

MA E_χ 02

isagila

Собрано 12.06.2023 в 22:19



Содержание

1. Интегрирование функции одной переменной	3
1.1. Определение и свойства неопределенного интеграла.	3
1.2. Замена переменной в неопределенном интеграле. Интегрирование по частям.	3
1.3. Интегрирование рациональных функций (общая схема). Разложение дроби на простейшие.	4
1.4. Интегрирование рациональных функций. Интегрирование простейших дробей 1,2,3.	5
1.5. Интегрирование тригонометрических функций. Универсальная тригонометрическая подстановка.	6
1.6. Интегрирование тригонометрических функций вида $R(\sin^m x, \cos^n x)$, $R(\sin mx, \cos nx)$	6
1.7. Интегрирование некоторых иррациональных функций, метод тригонометрической подстановки.	7
1.8. Определенный интеграл. Определение, свойства линейности и аддитивности.	7
1.9. Геометрический смысл определенного интеграла. Оценка определенного интеграла. Теорема о среднем.	8
1.10. Интеграл с переменным верхним пределом. Теорема Барроу.	9
1.11. Вычисление определенного интеграла. Формула Ньютона-Лейбница.	10
1.12. Замена переменной в определенном интеграле. Интегрирование по частям.	10
1.13. Приложения определенного интеграла: вычисление площадей в декартовых координатах.	11
1.14. Приложения определенного интеграла: вычисление площади криволинейного сектора в полярных координатах.	11
1.15. Приложения определенного интеграла: вычисление длины дуги кривой (вывод формулы).	12
1.16. Приложения определенного интеграла: вычисление длины дуги кривой, заданной параметрически.	12
1.17. Приложения определенного интеграла: вычисление объемов тел с известными площадями сечений и тел вращения.	13
1.18. Несобственные интегралы 1-го рода (на неограниченном промежутке). Определение и свойства.	13
1.19. Вычисление несобственного интеграла 1-го рода: формула Ньютона-Лейбница, интегрирование по частям, замена переменной.	13
1.20. Несобственные интегралы 2-го рода (от неограниченной функции). Определение, вычисление и свойства.	13
1.21. Признаки сходимости несобственных интегралов: первый признак сравнения (в неравенствах).	13
1.22. Признаки сходимости несобственных интегралов: второй признак сравнения (предельный).	13
1.23. Признаки сходимости несобственных интегралов: теорема об абсолютной сходимости. Понятие условной сходимости.	13
1.24. Сходимость интегралов 1-го и 2-го рода от степенных функций.	13
2. Интегрирование функции нескольких переменных	14
2.1. Двойной интеграл. Определение и свойства.	14
2.2. Вычисление двойного интеграла. Кратный интеграл.	14
2.3. Определение и вычисление тройного интеграла.	14
2.4. Криволинейные координаты.	14
2.5. Замена переменных в двойном и тройном интегралах. Якобиан.	14
2.6. Криволинейный интеграл 1-го рода: определение, свойства, вычисление, геометрический и физический смысл.	14
2.7. Криволинейный интеграл 2-го рода как работа силы вдоль пути. Определение, вычисление и свойства.	14
2.8. Криволинейные интегралы 1-го и 2-го рода: формула связи.	14
2.9. Теорема (формула) Грина.	14
2.10. Интегралы, не зависящие от пути интегрирования. Теорема о независимости интеграла от пути, равносильность I, II, III утверждений.	14
2.11. Интегралы, не зависящие от пути интегрирования. Теорема о независимости интеграла от пути, равносильность III, IV утверждений.	14
2.12. Следствие теоремы о независимости от пути (формула Ньютона-Лейбница).	14
2.13. Поверхностный интеграл 1-го рода: определение, свойства, вычисление, геометрический и физический смысл.	14
2.14. Поверхностный интеграл 2-го рода как поток жидкости через поверхность.	14
2.15. Связь между поверхностными интегралами 1-го и 2-го рода.	14
2.16. Поверхностный интеграл 2-го рода: математическое определение, вычисление, свойства.	14
2.17. Теорема Гаусса-Остроградского.	14
2.18. Теорема Стокса.	14
2.19. Скалярное и векторное поля: определения, геометрические характеристики. Дифференциальные и интегральные характеристики полей (определения).	14
2.20. Виды векторных полей и их свойства (теоремы о поле градиента и поле вихря).	14
2.21. Механический смысл потока и дивергенции.	14
2.22. Механический смысл вихря и циркуляции.	14
2.23. Векторная запись теорем теории поля и их механический смысл.	14

1. Интегрирование функции одной переменной

1.1. Определение и свойства неопределенного интеграла.

Def 1.1.1. Кусочная дифференцируемая функция $F(x)$ называется первообразной для функции $f(x)$, если $F'(x) = f(x)$.

Теорема 1.1.2. Разность двух первообразных для одной и той же функции — константа.

Доказательство. Пусть дана функция $f(x)$ и две её первообразные $F_1(x), F_2(x)$. Обозначим разность как $\varphi(x) = F_1(x) - F_2(x)$. Производная этой функции будет равна $\varphi'(x) = (F_1(x) - F_2(x))' = F_1'(x) - F_2'(x) = f(x) - f(x) = 0$.

Из множества дифференцируемости $F_1(x)$ и $F_2(x)$ выберем наименьшее и выделим в нем отрезок $[a; x]$. По т. Лагранжа:

$$\exists \xi \in (a; x): \varphi'(\xi) = \frac{\varphi(x) - \varphi(a)}{x - a}$$

Т.к. $\forall \xi: \varphi'(\xi) = 0$, то $\varphi(x) - \varphi(a) = 0$, т.е. $\varphi(x) = \varphi(a)$. Т.к. отрезок произвольный, то это значения функции $\varphi(x)$ равны во всех точках, т.е. она константа. ■

Следствие 1.1.3. Первообразные для $f(x)$ составляют множество функций вида $\{F(x) + C \mid C \in \mathbb{R}\}$, где $F(x)$ это какая-либо первообразная.

