Меры и меры по борьбе с ними

Лектор: А. А. Лодкин
Записал :taxus

6 июня 2017 г.

А эти множества?
Какой для них язык?.. Горé душа летит,
Все необъятное в единый вздох теснится,
И лишь молчание понятно говорит.

Студент на экзамене по теории меры

Оглавление

Глава 1: Теория меры и интегралы по мере

Билет № 1: Системы множеств

Определение 1. Пусть здесь (и дальше) X — произвольное множество. Тогда $\mathcal{P}(X) \equiv 2^X$ — множество всех подмножеств X.

E.g. $X = \{1 \,..\, n\} \Rightarrow \#\mathcal{P}(X) = 2^n$ (это количество элементов, если что)

Определение 2 (Алгебра)**.** Пусть $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$. Тогда $\mathcal{A}$ — алгебра множеств, если

1. $\varnothing \in \mathcal{A}$
2. $X \in \mathcal{A}$
3. $A, B \in \mathcal{A} \Rightarrow A \cap B, A \cup B, A \setminus B \in \mathcal{A}$

Замечание. Заметим, что в алгебре пересечение (или объединение) *конечного* числа её элементов лежит в алгебре. Это можно доказать простой индукцией. А вот для бесконечных объединений пользоваться индукцией уже нельзя, ведь $\infty \notin \mathbb{N}$.

Определение 3 (σ-алгбера)**.** Пусть $\mathcal{A} \in \mathcal{P}(X)$. Тогда $\mathcal{A}$ — σ-алгебра, если

1. $\mathcal{A}$ — алгебра
2. $A_1, \ldots, A_n \in \mathcal{A} \Rightarrow \bigcup\limits_{k=1}^{\infty} A_k \in \mathcal{A}, \bigcap\limits_{k=1}^{\infty} A_k \in \mathcal{A}$

Определение 4. Пусть $\mathcal{E} \subset \mathcal{P}(X)$. Тогда

$$\sigma(\mathcal{E}) := \bigcap \{\mathcal{A} \mid \mathcal{A} \text{ — } \sigma\text{-алгебра, } \mathcal{A} \supset \mathcal{E}\}$$

эта конструкция — сигма-алгебра, просто аксиомы проверить.

Билет № 2: Борелевская сигма-алгебра

Определение 1. Пусть $\mathcal{O}$ — все открытые множества в $\mathbb{R}^n$. Тогда $\mathcal{B}_n = \sigma(\mathcal{O})$ — борелевская σ-алгебра в $\mathbb{R}^n$.

Определение 2 (Ячейка в $\mathbb{R}^n$)**.** Обозначать её будем Δ^n, по размерности соответствующего пространства.

$$\Delta^1 = \begin{cases} [a; b) \\ (-\infty; b) \\ [a; +\infty) \\ (-\infty; +\infty) \end{cases} \qquad \forall\, n \;\; \Delta = \prod_{k=1}^{n} \Delta_k^1$$

Ещё введём алгебру $\mathcal{A} = \mathcal{C}ell_n = \{A \mid A = \bigcup\limits_{k=1}^{p} \Delta_k\}$

Лемма 1. *Пусть* $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2 \subset \mathcal{P}(X)$, $\sigma(\mathcal{E}_1) \supset \mathcal{E}_2$. *Тогда* $\sigma(\mathcal{E}_1) \supset \sigma(\mathcal{E}_2)$

▼
$\sigma(.)$ от обеих частей.
▲

Теорема 2. $\mathcal{B}_n = \sigma(\mathcal{Cell}_n)$.

□

$\sigma(\mathcal{O}) \supset \mathcal{Cell}$ Покроем открытыми квадратиками.

$\sigma(\mathcal{Cell}) \supset \mathcal{O}$ Для упрощения жизни $\mathcal{O} \supset G \in \mathbb{R}^2$. Рассмотрим классы ячеек

$$\mathcal{C}_k = \left\{ \left[\frac{m}{2}; \frac{m+1}{2^k}\right) \times \left[\frac{n}{2}; \frac{n+1}{2^k}\right) \subset G \;\middle|\; m, n \in \mathbb{Z} \right\}$$

Осталось показать, что любую точку из G покрывает ячейка какого-то класса.

Каждая точка открытого множества входит с какой-то окрестностью, которую можно считать обединением множеств из базы топологии. Короче, есть маленький открытый квадратик, содержащий точку.

Так что теперь можно думать просто про одномерье. Ясно, что

$$\exists\, m, k \;::\; \begin{cases} x - \varepsilon < \frac{m}{2^k} < x \\ x + \varepsilon > \frac{m+1}{2^k} > x \end{cases}$$

Для этого хватит, чтобы $|x - \varepsilon; x| > \frac{1}{2^k}$, например.

■

Пример 1. Все множества нижё — борелевские.

⟨1⟩ $\mathcal{O}$.

⟨2⟩ $\mathcal{F} = \{A \mid \overline{A} \in \mathcal{O}\}$.

⟨3⟩ $\left(A = \bigcap\limits_{\substack{k=1 \\ G_k \in \mathcal{O}}}^{\infty} G_k\right) \in G_\delta$.

⟨4⟩ $\left(B = \bigcup\limits_{\substack{k=1 \\ F_k \in \mathcal{F}}}^{\infty} F_k\right) \in F_\sigma$.

⟨5⟩ $\left(C = \bigcup\limits_{\substack{k=1 \\ A_k \in G_\delta}}^{\infty} A_k\right) \in G_{\delta\sigma}$.

У всех этих множеств со сложными индексами δ — пересечение, σ — объединение, G — операция над открытыми в самом начале, F — над замкнутыми.

Билет № 3: Мера

Определение 1. Пусть задано X, $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$, $A_k \in \mathcal{A}$. Тогда $\mu\colon \mathcal{A} \to [0; +\infty]$ — мера, если

1. $\mu(\varnothing) = 0$
2. $\mu\Bigg(\underbrace{\bigsqcup_{k=1}^{\infty} A_k}_{\in \mathcal{A}}\Bigg) = \sum_{k=1}^{\infty} \mu(A_k)$. Здесь никто не обещает, что будет именно σ-алгебра.

Множества $A \in \mathcal{A}$ в таком случае называются μ-измеримыми.

Пример 1. $a \in X$, $\mu(A) = \begin{cases} 1, & a \in A \\ 0, & a \notin A \end{cases}$ — δ-мера Дирака.

Пример 2. $a_k \in x$, $m_k \geqslant 0$, $\mu(a) := \sum\limits_{k\colon a_k \in a} m_k$ — «молекулярная» мера.

Пример 3. $\mu(A) = \#A$ — считающая мера. [1]

Билет № 4: Свойства меты

Здесь всюду будем рассматривать тройку $(X, \mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X), \mu)$

Утверждение 1 (Монотонность меры)**.** *Пусть* $A, B \in \mathcal{A}$*,* $A \subset B$*.*
Тогда $\mu(A) \leqslant \mu(B)$*.*

▼
$B = A \sqcup C$. Дальше очевидно
▲

Утверждение 2. *Пусть* $A, B \in \mathcal{A}$*,* $A \subset B$*,* $\mu(B) < +\infty$*.*
Тогда $\mu(B \setminus A) = \mu(B) - \mu(A)$*.*

Мемы A, B конечны, иначе нельзя вычитать.

Утверждение 3 (Усиленная монотонность)**.** *Пусть* $A_{1..n}, B \in \mathcal{A}$*,* $\bigsqcup_i A_i \subset B$ *.*

Тогда $\sum\limits_{k=1}^{n} \mu(A_k) \leqslant \mu B$

Утверждение 4 (Полуаддитивность меры)**.** *Пусть* $B_{1..n}, A \in \mathcal{A}$*,* $A \subset \bigcup\limits_{k=1}^{n} B_k$*.*

Тогда $\mu A \leqslant \sum\limits_{k=1}^{n} \mu(B_k)$*.*

▼
Сделать B_k дизъюнктными: $C_k = B_k \setminus \bigcup\limits_{j<k} B_k$. Затем представить A как дизъюнктное объединение D_k: $D_k = C_k \cap A$. Так можно сделать, потому что

$$A = A \cap \bigcup_{k=1}^{n} B_k = A \cap \bigsqcup_{k=1}^{n} C_k = \bigsqcup_{k=1}^{n} A \cap C_k$$

[1] она считает, не считывает ⌣̈

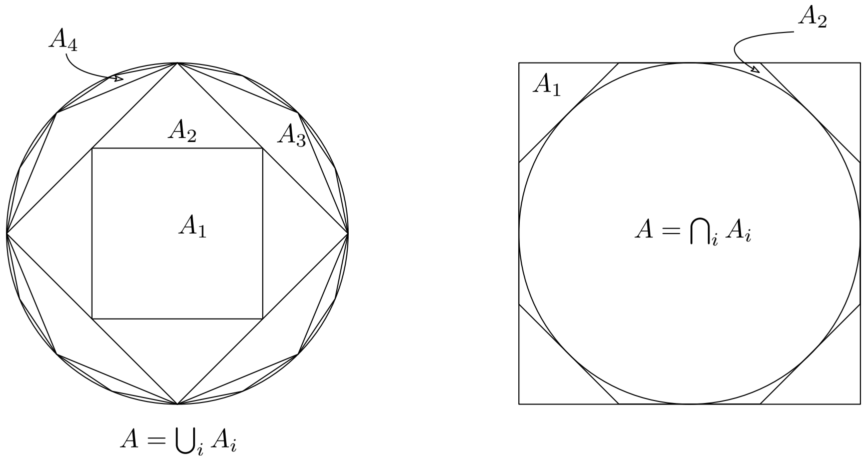


Рис. 1.1: Метод исчерпывания Евдокса

Ну а тогда
$$\mu(A) = \sum_k \mu D_k \leqslant \sum_k \mu C_k \leqslant \sum_k \mu B_k$$

▲

Утверждение 5 (Непрерывность меры снизу)**.** *Пусть* $A_1 \subset A_2 \subset \cdots$, $A_k \in \mathcal{A}$, $\left(A = \bigcup_{k=1}^{\infty} A_k\right) \in \mathcal{A}$. [1]

Тогда $\mu A = \lim_{n \to \infty} \mu A_n$

▼
Строим разности $C_k = A_{k+1} \setminus A_k$,$C_0 = A_1$ а $A = \bigsqcup_k C_k$.

Вот ещё картинка: 1.1, для пущей очевидности.
▲

Утверждение 6 (Непрерывность меры сверху)**.** *Пусть* $A_1 \supset A_2 \supset \cdots$, $A_k \in \mathcal{A}$, $A = \bigcap_{k=1}^{\infty} A_k \in \mathcal{A}$, $\mu A_1 < +\infty$.

Тогда $\mu A = \lim_{n \to \infty} \mu A_n$

▼
Сначала заметим, что все меры сделаны конечными, ведь нужно считать разности мер, а это так себе.

Снова сделаем разности $C_k = A_k \setminus A_{k+1}$
$$\bigsqcup_{k=1}^{n} C_k = A_1 \setminus A_{n+1} \Rightarrow \mu(A_{n+1}) = \mu(A_1) - \mu\left(\bigsqcup_{k=1}^{n} C_k\right)$$

Понятно, что
$$\lim_{n \to \infty} \bigsqcup_{k=1}^{n} C_k \sqcup A = \bigsqcup_{k=1}^{\infty} C_k \sqcup A = A_1$$

[1]Опять-таки никто не сказал, что $\mathcal{A}$ — σ-алгебра.

Так что
$$\lim_{n\to\infty} \mu\left(\bigsqcup_{k=1}^{n} C_k\right) = \mu(A_1) - \mu(B)$$
Но тогда
$$\lim_{n\to\infty} \mu(A_n) = \lim_{n\to\infty} \mu(A_{n+1}) = \mu B$$

▲

Определение 1. Пусть задана тройка $(X, \mathcal{A}_\sigma, \mu)$. Тогда μ — полная, если
$$\forall\, A \in \mathcal{A} : \mu A = 0 \;\; \forall\, B \subset A, B \in \mathcal{A} \;::\; \mu B = 0$$

Определение 2. Мера μ на $\mathcal{A}$ называется σ-конечной, если
$$\exists\, X_n \in \mathcal{A}, \mu X_n < +\infty \;::\; \bigcup_{n=1}^{\infty} X_n = X$$

Определение 3. Пусть $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2$ — сигма-алгебры подмножеств X, $\mathcal{A}_1 \subset \mathcal{A}_2$, $\mu_1 \colon \mathcal{A}_1 \to [0; +\infty]$, $\mu_2 \colon \mathcal{A}_2 \to [0; +\infty]$. Тогда μ_2 называется продолжением μ_1.

Теорема 7 (Лебега-Каратеодора)**.** *Пусть μ — сигма-конечная мера на $\mathcal{A}$. Тогда*

1. *Существуют её полные сигма-конечные продожения*
2. *Среди них есть наименьшее: $\overline{\mu}$. Её ещё называют стандартным продолжением.*

Определение 4 (Внешняя мема)**.** Пусть $E \subset X$. Положим
$$\mu^*(E) := \inf\left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \mu A_k \;\middle|\; A_k \in \mathcal{A}, E \subset \bigcup_{k=1}^{\infty} A_k \right\}$$
Тогда μ^* — внешняя мема, порождённая μ. Она не мера.

