

Комплексный анализ, ФН-12, ИУ-9, 4-й семестр.

Ответы на вопросы к экзамену

Весна 2024

Содержание

1	Непрерывность и дифференцируемость функций комплексного переменного, их связь. Теорема Коши-Римана. Голоморфные функции.	3
2	Геометрический смысл комплексной производной. Конформные отображения, связь конформности и дифференцируемости, примеры.	6
3	Определить дробно-линейное отображение (ДЛО). Сформулировать и доказать конформность и групповое свойство ДЛО.	8
4	Дробно-линейные функции, их геометрическая интерпретация и свойство трёх точек.	11
5	Дробно-линейные функции, их геометрические свойства: круговое свойство и сохранение симметричности.	13
6	Стереографическая проекция. Расширенная комплексная плоскость и ее топология. Бесконечно удаленная точка, ее окрестности. Угол между кривыми в бесконечности. Дифференцируемость и конформность в бесконечности. Дробно-линейные функции как отображения расширенной комплексной плоскости.	16
7	Интеграл от функции комплексного переменного вдоль пути в \mathbb{C} . Его свойства.	19
8	Теорема Коши для односвязных и многосвязных областей	22
9	Интегральная формула Коши для функции и ее производных.	24
10	Степенные ряды в \mathbb{C} , их свойства. Голоморфность суммы степенного ряда.	27

1 Непрерывность и дифференцируемость функций комплексного переменного, их связь. Теорема Коши-Римана. Голomorphic функции.

ФКП $f : G \subset \overline{\mathbb{C}} \rightarrow \overline{\mathbb{C}}$ непрерывна в точке z_0 , если:

$$\lim_{z \rightarrow z_0} f(z) = f(z_0)$$

ФКП $f(z)$ \mathbb{C} -дифференцируема в точке $z_0 \Leftrightarrow$

1. f определена в окрестности точки z_0 ;
2. $f(z_0 + \Delta z) - f(z_0) = A\Delta z + \alpha(\Delta z)\Delta z$,

где $A \in \mathbb{C}$, $\alpha(\Delta z) \rightarrow 0$ при $\Delta z \rightarrow 0$

Предел $\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{f(z_0 + \Delta z) - f(z_0)}{\Delta z}$ называют производной ФКП $f(z)$ в точке z_0 и обозначают $f'(z_0)$.

Теорема (1-ый критерий \mathbb{C} -дифференцируемости):

ФКП $f(z)$ дифференцируема в точке z_0

\Leftrightarrow

\exists производная $f'(z_0)$ функции f в точке z_0 , при этом $f'(z_0) = A$.

Доказательство.

” \Rightarrow ”

$$\begin{aligned} f'(z_0) &= \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{f(z_0 + \Delta z) - f(z_0)}{\Delta z} = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{A\Delta z + \alpha(\Delta z)\Delta z}{\Delta z} = \\ &= \lim_{\Delta z \rightarrow 0} (A + \alpha(\Delta z)) = A \quad (\alpha(\Delta z) \rightarrow 0 \text{ при } \Delta z \rightarrow 0) \Rightarrow \\ &\Rightarrow \exists f'(z_0) = A. \end{aligned}$$

” \Leftarrow ”

$$\begin{aligned} f'(z_0) &= \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{f(z_0 + \Delta z) - f(z_0)}{\Delta z}, \\ \alpha(\Delta z) &= \frac{f(z_0 + \Delta z) - f(z_0)}{\Delta z} - f'(z_0) \rightarrow 0 \text{ при } \Delta z \rightarrow 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow f(z_0 + \Delta z) - f(z_0) = A\Delta z + \alpha(\Delta z)\Delta z. \end{aligned}$$

□

Функция $w = f(z)$ называется **голоморфной (аналитической)** в точке $z_0 \in \mathbb{C} \Leftrightarrow f - \mathbb{C}$ – дифференцируема в окрестности точки z_0 .

Теорема (об условиях Коши-Римана):

Функция $f(z) = u(x, y) + iv(x, y)$, где $z = x + iy$, \mathbb{C} – дифференцируема в точке $z_0 = x_0 + iy_0$ тогда и только тогда, когда:

1. Функции $u(x, y)$ и $v(x, y)$ \mathbb{R}^2 – дифференцируемы в точке $M_0(x_0, y_0)$;
2. Выполняются условия (уравнения) Коши-Римана:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x}(M_0) = \frac{\partial v}{\partial y}(M_0) \\ \frac{\partial u}{\partial y}(M_0) = -\frac{\partial v}{\partial x}(M_0) \end{cases}$$

При этом $f'(z_0) = \frac{\partial u}{\partial x}(M_0) + i\frac{\partial v}{\partial x}(M_0) = \frac{\partial v}{\partial y}(M_0) - i\frac{\partial u}{\partial y}(M_0)$.

Доказательство.

” \Rightarrow ”

$\Delta f(z_0, \Delta z) = A\Delta z + \gamma(\Delta z)\Delta z$, но при этом:

$$\begin{aligned} \Delta f(z_0, \Delta z) &= \Delta u(x_0, y_0, \Delta x, \Delta y) + i\Delta v(x_0, y_0, \Delta x, \Delta y) = \\ &= \alpha\Delta x - \beta\Delta y + i(\alpha\Delta y + \beta\Delta x) + \gamma(\Delta z)\Delta z \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \Delta u = \alpha\Delta x - \beta\Delta y + \operatorname{Re}(\gamma(\Delta z)\Delta z) \\ \Delta v = \alpha\Delta y + \beta\Delta x + \operatorname{Im}(\gamma(\Delta z)\Delta z), \end{cases}$$

где $\frac{\gamma(\Delta z)\Delta z}{|\Delta z|} \rightarrow 0$ при $\Delta z \rightarrow 0$ ($(\Delta x, \Delta y) \rightarrow 0$), так как

$\gamma(\Delta z) \rightarrow 0$, а $\frac{\Delta z}{|\Delta z|}$ – ограничена при $\Delta z \rightarrow 0 \Rightarrow$