Def 1.1.4. Семейство первообразных функции $f(x)$ называется неопределенным интегралом функции $f(x)$ по аргументу x .

Замечание 1.1.5. О существовании первообразной

Не для каждой функции существует первообразная, но для каждой непрерывной на отрезке. Даже если первообразная существует, то она не всегда выражается в элементарных функциях, например, $\int e^{-x^2} dx$.

Далее рассмотрим некоторые свойства неопределенного интеграла.

Lm 1.1.6.

$$\int dF(x) = F(x) + C$$

Доказательство.

$$dF(x) = F'(x)dx = f(x)dx \implies \int dF(x) = \int f(x)dx = F(x) + C$$

Lm 1.1.7.

$$\left(\int f(x)dx \right)' = f(x)$$

Доказательство.

$$\left(\int f(x)dx \right)' = (F(x) + C)' = F'(x) = f(x)$$

Lm 1.1.8. Линейность

$$\begin{aligned} \int \alpha f(x)dx &= \alpha \int f(x)dx \\ \int (f(x) + g(x))dx &= \int f(x)dx + \int g(x)dx \end{aligned}$$

Доказательство.

$$\int \alpha f(x)dx = \int d(\alpha F(x)) = \alpha F(x) + C$$

При первом переходе используется свойство линейности дифференциала, а при втором — 1.1.6. Доказательство для суммы функций аналогично. ■

1.2. Замена переменной в неопределенном интеграле. Интегрирование по частям.

Замечание 1.2.1. Интеграл сохраняет инвариантность своей формы, т.е.

$$\int f(\clubsuit)d\clubsuit = F(\clubsuit) + C$$

Теорема 1.2.2. О замене производной в неопределенном интеграле

Если $x = \varphi(t)$, где $\varphi(t)$ обратимая и дифференцируемая функция, то

$$\int f(x)dx = \int f(\varphi(t))\varphi'(t)dt$$

Доказательство. Возьмем производные от обеих частей:

$$\left(\int f(x)dx\right)'_x = f(x)$$

$$\left(\int f(\varphi(t))\varphi'(t)dt\right)'_x = \left(\int f(\varphi(t))\varphi'(t)dt\right)'_t \frac{dt}{dx} \stackrel{1.1.7}{=} f(\varphi(t))\varphi'(t) \frac{dt}{dx} = f(\varphi(t))\varphi'(t) \frac{1}{\varphi'(t)} = f(\varphi(t)) = f(x)$$

Замечание 1.2.3. Формула работает в обе стороны:

$$\int \frac{e^{\sqrt{x}}}{\sqrt{x}} dx \stackrel{\sqrt{x}=t}{=} \int \frac{e^t}{t} 2t dt = 2e^t + C = 2e^{\sqrt{x}} + C$$

$$\int e^{x^2} \underbrace{2x dx}_{dx^2} \stackrel{x^2=t}{=} \int e^t dt = e^t + C = e^{x^2} + C$$

Теорема 1.2.4. Интегрирование по частям

$$\int u dv = uv - \int v du$$

Доказательство. Рассмотрим равенство $(uv)' = u'v + uv'$ и проинтегрируем обе его части:

$$(uv)' = u'v + uv'$$

$$\int (uv)' dx = \int u'v + uv' dx$$

$$uv = \int u'v dx + \int uv' dx \quad \text{Линейность интеграла (1.1.8)}$$

$$uv = \int v du + \int u dv \quad \text{Внесение под дифференциал (1.2.2)}$$

$$\int u dv = uv - \int v du$$

Замечание 1.2.5. Интегрирование по частям используется если $\int v du$ вычисляется проще, чем интеграл $\int u dv$. В качестве функции u выбирают ту, которая упрощается при дифференцировании.

1.3. Интегрирование рациональных функций (общая схема). Разложение дроби на простейшие.

Выделим 4 типа простейших дробей:

$$(I): \frac{A}{x-a} \quad (II): \frac{A}{(x-a)^2} \quad (III): \frac{Mx+N}{x^2+px+q} \quad (IV): \frac{Mx+N}{(x^2+px+q)^k}$$

где $(x^2 + px + q)$ неразложимый на множители многочлен, а A, M, N — неопределенные коэффициенты.

Метод неопределенных коэффициентов:

Пусть дана дробь $\frac{Q_m(x)}{P_n(x)}$, в которой $Q_m(x)$ и $P_n(x)$ это многочлены с вещественными коэффициентами. Требуется разложить её на простейшие.

1. Если $m \geq n$, то необходимо выделить целую часть. Далее будем считать, что $m < n$.
2. Раскладываем знаменатель на множители, т.е. приводим его к виду

$$P_n = a_0(x - x_1)^{b_1} \dots (x - x_t)^{b_t} (x^2 + p_1x + q_1)^{c_1} \dots (x^2 + p_rx + q_r)^{c_r}$$

3. Для каждой скобки в знаменателе записываем некоторую дробь по следующему правилу:

$$\begin{aligned}
(x - x_i) &\rightarrow \frac{A}{x - x_i} \\
(x - x_i)^k &\rightarrow \frac{A}{x - x_i} + \dots + \frac{A}{(x - x_i)^k} \\
(x^2 + p_i x + q_i) &\rightarrow \frac{Ax + B}{x^2 + p_i x + q_i} \\
(x^2 + p_i x + q_i)^k &\rightarrow \frac{Ax + B}{x^2 + p_i x + q_i} + \dots + \frac{Ax + B}{(x^2 + p_i x + q_i)^k}
\end{aligned}$$

У каждой скобки будет свой набор констант.

