

ФГАОУ ВО «НИУ ИТМО»  
ФАКУЛЬТЕТ ПРОГРАММНОЙ ИНЖЕНЕРИИ  
И КОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕХНИКИ

## Расчётная работа

(по дисциплине «Теория функций комплексного переменного»)

**Выполнил:**

Лабин Макар Андреевич,  
ТФКП 22.4, Р3231, 466449.

**Проверил:**

Поздняков Семён Сергеевич

**ИТМО**

г. Санкт-Петербург, Россия  
2025

# 1 Список заданий

В рамках выполнения расчётной работы по варианту №15 необходимо предоставить решения следующих заданий:

1. Изобразить на комплексной плоскости множество  $\mathcal{D}$ :

$$\mathcal{D} = \{z: |z - 3 + 2i| \leq 2, 0 < \Re(iz) \leq 1\}$$

2. Найти все значения функции в указанной точке:

$$e^{e^i}$$

3. Найти аналитическую функцию по известной её действительной части:

$$u(x, y) = \operatorname{sh}(2x) \cos(2y) + x^2 - y^2 + 4y - 4$$

4. Вычислить интеграл по заданной кривой в указанном направлении:

$$\int_C \Im z dz, \quad C: |z - 1| = 1, \Im z \geq 0, z_0 = 2$$

5. Разложить функцию  $f(z)$  в ряд Тейлора в окрестности точки  $z_0$  и указать область, в которой ряд представляет данную функцию:

$$f(z) = z^2 e^z, \quad z_0 = 1$$

6. Разложить функцию  $f(z)$  в ряд Лорана в указанной области:

$$f(z) = \frac{3}{z^2 - 7z + 10}, \quad 2 < |z| < 5$$

7. Вычислить интеграл при помощи вычетов:

$$\int_L z^3 \cos\left(\frac{2i}{z}\right) dz, \quad L = \{z: |z| = \sqrt{2}\}$$

8. Вычислить несобственный интеграл:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x \cos(ax)}{x^2 + 4x + 8} dx, \quad a > 0$$

## 2 Решения заданий

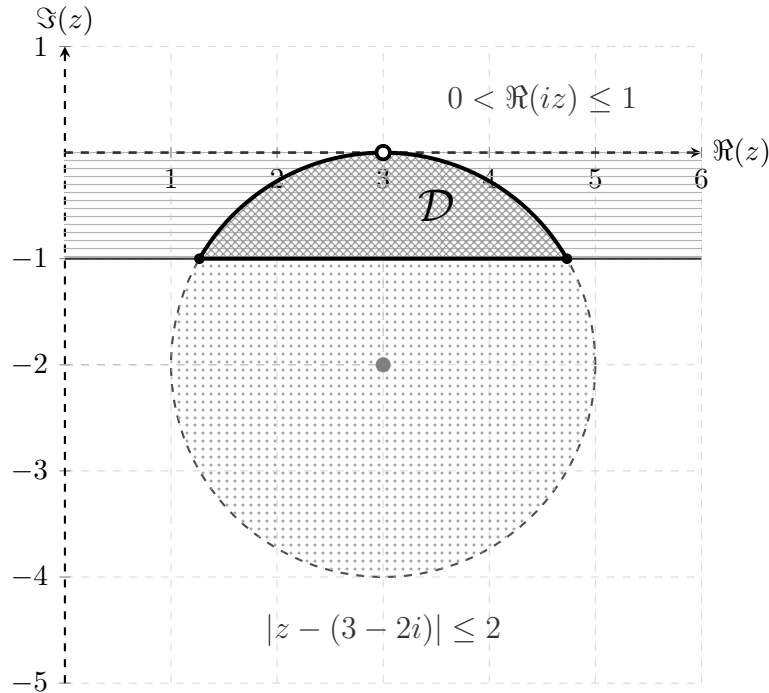
**Задание 1.** Изобразить на комплексной плоскости множество  $\mathcal{D}$ :

$$\mathcal{D} = \{z: |z - 3 + 2i| \leq 2, 0 < \Re(iz) \leq 1\}$$

**Решение.** Пусть  $z = x + iy$ . Тогда второе условие можно переписать в виде:

$$0 < \Re(iz) \leq 1 \implies 0 < \Re(ix - y) \leq 1 \implies 0 > y \geq -1$$

Итого:



**Задание 2.** Найти все значения функции в указанной точке:

$$e^{e^i}$$

**Решение.** Пусть  $\omega(z) = e^{e^z}$ ,  $z = x + iy$ . Преобразуем  $\omega(z)$ :

$$\begin{aligned} \omega(z) = e^{e^z} &= e^{e^{x+iy}} = e^{e^x e^{iy}} = e^{e^x (\cos y + i \sin y)} = e^{e^x \cos y} e^{e^x i \sin y} = \\ &= e^{e^x \cos y} (\cos(e^x \sin y) + i \sin(e^x \sin y)) \end{aligned}$$