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(\gamma(\Delta z)\Delta z) = o(|\Delta z|) \\ \operatorname{Im}(\gamma(\Delta z)\Delta z) = o(|\Delta z|) \end{cases} \Rightarrow 1);$$

$$\begin{aligned} & \begin{cases} \Delta u = u'_x \Delta x + u'_y \Delta y + o(|\Delta z|) \\ \Delta v = v'_x \Delta x + v'_y \Delta y + o(|\Delta z|) \end{cases} \Rightarrow \\ & \Rightarrow \begin{cases} u'_x = \alpha = v'_y \\ u'_y = -\beta = -v'_x \end{cases} \Rightarrow 2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Тогда } f'_z = \alpha + i\beta \Rightarrow \Rightarrow f'(z_0) &= \frac{\partial u}{\partial x}(M_0) + i \frac{\partial v}{\partial x}(M_0) = \\ & \frac{\partial v}{\partial y}(M_0) - i \frac{\partial u}{\partial y}(M_0) \end{aligned}$$

“ \Leftarrow .” Аналогично

□

2 Геометрический смысл комплексной производной. Конформные отображения, связь конформности и дифференцируемости, примеры.

Пусть задана кривая $z = z(t) = x(t) + iy(t)$, имеющая касательную в точке t_0 с направляющим вектором $\xi = x'(t_0) + iy'(t_0)$. Назовем ξ касательным вектором в точке t_0 к кривой z .

Теорема (геометрический смысл комплексной производной):

1. Любая голоморфная в т. $z_0 = z(t_0)$ функция f определяет линейное отображение касательных векторов $\eta = f'(z_0)\xi$, где η – образ касательного вектора ξ , являющийся касательным вектором к кривой $f(z)$ в точке $f(z_0)$.
2. Это отображение касательных векторов состоит в растяжении с коэффициентом $|f'(z_0)|$ и повороте на угол $\arg f'(z_0)$.

□ а) По правилу дифференцирования сложной функции (в смысле \mathbb{R}^2)

$$\eta = \frac{df(z(t))}{dt}(t_0) = f'(z(t_0))z'(t_0) = f'(z_0)\xi$$

б) $|\eta| = |f'(z_0)| \cdot |\xi|$ – растяжение с коэффициентом $|f'(z_0)|$;
 $\arg \eta = \arg f'(z_0) + \arg \xi \pm 2\pi$ – поворот на угол $\arg f'(z_0)$. ■

Отображение F называется **конформным** в точке $M_0(x_0, y_0)$ тогда и только тогда, когда касательное отображение в точке M_0 сохраняет углы.

Отображение F называется **конформным** в области $U \subset \mathbb{R}^2$ тогда и только тогда, когда оно конформно в любой из точек U .

$U \subset \mathbb{C}$, $H(U)$ – множество голоморфных в U функций.

Теорема (о связи конформности и дифференцируемости):

U – область в \mathbb{C} . Если $f \in H(U)$ и $\forall z \in U \quad f'(z) \neq 0$, тогда f – конформное в U отображение.

□ Доказательство следует из предыдущей теоремы:

В каждой точке $z_0 \in U$ лин.отображение $f'(z_0)$ растигивает в $|f'(z_0)| \neq 0$ и поворачивает на угол $\arg f'(z_0) \Rightarrow$ лин.отображение в z_0 сохраняет углы.



Определение: Угол между кривыми γ_1 и γ_2 в точке ∞ равен углу между касательными к $\hat{\gamma}_1$ и $\hat{\gamma}_2$ в точке 0, где $\hat{\gamma}_1 = \frac{1}{\gamma_1}$ и $\hat{\gamma}_2 = \frac{1}{\gamma_2}$.

Отображение F называется **конформным** в точке ∞ тогда и только тогда, угол между кривыми γ_1 и γ_2 в точке ∞ равен углу между кривыми $f(\gamma_1)$ и $f(\gamma_2)$ в точке ∞ .

3 Определить дробно-линейное отображение (ДЛО). Сформулировать и доказать конформность и групповое свойство ДЛО.

Дробно-линейные отображения — это функции вида:

$$w = \frac{az + b}{cz + d}, \text{ где } \begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix} \neq 0, \quad a, b, c, d \in \mathbb{C}$$

Доопределим функцию выше следующим образом:

$$z = -\frac{d}{c} : w\left(-\frac{d}{c}\right) = \infty$$

$$z = \infty : w(\infty) = \begin{cases} \frac{a}{c}, & c \neq 0 \\ \infty, & c = 0 \end{cases}$$

Тогда ДЛО: $w : \overline{\mathbb{C}} \rightarrow \overline{\mathbb{C}}$

Конформность:

Любое ДЛО — конформное отображение $\overline{\mathbb{C}} \rightarrow \overline{\mathbb{C}}$

Доказательство.

1) Рассмотрим точки $z_0 \neq -\frac{d}{c}, \infty$:

$$\text{Тогда } w' = \frac{a(cz + d) - (az + b)c}{(cz + d)^2} = \frac{ad - bc}{(cz + d)^2} \neq 0$$

Значит функция w голоморфна в точках z_0 и по теореме о конформности голоморфных отображений, она конформна в этих точках z_0 .

2) Рассмотрим точку $z_0 = -\frac{d}{c}$:

$$z \xrightarrow{L} w = \frac{az + b}{cz + d} \xrightarrow{L_0} \xi = \frac{1}{w}$$

$$-\frac{d}{c} \xrightarrow{L} \infty \xrightarrow{L_0} 0$$

Отображение $\xi = \frac{1}{w}$ сохраняет углы, то есть L_0 конформно.

Рассмотрим $L_0 \circ L$ в точке $z_0 = -\frac{d}{c}$:

$$(L_0 \circ L)'_{|z=-\frac{c}{d}} = \frac{cb - ad}{(az + b)^2}_{|z=-\frac{c}{d}} \neq 0$$

Значит отображение $L_0 \circ L$ конформно в точке $z_0 = -\frac{c}{d}$.
 $L = L_0^{-1} \circ (L_0 \circ L)$ конформно, так как композиция конформных и обратное к конформному отображению конформны.