4. Получаем уравнение относительно коэффициентов A, B, \dots , которые находятся в числителе полученных дробей.
5. Приводит полученную дробь к общему знаменателю и приравниваем её к исходной дроби.
6. Т.к. знаменатели полученных дробей равны, то должны быть равны и числители. Пользуемся тем, что два полинома равны когда равны все коэффициенты перед одинаковыми степенями. Получаем систему уравнений (по количеству коэффициентов).
7. Решаем систему, находим коэффициенты. Подставляем их в разложение исходной дроби на сумму простейших дробей.

Теперь интегрирование рациональных дробей свелось к тому, чтобы разложить их на простейшие, а потом, пользуясь линейностью интеграла (1.1.8), проинтегрировать каждую из дробей по-отдельности. Подробнее об интегрировании простейших дробей написано в вопросе 1.4.

1.4. Интегрирование рациональных функций. Интегрирование простейших дробей 1,2,3.

- Интегрирование простейших дробей I-ого типа

$$\int \frac{A}{x - a} dx = A \int \frac{d(x - a)}{x - a} = \ln |x - a| + C$$

- Интегрирование простейших дробей II-ого типа

$$\int \frac{A}{(x - a)^k} dx = A \int (x - a)^{-k} d(x - a) = \frac{A}{1 - k} \cdot (x - a)^{1 - k} = \frac{A}{1 - k} \cdot \frac{1}{(x - a)^{k - 1}}$$

- Интегрирование простейших дробей III-его типа

$$\int \frac{Mx + N}{x^2 + px + q} dx \quad (1)$$

Попытаемся внести числитель под дифференциал:

$$\begin{aligned}
d(x^2 + px + q) &= (2x + p)dx \\
(Mx + N) &= \frac{M}{2} \left(2x + \frac{2N}{M} \right) = \frac{M}{2} \left(2x + p + \frac{2N}{M} - p \right) = \frac{M}{2} (2x + p) + \underbrace{\left(N - \frac{Mp}{2} \right)}_h
\end{aligned}$$

Подставим это в (1):

$$\int \frac{(2x + p) + h}{x^2 + px + q} dx = \int \frac{2x + p}{x^2 + px + q} dx + \int \frac{h}{x^2 + px + q} dx$$

Далее вычислим каждый из интегралов по-отдельности:

$$\begin{aligned}
\int \frac{2x + p}{x^2 + px + q} dx &= \int \frac{d(x^2 + px + q)}{x^2 + px + q} = \ln |x^2 + px + q| + C \\
\int \frac{h}{x^2 + px + q} dx &= h \cdot \int \frac{1}{(x + p/2)^2 + \underbrace{q - (p/2)^2}_g} dx = \frac{h}{g} \cdot \arctg \left(\frac{x + p/2}{g} \right) + C
\end{aligned}$$

Подставим полученные выражения в исходный интеграл (1):

$$\begin{aligned}
\int \frac{Mx + N}{x^2 + px + q} dx &= \ln |x^2 + px + q| + \frac{h}{g} \cdot \arctg \left(\frac{x + p/2}{g} \right) + C \\
h &= \left(N - \frac{Mp}{2} \right), g = q - \left(\frac{p}{2} \right)^2
\end{aligned}$$

- Интегрирование простейших дробей IV-его типа

Рассмотрим на примере:

$$\int \frac{dx}{(x^2+1)^2} = \int \frac{x^2+1-x^2}{(x^2+1)^2} dx = \int \frac{dx}{x^2+1} - \int \frac{x^2}{(x^2+1)^2} dx \quad (1)$$

Первый из полученных интегралов мы уже вычислить, это простейшая дробь III-ого типа. Таким образом этот интеграл будет равен $\arctg x + C$. Далее работаем со вторым интегралом:

$$\int \frac{x^2}{(x^2+1)^2} dx = \frac{1}{2} \cdot \int \frac{x d(x^2+1)}{(x^2+1)^2} = \left[\frac{dt}{t^2} = -d\left(\frac{1}{t}\right) \right] = -\frac{1}{2} \cdot \int x \cdot d\left(\frac{1}{x^2+1}\right) \quad (2)$$

Полученный интеграл возьмем по частям:

$$\int \underbrace{x}_u d \underbrace{\left(\frac{1}{x^2+1}\right)}_v = \frac{x}{x^2+1} - \int \frac{dx}{x^2+1} = \frac{x}{x^2+1} - \arctg x + C \quad (3)$$

Подставим (3) в (2), а полученное выражение в исходный интеграл (1):

$$\begin{aligned} \int \frac{dx}{(x^2+1)^2} &= \int \frac{dx}{x^2+1} - \int \frac{x^2}{(x^2+1)^2} dx = \\ &= \arctg x + \frac{1}{2} \left(\frac{x}{x^2+1} - \arctg x \right) + C = \\ &= \frac{1}{2} \arctg x + \frac{x}{2(x^2+1)} + C \end{aligned}$$

Замечание 1.4.1. В случаях с более высокой степенью каждая подобная итерация будет приводить к уменьшению степени знаменателя на единицу.

TODO: И вообще это рекуррентные интегралы, которые считаются последовательно от 1-ой степени до данной.

1.5. Интегрирование тригонометрических функций. Универсальная тригонометрическая подстановка.

Замечание 1.5.1. Всякая рациональная дробь интегрируемая, поэтому можно попытаться с помощью замены свести функции другого вида к рациональным дробям.

