

Конспект по матанализу
III семестр
Современное программирование, факультет математики и
компьютерных наук, СПбГУ
(лекции Бахрева Федора Львовича)

Тамарин Вячеслав

20 сентября 2020 г.

Оглавление

1	Функциональные последовательности и ряды	2
1.1	Равномерная и поточечная сходимости	2
1.2	Равномерные и поточечные сходимости рядов	4
1.3	Свойства равномерно сходящихся функциональных последовательностей и рядов	7
1.4	Степенные ряды	9
1.5	Разложение элементарных функций в ряды Тейлора	14
2	Теория меры и интегрирования	16
2.1	Системы множеств	16

Глава 1

Функциональные последовательности и ряды

Лекция 1: †

2 Sept

1.1 Равномерная и поточечная сходимости

Определение 1: Поточечная сходимость

Пусть определена последовательность функций $f_n: E \rightarrow \mathbb{R}(\mathbb{C})$, и $f: E \rightarrow \mathbb{R}(\mathbb{C})$. Тогда говорят, что f_n сходится к f поточечно ($f_n \rightarrow f$), если

$$\forall x \in E: \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x).$$

То есть для любого $x \in E$ и любого $\varepsilon > 0$ существует $N_{(x,\varepsilon)}$ такое, что

$$\forall n > N: |f_n(x) - f(x)| < \varepsilon.$$

Замечание. Это определение можно обобщить куда угодно, где есть мера. В данном курсе под E обычно подразумевается подмножество \mathbb{R}^n .

Определение 2: Равномерная сходимость

Пусть определена последовательность функций $f_n: E \rightarrow \mathbb{R}(\mathbb{C})$, и $f: E \rightarrow \mathbb{R}(\mathbb{C})$. Тогда говорят, что f_n сходится к f равномерно на E ($f_n \rightrightarrows f$), если для любого $\varepsilon > 0$ существует $N_{(\varepsilon)}$ такое, что

$$\forall n > N \forall x \in E: |f_n(x) - f(x)| < \varepsilon.$$

Пример 1.1.1. Рассмотрим функции $f_n(x) = x^n$ на отрезке $(0, 1)$. Так как $\forall x \in (0, 1): x^n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$, $f_n \rightarrow f \equiv 0$. Но $f_n \not\rightrightarrows 0$, потому что, например, для $\varepsilon = \frac{1}{2}$ каким бы ни было N для всех $n > N$ можно взять такое x рядом с единицей, что $|x^n - 0| > \frac{1}{2}$.

Утверждение. $f_n \rightrightarrows f$ на E равносильно тому, что

$$\sup_{x \in E} |f_n(x) - f(x)| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0.$$

Ремарка. Если мы смотрим на множество непрерывных функций на компакте $C(K)$, где норма

$$\|f\|_{C(K)} = \max_{x \in K} |f(x)|,$$

то из поточечной сходимости следует равномерная:

$$f_n \rightarrow f \implies \|f_n - f\| \rightarrow 0 \iff f_n \rightrightarrows f \text{ на } K.$$

Аналогично будет с множеством ограниченных функций на E ($l^\infty(E)$) с нормой

$$\|f\|_\infty = \sup_{x \in E} |f(x)|.$$

Определение 3: Равномерная ограниченность

Последовательность функций $f_n: E \rightarrow \mathbb{R}(\mathbb{C})$ называется **равномерно ограниченной** на E , если существует такое M , что

$$\forall x \in E \forall n \in \mathbb{N}: |f_n(x)| \leq M.$$

Пример 1.1.2. Пусть $f_n \in C(K)$. Тогда равномерная ограниченность $\{f_n\}$ равносильна ограниченности по норме, то есть все функции содержатся в некотором шаре с центром в нуле.

Свойства.

0. Из равномерной сходимости следует поточечная

1. Если для всех $x \in E$ выполнено

$$|f_n(x) - f(x)| \leq a_n,$$

где $\{a_n\}$ — последовательность, стремящаяся к нулю при $n \rightarrow \infty$, то f_n равномерно сходится к f на E .

2. Если существует ε_0 и $x_n \in E$ для всех n такие, что

$$|f_n(x_n) - f(x_n)| \geq \varepsilon_0,$$

то f_n не сходится равномерно к f на E .

3. Пусть $\{f_n\} \Rightarrow f$ на E и $\{g_n\}$ равномерно ограничена на E . Тогда $f_n g_n \Rightarrow 0$.

Доказательство.

$$\sup_{x \in E} |f_n(x) g_n(x)| \leq M_{g_n} \cdot \underbrace{\sup_{x \in E} |f_n(x)|}_{\rightarrow 0} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0.$$

□

4. **Критерий Коши.** Пусть $f_n: E \rightarrow \mathbb{R}(\mathbb{C})$. f_n равномерно сходится на E , тогда¹ для любого положительного ε существует N , что

$$\forall n, m > N \forall x \in E: |f_n(x) - f_m(x)| < \varepsilon.$$

Доказательство.