3) Рассмотрим точку $z_0 = \infty$:

$$\xi = \frac{1}{z} \xleftarrow{L_0} z \xrightarrow{L} w = \frac{az + b}{cz + d}$$

$$0 \xleftarrow{L_0} \infty \xrightarrow{L} \frac{a}{c}$$

Рассмотрим отображение $L \circ L_0^{-1}$:

$$w = \frac{a \cdot \frac{1}{\xi} + b}{c \cdot \frac{1}{\xi} + d} = \frac{b \cdot \xi + a}{d \cdot \xi + c}$$

$$w'_{|0} = \frac{dc - da}{(d \cdot \xi + c)^2}_{|\xi=0} \neq 0$$

Значит отображение $L \circ L_0^{-1}$ конформно в точке $\xi_0 = 0$.

Тогда отображение $L = (L \circ L_0^{-1}) \circ L_0$ конформно в точке $z_0 = \infty$, так как композиция конформных и обратное к конформному отображению конформны. \square

Групповое свойство ДЛО:

Совокупность всех ДЛО Λ образует некоммутативную группу $(\Lambda; \circ)$ относительно операции композиции.

Доказательство.

0) Замкнутость:

$$w = \frac{az + b}{cz + d}; \quad \xi = \frac{a_1 w + b_1}{c_1 w + d_1}$$

$$\xi = \frac{a_1 \cdot \frac{az+b}{cz+d} + b_1}{c_1 \cdot \frac{az+b}{cz+d} + d_1} = \frac{a_1(az+b) + b_1(cz+d)}{c_1(az+b) + d_1(cz+d)} =$$

$$= \frac{(a_1a + b_1c)z + a_1b + b_1d}{(c_1a + d_1c)z + c_1b + d_1d}$$

Определитель $\begin{vmatrix} a_1a + b_1c & a_1b + b_1d \\ c_1a + d_1c & c_1b + d_1d \end{vmatrix}$ не равен 0, так как иначе композиция ДЛО была бы отображением в одну точку, но композиция биекций есть биекция.

1) Ассоциативность выполняется, так как композиция отображений ассоциативна

2) Существование единицы:

$$E : w = z, \begin{pmatrix} a=1 & b=0 \\ c=0 & d=1 \end{pmatrix}, \det = 1 \neq 0$$

3) Существование обратного:

Пусть $L : w = \frac{az+b}{cz+d}$ — ДЛО.

Построим обратное:

$$w(cz+d) = az+b$$

$$z(wc-a) = b-dw$$

$$L^{-1} : z = \frac{b-dw}{wc-a} \text{ — ДЛО, так как } \begin{vmatrix} -d & b \\ c & -a \end{vmatrix} = ad-bc \neq 0$$

4) Некоммутативность:

Приведем контрпример

$$L_1 : w = z + a, \quad L_2 : w = \frac{1}{z}$$

$$L_1 \circ L_2 : z \xrightarrow{L_2} w = \frac{1}{z} \xrightarrow{L_1} w = \frac{1}{z} + a$$

$$L_2 \circ L_1 : z \xrightarrow{L_1} w = z + a \xrightarrow{L_2} w = \frac{1}{z+a}$$

Получили, что $L_1 \circ L_2 \neq L_2 \circ L_1$

□

4 Дробно-линейные функции, их геометрическая интерпретация и свойство трёх точек.

Дробно-линейные отображения — это функции вида:

$$w = \frac{az + b}{cz + d}, \text{ где } \begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix} \neq 0, \quad a, b, c, d \in \mathbb{C}$$

Доопределим функцию выше следующим образом:

$$z = -\frac{d}{c} : w\left(-\frac{d}{c}\right) = \infty$$

$$z = \infty : w(\infty) = \begin{cases} \frac{a}{c}, & c \neq 0 \\ \infty, & c = 0 \end{cases}$$

Тогда ДЛО: $w : \overline{\mathbb{C}} \rightarrow \overline{\mathbb{C}}$

Геометрическая интерпретация: ДЛО — взаимно-однозначное непрерывное отображение $\overline{\mathbb{C}} \rightarrow \overline{\mathbb{C}}$

Теорема о трех точках

Для любых трех различных точек z_1, z_2, z_3 и других трех различных точек w_1, w_2, w_3 существует единственное ДЛО $L(z) : L(z_i) = w_i$

Доказательство

1) *Существование*

Для любых 3-х точек z_1, z_2, z_3 существует ДЛО, отображающее их в $0, \infty, 1$ соответственно:

$$w = \frac{z - z_1}{z - z_2} \cdot \frac{z_3 - z_2}{z_3 - z_1}$$

Тогда рассмотрим отображения $L_1 : \xi = \frac{z - z_1}{z - z_2} \cdot \frac{z_3 - z_2}{z_3 - z_1}$ и $L_2 :$

$\xi = \frac{w - w_1}{w - w_2} \cdot \frac{w_3 - w_2}{w_3 - w_1}$. Из группового свойства ДЛО следует, что L_2^{-1} — тоже ДЛО, и композиция ДЛО — тоже ДЛО. Тогда

получаем, что отображение $L = L_2^{-1} \circ L_1$ есть ДЛО, причем

$$\begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{pmatrix} \xrightarrow{L_1} \begin{pmatrix} 0 \\ \infty \\ 1 \end{pmatrix} \xrightarrow{L_2^{-1}} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

то есть L есть искомое ДЛО.

2) *Единственность* Пусть λ – ДЛО, отличное от L , построенного в пункте 1, удовлетворяющее условиям теоремы.

Рассмотрим отображение $\mu = L_2 \circ \lambda \circ L_1^{-1}$. Из группового свойства ДЛО полученное отображение – ДЛО, причем

$$\mu : \begin{pmatrix} 0 \\ \infty \\ 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ \infty \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Теперь покажем, что $\mu = id$:

$$\mu = \frac{az + b}{cz + d}$$

$$a) \mu(\infty) = \frac{a}{c} = \infty \Rightarrow c = 0$$

$$b) \mu(0) = \frac{b}{d} = 0 \Rightarrow b = 0$$

$$c) \mu(1) = \frac{a}{d} = 1 \Rightarrow a = d$$

В итоге получаем, что $\mu(z) = z \Rightarrow \mu = id$, то есть $L_2 \circ \lambda \circ L_1^{-1} = id \Rightarrow \lambda = L_2^{-1} \circ L_1 = L$, что и требовалось доказать.

