

Математический Анализ - 2

Авторы [конспекта 24/25 года](#), на основе которого написан текущий:

Винер Даниил | [github](#)

Нарек Хорянян | [github](#)

Авторы [текущего конспекта](#):

Жуков Андрей | [github](#)

Мелисов Тимур | [github](#)

Версия от 29.09.2025 19:47

Содержание

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Кратные интегралы. Брусы. Интегрируемые функции по Риману | 2 |
| 1.1 | Брус. Мера бруса | 2 |
| 1.2 | Свойства меры бруса в \mathbb{R}^n | 2 |
| 1.3 | Разбиение бруса. Диаметр множества. Масштаб разбиения | 2 |
| 1.4 | Интегральная сумма Римана. Интегрируемость по Риману | 3 |
| 1.5 | Пример константной функции | 4 |
| 1.6 | Пример неинтегрируемая функция | 4 |
| 1.7 | Вычисление многомерного интеграла | 4 |
| 2 | Свойства кратных интегралов. Условия интегрирования. Лебегова мера | 6 |
| 2.1 | Необходимое условие интегрирования. | 6 |
| 2.2 | Свойства интеграла Римана | 6 |
| 2.3 | Множество меры нуль по Лебегу | 7 |
| 2.4 | Свойства множества меры нуль по Лебегу | 7 |
| 3 | Топология в \mathbb{R}^n | 10 |
| 3.1 | Критерий замкнутости | 11 |
| 4 | Компакты в \mathbb{R}^n | 12 |
| 4.1 | Замкнутый брус — компакт | 12 |
| 4.2 | Критерий компактности | 13 |

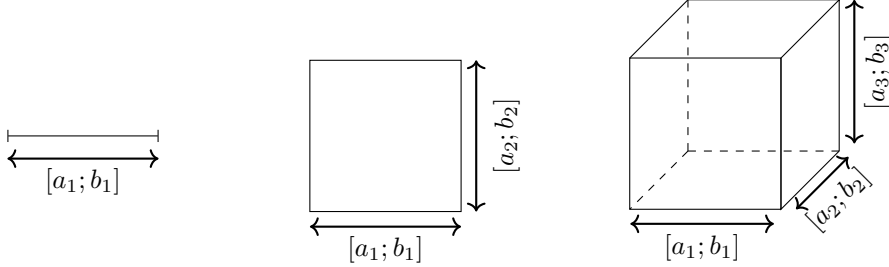
1 Кратные интегралы. Брусы. Интегрируемые функции по Риману

1.1 Брус. Мера бруса

Определение. Замкнутый брус (координатный промежуток) в \mathbb{R}^n — множество, описываемое как

$$I = \{x \in \mathbb{R}^n \mid a_i \leq x_i \leq b_i, i \in \{1, n\}\} \\ = [a_1, b_1] \times \dots \times [a_n, b_n]$$

Примечание. $I = \{a_1, b_1\} \times \dots \times \{a_n, b_n\}$, где $\{a_i, b_i\}$ может быть отрезком, интервалом и т.д.



Пример брусов размерности с 1 по 3

Определение. Мера бруса — его объём:

$$\mu(I) = |I| = \prod_{i=1}^n (b_i - a_i)$$

1.2 Свойства меры бруса в \mathbb{R}^n

1. **Однородность:** $\mu(I_{\lambda a, \lambda b}) = \lambda^n \cdot \mu(I_{a, b})$, где $\lambda \geq 0$
2. **Аддитивность:** Пусть I, I_1, \dots, I_k — брусы

Тогда, если $\forall i, j$ I_i, I_j не имеют общих внутренних точек, и $\bigcup_{i=1}^k I_i = I$, то

$$|I| = \sum_{i=1}^k |I_i|$$

3. **Монотонность:** Пусть I — брус, покрытый конечной системой брусов, то есть $I \subset \bigcup_{i=1}^k I_i$, тогда

$$|I| < \sum_{i=1}^k |I_i|$$

1.3 Разбиение бруса. Диаметр множества. Масштаб разбиения

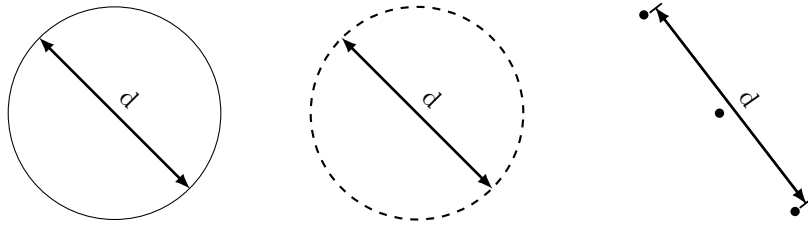
Определение. I — замкнутый, невырожденный брус и $\bigcup_{i=1}^k I_i = I$, где I_i попарно не имеют общих внутренних точек.

