

Математический анализ 4 семестр

shared with ♡ by artemZholus

Содержание

1	Критерий Лебега интегрируемости по Риману	2
2	Суммируемые функции	3
2.1	Неотрицательные суммируемые функции	3
2.2	Суммируемые функции произвольного знака	4
3	Предельный переход в классе суммируемых функций	6
3.1	Теорема Лебега о мажорируемой сходимости	6
3.2	Теорема Леви	7
3.3	Теорема Фату	8
4	Пространства L_p	9

1 Критерий Лебега интегрируемости по Риману

Определение (Колебание на отрезке).

$$\omega(f, c, d) = \sup_{[c,d]} f - \inf_{[c,d]} f = (\text{по лемме из 1го семестра}) = \sup_{x', x'' \in [c,d]} |f(x') - f(x'')|$$

Определение (Колебание функции в точке).

$$\omega(f, x) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \omega(f, x + \delta, x - \delta)$$

Очевидно, колебание на отрезке неотрицательно, и, если $0 < \delta_1 < \delta_2$ то $\omega(f, x - \delta_1, x + \delta_1) < \omega(f, x - \delta_2, x + \delta_2)$. Поэтому, вышеприведенный предел существует.

Утверждение 1.1. $\omega(f, x) = 0 \Leftrightarrow f \in C(x)$

Доказательство. 1. \Leftarrow Раз функция непрерывна, значит она достигает на отрезке своего \sup и \inf . Значит, если устремить границы отрезка к одной точке, в пределе получим разность двух одинаковых чисел.

2. \Rightarrow $\omega(f, x) = 0$ означает, что можно подобрать такую δ -окрестность для x , что она будет сколь угодно малой. Берем формулу $\sup_{x', x'' \in [x-\delta, x+\delta]} |f(x') - f(x'')| = 0$ фиксируем $x'' = x$ (от этого \sup разве что уменьшится) и получаем определение непрерывности в x . □

Определение. τ : - разбиение отрезка $[a, b]$, если $\tau = \{x_j\} : a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$

Ведем кусочно-постоянную функцию $g(\tau, x) = \omega(f, x_j, x_{j+1})$, при $x \in [x_j, x_{j+1}]$

Утверждение 1.2. $g(\tau_n, x) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} \omega(f, x)$ почти всюду на отрезке

Доказательство. Очевидно, мы можем подбирать τ_n так, чтобы границы отрезка, содержащего x совпали с границами из определения $\omega(f, x)$. Тогда для неграничных точек получим стремление. Граничных точек на конечном шаге - конечное число, а это значит, что мы не перейдем за границу счетной мощности (danger zone - МАТЛОГИКА), и предел будет почти всюду □

Тогда, по теореме Лебега о предельном переходе под знаком интеграла, получаем:

$$\int_{[a,b]} g(\tau_n, x) dx \rightarrow \int_{[a,b]} \omega(f, x) dx$$

Левая часть, по лемме из первого семестра равна $\int_{[a,b]} g(\tau_n, x) dx = \omega(f, \tau_n)$. Получаем:

$$\lim_{rang \tau_n \rightarrow 0} \omega(f, \tau_n) = \int_{[a,b]} \omega(f, x) dx$$

Это наша рабочая формула.

Теорема 1.3 (Критерий Лебега интегрируемости по Риману).

$$f \in \mathfrak{R}(a, b) \Leftrightarrow \lambda\{a : f \notin C(a)\} = 0$$

Доказательство. 1. \Rightarrow

Пусть $\omega(f, x) = 0$ почти всюду на $[a, b]$. Тогда $\int_{[a,b]} \omega(f, x) dx = 0 \Rightarrow f \in \mathfrak{R}[a, b]$

2. \Leftarrow

Пусть $f \in \mathfrak{R}[a, b]$. Тогда, по определению, $\omega(f, \tau_n) \rightarrow 0$. Тогда $\int_{[a,b]} \omega(f, x) dx = 0$. Но $\omega(f, x) \geq 0$. Значит $\omega(f, x) = 0$ почти всюду на $[a, b]$ (И, по лемме, почти всюду непрерывна). □

2 Суммируемые функции

2.1 Неотрицательные суммируемые функции

Здесь и далее считаем, что мера μ - полная и σ -конечная. Наша задача - распространить интеграл Лебега на более широкую ситуацию. Считаем, что $E \in \mathcal{A}$, $f : E \xrightarrow{\text{измеримо}} \mathbb{R}$, $f(x) \geq 0$ на E .

