

Содержание

1. Основные понятия	2
1.1. Комплексное число	2
1.2. Комплексная плоскость	2
1.3. Предел	4
1.4. Комплексная функция	5
1° Определение	5
2° Предел	6
3° Элементарные комплексные функции	7

1. Основные понятия

1.1. Комплексное число

Мет. $\mathbb{C} = \{(a, b) \mid a, b \in \mathbb{R}\}$

Обозначение: $z = (a, b) = a + bi$, где $i = (0, -1) = \sqrt{-1}$

Основные операции:

1. $\operatorname{Re} z = a$ - вещественная часть, $\operatorname{Im} z = b$ - мнимая часть
2. $z_1 + z_2 = (a_1, b_1) + (a_2, b_2) = (a_1 + a_2, b_1 + b_2) = (a_1 + a_2) + i(b_1 + b_2)$
3. $z_1 \cdot z_2 = (a_1 + b_1 i) * (a_2 + b_2 i) = (a_1 a_2 - b_1 b_2) + i(a_1 b_2 + a_2 b_1)$
4. $z^n = \rho^n (\cos n\varphi + i \sin n\varphi)$ - **формула Муавра**, где $\rho = |z|$, $\varphi = \arg z$
5. $\sqrt[n]{z} = \sqrt[n]{\rho} \left(\cos \frac{\varphi + 2\pi k}{n} + i \sin \frac{\varphi + 2\pi k}{n} \right)$, где $\rho = |z|$, $\varphi = \arg z$, $k \in \mathbb{Z}$
6. При $n = 2$ $\sqrt{z} = \sqrt{a + bi} = \pm(c + di)$, где $c = \sqrt{\frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{2}}$, $d = \operatorname{sign}(b) \sqrt{\frac{-a + \sqrt{a^2 + b^2}}{2}}$

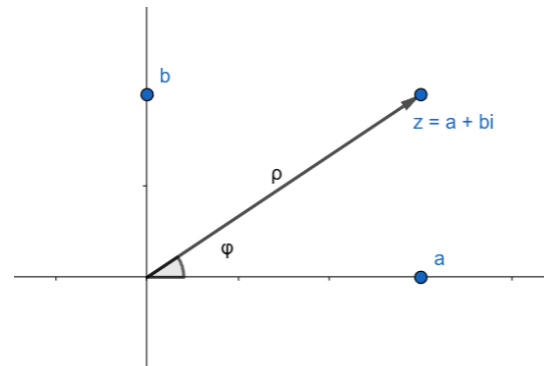
Тригонометрическая форма:

$z = a + bi = \rho(\cos \varphi + i \sin \varphi)$, где $\rho = |z| = \sqrt{a^2 + b^2}$, $\varphi =$

$\arg z \in [0; 2\pi)$

$\operatorname{Arg} z = \arg z + 2\pi k, k \in \mathbb{Z}$

По формуле Эйлера $z = \rho(\cos \varphi + i \sin \varphi) = \rho e^{i\varphi}$



1.2. Комплексная плоскость

Def. Окрестность точки $z_0 \in \mathbb{C}$ определяется как $U_\delta(z_0) = \{z \in \mathbb{C} \mid |z - z_0| < \delta\}$

Тогда $\overset{\circ}{U}_\delta(z_0) = U_\delta(z_0) \setminus \{z_0\}$ - выколота окрестность

Def. Для данной множества точек A точка z_0 считается

- внутренней, если для любого δ $U_\delta(z_0) \subset A$
- граничной, если для любого δ $\exists z \in U_\delta(z_0) \mid z \in A$ и $\exists z \in U_\delta(z_0) \mid z \notin A$

Def. Открытое множество состоит только из внутренних точек

Def. Закрытое множество содержит все свои граничные точки

Def. Границей Γ_D (иногда обозн. δD) для множества D называют множество всех граничных точек D

Def. Если любые две точки множества можно соединить ломаной линией конечной длины, то множество считается связным