Если требуется вычислить интеграл вида $\int R(\sin x, \cos x) dx$, где R это некоторая *рациональная* функция, то можно применить универсальную тригонометрическую подстановку:

$$x = 2 \arctg t \iff t = \tg \frac{x}{2}$$

Тогда составляющие интеграла преобразуется следующим образом:

$$\begin{aligned} \sin x &= 2 \sin \frac{x}{2} \cos \frac{x}{2} = \frac{2 \sin x/2 \cos x/2}{\sin^2 x/2 + \cos^2 x/2} = \frac{2 \tg x/2}{\tg^2 x/2 + 1} = \frac{2t}{1+t^2} \\ \cos x &= \cos^2 \frac{x}{2} - \sin^2 \frac{x}{2} = \frac{\cos^2 x/2 - \sin^2 x/2}{\sin^2 x/2 + \cos^2 x/2} = \frac{1 - \tg^2 x/2}{\tg^2 x/2 + 1} = \frac{1-t^2}{1+t^2} \\ dx &= d(2 \arctg t) = \frac{2}{1+t^2} dt \end{aligned}$$

Подставляя полученные выражения в исходный интеграл, получаем:

$$\int R(\sin x, \cos x) dx \xrightarrow{\text{УТП}} \int R\left(\frac{2t}{1+t^2}, \frac{1-t^2}{1+t^2}\right) \cdot \frac{2}{1+t^2} dt$$

1.6. Интегрирование тригонометрических функций вида $R(\sin^m x, \cos^n x)$, $R(\sin mx, \cos nx)$.

Рассмотрим интегралы вида $\int \sin^m x \cos^m x dx$

1. n или m нечетное

Пусть m нечетное, тогда $m = 2k + 1$. Подставим это в исходный интеграл:

$$\int \sin^m x \cos^m x dx = \int \sin^m x \cos^{2k} x \cos x dx = \int \sin^m x (1 - \sin^2 x)^k d(\sin x) \xrightarrow{t=\sin x} \int t^m x (1-t^2)^k dt$$

Получили интеграл от полинома \implies умеем его решать.

2. n и m четные

Обозначим $n = 2p$, $m = 2q$, тогда:

$$\int \sin^m x \cos^m x dx = \int (\sin^2 x)^p (\cos^2 x)^q dx = \int \left(\frac{1 - \cos 2x}{2}\right)^p \left(\frac{1 + \cos 2x}{2}\right)^q dx$$

Далее раскрываем скобки и упрощаем. Получится либо первый случай (с нечетной степенью), либо второй, но с меньшей степенью.

Интегралы видов

- $\int \sin mx \sin nx dx$
- $\int \sin mx \cos nx dx$
- $\int \cos mx \cos nx dx$

решаются при помощи использования тригонометрических формул, которые сводят произведение к сумме/разности:

$$\begin{aligned}\sin mx \sin nx &= \frac{1}{2} \left(\cos((m-n)x) - \cos((m+n)x) \right) \\ \sin mx \cos nx &= \frac{1}{2} \left(\sin((m-n)x) + \sin((m+n)x) \right) \\ \cos mx \cos nx &= \frac{1}{2} \left(\cos((m-n)x) + \cos((m+n)x) \right)\end{aligned}$$

TODO: На лекции были интегралы вида $\int \sin^m x \cos^n x dx$, а не $R(\sin^m x, \cos^n x)$.

1.7. Интегрирование некоторых иррациональных функций, метод тригонометрической подстановки.

- Интегралы вида $\int R(\sqrt{x^2 \pm 1}, x) dx$ решаются с помощью замены x на гиперболическую функцию:

$$\sinh u = \frac{e^u - e^{-u}}{2} \quad \cosh u = \frac{e^u + e^{-u}}{2}$$

Замечание 1.7.1. Данные функции называются гиперболическим синусом и гиперболическим косинусом соответственно.

Lm 1.7.2. Основное гиперболическое тождество

$$\cosh^2 - \sinh^2 = 1$$

Доказательство.

$$\cosh^2 - \sinh^2 = \left(\frac{e^u + e^{-u}}{2} \right)^2 - \left(\frac{e^u - e^{-u}}{2} \right)^2 = \frac{1}{4} (e^{2u} + 2 + e^{-2u} - e^{2u} + 2 - e^{-2u}) = 1$$

Замечание 1.7.3. Заметим, что

$$\ln |\sinh + \cosh| = \ln \left| \frac{e^u - e^{-u}}{2} + \frac{e^u + e^{-u}}{2} \right| = \ln e^u = u$$

Пример:

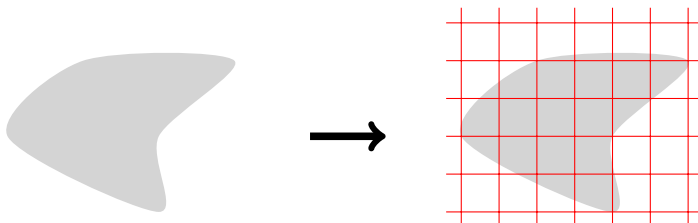
Вычислим 'длинный' логарифм:

$$\int \frac{dx}{\sqrt{1+x^2}} = \left[\begin{array}{l} x = \sinh u \implies 1+x^2 = \cosh^2 u \\ dx = d(\sinh u) = \cosh u du \\ u = \ln \left| \underbrace{x}_{\sinh u} + \underbrace{\sqrt{1+x^2}}_{\cosh u} \right| \quad (1.7.3) \end{array} \right] = \int \frac{\cosh u}{\cosh u} du = u + C = \ln \left| x + \sqrt{1+x^2} \right| + C$$

- Интегралы вида $\int R(\sqrt{1-x^2}, x) dx$ решаются с помощью замены x на синус или косинус.
- Интегралы вида $\int R(\sqrt[k]{x}, \dots, \sqrt[k]{x}) dx$ решаются с помощью замены $t = \sqrt[k]{x}$, где K это НОД для k_1, \dots, k_n .
- Интегралы вида $\int R(\sqrt{ax+b}, x) dx$ решаются с помощью замены $t = \sqrt{ax+b}$. При этом $x = \frac{t^2-b}{a}$, $dx = \frac{2t}{a} dt$.