Определение. $e \subset E$ называется допустимым для f если:

1. $\mu(e) < +\infty$
2. f - ограничена на e

Утверждение 2.1. *Непустые допустимые множества существуют.*

Доказательство. Пусть $E_n = E(n < f(x) \leq n + 1)$. Понятно, что $E = \bigcup_n E_n$. По σ -конечности $X = \bigcup_m X_m$, причем X_m - конечномерны. Тогда $E = \bigcup_{n,m} E_n X_m$ - допустимые множества. Если они все пустые, то E , тоже пусто. Значит среди них хотя бы одно непустое. \square

Определение (Несобственный интеграл Лебега).

$$\int_E f d\mu \stackrel{\text{def}}{=} \sup_{e \text{ - допустимо}} \int_e f d\mu$$

Определение (Неотрицательная суммируемая функция). Неотрицательная функция f называется суммируемой на множестве E , если $\int_E f d\mu < +\infty$

Очевидно, если $\mu E < +\infty$, $f(x) \geq 0$, то $\int_E f d\mu = \sup_{e \subset E} \int_e f d\mu$.

Проверим аддитивность и линейность.

Теорема 2.2 (σ -аддитивность несобственного интеграла Лебега).

Пусть $E = \bigcup_n E_n$ - дизъюнктивны. Тогда $\int_E f = \sum_n \int_{E_n} f$

Докажем в два этапа. сначала конечную аддитивность, потом σ -аддитивность

Доказательство. 1. Пусть $E = E_1 \cup E_2$. Пусть $e_1 \in E_1$, $e_2 \in E_2$ - допустимые. И любое допустимое для E множество $e = e_1 \cup e_2$. Для определенного интеграла мы знаем, что $\int_e f = \int_{e_1} f + \int_{e_2} f \leq \int_{E_1} f + \int_{E_2} f$

Переходя к \sup по e получаем $\int_E f \leq \int_{E_1} f + \int_{E_2} f$

В обратную сторону. Считаем, что f - суммируема (иначе все тривиально). По определению \sup , $\forall \varepsilon > 0 \exists e_j \subset E_j : \int_{e_j} f - \varepsilon < \int_{E_j} f$.

$\int_{E_1} f + \int_{E_2} f - 2\varepsilon < \int_{e_1} f + \int_{e_2} f = \int_e f \leq \int_E f$. Устремив $\varepsilon \rightarrow 0$ получим $\int_{E_1} f + \int_{E_2} f \leq \int_E f$.

Значит $\int_{E_1} f + \int_{E_2} f = \int_E f$

2. Итак, пусть $e = \bigcup_{n=1}^{+\infty} e_n$. Очевидно $\int_{e_n} f \leq \int_{E_n} f$ и $\int_e f = \sum_n \int_{e_n} f$. Значит $\int_e f \leq \sum_n \int_{E_n} f$.

Обратно. $\forall \varepsilon > 0 \exists e_n \subset E_n$:

$\int_{E_n} f - \frac{\varepsilon}{2^n} < \int_{e_n} f$. Сложим первые p неравенств: $\sum_{n=1}^p \int_{E_n} f - \varepsilon \sum_{n=1}^p \frac{1}{2^n} < \sum_{n=1}^p \int_{e_n} f \leq \int_E f$. Устремляя $p \rightarrow +\infty$,

получаем $\sum_{n=1}^{+\infty} \int_{E_n} f - \varepsilon \leq \int_E f$. Теперь устремим $\varepsilon \rightarrow 0$ и получим обратное неравенство.