Пример 1. Например, сигма-алгебра из вертикальных полос на квадратике. Аддитивность сломается, если взять 2 непересекающихся горизонтальных «лоскутка» один по другим.

Так, вот про идею доказательства. Внешняя мема — очень привлекательная вещь, но не мера.

Давайте разрешим лишь определённый набор множеств. Назовём их хорошо разбивающими.

Определение 5. Пусть $E \subset A$. Тогда E — хорошо разбивающее, если
$$\forall\, A \in \mathcal{A} \;::\; \mu A = \mu^*(A \cap E) + \mu^*(A \setminus E)$$

Хорошо разбивающие явно содержат исходную алгебру.

Для тех же вертикальных полос в хорошо разбивающие попадут все множества, проектирующиеся в точку на ось $\perp$ полосками.

Билет № 5: Объём в $\mathbb{R}^n$. Мера Лебега

Определение 1. Пусть $\Delta = \Delta_1 \times \cdots \times \Delta_n$, $\Delta_k = [a_k, b_k)$. Тогда

$$v_1\Delta_k \equiv |\Delta_k| := \begin{cases} b_k - a_k, & a_k \in \mathbb{R} \wedge b_k \in \mathbb{R} \\ \infty, & \text{иначе} \end{cases}$$

$$v\Delta \overset{(\in R^n)}{\equiv} v_n\Delta := |\Delta_1| \cdots |\Delta_n|$$

Для всего, что $\in \mathcal{C}ell_n$, представим его в виде дизъюнктного объединения Δ_j. Тогда $vA := \sum_{j=1}^{q} v\Delta_j$.

Замечание. Здесь радикально всё равно, входят ли концы — у них мера ноль.

Теорема 1. *v — конечно-аддитивен, то есть*

$$\forall\, A, A_{1..p} \in \mathcal{C}ell\,, A = \bigsqcup_{k=1}^{p} A_k \;\;::\; vA = \sum_{k=1}^{p} vA_k$$

$\square$ На клеточки побить. $\blacksquare$

Теорема 2. *v — счётно-аддитивен, то есть*

$$\forall\, A, A_{1..} \in \mathcal{C}ell\,, A = \bigsqcup_{k=1}^{\infty} A_k \;\;::\; vA = \sum_{k=1}^{\infty} vA_k$$

Сначала докажем маленькую лемму.

Лемма 3. *Пусть Δ — ограниченная ячейка в $\mathbb{R}^n$. Тогда*

$$\exists\, \Delta' \in \mathcal{O}, \Delta'' \in \mathcal{F} \;::\; \begin{cases} v\Delta' < v\Delta + \varepsilon \\ v\Delta'' > v\Delta - \varepsilon \end{cases}$$

$\blacktriangledown$

Например, для $\Delta = \prod_k [a_k; b_k)$

$$\Delta_i' = \prod_{k=1}^{n} \left(a_k - \frac{1}{i}; b_k\right)$$

$$\Delta_i'' = \prod_{k=1}^{n} \left[a_k; b_k - \frac{1}{i}\right]$$

Увеличивая i можно добраться до любого ε.

$\blacktriangle$

$\square$ (*Счётной аддитивности объема*) Здесь в конспекте лишь частный случай про ячейки. А по-хорошему $\mathcal{C}ell$ содержит и любые конечные объединения ячеек. Утверждается, что там тоже самое, только возни сильно больше.

Пусть $A = \Delta$, $A_k = \Delta_k$, причём они все конечны. Рассмотрим

$$\Delta_k' \supset \Delta \;::\; v\Delta_k' < v\Delta_k + \frac{\varepsilon}{2^k},$$

$$\Delta'' \subset \Delta \;::\; v\Delta'' > v\Delta - \varepsilon,$$

штрихи имеют смысл как в лемме.

Тогда

$$\Delta'' \subset \bigcup_{k=1}^{\infty} \Delta'_k$$

По определению компактности,

$$\exists\,(l_k)\ ::\ \Delta' \subset \bigcup_{l=1}^{N} \Delta''_{k_l}$$

Так что из счётной аддитивности

$$v\Delta'' \leqslant v\left(\bigcup_{l=1}^{N} \Delta'_{k_l}\right) = \sum_{l=1}^{N} v\Delta'_{k_l} < \sum_{l=1}^{N} v\Delta_{k_l} + \varepsilon$$

А

$$\sum_{l=1}^{N} v\Delta_{k_l} < \sum_{k=1}^{\infty} v\Delta_k$$

Так что

$$v\Delta < \sum_{k=1}^{\infty} v\Delta_k + 2\varepsilon \Rightarrow v\Delta \leqslant \sum_{k=1}^{\infty} v\Delta_k$$

В другую сторону не так понятно. Для частных сумм из конечной аддитивности

$$\forall\, N\ ::\ \sum_{k=1}^{N} v\Delta_k \leqslant v\Delta$$

При увеличении N сумма лишь возрастает, но она и ограничена. Значит предел есть. Тогда $\sum_k v\Delta_k \leqslant v\Delta$. ■

Определение 2 (Мера Лебега)**.** $X = \mathbb{R}^n$, $\mathcal{A} = \mathcal{C}ell_n$. Тогда $\lambda_n = \overline{v_n}$, $\mathcal{M} = \overline{\mathcal{A}}$ — мера Лебега и алгебра множеств, измеримых по Лебегу, соответственно.

Свойства меры Лебега

(1) ▷ $\lambda\{x\} = 0$

(2) ▷ $\lambda\big(\{x_k\}_k\big) = 0$

(3) ▷ $\mathcal{B} \subset \mathcal{M}$. Это, кстати, не очевидно. С другой стороны, для них есть покрытие квадратиками.

(4) ▷ $L \subset \mathbb{R}^m, m < n \Rightarrow \lambda_n L = 0$

А это уже целая теормема.

Теорема 4 (Регулярность меры Лебега)**.** *Пусть* $A \in \mathcal{M}$, $\varepsilon > 0$. *Тогда*

$$\exists\, G \in \mathcal{O}, F \in \mathcal{F}\ ::\ F \subset A \subset G \wedge \begin{cases} \lambda(G \setminus A) < \varepsilon \\ \lambda(A \setminus F) < \varepsilon \end{cases}$$

□

(1) Сначала разберёмся с конечными множествами. Из определения инфимума, $\exists\{\Delta_k\} \ :: \ \lambda(A) > \sum_k \Delta_k - \frac{\varepsilon}{2}$.

Снова подберём Δ'_k, как в 1.5.2, только $\widetilde{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{2^{k+1}}$. В таком случае

$$\lambda(A) > \sum_k \Delta_k - \varepsilon/2 > \sum_k \Delta'_k - \varepsilon$$

(2) ⟨⚒⟩ , но что-то жесть. Обычно доказывают что $\lambda \inf G_k = \lambda A$.

Кажется, победа. Для замкнутых можно доказывать все для $X \setminus A$ сводя к первому пунку. Как-то так

$$(F^c \setminus A^c) = (F^c \cap A) = (A \cap F^c) = A \setminus F$$

■

Следствие 1. $\forall\, A \,\exists\, D \in G_\delta \ :: \ A = D \cup N,\ \mu(N) = 0$.

Пример 1 (Пример неизмеримого множества (по Лебегу))**.** Пусть $x \sim y \Leftrightarrow y - x \in \mathbb{Q}$ и всё это лежит на отрезке $I = [0;1]$. Пусть R_k — k-ый смежный класс по $\sim$. Тогда $S = \sqcup_k R_k$.

Выберем $E\colon \forall\, k \ :: \ |E \cap R_k| = 1$. Как видно, $\{E_j\}$ отличаются сдвигом на $r \in \mathbb{Q}$. Будем считать, что сдвиг — это скорее поворот, как бы замыкаем начало и конец отрезка, так что $E_j + r \in I \ \ \forall\, k \in \mathbb{Z}, r \in [0;1] \cap \mathbb{Q}$.

Тогда $I = \sqcup_k E_k$, $\forall\, j,k \ :: \ \lambda E_j = \lambda E_l$.

Но теперь

$$1 = \lambda I = \sum_{k=1}^{\infty} \lambda E_k = \sum_{k=1}^{\infty} a$$

А бесконечная сумма вещественных чисел либо 0 либо ∞.

Билет № 6: Измеримые функции

Определение 1. Пусть задана тройка $(X, \mathcal{A}_\sigma, \mu)$. Пусть ещё $f\colon X \to \mathbb{R}$. Тогда f называется измеримой относительно $\mathcal{A}$, если

$$\forall\, \Delta \subset \mathbb{R} \ :: \ f^{-1}(\Delta) \in \mathcal{A}$$

Теорема 1. *Пусть f измеримо относительно $\mathcal{A}$. Тогда измеримы и следующие (Лебеговы) множества*

1 типа $\{x \in X \mid f(x) < a\} \equiv X[f < a]$

2 типа $\{x \in X \mid f(x) \leqslant a\} \equiv X[f \leqslant a]$

3 типа $\{x \in X \mid f(x) > a\} \equiv X[f > a]$

4 типа $\{x \in X \mid f(x) \geqslant a\} \equiv X[f \geqslant a]$

При этом верно и обратное: если измеримы множества какого-то отдного типа, то f измерима.

Теорема 2. *Пусть $f_1, \ldots, f_n$ измеримы относительно $\mathcal{A}$ и $g\colon \mathbb{R}^n \to R$ непрерывна. Тогда измерима и $\varphi(x) = g(f_1(x), \ldots, f_n(x))$.*

Замечание. В частности, $f_1 + f_2$ измерима.

Теорема 3. *Пусть* $f_1, f_2, \ldots$ *измеримы относительно* $\mathcal{A}$. *Тогда измеримы* $\sup f_n, \inf f_n, \liminf f_n, \limsup f_n, \lim f_n$. *Последний, правда, может не существовать.*

$\square$ Следует из непрерывности меры. $\blacksquare$

Определение 2. Пусть $f\colon X \to \mathbb{R}$ — измерима. Тогда она называется простой, если принимает конечное множество значений.

Определение 3 (Индикатор множества)**.**

$$E \subset X, \mathbb{1}_E := \begin{cases} 1, & x \in E \\ 0, & x \notin E \end{cases}$$

Он, как видно совсем простая функция.

Утверждение 4. f *— простая* $\Rightarrow f = \sum\limits_{k=1}^{p} c_k \mathbb{1}_{E_k}$

Теорема 5. *Пусть* $f\colon X \to \mathbb{R}$, *измерима,* $f \geqslant 0$. *Тогда*

$$\exists\, (\varphi_n)\colon 0 \leqslant \varphi_1 \leqslant \varphi_2 \leqslant \cdots \,::\, \varphi_n \nearrow f \text{ (поточечно)}$$

Билет № 7: Интеграл по мере

Определение 1. Пусть задана тройка $(X, \mathcal{A}_\sigma, \mu)$, f — измерима.

[1] f — простая.

$$\int_X f \,\mathrm{d}\mu := \sum_{k=1}^{p} c_k \mu E_k$$

[2] $f \geqslant 0$.

$$\int_X f \,\mathrm{d}\mu := \sup\left\{ \int_X g \,\mathrm{d}\mu \;\middle|\; g\text{-простая}, 0 \leqslant g \leqslant f \right\}$$

[3] f общего вида.

$$f_+ = \max\{f(x), 0\}$$
$$f_- = \max\{-f(x), 0\}$$
$$\int_X f \,\mathrm{d}\mu = \int_X f_+ \,\mathrm{d}\mu - \int_X f_- \,\mathrm{d}\mu$$

Здесь нужно, чтобы хотя бы один из интегралов в разности существовал.

Замечание 1. $\displaystyle\int_A f \,\mathrm{d}\mu := \sum_{k=1}^{p} c_k \mu(E_k \cap A)$

Замечание 2. Дальше измеримость и неотрицательность или суммируемость f будет периодически называться «обычными» условиями.

Утверждение 1. $\displaystyle\int_A f \,\mathrm{d}\mu = \int_X f \cdot \mathbb{1}_A \,\mathrm{d}\mu.$

Свойства интеграла от неотрицательных функций Здесь всюду функции неотрицательны и измеримы, что не лишено отсутствия внезапности.

A_1 $0 \leqslant f \leqslant g$. Тогда $\displaystyle\int_X f\,\mathrm{d}\mu \leqslant \int_X g\,\mathrm{d}\mu$.

A_2 $A \subset B \subset X$, $A, B \in \mathcal{A}$, $f \geqslant 0$, измерима. Тогда $\displaystyle\int_A f\,\mathrm{d}\mu \leqslant \int_B f\,\mathrm{d}\mu$

A_3 см теорему 1.8.1.

