

# Содержание

1	Теорема Римана об осцилляции	2
2	Представление частичной суммы ряда Фурье интегралом с ядром Дирихле. Принцип локализации.	5
3	Достаточные условия сходимости ряда Фурье в точке	8
4	Дифференцирование и интегрирование рядов Фурье. Порядок убывания коэффициентов Фурье.	10
5	Теорема Жордана.	11
6	Равномерная сходимость сумм Фейера для непрерывной функции	12
7	Теоремы Вейерштрасса о приближении непрерывных функций тригонометрическими и алгебраическими многочленами	15
8	Минимальное свойство коэффициентов Фурье по ортогональной системе. Неравенство Бесселя.	16
9	Полнота ортогональной системы функций, ортонормированный базис и равенство Парсеваля	17
10	Полнота тригонометрической системы в пространстве функций суммируемых с квадратом. . .	18
11	Теорема Рисса-Фишера	19
12	Полнота и замкнутость ортогональной системы, их связь	20
13	Полнота пространств $C[a, b]$ и $L_p[a, b], p > 1$	20
14	Непрерывность, интегрируемость и дифференцируемость интегралов, зависящих от параметра	22
15	Равномерная сходимость несобственных интегралов, зависящих от параметра. Критерий Коши, признаки Вейерштрасса и Дирихле	23
16	Непрерывность и интегрируемость несобственных интегралов, зависящих от параметра	24

# 1 Теорема Римана об осцилляции

Порядок и беспорядок – это число; храбрость и трусость – это мощь; сила и слабость – это форма.

---

Лукашов А.Л.

**Определение 1.1.** Точка  $x$  называется **точкой прикосновения** множества  $S$ , если любая окрестность  $x$  содержит хотя бы одну точку множества  $S$ .

**Определение 1.2.** Множество всех точек прикосновения  $S$  называется **замыканием**  $S$ .

**Определение 1.3.** **Носителем** функции  $f(x)$  называется замыкание множества тех  $x$ , для которых  $f(x) \neq 0$ .  $(\text{supp } f)$  Функции с ограниченным носителем называются **финитными**.

**Определение 1.4.** Множество  $D$  называется всюду плотным в множестве  $G$ , если

$$\overline{D} = G$$

**Утверждение 1.1.**  $L_1(\mathbb{R})$  – линейное нормированное пространство.

$$\|f\|_1 = \int_{\mathbb{R}} |f(x)| d\mu(x)$$

**Лемма 1.1.** Множество непрерывных финитных функций всюду плотно в  $L_1(\mathbb{R})$ .

*Доказательство.* Заменяем  $\mathbb{R}$  на  $[a, b]$ . То есть докажем, что множество непрерывных на  $[a, b]$  функций всюду плотно в  $L_1[a, b]$ .

- Любая суммируемая функция представима в виде разности двух неотрицательных суммируемых функций, поэтому достаточно доказать утверждение для неотрицательных суммируемых функций.
- Так как интеграл неотрицательной суммируемой функции слабо отличается от интеграла её срезки  $f_{[N]}(x)$  при достаточно больших  $N$ , то достаточно доказать утверждение для ограниченных неотрицательных суммируемых функций.
- Докажем для ограниченных неотрицательных. По теореме о представлении ограниченной измеримой функции пределом последовательности ступенчатых

$$\exists \{h_n\} : h_n \uparrow f$$

Теорема Леви гарантирует, что

$$\int_a^b h_n(x) d\mu(x) \rightarrow \int_a^b f(x) d\mu(x)$$

Значит

$$\int_a^b |f(x) - h_n(x)| d\mu(x) = \int_a^b (f(x) - h_n(x)) d\mu(x) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

То есть нам достаточно доказать, что любую ступенчатую можно приблизить непрерывной:

$$h_n(x) = \sum_{k=1}^N c_k \mathbb{I}_{E_k}(x)$$

В силу того, что  $\forall k : E_k$  – измеримое, то

$$\forall \varepsilon > 0 : \exists \text{ элементарное } M_\varepsilon : \mu(E_k \Delta M_\varepsilon) < \varepsilon$$

Значит

$$\int_a^b |\mathbb{I}_{E_k}(x) - \mathbb{I}_{M_\varepsilon}(x)| d\mu(x) = \int_a^b \mathbb{I}_{E \Delta M_\varepsilon}(x) d\mu(x) = \mu(E \Delta M_\varepsilon) < \varepsilon$$

Нам осталось научиться приблизить индикатор интервала непрерывными функциями (так как элементарное множество представимо объединением интервалов), а это сделать очень просто, используя непрерывную функцию  $\varphi(x)$ , которая выглядит вот так: Тогда

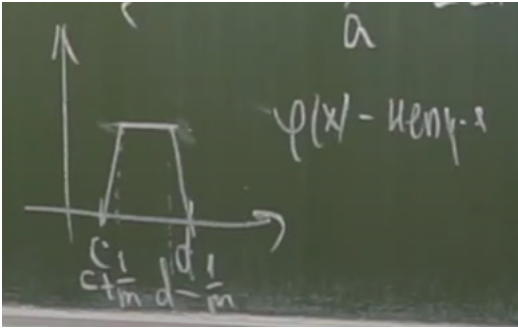


Рис. 1: Один из способов ввода функции  $\varphi$

$$\int_a^b |\mathbb{I}_{(c,d)}(x) - \varphi(x)| d\mu(x) = \frac{2}{m} < \varepsilon$$

Возвращаемся к общему случаю: пусть  $f \in L_1(\mathbb{R})$ .

$$\exists N \in \mathbb{N} \int_{\mathbb{R} \setminus [-N, N]} |f(x)| d\mu(x) < \frac{\varepsilon}{3}$$

По доказанному выше:

$$f|_{[-N, N]} : \forall \varepsilon > 0 \exists g \in C[-N, N] \|f|_{[-N, N]} - g\|_{L_1[-N, N]} < \frac{\varepsilon}{3}$$

Далее мы можем продлить  $g$  на всю прямую линейным образом (аналогично введению функции  $\varphi$  из рассуждений выше), так, чтобы

$$\int_{\mathbb{R} \setminus [-N, N]} |g(x)| d\mu(x) < \frac{\varepsilon}{3}$$

Тогда

$$\int_{\mathbb{R}} |f(x) - g(x)| d\mu(x) \leq \int_{-N}^N |f(x) - g(x)| d\mu(x) + \int_{\mathbb{R} \setminus [-N, N]} (|f(x)| + |g(x)|) d\mu(x) < \varepsilon$$

□

**Лемма 1.2.** *Каждая суммируемая на  $\mathbb{R}$  функция  $f(x)$  непрерывна в среднем относительно сдвига, то есть*

$$\lim_{t \rightarrow 0} \int_{\mathbb{R}} |f(x+t) - f(x)| d\mu(x) = 0$$

*Доказательство.* Докажем, что для  $f \in L_1[a, b]$ :

$$\lim_{\delta \rightarrow +0} \sup_{0 \leq h \leq \delta} \int_a^{b-h} |f(x+h) - f(x)| d\mu(x) = 0$$

По предыдущей лемме:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists g \in C[a, b] : \int_a^b |f(x) - g(x)| d\mu(x) < \frac{\varepsilon}{3}$$

$g$  – непрерывная на  $[a, b] \Rightarrow$  по теореме Кантора:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall x, y \in [a, b], |x - y| < \delta : |g(x) - g(y)| < \frac{\varepsilon}{3(b-a)}$$

Тогда  $\forall h \ 0 \leq h \leq \delta$ :

$$\begin{aligned} \int_a^{b-h} |f(x+h) - f(x)| d\mu(x) &\leq \int_a^{b-h} |f(x+h) - g(x+h)| d\mu(x) + \int_a^{b-h} |f(x) - g(x)| d\mu(x) + \\ &\quad + \int_a^{b-h} |g(x+h) - g(x)| d\mu(x) < \varepsilon \end{aligned}$$

Так как  $f$  суммируема на  $\mathbb{R}$ , то  $\exists N \in \mathbb{N}$ :

$$\int_{\mathbb{R} \setminus [-N, N]} |f(x)| d\mu(x) < \frac{\varepsilon}{3}$$

Тогда выберем  $[a, b] := [-N-1, N+1]$  и введём  $g := f \mathbb{I}_{[-N, N]} \in L_1[a, b]$ . Применим к этой функции доказанное выше равенство:

$$\exists \delta \in (0, 1) \forall h, 0 \leq h \leq \delta : \int_a^{b-h} |g(x+h) - g(x)| d\mu(x) < \frac{\varepsilon}{3}$$

Теперь возьмём  $\forall t, |t| < \delta$ :

$$\int_{\mathbb{R}} |f(x+t) - f(x)| d\mu(x) = \int_{\{x, x+t\} \subseteq [a, b]} |f(x+t) - f(x)| d\mu(x) + \int_{\{x, x+t\} \not\subseteq [a, b]} |f(x+t) - f(x)| d\mu(x) < \varepsilon$$

