

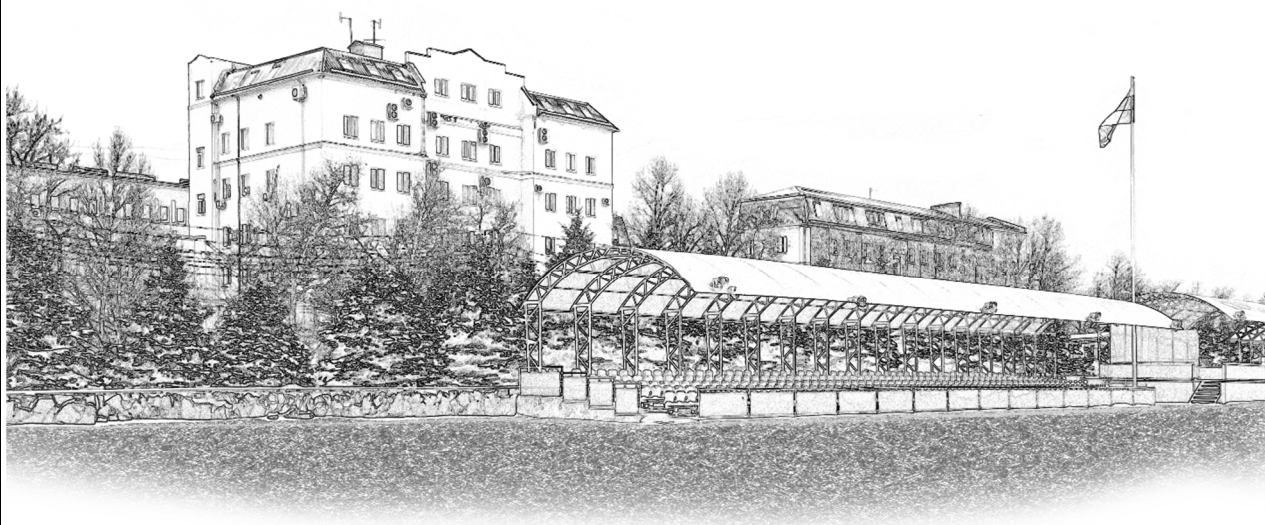


Краснодарский университет МВД России

Е. В. Михайленко

ВЫСШАЯ МАТЕМАТИКА

Учебник
В двух частях
Часть 1



Краснодар
2024

Краснодарский университет МВД России

Е. В. Михайленко

ВЫСШАЯ МАТЕМАТИКА

Учебник

В двух частях

Часть 1

Краснодар
2024

УДК 511.2+512.5+512.6+514.1+517.1
+517.2+517.3+517.9
ББК 22.1
М690

Одобрено
редакционно-издательским советом
Краснодарского университета
МВД России

Рецензенты:

В. М. Бакулин, кандидат физико-математических наук (Волгоградская академия МВД России);

Н. А. Миронов, кандидат физико-математических наук (Нижегородская академия МВД России);

Е. Г. Левченко (Главное управление МВД России по Краснодарскому краю).

Михайленко Е. В.

М690 Высшая математика : учебник : в 2 ч. / Е. В. Михайленко. – Краснодар : Краснодарский университет МВД России, 2024. – Ч. 1. – 426 с.

ISBN 978-5-9266-2125-6 (ч. 1)
ISBN 978-5-9266-2033-4

Содержит разделы математики «Основы общей алгебры», «Линейная алгебра и аналитическая геометрия», «Математический анализ».

Для профессорско-преподавательского состава, курсантов и слушателей образовательных организаций МВД России, обучающихся по информационно-техническим, судебно-экспертным и экономическим направлениям (специальностям), и сотрудников органов внутренних дел Российской Федерации.

УДК 511.2+512.5+512.6+514.1+517.1
+517.2+517.3+517.9
ББК 22.1

ISBN 978-5-9266-2125-6 (ч. 1)
ISBN 978-5-9266-2033-4

© Краснодарский университет
МВД России, 2024
© Михайленко Е. В., 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	14
Раздел 1. Основы общей алгебры.....	18
Глава 1. Элементы теории множеств	18
1.1. Понятие множества.....	18
1.2. Операции над множествами	20
1.3. Числовые множества	23
1.3.1. Перечень числовых множеств.....	23
1.3.2. Счетные множества	24
1.4. Множество действительных чисел	26
1.4.1. Основные свойства вещественных чисел	26
1.4.2. Изображение действительных чисел.....	27
1.4.3. Абсолютная величина действительного числа	28
1.4.4. Числовые промежутки	29
1.5. Понятие комплексного числа	29
1.5.1. Определение комплексного числа.....	30
1.5.2. Геометрическое изображение комплексных чисел.....	32
1.5.3 Модуль и аргумент комплексного числа	32
1.6. Действия над комплексными числами	33
1.6.1. Сумма и разность комплексных чисел	33
1.6.2. Произведение комплексных чисел	34
1.6.3. Деление комплексных чисел	34
1.6.4. Решение квадратных уравнений.....	35
1.7. Тригонометрическая форма комплексных чисел	36
1.7.1. Понятие тригонометрической формы	36
1.7.2. Операции в тригонометрической форме.....	37
1.8. Показательная форма.....	40
Глава 2. Элементы теории чисел	43
2.1. Основные понятия теории чисел.....	44
2.2. Делители и кратные	45
2.2.1. Общий наибольший делитель.....	45
2.2.2. Алгоритм Евклида.....	45

2.2.3. Свойства делителей	46
2.2.4. Общее наименьшее кратное	47
2.3. Простые числа	48
2.3.1. Решето Эратосфена	48
2.3.2. Простые числа Ферма и Мерсенна	49
2.3.3. Каноническое разложение натурального числа	49
2.4. Функции теории чисел	50
2.4.1. Целая и дробная части числа	50
2.4.2. Число делителей и сумма делителей	51
2.4.3. Количество простых чисел	52
2.5. Основные понятия сравнений	52
2.5.1. Определение сравнений	52
2.5.2. Свойства сравнений	53
2.6. Классы вычетов	54
2.6.1. Определение классов по модулю m	54
2.6.2. Полная система вычетов	55
2.6.3. Приведенная система вычетов	56
2.7. Взаимно простые числа	56
2.7.1. Функция Эйлера	56
2.7.2. Теоремы Эйлера и Ферма	57
2.7.3. Вычисление функции Эйлера	58
2.8. Сравнения первой степени с одной неизвестной	58
2.8.1. Определение сравнений n -й степени	58
2.8.2. Решение сравнений 1-й степени	59
Глава 3. Многочлены	62
3.1. Понятие полинома	62
3.1.1. Основные определения	62
3.1.2. Виды полиномов	63
3.2. Операции над многочленами	64
3.2.1. Сумма многочленов	64
3.2.2. Разность многочленов	65
3.2.3. Произведение многочленов	65

3.2.4. Деление многочленов	66
3.3. Бином Ньютона. Треугольник Паскаля	67
3.3.1. Бином Ньютона.....	67
3.3.2. Треугольник Паскаля	68
3.4. Корни многочленов	69
3.5. Разложение правильных дробей.....	72
Раздел 2. Линейная алгебра и аналитическая геометрия	77
Глава 4. Матрицы и определители	77
4.1. Основные понятия матричного счисления.....	78
4.1.1. Определение матрицы	78
4.1.2. Квадратные матрицы	79
4.1.3. Транспонирование матриц.....	80
4.2. Операции над матрицами.....	81
4.2.1. Сложение матриц	81
4.2.2. Умножение матрицы на число	82
4.2.3. Матричное произведение.....	83
4.3. Определители	86
4.3.1. Вычисление определителей 1-го, 2-го и 3-го порядков	86
4.3.2. Миноры и алгебраические дополнения элементов матрицы	88
4.3.3. Вычисление определителей n-ого порядка.....	89
4.3.4. Свойства определителей	90
4.4. Ранг матрицы.....	94
4.4.1. Понятие ранга матрицы и базисных миноров.....	94
4.4.2. Метод окаймляющих миноров.....	95
4.4.3. Вычисление ранга матрицы методом Гаусса.....	97
4.5. Обратная матрица	98
4.5.1. Определение обратной матрицы	98
4.5.2. Нахождение обратной матрицы.....	99
4.5.3. Вычисление обратной матрицы методом Гаусса.....	100
Глава 5. Системы линейных алгебраических уравнений	104
5.1. Линейное уравнение	105
5.2. Системы линейных алгебраических уравнений	107

5.2.1. Основные понятия и определения.....	107
5.2.2. Элементарные преобразования.....	108
5.2.3. Матричная форма записи системы линейных уравнений.....	110
5.3. Теорема Кронекера-Капелли	111
5.4. Методы решения определенных систем.....	113
5.4.1. Метод обратной матрицы	113
5.4.2. Метод Крамера.....	116
5.5. Метод Гаусса	118
5.5.1. Описание метода Гаусса.....	118
5.5.2. Решение определенных систем.....	121
5.5.3. Решение неопределенных систем	124
5.6. Однородные системы линейных алгебраических уравнений	127
5.6.1. Основные понятия систем однородных уравнений	127
5.6.2. Условия совместности однородных систем.....	128
5.6.3. Решение однородных систем линейных уравнений	129
5.7. Фундаментальная система решений	132
5.7.1. Понятие фундаментальной системы.....	132
5.7.2. Построение фундаментальной системы решений	133
Глава 6. Векторная алгебра	137
6.1. Основные понятия векторной алгебры.....	138
6.2. Линейные операции над векторами	140
6.3. Метод координат.....	142
6.3.1. Разложение вектора по ортам координатных осей.....	142
6.3.2. Модуль вектора.....	144
6.3.3. Направляющие косинусы	144
6.3.4. Равенство и коллинеарность векторов.....	146
6.4. Скалярное произведение	147
6.4.1. Определение скалярного произведения	147
6.4.2. Выражение скалярного произведения через координаты	148
6.4.3. Приложения скалярного произведения	149
6.5. Векторное произведение	150
6.5.1. Определение и свойства векторного произведения	150

6.5.2. Векторное произведение в координатной форме	152
6.5.3. Некоторые приложения векторного произведения	154
6.6. Смешанное произведение векторов	156
6.6.1. Определение и свойства смешанного произведения	156
6.6.2. Смешанное произведение в координатах	158
6.6.3. Некоторые приложения смешанного произведения	159
Глава 7. Основы аналитической геометрии	165
7.1. Метод координат на плоскости	165
7.1.1. Декартовы прямоугольные координаты	165
7.1.2. Полярные координаты	166
7.1.3. Основные задачи, решаемые методом координат	168
7.2. Уравнения прямой	170
7.2.1. Уравнение прямой с угловым коэффициентом	170
7.2.2. Общее уравнение прямой	172
7.2.3. Уравнение прямой с данным угловым коэффициентом, проходящей через данную точку	172
7.2.4. Уравнение прямой, проходящей через две точки	173
7.2.5. Уравнение прямой в отрезках	174
7.3. Взаимное расположение прямых	175
7.3.1. Угол между двумя прямыми	175
7.3.2. Взаимное расположение двух прямых	177
7.4. Плоскости в пространстве	178
7.4.1. Общее уравнение плоскости	178
7.4.2. Уравнение плоскости, проходящей через три точки	181
7.4.3. Уравнение плоскости в отрезках	182
7.4.4. Нормальное уравнение плоскости	184
7.5. Взаимное расположение плоскостей	185
7.5.1. Угол между двумя плоскостями	185
7.5.2. Условия параллельности и перпендикулярности плоскостей	187
7.5.3. Расстояние между точкой и плоскостью	190
7.6. Уравнения прямой в пространстве	191
7.6.1. Общие уравнения прямой в пространстве	191

7.6.2. Канонические уравнения прямой.....	192
7.6.3. Уравнения прямой, проходящей через две точки	193
7.6.4. Параметрические уравнения прямой в пространстве	193
7.6.5. Преобразования уравнений	194
7.7. Взаимное расположение прямых и плоскостей.....	195
7.7.1. Угол между прямыми	195
7.7.2. Взаимное расположение прямых	197
7.7.3. Взаимное расположение прямой и плоскости	201
7.8. Определение расстояний.....	203
7.8.1. Расстояние от точки до прямой.....	203
7.8.2. Расстояние между прямыми.....	203
7.8.3. Расстояние между прямой и плоскостью.....	205
Раздел 3. Математический анализ.....	209
Глава 8. Теория пределов и непрерывных функций	210
8.1. Функция одной переменной	210
8.1.1. Определение функции.....	210
8.1.2. Способы задания функций	211
8.1.3. Область определения функции	212
8.2. Основные свойства функций	214
8.2.1. Четность, нечетность функции	214
8.2.2. Периодичность	215
8.2.3. Монотонность функции	216
8.3. Классификация функций.....	218
8.3.1. Явные и неявные функции	218
8.3.2. Обратные функции.....	219
8.3.3. Сложные функции.....	220
8.3.4. Понятие элементарной функции	220
8.4. Понятие предела функции	222
8.4.1. Предел числовой последовательности	222
8.4.2. Предел функции в бесконечности	223
8.4.3. Предел функции в точке.....	225
8.5. Бесконечно малые и бесконечно большие величины	227

8.5.1. Бесконечно малые величины.....	227
8.5.2. Бесконечно большие величины	229
8.5.3. Сравнение бесконечно малых и бесконечно больших величин...	231
8.6. Основные теоремы о пределах	233
8.6.1. Свойства пределов	233
8.6.2. Признаки существования пределов	234
8.6.3. Замечательные пределы	235
8.7. Непрерывность функции.....	237
Глава 9. Дифференциальное исчисление функции одной переменной ..	240
9.1. Основные понятия дифференциального исчисления.....	240
9.1.1. Определение производной.....	240
9.1.2. Геометрический смысл производной.....	241
9.2. Дифференцирование функций.....	242
9.2.1. Основные формулы дифференцирования.....	243
9.2.2. Правила дифференцирования	243
9.3. Методы нахождения производных	246
9.3.1. Производная сложной функции.....	246
9.3.2 Производная обратной функции.....	246
9.3.3. Производные высших порядков	247
9.4. Правило Лопиталю.....	248
9.5. Локализация корней функции	250
9.5.1. Графическая локализация корней.....	250
9.5.2. Аналитическая локализация корней	252
9.6. Асимптоты функции	253
9.6.1. Вертикальные асимптоты	254
9.6.2. Наклонные асимптоты	255
9.7. Исследование функции с помощью производных	256
9.7.1. Монотонность функции	257
9.7.2. Экстремумы функции.....	258
9.7.3. Выпуклость и вогнутость функции	259
9.7.4. Точки перегиба.....	260
9.8. Исследование функций по общей схеме	261

Глава 10. Функции нескольких переменных.....	274
10.1. Понятие функции нескольких переменных	274
10.1.1. Основные определения	275
10.1.2. Предел функции нескольких переменных.....	276
10.1.3. Основные свойства непрерывных функций двух переменных..	278
10.2. Дифференцирование функции нескольких переменных	279
10.2.1. Частные производные первого порядка	279
10.2.2. Производные сложных функций	281
10.2.3. Дифференциал функции.	282
10.2.4. Частные производные высших порядков.....	282
10.3. Производные по направлению. Градиент	284
10.3.1. Производная по направлению.....	284
10.3.2. Градиент.....	286
10.4. Экстремумы функции двух переменных.....	286
10.4.1. Необходимые условия экстремума	287
10.4.2. Достаточные условия экстремума.....	290
10.5. Исследование функции в замкнутой области	292
10.5.1. Общая схема исследования функций в замкнутой области.....	292
10.5.2. Нахождение наибольшего и наименьшего значений	293
Глава 11. Неопределенные интегралы	298
11.1. Понятие неопределенного интеграла.....	299
11.2. Основные свойства и табличные интегралы.....	300
11.2.1. Основные свойства неопределенного интеграла.....	300
11.2.2. Табличные интегралы.....	301
11.3. Простейшие методы интегрирования.....	302
11.3.1. Непосредственное интегрирование	302
11.3.2. Внесение под знак дифференциала	305
11.3.3. Метод замены переменных	309
11.3.4. Метод интегрирования по частям	312
11.4. Интегрирование рациональных дробей.....	315
11.4.1. Приведение дроби к правильной.....	315
11.4.2. Разложение правильной дроби	316

