Тригонометрические ряды Фурье

$f(x) \in L_R(-l, l)$ и им. период $2l$

L_R - абс. интегр., т.е. $\int\limits_{-l}^{l} f(x)\,dx$ абс. сх.

$$a_n = \frac{1}{l}\int\limits_{-l}^{l} f(t)\cos\frac{\pi n t}{l}\,dt, \quad n = 1, 2, \dots$$

$$b_n = \frac{1}{l}\int\limits_{-l}^{l} f(t)\sin\frac{\pi n t}{l}\,dt, \quad n = 1, 2, \dots$$

— коэф-ты Фурье

Лемма Римана

$f(x) \in L_R(I) \Rightarrow \int\limits_I f(t)\cos tx\,dt \to 0$ при $x \to \infty$

I - промеж.

$\int\limits_I f(t)\sin tx\,dt \to 0, \quad x \to \infty$

Следствие: $f(x) \in L_R(-l; l) \Rightarrow a_n, b_n \to 0$

Трит. ряд $\frac{a_0}{2} + \sum\limits_{n=1}^{\infty}\left[a_n\cos\frac{\pi n x}{l} + b_n \sin\frac{\pi n x}{l}\right]$ - ряд Фурье $f(x)$

Свойства

1. Если $f(x)$ нечётна, то $a_n = 0$

   Если $f(x)$ чётна, то $b_n = 0$

2. $f(x)$ - периодична $\Rightarrow$ интеграл можно брать по любому отрезку длиной $2l$

Достаточное условие разложимости в р. Фурье

(следствие из пр. Липшица)

1. $f(x) \in L_R(-l; l)$, им. период $2l$

   В т. x_0 имеет конечные односторонние произв. $f'_+(x_0)$ и $f'_-(x_0)$.

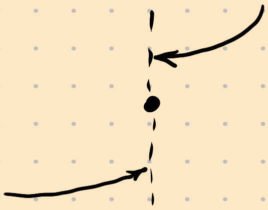
   Тогда ряд Ф. $f(x)$ в т. x_0 сходится к $f(x_0)$.

2. Пусть $f(x) \in L_R(-l; l)$, им. период $2l$

   x_0 - т. разрыва 1 рода, $\exists$ конечные „обобщённые" односторонние производные:

   $$\lim_{u \to +0}\frac{f(x_0+u) - f(x_0+0)}{u}, \quad \lim_{u \to +0}\frac{f(x_0-u) - f(x_0-0)}{-u}$$

   Тогда ряд Фурье в т. x_0 сходится к ср. арифм. $\frac{f(x_0+0) + f(x_0-0)}{2}$



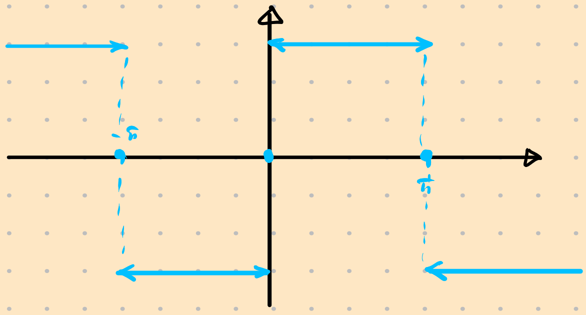
Часто $l=\pi$, тогда $a_n = \frac{1}{\pi}\int\limits_{-\pi}^{\pi} f(t)\cos nt\,dt$, $b_n = \frac{1}{\pi}\int\limits_{-\pi}^{\pi} f(t)\sin nt\,dt$

$$\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}\left[a_n\cos nx + b_n\sin nx\right]$$

Задача 1

Разложить в р. Фурье $f(x)=\operatorname{sign} x$, $-\pi<x<\pi$

Гр. суммы ряда строится сразу.



φ-ия нечёт. $\Rightarrow$ $a_n=0$

$b_n = \frac{2}{l}\int\limits_0^l f(t)\sin\frac{\pi n t}{l}\,dt$ - для нечёт. ф-ии

$b_n = \frac{2}{\pi}\int\limits_0^\pi \operatorname{sign} t\,\sin nt\,dt =$

$= \frac{2}{\pi}\int\limits_0^\pi \sin nt\,dt = \frac{2}{\pi n}\left(-\cos nt\right)\Big|_0^\pi =$

$= \frac{2}{\pi n}\left(1-(-1)^n\right)$

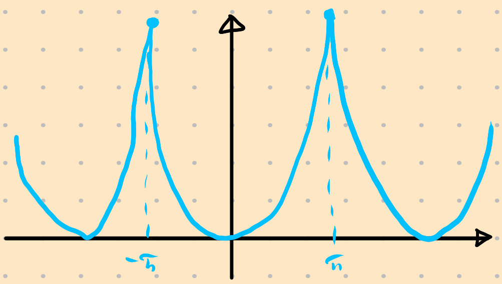
$$\operatorname{sign} x = \sum_{n=1}^{\infty}\frac{2}{\pi n}\left(1-(-1)^n\right)\sin x, \quad -\pi<x<\pi$$

Ряд не яв-ся равномерно сх. на всей прямой, т.к. сумма его разрывна (р/н сх. ряд из непр. ф-ий им. непр. сумму).

Задача 2

$f(x)=x^2$ на $-\pi<x<\pi$ сх-ся в $\forall$т. по 1 следствию

$a_n = \frac{2}{\pi}\int\limits_0^\pi x^2\cos nx\,dx$, $b_n=0$



$$\pi^2 = \frac{\pi^2}{3}+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{4}{n^2}(-1)^n(-1)^n$$

$$\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}=\frac{\pi^2}{6}$$

$$0 = \frac{\pi^2}{3} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{n^2}(-1)^n \qquad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} = -\frac{\pi^2}{12}$$

Дост. усл. р/н сх. р. Фурье

$f(x) \in L_R[-l;l]$, период $2l$, и кусочно-гладкая на $[-l;l]$.
($f(x)$ непр. на $[-l;l]$, $f'(x)$ кусочно-непр. на $[-l;l]$, т.е. есть конечное число т. разрыва I рода). Тогда р. Фурье $f(x)$ сх. р/н на всей числовой прямой.