□

**Теорема 1.1.** *Римана об осцилляции.*

*Если  $f \in L_1(I)$ , где  $I$  – конечный или бесконечный промежуток, то*

$$\lim_{\lambda \rightarrow \infty} \int_I f(x) \cos(\lambda x) d\mu(x) = \lim_{\lambda \rightarrow \infty} \int_I f(x) \sin(\lambda x) d\mu(x) = 0$$

*Доказательство.*

$$\begin{aligned} \int_I f(x) \cos(\lambda x) d\mu(x) &\stackrel{x=t+\frac{\pi}{\lambda}}{=} \int_{I-\frac{\pi}{\lambda}} f\left(t+\frac{\pi}{\lambda}\right) \cos(\lambda t) d\mu(t) = \\ &= -\frac{1}{2} \int_I \left(f\left(t+\frac{\pi}{\lambda}\right) - f(t)\right) \cos(\lambda t) d\mu(t) - \frac{1}{2} \int_{(I-\frac{\pi}{\lambda}) \Delta I} f\left(t+\frac{\pi}{\lambda}\right) \cos(\lambda t) d\mu(t) \end{aligned}$$

Заметим, что

$$\begin{aligned} \left| \int_{(I-\frac{\pi}{\lambda}) \setminus I} f\left(t+\frac{\pi}{\lambda}\right) \cos(\lambda t) d\mu(t) \right| &\leq \int_{(I-\frac{\pi}{\lambda}) \Delta I} \left| f\left(t+\frac{\pi}{\lambda}\right) \right| d\mu(t) = \\ &= \int_{I \Delta (I+\frac{\pi}{\lambda})} |f(x)| d\mu(t) \xrightarrow{\lambda \rightarrow \infty} 0 \end{aligned}$$

Последнее заключение следует из того, что  $\mu\left(I \Delta (I+\frac{\pi}{\lambda})\right) \xrightarrow{\lambda \rightarrow \infty} 0$

Также очевидно, что

$$\left| \int_I \left(f\left(t+\frac{\pi}{\lambda}\right) - f(t)\right) \cos(\lambda t) d\mu(t) \right| \leq \int_I \left| f\left(t+\frac{\pi}{\lambda}\right) - f(t) \right| d\mu(t) \xrightarrow{\text{по пред. Лемме}} 0$$

□

## 2 Представление частичной суммы ряда Фурье интегралом с ядром Дирихле. Принцип локализации.

О мастерстве полководца  
судят по старательности его  
подчиненных.

---

Лукашов А.Л.

**Определение 2.1.**  $f \in L_{2\pi} \Leftrightarrow f \in L_1[-\pi, \pi]$  и  $2\pi$  периодическая.

**Определение 2.2.** Ядром Дирихле  $D_n(u)$  называется выражение

$$D_n(u) = \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^n \cos(ku) = \frac{\sin(n+\frac{1}{2})u}{2 \sin(\frac{u}{2})}$$

*Доказательство.*

$$\begin{aligned} D_n(u) &= \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^n \cos(ku) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (e^{iku} + e^{-iku}) = \frac{1}{2} \sum_{k=-n}^n e^{iku} = \frac{1}{2} e^{-inu} \frac{e^{i(2n+1)u} - 1}{e^{iu} - 1} = \\ &= \frac{1}{2} e^{-inu} \frac{e^{i(2n+1)\frac{u}{2}} - e^{-i(2n+1)\frac{u}{2}}}{e^{i\frac{u}{2}} - e^{-i\frac{u}{2}}} \cdot \frac{e^{i(2n+1)\frac{u}{2}}}{e^{i\frac{u}{2}}} = \frac{1}{2} \frac{\sin((n+\frac{1}{2})u)}{\sin(\frac{u}{2})} \end{aligned}$$

□

**Лемма 2.1.** *О представлении частичной суммы.*

Если  $f \in L_{2\pi}$ , то  $n$ -я частичная сумма тригонометрического ряда Фурье

$$S_n(f, x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx)$$

может быть представлена следующим образом:

$$S_n(f, x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) D_n(x-t) d\mu(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+u) D_n(u) d\mu(u)$$

*Доказательство.* Подставим в  $S_n$  формулы для  $a_k, b_k$ :

$$\begin{aligned} S_n(f, x) &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \left( \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^n (\cos(kx) \cos(kt) + \sin(kx) \sin(kt)) \right) d\mu(t) = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) D_n(x-t) d\mu(t) \end{aligned}$$

Первая формула доказана, вторая доказывается очевидно заменой  $t = x + u$ , а также используя тот факт, что интеграл по любому отрезку длины  $T$ ,  $T$ -периодичной функции одинаков.  $\square$

**Лемма 2.2.** Пусть  $f \in L_{2\pi}$ ,  $g$  – измеримая,  $2\pi$ -периодическая, ограниченная функция. Тогда коэффициенты Фурье функции  $\chi(t) = f(x+t)g(t)$  стремятся к нулю при  $n \rightarrow +\infty$  равномерно по  $x$ .

*Доказательство.*  $g$  – ограниченная  $\Rightarrow \exists M : \forall u |g(u)| \leq M$ .

$f$  – измеримая  $\Rightarrow$  по (1.1) мы можем её представить, как  $f = f_1 + f_2$ , причём  $f_1 \in C[-\pi, \pi]$ , а  $\int_{-\pi}^{\pi} |f_2(t)| d\mu(t) < \frac{\varepsilon}{4M}$ .

$f_1$  – непрерывная на компакте  $[-\pi, \pi] \Rightarrow \exists B \forall u : |f_1(u)| \leq B$ .

Введём функцию, которая называется интегральный модуль непрерывности функции  $F$ :

$$\omega_1(\delta, F) := \sup_{0 \leq h \leq \delta} \int_{-\pi}^{\pi} |F(t+h) - F(t)| d\mu(t)$$

Рассмотрим  $a_n$  для функции  $\chi$ :

$$\begin{aligned} a_n(\chi) &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \chi(t) \cos(nt) d\mu(t) \stackrel{t=u+\frac{\pi}{n}}{=} \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \chi\left(u + \frac{\pi}{n}\right) \cos(nu) d\mu(u) = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left[ \chi\left(t + \frac{\pi}{n}\right) - \chi(t) \right] \cos(nt) d\mu(t) \Rightarrow \\ &|a_n(\chi)| \leq \frac{1}{2\pi} \omega_1\left(\frac{\pi}{n}, \chi\right) \end{aligned}$$

Аналогично получим неравенство для  $b_n(\chi)$ :

$$|b_n(\chi)| \leq \frac{1}{2\pi} \omega_1\left(\frac{\pi}{n}, \chi\right)$$

То есть мы свели доказательство к доказательству факта, что  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \omega_1(\frac{\pi}{n}, \chi) = 0$  равномерно по  $x$ :

$$\begin{aligned} \int_{-\pi}^{\pi} |\chi(t+h) - \chi(t)| d\mu(t) &= \int_{-\pi}^{\pi} |f(x+t+h)g(t+h) - f(x+t)g(t)| d\mu(t) \leq \\ &\leq \int_{-\pi}^{\pi} |f(x+t+h) - f(x+t)| \cdot |g(t+h)| d\mu(t) + \int_{-\pi}^{\pi} |f(x+t)| \cdot |g(t+h) - g(t)| d\mu(t) \leq \\ &\leq M \int_{-\pi}^{\pi} |f(u+h) - f(u)| d\mu(u) + \int_{-\pi}^{\pi} |f_1(x+t)| \cdot |g(t+h) - g(t)| d\mu(t) + \frac{\varepsilon}{2} \leq \\ &\leq M\omega_1(\frac{\pi}{n}, f) + B\omega_1(\frac{\pi}{n}, g) + \frac{\varepsilon}{2} \end{aligned}$$

Но по (1.2) мы знаем, что модуль непрерывности стремится к нулю при  $\delta \rightarrow 0$ . Что и требовалось доказать.  $\square$

**Теорема 2.1.** *Принцип локализации.*

Если  $f \in L_{2\pi}$  и тождественно равна нулю в некотором интервале  $(a, b) \subset [-\pi, \pi]$ , то её тригонометрический ряд Фурье сходится к нулю равномерно на любом отрезке  $[a', b'] \subset (a, b)$ .

*Доказательство.* Так как  $[a', b']$  содержится в  $(a, b)$ , то

$$\exists \eta > 0 \forall x \in [a', b'] \forall t, 0 \leq |t| < \eta : x+t \in (a, b)$$

Построим функцию  $\lambda(t)$ :

$$\lambda(t) = \begin{cases} 0, & t \in (-\eta, \eta) \\ 1, & t \in [-\pi, \pi] \setminus (-\eta, \eta) \end{cases}$$

Кроме того,  $\lambda - 2\pi$ -периодическая.

Тогда, используя лемму о представлении частичной суммы, получим:

$$S_n(f, x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+t) D_n(t) d\mu(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+t) \lambda(t) D_n(t) d\mu(t)$$

Данное соотношение верно, так как когда  $t \notin (-\eta, \eta)$ , то  $\lambda(t) = 1$ , ничего не меняем. Если же  $|t| < \eta$ , то  $x+t \in (a, b)$ , где  $f = 0$ , поэтому получили, что подынтегральные функции совпадают везде на  $[-\pi, \pi]$ .