1 \Rightarrow 2 Запишем определение равномерной сходимости на E для $\frac{\varepsilon}{2}$:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N: \forall n > N \forall x \in E \quad |f_n(x) - f(x)| < \frac{\varepsilon}{2}.$$

Тогда для любых $n, m > N$

$$\begin{aligned} |f_m(x) - f(x)| &\leq \\ &\leq |f_m(x) - f(x)| + |f_n(x) - f(x)| \leq \\ &\leq \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon \end{aligned}$$

2 \Rightarrow 1 Из условия Коши получаем, что для всех $x \in E$ последовательность $f_n(x)$ фундаментальна.

Следовательно, существует предел $f(x) := \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$.

Устремим $m \rightarrow \infty$. Тогда

$$|f_n(x) - f(x)| \leq \varepsilon.$$

По определению равномерной сходимости получаем, что $f_n \Rightarrow f$ на E .

¹С этого момента буду писать «согда» вместо «тогда и только тогда, когда», чтобы упростить формулировки

□

5. Пусть E — метрическое пространство. Рассмотрим последовательность непрерывных в точке $x \in E$ функций $f_n: E \rightarrow \mathbb{R}(\mathbb{C})$. Если $f_n \Rightarrow f$ на E , то f тоже непрерывна в точке a .

Доказательство. Проверим, что

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x) = f(a).$$

А именно, для любого $\varepsilon > 0$ существует $\delta > 0$ такое, что

$$\forall x \in E \quad \rho(x, a) < \delta \implies |f(x) - f(a)| < \varepsilon.$$

Используем равномерную сходимость: для любого $\varepsilon > 0$ существует N такое, что

$$\forall n > N \quad \forall x \in E \quad |f_n(x) - f(x)| < \frac{\varepsilon}{3}.$$

Так как f_n непрерывна в точке a , можем записать определение для $\frac{\varepsilon}{3}$ и заодно взять $n > N$:

$$\exists \delta > 0: \forall x \in E \quad \rho(x, a) < \delta \implies |f_n(x) - f_n(a)| \leq \frac{\varepsilon}{3}.$$

Используем два полученных неравенства:

$$\begin{aligned} |f(x) - f(a)| &\leq \\ &\leq |f(x) - f_n(x)| + \\ &+ |f_n(x) - f_n(a)| + \\ &+ |f_n(a) - f(a)| < \\ &< \frac{\varepsilon}{3} \cdot 3 = \varepsilon \end{aligned}$$

□

6. **Теорема Стокса-Зайделя.** Пусть $f_n \in C(E)$. Если $f_n \Rightarrow f$, то f непрерывна на E .

Доказательство. Следствие из 5 [прошлого свойства].

□

1.2 Равномерные и поточечные сходимости рядов

Определение 4: Функциональный ряд

Рассмотрим функции $u_n: E \rightarrow \mathbb{R}(\mathbb{C})$. Тогда

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} u_n(x) &\text{ — функциональный ряд,} \\ S_n(x) = \sum_{k=1}^n u_k(x) &\text{ — частичная сумма ряда.} \end{aligned}$$

Если S_n сходится к S поточечно, то говорят, что ряд сходится поточечно. Если S_n сходится к S равномерно, то говорят, что ряд сходится равномерно.

$$r_n = S(x) - S_n(x) \text{ — остаток ряда.}$$

Замечание. Если рассматриваемые функции ограничены ($u_n \in C(K)$), то $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ — ряд в нормированном пространстве, поэтому сходимость в $C(K)$ равносильна тому, что $\|S_n - S\|_{C(K)} \rightarrow 0$. Это в свою очередь равносильно тому, что S_n сходится равномерно к S на K .

Свойства.

1. $\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x)$ равномерно сходится на E , тогда $r_n \Rightarrow 0$ на E .
2. **Критерий Коши.** $\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x)$ равномерно сходится на E , тогда для всех $\varepsilon > 0$ существует такое N , что

$$\forall m > N \quad \forall p \in \mathbb{N} \quad \forall x \in E: \left| \sum_{k=m+1}^{m+p} u_k(x) \right| = |S_{m+p} - S_m| < \varepsilon.$$

3. **Необходимое условие равномерной сходимости ряда.** Если $\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x)$ сходится равномерно на E , то u_n равномерно сходится к 0.

Доказательство. По критерию Коши для $p = 1$. □

4. **Признак сравнения.** Пусть $u_n, v_n: E \rightarrow \mathbb{R}^2$ и для всех $x \in E$ выполнено неравенство $|u_n(x)| \leq v_n(x)$. Если $\sum_{n=1}^{\infty} v_n(x)$ сходится равномерно на E , то $\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x)$ тоже сходится равномерно на E .

Доказательство. Обозначим частичные суммы

$$S_n(x) = \sum_{k=1}^n u_k(x), \quad C_n(x) = \sum_{k=1}^n v_k(x).$$

Заметим, что

$$|S_m(x) - S_n(x)| \leq \sum_{k=n+1}^m v_k(x) \leq |C_m(x) - C_n(x)|.$$

Так как $\sum_{n=1}^{\infty} v_n(x)$ равномерно сходится, можно воспользоваться критерием Коши и получить, что последний модуль меньше ε при $m, n > N$ и $x \in E$. Тогда можем применить критерий Коши для $\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x)$. □

5. **Признак Вейерштрасса.** Пусть $u_n: E \rightarrow \mathbb{R}(\mathbb{C})$ и для всех $x \in E$ выполнено неравенство $|u_n(x)| \leq a_n$. Если сходится ряд $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$, то ряд $\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x)$ сходится равномерно.