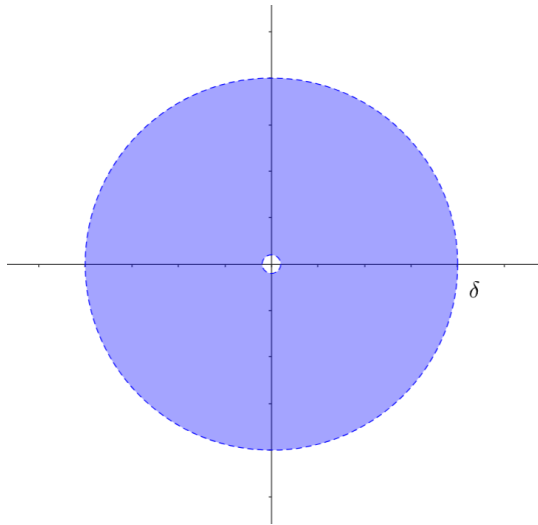
Def. Множество $D \subset \mathbb{C}$ называется областью, если D - открытая и связная

Def. Кривая $l \subset \mathbb{C}$ считается непрерывной, если $l = \{z \in \mathbb{C} \mid z = \varphi(t) + i\psi(t), t \in \mathbb{R}\}$, где $\varphi(t), \psi(t)$ - непрерывные функции

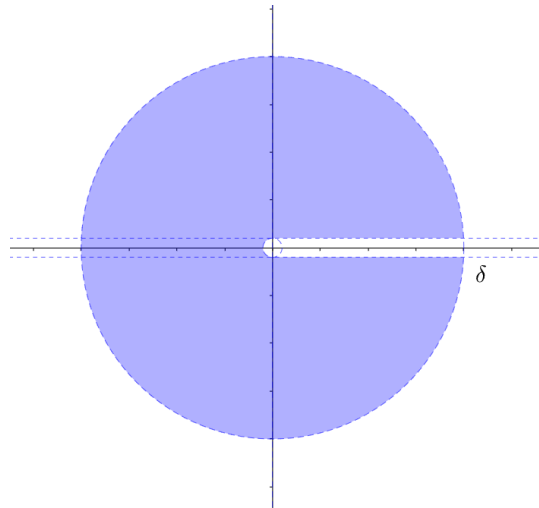
Nota. Если $\varphi(t)$ и $\psi(t)$ дифференцируемы и их производные непрерывные, то кривая l гладкая

Def. Непрерывная замкнутая (то есть начальная и конечная точки совпадают) без самопересечений кривая называется контуром

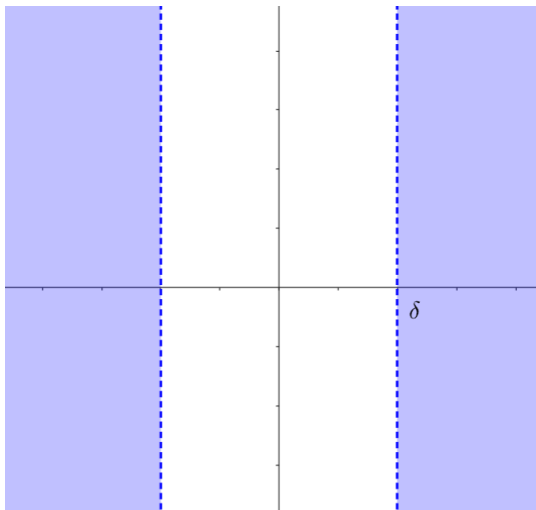
Nota. Односвязную область можно стянуть в точку