Продолжим раскрытия данной формулы, используя тригонометрические соотношения для ядра Дирихле:

$$S_n(f, x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+t) \lambda(t) \operatorname{ctg}\left(\frac{t}{2}\right) \sin(nt) d\mu(t) + \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+t) \lambda(t) \cos(nt) d\mu(t)$$

Взяв в качестве  $g$  из предыдущей леммы для первого слагаемого  $\lambda(t) \operatorname{ctg}(\frac{t}{2})$  и  $\lambda(t)$  для второго, то получим требуемое по этой же лемме.  $\square$

### 3 Достаточные условия сходимости ряда Фурье в точке

Одержать сто побед в ста  
битвах — это не вершина  
воинского искусства.  
Повергнуть врага без  
сражения — вот вершина.

---

Лукашов А.Л.

**Теорема 3.1.** *Признак Дини.*

Если  $f \in L_{2\pi}$  и  $\varphi_{x_0} \in L_1(0, \delta)$ ,  $\delta > 0$ , где

$$\varphi_{x_0}(t) := \frac{f(x_0 + t) + f(x_0 - t) - 2S(x_0)}{t}$$

то тригонометрический ряд Фурье функции  $f(x)$  сходится к  $S(x_0)$ .

*Доказательство.* Рассмотрим разность  $S_n(f, x_0) - S(x_0)$ , пользуясь леммой о представлении, можем записать её как

$$S_n(f, x_0) - S(x_0) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi (f(x+u) + f(x-u) - 2S(x_0)) D_n(u) d\mu(u)$$

В данном представлении мы воспользовались сразу несколькими фактами:

- Подынтегральная функция чётная относительно  $u$
- Интеграл по  $[-\pi, \pi]$  от ядра Дирихле равен  $\pi$
- Если заменить в представлении частичной суммы  $t$  на  $-t$ , то ничего не изменится

Продолжим цепочку преобразований, раскрыв  $\sin((n + \frac{1}{2})t) = \sin(nt) \cos(\frac{t}{2}) + \cos(nt) \sin(\frac{t}{2})$  в формуле ядра Дирихле:

$$\begin{aligned} S_n(f, x_0) - S(x_0) = & \frac{1}{\pi} \int_0^\delta \frac{f(x+t) + f(x-t) - 2S(x_0)}{t} \sin(nt) d\mu(t) + \\ & \frac{1}{\pi} \int_0^\pi (f(x+t) + f(x-t) - 2S(x_0)) \frac{\cos(nt)}{2} d\mu(t) + \\ & \frac{1}{\pi} \int_\delta^\pi (f(x+t) + f(x-t) - 2S(x_0)) \frac{\sin(nt) \cos(\frac{t}{2})}{2 \sin(\frac{t}{2})} d\mu(t) + \\ & \frac{1}{\pi} \int_0^\delta (f(x+t) + f(x-t) - 2S(x_0)) \sin(nt) \left( \frac{\cos(\frac{t}{2})}{2 \sin(\frac{t}{2})} - \frac{1}{t} \right) d\mu(t) \end{aligned}$$

По условию,  $\varphi_{x_0}$  суммируемая  $\Rightarrow$  по теореме Римана об осцилляции первое слагаемое стремится к нулю.

$(f(x+t) + f(x-t) - 2S(x_0))$  также суммируемая  $\Rightarrow$  второе слагаемое тоже стремится к нулю.



В третьем слагаемом  $(f(x+t) + f(x-t) - 2S(x_0)) \frac{\cos(\frac{t}{2})}{2\sin(\frac{t}{2})} \in L_1[\delta, \pi]$  и по той же причине стремится к нулю.

Для четвёртого слагаемого рассмотрим разность:

$$\frac{\cos(\frac{t}{2})}{2\sin(\frac{t}{2})} - \frac{1}{t} = \frac{1 - \frac{t^2}{8} + o(t^3)}{2(\frac{t}{2} - \frac{t^3}{48} + o(t^4))} - \frac{1}{t} = \frac{t - \frac{t^3}{8} - t + \frac{t^3}{24} + o(t^4)}{t^2 + o(t^3)} \xrightarrow{t \rightarrow \infty} 0$$

Значит этот множитель имеет устранимый разрыв в нуле, а значит

$$(f(x+t) + f(x-t) - 2S(x_0)) \left( \frac{\cos(\frac{t}{2})}{2\sin(\frac{t}{2})} - \frac{1}{t} \right) \in L_1[0, \delta]$$

и опять работает теорема об осцилляции.  $\square$

**Утверждение 3.1.** Анализ доказательства признака Дини показывает, что необходимым и достаточным условием сходимости тригонометрического ряда Фурье функции  $f \in L_{2\pi}$  к  $S(x_0)$  в точке  $x_0$  является равенство

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_0^\delta \varphi_{x_0}(t) \sin(nt) d\mu(t) = 0$$

**Определение 3.1.** Будем говорить, что функция  $f$  удовлетворяет условию Гёльдера порядка  $\alpha \in (0, 1]$  в точке  $x_0$ , если  $\exists$  конечные односторонние пределы  $f(x_0 \pm 0)$  и константы  $C, \delta > 0$  такие, что

$$\forall t, 0 < t < \delta, |f(x_0 + t) - f(x_0 + 0)| \leq Ct^\alpha, |f(x_0 - t) - f(x_0 - 0)| \leq Ct^\alpha$$

**Определение 3.2.** Обобщённой односторонней производной функции  $f$  в точке  $x_0$  называется

$$f'_+(x_0) = \lim_{t \rightarrow +0} \frac{f(x_0 + t) - f(x_0 + 0)}{t}, \quad f'_-(x_0) = \lim_{t \rightarrow +0} \frac{f(x_0 - t) - f(x_0 - 0)}{-t}$$

**Теорема 3.2.** Признак Липшица.

Если  $f \in L_{2\pi}$  удовлетворяет условию Гёльдера порядка  $\alpha$  в точке  $x_0$ , то тригонометрический ряд Фурье функции  $f(x)$  сходится в точке  $x_0$  к  $\frac{f(x_0-0) + f(x_0+0)}{2}$

*Доказательство.* По условию теоремы

$$S(x_0) = \frac{f(x_0 + 0) + f(x_0 - 0)}{2}$$

Значит функций  $\varphi_{x_0}$  из признака Дини примет вид

$$\varphi_{x_0}(t) = \frac{(f(x_0 + t) - f(x_0 + 0)) + (f(x_0 - t) - f(x_0 - 0))}{t}$$

То, что  $\varphi$  измерима – очевидно. Осталось доказать ограниченность интеграла

$$\left| \int_0^\delta \varphi_{x_0}(t) d\mu(t) \right| \leq \int_0^\delta \frac{|f(x_0 + t) - f(x_0 + 0)|}{t} d\mu(t) + \int_0^\delta \frac{|f(x_0 - t) - f(x_0 - 0)|}{t} d\mu(t) \leq 2C \int_0^\delta t^{\alpha-1} d\mu(t) = 2C \int_0^\delta t^{\alpha-1} dt = 2C \frac{\delta^\alpha}{\alpha}$$

Что и требовалось доказать.  $\square$

## 4 Дифференцирование и интегрирование рядов Фурье. Порядок убывания коэффициентов Фурье.

Непобедимость заключена в  
себе самом, возможность  
победы заключена в  
противнике.

---

Лукашов А.Л.

**Теорема 4.1.** *О почленном дифференцировании рядов Фурье.*

Если  $F$  —  $2\pi$ -периодическая абсолютно непрерывная на периоде функция, то тригонометрический ряд Фурье её производной совпадает с продифференцированным почленно тригонометрическим рядом Фурье  $F$ .

*Доказательство.*  $f(x) := F'(x) \in L_1$ . Значит  $f(x)$  раскладывается в ряд Фурье:

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) d\mu(x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F'(x) \cos(nx) d\mu(x) = \\ &= \frac{1}{\pi} F(x) \cos(nx) \Big|_{-\pi}^{\pi} + \frac{n}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F(x) \sin(nx) d\mu(x) = nB_n \end{aligned}$$

Аналогично докажем, что  $b_n = -nA_n$ , а также заметим, что  $a_0 = 0$ .

Нетрудно заметить, что мы доказали утверждение теоремы.  $\square$

**Следствие.** *Если  $f, \dots, f^{(k-1)}$  —  $2\pi$ -периодические, и  $f^{(k-1)}$  — абсолютно непрерывная на периоде, то коэффициенты ряда Фурье функции  $f(x)$  удовлетворяют:*

$$a_n = o\left(\frac{1}{n^k}\right) \quad b_n = o\left(\frac{1}{n^k}\right); \quad n \rightarrow +\infty$$

*Доказательство.* Пусть  $k = 1$ :  $f$  — абсолютно непрерывная, значит  $a_n(f) = -\frac{b_n(f')}{n}$ ,  $b_n(f) = \frac{a_n(f')}{n}$ . По теореме об осцилляции:  $a_n(f'), b_n(f') = o(1) \Rightarrow a_n(f), b_n(f) = o\left(\frac{1}{n}\right)$ .