A_4 $\displaystyle\int_X (f+g)\,\mathrm{d}\mu = \int_X f\,\mathrm{d}mu + \int_X g\,\mathrm{d}mu$

A_5 $\displaystyle\int_X (\lambda g)\,\mathrm{d}\mu = \lambda \int_X f\,\mathrm{d}mu$

Билет № 8: Теорема Беппо Лéви

Теорема 1. *Пусть* (f_n) *— измеримы на* X, $0 \leqslant f_1 \leqslant \cdots$, $f = \lim_n f_n$. *Тогда*

$$\int_X f\,\mathrm{d}\mu = \lim_{n\to\infty} \int_X f_n\,\mathrm{d}\mu$$

Билет № 9: Свойства интеграла от суммируемых функций

Определение 1. f — суммируемая (на X, μ), если $\displaystyle\int_X f\,\mathrm{d}\mu < \infty$. Весь класс суммируемых (на X, μ) функций обозначается через $\mathcal{L}(X, \mu)$.

Здесь всюду функции $\in \mathcal{L}$

B_1 $f \leqslant g \Rightarrow \displaystyle\int_X f\,\mathrm{d}\mu \leqslant \int_X g\,\mathrm{d}\mu$.

B_2 $\displaystyle\int_X (f \pm g)\,\mathrm{d}\mu = \int_X f\,\mathrm{d}\mu \pm \int_X g\,\mathrm{d}\mu$.

B_3 $\displaystyle\int_X \lambda f\,\mathrm{d}\mu = \lambda \int_X f\,\mathrm{d}\mu$.

B_4 $|f| \leqslant g \Rightarrow \displaystyle\left|\int_X f\,\mathrm{d}\mu\right| \leqslant \int_X g\,\mathrm{d}\mu$.

B_5 $\displaystyle\left|\int_X f\,\mathrm{d}\mu\right| \leqslant \int_X |f|\,\mathrm{d}\mu$.

B_6 $f \in \mathcal{L} \Leftrightarrow |f| \in \mathcal{L}$

B_7 $|f| \leqslant M \leqslant +\infty \Rightarrow \displaystyle\left|\int_X f\,\mathrm{d}\mu\right| \leqslant M\mu X$

Билет № 10: Счётная аддитивность интеграла

Теорема 1. *Пусть задана тройка* $(X, \mathcal{A}, \mu)$, f *— измерима и* $f \geqslant 0 \vee f \in \mathcal{L}$. *Пусть к тому же*

$$A, A_{1..} \subset X, A = \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n$$

Тогда

$$\int_A f\,\mathrm{d}\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{A_n} f\,\mathrm{d}\mu$$

Билет № 11: Абсолютная непрерывность интеграла

Теорема 1. *Пусть* $f \in \mathcal{L}(X, \mathcal{A}, \mu)$. *Тогда*

$$\forall\, \varepsilon > 0\ \exists\, \delta > 0\ ::\ \forall\, A \in \mathcal{A}, A \subset X \colon \mu A < \delta\ ::\ \left|\int_A f\,\mathrm{d}\mu\right| < \varepsilon$$

Билет № 12: Интеграл от непрерывной функции по мере Лебега

Теорема 1. *Пусть* $f \in C([a;b])$, λ *— мера Лебега на* $X = [a;b]$. *Тогда*

$$f \in \mathcal{L},\ \int_{[a;b]} f\,\mathrm{d}\mu = \int_a^b f = F(b) - F(a),$$

где F *— первообразная* f.

Билет № 13: Сравнение подходов Римана и Лебега

Сначала вспомним определения того, о чём собираемся рассуждать.

Определение 1 (Интеграл Римана)**.** Пусть $f \in C([a;b])$ $a < x_1 < \cdots < x_{n-1} < x_n = b$, $\xi_i \in [x_i; x_{i+1}]$. Тогда

- $\tau = \{x_1, \ldots, x_{n-1}\}$ — разбиение отрезка $[a;b]$
- $\xi = \{\xi_1, \ldots, \xi_{n-1}\}$ — оснащение разбиения τ
- $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$ — длина i-го отрезка
- $r = r(\tau) = \max\limits_i\{\Delta x_i\}$ — ранг разбиения
- $\sigma = \sigma(\tau, \xi, f) := \sum\limits_{i=0}^{n-1} f(\xi_i)\cdot\Delta x_i$ — сумма Римана

Сам интеграл определяется как-то так

$$\int_a^b f\,\mathrm{d}x = \lim_{r(\tau)\to 0} \sigma(\tau, \xi, f)$$

Определение 2 (Интеграл Лебега)**.** см. 1.7.1. В качестве множества X понятное дело, отрезок $[a;b]$.

Пример 1. Пусть $X = [0;1]$. Тогда $f(x) = \begin{cases} 0, & x \notin \mathbb{Q} \\ 1, & x \in \mathbb{Q} \end{cases}$ интегрируема по Лебегу, но не по Риману.

`<+картиночка с обоими интегралами+>`

Билет № 14: Сравнение несобственного интеграла и интеграла Лебега

Теорема 1. *Пусть* $f \geqslant 0 \vee f \in \mathcal{L}\big([a;b), \lambda\big)$. *Тогда* $\int_{[a;b)} f\,\mathrm{d}\lambda = \int_a^{\to b} f$.

□ ⟨⚒⟩ Свести к собственному, а дальше непрерывность меры. ■

Билет № 15: Интеграл по дискретной мере и мере, задаваемой плотностью

Теорема 1. *Пусть* $\mu = \sum_k m_k \delta_{a_k}$, $\{a_k\} \in X$ *и* $f\colon X \to \mathbb{R}$, $f \geqslant 0$ *или* $f \in \mathcal{L}(X, \mu)$. *Тогда*

$$\int_X f \,\mathrm{d}\mu = \sum_k f(a_k) \cdot \underbrace{m_k}_{\mu\{a_k\}}$$

□ ⟨⚒⟩ Счётная аддитивность интеграла поможет. 1.10.1 ■

Пример 1. Пусть $\mu A = \# A$. Тогда

$$\sum_{m,n \in \mathbb{N}} = \int_{\mathbb{N}^2} f(m,n) \,\mathrm{d}\mu$$

Причем условия суммируемости [1] ряда такие же, как у интеграла Лебега:

$$\left[\begin{array}{l} \forall\, m, n \in \mathbb{N} \;::\; a_{m,n} \geqslant 0 \\ \displaystyle\sum_{m,n \in \mathbb{N}} |a_{m,n}| < \infty \end{array}\right.$$

Определение 1. Пусть задана пара [2] (X, μ), $\rho\colon X \to \mathbb{R}$, измерима, $\rho \geqslant 0$. Тогда

- $\nu(E) := \displaystyle\int_E \rho \,\mathrm{d}\mu$ — мера, задаваемая плотностью ρ
- ρ — плотность меры ν относительно меры μ.

Замечание. Она правда мера, интеграл счётно-аддитивен.

Теорема 2. *Пусть выполнены «обычные» условия на* f. *Тогда* $\displaystyle\int_X f \,\mathrm{d}\nu = \int_X f\rho \,\mathrm{d}\mu$.

Билет № 16: Мера Лебега-Стилтьеса. Интеграл по распределению

Определение 1. Пусть $I \subset \mathbb{R}$, $F\colon I \to \mathbb{R}$, $F \nearrow$, $F(x) = F(x-0)$ (непрерывна слева).[3]. Рассмотрим порождённую полуинтервалами $[a;b) \subset I$ σ-алгебру. Введём «объём» $\nu_F\colon \nu([a;b)) = F(b) - F(a)$.

Тогда мера Лебега-Стилтьеса μ_F — стандартное продолжение ν_F на некоторую σ-алгебру $\mathcal{M}_F$.

Замечание 1. Здесь надо доказывать *счётную* аддитивность, а то как продолжать ν, если она — не мера?

Свойства мемы Лебега-Стилтьеса

Утверждение 1. *Пусть* $\Delta = [a;b]$. *Тогда* $\mu\Delta = F(b+0) - F(a)$.

Утверждение 2. *Пусть* $\Delta = \{a\}$. *Тогда* $\mu\Delta = F(a+0) - F(a)$.

Утверждение 3. *Пусть* $\Delta = (a;b)$. *Тогда* $\mu\Delta = F(b) - F(a+0)$.

---

[1] здесь объявим бесконечность приличным значением суммы ряда

[2] тройка, но все же поняли, что сигма-алгебра имелась в виду

[3] А можно и без. Тогда $\nu([a;b)) = F(b-0) - F(a-0)$, см. ??

Лемма 4. *Пусть $F \in C(I)$, $\Delta \subset I$. Тогда $\mu_F(\Delta) = \displaystyle\int_\Delta F'(t)\,\mathrm{d}\lambda$.*

Теорема 5. *Пусть $F \nearrow$, кусочно-гладка на $I \subset \mathbb{R}$, а для f выполнены обычные условия ($X = \mathcal{B}$, $\mu = \mu_F$). Промежутки гладкости F обозначим за (c_k, c_{k+1}). Тогда*

$$\int_X f\,\mathrm{d}\mu_F = \sum_k \int_{c_k}^{c_{k+1}} fF'\,\mathrm{d}\lambda + \sum_k f(c_k)\underbrace{\Delta_{c_k}F}_{\text{скачок в } c_k}$$

Определение 2 (Образ мемы)**.** Пусть $(X, \mathcal{A}, \mu)$ — пространство с мемой, $f\colon X \to Y$. Превратим и Y в пространство с мемой.

1. $\mathcal{A}' = \{E \subset Y \mid f^{-1}(E) \in \mathcal{A}\}$.
2. $\mu' \equiv \nu = \mu \circ f^{-1}$.

Теорема 6. *Пусть для $g\colon Y \to \mathbb{R}$ выполнены обычные условия ($\mathcal{A} = \mathcal{A}'$, $\mu = \nu$). Тогда $\displaystyle\int_Y g\,\mathrm{d}\nu = \int_X (g \circ f)\,\mathrm{d}\mu$.*

Определение 3 (Функция распределения)**.** Пусть задано (X, μ), $\mu X < +\infty$, $f\colon X \to \mathbb{R}$. Тогда $F(t) := \mu X[f < t]$. Как видно, она возрастает и непрерывна слева.

Теорема 7. *Пусть задано (X, μ), $\mu X < +\infty$, выполнены обычные условия для f. Тогда $\displaystyle\int_X f\,\mathrm{d}\mu = \int_{-\infty}^{+\infty} t\,\mathrm{d}\mu_F$.*

Билет № 17: Интеграл Эйлера-Пуассона

Утверждение 1. $\displaystyle\int_{\mathbb{R}^2} e^{-(x^2+y^2)}\,\mathrm{d}\lambda_2 = \pi$

Билет № 18: Вероятностный смысл мемы

`<+Табличка с соответствием+>`

Билет № 19: Геометрический смысл меры Лебега. Принцип Кавальери

Определение 1. Пусть задано (X, μ), $P(x)$ — предикат. Говорят, что $P(x) = 1$ почти везде (п.в.), если $\mu\{x \mid P(x) = 0\} = 0$.

Определение 2. $f \sim g \Leftrightarrow f(x) = g(x)$ п.в. .

Лемма 1 (Беппо-Леви для рядов)**.** *Пусть заданы (X, μ), $u_n\colon X \to \mathbb{R}$, $n \in \mathbb{N}$, u_n измеримы, $u_n \geqslant 0$. Тогда*

a) $\displaystyle\int_x \sum_{n=1}^{\infty} u_n\,\mathrm{d}\mu = \sum_{n=1}^{\infty}\int_x u_n\,\mathrm{d}\mu.$

b) Если эти числа конечны, то ряд $\sum_n u_n$ сх п.в.

Лемма 2 (Беппо-Леви «вверх ногами»)**.** *Пусть задано (X, μ), (f_n), измеримы, $f_1 \geqslant f_2 \geqslant \cdots \geqslant 0$. Пусть ещё $f_1 \in \mathcal{L}$. Тогда*

$$\lim_{n\to\infty}\int_X f_n\,\mathrm{d}\mu = \int_X \lim_{n\to\infty} f_n\,\mathrm{d}\mu$$

`<+Здесь была ещё пара лемм, но они не особо используются дальше. Вроде+>`

Определение 3. Пусть $E \subset \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^n \in \mathcal{M}_{m+n}$.

- ▷ $E_x = \{y \in \mathbb{R}^n \mid (x, y) \in E\}$ — «срез»
- ▷ $\Pi_1(E) = \{x \in \mathbb{R}^m \mid E_x \neq \varnothing\}$ — «проекция»

`<+картиночка для` $\mathbb{R}^2$`+>`

Теорема 3. *Пусть $E \in \mathcal{M}_{m+n}$, $E_x \in \mathcal{M}_n$ п.в. x, $\varphi(x) = \lambda_n(E_x)$ измерима относительно $\mathcal{M}_m$.*

Тогда

$$\lambda_{m+n}(E) = \int_{\mathbb{R}^m} \lambda_n(E_x)\,\mathrm{d}\lambda_m$$

`<+много букв+>`

Определение 4 (График)**.** $\Gamma^f = \{(x, t) \in \mathbb{R}^{n+1} \mid t = f(x)\}$.

Определение 5 (Подграфик)**.** $\Gamma^f_- = \{(x, t) \in \mathbb{R}^{n+1} \mid 0 \leqslant t \leqslant f(x)\}$.