Тогда набор $\mathbb{T} = \{I_i\}_{i=1}^k$ называется разбиением бруса I

Определение. Диаметр произвольного ограниченного множества $M \subset \mathbb{R}^n$ будем называть

$$d(M) = \sup_{1 \leq i \leq k} \|x - y\|, \text{ где}$$

$$\|x - y\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$



Пример диаметра для разных ограниченных множеств (Для всех трёх он равен d)

Определение. Масштаб разбиения $\mathbb{T} = \{I_i\}_{i=1}^k$ — число $\lambda(\mathbb{T}) = \Delta_{\mathbb{T}} = \max_{1 \leq i \leq k} d(I_i)$

Определение. Пусть $\forall I_i$ выбрана точка $\xi_i \in I_i$. Тогда, набор $\xi = \{\xi_i\}_{i=1}^k$ будем называть **отмеченными точками**

Определение. Размеченное разбиение — пара (\mathbb{T}, ξ)

1.4 Интегральная сумма Римана. Интегрируемость по Риману

Пусть I — невырожденный, замкнутый брус, функция $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ определена на I

Определение. Интегральная сумма Римана функции f на (\mathbb{T}, ξ) — величина

$$\sigma(f, \mathbb{T}, \xi) := \sum_{i=1}^k f(\xi_i) \cdot |I_i|$$

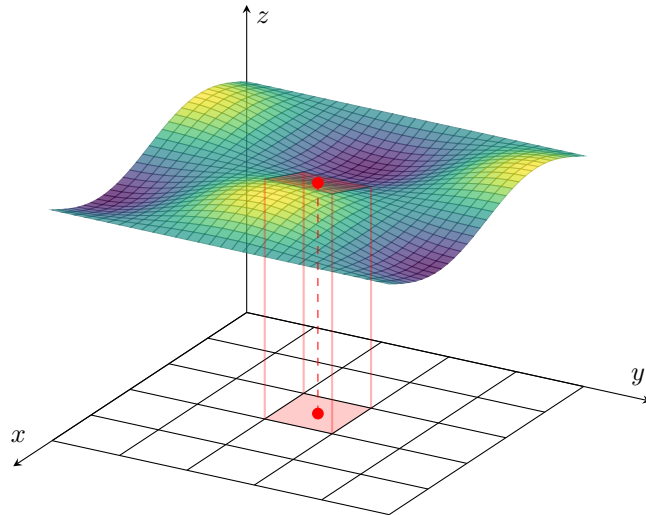
Определение. Функция f интегрируема (по Риману) на замкнутом бресе I ($f : I \rightarrow \mathbb{R}$), если

$$\exists A \in \mathbb{R} : \forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 : \forall (\mathbb{T}, \xi) : \Delta_{\mathbb{T}} < \delta : \\ |\sigma(f, \mathbb{T}, \xi) - A| < \varepsilon$$

Тогда

$$A = \int_I f(x) dx = \int_I \dots \int_I f(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n$$

Обозначение: $f \in \mathcal{R}(I)$



Пример интегрирования в \mathbb{R}^2 по определению

1.5 Пример константной функции

Пусть у нас есть функция $f = \text{const}$

$$\begin{aligned}\forall(\mathbb{T}, \xi) : \sigma(f, \mathbb{T}, \xi) &= \sum_{i=1}^k \text{const} \cdot |I_i| \\ &= \text{const} \cdot |I| \implies \int_I f(x) dx = \text{const} \cdot |I|\end{aligned}$$

1.6 Пример неинтегрируемая функция

Имеется брус $I = [0, 1]^n$, а также определена функция, такая что

$$f = \begin{cases} 1, & \forall i = \overline{1, \dots, n} \ x_i \in \mathbb{Q} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Доказательство. $\forall \mathbb{T}$ можно выбрать $\xi_i \in \mathbb{Q}$, тогда для такой пары $(\mathbb{T}, \bar{\xi})$:

$$\sigma(f, \mathbb{T}, \bar{\xi}) = \sum_{i=1}^k 1 \cdot |I_i| = |I| = 1$$

В то же время, $\forall \mathbb{T}$ можно выбрать $\xi_i \notin \mathbb{Q}$, тогда для такой пары $(\mathbb{T}, \hat{\xi})$:

$$\sigma(f, \mathbb{T}, \hat{\xi}) = \sum_{i=1}^k 0 \cdot |I_i| = 0 \implies f \notin \mathcal{R}(I)$$