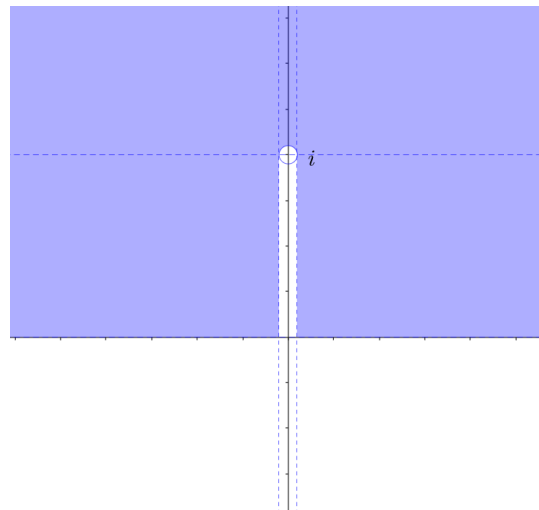
Ex. 1. $D = \{z \in \mathbb{C} \mid 0 < |z| < \delta\}$ - область связанная, но не односвязная, ее нельзя стянуть из-за дырки



Ex. 2. $D = \{z \in \mathbb{C} \mid 0 < |z| < \delta, \arg z \neq 0\}$ - область связная и односвязная



Ex. 3. $D = \{z \in \mathbb{C} \mid |\operatorname{Re} z| < \delta\}$ - несвязная область



Ex. 4. $D = \{z \in \mathbb{C} \mid \operatorname{Im} z \geq 0, z \notin [0, i]\}$ - здесь под $[0, i]$ подразумевается линейный отрезок на оси

Nota. Дальше все рассматриваемые Γ_D будут состоять из кусочногладких и изолированных кривых

1.3. Предел

Met. Последовательность $\{z_n\} = z_1, z_2, z_3, \dots, z_n, \dots$

Def. Пределом $\{z_n\}$ называют число z такое, что

$$\forall \varepsilon > 0 \exists n_0 = \mathbb{N} \left| \forall n > n_0 \quad |z_n - z| < \varepsilon \right.$$

Обозначается $\lim_{n \rightarrow \infty} z_n = z$

Nota. $\{z_n\}$ можно представить как $x_n + iy_n$, то есть двумя \mathbb{R} -последовательностями

$$\text{Th. } \exists \lim_{n \rightarrow \infty} z_n = x + iy \iff \begin{matrix} \exists \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \operatorname{Re} z_n = x \\ \exists \lim_{n \rightarrow \infty} y_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \operatorname{Im} z_n = y \end{matrix}$$

$$\boxed{\Leftarrow} \quad \forall \varepsilon > 0 \exists n_0 \in \mathbb{N} \left| \forall n > n_0 \quad \begin{matrix} |x_n - x| < \frac{\varepsilon}{2} \\ |y_n - y| < \frac{\varepsilon}{2} \end{matrix} \right.$$

$$|z_n - z| = |(x_n - x) + i(y_n - y)| \leq |x_n - x| + |y_n - y| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2}$$

То есть $\forall \varepsilon > 0 \dots |z_n - z| < \varepsilon$

$$\boxed{\Rightarrow} \quad \forall \varepsilon > 0 \quad |z_n - z| = |(x_n - x) + i(y_n - y)| < \varepsilon \Rightarrow \begin{cases} |x_n - x| \leq |(x_n - x) + i(y_n - y)| < \varepsilon \\ |y_n - y| \leq |(x_n - x) + i(y_n - y)| < \varepsilon \end{cases} \Rightarrow$$