1.8. Определенный интеграл. Определение, свойства линейности и аддитивности.

Постановка задачи: требуется найти площадь криволинейной фигуры. Разобьем фигуру на квадраты и найдем площадь каждого из них. После это сложим полученные площади.



Упростим задачу: пусть нужно посчитать площадь криволинейной трапеции.



1. Разбиение области $[a; b]$: $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$. Отрезок $[x_{i-1}, x_i]$ назовем частичным, если длину обозначим $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$. Разбиение (дробление) обозначим $T = \{x_i\}_{i=0}^n$. Введем понятие *ранга* дробления τ : $\tau = \max \Delta x_i$.
2. Выберем среднюю точку $\xi_i \in [x_{i-1}, x_i]$. Тогда $f(\xi_i)$ это высота элементарного прямоугольника. Значит площадь элементарного прямоугольника будет равна $S_e = \Delta x_i f(\xi_i)$.
3. Просуммируем площади всех элементарных прямоугольников: $\sum_{i=1}^n \Delta x_i f(\xi_i)$. Данная сумма называется интегральной суммой Римана.
4. Возьмем предел при $n \rightarrow \infty$ и $\tau \rightarrow 0$:

$$\lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \tau \rightarrow 0}} \sum_{i=1}^n \Delta x_i f(\xi_i) \quad (1)$$

Def 1.8.1. Если полученный предел интегральных сумм (1) существует, конечен, **не зависит дробления и выбора средней точки**, то он называется определенным интегралом.

$$\int_a^b f(x) dx = \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \tau \rightarrow 0}} \sum_{i=1}^n \Delta x_i f(\xi_i)$$

a, b называются пределами интегрирования, $f(x)$ — подынтегральной функцией, а dx — дифференциалом переменной (или элементом длины).

Замечание 1.8.2. В определении выше $a < b$. Доопределим для случаев $a = b$ и $a > b$:

$$\int_a^a f(x) dx = 0 \quad \int_a^b f(x) dx = - \int_b^a f(x) dx$$

Замечание 1.8.3. Интеграл Римана определен для кусочно-непрерывных (т.е. имеющих конечное число разрывов) функций.

Т.к. интеграл является пределом сумм, то его свойства вытекают из свойств пределов:

1. Линейность

$$\int_a^b (\lambda f(x) + \mu g(x)) dx = \lambda \int_a^b f(x) dx + \mu \int_a^b g(x) dx$$

2. Аддитивность

$$\int_a^b f(x) dx = \int_a^c f(x) dx + \int_c^b f(x) dx$$

Замечание 1.8.4. Свойство аддитивности выполняется даже в случае, если $c \notin [a; b]$. Это легко проверить пользуясь свойством 1.8.2.

1.9. Геометрический смысл определенного интеграла. Оценка определенного интеграла. Теорема о среднем.

Геометрический смысл определенного интеграла следует из его построения: определенный интеграл по модулю равен площади криволинейной трапеции.

Lm 1.9.1. Пусть $f \in C_{[a;b]}$ и определен $\int_a^b f(x) dx$. m, M — наименьшее и наибольшее значения функции $f(x)$ на отрезке $[a; b]$. Тогда

$$(b-a)m \leq \int_a^b f(x) dx \leq (b-a)M$$

Доказательство.

$$\begin{aligned}
\forall x \in [a; b]: m \leq f(x) \leq M &\implies \forall \xi_i \in [a; b]: m \leq f(\xi_i) \leq M \\
m \Delta x_i &\leq f(\xi_i) \Delta x_i \leq M \Delta x_i \\
m \sum_{i=1}^n \Delta x_i &\leq \sum_{i=1}^n f(\xi_i) \Delta x_i \leq M \sum_{i=1}^n \Delta x_i \\
m \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \tau \rightarrow 0}} \sum_{i=1}^n \Delta x_i &\leq \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \tau \rightarrow 0}} \sum_{i=1}^n f(\xi_i) \Delta x_i \leq M \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \tau \rightarrow 0}} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \\
(b-a)m &\leq \int_a^b f(x) dx \leq (b-a)M
\end{aligned}$$

■

Теорема 1.9.2. Теорема Лагранжа о среднем (в интегральной форме)

Пусть $f \in C_{[a;b]}$ и определен $\int_a^b f(x) dx$. Тогда

$$\exists \xi \in (a; b): \int_a^b f(x) dx = f(\xi)(b-a)$$

Доказательство. Воспользуемся леммой 1.9.1:

$$(b-a)m \leq \int_a^b f(x) dx \leq (b-a)M \implies m \leq \frac{1}{b-a} \cdot \int_a^b f(x) dx \leq M$$

По т. Больцано-Коши функция $f(x)$ принимает все значения от минимального m до максимального M . Значит $\exists \xi \in (a; b)$, что

$$f(\xi) = \frac{1}{b-a} \cdot \int_a^b f(x) dx \implies \int_a^b f(x) dx = f(\xi)(b-a)$$

■

Замечание 1.9.3. Геометрический смысл теоремы Лагранжа заключается в том, что на промежутке $(a; b)$ всегда найдется такая точка ξ , что площадь криволинейной трапеции будет в точности равна площади прямоугольника со сторонами $(b-a)$ и $(f(\xi) - f(m))$.