Известно: если $f'(x)$ опр. всюду на промеж., то у нее не может быть разрывов I рода. Поэтому в теореме о равн. сх. р. Фурье в т. разрыва $f'(x)$ не опр.

Ряд Ф. x^2 сх. р/н на $(-\infty;+\infty)$.

Утв. 22-110

Пусть триг. ряд (для простоты $l=\pi$)

$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos nx + b_n \sin nx)$ (1) сх. р/н на $(-\infty;+\infty)$. Тогда его сумма $f(x)$ - непр. 2π-период. ф-ия, и (1) - р. Фурье своей суммы.

□ $f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos nx + b_n \sin nx)$ - р/н сх.

Сумма р/н сх. ряда из непр. ф-ий - непр. ф-ия. $\Rightarrow f(x)$ непр.

Имеет период 2π - очев.

Р/н сх. ряд из непр. ф-ий на конечном отрезке можно почленно интегрировать.

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(t)\,dt = \frac{a_0}{2}\cdot 2\pi + \sum_{n=1}^{\infty}\Big(a_n \underbrace{\int_{-\pi}^{\pi}\cos nt\,dt}_{0} + b_n \underbrace{\int_{-\pi}^{\pi}\sin nt\,dt}_{0}\Big) \Rightarrow a_0 = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(t)\,dt$$

Если р/н сх. ряд умножить на огр. ф-цию, он останется р/н сх.

$f(x)\cos mx = \frac{a_0}{2}\cos mx + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos nx \cos mx + b_n \sin nx \cos mx)$, m фикс.
- сх р/н.

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(t)\cos mt\,dt = \frac{a_0}{2}\underbrace{\int_{-\pi}^{\pi}\cos mt\,dt}_{0} + \sum_{n=1}^{\infty}\Big(a_n \underbrace{\int_{-\pi}^{\pi}\cos nt \cos mt\,dt}_{=0 \text{ если } n\neq m} + b_n \underbrace{\int_{-\pi}^{\pi}\sin nt \cos mt\,dt}_{=0}\Big) =$$

$$= a_m \int_{-\pi}^{\pi} \cos^2 mt \, dt$$

Ортогональность системы $\{1, \cos t, \sin t, \dots, \cos nt, \sin nt, \dots\}$ в пр-ве непр. ф-ий на отр. $[-\pi; \pi]$ со скалярным произв. $\int_{-\pi}^{\pi} f(t) g(t)\, dt$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cos mt \, dt$$

■

Задача 22-111

Явл-ся ли рядами Фурье?

1. $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos nx}{n^2}$ — ряд сх. р/н на R => ряд Фурье своей суммы

2. $\sum_{n=1}^{\infty} \cos nx$ — коэф-ты $\not\to 0$ => не р. Фурье

Задача 4

$f(x) = x \cos x$, $-\pi \le x \le \pi$ — нечётная, $a_n = 0$

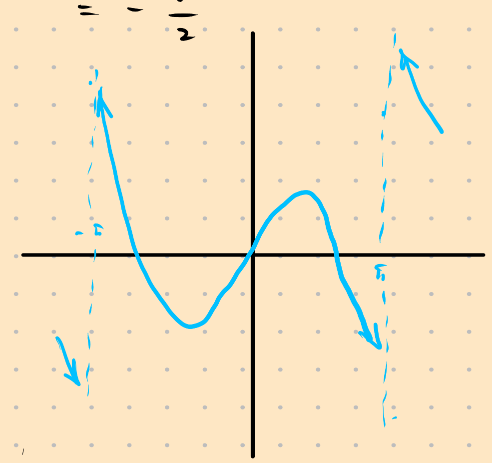
$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} t \cos t \cdot \sin nt \, dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} t \cdot (\sin (n+1)t + \sin (n-1)t)\, dt =$$

$$= \frac{1}{\pi} \Big[\Big(-\frac{t \cos (n+1)t}{n+1} - \frac{t \cos (n-1) t}{n-1} \Big) \Big|_0^{\pi} + \underbrace{\int_0^{\pi} \frac{\cos (n+1)t}{n+1} dt}_{=0} + \underbrace{\int_0^{\pi} \frac{\cos (n-1)t}{n-1} dt}_{=0} \Big] =$$

$$\underset{n \ge 2}{=} (-1)^{n+1} \Big(\frac{1}{n+1} + \frac{1}{n-1} \Big) = (-1)^{n+1} \frac{2n}{n^2 - 1} \text{ — } b_n \text{ при } n \ge 2$$

При $n = 1$ $b_n = \frac{2}{2\pi} \int_0^{\pi} t \sin 2t \, dt = \frac{1}{\pi} \Big[-\frac{1}{2} t \cos 2t \Big|_0^{\pi} + \underbrace{\int_0^{\pi} \frac{\cos 2t}{2} dt}_{=0} \Big] =$

$= -\frac{1}{2}$



Ряд сх. не р/н

$$x \cos x = -\frac{1}{2} \sin x + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} 2n}{n^2 - 1} \sin nx$$

на $(-\pi; \pi)$

Разложение по cos и по sin

$f(x) \in L_R(0; l)$

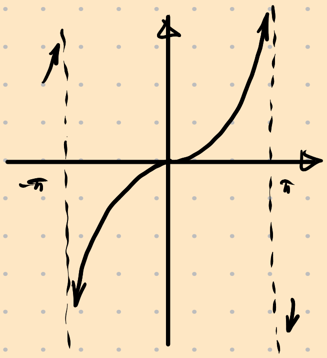
Если её продолжить по чётности $\rightarrow$ $f(x) \in L_R(-l; l)$