11.4.3. Знаменатели дробей с комплексными корнями	318
Глава 12. Определенные, несобственные и кратные интегралы.....	321
12.1. Понятие определенного интеграла	321
12.1.1. Основные определения	321
12.1.2. Формула Ньютона-Лейбница.....	323
12.1.3. Свойства определенного интеграла	325
12.2. Особенности вычисления определенных интегралов.....	326
12.2.1. Непосредственное интегрирование	326
12.2.2. Интегрирование подстановкой (замена переменной).....	328
12.2.3. Интегрирование по частям	329
12.2.4. Интегрирование четных и нечетных функций в симметричных пределах	330
12.3. Геометрические приложения определенного интеграла	331
12.3.1. Вычисление площадей плоских фигур	331
12.3.2. Вычисление длины дуги плоской кривой.....	335
12.3.3. Вычисление объемов тел вращения.....	336
12.4. Несобственные интегралы	336
12.4.1. Несобственные интегралы с бесконечными пределами интегрирования.....	336
12.4.2. Несобственные интегралы от разрывных функций.....	341
12.5. Двойные интегралы	344
12.5.1. Определение двойного интеграла	344
12.5.2. Вычисление двойного интеграла.....	345
Глава 13. Ряды	350
13.1. Числовые ряды и их свойства.....	351
13.1.1. Понятие числового ряда.....	351
13.1.2. Свойства сходящихся рядов	354
13.1.3. Ряд геометрической прогрессии.....	354
13.1.4. Признак сходимости и условие расходимости числового ряда .	355
13.2. Достаточные признаки сходимости знакопостоянных рядов	356
13.2.1. Признаки сравнения	356
13.2.2. «Эталонные» ряды, используемые для сравнения	357

13.2.3. Признак Даламбера.....	358
13.2.4. Радикальный признак Коши.....	360
13.2.5. Интегральный признак Коши	362
13.3. Знакопеременные и знакопеременные ряды	363
13.3.1. Знакопеременные ряды. Признак Лейбница	363
13.3.2. Знакопеременные ряды	364
13.3.3. Свойства абсолютно сходящихся рядов.....	365
13.4. Понятие функционального ряда.....	366
13.4.1. Определение функционального ряда.....	366
13.4.2. Сходимость функционального ряда.....	367
13.4.3. Определение степенного ряда.....	368
13.5. Сходимость степенных рядов.....	369
13.5.1. Теорема Абеля.....	369
13.5.2. Интервал и радиус сходимости степенного ряда.....	371
13.6. Разложение функций в степенные ряды.....	374
13.6.1. Ряд Тейлора	374
13.6.2. Разложение функции в ряд Маклорена	376
13.6.3. Нахождение приближенных значений функций.....	380
Глава 14. Дифференциальные уравнения.....	383
14.1. Обыкновенные дифференциальные уравнения	384
14.1.1. Понятие дифференциального уравнения.....	384
14.1.2. Типы задач получения частного решения.....	386
14.2. Дифференциальные уравнения первого порядка	388
14.2.1. Основные понятия	388
14.2.2. Задача Коши	388
14.3. Дифференциальные уравнения с разделяющимися переменными ..	389
14.3.1. Уравнения с разделенными переменными	389
14.3.2. Дифференциальные уравнения с разделяющимися переменными	390
14.4. Однородные дифференциальные уравнения	392
14.4.1. Понятие однородного дифференциального уравнения	392
14.4.2. Решение однородного дифференциального уравнения.....	393

14.5. Линейные дифференциальные уравнения.....	398
14.5.1. Понятие линейного дифференциального уравнения	398
14.5.2. Метод Иоганна Бернулли.....	398
14.6. Уравнение Якоба Бернулли	401
14.7. Дифференциальные уравнения высших порядков	404
14.7.1. Понятия дифференциальных уравнений высших порядков	404
14.7.2. Дифференциальные уравнения, допускающие понижение порядка	406
14.8. Линейные дифференциальные уравнения высших порядков	414
14.8.1. Линейные однородные дифференциальные уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами	414
14.8.2. Линейные неоднородные дифференциальные уравнения второго порядка	417
Заключение	422
Литература	423

Введение

Учебник подготовлен на основе лекций по дисциплине «Высшая математика», читаемых автором для курсантов Краснодарского университета МВД России, обучающихся по специальности 10.05.05 Безопасность информационных технологий в правоохранительной сфере. Представленный материал содержит понятия, определения, описание методов, алгоритмы и примеры решения задач, рассматриваемых в общей и линейной алгебре, аналитической геометрии, математическом анализе, теории вероятностей, математической статистике, дискретной математике, методах оптимизации.

Учебник состоит из двух частей и шести разделов. Разделы «1. Основы общей алгебры», «2. Линейная алгебра и аналитическая геометрия» и «3. Математический анализ», содержание которых раскрывают четырнадцать глав, включены в первую часть учебника, а разделы «4. Теория вероятностей и математическая статистика», «5. Дискретная математика» и «6. Методы оптимизации», изложенные в рамках одиннадцати глав, представлены во второй части учебника.

В первом разделе «Основы общей алгебры» рассматриваются абстрактные и числовые множества, теория делимости, теория сравнений и алгебра многочленов. В работе даны основные понятия множеств, введены операции над ними, описаны основные числовые множества, раскрываются описание и свойства действительных чисел. Подробно рассматриваются множество комплексных чисел, понятия модуля и аргумента комплексного числа, даются геометрическое изображение комплексных чисел, действия над комплексными числами в алгебраической, тригонометрической и показательной формах, представлены методы решения квадратных уравнений с комплексными корнями.

Значительное внимание уделено методам теории чисел. Предлагаются ключевые понятия и теоремы теории делимости, алгоритмы нахождения наибольшего общего делителя и наименьшего общего кратного, методы нахождения простых чисел и канонического разложения натуральных чисел, представлены основные функции теории делимости. Кроме того, в учебнике

содержатся основы теории сравнений, раскрываются методы определения классов вычетов, полной и приведенной систем вычетов, рассматриваются теоремы Эйлера и Ферма, даются алгоритмы решения сравнений первой степени с одной неизвестной. Рассматриваются основные виды полиномов, операции над многочленами, принципы работы с биномом Ньютона и треугольником Паскаля, алгоритмы определения корней многочленов.

Во втором разделе «Линейная алгебра и аналитическая геометрия» рассматриваются основы матричной алгебры, предлагаются понятия и алгоритмы решения систем линейных алгебраических уравнений, описываются методы векторной алгебры, исследуются плоскости и прямые в трехмерном пространстве.

Представленный теоретический материал включает ключевые понятия матричного исчисления, основные операции над матрицами, методы нахождения определителей, алгоритмы нахождения обратной матрицы и ранга матрицы. В работе содержатся основные понятия линейных уравнений и их систем, приводится их классификация, формы записи, рассматриваются условия совместности систем, подробно описываются методы нахождения решений: метод обратной матрицы, метод Крамера, метод Гаусса. Особое внимание уделяется исследованию нетривиальной совместности однородных систем, представлен алгоритм нахождения фундаментальной системы решений.

В разделе также даются базовые понятия векторной алгебры, вводятся линейные операции над векторами, особое внимание уделяется методу координат, определению, свойствам, методам вычисления и приложениям скалярного, векторного и смешанного произведений векторов. К изучению предлагаются линии и поверхности первого порядка в двухмерном и трехмерном пространствах. В разделе представлены различные формы записи плоскостей, определяются угол между двумя плоскостями, взаимное расположение плоскостей, описаны уравнения прямой в пространстве, методы преобразования уравнений, рассматриваются взаимное расположение прямых и плоскостей, рассчитываются расстояния между точками, плоскостями и прямыми.

Третий раздел «Математический анализ» включает главы, в рамках которых рассматриваются теория пределов, основы дифференциального и интегрального исчисления функций одной и нескольких переменных, числовые функциональные ряды и дифференциальные уравнения.

Раскрываются основные способы задания функции одной переменной, свойства функций, их классификация, понятие предела функции в точке и бесконечности, понятия бесконечно малых и бесконечно больших величин, свойства и признаки существования пределов. Особое внимание уделяется дифференциальному исчислению. Представлены определение и геометрический смысл производной, даются основные формулы и правила дифференцирования, методы нахождения производных высших порядков и принципы использования их для исследования функций. Для функций нескольких переменных определяются частные и смешанные производные, производные по направлению и градиент, представлены алгоритмы исследования функций в замкнутой области.

Кроме того, рассматриваются понятие и основные свойства неопределенного интеграла, простейшие методы интегрирования: непосредственное интегрирование, замены переменных, по частям, интегрирование рациональных дробей, определенные интегралы, особенности их вычисления, геометрические приложения определенных интегралов, несобственные интегралы. В разделе изучаются числовые ряды, их свойства, необходимые и достаточные признаки сходимости знакопостоянных и знакопеременных рядов, определяются понятия сходимости функционального ряда, раскрываются методы нахождения интервала и радиуса сходимости степенного ряда, разложения функций в степенные ряды.

В разделе даются основные понятия дифференциальных уравнений, определяются типы задач получения частного решения. Большое внимание уделяется методам решения обыкновенных дифференциальных уравнений первого и высших порядков. Рассматриваются принципы нахождения решений дифференциальных уравнений с разделяющимися переменными, понятия и

алгоритмы решения однородных дифференциальных уравнений, описываются методы Иоганна Бернулли и Якоба Бернулли решения линейных дифференциальных уравнений, определяются методы решения некоторых типов дифференциальных уравнений высших порядков.

Для лучшего восприятия учебного материала все вводимые понятия, определения, теоремы, формулы и вычислительные методы поясняются рисунками и примерами решения задач с подробным описанием хода решений.

Раздел 1. Основы общей алгебры

Глава 1. Элементы теории множеств

Понятие «*множество*» является одним из основных неопределяемых понятий математики. Теория множеств – одна из самых молодых математических дисциплин. Ее появление связано с работами немецкого математика Георга Кантора, опубликованными в 1874–1884 годах.

Понятие множества оказалось настолько общим и в то же время полезным, что многие сложные конструкции алгебры, геометрии и математического анализа получили ясное теоретико-множественное описание. Это сделало теорию множеств универсальным математическим языком. С другой стороны, математиков давно интересовал вопрос логического обоснования своей науки. Развитие логики в XIX веке и появление теории множеств привело к значительному прогрессу в этих исследованиях. В настоящее время теория множеств – активно развивающаяся область математики.

В настоящей главе мы дадим определения основных понятий теории множеств, введем наиболее общие операции над множествами, установим связи между основными числовыми множествами, изучим основные свойства счетных и несчетных множеств, рассмотрим понятия супремума и инфимума ограниченных множеств.

Особое место в главе занимает множество действительных чисел. Здесь рассматриваются основные операции над вещественными числами, свойства операций над числами, сравнения и непрерывности вещественных чисел, изображение действительных чисел на числовой оси, определение и свойства абсолютной величины чисел, а также классификация числовых промежутков.

1.1. Понятие множества

Под *множеством* понимают совокупность (собрание, класс, семейство, коллекция) некоторых объектов, объединенных по какому-либо признаку. Так можно говорить о множестве курсантов взвода (учебной группы), о множестве

точек отрезка, о множестве вершин четырехугольника, о множестве корней уравнения $x^2 + 3x - 4 = 0$, о множестве всех натуральных чисел и т.д.

Объекты, из которых состоит множество, называются его *элементами*. Множества принято обозначать заглавными буквами латинского алфавита $A, B, C, \dots$, а их элементы – малыми буквами $a, b, c, \dots$.

Запись $a \in A$ (читается: a принадлежит A) или $A \ni a$ (читается: A содержит a) означает, что a есть элемент множества A . Записи $a \notin A$ (a не принадлежит A) означает, что a не является элементом множества A .

Множество может содержать любое число элементов, конечное и бесконечное.

Множество, не содержащее ни одного, элемента, называется *пустым* и обозначается символом $\emptyset$.

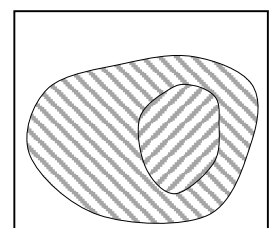
Элементы множества записывают в фигурных скобках, внутри которых они перечислены (если это возможно), либо указано общее свойство, которым обладают все элементы данного множества.

Пример. Запись $A = \{-1; 2; 5\}$ означает, что множество A состоит из трех чисел -1, 2 и 5.

Пример. Запись $A = \{x \mid 0 \leq x \leq 3\}$ означает, что множество A состоит из всех действительных чисел, удовлетворяющих неравенству $0 \leq x \leq 3$.

Для графического (наглядного) изображения множеств и их свойств используются диаграммы Эйлера – Венна (Леонард Эйлер (1707-1783) – швейцарский математик, механик и физик; Джон Венн (1834 - 1923) – английский логик). На них множество отождествляется с множеством точек на плоскости, лежащих внутри некоторых замкнутых кривых, например, окружностей (круги Эйлера).

Множество A называется *подмножеством* множества B , если каждый элемент множества A является элементом множества B (обозначение – $B \subseteq A$ или $A \supseteq B$).



Если одновременно $A \subseteq B$ и $B \subseteq A$, т.е. множества A и B состоят из одних и тех же элементов, то множества A и B *равны* или *совпадают* (обозначение – $A = B$).

Пример. Пусть $A = \{-1; 0; 3\}$, $B = \{-2; -1; 0; 2; 3; 5\}$, $C = \{-1; 0; 3\}$. В этом случае $A \subseteq B$, $A = C$, $C \subseteq B$.

1.2. Операции над множествами

Пусть даны два произвольных множества A и B .

Прямым произведением множеств A и B называется упорядоченное множество всех пар элементов $(a; b)$ таких, что a принадлежит множеству A , а b – множеству B .

$$A \times B = \{(a, b) \mid a \in A, b \in B\}$$

Пример. Для множеств $A = \{-1; 1; 3\}$ и $B = \{-1; 2\}$ вычислим $A \times B$.

По определению $A \times B = \{(a, b) \mid a \in \{-1; 1; 3\}, b \in \{-1; 2\}\}$ или $A \times B = \{(-1; -1); (-1; 2); (1; -1); (1; 2); (3; -1); (3; 2)\}$.

Множество $A \times B$ изображено на рисунке 5.1.

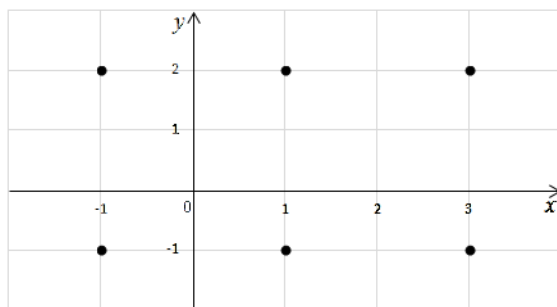
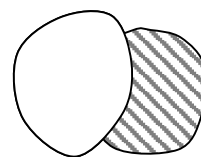


Рис. 5.1. Прямое произведение двух множеств.