Доказательство. Применить признак Коши. □

6. Если $\sum_{n=1}^{\infty} |u_n(x)|$ сходится равномерно, то и ряд $\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x)$ сходится равномерно.
7. **Признак Дирихле.** Пусть $u_n, v_n: E \rightarrow \mathbb{R}(\mathbb{C})$, обозначим $U_n(x) = \sum_{k=1}^n u_k(x)$. Если выполнены следующие условия, ряд $\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x)v_n(x)$ сходится равномерно:

- (a) ряд U_n равномерно ограничен на E , то есть $\exists M: \forall x \in E \quad \forall n \quad |U_n(x)| \leq M$;
- (b) ряд v_n равномерно сходится к нулю ($v_n \Rightarrow 0$);
- (c) для любого $x \in E$ последовательность $\{v_n(x)\}$ монотонна.

Доказательство. Воспользуемся преобразованием Абеля:

$$S_n(x) = \sum_{k=1}^n u_k(x)v_k(x) = U_n(x)v_n(x) + \sum_{k=1}^{n-1} U_k(x)(v_k(x) - v_{k+1}(x)).$$

²Здесь на лекции u_n, v_n были определены как $E \rightarrow \mathbb{R}(\mathbb{C})$, но случае \mathbb{C} не понятно сравнение комплексного и вещественного числа в следующем неравенстве

Так как $U_n(x)$ равномерно ограничено, а $v_n(x)$ равномерно сходится к нулю, $U_n(x)v_n(x)$ тоже равномерно сходится к нулю. Теперь докажем, что второе слагаемое тоже равномерно сходится. Для этого достаточно проверить, что следующий ряд равномерно сходится

$$\sum_{k=1}^{\infty} |U_k(x)(v_k(x) - v_{k+1}(x))|.$$

Оценим частичную сумму³

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{n-1} |U_k(x)(v_k(x) - v_{k+1}(x))| &\leq \\ &\leq \sum_{k=1}^{n-1} |U_k(x)| \cdot |v_k(x) - v_{k+1}(x)| \leq \\ &\leq M \cdot \sum_{k=1}^{n-1} |v_k(x) - v_{k+1}(x)| = \\ &= M \cdot |v_1(x) - v_n(x)| \end{aligned}$$

Так как $v_n \Rightarrow 0$, $|v_1(x) - v_n(x)| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} |v_1(x)|$. Значит, частичная сумма ряда стремится к $M \cdot |v_1(x)|$, следовательно⁴, второе слагаемое тоже равномерно сходится, а тогда и сумма равномерно сходится. \square

8. Признак Лейбница. Если выполнены следующие условия, то ряд $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n v_n(x)$ равномерно сходится:

- (a) $v_n \Rightarrow 0$ на E ;
- (b) для любого $x \in E$, ряд $\{v_n(x)\}$ монотонный.

Доказательство. Обозначим за $u_n(x) := (-1)^n$. Заметим, что ряд $U_n(x) = \sum_{k=1}^n u_k(x)$ ограничен, тогда по признаку Дирихле $\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x)v_n(x)$ равномерно сходится. \square

Пример 1.2.1. Рассмотрим ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(nx)}{n}$. Обозначим $u_n(x) = \sin(nx)$ и $v_n(x) = \frac{1}{n}$. Последний равномерно сходится к нулю и монотонно убывает.

$$\begin{aligned} U_n(x) &= \sum_{k=0}^n \sin(kx) = \\ &= \operatorname{Im} \left(\sum_{k=0}^n e^{ikx} \right) = \operatorname{Im} \left(\frac{1 - e^{i(n+1)x}}{1 - e^{ix}} \right) = \\ &= \operatorname{Im} \left(\frac{e^{ix \cdot \frac{n+1}{2}} \cdot (e^{ix \cdot \frac{n+1}{2}} - e^{-ix \cdot \frac{n+1}{2}})}{e^{\frac{ix}{2}} - e^{-\frac{ix}{2}}} \right) = \\ &= \operatorname{Im} \left(e^{\frac{ixn}{2}} \right) \cdot \frac{\sin \frac{n+1}{2}x}{\sin \frac{x}{2}} = \\ &= \frac{\sin \frac{nx}{2} \cdot \sin \frac{n+1}{2}x}{\sin \frac{x}{2}} \end{aligned}$$

³В последнем переходе мы используем монотонность $v_k(x)$

⁴Например, по признаку сравнения

Пример 1.2.2. Рассмотрим ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n x^n}{n}$ при $x \in (0, 1)$. Обозначим $v_n(x) = \frac{x^n}{n}$. $v_n(x)$ монотонна для всех $x \in (0, 1)$, так же $|v_n(x)| \leq \frac{1}{n}$, поэтому v_n равномерно сходится к нулю. По признаку Лейбница исходный ряд равномерно сходится.

9. Признак Абеля. Пусть $u_n, v_n: E \rightarrow \mathbb{R}(\mathbb{C})$. Если выполнены следующие условия, ряд $\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x)v_n(x)$ сходится равномерно:

- (a) ряд $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ равномерно сходится на E ;
- (b) ряд v_n равномерно ограничен;
- (c) для любого $x \in E$ последовательность $\{v_n(x)\}$ монотонна.