1.7 Вычисление многомерного интеграла

Вычислите интеграл

$$\iint_{\substack{0 \leq x \leq 1 \\ 0 \leq y \leq 1}} xy dx dy$$

рассматривая его как представление интегральной суммы при сеточном разбиении квадрата

$$I = [0, 1] \times [0, 1]$$

на ячейки — квадраты со сторонами, длины которых равны $\frac{1}{n}$, выбирая в качестве точек ξ_i нижние правые вершины ячеек

Имеется функция $f = xy$, $|I| = \frac{1}{n^2}$

$$\sigma(f, \mathbb{T}, \xi) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{n-1} \frac{i}{n} \cdot \frac{j}{n} \cdot \frac{1}{n^2} = \frac{1}{n^4} \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{n-1} i \cdot j = \frac{1}{n^4} \sum_{i=1}^n i \sum_{j=0}^{n-1} j = \frac{n(n-1)}{n^4} \sum_{i=1}^n i = \frac{n^2(n+1)(n-1)}{4n^4}$$

Заметим, что $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^2(n+1)(n-1)}{4n^4} = \frac{1}{4}$

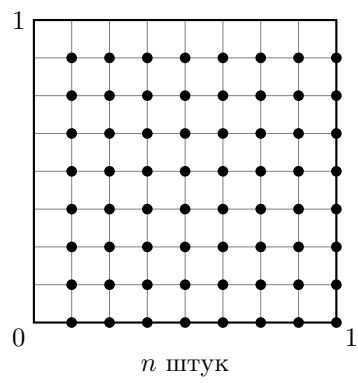


Рисунок того как мы выбираем в примере точки на разбиение

2 Свойства кратных интегралов. Условия интегрирования. Лебегова мера

2.1 Необходимое условие интегрирования.

Теорема. Пусть I — замкнутый брус.

$$f \in \mathcal{R}(I) \implies f \text{ ограничена на } I$$

Доказательство. От противного.

1. $f \in \mathcal{R}(I) \implies \exists A \in \mathbb{R}$, такая что $\forall \varepsilon > 0$, а значит для $\varepsilon = 1$ тоже:

$$\exists \delta > 0: \forall (\mathbb{T}, \xi) : \Delta_{\mathbb{T}} \leq \delta \text{ верно } |\sigma(f, \mathbb{T}, \xi) - A| < 1$$

Отсюда

$$A - 1 < \sigma < A + 1 \implies \sigma \text{ ограничена}$$

2. С другой стороны, так как предположили, что f — неограничена на I

$$\forall \mathbb{T} = \{I_i\}_{i=1}^k \quad \exists i_0: f \text{ неограничена на } I_{i_0}$$

Тогда рассмотрим интегральную сумму

$$\sigma(f, \mathbb{T}, \xi) = \sum_{i \neq i_0} f(\xi_i) \cdot |I_i| + f(\xi_{i_0}) \cdot |I_{i_0}|$$

Выбором подходящего ξ_{i_0} можно сделать $f(\xi_{i_0})$ сколь угодно большой $\implies \sigma$ будет не ограничена - противоречие

Из противоречия пунктов 1 и 2 следует, что

$$f \in \mathcal{R}(I) \implies f \text{ ограничена на } I$$

□

2.2 Свойства интеграла Римана

1. **Линейность.**

$$f, g \in \mathcal{R}(I) \implies (\alpha f + \beta g) \in \mathcal{R}(I) \quad \forall \alpha, \beta \in \mathbb{R}$$

И верно, что:

$$\int_I (\alpha f + \beta g) dx = \alpha \int_I f dx + \beta \int_I g dx$$

Доказательство.

$$\begin{aligned} f \in \mathcal{R}(I) : \exists A_f, \text{ что } \quad \forall \varepsilon > 0 \exists \delta_1 > 0 \quad \forall (\mathbb{T}, \xi) : \Delta_{\mathbb{T}} < \delta_1 \quad \text{верно } \left| \sigma(f, \mathbb{T}, \xi) - \int_I f dx \right| &=: |\sigma_f - A_f| < \frac{\varepsilon}{|\alpha| + |\beta| + 1} \\ g \in \mathcal{R}(I) : \exists A_g, \text{ что } \quad \forall \varepsilon > 0 \exists \delta_2 > 0 \quad \forall (\mathbb{T}, \xi) : \Delta_{\mathbb{T}} < \delta_2 \quad \text{верно } \left| \sigma(g, \mathbb{T}, \xi) - \int_I g dx \right| &=: |\sigma_g - A_g| < \frac{\varepsilon}{|\alpha| + |\beta| + 1} \end{aligned}$$