То её ряд Фурье — разложение $f(x)$ на $(-l; l)$ по cos

Если по нечётности, то по sin

Задача 1

$f(x) = x^2$ $\quad 0 < x < \pi$ $\quad$ по sin



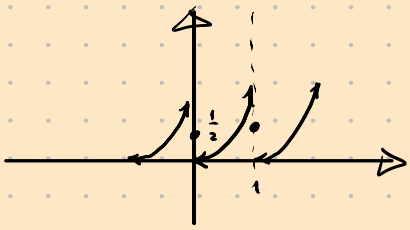
Ряд сх. неравномерно (разрывы) на $(-\infty; +\infty)$

$a_n = 0$

$$b_n = \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} t^2 \sin nt \, dt$$

Задача 2

Разложить в ряд Фурье $f(x) = x^2$ на $(0; 1)$ с периодом 1



$2l = 1 \Rightarrow l = \frac{1}{2}$

$$a_n = 2\int_0^1 t^2 \cos 2\pi n t \, dt \qquad n = 0, 1, 2 \dots$$

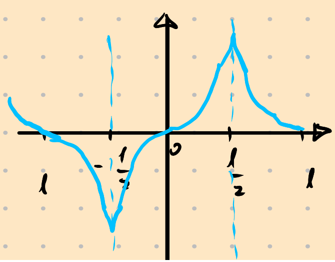
$$b_n = 2\int_0^1 t^2 \sin 2\pi n t \, dt$$

$$x^2 = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2\pi n x + b_n \sin 2\pi n x) \quad \text{на } 0 < x < 1$$

Ряд сх-ся неравномерно на $(-\infty; +\infty)$ т.к. сумма разрывна

Разложение по sin или cos чётных или нечётных кратных дуг

① $f(x) \in L_R(0; \frac{l}{2})$



$f(x) = f(l - x)$, $\quad 0 < x < \frac{l}{2}$ — симметрия отн. $x = \frac{l}{2}$

Далее по нечётности, далее с периодом $2l$

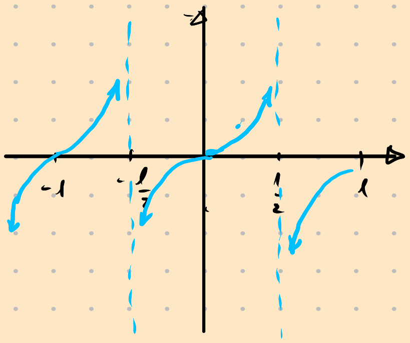
В этом случае $a_n = b_{2n} = 0$

$$b_{2n+1} = \frac{4}{l}\int_0^{l/2} f(t)\sin\frac{\pi(2n+1)t}{l}\,dt \qquad n=0,1,2,\dots$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} b_{2n+1}\sin\frac{\pi(2n+1)x}{n}$$ — разложение по sin нечётных кратных дуг

(2) $f(x)\in L_R(0;\frac{l}{2})$

$f(x) = -f(l-x)$, $0<x<\frac{l}{2}$ — симметрия отн. т. $(\frac{l}{2};0)$



$a_n=0$, $b_{n+1}=0$,

$$b_{2n} = \frac{4}{l}\int_0^{l/2} f(t)\sin\frac{2\pi n t}{l}\,dt$$

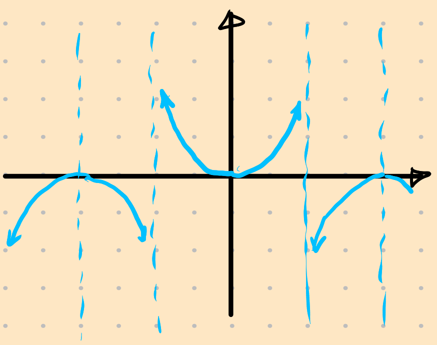
Разложение по sin чётных кр. дуг

(разложение по sin с периодом l)

$$\sum_{n=1}^{\infty} b_{2n}\sin\frac{2\pi n x}{l}$$

(3) $f(x) = -f(l-x)$ на $0<x<\frac{l}{2}$ — симм. отн. т. $(\frac{l}{2};0)$

Далее по чётности, далее с периодом $2l$



$b_n=0 \quad a_{2n}=0$

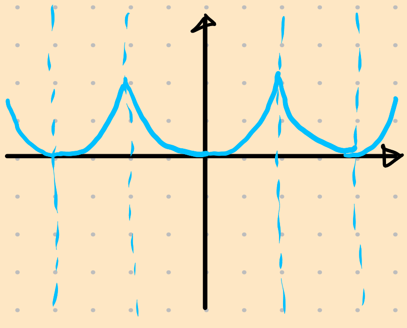
$$a_{2n+1} = \frac{4}{l}\int_0^{l/2} f(t)\cos\frac{\pi(2n+1)t}{l}\,dt$$

Разложение по cos нечётных кр. дуг

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_{2n+1}\cos\frac{\pi(2n+1)x}{l}$$

(4) $f(x) = f(l-x)$ $0<x<\frac{l}{2}$ — симм. отн. $x=\frac{l}{2}$

Далее по чётности, далее с периодом $2l$



$b_n=0 \quad a_{2n+1}=0$

$$a_{2n} = \frac{4}{l}\int_0^{l/2} f(t)\cos\frac{\pi\cdot 2nt}{l}\,dt$$

Разложение по cos чётных кр. дуг

$$\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty} a_{2n}\cos\frac{\pi\cdot 2nx}{l}$$

(фактич. разложение по cos с периодом l)

Задача 1

$$f(x) = \begin{cases} x, & 0 \le x \le 1 \\ 2-x, & 1 \le x \le 2 \end{cases}$$

Разложить по sin на $[0; 2]$ $\qquad l = 2$!