Определение 6 (Надграфик)**.** $\Gamma^f_+ = \{(x, t) \in \mathbb{R}^{n+1} \mid t \geqslant f(x)\}$.

Теорема 4 (Геометрический смысл интеграла)**.** *Пусть $f\colon \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$, измерима, $\geqslant 0$. Тогда*

1. *Γ^f_- измеримо.*
2. *$\lambda_{n+1}\Gamma^f_- = \int_{\mathbb{R}^n} f\,\mathrm{d}\lambda_n$ измеримо.*

Билет № 20: Сведение кратного интеграла к повторному

Будем в дальнейшем обозначать интегрирование по мере через $\mathrm{d}x$ (ну или $\mathrm{d}y$), размерность определяется из размерности x. Еще обозначим $\mathrm{d}(x, y)$ через $\mathrm{d}x\mathrm{d}y$.

Теорема 1 (Тонелли)**.** *Пусть $f\colon \mathbb{R}^{m+n} \to \mathbb{R}$, измерима, $\geqslant 0$, $x \in \mathbb{R}^m$, $y \in \mathbb{R}^n$. Тогда*

$$\iint_{\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^n} f(x, y)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y = \int_{\mathbb{R}^m} \mathrm{d}x \int_{\mathbb{R}^n} f(x, y)\,\mathrm{d}y$$

Теорема 2 (Фубини)**.** *Пусть $f\colon \mathbb{R}^{m+n} \to \mathbb{R}$, измерима, $\in \mathcal{L}(\mathbb{R}^{n+m}, \lambda_{m+n})$, $x \in \mathbb{R}^m$, $y \in \mathbb{R}^n$. Тогда*

$$\iint_{\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^n} f(x, y)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y = \int_{\mathbb{R}^m} \mathrm{d}x \int_{\mathbb{R}^n} f(x, y)\,\mathrm{d}y$$

Билет № 21: Мера Лебега и аффинные преобразования

Главные герои этого параграфа:

- ◯ Сдвиг: $T\colon \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$, $Tx = x + a$, $a \in \mathbb{R}^n$.
- ◯ Поворот с растяжением: $L\colon \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$, L — линейный иператор.

Утверждение 1. $E \in \mathcal{M} \Rightarrow T(E) \in \mathcal{M}$.

Утверждение 2. $E \in \mathcal{M} \Rightarrow L(E) \in \mathcal{M}$.

Утверждение 3. *Пусть $L\colon \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$, линейно. Тогда*

$$\exists\, C \geqslant 0 \forall\, E \in \mathcal{M} \;::\; \lambda L(E) = C\lambda E$$

Теорема 4. *C из прошлой теоремы равно $\big|\det[L]\big|$.*

`<+тут декомпозиция на ортогональный и диагональные операторы и 2 леммы+>`

Билет № 22: Мера образа при гладком отображении

Обозначение. $J_F(x) \equiv \det F'(x)$

Теорема 1. *Пусть* $E \in \mathcal{M}$, $F\colon G \subset \mathbb{R}^n \to R^n$, *гладкая биекция. Тогда* $F(E) \in \mathcal{M}$ *и* $\lambda F(E) = \int_E |\det F'(x)| \mathrm{d}x$.

□ ⟨∴⟩ ⟨⚒⟩ ■

Билет № 23: Глакая замена переменной в интеграле

Теорема 1. *Пусть* $F\colon G \subset \mathbb{R}^n \to R^n$, *гладкая биекция. Пусть к тому же* $E \subset F(G) \in \mathcal{M}$, $f\colon E \to \mathbb{R}$ *с обычными условиями.*

Тогда

$$\int_E f(y)\,\mathrm{d}y = \int_{F^{-1}(E)} f(F(x)) \cdot |J_F(x)|\,\mathrm{d}x$$

Пример 1 (Полярные координаты)**.** ⟨⚒⟩ $|J| = r$

Пример 2 (Сферические координаты)**.** ⟨⚒⟩ $|J| = r^2 \cos\psi$

Билет № 24: Предельный переход под знаком интеграла

Определение 1 (Всякие сходимости)**.** Пусть $(f_n)\colon X \to \mathbb{R}$, $f\colon X \to \mathbb{R}$, μ — мера на X.

$$\begin{array}{lcl}
f_n \to f & := & \forall\, x \in X \;::\; f_n(x) \to f(x) \\
f_n \overset{X}{\rightrightarrows} f & := & \sup\limits_X |f_n - f| \to 0 \\
f_n \to f \text{ п.в.} & := & \exists\, N \subset X\colon \mu(N) = 0 \;::\; \forall\, x \in X \setminus N \;::\; f_n(x) \to f(x). \\
f_n \overset{\mu}{\to} f & := & \forall\, \sigma > 0 \;::\; \mu X[|f_n - f| \geqslant \sigma] \to 0
\end{array}$$

Замечание 1. $f \overset{X}{\rightrightarrows} f \Rightarrow f_n \to f \Rightarrow f_n \to f$ п.в. .

Замечание 2. Пусть $\mu X < \infty$, тогда $f_n \to f$ п.в. $\Rightarrow f_n \overset{\mu}{\to} f$.

Замечание 3 (Теорема Рисса). $f_n \overset{\mu}{\to} f$ п.в. $\Rightarrow \exists\,(n_k) \;::\; f_{n_k} \to f$ п.в. .

Теорема 1. $f_n \overset{X}{\rightrightarrows} f, \mu X < \infty \Rightarrow \int_X f_n\,\mathrm{d}\mu \to \int_X f$

Теорема 2. *см теорему Беппо-Леви (1.8.1) или её вариацию 1.19.2.*

Теорема 3 (Фату)**.** *Пусть заданы* (X, μ), $f_n \geqslant 0$, *измеримы. Тогда*

$$\int_X \underline{\lim}\, f_n\,\mathrm{d}\mu \leqslant \underline{\lim} \int_X f_n\,\mathrm{d}\mu$$

Билет № 25: Теорема Лебега об ограниченной сходимости

Теорема 1. *Пусть снова заданы (X, μ), (f_n) измерима, $f_n \to f$ п.в. . К тому же*

$$\exists\, \varphi \in \mathcal{L} \ :: \ \forall\, n \ :: \ |f_n| \leqslant |\varphi|$$

Тогда

$$\lim_{n\to\infty} \int_X f_n \,\mathrm{d}\mu = \int_X f \,\mathrm{d}\mu$$

Обозначение. $(\mathcal{L})$ — условия теоремы Лебега об ограниченной сходимости.

Следствие 1. *Пусть $f\colon T \times X \to \mathbb{R}$, $T \subset \mathbb{R}^k$, $f_t \xrightarrow[t\to t_0]{} f$ п.в. , и*

$$\exists\, V(t^0), \varphi \in \mathcal{L} \ :: \ \forall\, t \in \overset{\circ}{V} \cap T \ :: \ |f_t| \leqslant |\varphi|$$

Тогда

$$\int_X f_t \,\mathrm{d}\mu \xrightarrow[t\to t_0]{} \int_X f \,\mathrm{d}\mu$$

Обозначение. $(\mathcal{L}_{\mathrm{loc}})$ — условия локальной теормемы Лебега об ограниченной сходимости.

Следствие 2. *Непрерывность интеграла по параметру при выполнении $(\mathcal{L}_{\mathrm{loc}})$ и непрерывности f_t.*

§* Интеграл по меме с параметром

Здесь часто придётся подчёркивать, что является параметром, а что — определяет функцию В таких случаях параметр будет записан, как индекс

Определение 1 (Собственный интеграл с параметром)**.** Пусть $f\colon X \times T \to \mathbb{R}$, $f_t(x) \in \mathcal{L}([a, b], \mu)\ \forall\, t \in T$. Тогда,

$$I(t) = \int_a^b f(x, t) \,\mathrm{d}x$$

Мы здесь определяем некоторую функцию от t, как видно $\mathcal{D}_I = T$.

По идее, надо здесь переформулировать все-все-все утверждения про последовательности функций. Надо бы узнать, что с этим делать. ⟨`:set aflame`⟩У нас в конспекте этот кусок почему-то написан про несобственные интегралы, но всюду полагается $(\mathcal{L}_{\mathrm{loc}})$. Так что по сути они — просто интегралы по меме.

Здесь тоже есть непрерывность, дифференциируемость и интегрирование по параметру, но все тривиально[1] следует из 1.25.1 и 1.20.2.

Билет № 26: Равномерная сходимость несобственного параметрического интеграла. Признаки

Определение 1 (Несобственный интеграл с параметром)**.** Пусть $f\colon X \times T \to \mathbb{R}$, $f \in \mathcal{L}([a, B], \mu)\ \forall\, B < b$. Тогда,

$$I(t) = \int_a^{\to b} f(x, t) \,\mathrm{d}x := \lim_{B\to b-0} \int_a^B f(x, t) \,\mathrm{d}x = \lim_{B\to b-0} I^B(t)$$

Предполагается, что $\forall\, t \in T$ интеграл сходится поточечно. А вот суммируемость никто не обещал.

[1] ну..

Определение 2. Говорят, что $I^B(t) \overset{T}{\rightrightarrows} I(t)$ (сходится равномерно относительно $t, t \in T$), если [1]

$$\sup_{t \in T} \left| \int_B^{\to b} f(x,t) \right| \xrightarrow[B \to b]{} 0$$

Здесь дальше всюду предполагается поточечная сходимость интеграла $\forall\, t \in T$.

Теорема 1 (Признак Больцано-Коши)**.**

$$I^B(t) \overset{T}{\rightrightarrows} I(t) \Leftrightarrow \sup_T \left| \int_{B_1}^{B_2} f(x,t)\,\mathrm{d}x \right| \xrightarrow[B_1, B_2 \to b]{} 0$$

Теорема 2 (Признак Вейерштрасса)**.** *Пусть* $\exists\, \varphi \in \mathcal{L}([a;b)) \;::\; |f(x,t)| \leqslant \varphi(x)\,\forall\, t$. *Тогда* $I^B(t) \overset{T}{\rightrightarrows} I(T)$.

Теорема 3 (Признак Дирихле)**.** *Пусть* $I(t) = \displaystyle\int_a^{\to b} f(x,t) \cdot g(x,t)\,\mathrm{d}x$ *и*

a) $f(x,t) \overset{T}{\rightrightarrows} 0,\; f(x,t) \searrow^x \; (x \to b - 0)$

b) $G(x,t) = \displaystyle\int_a^x g(\xi,t)\,\mathrm{d}\xi$

$$\exists\, M \colon \forall\, x \in [a;b), t \in T \;::\; |G(x,t)| \leqslant M$$

Тогда $I^B(t) \overset{T}{\rightrightarrows} I(T)$.

Теорема 4 (Признак Абеля)**.** *Пусть* $I(t) = \displaystyle\int_a^{\to b} f(x,t) \cdot g(x,t)\,\mathrm{d}x$ *и*

a) $\exists\, M \colon \forall\, t \in T \;::\; f(x,t) \leqslant M,\; f(x,t) \searrow^x$.

b) $\displaystyle\int_a^B g(x,t)\,\mathrm{d}x \underset{B \to b}{\overset{T}{\rightrightarrows}} \int_a^{\to b} g(x,t)\,\mathrm{d}x$

Тогда $I^B(t) \overset{T}{\rightrightarrows} I(T)$.

Билет № 27: Несобственные интегралы с параметром и операции анализа над параметром $\langle$⚒$\rangle$

Теорема 1. *Пусть* $f(x,t) \to f(x,t_0)$ *для п.в.*$x \in [a;b)$ *и* $I^B(t) \overset{V(t^0)}{\rightrightarrows} I(t)$. [2] *Тогда* $I \xrightarrow[t \to t_0]{} I(t_0)$.

Теорема 2. *Пусть для п.в.* $x\; \exists\, f'_t(x,t)$, *непрерывна на* $[a;b) \times \underbrace{[c;d)}_{T}$. *Допустим,*

a) $I(t) = \displaystyle\int_a^{\to b} f(x,t)\,\mathrm{d}x$ *сходится* $\forall\, t \in T$

[1] Никто же не любит ε-δ-определения?

[2] Это не очень докажется без конечности меры $V(t_0)$,а то интеграл может сходится, а функция не быть суммируемой

b) $\displaystyle\int_a^{\to b} f'_t(x,t)\,\mathrm{d}x$ *равномерно сходится относительно* $t \in T$

Тогда $\exists\, I'(t_0) = \displaystyle\int_a^{\to b} f'_t(x,t_0)\,\mathrm{d}x$

Замечание. Здесь нужна сходимость I, чтобы хоть где-то были конечные значения $I(t)$, нам их разность считать.

Теорема 3. *Пусть для п.в.* $x \,\exists\, f(x,t)$*, непрерывна на* $[a;b)\times\underbrace{[c;d)}_{T}$*. Допустим,* $I(t) = \displaystyle\int_a^{\to b} f(x,t)\,\mathrm{d}x$ *равномерно сходится относительно* $t \in T$

Тогда

$$\int_c^d I(t)\,\mathrm{d}t = \int_a^{\to b}\mathrm{d}x\int_c^d f(x,t)\,\mathrm{d}t$$

Билет № 28: Γ-функция Эйлера

Определение 1. $\Gamma(t) = \displaystyle\int_0^\infty x^{t-1}e^{-x}\,\mathrm{d}x$

Свойства

1° Определена для всех $t > 0$.