Далее применяем по индукции много-много раз. Мы имеем право так делать, потому что если производная абсолютно непрерывная, то она ограничена. А из ограниченной производной следует абсолютная непрерывность самой функции.  $\square$

**Теорема 4.2.** *Оценки коэффициентов Фурье функции ограниченной вариации.*

Если  $f$  — функция ограниченной вариации на периоде  $2\pi$ , то её коэффициенты Фурье удовлетворяют:

$$a_n = O\left(\frac{1}{n}\right) \quad b_n = O\left(\frac{1}{n}\right); \quad n \rightarrow +\infty$$

*Доказательство.* Рассмотрим  $a_n$ :

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx = \frac{-1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left[ f\left(x + \frac{\pi}{n}\right) - f(x) \right] \cos(nx) dx = \dots = \\ &= \frac{-1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left[ f\left(x + \frac{k\pi}{n}\right) - f\left(x + \frac{(k-1)\pi}{n}\right) \right] \cos(nx) dx, \quad \forall k = \overline{1, n} \end{aligned}$$

Сложив все эти  $n$  равенств, получим:

$$|na_n| \leq \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sum_{k=1}^n \left| f\left(x + \frac{k\pi}{n}\right) - f\left(x + \frac{(k-1)\pi}{n}\right) \right| dx \leq V(f)$$

□

**Теорема 4.3.** *Лебега об интегрировании рядов Фурье.*

Если  $f \in L_{2\pi}^1$ ,  $f(x) \sim \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx))$  – её тригонометрический ряд Фурье,  $F(x) = \int_{x_0}^x f(t) d\mu(t)$  – неопределённый интеграл Лебега для  $f$ , то  $F(x) = \frac{a_0}{2}x + C + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-b_n \cos(nx) + a_n \sin(nx)}{n}$ , где ряд равномерно сходится на  $\mathbb{R}$ .

*Доказательство.*  $F(x)$  – абсолютно непрерывная,  $F(\pi) - F(-\pi) = \int_{-\pi}^{\pi} f(t) d\mu(t) = \pi a_0$ .  
 $\Rightarrow F(x) - \frac{a_0}{2}x$  – тоже абсолютно непрерывная на периоде и  $2\pi$ -периодическая.

Значит по (4.1) ряд Фурье  $(F(x) - \frac{a_0}{2}x)'$  получается почленным дифференцированием ряда Фурье для  $F(x) - \frac{a_0}{2}x$ . Но с другой стороны  $(F(x) - \frac{a_0}{2}x)' = f(x) - \frac{a_0}{2}$ .

Равномерная сходимостъ проинтегрированного ряда очевидно следует из признака Жордана. □

## 5 Теорема Жордана.

Когда обороняются, значит,  
 есть в чем-то недостаток;  
 когда нападают, значит, есть  
 все в избытке.

---

Лукашов А.Л.

Возможно тут должна быть какая-то другая теорема Жордана, но пока здесь признак Жордана – на консультации уточню.

**Теорема 5.1.** *Признак Жордана.*

Если  $f \in L_{2\pi}$  и является функцией ограниченной вариации на  $[a, b]$ , то тригонометрический ряд Фурье  $f$  сходится к  $f(x_0)$  в каждой точке  $x_0 \in [a, b]$  непрерывности  $f(x)$  и к  $\frac{f(x_0+0) + f(x_0-0)}{2}$  в каждой точке разрыва  $x_0 \in [a, b]$ .

Если, кроме того,  $f \in C[a, b]$ , то тригонометрический ряд Фурье функции  $f$  сходится к ней равномерно на любом отрезке  $[a', b'] \subset (a, b)$ .

*Доказательство.* Так как  $f$  ограниченной вариации, то она представима в виде  $f = f_1 - f_2$ , где  $f_1, f_2$  – неубывающие. Значит нам достаточно доказать утверждение для неубывающих функций.

По (3.1) нам надо доказать лишь

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_0^{\delta} \varphi_{x_0}(t) \sin(nt) d\mu(t) = 0$$

Будем доказывать

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_0^{\delta} \frac{f(x_0 + t) - f(x_0 + 0)}{t} \sin(nt) d\mu(t) = 0$$

а для  $-t$  аналогично.

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta_1, 0 < \delta_1 < \delta : 0 \leq f(x_0 + \delta_1) - f(x_0 + 0) < \varepsilon$$

Перейдём к интегралу Римана, так как  $f$  монотонная и используем теорему о среднем для него:

$$\exists \delta_2, 0 < \delta_2 < \delta_1 \int_0^{\delta_1} \frac{f(x_0 + t) - f(x_0 + 0)}{t} \sin(nt) dt = (f(x_0 + \delta_1) - f(x_0 + 0)) \int_{\delta_2}^{\delta_1} \frac{\sin(nt)}{t} dt$$

Но мы знаем, что  $\int_0^{+\infty} \frac{\sin(t)}{t} dt$  сходится, поэтому если обозначим за  $G(v) := \int_0^v \frac{\sin t}{t} dt$ , то  $G(v)$  будет ограничена, т.е.  $\exists C : |G(v)| \leq C$ .

Но теперь рассмотрим  $\forall A$ :

$$\left| \int_0^A \frac{\sin(nt)}{t} dt \right| \stackrel{nt=u}{=} \left| \int_0^{nA} \frac{\sin(u)}{u} du \right| \leq C$$

Используя эту оценку получим, что

$$\left| \int_0^{\delta_1} \frac{f(x_0 + t) - f(x_0 + 0)}{t} \sin(nt) dt \right| \leq 2\varepsilon C$$

Таким образом, разбив исходный интеграл от 0 до  $\delta$  на сумму интегралов от 0 до  $\delta_1$  и от  $\delta_1$  до  $\delta$ . Получим первую часть утверждения теоремы.

Перейдём к доказательству равномерной сходимости:

Вспомним, как мы расписывали разность  $S_n(f, x_0) - S(x_0)$  на четыре слагаемых, только теперь мы знаем, что  $S(x_0) = f(x_0)$ . Применим к каждому из трёх последних слагаемых лемму (2.2) и сведём доказательство к тому, чтобы доказать равномерность предела из прошлого пункта доказательства.

Это сделать несложно: заметим, что если  $f$  непрерывна на  $[a', b']$ , то она равномерно непрерывна на нём, а значит мы сможем найти  $\delta_1$  из текущего доказательства независимо от  $x_0$ . Также независимо от  $x_0$  мы ограничиваем интеграл  $\frac{\sin(nx)}{x}$ , поэтому второе утверждение этой теоремы доказано.  $\square$

## 6 Равномерная сходимость сумм Фейера для непрерывной функции

Идти вперед туда, где не  
ждут; атаковать там, где не  
подготовились

---

Лукашов А.Л.

**Теорема 6.1.** *Коровкина.*

Если последовательность линейных положительных операторов  $L_n : C[a, b] \rightarrow C[a, b]$  такова, что  $L_n(e_i) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} e_i$  на  $[a, b]$ ,  $e_i(x) = x^i, i = 0, 1, 2$ , то

$$\forall f \in C[a, b] : L_n(f) \rightrightarrows f$$

на  $[a, b]$ .

*Доказательство.*  $f \in C[a, b] \Rightarrow f$  ограничена:

$$\exists M : -M \leq f(x) \leq M, \forall x \in [a, b]$$

$f \in C[a, b] \Rightarrow f$  равномерно непрерывна на  $[a, b]$ :

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall t, x \in [a, b], |t - x| < \delta : -\varepsilon < f(t) - f(x) < \varepsilon$$

Заметим, что  $f_1(x) \leq f_2(x) \forall x \in [a, b] \Rightarrow L_n(f_1) \leq L_n(f_2) \forall x \in [a, b]$ :

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 \forall t, x \in [a, b] : -\varepsilon - \frac{2M}{\delta^2}\psi(t) < f(t) - f(x) < \varepsilon + \frac{2M}{\delta^2}\psi(t)$$

где  $\psi_x(t) = (t - x)^2$ .

Откуда это следует? Если  $|t - x| < \delta$ , то мы только ослабляем условие равномерной непрерывности, значит неравенство сохраняется. Если же  $|t - x| \geq \delta \Rightarrow \frac{\psi(t)}{\delta^2} = \frac{(t-x)^2}{\delta^2} \geq 1 \Rightarrow$  неравенство сохраняется благодаря ограниченности  $f$ .

