

МАТАН 2 Семестр

Носорев Константин

2019

Содержание

1	Ряды	1
§1	Определение ряда. Основные свойства	1
П.0	Конечные суммы	1
П.1	Числовые ряды	2
П.2	Основные свойства	2
П.3	Неотрицательные числовые ряды	4
П.4	Телескопический признак. Эталонный ряд $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{n^p}$.	5
П.5	Признак Коши. Признак Даламбера	6
П.6	Число e , как сумма ряда	9
§2	Признак Лейбница. Признак Дирихле. Признак Абеля . . .	10
П.1	10
§3	Абсолютно и условно сходящиеся ряды	13

Глава 1 Ряды

§1 Определение ряда. Основные свойства

П.0 Конечные суммы

$$a_1 + a_2 + \cdots + a_n = \sum_{k=1}^n a_k$$

- $\sum_{k=1}^n a_k + \sum_{k=1}^n b_k = \sum_{k=1}^n (a_k + b_k)$
- $\lambda \sum_{k=1}^n a_k = \sum_{k=1}^n (\lambda a_k)$

П.1 Числовые ряды

Определение §1.1. Числовым рядом называется выражение вида

$$\sum_{k=1}^{\infty} a_k = a_1 + a_2 + \dots + a_n + \dots$$

где $a_k \in \mathbb{R}$ - общий член последовательности,

а $S_1 = a_1, S_2 = a_1 + a_2, S_n = \sum_{k=1}^n a_k$ - частичные суммы ряда

Определение §1.2. Числовой ряд называется *сходящимся*, если сходится последовательность его частичных сумм

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = S \text{ - сумма ряда, } \sum_{k=1}^{\infty} a_k = S \in \mathbb{R}$$

Если предел бесконечен или не существует, то ряд *расходится*

Пример. $\sum_{k=0}^{\infty} q^k$ - геометрическая прогрессия

$$S_0 = 1, S_1 = 1 + q, S_2 = 1 + q + q^2, \dots, S_n = \sum_{k=1}^n q^k = \frac{1 - q^{n+1}}{1 - q}$$

Если $|q| < 1$, то $S_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \frac{1}{1-q}$ - ряд сходится

Если $|q| > 1$, то $S_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \infty$ - ряд расходится

Если $q = 1$, то $S_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \infty$ - ряд расходится

Если $q = -1$, то $S_n = \begin{cases} 0, & n=2k \\ 1, & n=2k+1 \end{cases}$ - ряд расходится

П.2 Основные свойства

Теорема §1.1 (Критерий Коши).

$$\sum_{k=1}^{\infty} a_k \text{ - сходящаяся } \Leftrightarrow \forall \varepsilon > 0 \exists N : \forall m \geq n > N \mid \sum_{k=n}^m a_k \mid < \varepsilon$$

Доказательство. Используя критерий Коши для посл-ти частичных сумм

$$\sum_{k=1}^{\infty} a_k \text{ - сходящаяся } \Leftrightarrow S_n = \sum_{k=1}^n a_k \text{ - сходящаяся}$$

$$\xLeftrightarrow{\text{По кр. Коши}} \forall \varepsilon > 0 \exists N : \forall m \geq n-1 > N \mid S_m - S_{n-1} \mid < \varepsilon$$

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N : \forall m \geq n \geq N + 1 \left| \sum_{k=n}^m a_k \right| < \varepsilon$$

□

Пример.