5 Дробно-линейные функции, их геометрические свойства: круговое свойство и сохранение симметричности.

Дробно-линейные отображения — это функции вида:

$$w = \frac{az + b}{cz + d}, \text{ где } \begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix} \neq 0, \quad a, b, c, d \in \mathbb{C}$$

Доопределим функцию выше следующим образом:

$$z = -\frac{d}{c} : w\left(-\frac{d}{c}\right) = \infty$$

$$z = \infty : w(\infty) = \begin{cases} \frac{a}{c}, & c \neq 0 \\ \infty, & c = 0 \end{cases}$$

Тогда ДЛО: $w : \overline{\mathbb{C}} \rightarrow \overline{\mathbb{C}}$

Круговое свойство ДЛО

Любое ДЛО преобразует обобщенную окружность (окружность и ли прямая в $\overline{\mathbb{C}}$) в обобщенную окружность.

Доказательство.

1) случай, когда $c = 0$:

$$L : w = az + b$$

$$z \xrightarrow{L_1} z_1 = az \xrightarrow{L_2} z_2 = z_1 + b$$

L_1 — растяжение с поворотом: окружность перейдет в окружность, а прямая в прямую

L_2 — сдвиг: окружность перейдет в окружность, а прямая в прямую

2) случай, когда $c \neq 0$:

$$L : w = \frac{az + b}{cz + d} = \frac{a}{c} + \left(\frac{az + b}{cz + d} - \frac{a}{c} \right) = \frac{a}{c} + \frac{caz + bz - acz - ad}{c(cz + d)} =$$

$$\frac{a}{c} + \frac{bc - ad}{c(cz + d)} = \frac{a}{c} + \frac{\frac{bc - ad}{c}}{z + \frac{d}{c}}$$

$$\text{Обозначим } A = \frac{a}{c}, \quad B = \frac{bc - ad}{c}, \quad C = \frac{d}{c} :$$

$$L : w = A + \frac{B}{z + C}$$

$$z \xrightarrow{L_1} z_1 = z + C \xrightarrow{L_2} z_2 = \frac{1}{z_1} \xrightarrow{L_3} z_3 = B \cdot z_2 \xrightarrow{L_4} w = A + z_3$$

Отображения L_1 и L_4 — сдвиги, L_3 — растяжение с поворотом. Они переводят окружности в окружности, а прямые в прямые.

Рассмотрим отображение $L_2 : w = \frac{1}{z}$

Общее уравнение обобщённой окружности на плоскости xOy :

$$E(x^2 + y^2) + F_1x + F_2y + G = 0$$

$$E, F_1, F_2, G \in \mathbb{R}, (E, F_1, F_2, G) \neq (0, 0, 0, 0)$$

Запишем это уравнение через переменную $z = x + iy$:

$$x = \frac{z + \bar{z}}{2}, y = \frac{z - \bar{z}}{2i} = i \frac{\bar{z} - z}{2}$$

$$Ez\bar{z} + F_1 \frac{z + \bar{z}}{2} + F_2 i \frac{\bar{z} - z}{2} + G = 0$$

$$Ez\bar{z} + Fz + \bar{F}\bar{z} + G = 0,$$

$$\text{где } F = \frac{1}{2}F_1 - \frac{1}{2}iF_2 \in \mathbb{C}, \bar{F} = \frac{1}{2}F + \frac{1}{2}iF_2$$

Тогда кривая, полученная в результате преобразования L_2 задается уравнением:

$$E \frac{1}{z} \overline{\left(\frac{1}{z}\right)} + F \frac{1}{z} + \bar{F} \overline{\left(\frac{1}{z}\right)} + G = 0 \mid \cdot z\bar{z}$$

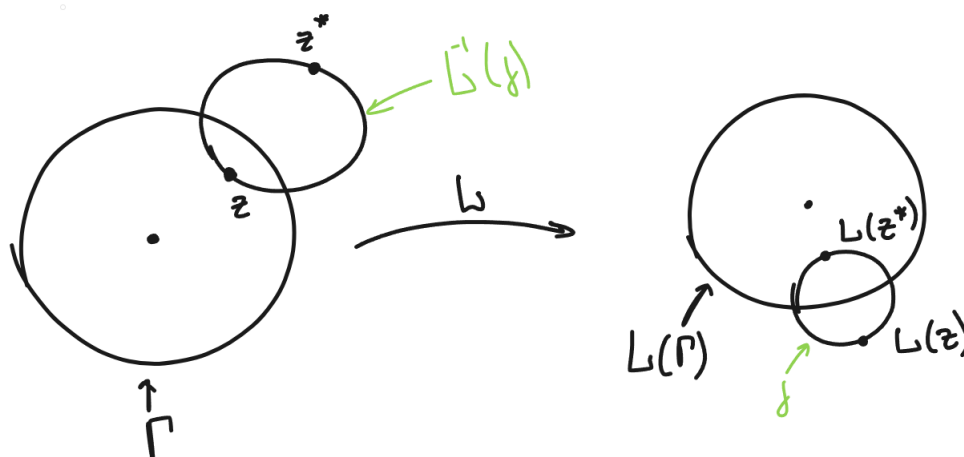
$$E + F\bar{z} + \bar{F}z + Gz\bar{z} = 0,$$

что является уравнением обобщенной окружности. Значит отображение L_2 переводит обобщенную окружность в обобщенную окружность. \square

Свойство ДЛО сохранения симметричности

Произвольное ДЛО L преобразует любые точки z и z^* , симметричные относительно обобщенной окружности Γ , в точки

$L(z)$ и $L(z^*)$, симметричные относительно обобщенной окружности $L(\Gamma)$.



Доказательство.

Пусть γ — произвольная обобщенная окружность, проходящая через точки $L(z)$ и $L(z^*)$. Тогда $L^{-1}(\gamma)$ — обобщенная окружность по круговому свойству ДЛО.