Тогда $\forall (\mathbb{T}, \xi) : \Delta_{\mathbb{T}} < \min(\delta_f, \delta_g) = \delta :$

$$\begin{aligned} |\sigma(\alpha f + \beta g, \mathbb{T}, \xi) - \alpha A_f - \beta A_g| &= \left| \sum (\alpha f(\xi_i) + \beta g(\xi_i)) \cdot |I_i| - \alpha A_f - \beta A_g \right| \leq \\ &\leq |\alpha| \cdot |\sigma_f - A_f| + |\beta| \cdot |\sigma_g - A_g| < (|\alpha| + |\beta|) \frac{\varepsilon}{|\alpha| + |\beta| + 1} < \varepsilon \end{aligned}$$

□

Монотонность

$$f, g \in \mathcal{R}(I); f \leq g \text{ на } I \implies \int_I f dx \leq \int_I g dx$$

Доказательство.

$$f \in \mathcal{R}(I) \implies \exists A_f \in \mathbb{R}: \forall \varepsilon > 0 \exists \delta: \forall (\mathbb{T}, \xi): \Delta_{\mathbb{T}} < \delta, \text{ выполняется } |\sigma_f - A_f| < \varepsilon$$

Аналогично для $g \in \mathcal{R}(I)$, тогда:

$$\begin{cases} A_f - \varepsilon < \sigma_1 < A_f + \varepsilon \\ A_g - \varepsilon < \sigma_2 < A_g + \varepsilon \\ \sigma_f \leq \sigma_g \end{cases}$$

Отсюда

$$A_f - \varepsilon < \sigma_f \leq \sigma_g < A_g + \varepsilon \implies A_f - \varepsilon < A_g + \varepsilon \implies A_f < A_g + 2\varepsilon \quad \forall \varepsilon > 0$$

□

Оценка интеграла (сверху)

$$f \in \mathcal{R}(I) \implies \left| \int_I f dx \right| \leq \sup_I |f| |I|$$

Доказательство. По необходимому условию для интегрируемости функции (см. ниже)

$$\begin{aligned} f \in \mathcal{R}(I) &\implies f \text{ Ограничена на } I \\ &\implies -\sup_I |f| \leq f \leq \sup_I |f| \end{aligned}$$

Тогда,

$$\begin{aligned} -\int_I \sup |f| dx &\leq \int_I f dx \leq \int_I \sup |f| dx \\ -\sup |f| |I| &\leq \int_I f dx \leq \sup |f| |I| \end{aligned}$$

□

2.3 Множество меры нуль по Лебегу

Определение. Множество $M \subset \mathbb{R}^n$ будем называть **множеством меры 0 по Лебегу**, если $\forall \varepsilon > 0$ существует не более чем счетный набор (замкнутых) брусков $\{I_i\}$ и выполняются:

- $M \subset \bigcup_i I_i$
- $\sum_i |I_i| < \varepsilon \quad \forall \varepsilon > 0$

Пример: $a \in \mathbb{R}$ — точка.

$$I = [a - \frac{\varepsilon}{3}, a + \frac{\varepsilon}{3}] \implies |I| = \frac{2\varepsilon}{3} < \varepsilon \quad \forall \varepsilon > 0 \implies a \text{ — множество меры нуль по Лебегу}$$

2.4 Свойства множества меры нуль по Лебегу

1. Если в определении $\{I_i\}$ заменить на открытые брусы, то определение останется верным.

Доказательство. Пусть $\{I_i\}$ — открытые брусы, тогда $\forall \varepsilon > 0 \exists$ не более чем счетный набор $\{I_i\}$: $M \subset \bigcup_i I_i$ и $\sum |I_i| < \varepsilon$

Пусть $\{\bar{I}_i\}$ — открытые брусы + границы = замкнутые брусы I_i , причём объем “добавленных” плоскостей будет нулевой, так как объем бруса $n - 1$ размерности, будет нулевым для объема бруса размерности n

$$M \subset \bigcup_i I_i \subset \bigcup_i \bar{I}_i, \text{ при этом } |I_i| = |\bar{I}_i|$$

Если

$$\forall \varepsilon \exists \{I_i\} : M \subset \bigcup_i I_i : \sum_i |I_i| < \varepsilon$$

то

$$\forall \varepsilon \exists \{\bar{I}_i\} : M \subset \bigcup_i \bar{I}_i : \sum_i |\bar{I}_i| < \varepsilon$$

Докажем в обратную сторону. Мы хотим увеличить замкнутый брус в два раза и увеличенный брус взять открытым.