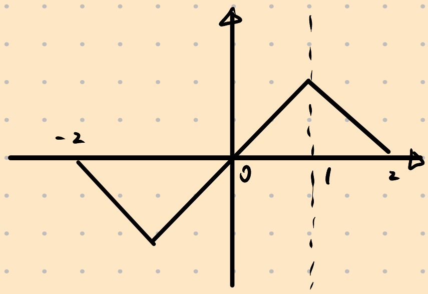


График симм. отн. $x = 1$

$f(x) = f(2-x)$, $0 \le x \le 1$

Получится по sin нечётных кр. дуг

$$b_{2n+1} = \frac{4}{2}\int_0^1 t \sin\frac{\pi(2n+1)t}{2}\,dt$$

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8(-1)^n}{\pi^2(2n+1)^2} \sin \pi\left(n+\frac{1}{2}\right)x$$

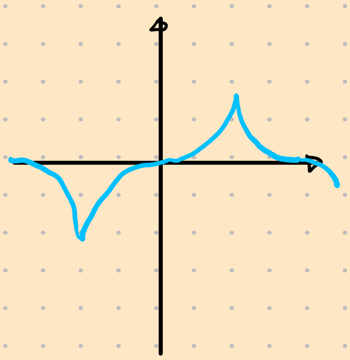
Ряд сх-ся р/н на $(-\infty; +\infty)$ т.к. $f(x)$ имеет период 4 и кусочно-гладкая на $[-4; 4]$

Задача 2

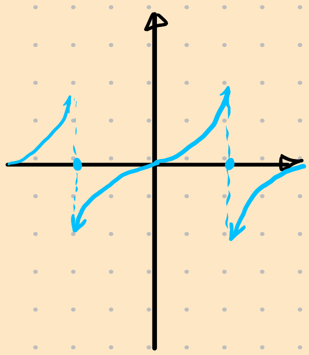
Построить гр. суммы рядов Фурье по cos и sin чёт. и нечёт. кратных дуг.

Сходятся ли они р/н?

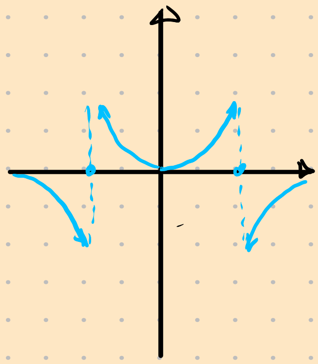
$f(x) = \operatorname{sh} x \qquad 0 < x < \frac{\pi}{2}$



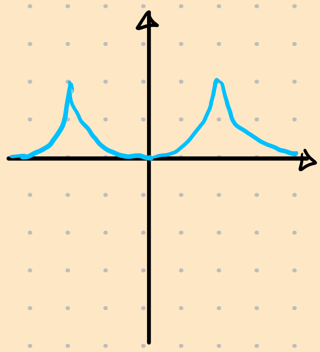
синусы неч. кр-дуг сх. р/н т.к. им. период 2π и кусоч. гладкая на $[-\pi; \pi]$



синусы чёт. кр. дуг сх. не р/н т.к. разрывы

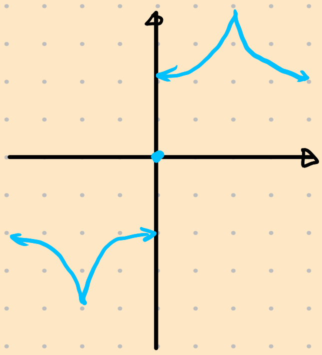


косинусы нечёт. кр. дуг сх. не р/н

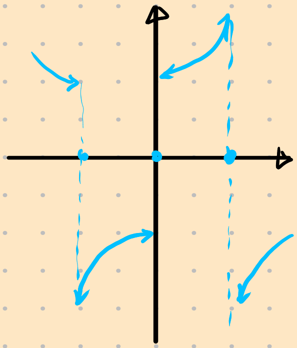


косинусы чёт. кр. дуг сх. р/н

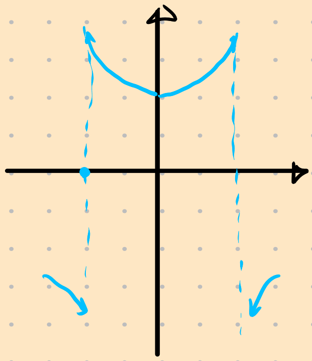
$f(x) = sh\ x + 1$



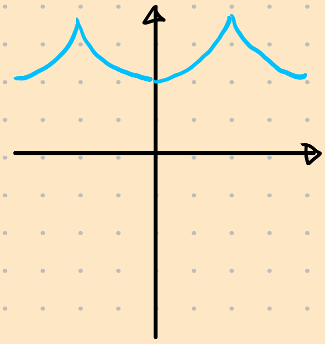
синусы нечёт. пр.
сх. не р/м



синусы чёт. пр. функ
сх. не р/м



косинусы нечёт. пр. функ
сх. не р/м



косинусы чёт. пр. функ
сх. р/м

Почленное дифференцирование рядов Фурье

$\exists\ f(x)$ им. период $2l$ и кус.-гл. на $[-l; l]$, тогда:

1. Ряд Ф. сх. р/м на $(-\infty; +\infty)$
2. Ряд Ф. можно почленно дифф.:

Если $f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum\limits_{n=1}^{\infty}\left[a_n \cos\frac{\pi n x}{l} + b_n \sin\frac{\pi n x}{l}\right]$

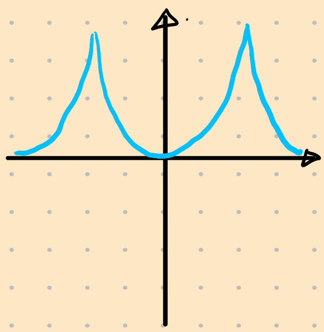
То ряд Ф. $f'(x)$ (к-рая кус. непр. на $[-l; l]$) получ. формальным дифф. ряда Фурье f:

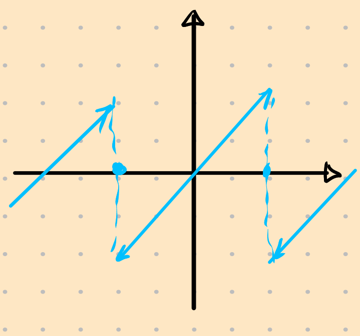
$$f'(x) \underset{\text{имеет ряд Фурье}}{\sim} \sum_{n=1}^{\infty}\left(-a_n \cdot \frac{\pi n}{l} \sin\frac{\pi n x}{l} + b_n \frac{\pi n}{l} \cos\frac{\pi n x}{l}\right)$$ – **не обязан сходиться!**

Пример

$$x^2 = \frac{\pi^2}{3} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(-1)^n}{n^2} \cos nx \qquad -\pi \le x \le \pi$$

$$2x \sim \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(-1)^{n+1}}{n} \sin nx$$ сумма ряда равна $2x$ на $(-\pi; \pi)$ по сл. 1 пр. Липшица





$-\pi < x < \pi$

$$x = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{n+1} \sin nx}{n}$$

Равенство Парсеваля

$L^2_R(I)$ – мн-во ф-ий, абс. инт. на I вместе с $f(x)^2$.

Для конечного I $L^2_R(I) \subset L_R(I)$

Все собств. инт. – из $L^2_R(a;b)$

Если $f(x) \in L^2_R(-l;l)$ и им. период $2l$, то

$$\frac{a_0^2}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n^2 + b_n^2 = \frac{1}{l}\int_{-l}^{l} (f(x))^2\,dx$$

В частности ряд слева сх.

Пример

$f(x) = x$;

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{n^2} = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} x^2\,dx = \frac{2}{\pi}\int_{0}^{\pi} x^2\,dx = \frac{2\pi^2}{3}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{\pi^2}{6}$$

$f(x) = x^2$;

$$\frac{2}{9}\pi^4 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{16}{n^4} = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} x^4\,dx = \frac{2}{\pi}\int_{0}^{\pi} x^4\,dx = \frac{2\pi^4}{5}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} = \frac{\pi^4}{90}$$

Неравенство Виртингера

$$\int_a^b f(x)^2\,dx \le C\int_a^b f'(x)^2\,dx$$

Задача 2

$f(x)$ непр. диф. на $[a,b]$, $f(a) = f(b) = 0$

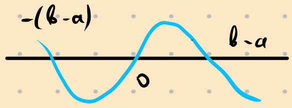
Тогда $\displaystyle\int_a^b f(x)^2\,dx \le \frac{(b-a)^2}{\pi^2}\int_a^b f'(x)^2\,dx$

$\square$ Рас-им $\varphi(x) = f(x+a)$, $\quad \varphi(0) = f(a) = 0$

$\varphi(b-a) = f(b) = 0$

Продол. по нечётности, задаём периодом $2\cdot(b-a)$ $(l = b-a)$

Т.к. она кус.-гл., р. Фурье сх. р/н



$$\varphi(x) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{\pi n x}{b-a}$$ нет cos т.к. нечётная

$$\varphi'(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi n}{b-a} b_n \cos \frac{\pi n x}{b-a}$$

$$\frac{2}{b-a} \int_0^{b-a} \varphi(x)^2 dx = \sum_{n=1}^{\infty} b_n^2$$

$$\frac{2}{b-a} \int_a^{b-a} \varphi'(x)^2 dx = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi^2}{(b-a)^2} b_n^2$$

■

Интегрирование рядов

Пусть $f(x)$ кус.-непр. на $[-l; l]$, пер. $2l$

$$f(x) \underset{\substack{\text{тр. р.}\\ \text{Фурье}}}{\sim} \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\frac{\pi n x}{l} + b_n \sin\frac{\pi n x}{l}\right)$$

Тогда $F(x) = \int\limits_{x_0}^{x} f(t)\,dt - \frac{a_0 x}{2}$ — кус. гл. на $[-l; l]$, $F(-l) = F(l)$

$$F(x) = \frac{C}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{l}{\pi n} a_n \sin\frac{\pi n x}{l} - \frac{l}{\pi n} b_n \cos\frac{\pi n x}{l}\right)$$ — сумма р/м сх. р. Фурье

$$C = \frac{1}{l}\int\limits_{-l}^{l} F(t)\,dt$$

Если $\frac{a_0 x}{2}$ не отнимать, то потеря и не сходиться р/м.

Порядок убывания коэф.-ов Фурье

Если $f(x)$ кус. гл. на $[-l; l]$ и пер. $2l$, то $a_n, b_n = o\left(\frac{1}{n}\right)$

$f(x)$ — кус. непр. дифф. на $[a, b]$, если $f'(x)$ сущ. всюду, кроме конечного числа т., где у неё разрывы I рода.

Коэф-ты Фурье такой ф-ии, $a_n, b_n = O\left(\frac{1}{n}\right)$ $\quad |a_n|, |b_n| \leq C\frac{1}{n}$

$f(x)$ кус.-гл., если она непрерывна и кус. непр. дифф.

Например, $\operatorname{sign} x$ — кус. непр. дифф., но не кус. гл.

Обобщение

Утв. А. Если $f(x)$ пер. $2l$ и $f^{(k-1)}(x)$ кус. гл. на $[-l; l]$, то коэф. Фурье $a_n, b_n = o\left(\frac{1}{n^k}\right)$

Утв. Б. Если $f(x)$ пер. $2l$, $f^{(k-2)}(x)$ непр. на $[-l; l]$, $f^{(k-1)}(x)$ кус. непр. дифф., то $a_n, b_n = O\left(\frac{1}{n^k}\right)$

Задача такая: оценить порядок убывания коэф.-ов Фурье.