Доказательство. Проверим критерий Коши, а именно: для любого $\varepsilon > 0$ должно существовать число N такое, что

$$\forall n > N \quad \forall p \in \mathbb{N} \quad \forall x \in E: \left| \sum_{k=n+1}^{n+p} u_k(x)v_k(x) \right| < \varepsilon.$$

Используем преобразование Абеля⁵:

$$\begin{aligned} \sum_{k=n+1}^{n+p} u_k(x)v_k(x) &= \sum_{k=1}^p u_{n+k}(x) + v_{n+k}(x) = \\ &= (U_{n+p}(x) - U_n(x)) \cdot v_{n+p}(x) + \sum_{k=1}^{p-1} (U_{n+k}(x) - U_n(x)) \cdot (v_{n+k}(x) - v_{n+k+1}(x)) \end{aligned}$$

Так как v_n равномерно ограничено, а u_n равномерно сходится⁶:

$$(U_{n+p}(x) - U_n(x)) \cdot v_{n+p}(x) \leq |U_{n+p}(x) - U_n(x)| \cdot M < \varepsilon \cdot M.$$

Для второго слагаемого аналогично используем критерий Коши для u_n и монотонность v_n :

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{p-1} (U_{n+k}(x) - U_n(x)) \cdot (v_{n+k}(x) - v_{n+k+1}(x)) &\leq \\ &\leq \sum_{k=1}^{p-1} |U_{n+k}(x) - U_n(x)| \cdot |v_{n+k}(x) - v_{n+k+1}(x)| \leq \\ &\leq \varepsilon \cdot \sum_{k=1}^{p-1} |v_{n+k}(x) - v_{n+k+1}(x)| \leq \\ &\leq \varepsilon \cdot |v_{n+1}(x) - v_{n+p}(x)| \leq \varepsilon \cdot 2M \end{aligned}$$

Итого, оценили сумму из критерия Коши через ε , поэтому можем им воспользоваться. □

1.3 Свойства равномерно сходящихся функциональных последовательностей и рядов

Свойства.

1. Пусть $f_n, f: E \rightarrow \mathbb{R}(\mathbb{C})$, a — предельная точка E , f_n равномерно сходится к f на E и существует предел $\lim_{x \rightarrow a} f_n(x) = b_n$. Тогда пределы $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n$, $\lim_{x \rightarrow a} f(x)$ существуют и равны.

То есть

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \lim_{x \rightarrow a} f_n(x) = \lim_{x \rightarrow a} \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x).$$

⁵Для удобства сделаем, чтобы сумма начиналась с единицы. Из-за этого придется писать больше скобок.

⁶Поэтому можем использовать критерий Коши

Доказательство.

- (а) Проверим, что у b_n есть предел. Из критерия Коши для f_n следует, что для каждого $\varepsilon > 0$ существует N , что

$$\forall n, m > N \quad \forall x \in E: |f_n(x) - f_m(x)| < \varepsilon.$$

Устремим $x \rightarrow a$. Тогда $f_n(x) \rightarrow b_n$ и $f_m(x) \rightarrow b_m$. Из того, что

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists N: \forall n, m > N \quad |b_n - b_m| < \varepsilon,$$

следует, что последовательность $\{b_n\}$ фундаментальна. Поэтому предел b_n существует и $b := \lim_{n \rightarrow \infty} b_n$.

- (b) Определим функции

$$g_n(x) = \begin{cases} f_n(x) & x \neq a \\ b_n & x = a \end{cases}, \quad g(x) = \begin{cases} f(x) & x \neq a \\ b & x = a \end{cases}$$

Эти функции непрерывны в точке a . Кроме этого $g_n \rightrightarrows g$ на $E \cup \{a\}$, так как можно выбрать N из прошлого пункта.

- (c) Используем свойство равномерной сходимости

$$b = \lim_{x \rightarrow a} g(x) = \lim_{x \rightarrow a} f(x).$$

□

Следствие 1. Если $f_n: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}(\mathbb{C})$, $f_n \rightrightarrows f$ на (a, b) и f_n непрерывна, то $f_n \rightrightarrows f$ на $[a, b]$

Лекция 2: †

9 Sept

2. Пусть $u_n: E \rightarrow \mathbb{R}(\mathbb{C})$, a — предельная точка E и $\lim_{x \rightarrow a} u_n(x) = b_n$. Если $\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x)$ равномерно сходится на E , то $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ сходится и

$$\sum_{n=1}^{\infty} \lim_{x \rightarrow a} u_n(x) = \lim_{x \rightarrow a} \sum_{n=1}^{\infty} u_n(x).$$

Доказательство. Обозначим частные суммы за

$$S_n(x) = \sum_{k=1}^n u_k(x)$$

$$B_n = \sum_{k=1}^n b_k$$

Тогда $\lim_{x \rightarrow a} S_n(x) = B_n$ и $S_n \rightrightarrows S$ на E . $S_n(x)$ — функции, поэтому можно применить свойство 1 и получить

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \lim_{x \rightarrow a} S_n = \lim_{x \rightarrow a} \lim_{n \rightarrow \infty} S_n(x).$$