Зафиксировав произвольный  $x$ , применяем оператор  $L_n$  относительно переменной  $t$ . Все неравенства сохраняются:

$$-\varepsilon L_n(e_0, x) - \frac{2M}{\delta^2} L_n(\psi_x(t), x) < L_n(f, x) - f(x) L_n(e_0, x) < \varepsilon L_n(e_0, x) + \frac{2M}{\delta^2} L_n(\psi_x(t), x)$$

Заметим, что

$$\begin{aligned} L_n(\psi_x, x) &= L_n((t - x)^2, x) = L_n(t^2 - 2tx + x^2, x) = L_n(e_2, x) - 2x L_n(e_1, x) + x^2 L_n(e_0, x) \Rightarrow \\ e_2(x) - 2xe_1(x) + x^2 e_0(x) &= x^2 - 2x \cdot x + x^2 \cdot 1 = 0 \end{aligned}$$

Значит

$$\exists N_1 \forall n > N_1 \forall x \in [a, b] : |L_n(\psi_x, x)| \leq \frac{\varepsilon \delta^2}{4M}$$

А из того, что  $L_n(e_0) \Rightarrow e_0$ :

$$\exists N_2 \forall n > N_2 \forall x \in [a, b] : |L_n(e_0, x)| < \frac{3}{2}$$

Также не забываем, что:

$$|L_n(f, x) - f(x) L_n(e_0, x)| \leq \varepsilon L_n(e_0, x) + \frac{2M}{\delta^2} L_n(\psi_x, x)$$

Объединяя эти три условия, получим, что

$$\forall n > \max(N_1, N_2) : |L_n(f, x) - f(x) L_n(e_0, x)| \leq 2\varepsilon$$

Снова используем тот факт, что  $L_n(e_0) \Rightarrow e_0$ :

$$\exists N_3 \forall n > N_3 \forall x \in [a, b] : |L_n(e_0, x) - 1| < \frac{\varepsilon}{M}$$

Значит

$$|f(x) L_n(e_0, x) - f(x)| \leq |f(x)| \cdot |L_n(e_0, x) - 1| \leq \varepsilon$$

Объединяя ВСЕ неравенства, получим:

$$\forall n > \max(N_1, N_2, N_3) \forall x \in [a, b] : |L_n(f, x) - f(x)| \leq 3\varepsilon$$

□

**Теорема 6.2.** *Коровкина'*

Если последовательность линейных положительных операторов  $L_n : C_{2\pi} \rightarrow C_{2\pi}$  такова, что  $L_n(e_i) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} e_i$  на  $\mathbb{R}$ ,  $e_0(x) = 1, e_1(x) = \cos(x), e_2(x) = \sin(x)$ , то

$$\forall f \in C_{2\pi} : L_n(f) \Rightarrow f$$

на  $\mathbb{R}$ .

*Доказательство.* Аналогично немодифицированной теореме, только вместо функции  $\psi_x$  введём

$$\begin{aligned} \varphi_x(t) = \sin^2\left(\frac{t-x}{2}\right) &= \frac{1 - \cos(t-x)}{2} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(t) \cos(x) - \frac{1}{2} \sin(t) \sin(x) = \\ &= \frac{1}{2} e_0(t) - \frac{1}{2} \cos(x) e_1(t) - \frac{1}{2} \sin(x) e_2(t) \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} L_n(\varphi_x, x) &= \frac{1}{2} L_n(e_0, x) - \frac{1}{2} \cos(x) L_n(e_1, x) - \frac{1}{2} \sin(x) L_n(e_2, x) \Rightarrow \\ &= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos^2(x) - \frac{1}{2} \sin^2(x) = 0 \end{aligned}$$

□

**Теорема 6.3.** *Фейера.*

Для любой непрерывной  $2\pi$ -периодической функции последовательность средних арифметических частичных сумм её тригонометрического ряда Фурье равномерно на  $\mathbb{R}$  сходится к ней.

*Доказательство.* Распишем среднее арифметическое частичных сумм:

$$\begin{aligned} \sigma_n(f, x) &:= \frac{S_0(f, x) + S_1(f, x) + \dots + S_n(f, x)}{n+1} = \frac{1}{(n+1)\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+t) \sum_{k=0}^n D_k(t) dt = \\ &= \frac{1}{(n+1)\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{f(x+t)}{2 \sin(\frac{t}{2})} \sum_{k=0}^n \sin((k + \frac{1}{2})t) dt = \frac{1}{(n+1)\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{f(x+t)}{2 \sin^2(\frac{t}{2})} \sum_{k=0}^n \sin((k + \frac{1}{2})t) \sin(\frac{t}{2}) dt = \\ &= \frac{1}{(n+1)\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{f(x+t)}{4 \sin^2(\frac{t}{2})} \sum_{k=0}^n (\cos(kt) - \cos((k+1)t)) dt = \frac{1}{(n+1)\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{f(x+t)}{4 \sin^2(\frac{t}{2})} (1 - \cos((n+1)t)) dt = \\ &= \frac{1}{(n+1)2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x+t) \cdot \frac{\sin^2(\frac{(n+1)t}{2})}{\sin^2(\frac{t}{2})} dt \end{aligned}$$

Получается,  $\sigma_n : C_{2\pi} \rightarrow C_{2\pi}$  образует последовательность линейных положительных операторов. Это значит, что нам нужно проверить сходимость лишь на трёх функциях:  $e_0 := 1, e_1 := \sin(x), e_2 := \cos(x)$ .

$$\sigma_n(e_0) = e_0, \forall n \in \mathbb{N} \cup \{0\} \quad \sigma_n(e_1) = e_1 \cdot \frac{n}{n+1}, \sigma_n(e_2) = e_2 \cdot \frac{n}{n+1}, \forall n \in \mathbb{N}$$

Тогда, по теореме Коровкина, получаем, что  $\forall f \in C_{2\pi} : \sigma_n(f) \Rightarrow f$

□

## 7 Теоремы Вейерштрасса о приближении непрерывных функций тригонометрическими и алгебраическими многочленами

Война – это путь обмана,  
постоянной организации  
ложных выпадов,  
распространения  
дезинформации,  
использования уловок и  
хитростей.

---

Лукашов А.Л.

**Теорема 7.1.** *Вейерштрасса о приближении алгебраическими многочленами.*

*Любая непрерывная на отрезке  $[a, b]$  функция  $f(x)$  может быть с любой степенью точности равномерно приближена алгебраическими многочленами, то есть*

$$\forall f \in C[a, b] \forall \varepsilon > 0 \exists P_n \forall x \in [a, b] : |f(x) - P_n(x)| < \varepsilon$$

*Доказательство.* Рассмотрим отрезок  $[0, 1]$ .

Введём многочлены Берштейна:

$$B_n(f, x) := \sum_{k=0}^n f\left(\frac{k}{n}\right) C_n^k x^k (1-x)^{n-k}$$

Мы можем рассматривать их, как операторы  $B_n : C[0, 1] \rightarrow C[0, 1]$ . Очевидно, что они линейные и положительные, поэтому достаточно проверить сходимость трёх функций:  $1, x, x^2$ .

$$B_n(e_0, x) = \sum_{k=0}^n C_n^k x^k (1-x)^{n-k} = (x + (1-x))^n = 1 = e_0(x)$$

Рассмотрим  $g(t) := (tx + (1-x))^n = \sum_{k=0}^n C_n^k t^k x^k (1-x)^{n-k}$ . Тогда

$$g'(t) = nx(tx + (1-x))^{n-1} = \sum_{k=1}^n k C_n^k t^{k-1} x^k (1-x)^{n-k}$$

Используя  $g'(1)$  получим равенство:

$$nx = \sum_{k=0}^n k C_n^k x^k (1-x)^{n-k} \Rightarrow B_n(e_1, x) = \sum_{k=0}^n \frac{k}{n} C_n^k x^k (1-x)^{n-k} = x = e_1(x)$$

Взяв вторую производную от  $g$ , получим:

$$n(n-1)x^2(tx + (1-x))^{n-2} = \sum_{k=2}^n k(k-1) C_n^k t^{k-2} x^k (1-x)^{n-k}$$

Используя  $g''(1)$  получим равенство:

$$n(n-1)x^2 = \sum_{k=0}^n (k^2 - k)C_n^k x^k (1-x)^{n-k} = \sum_{k=0}^n k^2 C_n^k x^k (1-x)^{n-k} - nx \Rightarrow$$

$$B_n(e_2, x) = \sum_{k=0}^n \frac{k^2}{n^2} C_n^k x^k (1-x)^{n-k} = \frac{n-1}{n} x^2 + \frac{x}{n} \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} e_2(x)$$

Получили, что для оператора  $B_n$  справедлива теорема Коровкина и утверждение доказано.

Для завершения доказательства перейдём к произвольному отрезку  $[a, b]$ : для  $f \in C[a, b]$  введём  $F(x) = f(x(b-a) + a) \in C[0, 1]$ . Тогда

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \forall n > N \forall x \in [0, 1] : |B_n(F, x) - F(x)| < \varepsilon$$

Осталось заметить, что если в многочлен Бернштейна подставить какую-то линейную функцию, то получится какой-то многочлен:

$$\Rightarrow |B(F, \frac{t-a}{b-a}) - f(t)| < \varepsilon$$

□

**Следствие.** Из данной теоремы и теоремы Коровкина' следует теорема Вейштрасса о приближении непрерывной  $2\pi$ -периодической функции тригонометрическими многочленами:

$$\forall f \in C_{2\pi} \forall \varepsilon > 0 \exists T_n := \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n \alpha_k \cos(kx) + \beta_k \sin(kx) : |f(x) - T_n(x)| < \varepsilon, \forall x \in \mathbb{R}$$

## 8 Минимальное свойство коэффициентов Фурье по ортогональной системе. Неравенство Бесселя.

Избегание столкновения с  
большими силами  
свидетельствует не о трусости,  
а о мудрости, ибо принесение  
себя в жертву никогда и нигде  
не является преимуществом.

---

Лукашов А.Л.