Значение функции  $\omega(z)$  в точке  $z_0 = i$ :

$$\omega(i) = e^{e^0 \cos 1} (\cos(e^0 \sin 1) + i \sin(e^0 \sin 1)) = e^{\cos 1} (\cos(\sin 1) + i \sin(\sin 1))$$

Итого:

$$e^{e^i} = e^{\cos 1} (\cos(\sin 1) + i \sin(\sin 1))$$

**Задание 3.** Найти аналитическую функцию по известной её действительной части:

$$u(x, y) = \operatorname{sh}(2x) \cos(2y) + x^2 - y^2 + 4y - 4$$

**Решение.** Пусть  $x = x + iy$ ,  $f(z) = u(x, y) + iv(x, y)$ .

Зная об аналитичности  $f(z)$ , воспользуемся первым уравнением из условия Коши-Римана:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (\operatorname{sh}(2x) \cos(2y) + x^2 - y^2 + 4y - 4) &= \frac{\partial v}{\partial y}(x, y) \implies \\ \implies \frac{\cos(2y)}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (e^{2x} - e^{-2x}) + 2x &= \frac{\partial v}{\partial y}(x, y) \implies \frac{\partial v}{\partial y}(x, y) = (e^{2x} + e^{-2x}) \cos(2y) + 2x \implies \\ \implies v(x, y) &= (e^{2x} + e^{-2x}) \int \cos(2y) dy + 2x \int dy = \operatorname{ch}(2x) \sin(2y) + 2xy + C(x) \end{aligned}$$

Воспользуемся вторым уравнением из условия Коши-Римана:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} (\operatorname{sh}(2x) \cos(2y) + x^2 - y^2 + 4y - 4) &= -\frac{\partial}{\partial x} (\operatorname{ch}(2x) \sin(2y) + 2xy + C(x)) \implies \\ \implies -2 \sin(2y) \operatorname{sh}(2x) - 2y + 4 &= -(2 \operatorname{sh}(2x) \sin(2y) + 2y + C'(x)) \implies \\ \implies C'(x) &= -4 \implies C(x) = -4x + C, \quad C \in \mathbb{R} \end{aligned}$$

Выразим функцию  $f(z)$  через  $z$ :

$$\begin{aligned} f(z) &= \operatorname{sh}(2x) \cos(2y) + x^2 - y^2 + 4y - 4 + i(\operatorname{ch}(2x) \sin(2y) + 2xy - 4x + C) = \\ &= -i \sin(i2x) \cos(2y) + i \cos(i2x) \sin(2y) + (x + iy)^2 - 4i(x + iy) - 4 + iC = \\ &= i(\sin(2y) \cos(i2x) - \cos(2y) \sin(i2x)) + z^2 - 4iz - 4 + iC = \\ &= i \sin(2y - i2x) + (z - 2i)^2 + iC = i \sin(-2i(x + iy)) + (z - 2i)^2 + iC = \\ &= \operatorname{sh}(2z) + (z - 2i)^2 + iC \end{aligned}$$

Итого:

$$\boxed{f(z) = \operatorname{sh}(2z) + (z - 2i)^2 + iC, \quad C \in \mathbb{R}}$$

**Задание 4.** Вычислить интеграл по заданной кривой в указанном направлении:

$$\int_C \Im z dz, \quad C: |z - 1| = 1, \quad \Im z \geq 0, \quad z_0 = 2$$

**Решение.** Параметризуем кривую  $C$ :

$$\gamma(t) = 1 + e^{it}, \quad t \in [0, \pi]$$

Вычислим интеграл вдоль пути  $\gamma$ :

$$\begin{aligned} \int_{\gamma} \Im \gamma(t) d\gamma &= \int_0^{\pi} \Im(1 + e^{it}) i e^{it} dt = i \int_0^{\pi} \sin t e^{it} dt = i \int_0^{\pi} \frac{e^{it} - e^{-it}}{2i} e^{it} dt = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^{\pi} (e^{2it} - 1) dt = \frac{1}{2} \left( \frac{e^{2it}}{2i} - t \right) \Big|_0^{\pi} = -\frac{\pi}{2} \end{aligned}$$

Итого:

$$\boxed{\int_C \Im z dz = -\frac{\pi}{2}}$$

**Задание 5.** Разложить функцию  $f(z)$  в ряд Тейлора в окрестности точки  $z_0$  и указать область, в которой ряд представляет данную функцию:

$$f(z) = z^2 e^z, \quad z_0 = 1$$

**Решение.** По определению ряда Тейлора в окрестности точки  $z_0 = 1$ :

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(1)}{n!} (z-1)^n$$

По формуле Лейбница:

$$\begin{aligned} f^{(n)} &= \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} (z^2)^{(k)} (e^z)^{(n-k)} = \left( \binom{n}{0} z^2 + \binom{n}{1} 2z + \binom{n}{2} 2 \right) \cdot e^z = \\ &= (z^2 + 2nz + n(n-1)) \cdot e^z \implies \\ \implies f^{(n)}(1) &= (1 + 2n + n^2 - n)e = e(n^2 + n + 1) \end{aligned}$$