□

3. Пусть $f_n \in C[a, b]$ и $f_n \rightrightarrows f$ на $[a, b]$ ⁷. Рассмотрим произвольную точку $c \in [a, b]$ и первообразную $\int_c^x f_n(t) dt$. Тогда

$$\int_c^x f_n(t) dt \rightrightarrows \int_c^x f(t) dt \text{ на } [a, b].$$

⁷Из этих двух условий автоматически следует, что f непрерывна

В частности,

$$\begin{aligned}\int_a^b f_n(t)dt &\rightarrow \int_a^b f(t)dt, \\ \lim_{n \rightarrow \infty} \int_a^b f_n(t)dt &= \int_a^b \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(t)dt.\end{aligned}$$

Доказательство. Посмотрим на разность

$$\left| \int_c^x f(t)dt - \int_c^x f_n(t)dt \right| \leq |c - x| \cdot \max_{t \in [c, x]} |f(t) - f_n(t)| \quad (1.3.1)$$

Расширив отрезок $[c, x]$ до $[a, b]$, получаем следующую оценку на 1.3.1

$$1.3.1 \leq (b - a) \cdot \max_{t \in [a, b]} |f_n(t) - f(t)| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \quad (1.3.2)$$

Выражение в 1.3.2 не зависит от x , откуда и следует равномерная сходимость. \square

4. **Перестановка дифференцирования и предельного перехода.** Пусть $f_n \in C[a, b]$, $f'_n \rightrightarrows g$, $c \in [a, b]$ и $f_n(c) \xrightarrow{n \rightarrow \infty}$. Тогда f_n равномерно сходится к f на $[a, b]$ и $f' = g$. То есть

$$\left(\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) \right)' = \lim_{n \rightarrow \infty} f'_n(x).$$

Доказательство. Так как $f'_n \rightrightarrows g$, по прошлому свойству

$$\int_c^x f'_n(t)dt \rightrightarrows \int_c^x g(t)dt.$$

Заметим, что

$$\int_c^x f'_n(t)dt = f_n(x) - f_n(c).$$

Поэтому

$$f_n(x) = \underbrace{f_n(c)}_{\rightarrow A} + \underbrace{\int_c^x f'_n(t)dt}_{\rightrightarrows \int_c^x g(t)dt} \rightrightarrows A + \int_c^x g(t)dt.$$

\square

Следствие 2 (дифференцирование равномерно сходящегося ряда). Пусть есть ряд $\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x)$, $c \in [a, b]$, $\sum_{n=1}^{\infty} u'_n(x)$ равномерно сходится и ряд $\sum_{n=1}^{\infty} u_n(c)$ сходится. Тогда ряд $\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x)$ сходится равномерно и

$$\left(\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x) \right)' = \sum_{n=1}^{\infty} u'_n(x).$$

1.4 Степенные ряды

Определение 5: Степенной ряд

Ряд $\sum_{n=0}^{\infty} a_n(z - z_0)^n$, где $a_n, z, z_0 \in \mathbb{C}$, называется степенным с центром в точке z_0 .

Замечание. С помощью переносов любой степенной ряд сводится к ряду с центром в нуле $\sum_{n=0}^{\infty} a_n z^n$.⁸

⁸Далее в утверждениях будет обычно фигурировать ряд с центром в нуле для упрощения рассуждений.

Теорема 1.4.1

Пусть ряд $\sum_{n=0}^{\infty} a_n z^n$ сходится в точке $z_0 \in \mathbb{C}$. Тогда ряд $\sum_{n=0}^{\infty} a_n z^n$ сходится при всех z , что $|z| < |z_0|$.^a

^aТо есть для всех z внутри шара с центром в нуле и радиусом z_0 .

Доказательство. Так как ряд сходится в точке z_0 , $a_n z_0^n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$, то есть $|a_n z_0^n| \leq M$. Тогда

$$\sum_{n=0}^{\infty} |a_n z^n| = \sum_{n=0}^{\infty} |a_n z_0^n| \cdot \left| \frac{z}{z_0} \right|^n \leq M \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left| \frac{z}{z_0} \right|^n.$$

А такой ряд сходится, так как $\left| \frac{z}{z_0} \right| < 1$. □

Следствие 3. Если ряд $\sum_{n=0}^{\infty} a_n z_0^n$ расходится, то для всех z , что $|z| > |z_0|$, степенной ряд $\sum_{n=0}^{\infty} a_n z^n$ расходится.

Определение 6: Радиус сходимости

Радиус сходимости R степенного ряда $\sum_{n=0}^{\infty} a_n z^n$ — такое число, что для всех z : $|z| < R$ ряд сходится, а для всех z : $|z| > R$ ряд расходится.

Замечание. R может быть равным нулю или бесконечности.

Теорема 1.4.2: Формула Коши-Адамара

Радиус сходимости существует и равен

$$R_{\text{cx}} = \frac{1}{\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|}}.$$

Доказательство. Зафиксируем z .

$$q = \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n z^n|} = |z| \cdot \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|}.$$

Если $|z| < R_{\text{cx}}$, то $q < 1$, тогда по признаку Коши ряд сходится.

Если $|z| > R_{\text{cx}}$, то $q > 1$, аналогично по признаку Коши ряд расходится.