**Определение 8.1.** Коэффициентами Фурье функции  $f$  в произвольном евклидовом(гильбертовом) пространстве называются скаляры вида

$$f_k = \frac{\langle f, e_k \rangle}{\|e_k\|^2}$$

где  $\{e_k\}$  – ортогональная система ненулевых элементов.



**Теорема 8.1.** *Минимальное свойство сумм Фурье.*

Если  $\{e_k\}$  – ортогональная система ненулевых элементов гильбертова пространства  $E$ , то

$$\forall f \in E \forall c_1, \dots, c_N \in \mathbb{R} : \|f - \sum_{k=1}^N c_k e_k\| \geq \|f - \sum_{k=1}^N f_k e_k\|$$

, где  $\{f_k\}$  – коэффициенты Фурье для  $f$ .

Причём равенство достигается  $\Leftrightarrow \forall k = \overline{1, N} : c_k = f_k$ .

*Доказательство.*

$$\begin{aligned} \|f - \sum_{k=1}^N c_k e_k\|^2 &= \langle f - \sum_{k=1}^N c_k e_k, f - \sum_{k=1}^N c_k e_k \rangle = \langle f, f \rangle - 2 \sum_{k=1}^N c_k \langle f, e_k \rangle + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N c_k c_l \langle e_k, e_l \rangle = \\ &= \langle f, f \rangle - 2 \sum_{k=1}^N f_k c_k \|e_k\|^2 + \sum_{k=1}^N c_k^2 \|e_k\|^2 = \\ &= \|f\|^2 - \sum_{k=1}^N f_k^2 \|e_k\|^2 + \sum_{k=1}^N (f_k^2 - 2f_k c_k + c_k^2) \|e_k\|^2 \geq \|f\|^2 - \sum_{k=1}^N f_k^2 \|e_k\|^2 = \|f - \sum_{k=1}^N f_k e_k\|^2 \end{aligned}$$

□

**Следствие.** *Тождество Бесселя.*

Если  $\{e_k\}_{k=1}^\infty$  – ортогональная система ненулевых элементов гильбертова пространства  $E$ , то  $\forall f \in E$ :

$$\|f - \sum_{k=1}^N f_k e_k\|^2 = \|f\|^2 - \sum_{k=1}^N f_k^2 \|e_k\|^2$$

*Доказательство.* Очевидно следует из цепочки неравенств из доказательства предыдущей теоремы. □

**Следствие.** *Неравенство Бесселя.*

Если  $\{e_k\}_{k=1}^\infty$  – ортогональная система ненулевых элементов гильбертова пространства  $E$ , то  $\forall f \in E$ :

$$\sum_{k=1}^\infty f_k^2 \|e_k\|^2 \leq \|f\|^2$$

*Доказательство.* Из тождества Бесселя следует, что

$$\forall N \in \mathbb{N} : \|f\|^2 - \sum_{k=1}^N f_k^2 \|e_k\|^2 \geq 0$$

Устремляя  $N \rightarrow +\infty$  получим требуемое. □

## 9 Полнота ортогональной системы функций, ортонормированный базис и равенство Парсеваля

**Теорема 9.1.** Если  $\{e_k\}_{k=1}^\infty$  – ортогональная система ненулевых элементов гильбертова пространства  $E$ , то  $\forall f \in E$  следующие утверждения эквивалентны:

1.  $\forall \varepsilon > 0 \exists T = \sum_{k=1}^N c_k e_k : \|f - T\| < \varepsilon$
2.  $f = \sum_{k=1}^{\infty} f_k e_k$
3.  $\|f\|^2 = \sum_{k=1}^{\infty} f_k^2 \|e_k\|^2$  – равенство Парсеваля для  $f$ .

*Доказательство.*  $1 \Leftrightarrow 2$  по предыдущей теме:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N : \|f - \sum_{k=1}^N f_k e_k\| < \varepsilon$$

Тогда используя неравенство Бесселя:

$$\forall n > N : \|f - \sum_{k=1}^n f_k e_k\|^2 = \|f\|^2 - \sum_{k=1}^n f_k^2 \|e_k\|^2 \leq \|f\|^2 - \sum_{k=1}^N f_k^2 \|e_k\|^2 = \|f - \sum_{k=1}^N f_k e_k\|^2$$

Ну а  $3 \Leftrightarrow 1$  так как при равенстве Парсеваля разность  $\|f\|^2 - \sum_{k=1}^N f_k^2 \|e_k\|^2$  будет бесконечно малая, а значит применяя равенство Бесселя получим требуемое.  $\square$

**Следствие.** Если  $\{e_k\}_{k=1}^{\infty}$  – ортогональная система ненулевых элементов гильбертова пространства  $E$ , то следующие утверждения эквивалентны:

1.  $\{e_k\}_{k=1}^{\infty}$  – полная система в  $E$ .
2.  $\forall f \in E : f = \sum_{k=1}^{\infty} f_k e_k$
3.  $\forall f \in E : \|f\|^2 = \sum_{k=1}^{\infty} f_k^2 \|e_k\|^2$

## 10 Полнота тригонометрической системы в пространстве функций суммируемых с квадратом...

**Определение 10.1.**  $f \in L_{2\pi}^2 \Leftrightarrow f$  –  $2\pi$ -периодическая и  $f \in L_2[-\pi, \pi]$ . Это пространство гильбертово.

**Утверждение 10.1.** Мы уже знаем, что ортогональной системой в этом пространстве будет система

$$\{e_k\}_{k=1}^{\infty} = \left\{ \frac{1}{2}, \cos(x), \sin(x), \cos(2x), \sin(2x), \dots \right\}$$

**Утверждение 10.2.** Благодаря теореме Фейера мы можем утверждать, что  $\{e_k\}_{k=1}^{\infty}$  полна в  $C_{2\pi}$ .

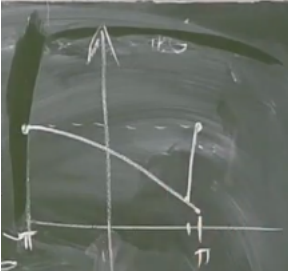
**Утверждение 10.3.** Мы уже знаем, что  $C[-\pi, \pi]$  всюду плотно в  $L_p[-\pi, \pi], p \geq 1$ .

Заметим, что  $C_{2\pi}$  всюду плотно в  $C[-\pi, \pi]$  в смысле нормы  $L_p[-\pi, \pi]$ . Делается это с помощью такого трюка:

Используя транзитивность свойства полноты, получим, что  $\{e_k\}_{k=1}^{\infty}$  – полна в  $L_p[-\pi, \pi]$ , в частности в  $L_{2\pi}^2$ .

**Утверждение 10.4.** Посчитаем коэффициенты Фурье для нашей ортогональной системы в явном виде:

Если  $e_k = \cos(nx)$ , то  $f_k = \frac{\int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) d\mu(x)}{\int_{-\pi}^{\pi} \cos^2(nx) dx} = a_n$ . Если  $e_k = \sin(nx)$ , то  $f_k = b_n$ . Ну и  $e_1 = a_0$ .



**Утверждение 10.5.** Равенство Парсеваля для тригонометрической системы в  $L_{2\pi}^2$  будет иметь вид:

$$\|f\|^2 = a_0^2 \cdot \frac{\pi}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k^2 + b_k^2) \pi$$

**Утверждение 10.6.** Теорема Рисса-Фишера даёт следующее следствие: если  $\frac{a_0^2}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n^2 + b_n^2)$  сходится, то коэффициенты  $a_0, \{a_n, b_n\}_{n=1}^{\infty}$  – коэффициенты тригонометрического ряда Фурье функции из  $L_{2\pi}^2$ .

## 11 Теорема Рисса-Фишера

**Теорема 11.1.** Рисса-Фишера.

Если  $\{e_k\}_{k=1}^{\infty}$  – ортогональная система ненулевых элементов гильбертова пространства  $H$  и  $\{\alpha_k\}_{k=1}^{\infty}$  – последовательность действительных чисел, такая что  $\sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k^2 \|e_k\|^2$  сходится, то ряд  $\sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k e_k$  сходится к некоторому  $f \in H$ .

*Доказательство.*  $\sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k^2 \|e_k\|^2$  сходится  $\stackrel{\text{к. Коши}}{\Rightarrow}$

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N} \forall n > N, \forall p \in \mathbb{N} : \sum_{k=n+1}^{n+p} \alpha_k^2 \|e_k\|^2 < \varepsilon$$

Тогда оценим норму некоего элемента из  $H$ :

$$\left\| \sum_{k=n+1}^{n+p} \alpha_k e_k \right\|^2 = \left\langle \sum_{k=n+1}^{n+p} \alpha_k e_k, \sum_{k=n+1}^{n+p} \alpha_k e_k \right\rangle = \sum_{k=n+1}^{n+p} \alpha_k^2 \|e_k\|^2 < \varepsilon$$

Это означает, что последовательность частичных сумм нашего ряда является фундаментальной, а значит благодаря гильбертовости пространства  $H$  мы можем сказать, что ряд сходится.