Пусть $\{I_i\}$ — набор замкнутых брусов

$$I_i = [a_i^1, b_i^1] \times \dots \times [a_i^n, b_i^n], \quad V_i = \sum_i |I_i| < \frac{\varepsilon}{2^n}$$

Так как $\left(\frac{a_i^k}{2}, \frac{b_i^k}{2}\right)$ — центр i -го бруса в k -ом измерении, увеличить изначальный брус в два раза по этому измерению можно сдвинувшись от центра не на половину, а на целую сторону, то есть на $b_i^k - a_i^k$

Таким образом:

$$\tilde{I}_i = \left(\frac{a_i^1 + b_i^1}{2} - (b_i^1 - a_i^1); \frac{a_i^1 + b_i^1}{2} + (b_i^1 - a_i^1)\right) \times \dots \times \left(\frac{a_i^n + b_i^n}{2} - (b_i^n - a_i^n); \frac{a_i^n + b_i^n}{2} + (b_i^n - a_i^n)\right)$$

$$\implies V_2 = \sum_i |\tilde{I}_i| = 2^n \cdot V_1 < \varepsilon$$

□

Если $M \subset \mathbb{R}^n$ - множество меры нуль по Лебегу, то из $L \subset M \implies L$ - множество меры нуль по Лебегу

Доказательство. Докажем по транзитивности

$$\forall \varepsilon > 0, \exists \text{ не более чем счетный набор } \{I_i\} : L \subset M \subset \bigcup_i I_i \implies L \subset \bigcup_i I_i$$

По условию нам дано, что для $M \subset \bigcup_i I_i$ верно $\sum_i |I_i| < \varepsilon$, и тоже самое выполнено и для $L \subset \bigcup_i I_i$, тогда L по определению является множеством меры нуль по Лебегу

□

Не более чем счетное объединение множеств меры нуль по Лебегу, тоже является множеством меры нуль по Лебегу

Доказательство. пусть $M = \bigcup_i^\infty M_k$ - объединение не более чем счетного числа множеств $\forall k M_k$ - множество меры нуль по Лебегу $\implies \forall k, \forall \varepsilon > 0 \exists \{I_i\}_{i=1}^\infty$ по определению множества меры нуль для них верно

- $M_k \subset \bigcup_i^\infty I_i^k$ ¹
- $\sum_i |I_i| < \varepsilon_k \quad \forall \varepsilon_k > 0$

¹ I_i^k - это i -ый для M_k , а не степень

Отсюда получаем $M = \bigcup_i^\infty M_k \subset \bigcup_i^\infty I_i^k$ и $\sum_{k=1}^\infty \sum_{i=1}^\infty |I_i^k| < \sum_{k=1}^\infty \varepsilon_k$ - если теперь взять $\varepsilon_k = \frac{\varepsilon}{2^k}$, то мы получим

$$\sum_{k=1}^\infty \varepsilon_k = \sum_{k=1}^\infty \frac{\varepsilon}{2^k} < \varepsilon$$

□

3 Топология в \mathbb{R}^n

Определение. Пусть имеется $M \subset \mathbb{R}^n$. Точку $x_0 \in M$ будем называть *внутренней* точкой M , если

$$\exists \varepsilon > 0 : B_\varepsilon(x_0) \subset M$$

Определение. Точку $x_0 \in M$ будем называть *внешней* точкой M , если

$$\exists \varepsilon > 0 : B_\varepsilon(x_0) \subset (\mathbb{R}^n \setminus M)$$

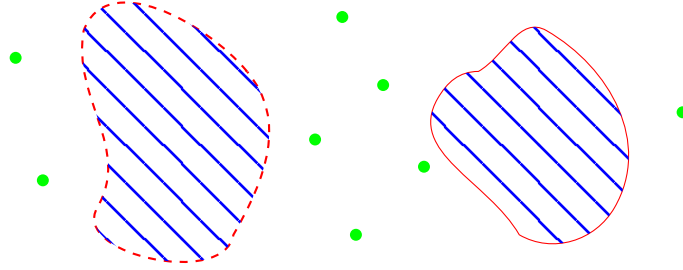
Пример. $M = [0; 1)$. тогда

$$\begin{cases} x = 0.5 & \text{— внутренняя} \\ x = 0 & \text{— не внутренняя} \\ x = 2 & \text{— внешняя} \end{cases}$$

Определение. Точку $x_0 \in \mathbb{R}^n$ будем называть *граничной* точкой M , если

$$\forall \varepsilon > 0 : (B_\varepsilon(x_0) \cap M) \neq \emptyset \wedge B_\varepsilon(x_0) \cap (\mathbb{R}^n \setminus M) \neq \emptyset$$