\square

Теорема 2.3 (Линейность несобственного интеграла Лебега).

$$1. \int_E \alpha f = \alpha \int_E f, \alpha > 0$$

$$2. \int_E (f + g) = \int_E f + \int_E g$$

Доказательство. Первое свойство следует непосредственно из определения. Докажем второе. Итак, пусть $E_n = E(n < f + g \leq n + 1)$. Тогда, очевидно, $E = \bigcup_n E_n$. По σ -конечности можно написать $X = \bigcup_n X_n$. От X_n мы хотим дизъюнктивности, поэтому, если они не таковы, то сделаем следующий трюк:

$X = X_1 \cup (X_2 \setminus X_1) \cup \dots \cup (X_n \setminus \bigcup_1^{n-1} X_j) \cup \dots$. Теперь E можно разбить как $E = \bigcup_{n,m} E_n X_m$ - эти множества дизъюнктивны и допустимы для $f + g$. Далее по σ -аддитивности пишем: $\int_E (f + g) = \sum_n \int_{A_n} (f + g) =$ (по линейности определенного интеграла) $= \sum_n \int_{A_n} f + \sum_n \int_{A_n} g =$ (по σ -аддитивности несобственного) $= \int_E f + \int_E g \quad \square$

Утверждение 2.4. Если $0 \leq f \leq g$, то $\int_E f \leq \int_E g$

Доказательство. $0 \leq g - f$ - по арифметике измеримости, эта функция суммируема. Раз она неотрицательна, интеграл от нее тоже.

$$0 \leq \int_E g - f = \int_E g - \int_E f \Rightarrow \int_E f \leq \int_E g$$

\square

2.2 Суммируемые функции произвольного знака

Определение.

$$f^+(x) = \begin{cases} 0 & , f(x) < 0 \\ f(x) & , f(x) \geq 0 \end{cases}$$

$$f^-(x) = \begin{cases} -f(x) & , f(x) < 0 \\ 0 & , f(x) \geq 0 \end{cases}$$

Заметим, что $f = f^+ - f^-$, $|f| = f^+ + f^-$. f^+ и f^- - неотрицательные суммируемые функции (если f - измерима).

Определение. f называется суммируемой на E , если одновременно f^+ и f^- - суммируемы.

$$\int_E f \stackrel{\text{def}}{=} \int_E f^+ - \int_E f^-$$

Утверждение 2.5. f - суммируема $\Leftrightarrow |f|$ - суммируема.

Доказательство. f - суммируема тогда и только тогда, когда f^+ и f^- - суммируемы. $|f|$ - суммируема тогда и только тогда, когда f^+ и f^- - суммируемы. \square

Аналогом суммируемости функций служит абсолютная сходимость.

Проверим σ -аддитивность и линейность для случая функции произвольного знака:

Теорема 2.6 (Аддитивность в случае произвольного знака). Пусть $E = \bigcup_n E_n$ - дизъюнктивные, тогда

$$\int_E f = \sum_n \int_{E_n} f$$

Доказательство. $\int_E f^+ = \sum_n \int_{E_n} f^+$, то же для f^- . Тогда $\int_E f = \int_E f^+ - \int_E f^- = \sum_n \int_{E_n} f^+ - \sum_n \int_{E_n} f^- = \sum_n (\int_{E_n} f^+ - \int_{E_n} f^-) = \sum_n \int_{E_n} f$ \square

Теорема 2.7 (Линейность в случае произвольного знака).

$$1. \int_E \alpha f = \alpha \int_E f, \alpha \in \mathbb{R}$$

$$2. \int_E (f + g) = \int_E f + \int_E g$$

Доказательство. Пункт 1 очевиден, не будем на нем останавливаться. Докажем пункт 2:

$$\int_E f + \int_E g = \left(\int_E f^+ + \int_E g^+ \right) - \left(\int_E f^- + \int_E g^- \right) = \int_E (f^+ + g^+) - \int_E (f^- + g^-) = (*) = \int_E (f+g)^+ - \int_E (f+g)^- = \int_E (f+g)$$