Что и требовалось доказать. □

**Следствие.** Если  $\{e_k\}_{k=1}^{\infty}$  – ортогональная система ненулевых элементов гильбертова пространства  $H$ , то  $\forall f \in H$  р. Фурье сходится к  $f_0 \in H : \sum_{k=1}^{\infty} f_k e_k = f_0$ , то

$$\langle f - f_0, e_j \rangle = 0, \forall j \in \mathbb{N}$$

*Доказательство.* Из неравенства Бесселя следует:

$$\sum_{k=1}^{\infty} f_k^2 \|e_k\|^2 < +\infty \stackrel{\text{т. Р.Ф}}{\Rightarrow} \exists f_0 \in H : \sum_{k=1}^{\infty} f_k e_k = f_0 \Rightarrow \langle f - f_0, e_j \rangle = \langle f, e_j \rangle - f_j \|e_j\|^2 = 0$$

□

## 12 Полнота и замкнутость ортогональной системы, их СВЯЗЬ

**Определение 12.1.** Система функций  $\{\varphi_n\}_{n=1}^{\infty}$ , называется полной в  $L_p(E)$ , если

$$\forall \varepsilon > 0 \forall f \in L_p(E) \exists \{c_1, \dots, c_n\} \subset \mathbb{R} : \|f - \sum_{k=1}^n c_k \varphi_k\|_p < \varepsilon$$

**Определение 12.2.** Система  $\{e_k\}_{k=1}^{\infty}$  называется замкнутой в евклидовом пространстве  $E$  (по Банаху, в банаховом пространстве тотальной, в  $C$  и  $L_p$  – полной), если  $\forall k \in \mathbb{N} : \langle f, e_k \rangle = 0 \Rightarrow f = 0$ .

**Теорема 12.1.** О связи.

$\{e_k\}_{k=1}^{\infty}$  – замкнутая система в гильбертовом пространстве  $\Leftrightarrow$  она полная.

*Доказательство.*  $\Rightarrow \{e_k\}_{k=1}^{\infty}$  – замкнутая  $\xRightarrow{\text{сл-е Т.Р-Ф}} \forall f \in H : f = \sum_{k=1}^{\infty} f_k e_k$  Тогда, применяя следствие теоремы (9.1) получим полноты системы.

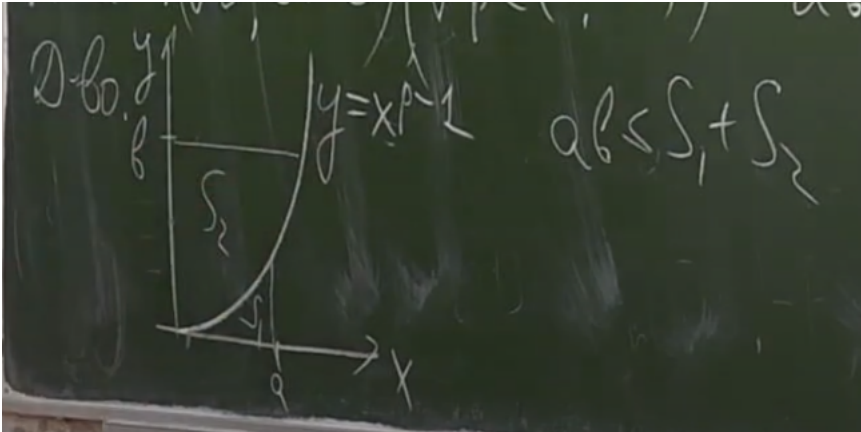
$\Leftarrow \{e_k\}_{k=1}^{\infty}$  – полная система,  $\forall k \in \mathbb{N} \forall f \in H : \langle f, e_k \rangle = 0 \Rightarrow f_k = 0$ . Теперь снова применим следствие теоремы (9.1) и свойства полноты системы, получим, что  $f = \sum 0 e_k = 0$ .  $\square$

## 13 Полнота пространств $C[a, b]$ и $L_p[a, b], p > 1$

**Определение 13.1.** Для  $1 < p < +\infty$  обозначим через  $q$  такое число, что  $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$ .

**Лемма 13.1.**  $\forall a, b > 0 \forall p \in (1, +\infty) : ab \leq \frac{a^p}{p} + \frac{b^q}{q}$

*Доказательство.* Геометрическое:



Причём  $S_1$  и  $S_2$  можно легко посчитать:

$$S_1 = \int_0^a x^{p-1} dx = \frac{a^p}{p} \quad S_2 = \int_0^b y^{q-1} dy = \frac{b^q}{q}$$

$\square$

**Теорема 13.1.** *Неравенство Гёльдера.*

Если  $f \in L_p(X)$ ,  $g \in L_q(X)$ ,  $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$ ,  $1 < p < +\infty$ , то

$$\int_X |f(x)g(x)|d\mu(x) \leq \left( \int_X |f(x)|^p d\mu(x) \right)^{\frac{1}{p}} \left( \int_X |g(x)|^q d\mu(x) \right)^{\frac{1}{q}}$$

*Доказательство.* Если правая часть равна нулю, то всё доказано.

Иначе введём обозначения:

$$A^p := \int_X |f(x)|^p d\mu(x), \quad B^q := \int_X |g(x)|^q d\mu(x)$$

Тогда, используя предыдущую лемму с параметрами:

$$a = \frac{|f(x)|}{A} \quad b = \frac{|g(x)|}{B}$$

Получим, что

$$\frac{|f(x)||g(x)|}{AB} \leq \frac{|f(x)|^p}{pA^p} + \frac{|g(x)|^q}{qB^q}$$

Теперь проинтегрируем обе части по  $x$  и получим требуемое:

$$\frac{\int_X |f(x)||g(x)|d\mu(x)}{AB} \leq \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$$

□

**Теорема 13.2.** *Для  $p \in [1, +\infty)$   $L_p([a, b])$  – банахово пространство.*

*Доказательство.* Пусть  $\{f_n\}_{n=1}^\infty$  – фундаментальная последовательность в  $L_p[a, b]$ :

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N} \forall n, m > N : \|f_n - f_m\|_p < \varepsilon$$

Отсюда получаем, что  $\exists \{n_k\}_{k=1}^\infty \uparrow \forall m \geq n_k : \|f_m - f_{n_k}\|_p < \frac{1}{2^k}$ .

Тогда в силу неравенства Гёльдера:

$$\|f_m - f_{n_k}\|_1 \leq \|f_m - f_{n_k}\|_p \cdot \|1\|_q < \frac{C}{2^k}$$

Рассмотрим ряд

$$\Phi(x) = |f_{n_1}(x)| + \sum_{k=2}^\infty |f_{n_k}(x) - f_{n_{k-1}}(x)|$$

И для него верно равенство (по теореме Леви):

$$\|\Phi\|_1 = \|f_{n_1}\|_1 + \sum_{k=2}^\infty \|f_{n_k} - f_{n_{k-1}}\|_1 < +\infty$$

Значит  $\Phi(x)$  конечная почти всюду  $\Rightarrow$  ряд  $|f_{n_1}(x)| + \sum_{k=2}^\infty |f_{n_k}(x) - f_{n_{k-1}}(x)|$  – сходится почти всюду на  $[a, b]$ .

Тогда ряд  $f_{n_1}(x) + \sum_{k=2}^\infty (f_{n_k}(x) - f_{n_{k-1}}(x))$  сходится абсолютно почти всюду на  $[a, b]$ , но его частичные суммы – это  $f_{n_k} \Rightarrow$  мы получили, что эта последовательность сходится почти всюду к чему-то, что мы обозначим, как  $f(x)$ .

Докажем, что  $f \in L_p[a, b]$ : если есть сходимость почти всюду, то по теореме Фату мы можем оценить:

$$\int_{[a, b]} |f(x)|^p d\mu(x) \leq \lim_{k \rightarrow +\infty} \int_{[a, b]} |f_{n_k}(x)|^p d\mu(x) = \|f_{n_k}\|_p^p < +\infty$$

Снова используем свойство последовательности  $\{n_k\}_{k=1}^\infty$ :

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N \in \mathbb{N} \forall k, l > N : \|f_{n_k} - f_{n_l}\|_p < \varepsilon$$

Но мы можем перейти к пределу  $l \rightarrow +\infty$  благодаря теореме Лебега:  $\|f_{n_k} - f\|_p < \varepsilon$ . Тогда при достаточно больших  $m$ :

$$\|f_m - f\|_p \leq \|f_m - f_{n_k}\|_p + \|f_{n_k} - f\|_p < 2\varepsilon$$

□

## 14 Непрерывность, интегрируемость и дифференцируемость интегралов, зависящих от параметра

**Определение 14.1.** Пусть функция  $f(x, \alpha)$  зависит от  $x, \alpha$ . Тогда мы можем рассматривать функцию  $f_{1, \alpha}(x)$  – изначальная функция, которую мы теперь считаем зависящей только от первого параметра, а второй параметр считаем фиксированным. Аналогично вводится  $f_{2, x}(\alpha)$ .

**Теорема 14.1.** *Непрерывность интеграла, зависящего от параметра*

Пусть  $\forall \alpha \in A \subset \mathbb{R}^n$  функция  $f_{1, \alpha}(x) = f(x, \alpha)$  суммируема на  $E \subset \mathbb{R}^m$ ,  $f_{2, x}(\alpha) = f(x, \alpha)$  при почти всех  $x \in E$  непрерывна в  $\alpha_0 \in E$ , и при почти всех  $x \in E, \forall \alpha \in A : |f(x, \alpha)| \leq \varphi(x)$ , где  $\varphi(x)$  суммируема на  $E$ . Тогда

$$F(\alpha) = \int_E f(x, \alpha) d\mu(x)$$

непрерывна в  $\alpha_0$ .