2° $\Gamma(1) = 1$

3° $\forall\, t\Gamma(t+1) = t\Gamma(t)$

4° $n \in \mathbb{N}\ \Gamma(n+1) = n!$

5° Γ-выпукла

6° $\Gamma \sim \frac{1}{t}$ при $t \to 0$

7° $\Gamma(t+1) \sim \sqrt{2\pi}\sqrt{t}t^te^{-t}$ при $t \to \infty$.

8° $\Gamma(t)\cdot\Gamma(1-t) = \frac{\pi}{\sin\pi t}$. (формула отражения)

Гамма-функцию можно продолжить на отрицательную область, через формулу отражения. И на комплексную, там будет сходимость при $\operatorname{Im} z > 0$.

Билет № 29: B-функция

Определение 1. $B(y,z) = \displaystyle\int_0^1 x^{y-1}(1-x)^{z-1}\,\mathrm{d}x.$

Свойства

1° $B(y,z) = B(z,y)$.

2° $B(y,z) = \dfrac{\Gamma(y)\Gamma(z)}{\Gamma(y+z)}$.

Билет № 30: Объём n-мерного шара

Теорема 1. *Пусть* $B_n(R) = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x\| \leqslant R\}$ *– n-мерный шар. Тогда*

$$\lambda_n B_n(R) = \frac{\pi^{n/2}R^n}{\frac{n}{2}\cdot\Gamma(\frac{n}{2})}$$

Глава 2: Дифференциальная геометрия ⟨⚒⟩

Билет № 31: Регулярная кривая и её естественная параметризация

Определение 1 (Кривая, как отображение)**.** Пусть задано гладкое отображение $t \in [a;b] \mapsto r(t) \in \mathbb{R}^3$, регулярное, то есть $\operatorname{rk} r'(t) \equiv 1$. t — параметр, само отображение ещё можно называть параметризацией.

Определение 2 (Кривая, как класс отображений)**.** Введём отношение эквивалентности отображений:

$$r(t) \sim \rho(\tau) \Leftrightarrow \exists\, \delta\colon [a;b] \leftrightarrow [\alpha, \beta] \ :: \ \rho(\delta(t)) = r(t)$$

А теперь будем их путать. ⟨`:set aflame`⟩Ещё веселье с многообразиями.

Определение 3 (Естественная параметризация)**.** Пусть $[a;b] = [t_0, t_1]$. Рассмотрим $\widetilde{s}(t) = \displaystyle\int_{t_0}^{t} |r'(t)|\,\mathrm{d}\tau$. Она, как видно, является пройденным путём и неубывает $\Rightarrow$ годится на роль δ.

Так что можно рассматривать s как параметр, это собственно и есть естественная (натуральная) параметризация.

Утверждение 1. *Пусть есть две разных параметризации: $r(t)$ и $r(s)$ одной кривой. Тогда*

$$\dot{r} \equiv \frac{\partial r(s)}{\partial s} = \Big(r'(t) \cdot (s'(t))^{-1}\Big)(t) = \frac{r'}{|r'|}$$

Как видно, натуральная почему-то обозначается точкой.

Билет № 32: Кривизна кривой

Определение 1 (Касательный вектор)**.** $\tau := \dot{r}(s)$.

Определение 2 (Кривизна)**.** $k_1 = |\dot{\tau}|$

Определение 3 (Радиус кривизны)**.** $R = k_1^{-1}$

Лемма 1. *Пусть $v(s) \in \mathbb{R}^n$, $|v| \equiv R \in \mathbb{R}$. Тогда $\dot{v} \perp v$.*

▼
$0 = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}|v|^2 = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\langle v, v\rangle) = 2\langle v, \dot{v}\rangle$. Так что $\langle v\dot{v}\rangle = 0 \Rightarrow v \perp \dot{v}$.
▲

Утверждение 2. $\tau \perp \dot{\tau}$

Теорема 3. *Пусть $r(t)$ — неестественная параметризация кривой. Тогда $k_1 = \dfrac{|r' \times r''|}{|r'|^3}$*

□

$$k_1 = |\dot\tau| = \left|\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s}\,\frac{r'}{|r'|}\right| = \left|\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{r'}{|r'|}\right)\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}s}\right| = \left|\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{r'}{|r'|}\right)\frac{1}{|r'|}\right|$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{r'}{|r'|}\right) = \frac{r''|r'| - r'|r'|'}{|r'|^2}, \quad |r'|' = \left(\sqrt{r'^2}\right)' = \frac{\langle r', r''\rangle}{|r'|}$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{r'}{|r'|}\right) = \frac{r''|r'|^2 - r'\langle r', r''\rangle}{|r'|^3} = \frac{r''\langle r', r'\rangle - r'\langle r', r''\rangle}{|r'|^3} = \frac{r' \times (r'' \times r')}{|r'|^3}\ (A = C)$$

$r' \perp r' \times r''$, так что

$$k_1 = \left|\frac{r' \times (r'' \times r')}{|r'|^3}\right|\frac{1}{|r'|} = \frac{|r' \times r''|}{|r'|^3}$$

■

Билет № 33: Кручение и нормаль

Определение 1 (Нормаль)**.** Пусть $k_1 \neq 0$. Тогда $\nu := \frac{\dot\tau}{k_1}$.

из геометрии, она лежит в плоскости кривой и направлена в сторону «поворота».

Определение 2 (Бинормаль)**.** $\beta = \tau \times \nu$.

Замечание. (τ, ν, β) — хороший кандидат для репера в какой-нибудь точке P.

Определение 3 (Соприкасающаяся плоскость)**.** Пусть $k_1 > 0$, $P = r(s_0)$, T — плоскость, $T \ni P$, $N \perp T$ — нормаль к ней. Допустим, $\langle \Delta r, N\rangle = h$, $h = o(\Delta s^2)$. Тогда T — соприкасающаяся плоскость.

Утверждение 1. *$\tau, \nu \perp N$; $(r - r_0, \dot r_0, \ddot r_0) = 0$ — её уравнение*

▼

$$\Delta r = \dot r\,\mathrm{d}s + \frac{\ddot r}{2}\,\mathrm{d}s^2 + o(\Delta s^2) = \tau\,\mathrm{d}s + \frac{1}{2}\,k_1\nu\,\mathrm{d}s^2 + o(s^2)$$
$$\langle \Delta r, N\rangle = o(\Delta s^2)$$

Так что скалярные произведения $\langle \tau, N\rangle$, $\langle \nu, N\rangle$ равны нулю.

Вторая часть — из свойств смешанного произведения.

▲

Определение 4 (Абсолютное кручение)**.** $|k_2| := |\dot\beta|$

Теорема 2. $|k_2| = \left|\dfrac{(\dot r, \ddot r, \dddot r)}{k_1^2}\right|$

□ Взять определение β и посчитать производную.

$$\dot\beta = \dot\tau \times \nu + \tau \times \dot\nu = k_1\nu \times \nu + \tau \times \dot\nu = \tau \times \dot\nu$$

Производная τ ничем не отличается от 2.32.3, только τ заместо r.
Так что

$$\dot\beta = \tau \times (\dot\tau \times (\ddot\tau \times \dot\tau))\,\frac{1}{k_1^3} = \frac{\dot\tau(\tau, \ddot\tau, \dot\tau) - (\ddot\tau \times \dot\tau)\cdot 0}{k_1^3} = -\frac{\nu\cdot(\tau, \dot\tau, \ddot\tau)}{k_1^2}$$

■

Определение 5 (Кручение)**.** $k_2 := \dfrac{-(\dot r, \ddot r, \dddot r)}{k_1^2}$

Билет № 34: Формулы Френе

Теорема 1.

$$\begin{pmatrix} \dot\tau \\ \dot\nu \\ \dot\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & k_1 & 0 \\ -k_1 & 0 & -k_2 \\ 0 & k_2 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \tau \\ \nu \\ \beta \end{pmatrix} \tag{2.1}$$

□ Осталось доказать лишь второе, но оно очевидно следует из 1 и 3 и соотношения $\nu = \beta \times \tau$. ■

Теорема 2. *Пусть $r(s)$ — гладкая кривая с заданными k_1 и k_2, $k_1 > 0$. Тогда система (2.1) определит её с точностью до движения.*

□ Система (2.1) вообще линейна. Так что решение задачи Коши у неё — единственно. А положение кривой как раз задается начальными значениями τ, ν, β.

Правда ниоткуда не следует, что кривизна и кручение будет какими надо, но это скучно. Из формул для них докажется. ■

В бумажном конспекте здесь ещё рассуждения, что полученные векторы единичны и ортональны, но это тоже скучно.

Билет № 35: Регулярная поверхность. Касательная плоскость. Первая квадратичная форма

Определение 1 (Поверзность (двумерная))**.** Пусть задано гладкое отображение

$$\varphi\colon (u, v) \in D \subset \mathbb{R}^2 \mapsto r = (x, y, z) \in \mathbb{R}^3$$

Добавим условие регулярности $\operatorname{rk} \varphi' \equiv 2$ и условимся путать отображение и класс оных.

Определение 2.

$$\begin{aligned} r_u &:= (x'_u, y'_u, z'_u) \\ r_v &:= (x'_v, y'_v, z'_v) \\ n &:= \frac{r_u \times r_v}{|r_u \times r_v|} = \frac{N}{|N|} \end{aligned}$$

Отметим, что условие регулярности не дает векторному произведению обращаться в 0.

Касательную плоскость можно было бы здесь определить через нормаль, но лучше пока ещё подумать. Может, абстракций добавить.

Просто утащил определеньки из № 41

Определение 3. Пусть $M \subset \mathbb{R}^n$. Выберем на нем произвольную точку x и рассмотрим $V(x) = V_{\mathbb{R}^n}(x) \cap M$. Допустим,

$$\exists\, f \in C^1 \;::\; V(x) \leftrightarrow^f \mathbb{R}^k \text{ (или } \mathbb{H}^k).$$

Тогда M — гладкое подмногообразие $\mathbb{R}^n$, а f — локальная карта многообразия. Набор всех карт называется атласом. $t \in \mathbb{R}^k$ — локальные координаты в V.

Атлас : $A(M) = \{(\varphi_k, V_k)_k\}$ — все окрестности и карты на них.

Если

$$\exists\, x \in M \;::\; V \leftrightarrow \mathbb{H}(\mathbb{H} = \{x \in \mathbb{R}^k \mid x^1 \leqslant 1\},$$

тогда это многообразие с краем. Край обычно обозначается как ∂M.

По идее, в атлас ещё надо включать информацию, карта на $\mathbb{R}^k$ или на $\mathbb{H}^k$. Так что

$$A(M) = \{(\mathbb{H}^k, \varphi_i, V_i)_i\} \cup \{(\mathbb{R}^k, \varphi_j, V_j)_j\}$$

Определение 4 (Касательное пространство в точке x)**.** Пусть M — гладкое многообразие. Допустим, φ_i — карта в $V(x)$. Тогда

$$T_x M = \Big(\mathrm{d}\varphi_i(x)\Big)(\mathbb{R}^k)$$

Определение 5 (Первая квадратичная форма)**.**

$$\begin{aligned} I := |\mathrm{d}r|^2 &= r_u^2\,\mathrm{d}u^2 + 2r_u r_v\,\mathrm{d}u\,\mathrm{d}v + r_v^2\,\mathrm{d}v^2 \\ &= E\,\mathrm{d}u^2 + 2F\,\mathrm{d}u\,\mathrm{d}v + G\,\mathrm{d}v^2 \end{aligned}$$

Плохое определение, надо сказать. Сделаем получше.

Определение 6. Первая квадратичная форма поверхности M — единичная квадратичная форма на его касательном пространстве.

Скаляряное произведение на $T_x M$ можно перенести из $\mathbb{R}^m \supset M$.

Утверждение 1. *Пусть $\varphi\colon D \subset M$ — карта на M. Тогда первая квадратичная форма в координатах пространства параметров имеет вид*

$$L^T L, \quad L = \varphi'(x)$$

Мы вроде можем спокойно рассматривать φ' как линейное отображение. Так что по идее первое определение — следствие отсюда, но $\langle ? \rangle$.

Определение 7. $g_{ij} = L^T L$. Хотелось бы сказать, что это метрический тензор, но не стоит.

Билет № 36: Вычисление длин и площадей на поверхности

Теорема 1. *Пусть M — поверхность, $\gamma\colon t \to r \in M$. Тогда*

$$\ell(\gamma) = \int_{t_0}^{t_1} \sqrt{I}.\ (\mathrm{d}s = I)$$

□ Пусть $r \in M$, $u \in D$. Тогда $\mathrm{d}s^2 = \langle \mathrm{d}r, \mathrm{d}r\rangle = \mathrm{d}r^T \mathrm{d}r = \mathrm{d}u^T L^T L \mathrm{d}u = I$. А дальше можно параметризовать кривую, так что u, v — функции от t. ■

Некое пояснение к определению.