Обозначение. ∂M — множество всех граничных точек M



Синяя область - пример множества внутренних точек

Зеленые - пример внешних (изображена часть точек)

Красные границы - пример множества граничных точек (пример ∂M)

Пример. $M = [0; 1) \Rightarrow x = 0; 1$ — граничные

Определение. Точку $x_0 \in M$ будем называть *изолированной* точкой M , если

$$\exists \varepsilon > 0 : \overset{\circ}{B}_\varepsilon(x_0) \cap M = \emptyset$$

Пример. $M = [0; 1] \cup \{3\} \Rightarrow x = 3$ — изолированная

Определение. Точку $x_0 \in \mathbb{R}^n$ будем называть *предельной* точкой M , если

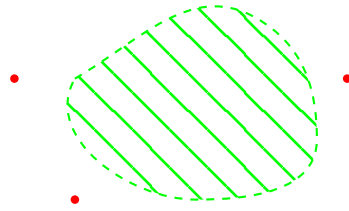
$$\forall \varepsilon > 0 : \overset{\circ}{B}_\varepsilon(x_0) \cap M \neq \emptyset$$

Примечание. Из определения следует, что изолированные точки не являются предельными

Определение. Точку $x_0 \in \mathbb{R}^n$ будем называть *точкой прикосновения* M , если

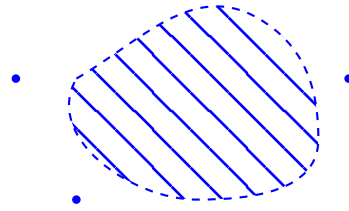
$$\forall \varepsilon > 0 : B_\varepsilon(x_0) \cap M \neq \emptyset$$

Примечание. Точки прикосновения = изолированные точки \oplus предельные точки



Пример точек

Красные - изолированные. Зелёные - предельные



Синие точки - точки прикосновения

Определение. Множество всех точек прикосновения M называется *замыканием* M и обозначается как \overline{M}

Пример. $M = (0; 1) \cup (1; 2] \implies \overline{M} = [0; 2]$

Пример. $M = \{x \in [0; 1] : x \in \mathbb{Q}\} \implies \overline{M} = [0; 1]$

Определение. Множество $M \subset \mathbb{R}^n$ называется *открытым*, если все его точки внутренние

Определение. Множество $M \subset \mathbb{R}^n$ называется *замкнутым*, если $\mathbb{R}^n \setminus M$ — открыто

Пример. $\begin{cases} (0; 1) & \text{— открыто в } \mathbb{R} \\ [0; 1] & \text{— замкнуто, т.к. } (-\infty; 0) \cup (1; +\infty) \text{ открыто в } \mathbb{R} \\ [0; 1) & \text{— ни открыто, ни замкнуто в } \mathbb{R} \end{cases}$

Определение. Множество $K \subset \mathbb{R}^n$ называется *компактом*, если из \forall его покрытия открытыми множествами можно выделить конечное подпокрытие

Примечание. Если хотя бы для какого-то покрытия это не выполняется, то K — не компакт

Пример. Пусть $M = (0; 1)$ покроем $\left\{ A_n = \left(0; 1 - \frac{1}{n} \right) \right\}_{n=1}^{\infty}$

При $n \rightarrow \infty$ $M \subset \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n$, но \forall фиксированного N : $M \not\subset \bigcup_{n=1}^N A_n \implies$ не компакт

Определение. Множество $M \subset \mathbb{R}^n$ — называется *ограниченным*, если

$$\exists x_0 \in \mathbb{R}^n \text{ и } \exists r > 0, \text{ такой что } M \subset B_r(x_0)$$

3.1 Критерий замкнутости

Теорема. M — замкнуто $\iff M$ содержит все свои предельные точки

Доказательство. Докажем необходимость и достаточность

1. (Необходимость) Докажем \implies от противного

- Пусть x_0 — предельная для M и $x_0 \notin M$. Тогда, $\forall \varepsilon > 0$ $\overset{\circ}{B}_\varepsilon(x_0) \cap M \neq \emptyset$ и $x_0 \in \mathbb{R}^n$
- По условию M — замкнуто, то есть $\mathbb{R}^n \setminus M$ — открыто \implies все его точки внутренние и $\exists r > 0$:

$$B_r(x_0) \subset \mathbb{R}^n \setminus M \implies \overset{\circ}{B}_r(x_0) \subset \mathbb{R}^n \setminus M \text{ и } \overset{\circ}{B}_r(x_0) \cap M = \emptyset$$