Объединением множеств A и B называется множество C , состоящее из элементов, принадлежащих или множеству A или множеству B или множеству A и B одновременно.

$$C = A \cup B = \{x \mid x \in A \text{ или } x \in B\}$$

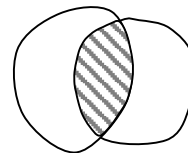


Пример. Для множеств $A = \{-1; 2; 3\}$ и $B = \{0; 2; 5; 6\}$ вычислим $A \cup B$.

$$A \cup B = \{-1; 2; 3\} \cup \{0; 2; 5; 6\} = \{-1; 0; 2; 3; 5; 6\}.$$

Пересечением множеств A и B называется множество C , состоящее из элементов, принадлежащих множеству A и множеству B одновременно

$$C = A \cap B = \{x \mid x \in A \text{ и } x \in B\}$$

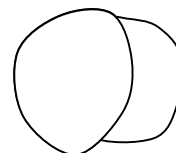


Пример. Для множеств $A = \{-1; 2; 3\}$, $B = \{0; 2; 5; 6\}$ вычислим $A \cap B$.

$$A \cap B = \{-1; 2; 3\} \cap \{0; 2; 5; 6\} = \{2\}.$$

Разностью множеств A и B называется множество C , состоящее только из тех элементов, которые принадлежат множеству A и не принадлежат множеству B .

$$C = A \setminus B = \{x \mid x \in A \text{ и } x \notin B\}$$



Пример. Для множеств $A = \{-1; 2; 3\}$ и $B = \{0; 2; 5; 6\}$ вычислим $A \setminus B$ и $B \setminus A$.

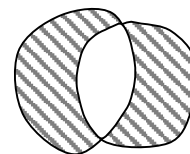
$$A \setminus B = \{-1; 2; 3\} \setminus \{0; 2; 5; 6\} = \{-1; 3\}, \quad B \setminus A = \{0; 2; 5; 6\} \setminus \{-1; 2; 3\} = \{0; 5; 6\}.$$

Симметрической разностью множеств A и B называется множество C , включающее все элементы множеств A и B , и не содержащее элементы принадлежащие одновременно обоим этим множествам.

$$C = A \Delta B = (A \cup B) \setminus (A \cap B)$$

или

$$C = A \Delta B = (A \setminus B) \cup (B \setminus A)$$



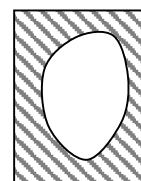
Пример. Для множеств $A = \{-1; 2; 3\}$ и $B = \{0; 2; 5; 6\}$ вычислим $A \Delta B$.

$$A \Delta B = (A \cup B) \setminus (A \cap B) = \{-1; 0; 2; 3; 5; 6\} \setminus \{2\} = \{-1; 0; 3; 5; 6\}.$$

Пусть дано произвольное множество A .

Дополнение множества A — это множество всех элементов, не принадлежащих множеству A .

$\bar{A} = U \setminus A = \{x \mid x \notin A\}$, где U – универсальное множество.



Универсальное множество U , как правило, изображается множеством точек некоторого прямоугольника.

Для множеств существует понятие *мощность*. Для конечных множеств мощность совпадает с количеством элементов.

Пример. Вычислим мощность множеств $A = \{\emptyset\}$, $B = \{-1\}$, $C = \{-2; 0; 1; 3\}$.

Множество A не содержит ни одного элемента, следовательно, $|A| = 0$.

Множество B содержит один элемент, следовательно, $|B| = 1$.

Множество C содержит четыре элемента, следовательно, $|C| = 4$.

Свойства операций над множествами

Пусть дано универсальное множество U . Тогда для любых множеств A, B, C ($A, B, C \subseteq U$) справедливы следующие свойства множеств:

1. Если $A \subset B$ и $B \subset C$, то $A \subset C$ (транзитивность);
2. Если $A \subset B$ и $B \subset A$, то $A = B$;
3. Если $A \supseteq B$, то $A \cup B = A$;
4. Если $A \supseteq B$, то $A \cap B = B$;
5. $A \cup A = A$ (идемпотентность объединения);
6. $A \cap A = A$ (идемпотентность пересечения);
7. $A \cup U = U$ (свойство единицы);
8. $A \cap U = A$ (свойство единицы);
9. $A \cup \emptyset = A$ (свойство нуля);
10. $A \cap \emptyset = \emptyset$ (свойство нуля);
11. $A \setminus A = \emptyset$;
12. $A \cup B = B \cup A$ (коммутативность объединения);
13. $(A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C)$ (ассоциативность объединения);
14. $A \cap B = B \cap A$ (коммутативность пересечения);
15. $(A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C)$ (ассоциативность пересечения);

16. $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$ (дистрибутивность объединения относительно пересечения);

17. $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$ (дистрибутивность пересечения относительно объединения);

$$18. A \setminus (B \cup C) = (A \setminus B) \cap (A \setminus C);$$

$$19. A \setminus (B \cap C) = (A \setminus B) \cup (A \setminus C);$$

$$20. (A \cap B) \cup A = A \text{ (поглощение);}$$

$$21. (A \cup B) \cap A = A \text{ (поглощение);}$$

$$22. \overline{\overline{A}} = A \text{ (свойство двойного дополнения);}$$

$$23. \overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B} \text{ (закон де Моргана);}$$

$$24. \overline{A \cap B} = \overline{A} \cup \overline{B} \text{ (закон де Моргана);}$$

$$25. A \cup \overline{A} = U \text{ (свойство дополнения);}$$

$$26. A \cap \overline{A} = \emptyset \text{ (свойство дополнения);}$$

$$27. A \setminus B = A \cap \overline{B}.$$

1.3. Числовые множества

1.3.1. Перечень числовых множеств

Множества, элементами которых являются числа, называются *числовыми*.

Рассмотрим основные числовые множества, а также установим связи между ними.

$N = \{1; 2; 3; \dots; n; \dots\}$ – *множество натуральных чисел*;

$Z_0 = \{0; 1; 2; 3; \dots; n; \dots\}$ – *множество целых неотрицательных чисел*;

$Z = \{\dots; -n; \dots; -2; -1; 0; 1; 2; 3; \dots; n; \dots\}$ – *множество целых чисел*;

$Q = \left\{ \frac{m}{n} : m \in Z, n \in N \right\}$ – *множество рациональных чисел*;

R – *множество действительных чисел*.

Очевидно, что имеет место включение $N \subset Z_0 \subset Z \subset Q \subset R$.

$I = R \setminus Q$ – *множество иррациональных чисел*.

Пример. Из множества действительных чисел

$\left\{-8,3; -4; \operatorname{tg} 3; 0; 0,7; 1; \sin \frac{\pi}{6}; \ln 5; e; \pi; 3, (2); \frac{17}{3}; 6\right\}$ выберем подмножества:

натуральных, целых, рациональных и иррациональных чисел.

Множество натуральных чисел: $\{1; 6\}$; множество целых чисел:

$\{-4; 0; 1; 6\}$; множество рациональных чисел:

$\left\{-8,3; -4; 0; 0,7; 1; \sin \frac{\pi}{6}; 3, (2); \frac{17}{3}; 6\right\}$; множество иррациональных чисел:

$\{\operatorname{tg} 3; \ln 5; e; \pi\}$.

1.3.2. Счетные множества

Конечное множество – множество, количество элементов которого конечно, то есть, существует неотрицательное целое число k , равное количеству элементов этого множества. В противном случае множество называется *бесконечным*.

Пример. Множество чисел $\left\{-8,3; -4; 0; 0,7; 1; \sin \frac{\pi}{6}; 3, (2); \frac{17}{3}; 6\right\}$ является

счетным, так как количество элементов данного множества конечно и равно девяти.

Пример. Множество решений уравнения $\sin x = 0$ бесконечно, поскольку имеет бесконечное множество решений.

Счетное множество – это бесконечное множество, элементы которого возможно пронумеровать натуральными числами.

Пример. Множество целых чисел является счетным, поскольку оно является бесконечным и его элементы можно пронумеровать:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	n	...
Число	0	1	-1	2	-2	3	-3	4	-4	...	$(-1)^n \cdot [n/2]$	...

В таблице показано, что любому натуральному числу n можно сопоставить целое число вычисляемое по формуле $(-1)^n \cdot [n/2]$, где $[n/2]$ – целая часть от деления натурального числа n на два.

Пример. Множество иррациональных чисел не является счетным, поскольку нумерацию всех его элементов осуществить нельзя.

Свойства счетных множеств

1. Любое подмножество счетного множества не более чем счетно (т.е. конечно или счетно).
2. Объединение конечного или счетного числа счетных множеств счетно.
3. Прямое произведение конечного числа счетных множеств счетно.
4. Множество всех конечных подмножеств счетного множества счетно.
5. Множество всех подмножеств счетного множества континуально (*от лат. continuum – непрерывное*) и, в частности, не является счетным.

Несчетное множество – бесконечное множество, которое не является счетным.

Мощность множества – характеристика множеств, обобщающее понятие количества (числа) элементов конечного множества.

Точная верхняя граница (верхняя грань) и точная нижняя граница (нижняя грань) – обобщение понятий максимума и минимума множества соответственно.

Точной (наименьшей) верхней гранью (границей), или супремумом (лат. supremum – самый высокий) подмножества упорядоченного множества, называется наименьший элемент, который равен или больше всех элементов множества. Другими словами, *супремум* – это наименьшая из всех верхних граней. Обозначается $\sup X$.

Точной (наибольшей) нижней гранью (границей), или инфимумом (лат. infimum – самый низкий) подмножества упорядоченного множества, называется наибольший элемент, который равен или меньше всех элементов множества. Другими словами, *инфимум* – это наибольшая из всех нижних граней. Обозначается $\inf X$.

Пример. Найдем верхнюю и нижнюю границы множеств $X = [1; 3)$ и $Y = (1; 2) \cup (3; 5)$.

$$\inf X = 1, \sup X = 3, \inf Y = 1, \sup Y = 5.$$

1.4. Множество действительных чисел

Множество действительных чисел R можно рассматривать как совокупность всех рациональных и иррациональных чисел.

1.4.1. Основные свойства вещественных чисел

I. Сложение и умножение вещественных чисел

Для любой пары a и b вещественных чисел определены и притом единственным образом два вещественных числа $a+b$ и ab , называемые соответственно их *суммой* и *произведением*, причем имеют место следующие свойства:

Каковы бы ни были числа a , b и c справедливы следующие соотношения:

1°. $a+b=b+a$ (переместительное свойство).

2°. $a+(b+c)=(a+b)+c$ (сочетательное свойство).

3°. $a \cdot b = b \cdot a$ (переместительное свойство).

4°. $a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c$ (сочетательное свойство).

5°. $(a+b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c$ (распределительное свойство).

6°. Существует единственное число 0 такое, что $a+0=a$ для любого числа a .

7°. Для любого числа a существует такое число $(-a)$, что $a+(-a)=0$.

8°. Существует единственное число $1 \neq 0$ такое, что для любого числа a имеет место равенство $a \cdot 1 = a$.

9°. Для любого числа $a \neq 0$ существует такое число a^{-1} такое, что $a \cdot a^{-1} = 1$. Число a^{-1} обозначают символом $\frac{1}{a}$.

II. Сравнение вещественных чисел

Для любых двух вещественных чисел a и b справедливо одно из отношений: $a=b$ (a равно b), $a>b$ (a больше b) или $b>a$.

10°. Если $a=b$ и $b=c$, то $a=c$ (транзитивность).

Каковы бы ни были числа a , b и c справедливы следующие соотношения:

11°. Если $a>b$ и $b>c$, то $a>c$ (транзитивность).

12°. Если $a > b$, то $a + c > b + c$.

13°. Если $a > b$ и $c > 0$, то $a \cdot c > b \cdot c$.

14°. Если $a > b$ и $c < 0$, то $a \cdot c < b \cdot c$.

Каковы бы ни были числа a , b , c и d справедливы следующие соотношения:

15°. Если $a > b$ и $c > d$, то $a + c < b + d$.

16°. Если $a > b$ и $c > d$ ($a > 0$, $b > 0$, $c > 0$, $d > 0$), то $a \cdot c < b \cdot d$.

17°. Если $a > b$ и $c < d$, то $a - c < b - d$.

18°. Если $a > b > 0$, то $\frac{1}{a} < \frac{1}{b}$.

19°. Если $a > b > 0$ $n \in \mathbb{N}$, то $a^n > b^n$.

Эти соотношения называются *неравенствами*. Неравенства вида $a < b$ и $a > b$ называются *строгими неравенствами*; неравенства $a \leq b$ и $a \geq b$ – *нестрогими*.

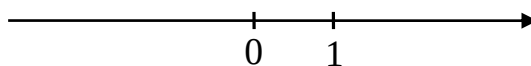
III. Непрерывность множества вещественных чисел

20°. Пусть X и Y – два множества, состоящие из вещественных чисел. Тогда, если для любых чисел $x \in X$ и $y \in Y$ выполняется неравенство $x \leq y$, то существует хотя бы одно число c такое, что для всех чисел x и y выполняются неравенства $x \leq c \leq y$.

1.4.2. Изображение действительных чисел

Действительные числа можно изображать точками числовой оси.

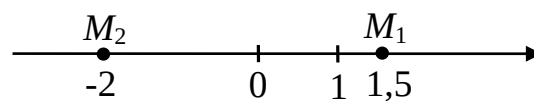
Числовой осью (координатной прямой) называется прямая, на которой выбраны начальная точка (начало), положительное направление (обозначено стрелкой) и отрезок, длина которого равна единице (масштабная единица). Направление, противоположное положительному направлению числовой оси, называется *отрицательным*.



Если действительное число $x > 0$, то оно изображается точкой числовой оси, находящейся от начала на расстоянии x в положительном направлении. Если действительное число $x < 0$, то оно изображается точкой числовой оси, находящейся от начала на расстоянии равном $(-x)$ в отрицательном направлении. Число 0 изображается начальной точкой.

Действительное число x называется *координатой точки M числовой оси*. Если x является координатой точки M , то принято писать $M(x)$.

Пример. На числовой оси отметить точки $M_1(1,5)$ и $M_2(-2)$.



1.4.3. Абсолютная величина действительного числа

Абсолютной величиной (или *модулем*) действительного числа x называется само число x , если $x \geq 0$, или число $-x$, если $x < 0$.

Абсолютная величина числа x обозначается символом $|x|$. Таким образом,

$$|x| = \begin{cases} x, & \text{при } x \geq 0, \\ -x, & \text{при } x < 0. \end{cases}$$

Пример. Вычислить абсолютную величину чисел: -2, 0, 3.

По определению абсолютной величины, имеем $|-2| = 2$, $|0| = 0$, $|3| = 3$.

Свойства абсолютной величины

1°. $|x| \geq 0$.

2°. $|x| = |-x|$.

3°. $-|x| \leq x \leq |x|$.

4°. Пусть $\varepsilon > 0$, тогда неравенства $|x| \leq \varepsilon$ и $-\varepsilon \leq x \leq \varepsilon$ равносильны.

5°. $|x + y| \leq |x| + |y|$.

6°. $|x - y| \leq |x| + |y|$.

7°. $|x - y| \geq |x| - |y|$.