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{n} - \text{расходится} \quad \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} - \text{сходится}$$

Следствие. Если в ряду изменить произвольным образом конечное число слагаемых, то новый ряд сходится, когда сходится исходный, и новый ряд расходится, если исходный расходится

Замечание. Сходимость ряда независит от поведения конечного числа слагаемых

Теорема §1.2 (Необходимый признак сходимости ряда). Если $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$ - сходится, то $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$

Следствие. Если $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n \neq 0$, то ряд расходится

Доказательство.

$$a_n = S_n - S_{n-1} \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n - S_{n-1} = 0$$

□

Теорема §1.3 (Арифметические свойства). Пусть ряды $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$ $\sum_{k=1}^{\infty} b_k$ - сходятся, тогда

$$\forall \lambda, \mu \in \mathbb{R} \quad \sum_{k=1}^{\infty} (\lambda a_k + \mu b_k) = \lambda \sum_{k=1}^{\infty} a_k + \mu \sum_{k=1}^{\infty} b_k - \text{сходится}$$

Доказательство. Пусть $S_n^A = \sum_{k=1}^n a_k \rightarrow S^A$ $S_n^B = \sum_{k=1}^n b_k \rightarrow S^B$
Рассмотрим $\sum_{k=1}^{\infty} (\lambda a_k + \mu b_k)$,

$$S_n = \sum_{k=1}^n \lambda a_k + \mu b_k = \lambda \sum_{k=1}^n a_k + \mu \sum_{k=1}^n b_k = \lambda S_n^A + \mu S_n^B \Rightarrow$$

$$\exists \lim_{n \rightarrow \infty} S_n = \lim_{n \rightarrow \infty} (\lambda S_n^A + \mu S_n^B) = \lambda S^A + \mu S^B$$

□

Замечание. В частности $\sum_{k=1}^{\infty} \lambda a_k = \lambda \sum_{k=1}^{\infty} a_k$

П.3 Неотрицательные числовые ряды

Рассмотрим $\sum_{k=1}^{\infty} a_k, a_k \geq 0, S_n \nearrow$

Теорема §1.4 (Критерий сходимости ряда с неотрицательными числами). *Ряд, члены которого неотрицательны, сходится \Leftrightarrow посл-ть частичных сумм ограничена*

Доказательство.

\Rightarrow Ряд сходится $\xrightarrow{\text{По определению}}$ последовательность частичных сумм сходится $\xrightarrow{\text{По свойству сходящейся посл-ти}}$ $\{S_n\}$ - ограничена
 $\Leftarrow \{S_n\}$ - ограничена и $S_n \nearrow \xrightarrow{\text{По th. Вейерштрасса}}$ $\{S_n\}$ - сходится $\xrightarrow{\text{По определению}}$ ряд сходится \square

Теорема §1.5 (Признак сравнения). *Пусть*

$$\exists N > 0 : \forall n > N \sum_{k=n}^{\infty} a_k, \sum_{k=n}^{\infty} b_k, a_k \geq 0, b_k \geq 0 \text{ и } a_k \leq b_k$$

1. Из сходимости $\sum_{k=1}^{\infty} b_k \Rightarrow$ сходимость ряда $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$
2. Из расходимости $\sum_{k=1}^{\infty} a_k \Rightarrow$ расходимость ряда $\sum_{k=1}^{\infty} b_k$

Доказательство. Конечное число членов ряда не влияет на сходимость \Rightarrow будем считать, что $a_k \leq b_k \forall k \geq 1$

1. Пусть $S_n^A = \sum_{k=1}^n a_k, S_n^B = \sum_{k=1}^n b_k$

$$\forall k \geq 1 a_k \leq b_k \Rightarrow S_n^A \leq S_n^B \forall n, \text{ если сходится } \sum_{k=1}^{\infty} b_k$$

$$\text{то } S_n^B \nearrow \text{ и сходится к } S^B \text{ при } n \rightarrow \infty \Rightarrow S_n^A \leq S_n^B \leq S^B \Rightarrow S_n^A \nearrow$$

$$\text{ограничена сверху } S^B \xrightarrow{\text{no th 4}} \text{ ряд } \sum_{k=1}^{\infty} a_k \text{ сходится}$$

2. (от противного) Пусть $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$ - расходится, а $\sum_{k=1}^{\infty} b_k$ - сходится, тогда по пункту 1 ряд $\sum_{k=1}^{\infty} a_k$ - сходится $\Rightarrow \perp$

\square

Теорема §1.6 (Признак сравнения в предельной форме). *Пусть*

$$\sum_{k=1}^{\infty} a_k, \sum_{k=1}^{\infty} b_k, a_k \geq 0, b_k > 0 \text{ и } \exists \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = c > 0 - \text{конечное}$$

тогда ряды сходятся и расходятся одновременно

Доказательство.