Пример

$f(x) = x^2$ на $[-\pi; \pi]$, с пер. 2π

A) $k-1=0$, $k=1$ $\qquad a_n = o\left(\frac{1}{n}\right)$, $b_n = 0$

$k-2=0$, $k-1=1$, $k=2$ $\qquad a_n = O\left(\frac{1}{n^2}\right)$ — удобнее применять

$f(x) = x^3$

A) неприменимо (она сама не кус. н.)

Б) $k-1=0$, $k=1$ $\qquad b_n = O\left(\frac{1}{n}\right)$, $a_n = 0$

$f(x) = (\pi^2 - x^2)^2$ $\qquad [-\pi; \pi]$ с пер. 2π

Нужно сравнивать знач. произв. в т. π и $-\pi$ (на концах могут быть проблемы)

$f(\pi) = f(-\pi) = 0$ — непр.

$f'(x) = 2(\pi^2 - x^2)\cdot(-2x)$

$f'(\pi) = f'(-\pi) = 0$

$f''(\pi) = f''(-\pi)$ — кус. н.

$f'''(\pi) \neq f'''(-\pi)$ — кус. непр. дифф.

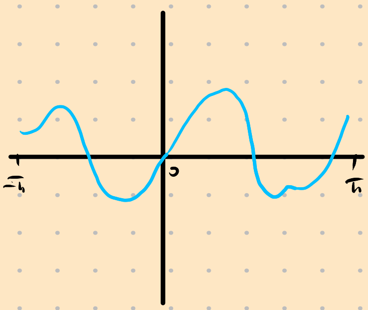
A) $a_n = o\left(\frac{1}{n^3}\right)$ $\qquad b_n = 0$

Б) $a_n = O\left(\frac{1}{n^4}\right)$ — на практике делать только Б!

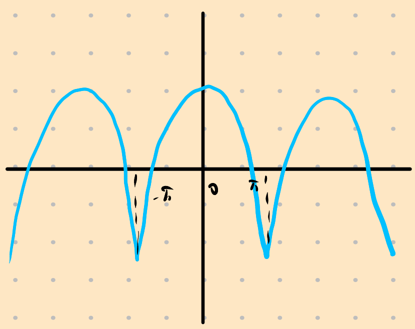
Задача 1

$f(x) = \pi^3 x - x^4$, $0 \le x \le \pi$ разл. в р. Фурье по sin.

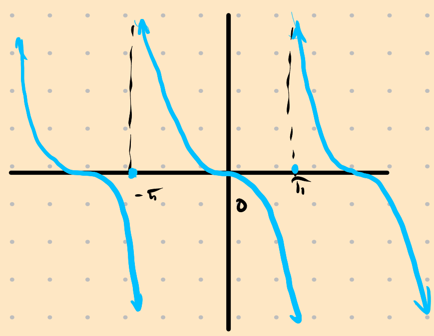
Тогда гр. суммы продолж. и дважды продифф. ряда



ряд



ряд'



ряд''

Суммирование рядов методом средних арифметических

Если $\lim\limits_{n\to\infty} x_n = a \Rightarrow \lim\limits_{n\to\infty} \dfrac{x_1+\ldots+x_n}{n} = a$

Обратное неверно, $(-1)^n$ – расх., ср. арифм. $\to 0$.

Ряд $1+2-3+1+2-3+\ldots$ расходится (общий член ряда $\not\to 0$)

$$S_n = \begin{cases} 0, & n=3k \\ 1, & n=3k+1 \\ 3, & n=3k+2 \end{cases}$$

$$\sigma_n = \frac{S_1+S_2+\ldots+S_n}{n}$$ – метод Фейера (метод ср. арифм.)

$$\sigma_n = \begin{cases} 4\dfrac{k}{n} = \dfrac{4}{3}, & n=3k \\ \dfrac{4k+1}{3k+1}, & n=3k+1 \\ \dfrac{4k+4}{3k+2}, & n=3k+2 \end{cases} \qquad \sigma_{3k} = \frac{4}{3} \quad \sigma_{3k+1}\to\frac{4}{3} \quad \sigma_{3k+2}\to\frac{4}{3}$$

$$\sigma_n \to \frac{4}{3}$$

Задача 1

$\sin x + \sin 2x + \ldots + \sin nx + \ldots$ – ряд сходится $\Leftrightarrow x = \pi k,\ k\in\mathbb{Z}$

А вот методом Фейера суммируется: $S_n = \sum\limits_{k=1}^{n} \sin kx$ – сопряжённое ядро Дирихле

$$S_n = \frac{2\sum\limits_{k=1}^{n} \sin kx \sin\frac{x}{2}}{2\sin\frac{x}{2}} = \frac{\sum\limits_{k=1}^{n} \cos\left(k-\frac{1}{2}\right)x - \cos\left(k+\frac{1}{2}\right)x}{2\sin\frac{x}{2}} = \frac{\cos\frac{x}{2} - \cos\left(n+\frac{1}{2}\right)x}{2\sin\frac{x}{2}} =$$