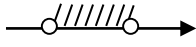
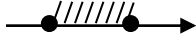
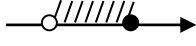
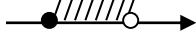
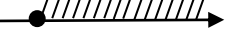
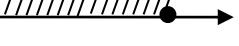
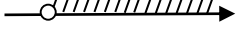
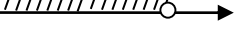
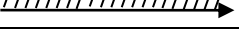
8°. $|x \cdot y| = |x| \cdot |y|$.

$$9^\circ. \left| \frac{x}{y} \right| = \frac{|x|}{|y|}, y \neq 0.$$

$$10^\circ. |x|^2 = x^2.$$

1.4.4. Числовые промежутки

Пусть a и b – действительные числа, причем $a < b$. Определим числовые промежутки, как подмножества всех действительных чисел, имеющих следующий вид:

№	Вид промежутка	Геометрическое изображение	Обозначение	Запись с помощью неравенств
1.	Интервал		$(a; b)$	$a < x < b$
2.	Отрезок		$[a; b]$	$a \leq x \leq b$
3.	Полуинтервал		$(a; b]$	$a < x \leq b$
4.	Полуинтервал		$[a; b)$	$a \leq x < b$
5.	Луч		$[a; +\infty)$	$x \geq a$
6.	Луч		$(-\infty; b]$	$x \leq b$
7.	Открытый луч		$(a; +\infty)$	$x > a$
8.	Открытый луч		$(-\infty; b)$	$x < b$
9.	Интервал		$(-\infty; +\infty)$	$x \in R$

1.5. Понятие комплексного числа

Комплексные числа, как квадратные корни из отрицательных чисел, впервые были получены в первой половине XVI века известным итальянским математиком Никколо Тартальей (1499 – 1557) в связи с выводением им формулы вычисления корней кубических уравнений. Идея использования таких чисел была поддержана Джероламо Кардано (1501 – 1576), в предложенном им оригинальном методе нахождения корней многочленов вида $ax^3 + bx^2 + cx + d$ (формула Кардано).

Попытки сравнить комплексные числа между собой на больше – меньше и поместить их на числовую ось не увенчались успехом. Великий Рене Декарт (1596-1650) в своих работах вообще отверг существование таких чисел и с его подачи их стали называть «мнимыми».

Однако в XVIII веке к комплексным числам снова обратились. Были введены операции над комплексными числами: сложение, вычитание, умножение и деление, появилась тригонометрическая форма записи комплексных чисел и Абрахамом де Муавром (1667 - 1754) решена задача возведения в натуральную степень и извлечения корней n -ой степени из комплексного числа.

Большой вклад в теорию комплексных чисел внес Леонард Эйлер (1707 – 1783), который ввёл общепризнанное обозначение i и ввел операции для показательной формы комплексных чисел. Само же понятие «комплексного числа» было дано лишь в 30–х годах XIX века Карлом Фридрихом Гауссом (1777 – 1855).

Уникальные свойства комплексных чисел и функций нашли широкое применение для решения многих практических задач в различных областях математики, физики и техники: в обработке сигналов, теории управления, электродинамике, теории колебаний, теории упругости и механике деформируемого твердого тела, квантовой физики многих других областях.

1.5.1. Определение комплексного числа

Комплексным числом z называется упорядоченная пара вещественных чисел $(x; y)$.

Число x называется действительной частью комплексного числа z или $Re\ z$, число y называется мнимой частью комплексного числа z или $Im\ z$.

Если $y = 0$, то комплексные числа вида $(x; 0)$ отождествляются с действительными числами, т.е. $(x; 0) = x$.

Пример. $(5; 0) = 5$.

Множество всех вещественных чисел (R) является подмножеством множества комплексных чисел (C), т.е. $N \subset Z \subset Q \subset R \subset C$.

Комплексное число вида $(0; 1)$ называется *мнимой единицей* и обозначается буквой i .

Пример. $(0; 1) = i$.

В *алгебраической форме* всякое комплексное число можно представить в виде: $z = x + yi$.

Пример. $(0; 7) = 7i$; $(-2; 5) = -2 + 5i$; $(3; -4) = 3 - 4i$.

Пример. Для чисел $z_1 = 7$, $z_2 = 6i$, $z_3 = 8 - i$, $z_4 = -17 + 2i$ определим действительную и мнимую части:

$$\operatorname{Re}(z_1) = 7; \operatorname{Im}(z_1) = 0; \quad \operatorname{Re}(z_3) = 8; \operatorname{Im}(z_3) = -1;$$

$$\operatorname{Re}(z_2) = 0; \operatorname{Im}(z_2) = 6; \quad \operatorname{Re}(z_4) = -17; \operatorname{Im}(z_4) = 2.$$

Два комплексных числа, отличающихся только знаком перед мнимой частью, называются *комплексно сопряженными*.

Пример. Для чисел $z_1 = 10$, $z_2 = 14i$, $z_3 = 13 - 16i$, $z_4 = -1 + i$ найдем комплексно сопряженные числа:

$$z_1 = 10 = 10 + 0i \Rightarrow \bar{z}_1 = 10; \quad z_3 = 13 - 16i \Rightarrow \bar{z}_3 = 13 + 16i;$$

$$z_2 = 14i = 0 + 14i \Rightarrow \bar{z}_2 = -14i; \quad z_4 = -1 + i \Rightarrow \bar{z}_4 = -1 - i.$$

Два комплексных числа, отличающихся знаками действительной и мнимой частей, называются *противоположными*.

Пример. Для чисел $z_1 = 14i$, $z_2 = 8 - 5i$ найдем противоположные.

$$-z_1 = -14i; \quad -z_2 = -8 + 5i.$$

Два комплексных числа z_1 и z_2 называются *равными* тогда и только тогда, когда равны их действительные и мнимые части:

$$z_1 = z_2 \Leftrightarrow \begin{cases} x_1 = x_2 \\ y_1 = y_2 \end{cases}.$$

1.5.2. Геометрическое изображение комплексных чисел

Всякое комплексное число $z = x + iy$ можно изобразить точкой $M(x; y)$ плоскости Oxy такой, что $x = \operatorname{Re} z$, $y = \operatorname{Im} z$. И наоборот, каждую точку $M(x; y)$ координатной плоскости можно рассматривать как образ комплексного числа $z = x + iy$.

Плоскость, на которой изображаются комплексные числа, называется *комплексной плоскостью*. Ось абсцисс называется *действительной осью*, а ось ординат – *мнимой*.

Комплексное число $z = x + yi$ можно задавать с помощью радиус-вектора (рис. 2.1).

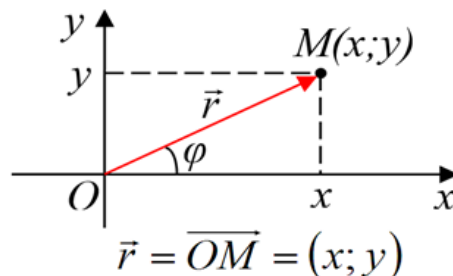


Рис. 1.1. Графическое изображение комплексного числа.

Пример. На комплексной плоскости изобразим векторами комплексные числа: -1 ; $-2i$; $3 + 2i$; $-2 + i$ (рис. 2.2).

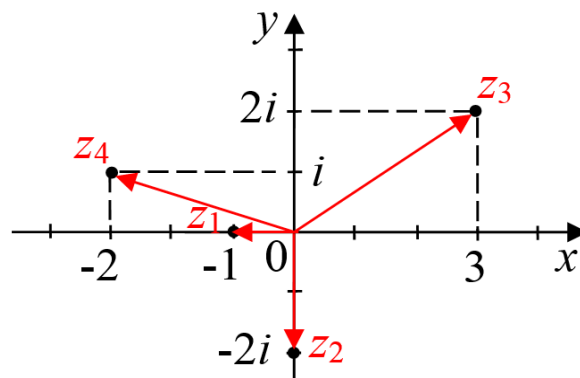


Рис. 1.2. Изображение чисел -1 ; $-2i$; $3 + 2i$; $-2 + i$.

1.5.3 Модуль и аргумент комплексного числа

Длина вектора, изображающего комплексное число z называется *модулем* этого числа и обозначается $|z|$.

Пример. Найдем модули комплексных чисел: $-5i$; $12 + 9i$; $-7 + 2i$.

$$|-5i| = 5; \quad |12+9i| = \sqrt{12^2+9^2} = \sqrt{225} = 15; \quad |-7+2i| = \sqrt{7^2+2^2} = \sqrt{53}.$$

Величина угла между положительным направлением действительной оси Ох и радиус-вектором числа z называется *аргументом* этого числа и обозначается $Arg\ z$.

Аргумент $\varphi = Arg\ z$ определяется из формул:

$$\cos \varphi = \frac{x}{r}; \quad \sin \varphi = \frac{y}{r}; \quad \tan \varphi = \frac{y}{x}.$$

Пример. Найти аргументы чисел: $z_1 = -6i$; $z_2 = 3 + 4i$.

$$\cos \varphi_1 = \frac{x_1}{r_1} = \frac{0}{6} = 0, \text{ так как } x = 0, \text{ а } y > 0, \text{ то } ARG(\varphi_1) = -\arccos 0 = -\frac{\pi}{2}.$$

$$\tan \varphi_2 = \frac{y_2}{x_2} = \frac{4}{3}, \text{ так как } x > 0 \text{ и } y > 0, \text{ то } ARG(\varphi_2) = \arctg \frac{4}{3}.$$

1.6. Действия над комплексными числами

1.6.1. Сумма и разность комплексных чисел

Пусть $z_1 = (x_1; y_1)$ и $z_2 = (x_2; y_2)$ – два комплексных числа.

Суммой двух комплексных чисел z_1 и z_2 называется число $z = z_1 + z_2 = (x_1 + x_2; y_1 + y_2)$.

Пример. Найдем сумму чисел $z_1 = (-5; 4)$ и $z_2 = (2; 3)$.

$$z_1 + z_2 = (-5 + 2; 4 + 3) = (-3; 7).$$

Для комплексных чисел, представленных в алгебраической форме, сложение можно совершать как над многочленами.

Пример. Найдем сумму чисел $z_1 = 14 - 9i$ и $z_2 = -20 - 2i$.

$$z_1 + z_2 = 14 - 9i - 20 - 2i = -6 - 11i.$$

Разность комплексных чисел $z_1 = (x_1; y_1)$ и $z_2 = (x_2; y_2)$ определяется как сумма числа z_1 и числа противоположного z_2 :

$$z = z_1 + (-z_2) = (x_1 - x_2; y_1 - y_2).$$

Пример. Найдем разность чисел $z_1 = -13 + 16i$ и $z_2 = -1 + 5i$.

$$z_1 - z_2 = (-13 + 16i) - (-1 + 5i) = -13 + 16i + 1 - 5i = -12 + 11i.$$

1.6.2. Произведение комплексных чисел

Пусть $z_1 = (x_1; y_1)$ и $z_2 = (x_2; y_2)$ – два комплексных числа.

Произведением комплексных чисел $z_1 = (x_1; y_1)$ и $z_2 = (x_2; y_2)$ называется число:

$$z = z_1 \cdot z_2 = (x_1 x_2 - y_1 y_2; x_1 y_2 + x_2 y_1).$$

Пример. Найдем произведение чисел $z_1 = (1; 6)$ и $z_2 = (-3; 7)$.

$$z_1 \cdot z_2 = (1 \cdot (-3) - 6 \cdot 7; 1 \cdot 7 + (-3) \cdot 6) = (-45; -11).$$

Пример. Вычислим i^2 .

$$i^2 = i \cdot i = (0; 1) \cdot (0; 1) = (0 \cdot 0 - 1 \cdot 1; 0 \cdot 1 + 1 \cdot 0) = (-1; 0) = -1.$$

Для комплексных чисел, представленных в алгебраической форме, умножение также можно совершать как произведение многочленов.

Пример. Найдем произведение чисел $z_1 = 3 - 4i$ и $z_2 = 5 + i$.

$$\begin{aligned} z_1 \cdot z_2 &= (3 - 4i)(5 + i) = 15 + 3i - 20i - 4i^2 = 15 - 17i - 4 \cdot (-1) = \\ &= 15 - 17i + 4 = 19 - 17i. \end{aligned}$$

Пример. Вычислить $(3 + i)^3$.

$$\begin{aligned} (3 + i)^3 &= (3 + i)^2(3 + i) = (9 + 6i + i^2)(3 + i) = (8 + 6i)(3 + i) = \\ &= 24 + 8i + 18i + 6i^2 = 18 + 26i. \end{aligned}$$

1.6.3. Деление комплексных чисел

Пусть $z_1 = (x_1; y_1)$ и $z_2 = (x_2; y_2)$ – два комплексных числа.

Частным комплексных чисел $z_1 = (x_1; y_1)$ и $z_2 = (x_2; y_2)$ ($z_2 \neq 0$) называется число:

$$z = \left(\frac{x_1 x_2 + y_1 y_2}{x_2^2 + y_2^2}; \frac{x_2 y_1 - x_1 y_2}{x_2^2 + y_2^2} \right).$$

Пример. Найти частное чисел $z_1 = (14; -8)$ и $z_2 = (2; -4)$.

$$\begin{aligned} \frac{z_1}{z_2} &= \frac{(14; -8)}{(2; -4)} = \left(\frac{14 \cdot 2 + (-8) \cdot (-4)}{2^2 + (-4)^2}; \frac{2 \cdot (-8) - 14 \cdot (-4)}{2^2 + (-4)^2} \right) = \\ &= \left(\frac{28 + 32}{20}; \frac{-16 + 56}{20} \right) = \left(\frac{60}{20}; \frac{40}{20} \right) = (3; 2). \end{aligned}$$

Для комплексных чисел, представленных в алгебраической форме, деление также можно совершать, как произведение многочленов. Для этого необходимо

умножить числитель и знаменатель на число, комплексно сопряженное знаменателю, а затем упростить выражение.

Пример. Найти частное чисел $z_1 = -14 + 27i$ и $z_2 = 4 + 3i$.

$$\begin{aligned}\frac{z_1}{z_2} &= \frac{-14 + 27i}{4 + 3i} = \frac{(-14 + 27i)(4 - 3i)}{(4 + 3i)(4 - 3i)} = \frac{(-14) \cdot 4 + 27i \cdot 4 + 3i \cdot 14 - 3i \cdot 27i}{16 - 9i^2} = \\ &= \frac{-56 + 150i - 81i^2}{16 - 9 \cdot (-1)} = \frac{-56 + 150i - 81 \cdot (-1)}{16 + 9} = \frac{25 + 150i}{25} = \\ &= \frac{25}{25} + \frac{150i}{25} = 1 + 6i.\end{aligned}$$

1.6.4. Решение квадратных уравнений

При решении квадратных уравнений $ax^2 + bx + c = 0$ с вещественными коэффициентами a , b и c при отрицательном дискриминанте действительных корней нет. Однако в любом случае получатся два комплексно сопряженных корня.

Пример. Решим уравнение $4x^2 + 3 = 0$.

Сначала рассчитаем дискриминант: $D = b^2 - 4ac = 0^2 - 4 \cdot 4 \cdot 3 = -48$. Затем найдем корни уравнения:

$$\begin{aligned}x_{1,2} &= \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a}; \quad x_1 = \frac{0 - \sqrt{-48}}{2 \cdot 4} = \frac{-4\sqrt{-3}}{8} = \frac{-4\sqrt{3}i}{8} = -\frac{\sqrt{3}i}{2}; \\ x_2 &= \frac{0 + \sqrt{-48}}{2 \cdot 4} = \frac{4\sqrt{-3}}{8} = \frac{4\sqrt{3}i}{8} = \frac{\sqrt{3}i}{2}.\end{aligned}$$

Таким образом получим два корня: $x_1 = -\frac{\sqrt{3}i}{2}$; $x_2 = \frac{\sqrt{3}i}{2}$.

Пример. Решим уравнение $x^2 - 2x + 2 = 0$.