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N > 0 : \forall n > N \left| \frac{a_n}{b_n} - c \right| < \varepsilon$$

$$-\varepsilon < \frac{a_n}{b_n} - c < \varepsilon$$

$$-\varepsilon + c < \frac{a_n}{b_n} < \varepsilon + c$$

$$(-\varepsilon + c)b_n < a_n < (\varepsilon + c)b_n$$

Возьмем $\varepsilon = \frac{c}{2}$

$$\exists N_0 > 0 : \forall n > N_0$$

$$\frac{c}{2}b_n < a_n < \frac{3c}{2}b_n$$

$$\begin{aligned} 1. \text{ Пусть } \sum_{k=1}^{\infty} b_k - \text{сходится} &\xrightarrow{\text{по сл-вию из th. Коши}} \sum_{k=N_0}^{\infty} b_k - \text{сходится} \xrightarrow{\text{по th 3}} \\ \sum_{k=N_0}^{\infty} \frac{3c}{2}b_n - \text{сходится} &\xrightarrow{\text{по th 5}} \sum_{k=N_0}^{\infty} a_n - \text{сходится} \xrightarrow{\text{по сл-вию из th. Коши}} \\ \sum_{k=1}^{\infty} a_n - \text{сходится} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2. \text{ Пусть } \sum_{k=1}^{\infty} b_k - \text{расходится} &\xrightarrow{\text{по сл-вию из th. Коши}} \sum_{k=N_0}^{\infty} b_k - \text{расходится} \\ \xrightarrow{\text{по th 3}} \sum_{k=N_0}^{\infty} \frac{c}{2}b_n - \text{расходится} &\xrightarrow{\text{по th 5}} \sum_{k=N_0}^{\infty} a_n - \text{расходится} \xrightarrow{\text{по сл-вию из th. Коши}} \\ \sum_{k=1}^{\infty} a_n - \text{расходится} \end{aligned}$$

□

П.4 Телескопический признак. Эталонный ряд $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{n^p}$

Теорема §1.7 (Телескопический признак). Пусть $a_n \searrow, a_n \geq 0$ ряд $\sum_{k=1}^{\infty} a_n$ - сходится \Leftrightarrow сходится $\sum_{k=0}^{\infty} 2^k a_{2^k}$

Доказательство. Правый ряд $a_1 + 2a_2 + 4a_4 + \dots$

$$\text{Рассмотрим } a_2 \leq a_2 \leq a_1$$

$$2a_4 \leq a_3 + a_4 \leq 2a_2$$

$$4a_8 \leq a_5 + a_6 + a_7 + a_8 \leq 4a_4$$

...

$$2^n a_{2^{n+1}} \leq \sum_{k=2^n+1}^{2^{n+1}} a_k \leq 2^n a_{2^n}$$

Сложим выражения в левой и правой частях

$$a_2 + 2a_4 + 4a_8 + \dots + 2^n a_{2^{n+1}} \leq S_{2^{n+1}}^A - a_1 \leq S_n^B$$

$$\frac{1}{2}(S_{n+1}^B - a_1) \leq S_{2^{n+1}}^A - a_1 \leq S_n^B$$

Рассмотрим отдельно каждое неравенство

1. $S_{2^{n+1}}^A - a_1 \leq S_n^B$ Если ряд S_n^B - сходится $\Rightarrow S_{2^{n+1}}^A - a_1$ - сходится
 $\Rightarrow S_n^A \leq S_n^B$ и $\{S_n^A\} \nearrow \xrightarrow{\text{По th. Вейерштрасса}} \text{ряд } \sum_{k=1}^{\infty} a_n$ - сходится
2. $\frac{1}{2}(S_{n+1}^B - a_1) \leq S_{2^{n+1}}^A - a_1$