Проверим переход (*). Для этого нужно, чтобы выполнялось $(f^+ + g^+) = (f + g)^+$ - в общем случае, это неправда. Поэтому нужно рассмотреть много случаев:

1. $f \geq 0, g \geq 0 \Rightarrow$ пусть $E_1 = E(f \geq 0, g \geq 0)$, тогда

- $f^+ = f, g^+ = g, (f + g)^+ = f + g \Rightarrow f^+ + g^+ = f + g = (f + g)^+$
- $f^- = 0, g^- = 0, (f + g)^- = 0 \Rightarrow 0 + 0 = 0$

2. $f \leq 0, g \leq 0 \Rightarrow$ пусть $E_2 = E(f \leq 0, g \leq 0)$, разбираем аналогично пункту (1) - появятся минусы в формулах

В остальных случаях переход (*) не верен, но под-интегральные функции можно перегруппировать по другому, например $\int_E (f^+ - g^-) - \int_E (f^- - g^+) :$

3. $f \geq 0, g \leq 0 \Rightarrow$ тут нужно различить два подслучая:

(a) $f + g \geq 0 \Rightarrow$ пусть $E_3 = E(f \geq 0, g \leq 0, f + g \geq 0)$, тогда

- $f^+ = f, g^- = -g, (f + g)^+ = f + g \Rightarrow f^+ - g^- = f + g = (f + g)^+$
- $f^- = 0, g^+ = 0, (f + g)^- = 0 \Rightarrow 0 - 0 = 0$

(b) $f + g < 0 \Rightarrow$ пусть $E_4 = E(f \geq 0, g \leq 0, f + g < 0)$, тогда

- $f^+ = f, g^- = -g, (f + g)^- = -(f + g) \Rightarrow -f^+ + g^- = -(f + g) = (f + g)^-$
- $f^- = 0, g^+ = 0, (f + g)^+ = 0 \Rightarrow -0 + 0 = 0$

4. $f \leq 0, g \geq 0 \Rightarrow$ аналогично, два подслучая, разбор которых аналогичен пункту (3), если поменять f и g местами :

(a) $f + g \geq 0 \Rightarrow$ пусть $E_5 = E(f \leq 0, g \geq 0, f + g \geq 0)$

(b) $f + g < 0 \Rightarrow$ пусть $E_6 = E(f \leq 0, g \geq 0, f + g < 0)$

Очевидно, эти множества дизъюнктивны (на 0 забудем) и можно написать: $\int_E f = \sum_{j=1}^6 \int_{E_j} f$. \square

3 Пределный переход в классе суммируемых функций

3.1 Теорема Лебега о мажорируемой сходимости

Теорема 3.1 (Теорема Лебега о мажорируемой сходимости). Пусть $f_n \Rightarrow f$ на E , $|f_n| \leq \phi$ на E , ϕ - суммируема.

Тогда:

1. f - суммируема

2. $\int_E f_n \rightarrow \int_E f$

Следует иметь ввиду, что в условии теоремы достаточно требовать выполнения свойств почти всюду.

Теорема 3.2. Пусть f - суммируема на E . Тогда $\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 : \forall E' \subset E \Rightarrow \mu E' < \delta \Rightarrow \left| \int_{E'} f \right| < \varepsilon$

Доказательство. По определению, можно написать $\forall \varepsilon > 0 \exists e : \int_{E \setminus e} |f| < \varepsilon$. Так как e - допустимо, f - ограничена на e и $E = (E \setminus e) \cup e$. Возьмем любое $E' \subset E$, тогда $E' = E'(E \setminus e) \cup E'e$.

$$\left| \int_{E'} f \right| \leq \left| \int_{E'(E \setminus e)} f \right| + \left| \int_{E'e} f \right| \leq \varepsilon + \left| \int_{E'e} f \right|$$