Здесь можно сказать, что мера на касательном многообразии задаётся как образ лебеговой меры в $\mathbb{R}^k$. Они вроде как имеют одну размерность. Правда его надо как-то повернуть для этого, иначе якобиан не посчитать.

Зафиксируем какие-то базисы в D и $T_x M$. Соорудим вот такое ортогональное преобразование: $O = \left(\sqrt{I}\right)^{-1} L^T$, $O\colon \mathbb{R}^m \to \mathbb{R}^m$, скалярное произведение в них одинаковое.

Здесь неявно сконструировали отображение $I\colon \mathbb{R}^k \to \mathbb{R}^k$ взяв матрицу I.

Тогда пусть $F = O \circ L = \left(\sqrt{I}\right)^{-1} L^T L = \sqrt{I}$. Пользуясь теоремой из теории меры, $\lambda_T = \det F = \det \sqrt{I} = \sqrt{\det I}$.

А теперь можно приближать параллелепипеды на самом многообразии похожими из касательного пространства.

Определение 1. Пусть M — подмногообразие $\mathbb{R}^n$. Тогда

$$\lambda_k := \int_D \sqrt{\det g(t)}\,\mathrm{d}t, \quad g(t)_{ij} = \left(\frac{\partial x}{\partial t_i} \cdot \frac{\partial x}{\partial t_j}\right)(t)$$

Теорема 2. *Определение выше не зависит от параметризации.*

Теорема 3. *Пусть M — поверхность, $u, v \in D$, $I = E\,\mathrm{d}u^2 + 2F\,\mathrm{d}u\,\mathrm{d}v + G\,\mathrm{d}v^2$. Тогда*

$$S(M) = \iint_D \sqrt{EG - F^2}\,\mathrm{d}u\,\mathrm{d}v$$

Определение 2. Пусть M_1, M_2 — пара поверхностей. Допустим, $\exists\, F\colon M_1 \to M_2$, сохраняющее длины кривых. Тогда они называются изометричными.

Теорема 4. *Пусть M_1, M_2 — пара поверхностей. Допустим, что существуют их параметризации, при которых $I_1 = I_2$. Тогда они изометричны.*

Билет № 37: Вторая квадратичная форма

Определение 1. Снова рассмотрим поверхность с какой-то параметризацией. Тогда $\mathrm{II} := -\mathrm{d}r\,\mathrm{d}n = L\,\mathrm{d}u^2 + 2N\,\mathrm{d}u\,\mathrm{d}v + M\,\mathrm{d}v^2$.

Утверждение 1. $\mathrm{II} = n \cdot \mathrm{d}^2 r$

Утверждение 2 (Типы точек на поверхности)**.** *Здесь названия связаны с типом соприкасающегося параболоида. Его можно добыть, рассматривая $\Delta r \cdot n$.*

$\mathrm{II} > 0$**:** *Эллиптический*

$\mathrm{II} < 0$**:** *Он же*

$\mathrm{II} \lessgtr 0$**:** *Гиперболический*

$\mathrm{II} \geqslant 0 \vee \mathrm{II} \leqslant 0$**:** *Параболический (вроде цилиндра)*

$\mathrm{II} = 0$**:** *Точка уплощения*

Билет № 38: Нормальная кривизна в данном направлении. Главные кривизны

Определение 1. Нормальное сечение поверхности — сечение плоскостью, содержащей нормаль к поверхности (в точке).

Лемма 1. *Нормальное сечение — кривая.*

Сначала рассмотрим несколько более общий случай

Теорема 2 (Менье)**.** *Пусть γ — кривая $\subset M$, $\gamma \ni P$. Тогда $k_0 = k_1 \cos(\underbrace{\nu \hat{;} n}_{\theta}) = \frac{\mathrm{II}}{\mathrm{I}}$.*

Замечание 1. Ещё можно сформулировать так: для всякой кривой на повехности, проходящей через точку в заданном направлении $k_0 = \mathrm{const}$

а теперь сузим обратно.

Определение 2. Нормальная кривизна — кривизна нормального сечения.

Для нормального сечения $\cos\theta = \pm 1$.

Если немного переписать и ввести параметр $t = \mathrm{d}v/\mathrm{d}u$

$$k_1(t) = |k_0(t)| = \left|\frac{L + 2Nt + Mt^2}{E + 2Ft + Gt^2}\right|$$

Этот параметр t и задаёт «направление» нормального сечения. Так что $k_0(t)$ и есть та самая «кривизна в данном направлении».

Теперь найдем экстремумы $\frac{\mathrm{II}}{\mathrm{I}}(t)$.

Теорема 3. $\exists\, k_{\min}, k_{\max},\ k_{\min} \cdot k_{\max} = \frac{LM - N^2}{EG - F^2}$.

Определение 3. $k_{\min}, k_{\max}$ — главные кривызны.

Билет № 39: Гауссова кривизна поверхности. Теорема Гаусса

Определение 1 (Гауссова кривизна)**.** $K = k_{\min} \cdot k_{\max}$.

Определение 2 (Гауссово отображение)**.** Пусть M — поверхность, n — нормаль к ней в точке P, S — единичная сфера. Тогда $G : n \mapsto C \in S$ (C — точка на сфере).

Теорема 1. *Пусть U — окрестность $P \subset M$, M — поверхность, $\mathcal{N}$ — поле нормалей на U. Допустим, что $V = G(\mathcal{N})$, она вроде как окрестность $G(n_P)$. Тогда*

$$|K| = \lim_{U \to P} \frac{\iint_V |n_u \times n_v|}{\iint_U |r_u \times r_v|}$$

Билет № 40: Геодезическая кривизна. Теорема Гаусса-Бонне.

Определение 1 (Геодезическая кривизна)**.** Пусть M — поверхность, T — касательная к ней в точке P. Допустим, $\gamma \subset M$ проходит через P. Рассмотрим проекцию γ на T. Тогда $\varkappa := k_\gamma$ — и есть геодезическая кривизна.

Определение 2. Если для кривой $\varkappa(s) \equiv 0$, то она называется геодезической.

Теорема 1 (Гаусса-Бонне)**.** *Пусть M — гладкая поверхность, $P_1, \ldots, P_n$ — вершины криволинейного многоугольника, $P_i, P_{i+1} = \gamma$, α_i — углы при вершинах. Тогда*

$$\sum_i \alpha_i + \sum_i \int_{\gamma_i} \varkappa\, \mathrm{d}s = 2\pi - \iint_P K\, \mathrm{d}s$$

Билет № 41: Ориентация кривой и поверхности

Здесь сначала введём всякие конкретные определения, потом абстрактное, потом конкретные примеры.

Определение 1 (Векторное поле)**.** Пусть $G \subset \mathbb{R}^n$, V — векторное пространство. Тогда $f\colon G \to V$ и есть векторное поле.

Пример 1. $V = \mathbb{R}^k$.

Замечание 1. Если захотеть гладкого векторного поля, то нужно уметь вводить на V норму[1]. Но как правило имеют дело с $V = \mathbb{R}^n$ где это всё уже есть.

[1] $o(\|h\|)$

Определение 2. Ориентация на кривой — непрерывное поле $\tau(x(t))$. Они все единичные, так что варианта выбрать $\tau(x)$ всего 2. Соответсвенно, и ориентаций две.

Замечание 1. Регулярность избавит от изломов, а все пересечения разделяются по t.

Замечание 2 (⟨`:set aflame`⟩). В нашем понимании кривая — не многообразие. У многообразия были бы проблемы с окрестностью пересечения. Это можно показать рассмотрев 4 точки в окрестности пересечения и устремив ту, что с самым далёким прообразом к пересечению. [1]

Определение 3. Ориентация на кривой — класс эквивалентности параметризаций по отношению $r(t) \sim \rho(\tau) \Leftrightarrow \delta' > 0$(всегда).

Утверждение 1. *Определения 2.41.2 и 2.41.3 эквивалентны.*

▼
банан.
▲

Определение 4. Если на кривой вводится ориентация, то она ориентируемая.

Тут нужно отметить, что подход выше совсем ломается, когда дело заходит о поверхностях. Обобщив рассуждения выше на поверхности, мы придём к тому, что лента Мёбиуса окажется ориентируемой. Ну, в самом деле, если привязать нормали к параметрам, а не к координатам пространства содержащего поверхность, то окажется, что нормаль всегда «вращается» непрерывно.

Так что надо сейчас заняться ориентацией многообразий.

Определение 5. Пусть $M \subset \mathbb{R}^n$. Выберем на нем произвольную точку x и рассмотрим $V(x) = V_{\mathbb{R}^n}(x) \cap M$. Допустим,

$$\exists\, f \in C^1 \;::\; V(x) \leftrightarrow^f \mathbb{R}^k \text{ (или } \mathbb{H}^k).$$

Тогда M — гладкое подмногообразие $\mathbb{R}^n$, а f — локальная карта многообразия. Набор всех карт называется атласом. $t \in \mathbb{R}^k$ — локальные координаты в V.

Атлас : $A(M) = \{(\varphi_k, V_k)_k\}$ — все окрестности и карты на них.

Если

$$\exists\, x \in M \;::\; V \leftrightarrow \mathbb{H}(\mathbb{H} = \{x \in \mathbb{R}^k \mid x^1 \leqslant 1\},$$

тогда это многообразие с краем. Край обычно обозначается как ∂M.

По идее, в атлас ещё надо включать информацию, карта на $\mathbb{R}^k$ или на $\mathbb{H}^k$. Так что

$$A(M) = \{(\mathbb{H}^k, \varphi_i, V_i)_i\} \cup \{(\mathbb{R}^k, \varphi_j, V_j)_j\}$$

Теперь про ориентацию.

Определение 6. Две карты называются согласованными, если отображение $t_1 \mapsto x \in V_1 \cap V_2 \mapsto t_2$ имеет положительный якобиан.

Определение 7. Если все карты попарно согласованы, то атлас называется ориентирующим. Многообразие тогда называется ориентированным.

[1] я же тот ещё велосипедостроитель?

Представить все это проще всего на примере города, покрытого точками сотовой связи. Пересечение границы области покрытия одной вышки не приводит к потере связи.

Нетрудно понять, что ориентирующих атласов много. Город может покрывать хорошее количество сотовых операторов.

Определение 8. Атласы эквивалентны, если составленный из них атлас — тоже ориентирующий.

Утверждение 2. *Если многообразие связно, то они линейно связно.*

Утверждение 3. *Классов эквивалентности атласов для связного многообразия — два.*

▼ (⟨?⟩)
Пусть какая-нибудь точка M содержится в пересечении двух карт из разных атласов.

Пусть в её окрестности репараметризация между атласами происходит с положительным якобианом. До любой другой точки можно добраться по цепочке карт из одного атласа (из линейной связности).

Так что в её окрестности переход между атласами происходит с тем же знаком, что и в окрестности исходной точки. От выбора карт по дороге ничего не зависит, так как они из одного атласа.
▲

Определение 9. Пусть на M задан ориентирующий атлас. Тогда сужение этого атласа на край задаёт ориентацию края.

А теперь минутка конкретики.

Определение 10. Поверхность (регулярная) — связное ⟨?⟩подмногообразие $\mathbb{R}^3$ с рангом карт 2.

Утверждение 4. *Ориентация на поверхности задаётся непрерывным векторным полем нормалей. «Сторона» поверхности задаётся им же.*

$$n = \frac{r_u \times r_v}{|r_u \times r_v|}$$

▼
Связка бананов. Бананы тут ни при чём, но они кончились.
▲

Замечание 1. С кривыми наверное тоже стоит иметь дело, как с многообразиями, но вот тут ⟨?⟩. Дальше я так буду делать, но не очень законно.

Билет № 42: Интеграл второго рода

Здесь всюды $\mathrm{d}s$ — мера на многообразии.

Определение 1. Интеграл второго рода по кривой Γ от векторного поля F определяется, как

$$\int_\Gamma \langle F, \tau \rangle \,\mathrm{d}s$$

Определение 2. Интеграл второго рода по поверхности M от векторного поля F определяется, как
$$\int_\Gamma \langle F, n\rangle \,\mathrm{d}s$$

Определение 3 (Касательное пространство в точке x)**.** Пусть M — гладкое многообразие. Допустим, φ_i — карта в $V(x)$. Тогда
$$T_x M = \Big(\mathrm{d}\varphi_i(x)\Big)(\mathbb{R}^k)$$

Кокасательное пространство — сопряжённое к нему. Собственно, пространство линейных форм, действующих из $T_x M$.