$$S_{n+1}^B \leq 2S_{2^{n+1}}^A - a_1$$

Если ряд $\sum_{k=1}^{\infty} a_n$ - сходится $\Rightarrow S_n^B \leq 2S_{2^{n+1}}^A - a_1$ и $\{S_n^B\} \nearrow \xrightarrow{\text{По th. Вейерштрасса}} \text{ряд } \sum_{k=1}^{\infty} 2^n a_{2^n}$ - сходится

Примечание: Расхождение доказывается по признаку сравнения

□

Теорема §1.8. Ряд $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{n^p}$ $\begin{cases} \text{сходится,} & \text{если } p > 1 \\ \text{расходится,} & \text{если } p \leq 1 \end{cases}$

Доказательство.

- Пусть $p > 1 \Rightarrow 0 < \{\frac{1}{n^p}\} \searrow_0$ Рассмотрим ряд из th 7 $\sum_{k=0}^{\infty} 2^k \frac{1}{2^{kp}} = \sum_{k=0}^{\infty} (2^{1-p})^k$ - геометрическая прогрессия $q = 2^{1-p} \Rightarrow \sum_{k=1}^{\infty} (2^{1-p})^k$ - сходится $\xrightarrow{\text{по th 7}} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{n^p}$ - сходится

- Пусть $p \leq 1$

$$\frac{1}{n^p} > \frac{1}{n} \forall n \in \mathbb{N} \Rightarrow \text{т.к. } \frac{1}{n} - \text{расходится} \xrightarrow{\text{по признаку сравнения}} \frac{1}{n^p} - \text{расходится}$$

□

П.5 Признак Коши. Признак Даламбера

Теорема §1.9 (признак Даламбера). Пусть $a_n > 0$ и $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} = q$, тогда

1. Если $0 \leq q < 1$, то ряд $\sum_{k=1}^{\infty} a_n$ - сходится

2. Если $q > 1$, то ряд $\sum_{k=1}^{\infty} a_n$ - расходится

3. Если $q = 1$, то признак не работает

Замечание. Признак удобно применять, если в a_n есть $2^n, n!, n^k$

Доказательство.

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N > 0 : \forall n > N \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} - q \right| < \varepsilon$$

$$-\varepsilon < \frac{a_{n+1}}{a_n} - q < \varepsilon$$

$$(q - \varepsilon)a_n < \frac{a_{n+1}}{a_n} < (q + \varepsilon)a_n \quad \forall n = N + 1, N + 2, \dots$$

1. Пусть $q < 1$

Возьмем $\varepsilon : \tilde{q} = q + \varepsilon < 1$ (Например $\varepsilon = \frac{1-q}{2}$) Тогда $\forall n > N$

$$a_{n+1} < a_n \tilde{q}$$

$$N + 1 : a_{n+2} < a_{n+1} \tilde{q}$$

$$N + 2 : a_{n+3} < a_{n+2} \tilde{q} < a_{n+1} \tilde{q}^2$$

...

$$N + k - 1 : a_{n+k} < a_{n+k-1} \tilde{q} < \dots < a_{n+1} \tilde{q}^{k-1}$$

Т.к $\sum_{k=1}^{\infty} \tilde{q}^k$ - геометрическая прогрессия ($\tilde{q} < 1$) \Rightarrow сходится $\xrightarrow{\text{по признаку сравнения}}$
 $\sum_{n=1}^{\infty} a_{n+k}$ - сходится $\xrightarrow{\text{Следствие критерия Коши}} \sum_{n=1}^{\infty} a_n$ - сходится