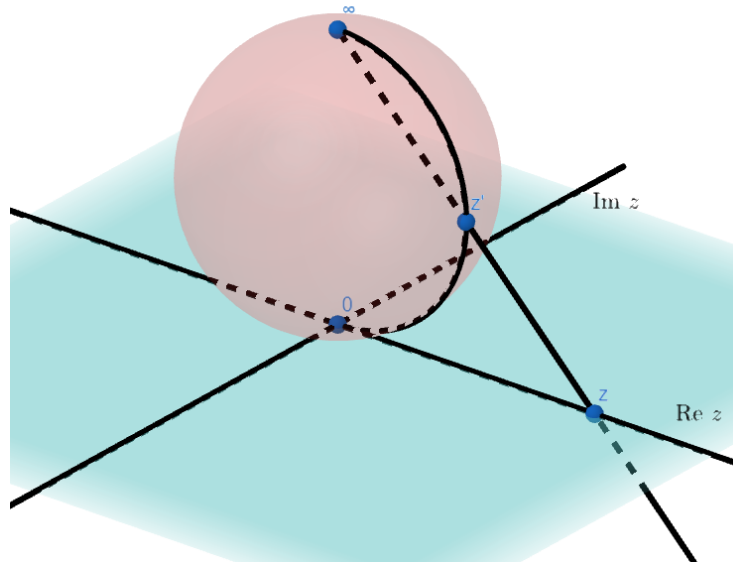
$$\exists \lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x \text{ и } \exists \lim_{n \rightarrow \infty} y_n = y$$

Nota. Для комплексных чисел работают теоремы для пределов (сумма пределов, произведение пределов и т.д.), критерий Коши и другие

$$\text{Def. } \lim_{n \rightarrow \infty} z_n = \infty \iff \forall \varepsilon > 0 \exists n_0 \in \mathbb{N} \left| n > n_0 \quad |z| > \varepsilon \right.$$

Def. Точка z , определенная как предел, равный ∞ , называется бесконечно удаленной. Но существует множество последовательностей, чьи пределы удаляются на бесконечность разными путями на плоскости

Def. Стереографическая проекция (сфера Римана)



Поместим сферу на комплексную плоскость и сделаем биекцию точек плоскости на точки сферы: проведем из верхней точки сферы лучи вниз на плоскость, и точка, где луч пересекает сферу, будет считаться отображением для данной точки. Заметим, что в этом случае бесконечно удаленные точки будут отображаться в верхнюю точку сферы

Def. $\mathbb{C} \cup \{\infty\} = \overline{\mathbb{C}}$ - расширенная комплексная плоскость

Однако $z + \infty$ не определена, $\infty + \infty$ не определена. Но $\infty = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{z_n}$ при $z_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$; $\infty = \infty \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} z_n$ при $z_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} z$

Записью $[-\infty; +\infty]$ обозначается ось $\overline{\mathbb{R}}$;

$[-i\infty; +i\infty]$ - мнимая расширенная ось

Путь $x \pm i\infty$ при фикс. x - вертикальная прямая;

$iy \pm \infty$ - горизонтальная прямая;

$e^{i\varphi} \cdot \infty$ - прямая, проходящая через начало координат

1.4. Комплексная функция

1° Определение

Мет. $f : E \subset \mathbb{R} \longrightarrow D \subset \mathbb{R} \stackrel{\text{def}}{\iff}$ отображение такое, что $\forall x \in E \exists! y \in D \mid y = f(x)$

Def. $f : D \subset \mathbb{C} \longrightarrow G \subset \mathbb{C} \stackrel{\text{def}}{\iff}$ отображение такое, что $\forall z \in D \exists w \in G \mid f(z) = w$

Def. Если $\forall z \in D \exists! w \in G$, то f называется однозначной функцией

Def. Если $\forall z_1, z_2 \in D (z_1 \neq z_2) \implies f(z_1) \neq f(z_2)$, то f называется однолистной функцией

Ex. 1. $w = \sqrt{z}$ - неоднозначная функция

$$\square z = 1 = 1(\cos 0 + i \sin 0)$$

$$\sqrt{z} = \sqrt{1} \left(\cos \frac{2\pi k}{2} + i \sin \frac{2\pi k}{2} \right)$$

$$w_1 = 1, \quad w_2 = -1$$

Ex. 2. $w = z^2$ - неоднолистная функция

$$z_1 = 1, z_2 = -1 \quad w(z_1) = w(z_2) = 1$$

Nota. Если $f(z)$ однозначна и однолистка, то $f(z)$ - взаимно однозначное соответствие (биекция).

