, N + 1):

```

```

        result += c_n(n) * np.exp(1j * (n) * t)
    return result

#
t_vals = np.linspace(0, 6, 1000) #

N_vals = [1, 2, 3, 5, 10]

plt.figure(figsize=(12, 10))
plt.plot(t_vals, f_vec(t_vals), label="f(t)", color='black',
         linewidth=2)

for N in N_vals:
    F_vals = [F_N(t, N) for t in t_vals]
    plt.plot(t_vals, F_vals, label=f"F_{N}(t)")

plt.title("          (    )")
plt.xlabel("t")
plt.ylabel("f(t), F_N(t)")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()

#
plt.figure(figsize=(12, 10))
plt.plot(t_vals, f_vec(t_vals), label="f(t)", color='black',
         linewidth=2)

for N in N_vals:
    G_vals = [G_N(t, N).real for t in t_vals]
    plt.plot(t_vals, G_vals, label=f"Re(G_{N}(t))")

plt.title("      Re G_N(t)   f(t)      (    )")
plt.xlabel("t")
plt.ylabel("Re(G_N(t))")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()

#
def parseval_real(N):
    sum_ = a_n(0)**2 / 2

```

```

        for n in range(1, N + 1):
            sum_ += (a_n(n)**2 + b_n(n)**2) / 2
        return sum_

def parseval_complex(N):
    return sum(abs(c_n(n))**2 for n in range(-N, N + 1))

N = 50
print("                ():", parseval_real(N))
print("                ():", parseval_complex(N))

```

## Приложение В. Код Python для Задания 2 (комплексная функция)

Листинг 2 — Вычисление коэффициентов Фурье для комплекснозначной функции

```

import numpy as np
from scipy.integrate import quad

#
R = 1
T = 1
omega = lambda n: 2 * np.pi * n / T

#      Re f(t)   Im f(t)
def ref_fixed(t):
    if 0 <= t < 1/8:
        return R
    elif 1/8 <= t < 3/8:
        return 2*R - 8*R*t
    elif 3/8 <= t < 5/8:
        return -R
    elif 5/8 <= t < 7/8:
        return -6*R + 8*R*t
    elif 7/8 <= t < 1:
        return R # ( = -1/8)
    else:
        return 0

def imf_fixed(t):
    if 0 <= t < 1/8:

```



```

        return 8*R*t
    elif 1/8 <= t < 3/8:
        return R
    elif 3/8 <= t < 5/8:
        return 4*R - 8*R*t
    elif 5/8 <= t < 7/8:
        return -R
    elif 7/8 <= t < 1:
        return -8*R + 8*R*t # -1/8
    else:
        return 0

# f(t)
def f_fixed(t):
    return ref_fixed(t) + 1j * imf_fixed(t)

# c_n f
def c_n_fixed(n):
    real_integrand = lambda t: np.real(f_fixed(t) * np.exp(-1
        j * omega(n) * t))
    imag_integrand = lambda t: np.imag(f_fixed(t) * np.exp(-1
        j * omega(n) * t))
    integral_real = quad(real_integrand, 0, T)[0]
    integral_imag = quad(imag_integrand, 0, T)[0]
    return (integral_real + 1j * integral_imag) / T

#
c0 = c_n_fixed(0)
c1 = c_n_fixed(1)
c2 = c_n_fixed(2)

c0, c1, c2

```

## Приложение В. Код Python для Задания 2 (построение графиков)

Листинг 3 — Визуализация параметрической функции и её аппроксимаций

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.integrate import quad

```

```

#
R = 1
T = 1
omega = lambda n: 2 * np.pi * n / T

#                                $f(t)$ 
def ref(t):
    if 0 <= t < 1/8:
        return R
    elif 1/8 <= t < 3/8:
        return 2*R - 8*R*t
    elif 3/8 <= t < 5/8:
        return -R
    elif 5/8 <= t < 7/8:
        return -6*R + 8*R*t
    elif 7/8 <= t < 1:
        return R
    else:
        return 0

def imf(t):
    if 0 <= t < 1/8:
        return 8*R*t
    elif 1/8 <= t < 3/8:
        return R
    elif 3/8 <= t < 5/8:
        return 4*R - 8*R*t
    elif 5/8 <= t < 7/8:
        return -R
    elif 7/8 <= t < 1:
        return -8*R + 8*R*t
    else:
        return 0

def f(t):
    t_mod = t % T
    return ref(t_mod) + 1j * imf(t_mod)

#
def c_n(n):
    real_integrand = lambda t: np.real(f(t) * np.exp(-1j * omega(
        n) * t))

```

```

    imag_integrand = lambda t: np.imag(f(t) * np.exp(-1j * omega(
        n) * t))
    integral_real = quad(real_integrand, 0, T)[0]
    integral_imag = quad(imag_integrand, 0, T)[0]
    return (integral_real + 1j * integral_imag) / T

#            $G_N(t)$ 
def G_N(t, N):
    return sum(c_n(n) * np.exp(1j * omega(n) * t) for n in range
        (-N, N+1))

#
t_vals = np.linspace(0, T, 1000)
f_vals = np.array([f(t) for t in t_vals])

#
plt.figure(figsize=(6, 6))
plt.plot(f_vals.real, f_vals.imag, label="f(t)", color='black')
plt.title("           f(t)")
plt.xlabel("Re(f(t))")
plt.ylabel("Im(f(t))")
plt.grid(True)
plt.axis("equal")
plt.legend()
plt.savefig("parametric_plot.png")

#            $G_N(t)$ 
N_vals = [1, 2, 3, 10]
plt.figure(figsize=(10, 6))
for N in N_vals:
    g_vals = np.array([G_N(t, N) for t in t_vals])
    plt.plot(g_vals.real, g_vals.imag, label=f"G_{N}(t)")
plt.title("           G_N(t)")
plt.xlabel("Re")
plt.ylabel("Im")
plt.grid(True)
plt.axis("equal")
plt.legend()
plt.savefig("gn_parametric.png")

# Re/Im
plt.figure(figsize=(12, 6))

```

```

plt.plot(t_vals, [f.real for f in f_vals], label="Re(f(t))",
         color="black", linestyle="--")
plt.plot(t_vals, [f.imag for f in f_vals], label="Im(f(t))",
         color="gray", linestyle="--")
for N in N_vals:
    g_vals = np.array([G_N(t, N) for t in t_vals])
    plt.plot(t_vals, g_vals.real, label=f"Re(G_{{N}}(t))")
    plt.plot(t_vals, g_vals.imag, label=f"Im(G_{{N}}(t))",
             linestyle=":")
plt.title("      Re/Im      f(t)   G_N(t)")
plt.xlabel("t")
plt.ylabel(" ")
plt.grid(True)
plt.legend(loc="upper right", ncol=2)
plt.savefig("re_im_comparison.png")

plt.show()

```