Рассчитаем дискриминант: $D = b^2 - 4ac = 2^2 - 4 \cdot 1 \cdot 2 = 4 - 8 = -4$. Найдем корни уравнения:

$$\begin{aligned}x_{1,2} &= \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a} \quad x_1 = \frac{-(-2) - \sqrt{-4}}{2 \cdot 1} = \frac{2 - 2\sqrt{-1}}{2} = \frac{2 - 2i}{2} = 1 - i; \\ x_2 &= \frac{-(-2) + \sqrt{-4}}{2 \cdot 1} = \frac{2 + 2\sqrt{-1}}{2} = \frac{2 + 2i}{2} = 1 + i.\end{aligned}$$

Таким образом получим два корня: $x_1 = 1 - i$; $x_2 = 1 + i$.

1.7. Тригонометрическая форма комплексных чисел

1.7.1. Понятие тригонометрической формы

По формулам $x = r \cos \varphi$, $y = r \sin \varphi$, связывающих полярные и прямоугольные координаты, получим тригонометрическую форму записи комплексного числа $z = x + iy$:

$$z = r(\cos \varphi + i \sin \varphi),$$

где r – модуль, а число φ – аргумент комплексного числа z (рис. 2.3).

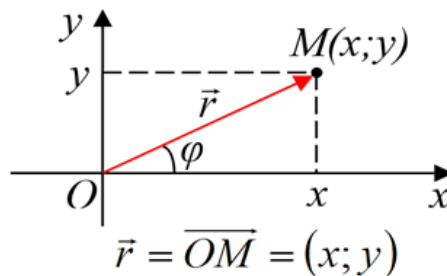


Рис. 1.3. Модуль и аргумент комплексного числа.

Модуль $r = |z|$ вычисляется по формуле $r = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Аргумент $\varphi = \text{Arg } z$ определяется из формул $\cos \varphi = \frac{x}{r}$, $\sin \varphi = \frac{y}{r}$, $\text{tg } \varphi = \frac{y}{x}$,

где

$$-\pi < \text{Arg } z \leq \pi, \quad \varphi = \text{Arg } z = \begin{cases} \text{arctg } \frac{y}{x}, & \text{при } x > 0, \\ \text{arctg } \frac{y}{x} + \pi, & \text{при } x < 0, y > 0, \\ \text{arctg } \frac{y}{x} - \pi, & \text{при } x < 0, y < 0. \end{cases}$$

Пример. Представить в тригонометрической форме комплексное число $z = 2 + 4i$.

Для комплексного числа $z = 2 + 4i$, где $\text{Re } z = x = 2 > 0$, $\text{Im } z = y = 4 > 0$, модуль равен: $|z| = |2 + 4i| = \sqrt{2^2 + 4^2} = \sqrt{4 + 16} = \sqrt{20} = 2\sqrt{5}$.

Рассчитаем аргумент $z = 2 + 4i$: $\varphi = \operatorname{Arg} z = \operatorname{arctg} \frac{4}{2} = \operatorname{arctg} 2$.

Следовательно, $z = 2 + 4i = 2\sqrt{5}(\cos(\operatorname{arctg} 2) + i \sin(\operatorname{arctg} 2))$.

1.7.2. Операции в тригонометрической форме

Рассмотрим действия над комплексными числами в тригонометрической форме.

Произведением комплексных чисел $z_1 = r_1(\cos \varphi_1 + i \sin \varphi_1)$ и $z_2 = r_2(\cos \varphi_2 + i \sin \varphi_2)$ называется число, определяемое равенством:

$$z = r_1 r_2 (\cos(\varphi_1 + \varphi_2) + i \sin(\varphi_1 + \varphi_2)).$$

Действительно, используя тригонометрические равенства, имеем

$$\begin{aligned} z_1 \cdot z_2 &= r_1(\cos \varphi_1 + i \sin \varphi_1) \cdot r_2(\cos \varphi_2 + i \sin \varphi_2) = \\ &= r_1 r_2 (\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 + i \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 + i \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 + i^2 \sin \varphi_1 \sin \varphi_2) = \\ &= r_1 r_2 ((\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - \sin \varphi_1 \sin \varphi_2) + i(\cos \varphi_1 \sin \varphi_2 + \sin \varphi_1 \cos \varphi_2)) = \\ &= r_1 r_2 (\cos(\varphi_1 + \varphi_2) + i \sin(\varphi_1 + \varphi_2)). \end{aligned}$$

Пример. Найдём произведение чисел $z_1 = 3(\cos 10^\circ + i \sin 10^\circ)$ и $z_2 = 2(\cos 40^\circ + i \sin 40^\circ)$.

$$\begin{aligned} z_1 \cdot z_2 &= 3(\cos 10^\circ + i \sin 10^\circ) \cdot 2(\cos 40^\circ + i \sin 40^\circ) = \\ &= 6(\cos(10^\circ + 40^\circ) + i \sin(10^\circ + 40^\circ)) = 6(\cos 50^\circ + i \sin 50^\circ). \end{aligned}$$

Частное комплексных чисел $z_1 = r_1(\cos \varphi_1 + i \sin \varphi_1)$ и $z_2 = r_2(\cos \varphi_2 + i \sin \varphi_2)$ ($z_2 \neq 0$) определяется как:

$$z = \frac{r_1}{r_2} (\cos(\varphi_1 - \varphi_2) + i \sin(\varphi_1 - \varphi_2)).$$

Действительно, используя тригонометрические равенства, имеем

$$z = \frac{z_1}{z_2} = \frac{r_1(\cos \varphi_1 + i \sin \varphi_1)}{r_2(\cos \varphi_2 + i \sin \varphi_2)} = \frac{r_1}{r_2} \frac{(\cos \varphi_1 + i \sin \varphi_1)(\cos \varphi_2 - i \sin \varphi_2)}{(\cos \varphi_2 + i \sin \varphi_2)(\cos \varphi_2 - i \sin \varphi_2)} =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{r_1}{r_2} \frac{(\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 - i^2 \sin \varphi_1 \sin \varphi_2) + (-i \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 + i \sin \varphi_1 \cos \varphi_2)}{\cos \varphi_2 \cos \varphi_2 - i^2 \sin \varphi_2 \sin \varphi_2} = \\
&= \frac{r_1}{r_2} \frac{(\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 + \sin \varphi_1 \sin \varphi_2) + i(\sin \varphi_1 \cos \varphi_2 - \cos \varphi_1 \sin \varphi_2)}{\cos \varphi_2 \cos \varphi_2 + \sin \varphi_2 \sin \varphi_2} = \\
&= \frac{r_1}{r_2} \frac{\cos(\varphi_1 - \varphi_2) + i \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{\cos^2 \varphi_2 + \sin^2 \varphi_2} = \frac{r_1}{r_2} (\cos(\varphi_1 - \varphi_2) + i \sin(\varphi_1 - \varphi_2)).
\end{aligned}$$

Пример. Найдем частное чисел $z_1 = 5\left(\cos \frac{\pi}{3} + i \sin \frac{\pi}{3}\right)$ и

$$z_2 = 7\left(\cos \frac{3\pi}{5} + i \sin \frac{3\pi}{5}\right).$$

Применим формулу для нахождения частного двух комплексных чисел, заданных в тригонометрической форме:

$$\begin{aligned}
\frac{z_1}{z_2} &= \frac{5\left(\cos \frac{\pi}{3} + i \sin \frac{\pi}{3}\right)}{7\left(\cos \frac{3\pi}{5} + i \sin \frac{3\pi}{5}\right)} = \frac{5}{7} \left(\cos \left(\frac{\pi}{3} - \frac{3\pi}{5} \right) + i \sin \left(\frac{\pi}{3} - \frac{3\pi}{5} \right) \right) = \\
&= \frac{5}{7} \left(\cos \left(\frac{\pi}{3} - \frac{3\pi}{5} \right) + i \sin \left(\frac{\pi}{3} - \frac{3\pi}{5} \right) \right) = \frac{5}{7} \left(\cos \left(-\frac{4\pi}{15} \right) + i \sin \left(-\frac{4\pi}{15} \right) \right) = \\
&= \frac{5}{7} \left(\cos \left(\frac{4\pi}{15} \right) - i \sin \left(\frac{4\pi}{15} \right) \right).
\end{aligned}$$

Возведение комплексного числа $z = r(\cos \varphi + i \sin \varphi)$ в натуральную степень n осуществляется по формуле *Муавра*:

$$z^n = r^n (\cos(n\varphi) + i \sin(n\varphi)).$$

Пример. Возведем число $-1 + i\sqrt{3}$ в двенадцатую степень.

Запишем число $z = -1 + i\sqrt{3}$ в тригонометрической форме, для этого вычислим модуль и аргумент комплексного числа z :

$$\operatorname{Re} z = x = -1 < 0, \operatorname{Im} z = y = \sqrt{3} > 0, r = |z| = \sqrt{(-1)^2 + (\sqrt{3})^2} = \sqrt{1+3} = 2,$$

$$\varphi = \operatorname{Arg} z = \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{3}}{-1} \right) + \pi = -\frac{\pi}{3} + \pi = \frac{2\pi}{3}.$$

Комплексное число в тригонометрической форме имеет вид

$$z = 2 \left(\cos \frac{2\pi}{3} + i \sin \frac{2\pi}{3} \right).$$

Применим формулу Муавра

$$\begin{aligned} z^{12} &= \left(2 \left(\cos \frac{2\pi}{3} + i \sin \frac{2\pi}{3} \right) \right)^{12} = 2^{12} \left(\cos \left(12 \cdot \frac{2\pi}{3} \right) + i \sin \left(12 \cdot \frac{2\pi}{3} \right) \right) = \\ &= 2^{12} \left(\cos \left(12 \cdot \frac{2\pi}{3} \right) + i \sin \left(12 \cdot \frac{2\pi}{3} \right) \right) = 4096 (\cos(8\pi) + i \sin(8\pi)) = \\ &= 4096(1 + i \cdot 0) = 4096. \end{aligned}$$

Извлечение из комплексного числа $z = r(\cos \varphi + i \sin \varphi)$ корня n -ой степени осуществляется по формуле

$$\sqrt[n]{z} = \sqrt[n]{r} \left(\cos \frac{\varphi + 2\pi k}{n} + i \sin \frac{\varphi + 2\pi k}{n} \right), \quad k = 0, 1, 2, \dots, n-1.$$

Пример. Из числа $\sqrt{3} + i$ извлечь корень третьей степени.

Запишем число $z = \sqrt{3} + i$ в тригонометрической форме, для этого вычислим модуль и аргумент комплексного числа z :

$$\operatorname{Re} z = x = \sqrt{3} > 0, \quad \operatorname{Im} z = y = 1 > 0,$$

Тогда модуль комплексного числа будет равен

$$r = |z| = \sqrt{(\sqrt{3})^2 + 1^2} = \sqrt{3+1} = 2, \quad \text{а аргумент определим, как}$$

$$\varphi = \operatorname{Arg} z = \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{3}}{1} \right) = \frac{\pi}{3}.$$

Тогда комплексное число $\sqrt{3} + i$ в тригонометрической форме имеет вид

$$z = 2 \left(\cos \frac{\pi}{3} + i \sin \frac{\pi}{3} \right).$$

Таким образом,

$$\sqrt[3]{\sqrt{3}+i} = \sqrt[3]{2} \left(\cos \frac{\frac{\pi}{3} + 2\pi k}{3} + i \sin \frac{\frac{\pi}{3} + 2\pi k}{3} \right), \quad k = 0, 1, 2.$$

Для $k=0, 1, 2$ получим три корня:

если $k = 0$, тогда

$$z_1 = \sqrt[3]{z} = \sqrt[3]{2} \left(\cos \frac{\frac{\pi}{3} + 2\pi \cdot 0}{3} + i \sin \frac{\frac{\pi}{3} + 2\pi \cdot 0}{3} \right) = \sqrt[3]{2} \left(\cos \frac{\pi}{9} + i \sin \frac{\pi}{9} \right);$$

если $k = 1$, тогда

$$z_2 = \sqrt[3]{z} = \sqrt[3]{2} \left(\cos \frac{\frac{\pi}{3} + 2\pi \cdot 1}{3} + i \sin \frac{\frac{\pi}{3} + 2\pi \cdot 1}{3} \right) = \sqrt[3]{2} \left(\cos \frac{7\pi}{9} + i \sin \frac{7\pi}{9} \right);$$

если $k = 2$, тогда

$$z_3 = \sqrt[3]{z} = \sqrt[3]{2} \left(\cos \frac{\frac{\pi}{3} + 2\pi \cdot 2}{3} + i \sin \frac{\frac{\pi}{3} + 2\pi \cdot 2}{3} \right) = \sqrt[3]{2} \left(\cos \frac{13\pi}{9} + i \sin \frac{13\pi}{9} \right).$$

1.8. Показательная форма

Используя формулу Эйлера $e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi$, комплексное число $z = r(\cos \varphi + i \sin \varphi)$ можно записать показательной форме

$$z = re^{i\varphi},$$

где r – модуль, а число φ – аргумент комплексного числа z .

Пример. Представим в показательной форме число $z = -4 - 3i$.

Для комплексного числа $z = -4 - 3i$, где

$$\operatorname{Re} z = x = -4 < 0, \quad \operatorname{Im} z = y = -3 < 0,$$

модуль равен $|z| = |-4 - 3i| = \sqrt{(-4)^2 + (-3)^2} = \sqrt{16 + 9} = \sqrt{25} = 5,$

а значение аргумента $\varphi = \operatorname{Arg} z = \operatorname{arctg} \frac{-3}{-4} = \operatorname{arctg} \frac{3}{4} - \pi.$

Следовательно, $z = -4 - 3i = 5e^{i\left(\arctg\frac{3}{4}-\pi\right)}$.

Алгебраические операции над комплексными числами в показательной форме выполняются схоже с операциями в тригонометрической форме.

Произведение комплексных чисел $z_1 = r_1 e^{i\varphi_1}$ и $z_2 = r_2 e^{i\varphi_2}$ равно

$$z_1 z_2 = r_1 r_2 e^{i(\varphi_1 + \varphi_2)}.$$

Частное комплексных чисел $z_1 = r_1 e^{i\varphi_1}$ и $z_2 = r_2 e^{i\varphi_2}$ можно представить, как

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{r_1}{r_2} e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)}.$$

Возведение в натуральную степень и извлечение корня числа $z = r e^{i\varphi}$ также выполняются по формулам Муавра:

$$z^n = r^n e^{in\varphi}, \quad \sqrt[n]{z} = \sqrt[n]{r} e^{i\frac{\varphi + 2\pi k}{n}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, n-1.$$

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое множество? Как определяется подмножество для данного множества?
2. Приведите примеры множеств, являющихся подмножествами других множеств.
3. Какие операции над множествами вы знаете?
4. Каким образом можно иллюстрировать операции над множествами с помощью диаграмм?
5. Приведите перечень основных числовых множеств. Какие числовые множества являются подмножествами других числовых множеств?
6. Чем отличаются счетные множества от несчетных? Приведите примеры счетных и несчетных множеств.
7. Как определить точную верхнюю и точную нижнюю границы числовых множеств? Приведите примеры нахождения точной верхней и нижней границ множества.
8. Какие операции над множеством действительных чисел определены в теории множеств? Приведите примеры выполнения этих операций.
9. Перечислите основные свойства действительных чисел. Приведите

примеры, иллюстрирующие эти свойства.

10. Как определяется абсолютное значение действительных чисел?

Перечислите свойства абсолютного значения действительных чисел.

11. Каким образом можно изобразить действительные числа геометрически?

12. Какие виды промежутков используются для действительных чисел?

Как они обозначаются? Приведите примеры.