Lm 1.9.4. Если $f(x), g(x) \in C_{[a;b]}$, определены $\int_a^b f(x) dx$, $\int_a^b g(x) dx$ и при этом $\forall x \in [a; b]: f(x) \geq g(x)$, то

$$\int_a^b f(x) dx \geq \int_a^b g(x) dx$$

Доказательство. Рассмотрим $h(x) = f(x) - g(x)$. Она будет неотрицательная на отрезке $[a; b]$, значит $\int_a^b h(x) dx \geq 0$. Далее пользуемся аддитивностью и получаем искомое неравенство. ■

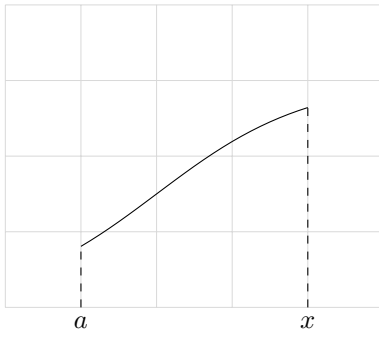
Lm 1.9.5. Пусть $f \in C_{[a;b]}$ и определен $\int_a^b f(x) dx$. Тогда

$$\left| \int_a^b f(x) dx \right| \leq \int_a^b |f(x)| dx$$

Доказательство. Т.к. определенный интеграл это предел интегральных сумм, то можно воспользоваться предельным переходом, а затем свойством о том, что модуль суммы не превосходит сумму модулей. ■

Замечание 1.9.6. Выкалывание из отрезка $[a; b]$ конечного числа точек не меняет значение интеграла.

1.10. Интеграл с переменным верхним пределом. Теорема Барроу.



Def 1.10.1. Интегралом с переменных верхним пределом называется

$$\int_a^x f(t)dt$$

где x — переменный верхний предел.

Замечание 1.10.2. $\forall x \in [a; +\infty]$ соответствует определенное значение $\Phi(x) = \int_a^x f(t)dt$, т.е. определена функция верхнего предела, которая геометрически является площадью криволинейной трапеции с подвижным правым краем.

Теорема 1.10.3. Теорема Барроу

Пусть $f \in C_{[a;b]}$ и определен $\Phi(x) = \int_a^x f(t)dt$. Тогда $\Phi'(x) = f(x)$.

Доказательство. Раскроем производную $\Phi'(x)$ по определению, после чего воспользуемся линейностью интеграла:

$$\Phi'(x) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\Phi(x + \Delta x) - \Phi(x)}{\Delta x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\int_a^{x+\Delta x} f(t)dt - \int_a^x f(t)dt}{\Delta x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\int_x^{x+\Delta x} f(t)dt}{\Delta x}$$

Далее по т. Лагранжа (1.9.2) $\exists \xi \in (a; b)$ такая, что:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\int_x^{x+\Delta x} f(t)dt}{\Delta x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{f(\xi)\Delta x}{\Delta x} = \left[\begin{array}{l} \Delta x \rightarrow 0 \\ \xi \in (x, x + \Delta x) \end{array} \right\} \Rightarrow \xi \rightarrow x = f(x)$$

■

1.11. Вычисление определенного интеграла. Формула Ньютона-Лейбница.

Теорема 1.11.1. Формула Ньютона-Лейбница

Пусть $f(x) \in C_{[a;b]}$, определен $\int_a^b f(x)dx$ и $F(x)$ это некоторая первообразная для $f(x)$. Тогда

$$\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a) = F(x) \Big|_a^b$$

Доказательство. Рассмотрим функцию $\Phi(x) = \int_a^x f(t)dt$, где $x \in [a; b]$. Тогда по т. Барроу (1.10.3) $\Phi(x) = F(x) + C$.

Найдем значение функции $\Phi(x)$ в точке a :

$$\left. \begin{array}{l} \Phi(a) = \int_a^a f(t)dt = 0 \\ \Phi(a) = F(a) + C \end{array} \right\} \Rightarrow C = -F(a)$$

Теперь найдем значение функции $\Phi(x)$ в точке b :

$$\left. \begin{array}{l} \Phi(b) = \int_a^b f(t)dt \\ \Phi(b) = F(b) + C = F(b) - F(a) \end{array} \right\} \Rightarrow \int_a^b f(t)dt = F(b) - F(a)$$

■

Замечание 1.11.2. Формула Ньютона-Лейбница работает в тех случаях, когда можно найти $F(x)$ или хотя бы её значения на концах отрезка $[a; b]$.

Замечание 1.11.3. Если функция $f(x)$ кусочно заданная, то используем свойство аддитивности и разбиваем отрезок на части.

1.12. Замена переменной в определенном интеграле. Интегрирование по частям.

Замена в определенном интеграле выполняется также, как и в неопределенном за исключением смены пределов интегрирования. Более формально:

$$\int_a^b f(x)dx = \int_{\alpha}^{\beta} f(\varphi(t))\varphi'(t)dt$$

$$\varphi(\alpha) = a, \varphi(\beta) = b$$

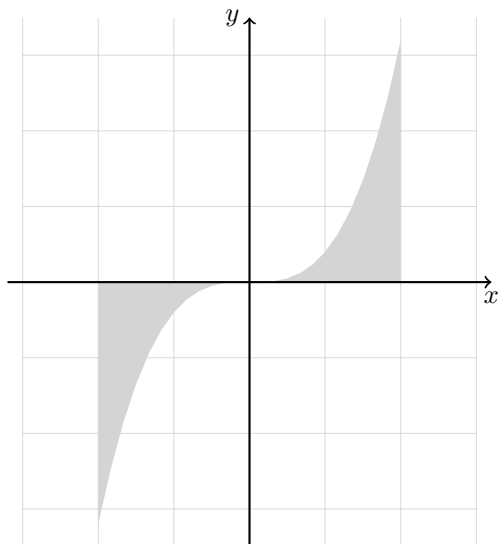
Интегрирование по частям для определенных интегралов выполняется также, как и для неопределенных:

$$\int_a^b u dv = uv \Big|_a^b - \int_a^b v du$$

Стоит отметить несколько свойств определенных интегралов для четных и нечетных функций на симметричном промежутке