Мы считаем, что $|f(x)| \leq M$. Заметим, что выбор E' не накладывал никаких ограничений на M . Тогда:

$$\int_{E'e} |f| \leq M \mu E'e \leq M \mu E'$$

Поэтому δ мы можем выбрать как $\delta = \frac{\varepsilon}{M}$. И получится, что $\mu E' \leq \delta \Rightarrow \left| \int_{E'} f \right| \leq 2\varepsilon$ □

Доказательство теоремы Лебега. По теореме Рисса $f_{n_k} \rightarrow f$ почти всюду, причем $|f_{n_k}(x)| \leq \phi(x)$, значит $|f(x)| \leq \phi(x) \Rightarrow f$ - суммируема. Рассмотрим $\left| \int_E f_n - \int_E f \right| \leq \int_E |f_n - f|$. Так как ϕ - суммируема,

$\forall \varepsilon > 0 \exists e(\text{допустимое для } \phi) : \int_{E \setminus e} \phi \leq \varepsilon$

$$\int_E |f_n - f| = \int_{E \setminus e} |f_n - f| + \int_e |f_n - f| \leq 2\varepsilon + \int_e |f_n - f|$$

Пусть $|\phi| \leq M \Rightarrow |f_n - f| \leq 2M$. Так же мы знаем, что $\int_e |f_n - f| \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$. Значит, начиная с некоторого N_0 , $\int_e |f_n - f| < \varepsilon$. Следовательно, начиная с N_0 , $\int_E |f_n - f| \leq 3\varepsilon$ □

3.2 Теорема Леви

Теорема 3.3 (Теорема Леви). Пусть $f_n(x) \leq 0$, $f_n(x) \leq f_{n+1}(x)$, $f(x) = \lim_{n \rightarrow +\infty} f_n(x)$ на E . Тогда $\int_E f_n \rightarrow \int_E f$

Доказательство. Два случая:

1. f - почти всюду конечна на E . Два подслучая:

(а) $\int_E f < +\infty$. Так как $|f_n(x)| \leq f(x) \Rightarrow f$ - суммируемая мажоранта для f_n , и теорема верна по теореме Лебега о мажорируемой сходимости.

(б) $\int_E f = +\infty$. (f все еще мажоранта для f_n , но уже не суммируемая) Мы поступим так. Раз $\sup_{e-\text{допустимо}} \int_e f = +\infty$, значит $\forall c > 0 \exists e - \text{допустимо}$ для $f : c < \int_e f$. В силу $f_n \leq f$ по теореме Лебега о мажорируемой сходимости $\int_e f_n \rightarrow \int_e f$. Это значит, начиная с некоторого N_0 , $c < \int_e f_n \leq \int_E f_n \Rightarrow \int_E f_n \rightarrow +\infty = \int_E f$

2. $\mu E(f = +\infty) > 0$ (Расслабьтесь, и будет не больно)

Очевидно, в этой ситуации может быть только $\int_E f = +\infty$. Из $f_n(x) \leq f_{n+1}(x) \Rightarrow \int_E f_n(x) \leq \int_E f_{n+1}(x)$.

По теореме Вейерштрасса, у последовательности $\left\{ \int_E f_n \right\}$ будет существовать предел. Причем он будет конечным тогда и только тогда, когда эта последовательность ограничена. Так что нам нужно вывести противоречие из того факта, что эта последовательность ограничена. Предположим, что это так: пусть $\int_E f_n \leq M$. Итак, зафиксируем $\forall c > 0$. Рассмотрим $E(f_n \geq c) \subset E$.

$$\int_{E(f_n \geq c)} f_n \leq M$$

$$c \mu E(f_n \geq c) \leq \int_{E(f_n \geq c)} f_n \Rightarrow \mu E(f_n \geq c) \leq \frac{M}{c}$$

Можно проверить, что:

$$E(f = +\infty) \subset \bigcup_{m=1}^{\infty} \bigcap_{n=m}^{\infty} E(f_n \geq c)$$