Если $|z| = R_{\text{cx}}$, то $q = 1$, и в этом случае ничего сказать нельзя. □

Упражнение. Придумать формулировку в стиле признака Даламбера, то есть

$$q = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right|.$$

Здесь, в отличие от верхнего предела в формуле Коши-Адамара, еще нужно доказать, что предел существует.

Пример 1.4.1. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{z^n}{n!}$, $n! \sim e^n$, поэтому $R_{\text{cx}} = \infty$.

Пример 1.4.2. $\sum_{n=0}^{\infty} z^n n!$, $R_{\text{cx}} = 0$.

Пример 1.4.3. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{z^n}{n}$, $R_{\text{cx}} = 1$.

Теорема 1.4.3

Пусть R — радиус сходимости степенного ряда $\sum_{n=0}^{\infty} a_n z^n$. Рассмотрим $0 < r < R$. Тогда в $\overline{B(0, r)}$ ряд сходится равномерно.

Доказательство. Возьмем ряд $\sum_{n=0}^{\infty} |a_n| r^n$. Это сходящийся числовой ряд. Если взять ряд $\sum_{n=0}^{\infty} a_n z^n$ с произвольным z , то

$$\max_{\overline{B(0, r)}} |a_n z^n| = |a_n| r^n.$$

Получили что, ряд максимумов сходится, из чего по признаку Вейерштрасса следует, что ряд сходится. \square

Следствие 4. Сумма степенного ряда непрерывна в шаре $B(0, R_{\text{сх}})$, так как частичные суммы будут непрерывными функциями, которые равномерно сходятся, следовательно, сходятся к непрерывной функции.

Теорема 1.4.4: Теорема Абеля

Рассмотрим ряд $\sum_{n=0}^{\infty} a_n z^n$, радиус сходимости равен R . Предположим, что в точке z есть сходимость. Тогда $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ сходится на $[0, R]$ равномерно. В частности,

$$\exists \lim_{x \rightarrow R-} \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = \sum_{n=0}^{\infty} a_n R^n.$$

Доказательство. Докажем, что ряд сходится равномерно. Запишем следующее равенство:

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = \sum_{n=0}^{\infty} a_n R^n \left(\frac{x}{R}\right)^n.$$

По условию $\sum_{n=0}^{\infty} a_n R^n$ сходится равномерно (не зависит от x), а $\left(\frac{x}{R}\right)^n$ — монотонна и ограничена. Тогда по признаку Абеля ряд равномерно сходится на $[0, R]$ \square

Пример 1.4.4. Разложим в ряд Тейлора

$$\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots \quad \text{при } |x| < 1.$$

По признаку Абеля при $|x| = 1$ ряд тоже сходится. Поэтому $R_{\text{сх}} = 1$, причем на самом радиусе ряд тоже сходится.

Лемма 1. Следующие ряды имеют одинаковые радиусы сходимости:

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n z^n, \quad \sum_{n=0}^{\infty} a_n \frac{z^{n+1}}{n+1}, \quad \sum_{n=0}^{\infty} a_n n z^{n-1}.$$

Доказательство. Заметим, что если x_n сходится, то⁹

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} x_n y_n = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} y_n.$$

⁹По определению верхнего предела это супремум частичных пределов последовательности, выберем такую $\{x_{k_i}, y_{k_i}\}$. Мы знаем, что $x_{k_i} \rightarrow x$, поэтому $\lim_{i \rightarrow \infty} x_{k_i} y_{k_i} = x \lim_{i \rightarrow \infty} y_{k_i}$.

Теперь воспользуемся формулой Коши-Адамара. Обозначим за R_1, R_2, R_3 радиусы сходимости рядов из условия.

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{1}{\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n+1]{\left| a_n \cdot \frac{1}{n+1} \right|}} = \frac{1}{\left(\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n+1]{\frac{1}{n+1}} \right) \cdot \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n+1]{|a_n|}} = \\ &= \frac{1}{\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|}} = R_1 \\ R_3 &= \frac{1}{\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n-1]{|a_n \cdot n|}} = \frac{1}{\left(\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n-1]{n} \right) \cdot \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n-1]{|a_n|}} = \\ &= \frac{1}{\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|}} = R_1 \end{aligned}$$

□

Теорема 1.4.5

Пусть есть вещественный степенной ряд $\sum_{n=0}^{\infty} a_n(x - x_0)^n$, его радиус сходимости равен R . Тогда его можно проинтегрировать почленно для всех x , что $|x - x_0| < R$:

$$\int_{x_0}^x \sum_{n=0}^{\infty} a_n(t - x_0)^n dt = \sum_{n=0}^{\infty} \int_{x_0}^x a_n(t - x_0)^n dt = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \frac{(x - x_0)^{n+1}}{n+1}.$$

Доказательство. Пусть $r = |x - x_0| < R$. В $\overline{B(x_0, r)}$ ряд равномерно сходится. Рассмотрим его частные суммы $S_n(x)$. Так как $S_n(x) \Rightarrow S$,

$$\begin{aligned} \int_{x_0}^x \sum_{n=0}^{\infty} a_n t^n dt &= \int_{x_0}^x S(t) dt = \\ &= \int_{x_0}^x \lim_{n \rightarrow \infty} S_n(t) dt = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{x_0}^x S_n(t) dt \end{aligned}$$

□

Определение 7: Производная комплекснозначной функции

Пусть $E \subset \mathbb{C}$, a — внутренняя точка E , $f: E \rightarrow \mathbb{C}$. Производную в точке a можно определить двумя способами:

1. это такая функция

$$f'(a) = \lim_{z \rightarrow a} \frac{f(z) - f(a)}{z - a}.$$

2. f дифференцируема в точке a , если существует такое $k \in \mathbb{C}$, что

$$f(z) = f(a) + k(z - a) + o_{z \rightarrow a}(z - a).$$

Замечание. Существование $f'(a)$ равносильно тому, что f дифференцируема в точке a , и в этом случае $k = f'(a)$.