Пришли к противоречию $\implies M$ содержит все свои предельные точки □

2. (Достаточность) Докажем \Leftarrow

Пусть y_0 — не является предельной для M , то есть $y_0 \in \mathbb{R}^n \setminus M \implies \exists r > 0$:

$$\begin{cases} \overset{\circ}{B}_r(y_0) \cap M = \emptyset \\ y_0 \in \mathbb{R}^n \setminus M \end{cases} \implies B_r(y_0) \subset \mathbb{R}^n \setminus M$$

$\implies \mathbb{R}^n \setminus M$ — открытое и состоит из всех точек, не являющихся предельными $\implies M$ — замкнуто по определению □

4 Компакты в \mathbb{R}^n

4.1 Замкнутый брус — компакт

Теорема. Пусть $I \subset \mathbb{R}^n$ — замкнутый брус $\implies I$ — компакт

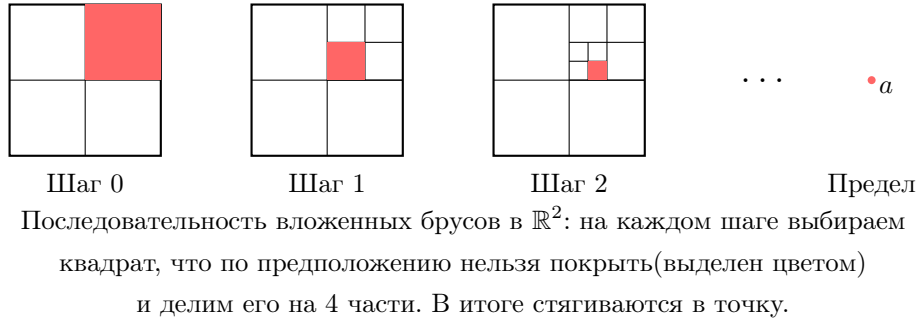
Доказательство. Пойдем от противного

Пусть $I = [a_1; b_1] \times \dots \times [a_n; b_n]$

1. Положим, что I — не компакт. Значит, существует его покрытие $\{A_\alpha\}$ — открытые множества, такие что $I \subset \{A_\alpha\}$, не допускающее выделения конечного подпокрытия
2. Поделим каждую сторону пополам. Тогда, $\exists I_1$, такой что не допускает конечного подпокрытия. Иначе, I — компакт
3. Аналогично, повторим процесс и получим систему вложенных брусков:

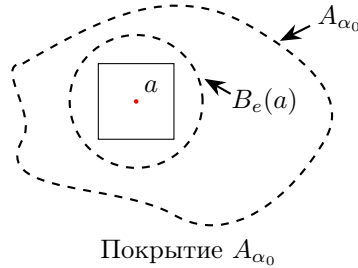
$$I \supset I_1 \supset I_2 \supset \dots$$

То есть на каждой стороне возникает последовательность вложенных отрезков, которые стягиваются в точку $a = (a_1, \dots, a_n)$



При этом, $\exists a = \bigcap_{i=1}^{\infty} I_i$

4. $a \in I \implies a \in \bigcup A_\alpha \implies \exists \alpha_0 : a \in \underbrace{A_{\alpha_0}}_{\text{открытое}} \implies \exists \varepsilon > 0 : B_\varepsilon(a) \subset A_{\alpha_0}$



5. Из построения получили, что $I \supset I_1 \supset \dots \supset a \implies \exists N : \forall n > N \ I_n \subset B_\varepsilon(a) \subset A_{\alpha_0}$

Получается, что $\forall n > N \ I_n$ покрывается одним лишь A_{α_0} из системы $\{A_\alpha\}$

Получаем противоречие тому, что любое I_n не допускает конечного подпокрытия, а у нас получилось, что $I_n \in A_{\alpha_0} \forall n > N \implies I$ — компакт □

Примечание. Любое ограниченное множество можно вписать в замкнутый брус. Потому что можно вокруг него описать шарик, который точно можно вписать в брус

4.2 Критерий компактности

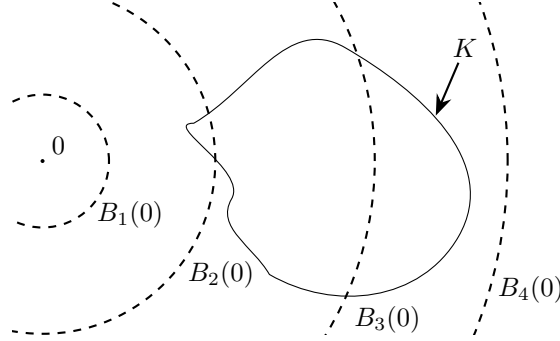
Теорема. $K \subset \mathbb{R}^n$. K — компакт $\iff K$ замкнуто и ограничено