Lm 1.12.1. Если $f(x)$ нечетная функция, то

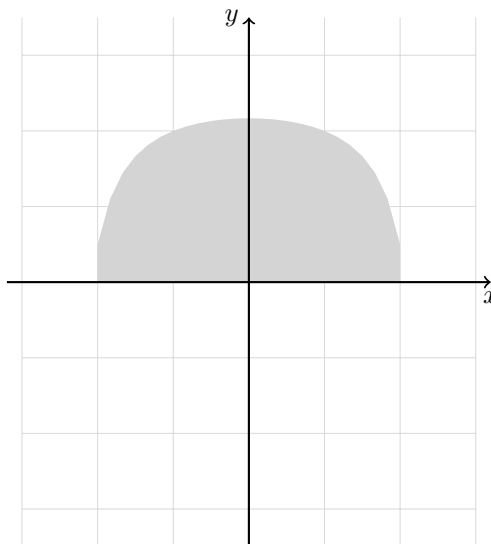
$$\int_{-a}^a f(x) dx = 0$$



(a) $f(-x) = -f(x)$

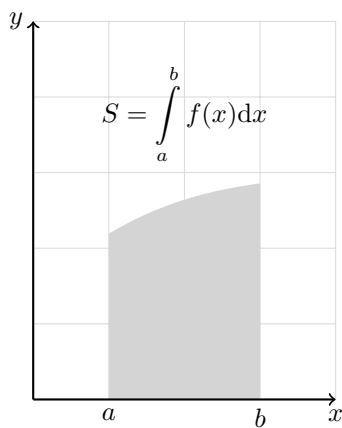
Lm 1.12.2. Если $f(x)$ четная функция, то

$$\int_{-a}^a f(x) dx = 2 \int_0^a f(x) dx$$

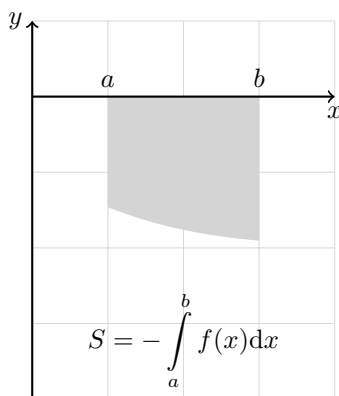


(b) $f(-x) = f(x)$

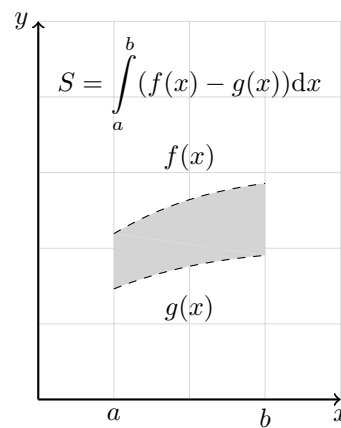
1.13. Приложения определенного интеграла: вычисление площадей в декартовых координатах.



(a) $f(x) \geq 0$



(b) $f(x) \leq 0$



(c) $f(x) \geq g(x)$

Замечание 1.13.1. Для случая (c) расположение функций $f(x)$, $g(x)$ относительно нуля не важно. Важно лишь, чтобы $\forall x \in [a; b]: f(x) \geq g(x)$.

1.14. Приложения определенного интеграла: вычисление площади криволинейного сектора в полярных координатах.



Построим интеграл:

1. Дробление отрезка $[\alpha, \beta]$ на подотрезки $[\varphi_{i-1}, \varphi_i]$, $\tau = \max \Delta\varphi_i$.
2. В каждом отрезке выбираем среднюю точку ξ_i . Ищем $\rho(\xi_i)$, приближаем площадь элементарного сектора площадью кругового.

$$S_{sec} = \frac{\pi \rho^2(\xi_i)}{2\pi} \cdot \Delta\varphi_i = \frac{1}{2} \rho^2(\xi_i) \Delta\varphi_i$$

3. Площадь это предел интегральных сумм

$$S = \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \tau \rightarrow 0}} \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \rho^2(\xi_i) \Delta\varphi_i$$

4. Переход к интегралу

$$S = \frac{1}{2} \int_{\alpha}^{\beta} \rho^2(\varphi) d\varphi$$

Замечание 1.14.1. Если кривая задана параметрически $x = \varphi(t), y = \psi(t)$, то площадь можно вычислить по формуле:

$$S = \int_a^b f(x) dx = \int_{\alpha}^{\beta} \varphi(t) \varphi'(t) dt$$

$$a = \varphi(\alpha), b = \varphi(\beta)$$

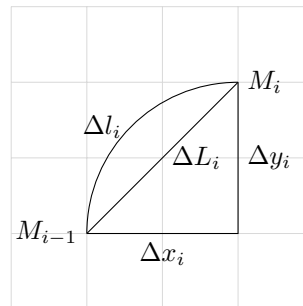
1.15. Приложения определенного интеграла: вычисление длины дуги кривой (вывод формулы).

Пусть дана гладкая (без самопересечений, разрывов и циклов) дуга \check{AB} задаваемая уравнением $y = y(x)$, где $y(x)$ функция, дифференцируемая на $[a; b]$. Найдем её длину.

Построим интеграл:

1. Дробление \check{AB} такими M_i , что $AM_0 \dots M_n B \approx \check{AB}$.
2. Стянем точки M_{i-1} и M_i хордой и получим координатный треугольник.

$$\Delta l_i \approx \Delta L_i = \sqrt{(\Delta x_i)^2 + (\Delta y_i)^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta y_i}{\Delta x_i}\right)^2} \Delta x_i$$



3. Заметим, что $\frac{\Delta y_i}{\Delta x_i}$ это отношение конечных приращений, поэтому можно применить т. Лагранжа:

$$\exists \xi_i \in [x_{i-1}, x_i]: \frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} = f'(\xi_i)$$

$$\Delta L_i = \sqrt{1 + y'(\xi_i)^2} \Delta x_i$$

4. Составим предел интегральных сумм и перейдем к интегралу:

$$L = \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \tau \rightarrow 0}} \sum_{i=1}^n \sqrt{1 + y'(\xi_i)^2} \Delta x_i \implies L = \int_a^b \sqrt{1 + y'(x)^2} dx$$

Замечание 1.15.1. Выражение $dl = \sqrt{1 + y'(x)^2} dx$ называется дифференциалом дуги.