Теорема 1.4.6

Рассмотрим ряд $\sum_{n=0}^{\infty} a_n(z - z_0)^n$, его радиус сходимости равен R , $f(z)$ — сумма ряда внутри шара

$B(z_0, R)$. Тогда при $z: |z - z_0| < R$ функция f дифференцируема сколько угодно раз, при этом

$$f^{(m)}(z) = \sum_{n=m}^{\infty} a_n \frac{n!}{(n-m)!} (z - z_0)^{n-m}.$$

Доказательство. Опять скажем, что $z_0 = 0$. Достаточно доказать для $m = 1$, а далее по индукции. Пусть $|z| < r < R$. Запишем определение

$$\begin{aligned} f'(z) &= \lim_{w \rightarrow z} \frac{f(w) - f(z)}{w - z} = \\ &= \lim_{w \rightarrow z} \frac{\sum_{n=0}^{\infty} a_n w^n - \sum_{n=0}^{\infty} a_n z^n}{w - z} = \\ &= \lim_{w \rightarrow z} \frac{\sum_{n=1}^{\infty} a_n (w^n - z^n)}{w - z} \stackrel{?}{=} \\ &\stackrel{?}{=} \sum_{n=1}^{\infty} \lim_{w \rightarrow z} a_n \underbrace{(w^{n-1} + w^{n-2}z + \dots + z^{n-1})}_{\text{все стремятся к } z^{n-1}} = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot n \cdot z^{n-1} \end{aligned}$$

Осталось доказать один переход. Если докажем равномерную сходимость ряда в $\overline{B(0, r)}$, то он будет верен. Обозначим

$$u_n(w) = a_n(w^{n-1} + w^{n-2}z + \dots + z^{n-1}).$$

Заметим, что

$$|u_n(w)| \leq |a_n| \cdot (|w^{n-1}| + |w^{n-2}z| + \dots + |z^{n-1}|) \leq |a_n| \cdot n \cdot r^{n-1}.$$

Так как $r^{n-1} \in \overline{B(0, R)}$, ряд $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n| \cdot n \cdot r^{n-1}$ сходится. Тогда по признаку Вейерштрасса ряд $\sum_{n=1}^{\infty} u_n(w)$ сходится, следовательно можем переставить предел и суммирование. \square

Теорема 1.4.7: О единственности разложения в степенной ряд

Если $f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(z - z_0)^n$ и сходится в круге $B(z_0, R)$, то коэффициенты задаются однозначно:

$$a_m = \frac{f^{(m)}(z_0)}{m!}.$$

Доказательство. По теореме 1.4.6 можем записать следующую формулу:

$$f^{(k)}(z) = \sum_{n=m}^{\infty} a_n \cdot \frac{n!}{(n-k)!} \cdot (z - z_0)^{n-k}.$$

Тогда

$$f^{(m)}(z_0) = a_m \cdot \frac{n!}{(n-m)!} = a_m m! \implies a_m = \frac{f^{(m)}(z_0)}{m!}.$$

\square

Определение 8

Для бесконечно дифференцируемого в точке z_0 степенного ряда f имеет место формула Тейлора с центром в точке z_0 :

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(z_0)}{n!} (z - z_0)^n.$$

1.5 Разложение элементарных функций в ряды Тейлора

Запишем разложения, которые нам уже известны

1. e^x

$$\forall x \in \mathbb{R} \quad e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}.$$

2. $\sin x$

$$\forall x \in \mathbb{R} \quad \sin x = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!}.$$

3. $\cos x$

$$\forall x \in \mathbb{R} \quad \cos x = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{x^{2n}}{(2n)!}.$$

Определение 9

Пусть $z \in \mathbb{C}$. Определим $\exp z, \sin z, \cos z$ для комплексного числа как ряды из формул выше.

Упражнение.

$$\begin{aligned} e^{z_1+z_2} &= e^{z_1} e^{z_2} \\ \cos(z_1+z_2) &= \cos z_1 \cos z_2 - \sin z_1 \sin z_2 \\ \sin(z_1+z_2) &= \sin z_1 \cos z_2 + \cos z_1 \sin z_2 \\ \sin^2 z + \cos^2 z &= 1 \\ (e^z)' &= e^z \\ (\sin z)' &= \cos z \\ (\cos z)' &= -\sin z \end{aligned}$$

Теорема 1.5.1: Формула Эйлера

$$e^{iz} = \cos z + i \sin z.$$

Доказательство. Честная подстановка. Можно перегруппировывать слагаемые в рядах, так как они абсолютно сходятся. \square

4. $\ln(1+x)$

$$\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \dots \quad |x| < 1.$$

Доказательство.