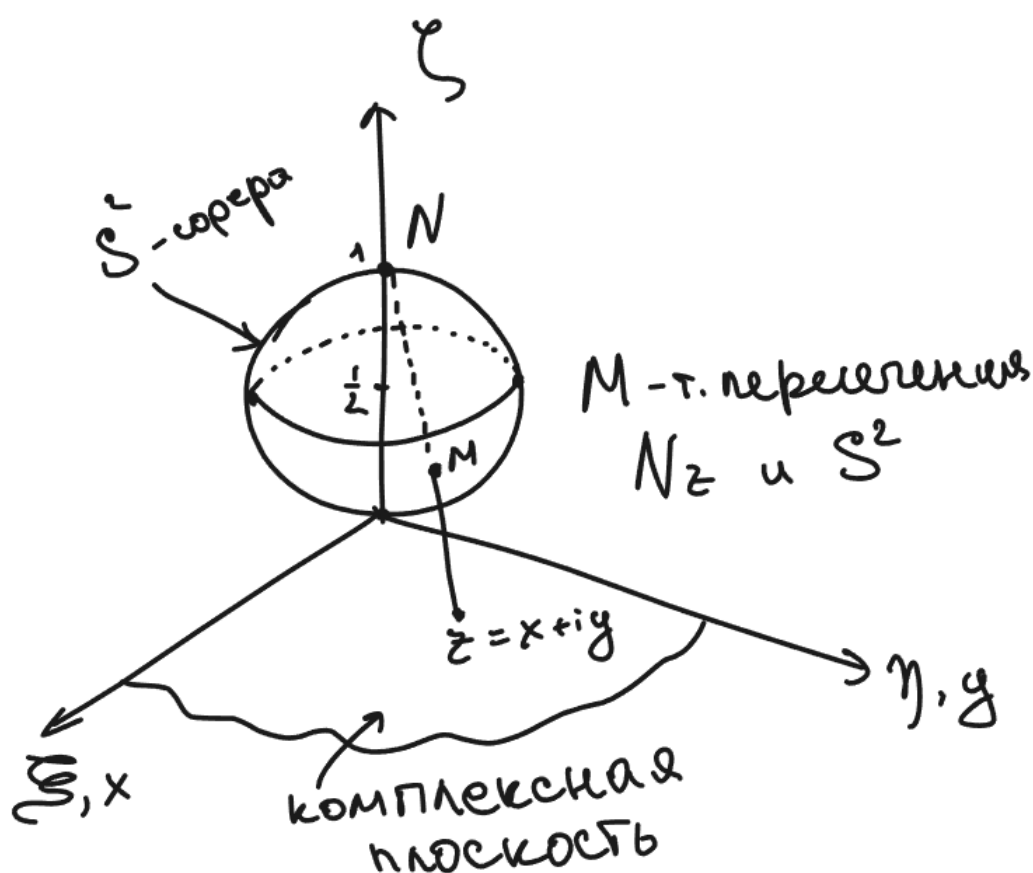
Так как $L(z), L(z^*) \in \gamma$, то:

$$L^{-1}(L(z)) = z \in L^{-1}(\gamma) \text{ и } L^{-1}(L(z^*)) = z^* \in L^{-1}(\gamma).$$

По определению симметричных точек окружности Γ и $L^{-1}(\gamma)$ ортогональны. ДЛО L сохраняет углы, а значит $L(\Gamma)$ ортогональна $L(\gamma)$. \square

6 Стереографическая проекция. Расширенная комплексная плоскость и ее топология. Бесконечно удаленная точка, ее окрестности. Угол между кривыми в бесконечности. Дифференцируемость и конформность в бесконечности. Дробно-линейные функции как отображения расширенной комплексной плоскости.

Выберем ДСК с осями ξ, η, ζ , причем оси ξ, η совпадают с осями x, y . Рассмотрим сферу радиуса $\frac{1}{2}$ в этой системе координат.



динат, которая описывается уравнением

$$S^2 : \xi^2 + \eta^2 + \left(\zeta - \frac{1}{2}\right)^2 = \left(\frac{1}{2}\right)^2$$

а также луч, исходящий из точки $N(0, 0, 1)$, и пересекающий плоскость $0xy$ в точке (x, y) , заданный параметрически:

$$\begin{cases} \xi = 0 + tx \\ \eta = 0 + ty \\ \zeta = 1 + t \cdot (-1) \end{cases}$$

Точка пересечения луча со сферой (ξ, η, ζ) (подставляем в уравнение сферы уравнения луча):

$$\begin{aligned} t^2 x^2 + t^2 y^2 + \left(\frac{1}{2} - t\right)^2 &= \left(\frac{1}{2}\right)^2 \\ t^2(x^2 + y^2 + 1) - t &= 0 \quad | : t \neq 0 \\ t &= \frac{1}{1 + x^2 + y^2} = \frac{1}{1 + |z|^2} \\ \begin{cases} \xi = \frac{x}{1 + x^2 + y^2} = \frac{x}{1 + |z|^2} \\ \eta = \frac{y}{1 + x^2 + y^2} = \frac{y}{1 + |z|^2} \\ \zeta = \frac{x^2 + y^2}{1 + x^2 + y^2} = \frac{|z|^2}{1 + |z|^2} \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

Обратное отображение:

$$\begin{aligned} \zeta &= \frac{|z|^2 + 1 - 1}{1 + |z|^2} \Rightarrow \frac{1}{1 + |z|^2} = 1 - \zeta \\ \Rightarrow \xi &= x(1 - \zeta), \eta = y(1 - \zeta) \Rightarrow \\ \begin{cases} x = \frac{\xi}{1 - \zeta} \\ y = \frac{\eta}{1 - \zeta} \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

Отображения (3) и (4) являются однозначными отображениями между \mathbb{C} и $S^2 \setminus N$, так как в преобразованиях не возникали неоднозначности.

$\overline{\mathbb{C}} = \mathbb{C} \cup \{\infty\}$. $\overline{\mathbb{C}}$ называется **расширенной комплексной плоскостью**.