*Доказательство.* Рассмотрим  $\forall \{\alpha_n\}_{n=1}^\infty \subset A, \lim_{n \rightarrow +\infty} \alpha_n = \alpha_0$ .

Тогда, по условию,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} f(x, \alpha_n) = f(x, \alpha_0)$  при почти всех  $x \in E$ . Кроме того, для почти всех  $x$  из  $E$ , выполняется неравенство  $\forall n \in \mathbb{N} : |f(x, \alpha_n)| \leq \varphi(x)$ . Тогда, используя теорему Лебега, мы сможем перейти к пределу интегралов:

$$F(\alpha_n) = \int_E f_{1, \alpha_n}(x) d\mu(x) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \int_E f(x, \alpha_0) d\mu(x) = F(\alpha_0)$$

□

**Теорема 14.2.** *Дифференцируемость интеграла, зависящего от параметра*

Пусть  $f_{1, \alpha}(x) = f(x, \alpha)$  при всех  $\alpha \in U(\alpha_0) \subset \mathbb{R}$  суммируема на  $E \subset \mathbb{R}^m$  вместе с  $\frac{\partial f(x, \alpha)}{\partial \alpha}$ , и при почти всех  $x \in E, \forall \alpha \in U(\alpha_0) : \left| \frac{\partial f(x, \alpha)}{\partial \alpha} \right| \leq \varphi(x)$ , где  $\varphi(x)$  суммируема на  $E$ . Тогда

$$F'(\alpha_0) = \int_E \frac{\partial f(x, \alpha_0)}{\partial \alpha} d\mu(x)$$

*Доказательство.* Рассмотрим  $\forall \{\alpha_n\}_{n=1}^\infty \subset \dot{U}(\alpha_0)$ ,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} \alpha_n = \alpha_0$ .

Тогда частная производная в точке  $\alpha_0$  – это

$$\left| \frac{f(x, \alpha_n) - F(x, \alpha_0)}{\alpha_n - \alpha_0} \right| = \left| \frac{\partial f(x, \xi_n(x))}{\partial \alpha} \right| \leq \varphi(x)$$

Теперь, используя теорему Лебега, получим равенство пределов интегралов:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_E \frac{f(x, \alpha_n) - f(x, \alpha_0)}{\alpha_n - \alpha_0} d\mu(x) = \int_E \frac{\partial f(x, \alpha_0)}{\partial \alpha} d\mu(x)$$

□

## 15 Равномерная сходимость несобственных интегралов, зависящих от параметра. Критерий Коши, признаки Вейерштрасса и Дирихле

**Определение 15.1.** Пусть  $f(x, y) \in \mathcal{R}[a, \tilde{b}] \forall \tilde{b} < b \forall y \in A \subset \mathbb{R}$ . Тогда несобственным интегралом Римана, зависящим от параметра  $y$  называется

$$\int_a^b f(x, y) dx = \lim_{\tilde{b} \rightarrow b-0} \int_a^{\tilde{b}} f(x, y) dx \quad (1)$$

**Определение 15.2.** Мы говорим, что несобственный интеграл (1) сходится поточечно, если:

$$\forall y \in A \forall \varepsilon > 0 \exists B \in (a, b) \forall B' \in (B, b) : \left| \int_{B'}^b f(x, y) dx \right| < \varepsilon$$

**Определение 15.3.** Несобственный интеграл (1) сходится равномерно на  $A$ , если:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists B \in (a, b) \forall B' \in (B, b) \forall y \in A : \left| \int_{B'}^b f(x, y) dx \right| < \varepsilon$$

**Теорема 15.1.** Критерий Коши равномерной сходимости интегралов, зависящих от параметра

(1) сходится равномерно на  $A \Leftrightarrow$

$$\forall \varepsilon > 0 \exists B \in (a, b) \forall a < B' < B'' < b \forall y \in A : \left| \int_{B'}^{B''} f(x, y) dx \right| < \varepsilon$$

*Доказательство.*  $\Rightarrow$  При всех требуемых кванторах можем сделать оценку:

$$\left| \int_{B'}^{B''} f(x, y) dx \right| = \left| \int_{B'}^b f(x, y) dx - \int_{B'}^b f(x, y) dx \right| < 2\varepsilon$$

$\Leftarrow$  Фиксируем  $\forall y \in A$ , тогда используем критерий Коши сходимости несобственных интегралов (без параметра), то есть

$$\int_a^b f(x, y) dx < +\infty \xrightarrow{B'' \rightarrow b-0} \left| \int_{B'}^{B''} f(x, y) dx \right| \leq \varepsilon$$

□

**Следствие. Признак сравнения.**

Если  $|f(x, y)| < g(x, y)$ ,  $f, g$  удовлетворяют условиям определения несобственных интегралов Римана,  $\int_a^b g(x, y)dx$  равномерно сходится на  $A$ , то  $\int_a^b f(x, y)dx$  равномерно сходится на  $A$ .

**Следствие. Признак Вейерштрасса.**

Если  $|f(x, y)| \leq g(x)$ ,  $f, g$  удовлетворяют условиям определения несобственных интегралов Римана,  $\int_a^b g(x, y)dx$  сходится на  $A$ , то  $\int_a^b f(x, y)dx$  равномерно сходится на  $A$ .

**Теорема 15.2. Признак Дирихле равномерной сходимости НИРЗП.**

1.  $f \in \mathcal{R}[a, \tilde{b}] \forall \tilde{b} \in (a, b) \forall y \in A$  и  $\forall y \in A$ :

$$\left| \int_a^x f(t, y)dt \right| \leq C$$

2.  $g(x, y) \downarrow 0$  при  $x \rightarrow b - 0$  равномерно по  $y \in A$ .

Тогда  $\int_a^b f(x, y)g(x, y)dx$  равномерно сходится на  $A$ .

*Доказательство.*

$$\int_{B'}^{B''} f(x, y)g(x, y)dx = g(B', y) \int_{B'}^{\xi(y)} f(x, y)dx + g(B'', y) \int_{\xi(y)}^{B''} f(x, y)dx$$

$g \Rightarrow 0$ , значит

$$\forall \varepsilon > 0 \exists B \in (a, b) \forall x \in (B, b) \forall y \in A : |g(x, y)| < \frac{\varepsilon}{4C}$$

А все интегралы в полученной формуле можно оценить сверху, как  $2C$ , поэтому получим, что

$$\left| \int_{B'}^{B''} f(x, y)g(x, y)dx \right| \leq \frac{\varepsilon}{4C} \cdot 2C + \frac{\varepsilon}{4C} \cdot 2C = \varepsilon$$

□

## 16 Непрерывность и интегрируемость несобственных интегралов, зависящих от параметра

**Теорема 16.1. Непрерывность НИРЗП**

Если  $f(x, y)$  непрерывна на  $[a, b] \times [c, d]$  ( $b \leq +\infty$ ) и  $\int_a^b f(x, y)dx$  равномерно сходится на  $[c, d]$ , то он является непрерывной функцией на  $[c, d]$ .

*Доказательство.* Рассмотрим произвольную  $\{b_n\}_{n=1}^\infty \subset [a, b]$ ,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} b_n = b$ , а также введём

$$I_n(y) := \int_a^{b_n} f(x, y)dx$$

Равномерная сходимость  $\int_a^b f(x, y)dx$  влечёт равномерную сходимость  $I_n(y)$ . Используя теорему о пределе равномерно сходящейся функциональной последовательности получим, что  $\lim_{n \rightarrow +\infty} I_n(y)$  – непрерывная. □



**Теорема 16.2.** *Собственная интегрируемость НИРЗП.*

Если  $f(x, y)$  непрерывна на  $[a, b) \times [c, d]$  ( $b \leq +\infty$ ) и  $\int_a^b f(x, y)dx$  равномерно сходится на  $[c, d]$ , то

$$\int_a^b \left( \int_c^d f(x, y)dy \right) dx = \int_c^d \left( \int_a^b f(x, y)dx \right) dy$$

*Доказательство.* Рассмотрим произвольную последовательность  $\{b_n\}_{n=1}^\infty \subset [a, b)$ ,  $\lim_{n \rightarrow +\infty} b_n = b$ . Положим

$$I_n(y) := \int_a^{b_n} f(x, y)dx$$

Тогда равномерная сходимость  $\int_a^b f(x, y)dx$  влечёт равномерную сходимость  $I_n(y)$ .

Используя предыдущую теорему и теорему об интегрируемости функциональных последовательностей и тот факт, что  $f(x, y)$  непрерывна на прямоугольнике  $[a, b_n] \times [c, d]$ , поэтому мы можем переставить пределы интегрирования и получим:

$$\int_a^{b_n} \left( \int_c^d f(x, y)dy \right) dx = \int_c^d I_n(y)dy \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \int_c^d \left( \int_a^b f(x, y)dx \right) dy$$

□