$$\begin{aligned} \ln(1+x) &= \int_0^x \frac{1}{1+t} dt = \int_0^x (1 - t + t^2 - \dots) dt = \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \int_0^x t^n dt = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{n+1}}{n+1} \end{aligned}$$

Так как $1 - t + t^2 - t^3 + \dots$ — равномерно сходящийся ряд при $|t| < 1$, можем интегрировать его почленно. Аналогично мы можем определить $\ln(1+z)$ для $z \in \mathbb{C}$, если $|z| < 1$. \square

5. $\operatorname{arctg} x$

$$\operatorname{arctg} x = x - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} - \frac{x^7}{7} + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{2n+1}.$$

Доказательство.

$$\begin{aligned}\operatorname{arctg} x &= \int_0^x \frac{dt}{1+t^2} = \int_0^x \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n t^{2n} dt = \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \int_0^x t^{2n} dt = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{2n+1}\end{aligned}$$

Формула верна внутри круга $|t| < 1$ для равномерной сходимости. \square

6. $(1+x)^p$

$$(1+x)^p = 1 + px + \frac{p(p-1)}{2}x^2 + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{p(p-1)\dots(p-n+1)}{n!}x^n.$$

Докажем, что радиус сходимости равен 1. Обозначим

$$S(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{p(p-1)\dots(n-p+1)}{n!}x^n, \quad f(x) = \frac{S(x)}{(1+x)^p}, \quad x \in (-1, 1).$$

Поступим хитро: докажем, что $f(x) \equiv 1$. Заметим, что $f(0) = 1$. Тогда достаточно проверить, что $f'(x) = 0$ для всех $x: |x| < 1$.

$$\begin{aligned}f(x) &= S(x)(1+x)^{-p} \\ f'(x) &= S'(x)(1+x)^{-p} - pS(x)(1+x)^{-p-1} = \\ &= (1+x)^{-p-1} (S'(x)(1+x) - pS(x))\end{aligned}$$

Проверим, что $(S'(x)(1+x) - pS(x)) = 0$.

$$\begin{aligned}\textcolor{red}{p} \cdot S(x) &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{p(p-1)\dots(n-p+1)}{n!}x^n \cdot \textcolor{red}{p} \\ \textcolor{red}{(1+x)} \cdot S'(x) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{p(p-1)\dots(n-p+1)}{(n-1)!}x^{n-1} \cdot \textcolor{red}{(1+x)} = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{p(p-1)\dots(n-p+1)}{(n-1)!}(x^{n-1} + x^n)\end{aligned}$$

Теперь заметим, что

$$p \cdot \frac{p(p-1)\dots(n-p+1)}{n!} = \frac{p(p-1)\dots(n-p+1)}{(n+1)!} + \frac{p(p-1)\dots(n-p)}{n!}.$$

Поэтому коэффициенты при x^k будут одинаковыми, следовательно, разность равна нулю.

7. Частный случай для $p = -\frac{1}{2}$

$$\frac{p(p-1)\dots(n-p+1)}{n!} = \frac{(-\frac{1}{2}) \cdot (-\frac{3}{2}) \cdot \dots \cdot (-\frac{2n-1}{2})}{n!} = (-1)^n \frac{(2n-1)!!}{2^n \cdot n!} = (-1)^n \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!}.$$

8. $\arcsin x$

$$\arcsin x = \int_0^x \frac{dt}{\sqrt{1-t^2}} = \int_0^x \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} (-t^2)^n dt = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \cdot \frac{x^{2n+1}}{2n+1}.$$

Глава 2

Теория меры и интегрирования

Лекция 3: †

16 Sept

2.1 Системы множеств

Определение 10: Алгебра подмножеств

Пусть T — произвольное множество, 2^T — система подмножеств. $\mathfrak{A} \subset 2^T$ — алгебра подмножеств, если

- (i) $\emptyset \in \mathfrak{A}$
- (ii) $A, B \in \mathfrak{A} \implies A \cap B \in \mathfrak{A}$
- (iii) $A \in \mathfrak{A} \implies T \setminus A \in \mathfrak{A}$

Свойства.

- 1. $T \in \mathfrak{A}$
- 2. $A, B \in \mathfrak{A} \implies A \setminus B = A \cap (T \setminus B) \in \mathfrak{A}$
- 3. $A, B \in \mathfrak{A} \implies A \cup B = T \setminus ((T \setminus A) \cap (T \setminus B)) \in \mathfrak{A}$
- 4. $A_j \in \mathfrak{A}, j = 1, \dots, n \implies \bigcup_{j=1}^n A_j \in \mathfrak{A}, \bigcap_{j=1}^n A_j \in \mathfrak{A}$

Определение 11: σ -алгебра

$\mathfrak{A} \subset 2^T$ — σ -алгебра, если \mathfrak{A} — алгебра и

$$(ii \ \sigma) \ \forall A_j \in \mathfrak{A}, j \in \mathbb{N}: \bigcap_{j=1}^{\infty} A_j \in \mathfrak{A}$$

Замечание. $\forall A_j \in \mathfrak{A}, j \in \mathbb{N} \implies \bigcup_{j=1}^{\infty} A_j \in \mathfrak{A}$

Пример 2.1.1.

- 1. $2^T = \mathfrak{A}$
- 2. $\{\emptyset, T\} = \mathfrak{A}$