Топология $\overline{\mathbb{C}}$:

Открытое множество на $S^2 - U \cap S^2$, где U – открытое в \mathbb{R}^3 .

Условимся, что точке $N(0, 0, 1)$ соответствует точка ∞ поля $\overline{\mathbb{C}}$, тем самым определяется биекция между S^2 и $\overline{\mathbb{C}}$, точка ∞ называется **бесконечно удаленной точкой**.

Окрестностью U бесконечно удаленной точки называется множество точек z , удовлетворяющих неравенству

$$|z - z_0| > R, R \in \mathbb{R}$$

Функция $f : U \rightarrow \overline{\mathbb{C}}, \infty \in U$, **дифференцируема в точке ∞** , если функция $\varphi(z) = f\left(\frac{1}{z}\right)$ дифференцируема в нуле.

Функция $f : U \rightarrow \overline{\mathbb{C}}, \infty \in U$, **конформна в точке ∞** , если функция $\varphi(z) = f\left(\frac{1}{z}\right)$ конформна в нуле.

7 Интеграл от функции комплексного переменного вдоль пути в \mathbb{C} . Его свойства.

Путь – параметризованная кривая, возможно с самопересечением (непрерывное отображение $\gamma : [a, b] \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$).

Пусть γ – гладкий путь, то есть $\gamma : z = z(t), t \in J = [\alpha, \beta] \subset \mathbb{R}, z(t) \in \mathbb{C}, z(J) \subset \mathbb{C}$, функция $f(z)$ определена на $z(J)$ и функция

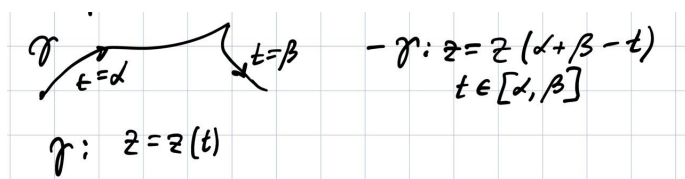
$f(z(t)) : J \rightarrow \mathbb{C}$ непрерывна (говорят, что f непрерывна на γ).

Число $\int_{\alpha}^{\beta} f(z(t))z'(t) dt$ называют **интегралом от функции f вдоль пути γ** и обозначают $\int_{\gamma} f(z) dz$, где $z(t) = x(t) + iy(t), z'(t) = x'(t) + iy'(t)$.

Свойства интеграла:

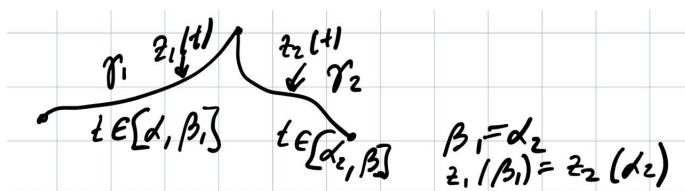
1. Линейность: $\int_{\gamma} [af(z) + bf(z)] dz = a \int_{\gamma} f(z) dz + b \int_{\gamma} f(z) dz;$

2. Ориентированность:



$$\int_{-\gamma} f(z) dz = - \int_{\gamma} f(z) dz;$$

3. Аддитивность:



$$\gamma_1 \cup \gamma_2 : z = \begin{cases} z_1(t), t \in [\alpha, \beta_1]; \\ z_2(t), t \in [\alpha_2, \beta]. \end{cases}$$

$$\int_{\gamma_1 \cup \gamma_2} f dz = \int_{\gamma_1} f dz + \int_{\gamma_2} f dz;$$

4. Независимость интеграла от выбора параметризации кривой:

Пусть $\gamma : z = z(t), t \in [\alpha, \beta]$, $\gamma_1 : z = z_1(\tau), \tau \in [\alpha_1, \beta_1]$ – два непрерывно дифференцируемых пути, $z_1(\tau) = z(t(\tau)) \forall \tau \in [\alpha_1, \beta_1]$, где $t = t(\tau) : [\alpha_1, \beta_1] \rightarrow [\alpha, \beta]$ – непрерывно дифференцируемая возрастающая функция, f непрерывна на γ .

Тогда
$$\int_{\gamma} f dz = \int_{\gamma_1} f dz;$$

5. Оценка интеграла:

Если f – непрерывная функция на кусочно-гладком пути $\gamma : z = z(t), t \in [\alpha, \beta]$, то $|\int_{\gamma} f dz| \leq \int_{\gamma} |f(z)| |z'(t)| dt$
($|z'(t)| dt = |dz|$ – дифференциал длины дуги).

Доказательство.

4. Независимость интеграла:

$$\int_{\gamma} f dz = \int_{\alpha}^{\beta} f(z(t)) z'(t) dt =$$

$$\left| t = t(\tau), dt = t'(\tau) d\tau, \frac{dz(t(\tau))}{d\tau} = \frac{dt}{d\tau} \frac{dz(t(\tau))}{dt} \right|$$

$$= \int_{\alpha_1}^{\beta_1} f(z(t(z))) \cdot z'(t(\tau)) t'(\tau) d\tau = \int_{\alpha_1}^{\beta_1} f(z_1(\tau)) z'(\tau) d\tau = \int_{\gamma_1} dz$$

5. Оценка интеграла:

Пусть $I = \int_{\gamma} f dz \in \mathbb{C} = |I| \cdot \exp^{i\theta}$

$$|I| = \exp^{-i\theta} \cdot I = \int \exp^{-i\theta} f[z(t)] z'(t) dt$$

Обозначим $g(t) = \exp^{-i\theta} f[z(t)] z'(t)$.

$$\text{Тогда } |I| = \int_{\alpha}^{\beta} \operatorname{Re} g(t) dt + i \int_{\alpha}^{\beta} \operatorname{Im} g(t) dt \leq \int_{\alpha}^{\beta} |g(t)| dt = \int_{\alpha}^{\beta} |\exp^{-i\theta}| \cdot |f(z(t))| \cdot |z'(t)| dt$$

□

8 Теорема Коши для односвязных и многосвязных областей

Теорема 1 (Коши для односвязной области)

Если $D \subset \mathbb{C}$ – односвязная область, $f \in H(D)$ (f голоморфна), $\gamma \subset D$ – замкнутая кривая, то $\int_{\gamma} f dz = 0$.