1.16. Приложения определенного интеграла: вычисление длины дуги кривой, заданной параметрически.

Рассмотрим формулу $L = \int_a^b \sqrt{1 + y'(x)^2} dx$ при условии, что кривая задана параметрически. Получим:

$$\begin{aligned}
 x &= \varphi(t), y = \psi(t) \\
 dx &= \varphi'(t)dt \\
 a &= \varphi(\alpha), b = \varphi(\beta), t \in [\alpha; \beta] \\
 y'(x) &= \frac{dy}{dx} = \frac{\psi'(t)}{\varphi'(t)}
 \end{aligned}$$

Подставим это в исходную формулу:

$$\begin{aligned}
 L &= \int_a^b \sqrt{1 + y'(x)^2} dx = \int_\alpha^\beta \sqrt{1 + \left(\frac{\psi'(t)}{\varphi'(t)}\right)^2} \varphi'(t) dt = \int_\alpha^\beta \sqrt{\varphi'(t)^2 + \psi'(t)^2} dt \\
 &\quad a = \varphi(\alpha), b = \varphi(\beta)
 \end{aligned}$$

1.17. Приложения определенного интеграла: вычисление объемов тел с известными площадями сечений и тел вращения.

Пусть дано некоторое тело и известны площади его сечений в плоскости $\perp Ox$, т.е. известна функция $S(x)$, определяющая площадь сечения в зависимости от x . Построим интеграл:

1. Дробление: отрезок $[a; b]$, где a и b это крайние точки тела, делится на подотрезки $[x_{i-1}, x_i]$. Через x_i проводится плоскость $\perp Ox$ и выделяется элементарный слой.
2. Приближаем объем этого слоя объемом цилиндра с основанием $S(\xi_i)$, где ξ_i это некоторая средняя точка из отрезка $[x_{i-1}, x_i]$.
3. Составляем предел интегральных сумм и переходим к интегралу.

$$V = \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \tau \rightarrow 0}} \sum_{i=1}^n S(\xi_i) \Delta x_i \implies V = \int_a^b S(x) dx$$

Замечание 1.17.1. Сечения обязательно должны быть $\perp Ox$, в противном случае получится объем, умноженный на коэффициент наклона сечения по отношению к оси Ox .

Рассмотрим нахождение объема тел вращения.

Подставим в полученную выше формулу $S_{sec} = S_o = \pi f(x)^2$. Получим, что объем тела вращения равен:

$$V = \pi \int_a^b f(x)^2 dx$$

- 1.18. Несобственные интегралы 1-го рода (на неограниченном промежутке). Определение и свойства.
- 1.19. Вычисление несобственного интеграла 1-го рода: формула Ньютона-Лейбница, интегрирование по частям, замена переменной.
- 1.20. Несобственные интегралы 2-го рода (от неограниченной функции). Определение, вычисление и свойства.
- 1.21. Признаки сходимости несобственных интегралов: первый признак сравнения (в неравенствах).
- 1.22. Признаки сходимости несобственных интегралов: второй признак сравнения (предельный).
- 1.23. Признаки сходимости несобственных интегралов: теорема об абсолютной сходимости. Понятие условной сходимости.
- 1.24. Сходимость интегралов 1-го и 2-го рода от степенных функций.

2. Интегрирование функции нескольких переменных

- 2.1. Двойной интеграл. Определение и свойства.
- 2.2. Вычисление двойного интеграла. Кратный интеграл.
- 2.3. Определение и вычисление тройного интеграла.
- 2.4. Криволинейные координаты.
- 2.5. Замена переменных в двойном и тройном интегралах. Якобиан.
- 2.6. Криволинейный интеграл 1-го рода: определение, свойства, вычисление, геометрический и физический смысл.
- 2.7. Криволинейный интеграл 2-го рода как работа силы вдоль пути. Определение, вычисление и свойства.
- 2.8. Криволинейные интегралы 1-го и 2-го рода: формула связи.
- 2.9. Теорема (формула) Грина.
- 2.10. Интегралы, не зависящие от пути интегрирования. Теорема о независимости интеграла от пути, равносильность I, II, III утверждений.
- 2.11. Интегралы, не зависящие от пути интегрирования. Теорема о независимости интеграла от пути, равносильность III, IV утверждений.
- 2.12. Следствие теоремы о независимости от пути (формула Ньютона-Лейбница).
- 2.13. Поверхностный интеграл 1-го рода: определение, свойства, вычисление, геометрический и физический смысл.
- 2.14. Поверхностный интеграл 2-го рода как поток жидкости через поверхность.
- 2.15. Связь между поверхностными интегралами 1-го и 2-го рода.
- 2.16. Поверхностный интеграл 2-го рода: математическое определение, вычисление, свойства.
- 2.17. Теорема Гаусса-Остроградского.
- 2.18. Теорема Стокса.
- 2.19. Скалярное и векторное поля: определения, геометрические характеристики. Дифференциальные и интегральные характеристики полей (определения).
- 2.20. Виды векторных полей и их свойства (теоремы о поле градиента и поле вихря).
- 2.21. Механический смысл потока и дивергенции.
- 2.22. Механический смысл вихря и циркуляции.
- 2.23. Векторная запись теорем теории поля и их механический смысл.