Доказательство. Докажем необходимость (\implies)

- *Ограниченность.* K — компакт $\implies \forall \{A_\alpha\}_{\alpha \in \mathbb{N}}$ — можно выделить конечное подпокрытие \implies

\implies Пусть $\{A_\alpha\} = \{B_n(0)\}_{n=1}^\infty \implies \exists N \in \mathbb{N} : \forall n > N \ K \subset \bigcup_{n=1}^N B_n(0)$ и так как $B_n(0)$ — вложены шары \implies

$\implies K \subset B_N(0) \implies$ по определению K — ограничено



Пример покрытия K вокруг точки 0 с помощью шаров

- *Замкнутость.* Пойдем от противного. K — компакт, тогда возьмем $\{B_{\frac{\delta(x)}{2}}(x)\}_{x \in K}$ — покрытие открытыми шарами, где $\delta(x) = \rho(x, x_0)$. x_0 — предельная точка, которая $\notin K$ (или же $\in \mathbb{R}^n \setminus K$)

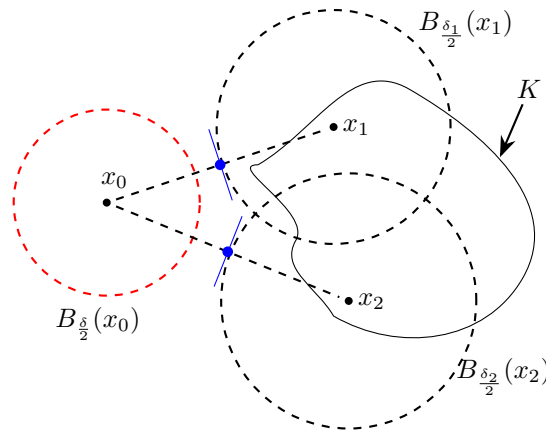
Так как K — компакт, $\exists x_1, \dots, x_s : K \subset \bigcup_{i=1}^s B_{\frac{\delta(x_i)}{2}}(x_i)$

Пусть $\delta = \min_{1 \leq i \leq s} \delta(x_i)$, тогда

$$B_{\frac{\delta}{2}}(x_0) \cap \bigcup_{i=1}^s B_{\frac{\delta(x_i)}{2}}(x_i) = \emptyset \implies B_{\frac{\delta}{2}}(x_0) \subset \mathbb{R}^n \setminus K$$

$$\implies \overset{\circ}{B}_{\frac{\delta}{2}}(x_0) \cap K = \emptyset$$

Значит, x_0 не является предельной точкой K , что противоречит нашему предположению



Пример как мы строим $B_{\frac{\delta}{2}}$ вокруг точки x_0 .

Синие точки — середины отрезков на которых они лежат

Доказательство. Докажем достаточность

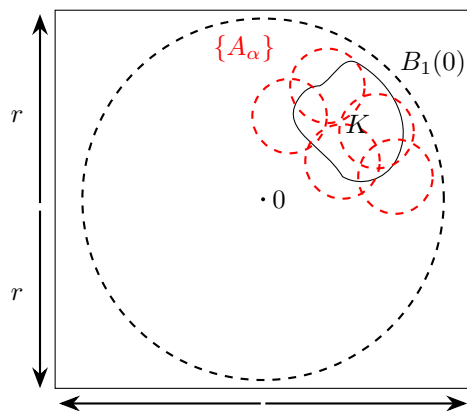
K — замкнуто и ограничено $\implies \exists r > 0 : B_r(0) \supset K \implies \exists I$ — замкнутый брус, такой что

$$K \subset I \text{ и } I = [-r; r]^n$$

Пусть $\{A_\alpha\}_{\alpha \in \mathbb{N}}$ — произвольное покрытие открытыми множествами для K . Тогда, $I \subset \{A_\alpha\} \cup \underbrace{\{\mathbb{R}^n \setminus K\}}_{\text{открыто}}$. Так как I — компакт, то \exists конечное подпокрытие

$$\{A_{\alpha_i}\}_{i=1}^m \cup \{\mathbb{R}^n \setminus K\} \supset I \supset K \text{ — покрытие для } I$$

Значит, $K \subset \{A_{\alpha_i}\}_{i=1}^m$ — конечное и $\{A_\alpha\}$ — произвольное, тогда K — компакт по определению □



Строим замкнутый брус вокруг точки 0, пользуясь существованием конечного покрытия покрываем наш компакт K