13. Как понимают абсолютную величину действительного числа? Какие свойства абсолютной величины вы знаете?

14. Какие числовые промежутки бывают?

15. Дайте определение комплексного числа. Как обозначается число $\sqrt{-1}$?

16. Каким образом представляются комплексные числа в алгебраической форме? Приведите примеры.

17. Как находятся противоположные и комплексно сопряженные числа?

18. Как определяются модуль и аргумент комплексного числа?

19. Расскажите об особенностях графического изображения комплексных чисел, заданных в алгебраической, тригонометрической и показательной формах.

20. Какие действия определены над комплексными числами в алгебраической форме?

21. Каким образом осуществляется решение квадратных уравнений с отрицательным дискриминантом? Какие корни получаются в результате решения таких уравнений?

22. Приведите примеры нахождения произведения, частного комплексных чисел в тригонометрической форме.

23. Каким образом комплексные числа в тригонометрической форме возводятся в натуральную степень и из них извлекаются корни натуральной степени?

24. Приведите примеры нахождения произведения, частного комплексных чисел в показательной форме. Каким образом комплексные числа в показательной форме возводятся в натуральную степень и из них извлекаются корни натуральной степени?

Глава 2. Основы теории чисел

Теория чисел – это раздел математики, в котором исторически изучаются свойства целых чисел. Однако в современной теории чисел рассматриваются и другие типы чисел, например, алгебраические или трансцендентные, а также функции различного происхождения, которые связаны с арифметикой целых чисел и их обобщений.

В исследованиях по теории чисел, наряду с понятиями арифметики и алгебры применяются методы аналитической геометрии, алгебры, математического анализа, теории вероятностей. В свою очередь, методы теории чисел широко применяются в алгебре, математическом анализе, вычислительной математике, криптографии, теории информации, программировании, при разработке микросхем.

Среди основных тематических направлений элементарной теории чисел в настоящее время можно выделить следующие: теорию делимости целых чисел, теорию сравнений, цепные дроби, диафантовы уравнения, аналитическую и алгебраическую теорию чисел.

Большой вклад в развитие теории чисел внесли известнейшие математики. Это пифагорейцы Евклид и Диофант Александрийский, древнекитайский ученый Сунь Цзы, средневековые индийские математики Ариабхата, Брахмагупта и Бхаскары. Теорией чисел также занимались выдающиеся ученые: Пьер Ферма, Леонард Эйлер, Карл Фридрих Гаусс, Густав Лежён Дирихле, Пафнутий Львович Чебышев, Андрей Андреевич Марков, Давид Гильберт, Георгий Феодосьевич Вороной, Герман Вейль, Иван Матвеевич Виноградов.

В теорию чисел входят четыре основных раздела: элементарная, аналитическая, алгебраическая и геометрическая теории. В нашей главе мы рассмотрим только некоторые понятия из двух основных направлений элементарной теории чисел: теории делимости и теории сравнений.

2.1. Основные понятия теории чисел

Теория чисел занимается изучением свойств целых чисел.

Целыми будем называть числа натурального ряда 1, 2, 3, ... (положительные целые), числа им противоположные -1, -2, -3, ... (отрицательные целые) и 0 (ноль).

Сумма, разность и произведение двух целых a и b будут также целыми, но частное от деления a на b , если b не равно нулю, может быть, как целым, так и дробным.

В случае, когда частное от деления a на b – целое, обозначая его буквою d , имеем $a = b \cdot d$, говорят, что a *делится* на b или что b *делит* a . При этом a называем *кратным* числа b и b – *делителем* числа a .

Пример. Найти четыре числа, кратные числу 12.

Таковыми числами могут быть числа, которые делятся на 12, например, -24, 60, 804, 14808.

Пример. Определить все делители числа 30.

Выпишем все числа, на которые нацело делится число 30 в порядке возрастания: -30, -15, -10, -6, -5, -3, -2, -1, 1, 2, 3, 5, 6, 10, 15, 30.

Имеют место следующие теоремы делимости.

Теорема 7.1. Если a кратно m , m кратно b , то a кратно b .

Пример. Число 1716 кратно 156, а 156 кратно 13, значит 1716 кратно 13.

Теорема 7.2. Если в равенстве вида $k + 1 + \dots + n = p + q + \dots + b$ относительно всех членов, кроме какого-либо одного известно, что они кратны b , то и этот один член кратен b .

Пример. В равенстве $204 + 238 + 179 + 187 + 119 = 153 + 765$ все числа левой части 204, 238, 179, 187, 119 и справа 153 очевидно делятся на 17, следовательно, 765 тоже делится на 17.

3. Всякое целое a представляется единственным способом через положительное целое b в виде: $a = bq + r$, где $0 \leq r < b$.

Пример. Число -3577 единственным способом можно представить через положительное число 49 в виде: $-3577 = 49 \cdot (-73)$.

2.2. Делители и кратные

2.2.1. Общий наибольший делитель

Всякое целое, делящее одновременно целые $a, b, \dots, l$, называется их *общим делителем*. Наибольший из общих делителей называется *наибольшим общим делителем* и обозначается $(a, b, \dots, l)$.

Пример. Число -7 является общим делителем чисел $210, -1925, 770, 3115$. Однако, наибольший общий делитель $35 = (210, -1925, 770, 3115)$.

Если $(a, b, \dots, l) = 1$, то $a, b, \dots, l$ называются *взаимно простыми*.

Если каждое из чисел $a, b, \dots, l$ взаимно просто с каждым другим из них, то $a, b, \dots, l$ называются *попарно простыми*.

Пример. Числа $21, 25, 15, 36$ – взаимно простые (попарно простыми не являются). Числа $33, 25, 67, 131$ – попарно простые (одновременно взаимно простые).

Рассмотрим общие делители двух чисел.

Если a кратно b , то совокупность общих делителей чисел a и b совпадает с совокупностью делителей одного b ; в частности, $(a, b) = b$.

Пример. Числа $1, 3, 7, 21$ совокупность общих делителей чисел 21 и 357 . Это совпадает с совокупностью делителей числа 21 .

Если $a = b \cdot q + c$, то совокупность общих делителей чисел a и b совпадает с совокупностью общих делителей чисел b и c ; в частности,

$$(a, b) = (b, c).$$

Пример. Если $150 = 18 \cdot 7 + 24$, то числа $1, 2, 3, 6$ совокупность общих делителей чисел 150 и 18 , числа $1, 2, 3, 6$ совокупность общих делителей чисел 18 и 24 .

Отсюда $(150, 18) = 6$ и $(18, 24) = 6$.

2.2.2. Алгоритм Евклида

Для отыскания общего наибольшего делителя, а также для вывода его важнейших свойств применяется *алгоритм Евклида*.

Пусть a и b – положительные целые.

Находим ряд равенств:

$$a = bq_1 + r_2,$$

$$b = r_2q_2 + r_3,$$

$$r_2 = r_3q_3 + r_4,$$

... ..

$$r_{n-2} = r_{n-1}q_{n-1} + r_n,$$

$$r_{n-1} = r_nq_n.$$

Тогда $(a, b) = r_n$ - последнему не равному нулю остатку

Пример.

Применим алгоритм Эвклида к отысканию $(525, 231)$. Для отыскания коэффициентов ряда равенств используем последовательное деление чисел:

$$\begin{array}{r}
 525 \quad | \quad 231 \\
 \hline
 462 \quad | \quad 2 \\
 \hline
 231 \quad | \quad 63 \\
 \hline
 189 \quad | \quad 3 \\
 \hline
 63 \quad | \quad 42 \\
 \hline
 42 \quad | \quad 1 \\
 \hline
 42 \quad | \quad 21 \\
 \hline
 42 \quad | \quad 2 \\
 \hline
 \end{array}$$

Таким образом, составим ряд равенств:

$$525 = 231 \cdot 2 + 63;$$

$$231 = 63 \cdot 3 + 42;$$

$$63 = 42 \cdot 1 + 21;$$

$$42 = 21 \cdot 2.$$

Последний не равный нулю остаток $r_4 = 21$. Значит, наибольший общий делитель $(525, 231) = 21$.

2.2.3. Свойства делителей

1. Если $(a, b) = 1$, то $(ac, b) = (c, b)$.
2. Если $(a, b) = 1$ и ac делится на b , то c делится на b .
3. Если каждое $a_1, a_2, \dots, a_n$ взаимно просто с каждым $b_1, b_2, \dots, b_n$, то и произведение $a_1a_2 \dots a_n$ взаимно просто с произведением $b_1b_2 \dots b_n$.

4. Чтобы найти общий наибольший делитель чисел $a_1, a_2, \dots, a_n$, составляем ряд чисел:

$$d_1 = (a_1, a_2), d_2 = (a_2, d_1), d_3 = (a_3, d_2), \dots, d_n = (a_n, d_{n-1}).$$

Тогда d_n и будет общим наибольшим делителем чисел $a_1, a_2, \dots, a_n$.

Пример. Найдем общий наибольший делитель чисел 120, 180, 72, 150.

$$d_1 = (120, 180) = 60, d_2 = (72, 60) = 12, d_3 = (150, 12) = 6.$$

Таким образом, $(120, 180, 72, 150) = 6$.

2.2.4. Общее наименьшее кратное

Всякое целое, кратное всех данных чисел, называется их общим кратным.

Наименьшее положительное общее кратное называется общим наименьшим кратным.

Пример. Число 3600 является общим кратным чисел 15, 6, 18, 9. Однако, общее наименьшее кратное $[15, 6, 18, 9] = 90$.

Общие кратные двух чисел совпадают с кратными их общего наименьшего кратного.

Пример. Для чисел 15 и 6 общие кратные 30, 60, 90, 120, ... совпадают с кратными их общего наименьшего кратного 30.

Общее наименьшее кратное двух чисел равно их произведению, делённому на их общий наибольший делитель.

Пример. Найдем наименьше общее кратное для чисел 525, 231.

$$[525, 231] = 525 \cdot 231 / (525, 231) = 121275 / 21 = 5775.$$

Алгоритм нахождения наименьших общих кратных нескольких чисел состоит в последовательном расчете, аналогично отысканию наибольшего общего делителя.

Пример. Найдем наименьше общее кратное для чисел 120, 180, 72, 150.

$$[120, 180] = 120 \cdot 180 / (120, 180) = 120 \cdot 180 / 60 = 360;$$

$$[360, 72] = 360 \cdot 72 / (360, 72) = 360 \cdot 72 / 72 = 360;$$

$$[360, 150] = 360 \cdot 150 / (360, 150) = 360 \cdot 150 / 30 = 1800.$$

2.3. Простые числа

Число, делящееся только на себя и единицу, называется *простым числом*.

Пример. Числа 1, 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19 являются простыми.

Свойства простых чисел

1. Число 1 имеет только один положительный делитель, равный 1.
2. Наименьший отличный от единицы делитель целого, большего единицы, есть число простое.
3. Наименьший отличный от единицы делитель составного числа a не превосходит $a^{1/2}$.
4. Число простых чисел бесконечно велико.

2.2.1. Решето Эратосфена

Для составления таблицы простых чисел, не превосходящих данного числа, существует простой способ, называемый *решетом Эратосфена*:

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10,
11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20,
21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30,
31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, ...

Предложим алгоритм составления решета Эратосфена.

1. Выпишем список чисел 1, 2, 3, ... до заданного числа.
 2. Выделяем первое после единицы число 2 и вычеркиваем все последующие числа, кратные 2.
 3. Выделяем следующее не вычеркнутое число 3 и вычеркиваем все последующие числа, кратные 3.
-
4. Повторяем эти действия для чисел 5, 7, ... и всех не вычеркнутых в ходе предыдущих действий чисел.
 5. Числа, оставшиеся в списке не вычеркнутыми, составляют *множество всех простых чисел* в заданном промежутке.

2.3.2. Простые числа Ферма и Мерсенна

Простое число называется *числом Ферма*, если оно имеет вид $2^m + 1$.

В 1650 году Пьер Ферма предположил, что числа вида $F_n = 2^{2^n} + 1$, $n \geq 0$ простые для любого n . Однако Леонард Эйлер в 1732 г. обнаружил, что $F_5 = 4294967297$ – составное число: $4294967297 = 641 \cdot 6700417$. Более того, в настоящее время при $n \geq 5$ не известно ни одного простого числа Ферма.

Простые числа вида $2^n - 1$, где n – простое число, называются *простыми числами Мерсенна*.

Числа $M_2=3$, $M_3=7$, $M_5=31$, $M_7=127$, M_{13} , M_{17} и M_{19} – простые. В 1772 г. Леонард Эйлер установил простоту числа M_{31} , а Иван Михеевич Первушин в 1883 г. – простоту числа M_{61} . В 2002г. найдено число $M_{13\,466\,917}$. Это 39-ое известное число Мерсенна.

2.3.3. Каноническое разложение натурального числа

Произвольное натуральное число $a > 1$ можно представить в виде произведения простых чисел. Это представление однозначно с точностью до порядка сомножителей.

Пример. Число 518700 можно представить в виде

$$2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 13 \cdot 19.$$

Каноническим разложением натурального числа a называется запись

$$a = p_1^{\alpha_1} \cdot p_2^{\alpha_2} \cdot p_3^{\alpha_3} \cdot \dots \cdot p_k^{\alpha_k}$$

Пример. Представим число 518700 в каноническом виде:

$$2^2 \cdot 3 \cdot 5^2 \cdot 7 \cdot 13 \cdot 19.$$

Каноническое разложение натурального числа можно использовать для нахождения общего наименьшего кратного и общего наибольшего делителя чисел.

Пример. Найти $(18900, 48510)$ и $[18900, 48510]$.

Разложим канонически $18900 = 2^2 \cdot 3^3 \cdot 5^2 \cdot 7$; $48510 = 2 \cdot 3^2 \cdot 5 \cdot 7^2 \cdot 11$.

Тогда $(18900, 48510) = 2 \cdot 3^2 \cdot 5 \cdot 7$; $[18900, 48510] = 2^2 \cdot 3^3 \cdot 5^2 \cdot 7^2 \cdot 11$.

2.4. Функции теории чисел

2.4.1. Целая и дробная части числа

Рассмотрим функции, которые изучаются в теории чисел. Пусть x – произвольное действительное число.

Целой частью числа x называется наибольшее целое число, не превосходящее x .

Целая часть числа x обозначается через $[x]$.

Пример. Найдем целые части чисел.

$$[2, 4] = 2, \quad [5] = 5, \quad [-3, 7] = -4.$$

Дробной частью числа x называется разность $x - [x]$.

Дробная часть числа x обозначается через $\{x\}$.

Пример. Найдем дробные части чисел.

$$\{2, 4\} = 0, 4; \quad \{5\} = 0; \quad \{-3, 7\} = 0, 3.$$

Теорема 7.3. Пусть α – показатель, с которым простое число p входит в каноническое разложение числа $n!$, тогда значение этого показателя можно рассчитать по формуле:

$$\alpha = \left[\frac{n}{p} \right] + \left[\frac{n}{p^2} \right] + \left[\frac{n}{p^3} \right] + \dots$$

Пример. Найти α – показатель степени, с которым $p = 11$ входит в каноническое разложение числа $a = 1000!$.

$$\alpha = \left[\frac{1000}{11} \right] + \left[\frac{1000}{121} \right] = 90 + 8 = 98.$$

Пример. Найти каноническое разложение числа $16!$.