$x \neq 2\pi k$

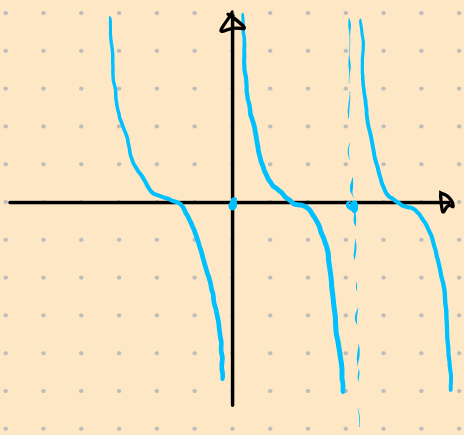
$$= \frac{1}{2}\operatorname{ctg}\frac{x}{2} - \frac{\cos\left(n+\frac{1}{2}\right)x}{2\sin\frac{x}{2}}$$

$$\sigma_n = \frac{\sum\limits_{k=1}^{n} S_k}{n}$$ – сопряжённое ядро Фейера

$$\sigma_n = \frac{1}{2}\operatorname{ctg}\frac{x}{2} - \frac{2\sum\limits_{k=1}^{n}\cos\left(k+\frac{1}{2}\right)x\sin\frac{x}{2}}{n\,4\sin^2\frac{x}{2}} = \frac{1}{2}\operatorname{ctg}\frac{x}{2} - \frac{\sum\limits_{k=1}^{n}\left(\sin(k+1)x - \sin kx\right)}{n\cdot 4\sin^2\frac{x}{2}} =$$

$$= \frac{1}{2}\operatorname{ctg}\frac{x}{2} - \frac{\sin(n+1)x - \sin x}{4n\sin^2\frac{x}{2}} \to 0, \quad n\to\infty$$

$$\lim \sigma_n = \begin{cases} \frac{1}{2}\operatorname{ctg}\frac{x}{2}, & x\neq 2\pi k \\ 0, & x = 2\pi k \end{cases}$$



Суммирование р. Фурье методом Фейера

Пусть $f(x) \in L_R(-l, l)$, пер. период $2l$ и непр. в т. x_0. Тогда ряд Фурье $f(x)$ суммируем в т. x_0 к $f(x_0)$ методом Фейера

Равномерная непр. суммирования

Пусть $f(x)$ пер. период $2l$ и непр. на $[-l; l]$. Тогда р. Фурье f равномерно суммируется к $f(x)$ методом Фейера на $(-\infty; +\infty)$ $\left(\sigma_n(f, x) \underset{R}{\rightrightarrows} f(x)\right)$

Утв Пусть $f(x) \in L_R(-l; l)$ и непр. в т. x_0, причём р. Фурье сх. в т. x_0. Тогда он сх. именно к $f(x_0)$.

Теорема Вейерштрасса тригонометрическая (следствие из пред.)

Пусть $f(x)$ непр. на $[-l; l]$, $f(-l) = f(l)$. Тогда $\forall \varepsilon > 0 \to \exists$ тригоном. многочлен вида $T(x) = \frac{\alpha_0}{2} + \sum_{k=1}^{n} \left(\alpha_k \cos \frac{\pi k x}{l} + \beta_k \sin \frac{\pi k x}{l}\right)$, причём $\forall x \in [-l; l] \to |f(x) - T(x)| < \varepsilon$.

Линейное нормированное пр-во

Лин. пр-во L наз-ся **нормированным** (ЛНП), если в нём введена норма:

$\forall x \in L$ опред. $\|x\| \in \mathbb{R}$, такое, что

1. $\|x+y\| \le \|x\| + \|y\|$
2. $\|\alpha x\| = |\alpha| \cdot \|x\|$
3. $\|x\| \geq 0$, $\|x\| = 0 \iff x = 0$.

Для Евклидова пр-ва $\|x\| = \sqrt{(x,x)}$

ЛНП яв-ся **метрическим**, если $\rho(x,y) = \|x-y\|$

Пос-ть $x_n \to x$ в ЛНП L, если $\|x_n - x\| \to 0$, $n \to \infty$

$(\forall \varepsilon > 0 \to \exists n_0 : \forall n \geq n_0 \to \|x_n - x\| < \varepsilon)$

Пос-ть x_n в ЛНП яв-ся **фундаментальной**, если

$\forall \varepsilon > 0 \to \exists n_0 : \forall n, m \geq n_0 \to \|x_n - x_m\| < \varepsilon$.

Любая сходящаяся x_n фундаментальна. Обратное неверно (вообще говоря).

ЛНП называется **полным (банаховым)**, если в нём любая фунд. пос-ть сх-ся.

Примеры: $\mathbb{R}^1$, $\mathbb{R}^n$ $(\|x\| = |x|)$.

Внимание: рац. числа ЛНП не образуют! (умножение на вещ. число не вар.)

Вообще, любые конечномерные пр-ва с любой нормой полные.

① $C[a,b]$ – пр-во ф-ий, непр. на $[a,b]$. $\|f\| = \max\limits_{[a,b]} |f(x)|$.

$f_n \to f$ в $C[a,b]$, если $\forall \varepsilon > 0 \to \exists n_0 : \forall n \geq n_0 \to \|f_n - f\| < \varepsilon$

$$\left(\max_{[a,b]} |f_n(x) - f(x)| < \varepsilon\right)$$

По кр. Коши о равномерной сх-ти, $C[a,b]$ полное.

② $C^1[a,b]$ – пр-во ф-ий, непр. дифф. на $[a,b]$, $\|f\| = \max\limits_{[a,b]} |f(x)| + \max\limits_{[a,b]} |f'(x)|$

$C^1[a,b]$ – полно.

□ Пусть $f_n \subset C_1[a,b]$ и $\forall \varepsilon > 0 \to \exists n_0 : \forall n, m \geq n_0 \to \|f_n - f_m\| < \varepsilon$

$\forall x \in [a,b] \to |f_n(x) - f_m(x)| < \varepsilon$ и $|f_n'(x) - f_m'(x)| < \varepsilon$. $\Rightarrow$

Теорема Если $f_n(x) \in C^1[a,b]$, $\exists x_0 \in [a,b]$: $f_n(x_0)$ сх.,

$f_n'(x) \rightrightarrows \varphi(x)$ на $[a,b]$, то $f_n(x) \rightrightarrows f(x)$ на $[a,b]$,

$f(x) \in C^1[a,b]$, $f'(x) = \varphi(x)$.

$\Rightarrow$ По кр. Коши р-и сх-ти, $f_n(x)$ и $f_n'(x)$ р/н сх. на $[a,b]$.