Определение 4. Дифференциальная форма p-го порядка на многообразии M в точке x — кососимметрическая линейная функция
$$\omega^p \colon \underbrace{T_x M \times \dots \times T_x M}_{p} \to \mathbb{R} \in (T_x^* M)^p$$

Умножение векторных пространств тут на самом деле тензорное, как я понял, так что очевидно следущее

Утверждение 1. *ω^p разложится по базису $\bigwedge_{i_k} \mathrm{d}x^{i_k} \in (T_x^* M)^p$*

А ещё $(T_x M)^p$ надо бы обозначать как-то так, подчёркивая, что это внешняя степень: $\Lambda^p(T_x M)$

Пример 1. Поскольку эта ерунда кососкоммутативна, надо думать что засунуть в базис. Вот давайте все для $\mathbb{R}^3$ напишем.
$$\begin{aligned}
&\omega^1 = a_x \,\mathrm{d}x + a_y \,\mathrm{d}y + a_z \,\mathrm{d}z\\
&\omega^2 = a_{yz} \,\mathrm{d}y \wedge \mathrm{d}z + a_{zx} \,\mathrm{d}z \wedge \mathrm{d}x a_{xy} \,\mathrm{d}x \wedge \mathrm{d}y\\
&\omega^3 = a_{xyz} \,\mathrm{d}x \wedge \mathrm{d}y \wedge z
\end{aligned}$$

Ещё одно маленькое

Определение 5 (Внешний дифференциал)**.** Введём линейный император : $(T_x^* M)^p \to (T_x^* M)^{p+1}$

1. Для функции $f \colon \mathbb{R}^k \to M$ совпадает с обычнм дифференциалом.
2. $\mathrm{d}(\omega^p \wedge \omega^q) = \mathrm{d}\omega^p \wedge \omega^q + (-1)^p \omega^p \wedge \mathrm{d}\omega^q$ Это вместо правила Лейбница.
3. $\mathrm{d}(\mathrm{d}\omega) = 0$.

Вообще, можно было бы определить 1, 3 правило и как дифференцировать 1-формы. Тогда 2 правило ясно следует оттуда. Соберём обе формы в одну, здоровую. После того как продифференцировали коэффициент, вылезет ещё какой-то $\mathrm{d}x^{i_l}$. Если он из второй формы, его надо переставить через все первые p дифференциалов. Как раз и вылезет $(-1)^p$.

⟨⚒⟩ `<+понять меры Хаара. Когда-нибудь...+>`

Положим, все формы имеют гладкие коэффициенты. Тогда пока интеграл от гладкой дифференциальной формы на многообразии определим так:

Определение 6. Пусть M — простое n-мерное многообразие (покрывается одной картой $f\colon D \to M$), $u \in D$, а ω^n — дифференциальная форма с коэффициентами $a_{i_1,\dots,i_n}(x)$. Давайте её поподробней напишем

$$\omega = \sum_{i_1<\dots<i_n} a_{i_1,\dots,i_n}(x)\,\mathrm{d}x^{i_1} \wedge \dots \wedge \mathrm{d}x^{i_n}$$

Тогда можно написать такое определение:

$$\int_M \omega^n := \int_D a_{i_1,\dots,i_n}(x) \bigwedge_{j=1}^{n} \mathrm{d}x^{i_j} := \int_D a_{i_1,\dots,i_n}\big(f(u)\big) \frac{\partial x^{i_1..i_k}}{\partial u^{i_1..i_k}}\,\mathrm{d}\lambda_n(u)$$

Здесь на самом деле обычный интеграл Римана, все функции под интегралом непрерывны.

Замечание 1. Здесь нужно и можно вспомнить, что в интеграле 1 рода был $\sqrt{g(u)} = \left|(\frac{\partial x}{\partial u})^T \frac{\partial x}{\partial u}\right|$. Те есть, корень из суммы квадратов тех миноров, что здесь.

Общее определение требует понимания разбиения единицы, а я пока так не умею.

Теперь минутка конкретики

Утверждение 2. *Пусть $F = (P, Q, R)$, $\omega_F^1 = P\,\mathrm{d}x + Q\,\mathrm{d}y + R\,\mathrm{d}y$. Положим, G — кривая (одномерное многообразие). Тогда*

$$\int_\Gamma \langle F, \tau\rangle\,\mathrm{d}s = \int_\Gamma \omega_F^1$$

▼

Заметим, что $\mathrm{d}s = |r'|\,\mathrm{d}t$, тогда $\tau\,\mathrm{d}s = (\mathrm{d}x, \mathrm{d}y, \mathrm{d}z)$. Кажется, всё.

▲

Утверждение 3. *Пусть ω_F^1 точна, то есть $\omega = \mathrm{d}\Phi$. Тогда*

$$\int_\Gamma \omega_F^1 = \Phi(B) - \Phi(A).$$

Физический смысл этого дела — работа.

Определение 7. Форма ω точна, если $\Gamma \int_\Gamma \omega = 0$

Определение 8. Форма ω замкнута, если $\mathrm{d}\omega = 0$.

Утверждение 4. *Пусть M — 2-мерная гадкая ориентируемая поверхность, $F = (P, Q, R)$, $\omega_F^2 = P\,\mathrm{d}y \wedge \mathrm{d}z + Q\,\mathrm{d}z \wedge \mathrm{d}x + R\,\mathrm{d}x \wedge \mathrm{d}y$. Тогда*

$$\int_M \omega_F^2 = \int_M \langle F, n\rangle\,\mathrm{d}s$$

▼

Пусть $N = (A, B, C)$. $\mathrm{d}S$ можно расписать получше.

$$L = \frac{\partial r}{\partial(u,v)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \\ \frac{\partial z}{\partial u} & \frac{\partial z}{\partial v} \end{pmatrix}$$

При умножении на транспонированную воспольземся известной формулой с суммой миноров:

$$g = L^T L = I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 = A^2 + B^2 + C^2 \Rightarrow \mathrm{d}S = \sqrt{g} = |N|$$

Тогда $Fn\,\mathrm{d}S = (PA + QB + RC)\,\mathrm{d}u$. А теперь смотрим на определение 2.42.6 и понимаем что там ровно то же самое.

▲

Билет № 43: Дифференцирование векторных полей

по методичке Лодкина Здесь — основные утверждения

Определение 1. Пусть f — скалярное поле, $F = (P, Q, R)$ — векторное. Тогда

$$\begin{aligned}
\nabla f = \operatorname{grad} f &= \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z}\right) \\
\nabla \times F = \operatorname{rot} F &= \left(\frac{\partial R}{\partial y} - \frac{\partial Q}{\partial z}, \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\partial R}{\partial x}, \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y}\right) \\
\langle \nabla, F\rangle = \operatorname{div} F &= \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z}
\end{aligned}$$

Утверждение 1. *При обратимом гладком преобразовании координат $\Psi\colon x \mapsto \widetilde{x}$ ротор и дивергенция изменяются следующим образом.*

$$\begin{aligned}
\operatorname{div} \widetilde{F}(\widetilde{r}) &= \operatorname{div} F(r) \\
\operatorname{rot} \widetilde{F}(\widetilde{r}) &= \Psi(\operatorname{rot} F(r))
\end{aligned}$$

Теорема 2. *Пусть F — гладкое поле. Тогда*

$$\begin{aligned}
\operatorname{rot} F(r) &= \operatorname{rot}\Big(\mathrm{d}F_r(h)\Big) \\
\operatorname{div} F(r) &= \operatorname{div}\Big(\mathrm{d}F_r(h)\Big)
\end{aligned}$$

□ Ну, если отображение линейно, то его матрица Якоби равна его матрице. А дальше очевидно ■

Теорема 3. *Пусть $a, b \in \mathbb{R}^3$. Тогда*

$$\begin{array}{llll}
F(r) = r & \Rightarrow & \operatorname{rot} F = 0 & \operatorname{div} F = 3 \\
F(r) = a \times r & \Rightarrow & \operatorname{rot} F = 2a & \operatorname{div} F = 0 \\
F(r) = \langle a, r\rangle b & \Rightarrow & \operatorname{rot} F = a \times b & \operatorname{div} F = \langle a, b\rangle
\end{array}$$

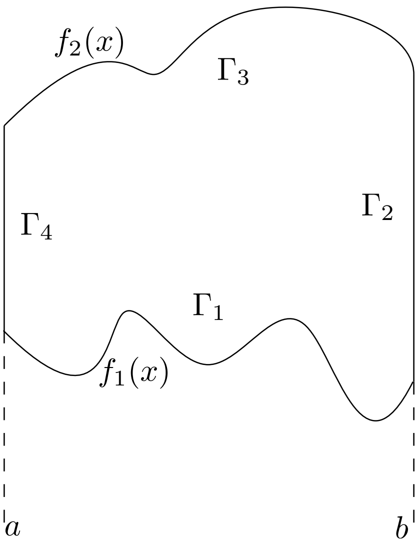
Билет № 44: Формула Грина

Теорема 1. *Пусть D — связное двумерное ориентируемое гладкое компактное подмногообразие $\mathbb{R}^2$ с краем, $\omega = P\,\mathrm{d}x + Q\,\mathrm{d}y$ — гладкая дифференциальная форма. Тогда*

$$\int_{\partial D} \omega = \iint_D \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y}\right) \mathrm{d}x \wedge \mathrm{d}y$$

□ Здесь почти нигде не пользуются явным определением формы на многообразии. Ну, а зачем, пространство двумерное. Так что можно сразу сказать, что нормаль лишь повлияет на знак $\mathrm{d}x \wedge \mathrm{d}y$ и не думать особо про то что x, y не очень совпадает с пространством параметров.

Много пунктов. Сначала разбить на области типа y (с вертикальными краями). И ещё занулить Q, например.



Тогда $\displaystyle\int_\Gamma \omega = \int_{\Gamma_1} \omega + \int_{\Gamma_3} \omega = \int_a^b P(t, f_1(t)) - P(t, f_2(t))\,\mathrm{d}t$

Тем временем, от $\displaystyle\iint_D \cdots$ осталось лишь $(-1) \cdot \displaystyle\int_a^b \mathrm{d}x \int_{f_1(x)}^{f_2(x)} \frac{\partial P}{\partial y}\,\mathrm{d}y$.

Как видно, получилось.

Произвольная область легко [1] режется на области типа y. Склеивать их можно, так как интеграл по вертикальным сторонам 0.

А потом сложить это с областями типа x. ■

Билет № 45: Классическая формула Стокса

Теорема 1. *Пусть M — компактная ориентируемая поверхность в $\mathbb{R}^3$ с краем, F — гладкое векторное поле. Тогда*

$$\iint_M \langle \operatorname{rot} F, n\rangle\,\mathrm{d}S = \oint_{\partial M} \langle F, \tau\rangle\,\mathrm{d}s$$

□ Поскольку всё еще непонятно, что есть интеграл от формы по непростому многообразию, придётся ограничиться простыми.

Пусть $F = (P, Q, R)$, $N = (A, B, C)$. Здесь можно снова занулить Q, R. Тогда

$$\operatorname{rot} Fn = \frac{1}{|N|}\Big\langle (0, P_z, -P_y), N\Big\rangle = \frac{1}{|N|}(P_z B - P_y C)$$

Тперь про вторую половину.

$$\oint_\Gamma \langle F, \tau\rangle\,\mathrm{d}s = \oint_{\widetilde{\Gamma}} P x_u\,\mathrm{d}u + P x_v\,\mathrm{d}v = \oint_{\widetilde{\Gamma}} \widetilde{\omega}$$

Здесь мы довольно коварно перешли от границы многообразия к границе пространства параметров. И ещё одна проблема как будто возникает из-за того, что в определении многообразия с границей граница вроде не замкнута. Да и вообще прямая. Впрочем, это лечится инверсией. А вот что делать бесконечностью — непонятно. Разве что сказать, что одна точка имеет меру ноль.

Ладно, тут пользуемся теоремой 2.44.1, и получим первую половину. ■

Билет № 46: Формула Гаусса-Остроградского

Теорема 1. *Пусть V — компактное тело в $\mathbb{R}^3$ с гладкой границей (гладким подмногообразием $\mathbb{R}^3$). Нормаль выберем «наружу». Тогда*

$$\oiint_M \langle F, n\rangle\,\mathrm{d}S = \iiint_V \operatorname{div} F\,\mathrm{d}V$$

[1] нет

□ Идейно мало чем отличается от теоремы Грина. Тоже разбиваем всё на области с вертикальными гранями, а потом складываем. ■

Все равно все эти теоремы никому не нужны, а лучше пользоваться абстрактной формулой Стокса

$$\int_{\partial M} \omega = \int_M \mathrm{d}\omega$$

Билет № 47: Физический смысл дивергенции и ротора

Дивергенция — удельный (по объему) поток через через бесконечно малую поверхность. С ротором — сложно. Можно представить себе как-то так. Выделим контур (в жидкости) и заморизим всё, кроме него. Тогда средняя скорость (усреднённая по площади!) будет чем-то вроде ротора.

См Фейнмановские лекции по физике, том 5 или 6. Который про магнетизм.

Билет № 48: Разные векторные поля

Попробуем в красивые таблички: 2.1

Из нечетных условий следуют чётные. Наоборот работает лишь там, где любая петля стягивается в точку.

Билет № 49: Примеры полей с разными свойствами

вот тут уже точно по методичке Лодкина.