Имеем $16! = 2^{\alpha_1} \cdot 3^{\alpha_2} \cdot 5^{\alpha_3} \cdot 7^{\alpha_4} \cdot 11^{\alpha_5} \cdot 13^{\alpha_6}$. При этом,

$$\alpha_1 = \left[\frac{16}{2} \right] + \left[\frac{16}{4} \right] + \left[\frac{16}{8} \right] + \left[\frac{16}{16} \right] = 8 + 4 + 2 + 1 = 15;$$

$$\alpha_2 = \left[\frac{16}{3} \right] + \left[\frac{16}{9} \right] = 5 + 1 = 6; \quad \alpha_3 = \left[\frac{16}{5} \right] = 3;$$

$$\alpha_4 = \left[\frac{16}{7} \right] = 2; \quad \alpha_5 = \left[\frac{16}{11} \right] = 1; \quad \alpha_5 = \left[\frac{16}{11} \right] = 1;$$

Тогда $16! = 2^{15} \cdot 3^6 \cdot 5^3 \cdot 7^2 \cdot 11 \cdot 13$.

2.4.2. Число делителей и сумма делителей

Функцией $\tau(n)$ называется число делителей натурального числа n .

Функцией $\sigma(n)$ называется сумма делителей натурального числа n .

Пример. Найдем число делителей и сумму делителей натуральных чисел 3, 4, 6, 12.

$$\begin{aligned} \tau(3) &= 2; & \tau(4) &= 3; & \tau(6) &= 4; & \tau(12) &= 6; \\ \sigma(3) &= 4; & \sigma(4) &= 7; & \sigma(6) &= 12; & \sigma(12) &= 28. \end{aligned}$$

Теорема 7.4. Пусть дано каноническое разложение

$$n = p_1^{\alpha_1} p_2^{\alpha_2} \dots p_k^{\alpha_k}.$$

Тогда число делителей $\tau(n)$ натурального числа n равно

$$\tau(n) = (\alpha_1 + 1) \cdot (\alpha_2 + 1) \cdot \dots \cdot (\alpha_k + 1).$$

Пример. Рассчитаем количество делителей числа $n = 1000$.

Найдем каноническое разложение числа n :

$$1000 = 2^3 \cdot 5^3.$$

Тогда

$$\tau(1000) = (3 + 1)(3 + 1) = 16.$$

Теорема 7.5. Пусть дано каноническое разложение

$$n = p_1^{\alpha_1} p_2^{\alpha_2} \dots p_k^{\alpha_k}.$$

Тогда сумма делителей $\sigma(n)$ натурального числа n равна

$$\sigma(n) = p_1^{(\alpha_1 + 1)/(p_1 - 1)} \cdot p_2^{(\alpha_2 + 1)/(p_2 - 1)} \cdot \dots \cdot p_k^{(\alpha_k + 1)/(p_k - 1)}.$$

Пример. Рассчитаем сумму делителей числа $n = 24$.

Найдем каноническое разложение числа n : $24 = 2^3 \cdot 3^1$. Тогда

$$\sigma(24) = 2^{3+1} / (2 - 1) \cdot 3^{1+1} / (3 - 1) = 16 \cdot 9/2 = 72.$$

Пример. Рассчитать сумму делителей числа $n = 1000$.

Найдем каноническое разложение числа n :

$$1000 = 2^3 \cdot 5^3.$$

Тогда

$$\sigma(1000) = 2^{3+1} / (2-1) \cdot 5^{3+1} / (5-1) = 2500.$$

2.4.3. Количество простых чисел

Определение. Функцией $\pi(x)$ называется количество простых чисел в промежутке от 1 до x .

В начале XIX века поставлена задача нахождения приближения для функции $\pi(x)$. Важный шаг к доказательству закона распределения простых чисел удалось сделать П.Л. Чебышеву. Он показал, что для достаточно больших x выполняется неравенство:

$$0,9212 \cdot \frac{x}{\ln x} < \pi(x) < 1,1055 \cdot \frac{x}{\ln x}.$$

Пример. Оценить количество простых чисел, не превышающих 1000000.

Для решения воспользуемся неравенством Чебышева.

$$0,9212 \cdot \frac{1000000}{\ln 1000000} < \pi(x) < 1,1055 \cdot \frac{1000000}{\ln 1000000}.$$

$$66679 < \pi(x) < 80018.$$

2.5. Основные понятия сравнений

2.5.1. Определение сравнений

Пусть m – натуральное число, которое будем называть модулем, а a и b – произвольные целые числа.

Число a сравнимо с числом b по модулю m , если a и b имеют одинаковые остатки при делении на m . Выражение: a сравнимо с b по модулю m , записывают $a \equiv b \pmod{m}$.

Пример. Справедливы следующие сравнения:

$$17 \equiv 5 \pmod{4}; \quad 18 \equiv -6 \pmod{4}; \quad 15 \equiv 0 \pmod{5}.$$

Теорема 7.6. Пусть a и b – произвольные целые числа. Тогда равносильны следующие три утверждения:

- 1) $a \equiv b \pmod{m}$,
- 2) $a - b$ кратно m ,
- 3) существует число $q \in \mathbb{Z}$ с условием $a = b + mq$.

Пример. Для чисел 17 и 5 можно записать:

$$17 \equiv 5 \pmod{4}; \quad 17 - 5 \text{ кратно } 4; \quad 17 = 5 + 4 \cdot 3.$$

2.5.2. Свойства сравнений

Свойство 1. Отношение сравнимости

а) *Рефлексивно:*

$$a \equiv a \pmod{m},$$

б) *Симметрично:*

$$\text{из } a \equiv b \pmod{m} \text{ следует } b \equiv a \pmod{m}.$$

в) *Транзитивно:*

$$\text{из } a \equiv b \pmod{m} \text{ и } b \equiv c \pmod{m} \text{ следует } a \equiv c \pmod{m}.$$

Примеры. $24 \equiv 24 \pmod{15}$;

$$\text{из } 14 \equiv 38 \pmod{6} \text{ следует } 38 \equiv 14 \pmod{6};$$

$$\text{если } 17 \equiv 5 \pmod{12} \text{ и } 5 \equiv -19 \pmod{12}, \text{ тогда } 17 \equiv -19 \pmod{12}.$$

Свойство 2. Сравнения можно почленно складывать, вычитать и умножать. Если $a \equiv b \pmod{m}$ и $c \equiv d \pmod{m}$, то

$$\text{а) } a + c \equiv b + d \pmod{m};$$

$$\text{б) } a - c \equiv b - d \pmod{m};$$

$$\text{в) } ac \equiv bd \pmod{m}.$$

Примеры. Если $17 \equiv 5 \pmod{4}$ и $13 \equiv 21 \pmod{4}$, тогда:

$$17 + 13 \equiv 5 + 21 \pmod{4} \text{ или } 30 \equiv 26 \pmod{4};$$

$$17 - 13 \equiv 5 - 21 \pmod{4} \text{ или } 4 \equiv -16 \pmod{4};$$

$$17 \cdot 13 \equiv 5 \cdot 21 \pmod{4} \text{ или } 221 \equiv 105 \pmod{4}.$$

Свойство 3. Обе части сравнения можно

а) умножать на произвольное целое число:

$$\text{если } a \equiv b \pmod{m}, \text{ то } ak \equiv bk \pmod{m}.$$

б) разделить на число, взаимно простое с модулем:

$$\text{если } (k, m) = 1, \text{ то } a/k \equiv b/k \pmod{m}.$$

Примеры. Если $26 \equiv 50 \pmod{3}$ и $(2, 3) = 1$, тогда:

$$26 \cdot 4 \equiv 50 \cdot 4 \pmod{3} \text{ или } 104 \equiv 200 \pmod{3};$$

$$26 / 2 \equiv 50 / 2 \pmod{3} \text{ или } 13 \equiv 25 \pmod{3}.$$

Свойство 4. Обе части сравнения можно возводить в степень с показателем k :

$$\text{если } a \equiv b \pmod{m} \text{ то } a^k \equiv b^k \pmod{m}.$$

Пример. Если $7 \equiv 12 \pmod{5}$, тогда:

$$7^3 \equiv 12^3 \pmod{5} \text{ или } 343 \equiv 1728 \pmod{5}.$$

Свойство 5. Обе части сравнения и модуль

а) можно умножать на произвольное число $k > 0$:

$$\text{если } a \equiv b \pmod{m}, \text{ то } ak \equiv bk \pmod{mk}.$$

б) можно разделить на их общий делитель $k > 0$:

$$\text{если } ak \equiv bk \pmod{mk}, \text{ то } a \equiv b \pmod{m}.$$

Пример. Если $26 \equiv 50 \pmod{3}$, тогда:

$$26 \cdot 6 \equiv 50 \cdot 6 \pmod{3 \cdot 6} \text{ или } 104 \equiv 200 \pmod{18}.$$

Если $180 \equiv 40 \pmod{28}$, тогда:

$$180 / 4 \equiv 40 / 4 \pmod{28 / 4} \text{ или } 45 \equiv 10 \pmod{7}.$$

Свойство 6. Если $a \equiv b \pmod{m_1}$ и $a \equiv b \pmod{m_2}$, то

$$a \equiv b \pmod{m}, \text{ где } m = [m_1, m_2] - \text{НОК модулей } m_1 \text{ и } m_2.$$

Пример. Если $19 \equiv 67 \pmod{4}$ и $19 \equiv 67 \pmod{6}$, тогда:

$$19 \equiv 67 \pmod{[4, 6]} \text{ или } 19 \equiv 67 \pmod{12}.$$

2.6. Классы вычетов

2.6.1. Определение классов по модулю m

Классом вычетов $\bar{a}$ по модулю m называется множество всех чисел, сравнимых с числом a по модулю m .

Пример. Класс вычетов $\bar{3}$ по модулю 7 представляет множество:

$$\{\dots, -18, -11, -4, 3, 10, 17, 24, 31, \dots\}.$$

Свойство 1. Два класса вычетов $\bar{a}$ и $\bar{b}$ равны тогда и только тогда, когда числа a и b сравнимы по модулю m :

$$\bar{a} = \bar{b} \Leftrightarrow a \equiv b \pmod{m}.$$

Пример. Классы вычетов $\bar{10}$ и $\bar{31}$ по модулю 7 равны.

При делении целых чисел на m возможны остатки $0, 1, 2, \dots, m-1$.

Рассмотрим классы $\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \dots, \overline{m-1}$.

Свойство 2. Если r – остаток от деления числа a на m , то класс $\bar{a}$ совпадает с классом $\bar{r}$.

Пример. Остаток от деления 43 на 9 равен 6, тогда $\overline{43} = \bar{6} \pmod{9}$.

Свойство 3. Существует ровно m классов вычетов по модулю m . Классы $\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \dots, \overline{m-1}$ попарно различны и исчерпывают все классы по модулю m .

Пример. При делении целых чисел на 7 получим классы вычетов:

$$\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}, \bar{4}, \bar{5}, \bar{6}.$$

2.6.2. Полная система вычетов

Полной системой вычетов по модулю m называется совокупность чисел, взятых по одному из каждого класса вычетов по модулю m .

Пример. Совокупность чисел $\{8, 5, 18, 11\}$ является полной системой вычетов по модулю 4, так как при $m = 4$ имеется ровно четыре класса, а числа 8, 5, 18, 11 взяты по одному из каждого класса:

$$8 \in \bar{0}, \quad 5 \in \bar{1}, \quad 18 \in \bar{2}, \quad 11 \in \bar{3}.$$

Пример. Множество $\{8, 5, 1, 11\}$ не образует полную систему вычетов по модулю 4, так как числа 5 и 1 взяты из одного класса $\bar{1}$ и не представлены числа из класса $\bar{3}$.

Теорема 7.7. Совокупность чисел $x_1, x_2, \dots, x_k$ образует полную систему вычетов по модулю m тогда и только тогда, когда:

1) $k = m$,

2) не выполняются сравнения $x_i \equiv x_j \pmod{m}$ при $i \neq j$.

Пример. Множество $\{5, 10, 30\}$ является полной системой вычетов по модулю 3, так как $k = m = 3$ и не выполняются сравнения:

$$5 \equiv 10 \pmod{3}, \quad 5 \equiv 30 \pmod{3}, \quad 10 \equiv 30 \pmod{3}.$$

Теорема 7.8. Пусть $a, b \in Z$ и $(a, m) = 1$. Если числа $x_1, x_2, \dots, x_k$ образуют полную систему вычетов по модулю m , то числа $ax_1 + b, ax_2 + b, \dots, ax_k + b$ также образуют полную систему вычетов по модулю m .

Пример. Совокупность чисел 5, 11, 4, 6 является полной системой вычетов по модулю 4.

Тогда при $a = 3$ и $b = 2$ множество чисел $\{17, 35, 14, 20\}$

$$3 \cdot 5 + 2 = 17,$$

$$3 \cdot 11 + 2 = 35,$$

$$3 \cdot 4 + 2 = 14,$$

$$3 \cdot 6 + 2 = 20.$$

также образуют полную систему вычетов по модулю 4.

2.6.3. Приведенная система вычетов

Приведенной системой вычетов по модулю m называется совокупность чисел, взятых по одному из каждого класса вычетов, взаимно простого с модулем.

Пример. Совокупность чисел $\{5, 15\}$ является приведенной системой вычетов по модулю 4.

Из четырех классов вычетов модулю 4 классы $\bar{1}$ и $\bar{3}$ взаимно просты с модулем, а классы $\bar{0}$ и $\bar{2}$ не взаимно просты с модулем 4.

Пример. Множество $\{13, 29, 7, 23\}$ образует приведенную систему вычетов по модулю 12, так как элементы этого множества принадлежат всем классам вычетов $\bar{1}, \bar{5}, \bar{7}, \bar{11}$, взаимно простых с модулем 12.

Пример. Множество $\{1, 2, 4, 5, 7, 8\}$ образует приведенную систему вычетов по модулю 9.

2.7. Взаимно простые числа

2.7.1. Функция Эйлера

Функцией Эйлера $\phi(m)$ называется количество чисел из совокупности $0, 1, 2, \dots, m-1$, взаимно простых с числом m .

Пример. Найти значение функции Эйлера $\phi(m)$ при $m = 6$.

Рассмотрим совокупность чисел 0, 1, 2, 3, 4, 5. Вычеркнем из нее те числа, которые не взаимно просты с $m = 6$. Получим:

$$0, 1, 2, 3, 4, 5$$

Остались числа 1, 5, которые взаимно просты с $m = 6$. Поэтому $\phi(6) = 2$.

Теорема 7.9. Число классов вычетов по модулю m , взаимно простых с модулем, равно $\phi(m)$.

Пример. Рассмотрим модуль $m = 8$. Тогда $\phi(8) = 4$ и ровно четыре класса 1, 3, 5, 7 взаимно просты с модулем 8.

Теорема 7.10. Совокупность чисел $x_1, x_2, \dots, x_k$ образует приведенную систему вычетов по модулю m тогда и только тогда, когда если:

1) числа $x_1, x_2, \dots, x_k$ взаимно просты с модулем m ,

2) $k = \phi(m)$, (8.3)

3) не выполняется $x_i \equiv x_j \pmod{m}$ при $i \neq j$.

Теорема 7.11. Пусть $(a, m) = 1$ и числа $x_1, x_2, \dots, x_k$ образуют приведенную систему вычетов по модулю m . Тогда числа $ax_1, ax_2, \dots, ax_k$ также образуют приведенную систему вычетов по модулю m .

Пример. Числа 1, 3, 5, 7 образуют приведенную систему вычетов по модулю 8. Тогда числа 11, 33, 55, 77 также образуют приведенную систему вычетов по модулю 8.

2.7.2. Теоремы Эйлера и Ферма

Теорема 7.12. (Леонард Эйлер).