Доказательство.

Для случая, когда $f'(z)$ непрерывная в D :

$$z = x + iy; f(z) = u(x, y) + iv(x, y)$$

$$I = \int_{\gamma} f dz = \int_{\alpha}^{\beta} f(z(t)) z'(t) dt = \int [u(x(t), y(t)) + iv(x(t), y(t))] \cdot$$

$$[x'(t) + it'(t)] dt = \int_{\alpha}^{\beta} [u \cdot x' - v \cdot y'] + i(uy' + vx') dt = \int_{\alpha}^{\beta} (ux' -$$

$$vy') dt + i \int_{\alpha}^{\beta} (uy' + vx') dt = \int_{\gamma} u dx - v dy + i \int_{\gamma} u dy + v dx =$$

Разрежем γ на простые контуры γ_i :

$$\gamma = \bigcup_{j=1}^k \gamma_j, G_j - \text{область внутри } \gamma_j$$

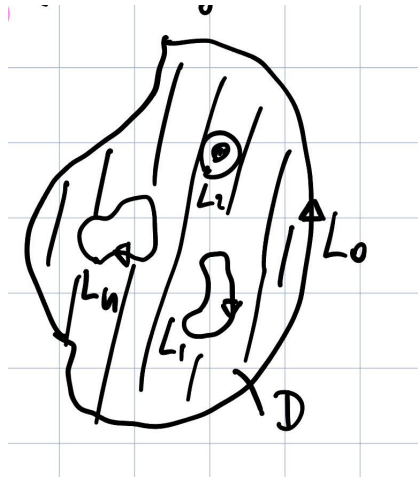
$$I = \sum_{j=1}^k \left[\oint_{\gamma_j} u dx - v dy + i \oint_{\gamma_j} v dx + u dy \right] =$$

$$= \sum_j \left[\iint_{G_j} \left(-\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) dx dy + i \iint_{G_j} \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) dx dy \right] = 0$$

□

Теорема 2 (Коши для многосвязной области)

Пусть многосвязная область D ограничена внешним конту-



ром L_0 и внутренними контурами L_1, \dots, L_n , контуры L_1, \dots, L_n – кусочно-гладкие, $f \in H(D \cup L_0 \cup L_1 \cup \dots \cup L_n)$.

Тогда $\int_L f dz = 0$, где $L = L_0 \cup L_1 \cup \dots \cup L_n$, обход L_0 – против часовой стрелки, L_1, \dots, L_n – по часовой стрелке.

Замечание. $\oint_{L_0} f dz = \sum_{i=1}^n \oint_{L_i} f dz$, где обход L_0, L_1, \dots, L_n против часовой стрелки.

Доказательство.

С помощью разрезов $\gamma_1, \dots, \gamma_n$ получим односвязную область D^* . Тогда $D = D^* \cup \gamma_1 \cup \dots \cup \gamma_n$.

Так как D^* –односвязная, то $0 = \int_{D^*} f dz =$

Граница $D^* = L_0 \cup \gamma_1 \cup -\gamma_1 \cup L_1 \cup \dots \cup \gamma_n \cup -\gamma_n \cup L_n$.

Тогда из аддитивности и ориентированности:

$$= \int_{L_0} f dz + \sum_{i=1}^n \left[\int_{\gamma_i} f dz + \int_{-\gamma_i} f dz + \int_{L_i} f dz \right] = \int_L f dz = 0 \quad \square$$

9 Интегральная формула Коши для функции и ее производных.

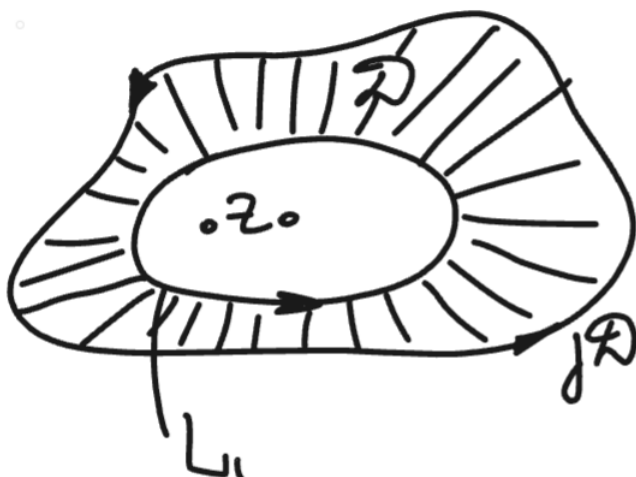
Интегральная формула Коши для голоморфных функций:

Пусть D — односвязная область в \mathbb{C} , ∂D — граница D , $f \in H(D \cup \partial D)$.

Тогда для $z_0 \in D$:

$$f(z_0) = \frac{1}{2\pi i} \cdot \oint_{\partial D} \frac{f(z)}{z - z_0} dz$$

Доказательство.



1) Пусть L_1 — простой контур, $L_1 \subset D$

Пусть D_1 — область внутри L_1 , $G = D \setminus D_1 \setminus L_1$ — многосвязная область

По т. Коши для многосвязной области:

$$\int_{\partial G} \frac{f(z)}{z - z_0} dz = 0,$$

т.к. $\frac{f(z)}{z - z_0} \in H(G)$

Имеем $\partial G = \partial D \cup (-L_1)$:

$$\oint \partial D \frac{f(z)}{z - z_0} dz - \oint_L \frac{f(z)}{z - z_0} dz = 0$$

2) Пусть $\gamma : z = z + r \cdot e^{it}, t \in [0, 2\pi], r > 0$
 $f(z) = (z - a)^n; n \in \mathbb{Z}$

$$\int_{\gamma} (z - a)^n dz = \int_0^{2\pi} (a + r \cdot e^{it} - a)^n \cdot r \cdot i e^{it} dt = r^{n+1} \cdot i \cdot \int_0^{2\pi} e^{it(n+1)} dt \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \oint_{L_1} \frac{dz}{z - z_0} = 2\pi i, \text{ где } L_1 - \text{окр-ть с центром в точке } z_0$$