Таблица 2.1: Разные поля

Название	F	ω_F	$\int \omega_F$
Потенциальное	$F = \operatorname{grad} \Phi$	точна, $p = 1$	ноль для любой петли. Следует хоть из Ньютона-Лейбница.
Безвихревое	$\operatorname{rot} F = 0$	замкнута, $p = 1$	ноль для петель, что граница какой-нибудь поверхности. Можно проверить через формулу Стокса (2.45.1)
Соленоидальное	$F = \operatorname{rot} B$	точна, $p = 2$	$\iint_M \omega = 0$, M — замкнута. Проверяется тоже через Стокса, но в другую сторону.
Безвихревое	$\operatorname{div} F = 0$	замкнута, $p = 2$	ноль, для поверхностей, являющихся краем трехмерных многообразий. Проверяется через Гаусса-Остроградского. (2.46.1)

Глава 3: Анализ Фурье ⟨⚒⟩

Билет № 50: Гильбертово пространство. $\mathcal{L}_2$

Определение 1. Пусть H — линейное пространство над полем $\mathbb{C}$. Введём на нём (эрмитово) скалярное произведение, связанную с ним норму и метрику. Допустим, оно полно по введённой метрике. Тогда H — гильбертово пространство.

Замечание 1. Если полноты нет, то пространство называется предгильбертовым.

Утверждение 1. *Скалярное произведение — непрерывно.*

Пример 1. Пусть (X, μ) — пространство с мерой. Рассмотрим пространство $\widetilde{L}$

$$\widetilde{L} := \left\{ f \;\middle|\; f\colon X \to \mathbb{C},\ \text{измерима}, \int_X |f|^2 \,\mathrm{d}\mu < \infty \right\}$$

Скалярное произведение зададим так:

$$\langle f, g \rangle = \int_X f \cdot \overline{g} \,\mathrm{d}\mu$$

Введем теперь отношение эквивалентности $f \sim g := f = g$ п.в. . Тогда $\mathcal{L}_2 = \widetilde{L}/_{\sim}$.

Теорема 2. *$\mathcal{L}_2$ полно по мере, введённой выше.*

Билет № 51: Ортогональные системы. Ряд Фурье в гильбертовом пространстве.

Определение 1. $\delta_{ij} \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$

Определение 2. Пусть H — гильбертово. Рассмотрим $f_1, \ldots, f_n \in H$. Допустим, $\langle f_i, f_j \rangle = \delta_{ij}$. Тогда (f_i) — ортогональная система.

Теорема 1 (Пифагора ⟨ᵕ̈⟩)**.** *Пусть (f_i) — ортогональная система. Допустим, $f = \sum_k f_k$. Тогда*

$$\|f\|^2 = \sum_k \|f_k\|^2$$

Определение 3. Пусть (e_i) — ортогональная система, $f \in H$. Тогда

$$c_n = \left\langle f, \frac{e_n}{\|e_n\|} \right\rangle \text{ — коэффициенты Фурье } f$$

$$f = \sum_k c_k e_k \text{ — ряд Фурье } f$$

Теорема 2 (Неравенсто Бесселя). *Пусть $f \in H$, (e_i) — ортогональная система. Тогда*
$$\sum_n |c_n|^2 \|e_n\|^2 \leqslant \|f\|^2$$

Определение 4. Пусть (e_i) — ортогональная система. Допустим
$$\forall\, f \in \mathcal{L}_2 \ :: \ f \sim \sum_n c_n e_n$$

Тогда (e_i) — полная система.

Утверждение 3. *Разложение в ряд Фурье по полной ортогональной системе — единственно.*

Билет № 52: Тригонометрические системы

Определение 1. $\mathcal{L}_2^{2\pi} = \mathcal{L}_2\big((0;2\pi),\mu\big) \cap \{2\pi\text{-периодичные функции}\}$.

Утверждение 1. $1, \cos x, \sin x, \cos 2x, \ldots$ *— ортогональная система*

Утверждение 2. $1, e^x, e^{2x}, \ldots$ *— ортогональная система*

Теорема 3. *Тригонометрические системы выше — полны.*

$\square$ $\langle ? \rangle$Вообще, тут большой кусок теории. $\blacksquare$

Определение 2. Будем понимать
$$\sum_{-\infty}^{\infty} a_n := \mathrm{V.\,p.} \sum_{-\infty}^{\infty} a_n = \lim_{N \to +\infty} \sum_{-N}^{N} a_n$$

Утверждение 4. *Коэффициенты разложения по синусам и косинусам:*
$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x)\, \cos nx \, \mathrm{d}x \ (n \geqslant 1)$$
$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x)\, \sin nx \, \mathrm{d}x \ (n \geqslant 1)$$
$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x)\, \mathrm{d}x$$
$$\widetilde{a_0} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x)\, \mathrm{d}x = 2a_0$$
$$f(x) \sim a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_n \, \cos nx + \sum_{k=1}^{\infty} b_n \, \sin nx$$

Утверждение 5. *Коэффициенты разложения по экспонентам:*
$$c_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x)\, e^{-inx} \, \mathrm{d}x$$
$$f(x) \sim \sum_{k=-\times}^{\infty} c_n e^{inx}$$

Билет № 53: Ядро Дирихле. Лемма Римана-Лебега

Определение 1 (Ядро Дирихле)**.** $\mathcal{D}_n(x) := \sum\limits_{-n}^{n} e^{ikx}$

Лемма 1 (Свойства ядра Дирихле)**.**

1. $\mathcal{D}_n(-x) = \mathcal{D}(x)$
2. $\mathcal{D}_n(x) = \dfrac{\sin(n + 1/2)x}{\sin\frac{x}{2}}$
3. *всякие следствия отсюда*

Определение 2 (Ядро Фейера)**.** $\mathcal{F}_n(x) := \frac{1}{n}\sum\limits_{k=0}^{n-1} \mathcal{D}_k(x)$

Лемма 2 (Свойства ядра Фейера)**.**

1. $\mathcal{F}_n(-x) = \mathcal{F}(x)$
2. $\mathcal{F}_n(x) = \dfrac{1}{n} \cdot \dfrac{\sin^2\left(\frac{nx}{2}\right)}{\sin^2\frac{x}{2}}$
3. *всякие следствия отсюда*

Лемма 3 (Римана-Лебега)**.** *Пусть* $f \in \mathcal{L}(\mathbb{R})$*. Тогда*

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\sin nx\, x \xrightarrow[n\to\infty]{} 0$$
$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\cos nx\, x \xrightarrow[n\to\infty]{} 0$$
$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)e^{-inx}\, x \xrightarrow[n\to\infty]{} 0$$

Билет № 54: Теорема Дини о поточечной сходимости

Теорема 1 (Дини)**.** *Пусть* $f \in \mathcal{L}_2^{2\pi}$*,* $x \in \mathbb{R}$*. Допустим,* f *удовлетворяет условию Дини:*

$$\exists\, L \in \mathbb{C}, \delta > 0 \ :: \ u \in \mathcal{L}\big((0;\delta)\big), u(t) = \frac{f(x+t) + f(x-t) - 2L}{t}$$

Тогда

$$S_n(x) = \sum_{k=-n}^{n} c_n e^{ikx} \xrightarrow[n\to\infty]{} L$$

Утверждение 2. *Частные случаи условия Дини:*

1. $\exists$ *конечные* $f(x \pm 0)$*,* $f'(x \pm 0)$*. При этом* $L = \frac{1}{2}(f(x+0) + f(x-0))$*.*
2. f *непрерывна в* x*,* $\exists$ *конечные* $f'(x \pm 0)$*. При этом* $L = f(x)$*.*
3. f *дифференцируема в* x*. При этом* $L = f(x)$*.*

Билет № 55: Свойства коэффициентов Фурье

Обозначение. $\widehat{f}(n) := c_n = \dfrac{1}{2\pi}\displaystyle\int_{-\pi}^{\pi} f(x)\, e^{-inx}\, \mathrm{d}x$

Утверждение 1. $f \in \mathcal{L}_2^{2\pi} \Rightarrow \widehat{f}(n) \xrightarrow[n\to\infty]{} 0$

Утверждение 2. *Пусть* $\exists\, f' \in \mathcal{L}_2^{2\pi}$. *Тогда*

- $\widehat{f}'(n) = in\widehat{f}(n)$
- $\widehat{f}(n) = o\left(\frac{1}{n}\right),\ n \to \infty$

Утверждение 3. *Пусть* $\exists\, f^{(p)} \in \mathcal{L}_2^{2\pi}$. *Тогда*

- $\widehat{f^{(p)}}(n) = (in)^p \cdot \widehat{f}'(n)$
- $\widehat{f}(n) = o\left(\frac{1}{n^p}\right),\ n \to \infty$

Утверждение 4. *Пусть* $c_n = O\left(\dfrac{1}{n^{p+2}}\right)$. *Тогда* $\exists\, \varphi \in C_{2\pi}^p \ :: \ \varphi \sim f$.

Билет № 56: Сходимость рядов Фурье..

1° $f \in \mathcal{L}_1^{2\pi} \Rightarrow \forall\, \Delta \subset [-\pi, \pi] \ :: \ \displaystyle\int_\Delta f(x)\, \mathrm{d}x = \sum_{-\infty}^{\infty} \widehat{f}(n) \int_\Delta e^{inx}\, \mathrm{d}x.$

2° $f \in \mathcal{L}_1^{2\pi} \Rightarrow c_n$ определены.

3° $f \in \mathcal{L}_2^{2\pi} \Rightarrow \|S_n - f\| \to 0.$

4° $f \in C^{(p)} \Rightarrow c_n$ быстро убывают.

5° c_n быстро убывают $\Rightarrow f \in C^{(p)}$.

6° теорема Дини 3.54.1

7° теорема Фейера 3.56.1

Теорема 1 (Фейера)**.** *Пусть* $f \in C^{2\pi}$. *Тогда* $\sigma_n \overset{\mathbb{R}}{\rightrightarrows} f$, *где* $\sigma_n = \frac{1}{n}\displaystyle\sum_{k=0}^{n-1} S_k$. *(сходимость по Чезаро).*

Билет № 57: Преобразование Фурье

Определение 1. Пусть $f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R})$. Тогда

$$\widehat{f}(s) := \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-isx}\, \mathrm{d}x$$

1. $|\widehat{f}(s)| \leqslant \frac{1}{2\pi}\|f\|_1$.
2. $\widehat{f}(s) \in C^0$.
3. $\Big(g(x) = x^n f(x) \in \mathcal{L}_1\Big) \Rightarrow \widehat{f}(s) \in C^{(n)}$.

4. $\widehat{f}(s) \xrightarrow[s\to\infty]{} 0$.

5. $\left(f \in C^{(p)}, f^{(p)} \in \mathcal{L}_1\right) \Rightarrow \widehat{f}(s) = o\left(\frac{1}{|s|^p}\right)$.

6. $f \in \mathcal{L}_1, a \in \mathbb{R}, g(x) = f(x-a) \Rightarrow \widehat{g}(s) = e^{-isa}\,\widehat{f}(s)$

7. $f, g \in \mathcal{L}_1$. Тогда
$$\widehat{f * g}(s) = 2\pi\,(\widehat{f}(s) \cdot \widehat{g}(s))$$

8. Интегральная формула Фурье 3.57.1

Теорема 1 (формула восстановления Дини)**.** *Пусть $f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R})$, $x \in \mathbb{R}$, $L \in \mathbb{C}$* [1]*. Допустим f удовлетворяет условию Дини в точке x с константой L. Тогда*

$$\check{\widehat{f}}(x) = L$$

Для непрерывных функций

$$f(x) = \mathrm{V.\,p.} \int_{-\infty}^{+\infty} \widehat{f}(s)\, e^{isx}\,\mathrm{d}x$$

Билет № 58: Решение уравнения теплопроводности

Само уравнение теплопроводности выглядит так:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

Но к нему ещё есть пара начальных условий:

$$u(x, 0) = f(x)$$
$$f \in \mathcal{L} \qquad f \in C^2_x$$

⟨⚒⟩: `<+решить что-ли..+>`
В итоге получится что-то вроде

$$u(x,t) = \frac{1}{2a\sqrt{\pi t}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{(x-y)^2}{4a^2 t}\right) \cdot f(y)\,\mathrm{d}y$$

[1]Тут по идее все можно в $\mathbb{C}$

Глава A: Обозначения

Обозначения с лекции

$a := b$ — определение a.

$\bigsqcup\limits_k A_k$ — объединение дизъюнктных множеств.

$\mathcal{A}$ — Алгебра множеств

$\overline{A}$ — Замыкание A.

A^c — $X \setminus A$.

Нестандартные обозначения

⟨⚒⟩ — ещё правится. Впрочем, относится почти ко всему.

$\square \cdots \blacksquare$ — начало и конец доказательства теоремы

$\blacktriangledown \cdots \blacktriangle$ — начало и конец доказательства более мелкого утверждения

⟨$\ddot{\approx}$⟩ — кривоватая формулировка

⟨`:set aflame`⟩ — набирающему зело не нравится билет

`<+что-то+>` — тут будет `что-то`, но попозже

$a \,..\, b$ — $[a; b] \cap \mathbb{Z}$

$\equiv$ — штуки эквивалентны. Часто используется в этом смысле в определениях, когда вводится два разных обозначения одного и того же объекта.

$::$ — В кванторах, «верно, что»

$\mathcal{A}_\sigma$ — Сигма-алгебра множеств

$f : A \leftrightarrow B$ —биекция