Функция  $f(z)$  получена как произведение аналитических функций на  $\mathbb{C}$ , поэтому  $f(z)$  тоже аналитична на  $\mathbb{C}$ :

$$f(z) = e \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n^2 + n + 1}{n!} (z-1)^n, \quad z \in \mathbb{C}$$

**Задание 6.** Разложить функцию  $f(z)$  в ряд Лорана в указанной области:

$$f(z) = \frac{3}{z^2 - 7z + 10}, \quad 2 < |z| < 5$$

**Решение.** Найдём нули знаменателя:

$$\begin{cases} z^2 - 7z + 10 = 0 \\ D = 49 - 40 = 9 \end{cases} \implies \begin{cases} z = 2 \\ z = 5 \end{cases}$$

Разложим  $f(z)$  на простейшие дроби методом неопределённых коэффициентов:

$$\begin{aligned} \frac{A}{z-2} + \frac{B}{z-5} &= \frac{3}{(z-2)(z-5)} \implies A(z-5) + B(z-2) = 3 \implies \\ \implies \begin{cases} A + B = 0 \\ -5A - 2B = 3 \end{cases} &\implies \begin{cases} A = -B \\ 5B - 2B = 3 \end{cases} \implies \begin{cases} A = -1 \\ B = 1 \end{cases} \end{aligned}$$

Разложим функцию  $f(z)$  в ряд Лорана в области  $2 < |z| < 5$ :

$$\begin{aligned} f(z) &= \frac{1}{z-5} - \frac{1}{z-2} = -\frac{1}{5} \cdot \frac{1}{1-\frac{z}{5}} - \frac{1}{z} \cdot \frac{1}{1-\frac{2}{z}} = -\frac{1}{5} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{z}{5}\right)^n - \frac{1}{z} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{2}{z}\right)^n = \\ &= -\sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{5^{n+1}} - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2^n}{z^{n+1}} = -\sum_{n=-\infty}^{-1} \frac{z^n}{2^{n+1}} - \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{z^n}{5^{n+1}} \end{aligned}$$

Итого:

$$f(z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n z^n, \quad c_n = \begin{cases} -2^{-n-1}, & n \leq -1 \\ -5^{-n-1}, & n \geq 0 \end{cases}$$

**Задание 7.** Вычислить интеграл при помощи вычетов:

$$\int_L z^3 \cos\left(\frac{2i}{z}\right) dz, \quad L = \{z: |z| = \sqrt{2}\}$$

**Решение.** Выполним замену переменной интегрирования:

$$z = \frac{2i}{\omega} \implies \int_L z^3 \cos\left(\frac{2i}{z}\right) dz = \int_{\tilde{L}} \frac{(2i)^3}{\omega^3} \cos \omega \frac{-2i}{\omega^2} d\omega = -16 \int_{\tilde{L}} \frac{\cos \omega}{\omega^5} d\omega$$

Параметризуем контур  $L$  и определим новый контур  $\tilde{L}$ :

$$\gamma(t) = \sqrt{2}e^{it}, \quad t \in [0, 2\pi] \implies \tilde{\gamma}(t) = \frac{2i}{\sqrt{2}e^{it}} = \sqrt{2}ie^{-it} = \sqrt{2}e^{\frac{\pi}{2}-it}, \quad t \in [0, 2\pi]$$

Контур  $\tilde{L}$  получен из  $L$  поворотом на  $\frac{\pi}{2}$  и инверсией направления обхода.

Подынтегральная функция голоморфна на открытом множестве  $D \setminus \{0\}$  с внешней замкнутой границей  $\tilde{L}$ .

По первой теореме Коши о вычетах:

$$\int_{\tilde{L}} \frac{\cos \omega}{\omega^5} d\omega = -2\pi i \operatorname{Res}_{\omega=0} \frac{\cos \omega}{\omega^5} = -\frac{2\pi i}{4!} \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{d^4 \cos \omega}{d\omega^4} = -\frac{\pi i}{12} \lim_{\omega \rightarrow 0} \cos \omega = -\frac{\pi i}{12}$$

Итого:

$$\boxed{\int_L z^3 \cos\left(\frac{2i}{z}\right) dz = \frac{4\pi i}{3}}$$

**Задание 8.** Вычислить несобственный интеграл:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x \cos(ax)}{x^2 + 4x + 8} dx, \quad a > 0$$

**Решение.** ...