2. Пусть $q > 1$

Возьмем $\varepsilon : \tilde{q} = q - \varepsilon > 1$

Тогда $\forall n > N \ a_n \tilde{q} < a_{n+1} \xrightarrow{\text{по 1 пункту}} a_{n+k} > a_{n+1} \tilde{q}^{k-1}$

$a_{n+1} \tilde{q}^{k-1} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \Rightarrow a_{n+k} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \xrightarrow{\text{по необходимому признаку}} \text{ряд расходится}$

3. Пусть $q = 1$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} : \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n+1}}{\frac{1}{n}} = 1 \text{ ряд расходится}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} : \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{(n+1)^2}}{\frac{1}{n^2}} = 1 \text{ ряд сходится}$$

□

Пример.

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2}{2^n}, \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{(n+1)^2}{2^{n+1}}}{\frac{n^2}{2^n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+1)^2}{2n^2} = \frac{1}{2} < 1 \Rightarrow \text{ряд сходится}$$

Теорема §1.10 (радикальный признак Коши).

Пусть $a_n \geq 0$ и $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{a_n} = q$, тогда

1. Если $0 \leq q < 1$, то ряд $\sum_{k=1}^{\infty} a_n$ - сходится
2. Если $q > 1$, то ряд $\sum_{k=1}^{\infty} a_n$ - расходится
3. Если $q = 1$, то признак не работает

Замечание. Признак удобно применять, если в a_n есть $2^n, n^k$

Доказательство.

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N > 0 : \forall n > N \mid \sqrt[n]{a_n} - q \mid < \varepsilon$$

$$-\varepsilon < \sqrt[n]{a_n} - q < \varepsilon$$

$$(q - \varepsilon) < \sqrt[n]{a_n} < (q + \varepsilon) \quad \forall n = N + 1, N + 2, \dots$$

1. Пусть $q < 1 \Rightarrow \exists \tilde{q} = \frac{q+1}{2} \mid q < \tilde{q} < 1 \exists N > 0 : \forall n > N$

$$\sqrt[n]{a_n} < \tilde{q} \Leftrightarrow a_n < \tilde{q}^n \quad \sum_{n=1}^{\infty} \tilde{q}^n - \text{геометрическая прогрессия} (\tilde{q} < 1)$$

$$\Rightarrow \text{ряд сходится} \xrightarrow{\text{по признаку сравнения}} \text{сходится исходный ряд}$$

2. Пусть $q > 1 \Rightarrow \exists \{a_{n_k}\} : \sqrt[n_k]{a_{n_k}} > 1 \Rightarrow a_{n_k} > 1 \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} a_{n_k} \neq 0 \Rightarrow$
ряд расходится

3. Пусть $q = 1$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} : \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt[n]{n}} = 1 \text{ ряд расходится}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} : \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt[n]{n^2}} = 1 \text{ ряд сходится}$$

□

Пример.

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n-1}{n}\right)^{n^2}, \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{n-1}{n}\right)^n = e^{-1} < 1 \Rightarrow \text{ряд сходится}$$

Теорема §1.11 (Признак Раабе). Пусть $a_n > 0$ и $\exists \lim_{n \rightarrow \infty} n\left(\frac{a_n}{a_{n+1}} - 1\right) = q$, тогда

1. Если $q < 1$, то ряд $\sum_{k=1}^{\infty} a_n$ - расходится
2. Если $q > 1$, то ряд $\sum_{k=1}^{\infty} a_n$ - сходится
3. Если $q = 1$, то признак не работает

Пример.