3) Пусть σ_1 – радиус L_1 и $L_1 \subset D$

$$I = \left| \frac{1}{2\pi i} \oint_{L_1} \frac{f(z)}{z - z_0} dz - f(z_0) \right| = \left| \frac{1}{2\pi i} \oint_{L_1} \frac{f(z)}{z - z_0} dz - f(z_0) \frac{1}{2\pi i} \oint_{L_1} \frac{dz}{z - z_0} \right| =$$

$$= \left| \frac{1}{2\pi i} \oint_{L_1} \frac{f(z) - f(z_0)}{z - z_0} dz \right| \leq \frac{1}{2\pi |i|} \oint_{L_1} \left| \frac{f(z) - f(z_0)}{z - z_0} \right| |z'(t)| dt$$

4) Так как $f \in H(D)$, то $\forall \varepsilon > 0 \exists \delta(\varepsilon) > 0 : |z - z_0| < \delta \rightarrow |f(z) - f(z_0)| < \varepsilon$

Имеем $z \in L_1 : |z - z_0| = \sigma_1$:

$$\left| \frac{f(z) - f(z_0)}{z - z_0} \right| < \frac{\varepsilon}{\sigma_1} : \oint_{L_1} |z'(t)| dt - \text{длина } L_1, \text{ то есть } 2\pi\sigma_1$$

Тогда $I \leq \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\varepsilon}{\sigma_1} \cdot 2\pi\sigma_1 = \varepsilon \Rightarrow$ не зависит от ε

□

Интегральная формула Коши для производных:

Пусть $f \in H(D) : G \cup \partial G \subset D; D$ — область, ограниченная конечным числом замкнутых кривых, $z_0 \in G$

Тогда:

$$f^{(n)}(z_0) = \frac{n!}{2\pi i} \int_{\partial G} \frac{f(\xi)}{(\xi - z_0)^{n+1}} d\xi$$

Доказательство.

По теоремам о разложении голоморфной функции в степенной ряд и теореме о единственности разложения в степенной ряд:

$$c_n = \frac{1}{2\pi} \oint_{\gamma_r} \frac{f(\xi) d\xi}{(\xi - z_0)^{n+1}}; \oint_{\gamma_r} \dots = \oint_{\gamma_G} \quad \square$$

10 Степенные ряды в \mathbb{C} , их свойства. Голоморфность суммы степенного ряда.

Ряд $\sum_{n=0}^{\infty} c_n(z - z_0)^n$ — **степенной** ряд, $c_n \in \mathbb{C}$.

Свойства:

1. Теорема Абеля:

Если степенной ряд $\sum_{n=0}^{\infty} c_n(z - z_0)^n$ сходится в точке z_1 , то этот ряд сходится в круге $U = \{z \in \mathbb{C} : |z - z_0| < |z_1 - z_0|\}$ и на любом компакте $K \subset U$ он сходится равномерно.

2. Теорема Коши-Адамара:

Пусть для ряда $A : \sum_{n=0}^{\infty} c_n(z - z_0)^n$ имеем $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|c_n|} = \frac{1}{R}$,

где $0 < R \leq \infty$.

Тогда в любой точке $z : |z - z_0| < R$ ряд сходится и в любой точке $z : |z - z_0| > R$ ряд расходится.

Голоморфность суммы степенного ряда:

Пусть в круге $U = \{z \in \mathbb{C} : |z - z_0| < R\}$ $S(z) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n(z - z_0)^n$.

Тогда $S \in H(U_R(z_0))$ и $S'(z) = \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot c_n(z - z_0)^{n-1}$ (*)

Доказательство.

$r : 0 < r < R$ — произвольные.

Пусть $z_1 \in U_R(z_0) : |z_1 - z_0| > r$

$\forall z \in U_r(z_0) = \{z : |z - z_0| < r\} :$

$$|n \cdot C_n(z - z_0)^{n-1}| = n \left| C_n \frac{(z - z_0)^{n-1}}{(z_1 - z_0)^n} \right| \cdot |(z_1 - z_0)^n| = n \frac{1}{|z_1 - z_0|}.$$

$$|C_n(z_1 - z_0)^n| \cdot \left| \frac{z - z_0}{z_1 - z_0} \right|^{n-1} \leq n \frac{M}{|z_1 - z_0|} \rho^{n-1},$$

где $M > |C_n(z_1 - z_0)^n|$, $\rho = \left| \frac{z - z_0}{z_1 - z_0} \right|$

То есть ряд $\sum_{n=1}^{\infty} n \frac{M}{|z_1 - z_0|} \rho^{n-1} = \frac{M}{|z_1 - z_0|} \sum_{n=1}^{\infty} n \rho^{n-1}$ — мажорирующий для ряда (*).

Ряд $\sum_{n=1}^{\infty} n \rho^{n-1}$ сходится при $\rho \in (0; 1)$ как ряд из производных ряда $\sum_{n=1}^{\infty} \rho^n$. Тогда по признаку Вейерштрасса ряд (*) сходится равномерно и абсолютно в $U_r(z_0)$.

Для любой замкнутой кривой $\gamma \subset U_r(z_0)$ по теореме Коши:

$$\oint_{\gamma} \left(\sum_{n=1}^{\infty} n C_n (z - z_0)^{n-1} \right) dz = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \oint_{\gamma} (z - z_0)^{n-1} dz = 0$$

Значит функция $g(z) = \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot C_n (z - z_0)^{n-1}$ имеет первообразную в $U_r(z_0)$, которая равна:

$$\int_{z_0}^z g(\xi) d\xi = \int_{z_0}^z \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot C_n (\xi - z_0)^{n-1} d\xi = \sum_{n=1}^{\infty} n C_n \frac{(z - z_0)^n}{n} =$$

$$S(z) - S(z_0) = S(z) - C_0.$$

Следовательно $S \in H(U_r(z_0)) \forall r \in (0; R)$.

Поэтому $S \in H(U_R(z_0))$ и $S' = g$. □

Следствия из этой теоремы:

1. Производная функции $f \in H(d)$ голоморфна в D
- 2.