Доказательство. Пусть $x \in E(f = +\infty)$. Значит $f_n(x) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty$. Следовательно $\forall c > 0 \exists N_x : \forall n > N_x$

$$N_x \Rightarrow f_n(x) \geq c \xrightarrow[\text{def}]{\text{by}} x \in \bigcap_{n=N_x}^{\infty} E(f_n \geq c) \quad \square$$

Заметим одну интересную штуку.

$$\forall c > 0 f_n(x) \geq c \Rightarrow f_{n+1}(x) \geq c \Rightarrow E(f_n \geq c) \subset E(f_{n+1} \geq c) \Rightarrow \bigcap_{n=m}^{\infty} E(f_n \geq c) = E(f_m \geq c) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \bigcup_{m=1}^{\infty} \bigcap_{n=m}^{\infty} E(f_n \geq c) = \lim_{m \rightarrow +\infty} E(f_m \geq c)$$

Отсюда делаем вывод, что:

$$\mu \bigcap_{n=m}^{\infty} E(f_n \geq c) \xrightarrow{m \rightarrow +\infty} \mu \bigcup_{m=1}^{\infty} \bigcap_{n=m}^{\infty} E(f_n \geq c) \geq \mu E(f = +\infty)$$

$$\begin{aligned}
\mu \bigcap_{n=m}^{\infty} E(f_n \geq c) &= \mu E(f_m \geq c) \leq \frac{M}{c} \Rightarrow \\
\Rightarrow \mu \bigcup_{m=1}^{\infty} \bigcap_{n=m}^{\infty} E(f_n \geq c) &\leq \frac{M}{c} \Rightarrow \\
\Rightarrow \mu E(f = +\infty) &\leq \frac{M}{c}
\end{aligned}$$

c - любое, поэтому можно устремить $c \rightarrow +\infty$. Значит $\mu E(f = +\infty) = 0$. Противоречие получено. □

Следствие 3.4. Пусть $u_n(x) \geq 0$ и $\sum_n \int_E u_n$ - сходится. Тогда $\sum_n u_n(x)$ - сходится почти всюду на E .

Доказательство. $S_n = u_1 + u_2 + \dots + u_n$. Так как интеграл сходится, его частичная сумма ограничена. $M \geq \sum_{n=1}^m \int_E u_n = \int_E S_m$. Обозначим $S(x) = \sum_n u_n(x)$. В силу неотрицательности $u_n(x)$, $S_n(x)$ - возрастает ($S_n \leq S_{n+1}$), и $S(x) = \lim_{n \rightarrow +\infty} S_n(x)$. Следовательно, по теореме Леви $\int_E S_n \rightarrow \int_E S$. Следовательно, S - суммируемая функция, это значит, что она почти всюду конечна. □

Следствие 3.5. Пусть $f \geq 0$, $f_n(x) = \min\{f(x), n\}$ - срезка функции f . Тогда $\int_E f_n \rightarrow \int_E f$.

Доказательство. f_n удовлетворяют условиям теоремы Леви. □

3.3 Теорема Фату

Теорема 3.6 (Теорема Фату). Пусть $f_n \geq 0$, $f_n \Rightarrow f$ на E . Тогда

$$\int_E f \leq \sup_{n \in \mathbb{N}} \int_E f_n$$

Доказательство. Применим теорему Рисса, получив, что $f_{n_k} \rightarrow f$ почти всюду. Без ограничения общности можем считать, что $f_n \rightarrow f$ почти всюду (потому что если доказать для \sup по подпоследовательности, неравенство будет верно и для последовательности). Пусть $g_n = \min\{f_n, f\}$. Тогда $g_n \leq f$. Рассмотрим два случая:

1. f - суммируема. Тогда, по теореме Лебега, $\int_E g_n \rightarrow \int_E f$. Предел последовательности $\int_E g_n$ не превзойдет своего верхнего предела, поэтому $\int_E f \leq \sup_n \int_E g_n \leq \sup_n \int_E f_n$
2. $\int_E f = +\infty$. ???

□

4 Пространства L_p