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot \dots \cdot (2n-1)}{2^n \cdot n!}$$

Доломбер:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot \dots \cdot (2n+1))2^n \cdot n!}{2^{n+1} \cdot (n+1)!(1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot \dots \cdot (2n-1))} =$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2n+1}{2 \cdot (n+1)} = 1$$

Раабе:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n\left(\frac{2(n+1)}{2n+1} - 1\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{2n+1} = \frac{1}{2} < 1 \Rightarrow \text{ряд расходится}$$

П.6 Число e , как сумма ряда

$$e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = \lim_{n \rightarrow \infty} e_n$$

1.

$$e_n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = \sum_{k=0}^{\infty} C_k^n \frac{1}{n^k} = \sum_{k=0}^n \frac{n!}{k!(n-k)!} \frac{1}{n^k} =$$

$$= \sum_{k=0}^n \frac{(n-k+1)(n-k+2) \dots n}{k!n^k} < \sum_{k=0}^n \frac{n^k}{k!n^k} = \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} = S_n \Rightarrow e_n < S_n$$

2. Пусть $m < n$

$$\begin{aligned} e_n &= \sum_{k=0}^n C_n^k \frac{1}{n^k} > \sum_{k=0}^m C_n^k \frac{1}{n^k} = \\ &= 1 + 1 + \frac{n(n-1)}{2!n^2} + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!n^3} + \dots + \frac{n(n-1)(n-2)\dots(n-m+1)}{m!n^m} = A_{n,m} \\ &\Rightarrow e_n > A_{n,m} \text{ Зафиксируем } m. \text{ Тогда при } n \rightarrow \infty e \geq S_m \end{aligned}$$

3. $\Rightarrow e_n < S_n \leq e$ и $\{S_n\} \nearrow \xrightarrow{\text{По th Вейерштрасса}} \text{Ряд сходится}$

$$e = 1 + 1 + \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} + \dots + \frac{1}{n!} + \dots$$

4. Оценка погрешности при приближении числа e частичными суммами:

$$\begin{aligned} 0 < e - S_n &= \sum_{k=n+1}^{\infty} \frac{1}{k!} = \frac{1}{(n+1)!} + \frac{1}{(n+2)!} + \frac{1}{(n+3)!} + \dots = \\ &= \frac{1}{(n+1)!} \left[1 + \frac{1}{(n+2)} + \frac{1}{(n+2)(n+3)} + \dots \right] < \\ &< \frac{1}{(n+1)!} \left[1 + \frac{1}{(n+1)} + \frac{1}{(n+1)^2} + \frac{1}{(n+1)^3} + \dots \right] = \frac{1}{(n+1)!} \frac{n+1}{n} = \frac{1}{n \cdot n!} \end{aligned}$$

Упражнение. Доказать, что e - иррационально

Упражнение. Доказать, что $2 < e < 3$

§2 Признак Лейбница. Признак Дирихле. Признак Абеля

П.1

Определение §2.1. Ряд вида $a_1 - a_2 + a_3 - a_4 + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n a_n$ называется знакопеременным, где $\forall n a_n > 0$

Теорема §2.1 (Признак сходимости Лейбница знакопеременных рядов). Пусть дан знакопеременный ряд $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} a_n$ $a_n > 0$. Если $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$ и $\{a_n\} \searrow$, то ряд сходится

Доказательство.

$$\begin{aligned}
S_{2m} &= a_1 - a_2 + a_3 - a_4 + \dots - a_{2m-2} + a_{2m-1} - a_{2m} = \\
&= a_1 - (a_2 - a_3) - (a_4 - a_5) - \dots - (a_{2m-2} - a_{2m-1}) - a_{2m} \leq a_1 \Rightarrow \\
&\Rightarrow \{S_{2m}\} - \text{ограничена сверху} \\
S_{2m+2} &= S_{2m} + (a_{2m+1} - a_{2m+2}) \geq S_{2m} \Rightarrow \{S_{2m}\} \nearrow \mid \xrightarrow{\text{по th Вейерштрасса}} \exists \lim_{n \rightarrow \infty} S_{2m} = S \\
S_{2m+1} &= S_m + a_{2m+1} \xrightarrow{S_m \rightarrow S, a_{2m+1} \rightarrow 0 \text{ При } n \rightarrow \infty} \lim_{n \rightarrow \infty} S_{2m+1} = S
\end{aligned}$$

□

Замечание. Признак достаточный, но не необходимый!