Тогда $\exists g(x) \mid g(f(x)) = x$

Комплексную функцию $f(z)$ можно представить как $u(x, y) + iv(x, y)$, где $x + iy = z$

$$Ex. w = z^2 = (x + iy)^2 = x^2 + 2ixy - y^2 = (x^2 - y^2) + i \cdot 2xy$$

$$u(x, y) = (x^2 - y^2), \quad v(x, y) = 2xy$$

2° Предел

Def. $L \in \mathbb{C}, f : D \longrightarrow G, \quad L \stackrel{def}{=} \lim_{z \rightarrow z_0} f(z) \implies \forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \mid z \in D, z \in U_\delta^\circ(z_0) \implies f(z) \in U_\varepsilon(L)$

В определении существование и значение L не должно зависеть от пути, по которому z приближается к точке сгущения z_0 . Может быть так, что для любого направления стремления предел есть, но в общем смысле не существует

$$Ex. f(z) = \frac{1}{2i} \left(\frac{z}{\bar{z}} - \frac{\bar{z}}{z} \right) \quad \square z = \rho e^{i\varphi}$$

$$f(z) = \frac{1}{2i} \left(\frac{\rho e^{i\varphi}}{\rho e^{-i\varphi}} - \frac{\rho e^{-i\varphi}}{\rho e^{i\varphi}} \right) = \frac{1}{2i} (e^{2i\varphi} - e^{-2i\varphi}) = \frac{1}{2i} (\cos 2\varphi + i \sin 2\varphi - \cos 2\varphi + i \sin 2\varphi) = \sin 2\varphi$$

Зафиксируем $\varphi = \varphi^* \in [0; 2\pi)$, тогда $\sin 2\varphi^* \in [-1; 1]$

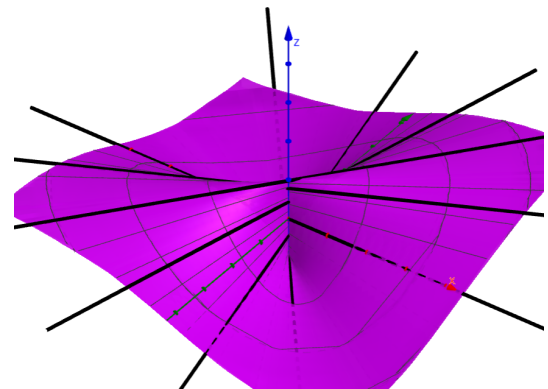
$$\lim_{z \rightarrow 0} f(z) = \lim_{\substack{\rho \rightarrow 0 \\ \varphi = \varphi^*}} f(z) = \lim_{\rho \rightarrow 0} \sin 2\varphi = \sin 2\varphi^* \in [-1; 1]$$

Значения предела занимает отрезок $[-1; 1] \implies$

$$\nexists \lim_{z \rightarrow 0} f(z)$$

На рисунке изображена $\sin 2\varphi$, на оси Oz изображена

Re w . Черные линии - это возможные пути приближения z к 0



Nota. Это аналогия с односторонними пределами \mathbb{R} -функций

Def. Непрерывность функций в точке z_0 .

$f: D \rightarrow G, z_0 \in D, f(z)$ называется непрерывной в z_0 , если $\lim_{z \rightarrow z_0} f(z) = f(z_0)$

На языке приращений: $\Delta f = f(z_0 + \Delta z) - f(z_0) \xrightarrow{\Delta z \rightarrow 0} 0$

$$\Delta z = z - z_0 = \Delta x + i\Delta y \rightarrow 0 \implies \begin{cases} \Delta x \rightarrow 0 \\ \Delta y \rightarrow 0 \end{cases} \implies \Delta \rho \rightarrow 0$$

3° Элементарные комплексные функции

Ex. 1. Линейная $f(z) = az + b$, $a, b \in \mathbb{C} \quad a \neq 0$

Эта функция однозначная, однолистная $\implies \exists f^{-1}(z) = g(z) = \frac{z-b}{a}$