$f_n(x) \rightrightarrows f(x)$, $f_n'(x) \rightrightarrows \varphi(x) = f'(x)$

$f(x) \in C^1[a,b]$, $\forall \varepsilon > 0 \rightarrow \exists n_0 : \forall n \geq n_0 \ \forall x \in [a,b]$ $|f_n(x) - f(x)| < \varepsilon$, $|f_n'(x) - f'(x)| < \varepsilon$ $\Rightarrow$

$\Rightarrow f_n \to f$ в $C^1[a,b]$, т.е. $C^1[a,b]$ полно.

3. Пример неполного пр-ва

Мн-во непр. дифф. ф-ий на $[a,b]$ с нормой $\|f\| = \max\limits_{[a,b]} |f(x)|$.

Возьмём $f(x) = |x|$ на $[-\pi; \pi]$, далее с периодом 2π - кусочно-гладкая на $[-\pi; \pi]$ и периодич. $\Rightarrow$ р. Фурье сх-ся равномерно : $S_n(f, x) \underset{[-\pi;\pi]}{\rightrightarrows} f(x)$

Т.е. она фундаментальна (посл-ть непр. дифф. ф-ий), но предел не яв-ся непр. дифф. $\Rightarrow$ посл-ть не яв-ся сходящейся в нашем пр-ве.

Значит оно неполное.

Другие нормы в пр-ве непр. ф-ий

$L_c^2[a,b]$ $\quad \|f\| = \sqrt{\int_a^b (f(x))^2 dx}$

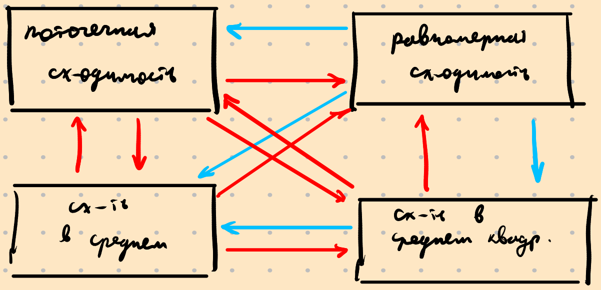
$L_c^1[a,b]$ $\quad \|f\| = \int_a^b |f(x)| dx$

— неполные

$C[a,b]$ $\quad f_n \to f$, если $\|f_n - f\|_C \to 0$ — равномерная сх-ть

$L_c^2[a,b]$ $\quad \|f_n - f\|_2 \to 0$: $\int_a^b |f_n - f|^2 dx \to 0$ — сх-ть в среднем квадратичном

$L_c^1[a,b]$ $\quad \|f_n - f\|_1 \to 0$: $\int_a^b |f_n - f| dx \to 0$ — сх-ть в среднем



Все ф-ии непр.

Р/н сх-ть - самая сильная.

Из неё следует сх-ть в ср. кв.:

$\|f_n - f\|_C \to 0$

$\|f_n - f\|_2 \to 0$: $\int_a^b (f_n - f)^2 dx \leq$

$\leq \|f_n - f\|_C^2 \cdot \int_a^b 1\, dx = (b-a)\|f_n - f\|_C^2 \to 0$

Аналогично, р/н сх. → сх. ср.

Из сх. в ср.кв. → сх. ср.:

$\|f_n - f\|_2 \to 0$

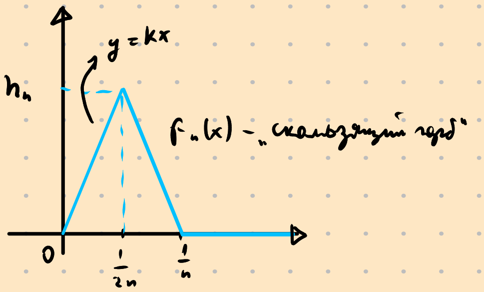
$$\|f_n - f\|_1 = \int_a^b |f_n - f|\, dx \leq \sqrt{\int_a^b (f_n - f)^2 dx} \cdot \sqrt{\int_a^b 1\, dx} = \sqrt{b-a}\, \|f_n - f\|_2 \to 0$$

В евклидовом пр-ве $\mathcal{L}^2_R$ $\quad |(f, g)| \leq |f| \cdot |g|$

$$\left|\int_a^b f(x) g(x)\, dx\right| \leq \sqrt{\int_a^b f(x)^2 dx} \cdot \sqrt{\int_a^b g(x)^2 dx}$$

неравенство Коши - Буняковского

Рас-им $f_n(x)$:



Какая бы ни была высота h_n горба, поточечная сх-ть - к 0.

$\forall x \in [0; 1] \quad f_n(x) \to f(x) \equiv 0$

- р/н сх-ть $\Leftrightarrow h_n \to 0$: $\sup\limits_{[0;1]} |f_n(x) - f(x)| = h_n$

$$\|f_n - f\|_1 = \int_0^1 |f_n - f|\, dx = \frac{h_n}{2n}$$

- Сх-ть в среднем, если $h_n = o(n)$

$$\|f_n - f\|_2 = \int_0^1 |f_n - f|^2 dx = 2\int_0^{\frac{1}{2n}} (kx)^2 dx = \qquad k \cdot \frac{1}{2n} = h_n \Rightarrow k = 2n \cdot h_n$$

$$= 2 \cdot 4n^2 \cdot h_n^2 \int_0^{1/2n} x^2 dx = 8n^2 \cdot h_n^2 \cdot \frac{1}{3 \cdot 8 n^3} = \frac{h_n^2}{3n}$$ — • сх-ть в ср.кв., если $h_n = o(\sqrt{n})$

Если $h_n = 1$: есть в ср.кв., нет равномерной.

Если $h_n = \sqrt{n}$: есть в среднем, нет в ср. кв.

Если $h_n = n$: есть поточечная, нет остальных видов