Следствие (Оценка для остаточного члена ряда Лейбница).

$$\begin{aligned}
S &= S_n + R_n = S_n + (-1)^n a_{n+1} + (-1)^{n+1} a_{n+2} + \dots \\
|R_n| &= |(-1)^n| |(a_{n+1} - a_{n+2}) + (a_{n+2} - a_{n+3}) + \dots| = \\
&= a_{n+1} - (a_{n+2} - a_{n+3}) - (a_{n+4} - a_{n+5}) - \dots \leq a_{n+1} \\
&\mid \Rightarrow |R_n| \leq a_{n+1}
\end{aligned}$$

Лемма (Абеля). Дано a_1, \dots, a_n и b_1, \dots, b_n . При этом:

1. $\{a_i\}$ монотонно
2. $\exists B > 0 : |\sum_{i=1}^m b_i| \leq B$, где $m = 1, 2, 3, \dots, n$

Тогда выполняется неравенство $|\sum_{k=1}^n a_k b_k| \leq B(|a_1| + 2|a_n|)$

. Обозначим $B_1 = b_1, B_2 = b_1 + b_2, \dots, B_n = b_1 + b_2 + \dots + b_n$, также перепишем (2) условие, как $\exists B > 0 : |B_m| \leq B$, где $m = 1, 2, 3, \dots, n$

$$\begin{aligned}
\sum_{k=1}^n a_k b_k &= a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_n b_n = a_1 B_1 + a_2 (B_2 - B_1) + \dots + a_n (B_n - B_{n-1}) = \\
&= B_1(a_1 - a_2) + B_2(a_2 - a_3) + \dots + B_{n-1}(a_{n-1} - a_n) + B_n a_n \\
\left| \sum_{k=1}^n a_k b_k \right| &= |B_1| |a_1 - a_2| + \dots + |B_{n-1}| |a_{n-1} - a_n| + |B_n| |a_n| \leq \\
&\leq B(\underbrace{|a_1 - a_2| + |a_2 - a_3| + \dots + |a_{n-1} - a_n|}_{\text{По монотонности, либо все модули раскроются с +, либо все с -}} + |a_n|) = \\
&= B(|a_1 - a_n| + |a_n|) \stackrel{\text{Используя неравенство треугольника}}{\leq} B(|a_1| + 2|a_n|)
\end{aligned}$$

□

Теорема §2.2 (Признак Дирихле). Пусть дан ряд $\sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n$ тогда, если:

1. a_n монотонно сходится к 0
2. $\exists C \forall n \left| \sum_{k=1}^m b_k \right| \leq C$

Ряд $\sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n$ сходится

Доказательство. Из (1) условия a_n - монотонно $\rightarrow 0 \xrightarrow{\text{По определению предела}} \forall \varepsilon > 0 \exists N > 0 : \forall n > N |a_n| < \frac{\varepsilon}{6C}$
 Из (2) условия $\forall n \forall p \left| \sum_{k=n}^{n+p} b_k \right| = \left| \sum_{k=1}^{n+p} b_k - \sum_{k=1}^n b_k \right| \leq 2C$
 Рассмотрим a_n, \dots, a_{n+p} и $b_n, \dots, b_{n+p} \xrightarrow{\text{По лемме Абеля } (B=2C)} \left| \sum_{k=1}^n a_k b_k \right| \leq 2C(|a_n| + 2|a_{n+p}|) \leq 6C \frac{\varepsilon}{6C} = \varepsilon \xrightarrow{\text{По критерию Коши}} \text{ряд } \sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n \text{ сходится} \quad \square$

Теорема §2.3 (Признак Абеля). Пусть дан ряд $\sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n$ тогда, если:

1. a_n монотонно и ограничена
2. $\sum_{k=1}^{\infty} b_k$

Ряд $\sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n$ сходится

Доказательство. Из (1) условия $\Rightarrow |a_n| \leq A \forall n$
 Из (2) условия $\xrightarrow{\text{По пр. Коши}} \forall \varepsilon > 0 \exists N > 0 : \forall n > N \left| \sum_{k=n}^{n+p} b_k \right| < \frac{\varepsilon}{3A}$
 Рассмотрим $a_n, a_{n+1}, \dots, a_{n+p}$ и $b_n, b_{n+1}, \dots, b_{n+p}$

$$\xrightarrow{\text{По лемме Абеля. } \{a_i\} - \text{монот. из усл. } B = \frac{\varepsilon}{3A}} \left| \sum_{k=n}^{n+p} a_k b_k \right| \leq B(|a_n| + 2|a_{n+p}|) =$$

$$= \frac{\varepsilon}{3A} (\overbrace{|a_n|}^{\leq A} + 2 \overbrace{|a_{n+p}|}^{\leq A}) \leq \varepsilon$$

Тогда по кр. Коши для ряда $\sum_{k=1}^{\infty} a_k b_k$ - сходится \square

Доказательство. Теоремы 1. Вариант 2. Из условия, что $\{a_n\} \searrow 0$ и того факта, что $\left| \sum_{n=1}^m (-1)^n \right| \leq 1$, по теореме Дирихле следует, что ряд $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} a_n$ - сходится \square

Пример.

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(nx)}{n} \quad \forall x \in \mathbb{R}$$

Зафиксируем m . Тогда

$$\begin{aligned}
 a_n &= \frac{1}{n} \searrow \text{к } 0, b_n = \sin(nx) \\
 S_m &= \sin(x) + \sin(2x) + \sin(3x) + \dots + \sin(mx) = \\
 &= \frac{1}{\sin(x/2)} (\sin(x)\sin(x/2) + \sin(2x)\sin(x/2) + \dots + \sin(mx)\sin(x/2)) = \\
 &= \frac{1}{2\sin(x/2)} (\cos(x/2) - \cos(3x/2) + \dots + \cos(\frac{2m-1}{2}x) - \cos(\frac{2m+1}{2}x)) = \\
 &= \frac{1}{2\sin(x/2)} (\cos(x/2) - \cos(\frac{2m+1}{2}x))
 \end{aligned}$$

Если $\sin(x/2) = 0 \Rightarrow \sin(nx) = 0 \Rightarrow$ ряд сходится

Если $\sin(x/2) \neq 0 \Rightarrow |\sum_{k=1}^n \sin(kx)| \leq \frac{2}{2\sin(x/2)} = \frac{1}{\sin(x/2)} = C$
 $\mid \xrightarrow{\text{по признаку Дирихле}} \text{ряд сходится}$

Упражнение.

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n)\cos(\frac{\pi}{4})}{2}$$

§3 Абсолютно и условно сходящиеся ряды

Определение. Числовой ряд $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ называется абсолютно сходящимся, если сходится ряд $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$

Теорема §3.1. Абсолютный ряд сходится

Доказательство. Дано $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$ - сходится. Докажем, что сходится ряд $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$

$\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$ - сходится $\xrightarrow{\text{по th. Коши}} \forall \varepsilon > 0 \exists N > 0 : \forall n > N \forall p |a_n| + |a_{n+1}| + \dots + |a_{n+p}| < \varepsilon$

Рассмотрим ряд $\sum_{n=1}^{\infty} a_n \xrightarrow{\text{th. Коши}} \forall \varepsilon > 0 \exists N > 0 : \forall n > N \forall p |a_n + a_{n+1} + \dots + a_{n+p}| \leq |a_n| + |a_{n+1}| + \dots + |a_{n+p}| < \varepsilon \Rightarrow$ ряд $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ - сходится \square