Геометрический смысл:

$$a \in \mathbb{C}, z \in \mathbb{C}$$

$az = |a||z|(\cos(\varphi_a + \varphi_z) + i\sin(\varphi_a + \varphi_z))$ - поворот и растяжение ($\varphi_a = \arg a, \varphi_z = \arg z$)

$az + b = (x_{az} + x_b) + i(y_{az} + y_b)$ - сдвиг

То есть линейная функция - комбинация линейных перемещений

Ex. 2. Степенная $w = z^n$, $n \in \mathbb{N}$ - однозначная, может быть неоднолистной

Для $n \in \mathbb{Q}$ функция становится неоднозначной

$$\text{Ex. } w = z^2 \quad z = \rho e^{i\varphi}, w = \rho^2 e^{2i\varphi}$$

Заметим, что $\arg z_1 = \arg z_2 \pm \pi$

$$w(z_1) = \rho^2 e^{2i\arg z_1} = \rho^2 e^{2i(\arg z_1 + 2\pi k)}$$

$$w(z_2) = \rho^2 e^{2i\arg z_2} = \rho^2 e^{2i(\arg z_1 + \pi)} = \rho^2 e^{i(2\arg z_1 + 2\pi)} = w(z_1)$$

Область однолистности z^2 - множество точек, для которых $\arg z \in [0; \pi)$

Точку $w = 0$ называют точкой разветвления

$$\text{Ex. } w = z^{-1} = \frac{1}{z} \quad w(0) = \infty, w(\infty) = 0$$

$z \in \mathbb{C} \setminus \{0\}$ - функция обратима

$$w = \rho e^{i\psi} = \frac{1}{\rho e^{i\phi}} = \frac{1}{\rho} e^{-i\phi} \implies |w| = \frac{1}{|z|}, \arg w = -\arg z$$

Преобразование $|w| = \frac{1}{|z|}$ называется инверсией, а

$\arg w = -\arg z$ дает симметрию относительно $\text{Re } z$

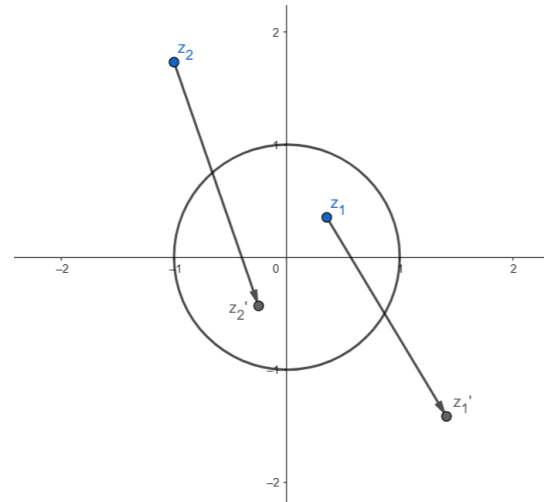
$$\text{Ex. 3. Рациональная } f(z) = \frac{P_n(z)}{Q_m(z)}, \quad n, m \in \mathbb{N}$$

$$\text{Ex. 4. Показательная } w = e^z = e^x + e^{iy} = e^x(\cos y + i \sin y)$$

Свойства:

$$1. e^{z_1+z_2} = e^{z_1} \cdot e^{z_2}$$

$$2. (e^{z_1})^{z_2} = e^{z_1 z_2}$$



3. $e^{z+2\pi i} = e^z \cdot e^{2\pi i} = e^z$ - показательная функция периодична с периодом $2\pi i$

Ex. 5. Логарифмическая $w = \text{Ln} z$

Если $e^w = e^{u+vi} = e^u(\cos v + i \sin v) = z = |z|e^{i \arg z}$, то $u = \ln |z|$, $v = \arg z + 2\pi k$

Тогда $\boxed{\text{Ln} z = \ln |z|(\cos(\arg z + 2\pi k) + i \sin(\arg z + 2\pi k))}$

$\ln z = \text{Ln} z$ при $k = 0$ - т. н. главное значение