Пусть $(a, m) = 1$. Тогда

$$a^{\phi(m)} \equiv 1 \pmod{m}.$$

Пример. Пусть $a = 2, m = 7$. Проверим, что $a^{\phi(m)} \equiv 1 \pmod{m}$.

Так как $m = 7$ – простое число, поэтому $\phi(7) = 7 - 1 = 6$. Тогда $2^6 \equiv 1 \pmod{7}$, т.е. $64 \equiv 1 \pmod{7}$, что верно.

Теорема 7.13. (Пьер Ферма) Пусть p – простое число и a не делится на p . Тогда

$$a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}.$$

Пример. Пусть $a = 2, p = 7$. Тогда $2^{7-1} = 64$, а $64 \equiv 1 \pmod{7}$, что верно.

2.7.3. Вычисление функции Эйлера

Функция $f(x)$, определенная на множестве натуральных чисел и не равная тождественно нулю, называется *мультипликативной*, если $f(a \cdot b) = f(a) \cdot f(b)$ для всех $a, b \in N$ таких, что $(a, b) = 1$.

Пример. Покажем, что функция Эйлера является мультипликативной функцией.

Возьмем два взаимно простых числа 5 и 6.

Очевидно $\phi(5 \cdot 6) = \phi(30) = 8$, а $\phi(5) \cdot \phi(6) = 4 \cdot 2 = 8$.

Теорема 7.14. Пусть $m = p_1^{\alpha_1} p_2^{\alpha_2} \dots p_k^{\alpha_k}$ – каноническое разложение числа m . Тогда функция Эйлера вычисляется по формуле:

$$\phi(m) = (p_1^{\alpha_1} - p_1^{\alpha_1-1})(p_2^{\alpha_2} - p_2^{\alpha_2-1}) \dots (p_k^{\alpha_k} - p_k^{\alpha_k-1}).$$

Пример. Рассчитаем функцию Эйлера $\phi(600)$.

Каноническое разложение числа $600 = 2^3 \cdot 3 \cdot 5^2$. Следовательно,

$$\phi(600) = (2^3 - 2^2)(3^1 - 3^0)(5^2 - 5^1) = 4 \cdot 2 \cdot 20 = 160.$$

2.8. Сравнения первой степени с одной неизвестной

2.8.1. Определение сравнений n -й степени

Рассмотрим сравнение

$$f(x) \equiv 0 \pmod{m},$$

где $f(x) = a_0x^n + a_1x^{n-1} + \dots + a_n$ – многочлен с целыми коэффициентами.

Если a_n не делится на m , то данное сравнение называется сравнением n -ой степени.

При $n = 1$ получаем сравнение первой степени

$$ax \equiv b \pmod{m}.$$

Пример. Решить сравнение

$$5x \equiv 1 \pmod{7}.$$

Это сравнение решим методом перебора. Проверим поочередно все классы $\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}, \bar{4}, \bar{5}, \bar{6}$ по модулю 7, и выясним, являются ли они решениями.

$$0 \equiv 1 \pmod{7} \text{ неверно,} \quad 5 \equiv 1 \pmod{7} \text{ неверно,}$$

$$\begin{array}{ll}
10 \equiv 1 \pmod{7} \text{ неверно,} & 15 \equiv 1 \pmod{7} \text{ верно,} \\
20 \equiv 1 \pmod{7} \text{ неверно,} & 25 \equiv 1 \pmod{7} \text{ неверно,} \\
30 \equiv 1 \pmod{7} \text{ неверно.} &
\end{array}$$

Таким образом, сравнение $5x \equiv 1 \pmod{7}$ имеет единственное решение

$$x = \bar{3}.$$

Пример. Решить сравнение

$$6x \equiv 1 \pmod{14}.$$

Можно перебрать все классы, и обнаружится, что решений нет. Однако отсутствие решений видно сразу. Если существует число a , удовлетворяющее сравнению, то $6a \equiv 1 \pmod{14}$. Тогда

$$6a = 1 + 14q.$$

Получается, что слева в равенстве стоит четное выражение, а справа – нечетное, что противоречит здравому смыслу.

Таким образом, сравнение $6x \equiv 1 \pmod{14}$ решений не имеет.

Пример. Решить сравнение

$$6x \equiv 8 \pmod{4}.$$

Решение. Проверим поочередно все классы $\bar{0}$, $\bar{1}$, $\bar{2}$, $\bar{3}$ по модулю 4, и выясним, являются ли они решениями.

$$\begin{array}{ll}
0 \equiv 8 \pmod{4} \text{ верно,} & 6 \equiv 8 \pmod{4} \text{ неверно,} \\
12 \equiv 8 \pmod{4} \text{ верно,} & 18 \equiv 8 \pmod{4} \text{ неверно.}
\end{array}$$

Таким образом, сравнение $6x \equiv 8 \pmod{4}$ имеет два решения

$$x_1 = \bar{0} \text{ и } x_2 = \bar{2}.$$

2.8.2. Решение сравнений 1-й степени

Рассмотрим три случая, при решении сравнений первой степени.

1-й случай.

Сравнение первой степени $ax \equiv b \pmod{m}$, где $(a, m) = 1$, имеет единственное решение.

Теорема 7.15. Пусть дано сравнение $ax \equiv b \pmod{m}$, где $(a, m) = 1$. Тогда решение сравнения имеет вид

$$x \equiv a^{\phi(m)-1} \cdot b \pmod{m}.$$

Пример. Решить сравнение $6x \equiv 8 \pmod{5}$.

$$\begin{aligned} x &\equiv 6^{\phi(5)-1} \cdot 8 \pmod{5} \equiv 6^{4-1} \cdot 8 \pmod{5} \equiv 216 \cdot 8 \pmod{5} \equiv \\ &\equiv 1728 \pmod{5} \equiv 3 \pmod{5}. \end{aligned}$$

Окончательно получим: $x \equiv 3 \pmod{5}$.

Пример. Решить сравнение $5x \equiv 4 \pmod{9}$.

$$\begin{aligned} x &\equiv 5^{\phi(9)-1} \cdot 4 \pmod{9} \equiv [\phi(9) = \phi(3^2) = 3^2 - 3 = 9 - 3 = 6] \equiv 5^{6-1} \cdot 4 \pmod{9} \equiv \\ &\equiv 3125 \cdot 4 \pmod{9} \equiv 12500 \pmod{9} \equiv 8 \pmod{9}. \end{aligned}$$

Тогда получим: $x \equiv 8 \pmod{9}$.

2-й случай.

Сравнение первой степени $ax \equiv b \pmod{m}$, где $(a, m) = d$ и b делится на d имеет ровно d решений.

Пример. Решить сравнение $12x \equiv 40 \pmod{8}$.

Заметим, что $(12, 8) = 4$, а 40 делится на 4. Тогда получим 4 решения.

Разделим сравнение на 4, получим: $3x \equiv 10 \pmod{2}$.

$$\begin{aligned} x &\equiv 3^{\phi(2)-1} \cdot 10 \pmod{2} \equiv [\phi(2) = \phi(2^1) = 2^1 - 2^0 = 2 - 1 = 1] \equiv \\ &\equiv 3^{1-1} \cdot 10 \pmod{2} \equiv 10 \pmod{2} \equiv 0 \pmod{2}. \end{aligned}$$

Четыре решения первоначального сравнения получим в виде:

$$x_1 \equiv 0 \pmod{8}; \quad x_2 \equiv 0 + 1 \cdot 2 \pmod{8} \equiv 2 \pmod{8};$$

$$x_3 \equiv 0 + 2 \cdot 2 \pmod{8} \equiv 4 \pmod{8}; \quad x_4 \equiv 0 + 3 \cdot 2 \pmod{8} \equiv 6 \pmod{8}.$$

Тогда получим: $x \equiv 0, 2, 4, 6 \pmod{8}$.

3-й случай.

Сравнение первой степени $ax \equiv b \pmod{m}$, где $(a, m) = d$ и b не делится на d не имеет решений.

Пример. Решить сравнение $27x \equiv 20 \pmod{18}$.

Так как $(27, 18) = 9$, а 20 не делится на 18, то сравнение не имеет решений.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие числа изучаются в теории чисел?
2. Дайте определение делителя. Какие основные теоремы делимости вы знаете?

3. Перечислите свойства общих делителей. Какие методы нахождения общих делителей вы знаете? Какой из методов вы считаете эффективней?
4. Дайте определение общего наименьшего кратного. Приведите примеры нахождения общего наименьшего кратного различными методами?
5. Что такое простые числа? Какие свойства простых чисел вы знаете?
6. Что такое каноническое разложение натурального числа? Каким образом осуществляется каноническое разложение факториалов на простые сомножители?
7. Как определяются простые числа Ферма и Мерсенна?
8. Как оценить количество простых чисел на заданном интервале?
9. Приведите примеры нахождения количества делителей и суммы делителей целых положительных чисел.
10. Что такое сравнение. Какие свойства сравнений вы знаете?
11. Дайте понятие класса по модулю m . Сколько существует различных классов по модулю m ?
12. Как определяется полная система вычетов по модулю m ?
Продemonстрируйте на примерах теоремы о полной системе вычетов.
13. Как находится приведённая система вычетов?
14. Дайте определение взаимно простых чисел. О чем говорят основные теоремы о взаимно простых числах?
15. Каким образом теоремы Эйлера и Ферма используются для нахождения функции Эйлера? Является ли функция Эйлера мультипликативной.
16. Продemonстрируйте на примере алгоритм нахождения значения функции Эйлера для больших чисел.
17. Что такое сравнения с одним неизвестным? Каким образом решаются сравнения первой степени.
18. Какие возможны варианты решений сравнения первой степени? Как определяется количество решений?

Глава 3. Многочлены

При решении многих важных задач прикладной математики, квантовой механики, теоретической физики, кибернетики, теории защиты информации приходится пользоваться различными специальными функциями. Наиболее употребительными из них являются классические многочлены (полиномы). Полиномы обладают рядом свойств, которые позволяют использовать их для построения и описания моделей объектов в различных областях техники.

Изучение полиномов является одной из основных задач общей алгебры. С ними связан целый ряд преобразований в математике: введение в вычисления нуля, отрицательных, комплексных чисел, появление теории групп, выделение классов специальных функций.

Техническая простота вычислений, связанных с многочленами способствовала развитию методов разложения в ряды и полиномиальной интерполяции и экстраполяции.

Многочлены также играют ключевую роль в алгебраической геометрии, объектом которой являются множества, определённые как решения систем многочленов. Особые свойства преобразования коэффициентов при умножении многочленов используются в аналитической геометрии, алгебре, теории узлов и других разделах математики для кодирования, для выражения многочленами свойств различных объектов.

3.1. Понятие полинома

3.1.1. Основные определения

Многочленом или *полиномом* (от n переменных) называется конечная формальная сумма вида:

$$\sum_i c_i x_1^{i_1} x_2^{i_2} x_3^{i_3} \cdot \dots \cdot x_n^{i_n} . \quad (3.1)$$

Пример. Даная сумма, содержащая 7 слагаемых, является полиномом.

$$2x_1^3 x_2^5 x_4 - 5x_3^4 x_5^2 + x_1 x_2^2 x_4^2 + 7x_1 x_2 + 8x_1 - 10x_4 + 23$$

В частности, *многочлен от одной переменной* есть конечная формальная сумма вида:

$$C_0 + C_1x + C_2x^2 + C_3x^3 + \dots + C_{n-1}x^{n-1} + C_nx^n$$

Пример. Ниже приведен многочлен от одной переменной x .

$$12 - 5x^2 - x^3 - 17x^4 + 12x^5 + 7x^{10}$$

Многочлен вида:

$$cx_1^{i_1} x_2^{i_2} x_3^{i_3} \cdot \dots \cdot x_n^{i_n}$$

называется *одночленом* или *мономом*.

Пример. Данный одночлен является мономом.

$$-7x_1^3 x_2^5 x_3^2 x_4 x_5^3$$

Одночлен, соответствующий мультииндексу $(0, 0, 0, \dots, 0)$ называется *свободным членом*.

Пример. Данный одночлен является свободным членом.

Полной степенью ненулевого монома

$$cx_1^{i_1} x_2^{i_2} x_3^{i_3} \cdot \dots \cdot x_n^{i_n}$$

называется сумма степеней $i_1 + i_2 + i_3 + \dots + i_n$.

Пример. Полная степень монома $9x_1^4 x_2 x_3^2 x_4^8 x_5^3$ равна

$$4 + 1 + 2 + 8 + 3 = 18.$$

Степенью многочлена называется максимальная из степеней его одночленов.

Пример. Определим степень полинома

$$2x_1^3 x_2^5 x_4 - 5x_3^4 x_5^2 + x_1^5 x_2^2 x_4^4 + 7x_1 x_2 + 8x_1 - 10x_4 + 23.$$

Так как степени в входящих в полином мономах соответственно равны 9, 6, 11, 2, 1, 1, 0, то степень полинома равна 11.

3.1.2. Виды полиномов

Многочлен, являющийся суммой двух мономов, называется *двучленом* или *биномом*.

Пример. Многочлен $8x_1^2x_3^2 - 4x_3^5x_5^3$ является биномом.

Многочлен одной переменной называется *приведенным*, если его старший коэффициент равен единице.

Пример. Полином $x^3 - 3x^2 + x + 4$ является приведенным.

Многочлен, все одночлены которого имеют одну и ту же полную степень называется *однородным*.

Пример. Полином $3x_1^3x_2^2x_4^2 - x_3^4x_5^3 + 2x_1x_2^3x_4^3 + 7x_1^5x_2^2$ является однородным.

Многочлен, который можно представить в виде произведения многочленов низших степеней, называется *приводимым*, в противном случае – *неприводимым*.

Пример. Многочлен $x^4 - 2$

1) является неприводимым во множествах натуральных, целых и рациональных чисел;

2) является приводимым во множестве действительных чисел:

$$x^4 - 2 = (x^2 - \sqrt{2})(x^2 + \sqrt{2}) = (x - \sqrt[4]{2})(x + \sqrt[4]{2})(x^2 + \sqrt{2})$$

3) является приводимым во множестве комплексных чисел:

$$x^4 - 2 = (x - \sqrt[4]{2})(x + \sqrt[4]{2})(x - i\sqrt[4]{2})(x + i\sqrt[4]{2}).$$

3.2. Операции над многочленами

Над многочленами определены следующие операции: сложение, вычитание, умножение, деление, возведение в степень.

3.2.1. Сумма многочленов

Суммой многочленов $P(x)$ и $Q(x)$ называется многочлен $S(x)$, коэффициенты которого при каждой степени x равны сумме коэффициентов при этой степени x многочленов $P(x)$ и $Q(x)$.

О многочлене $S(x)$ говорят, что он получен в результате сложения многочленов $P(x)$ и $Q(x)$, и пишут $S(x) = P(x) + Q(x)$.

Пример. Определим сумму многочленов

$$2x^3 + 4x^2 - 6 \text{ и } 3x^4 - 8x^2 + 5x + 18.$$

Сложим полиномы почленно в столбик.

$$\begin{array}{r} \\ \\ + \\ \hline 3x^4 + 2x^3 - 4x^2 + 5x + 12 \end{array}$$

Полученный результат увидим под чертой.

3.2.2. Разность многочленов

Разностью многочленов $P(x)$ и $Q(x)$ называется многочлен $L(x)$, коэффициенты которого при каждой степени x равны разности коэффициентов при этой степени многочленов $P(x)$ и $Q(x)$.

О многочлене $L(x)$ говорят, что он получен в результате разности многочленов $P(x)$ и $Q(x)$, и пишут $L(x) = P(x) - Q(x)$.

Пример. Определим разность многочленов

$$2x^3 + 4x^2 - 6 \text{ и } 3x^4 - 8x^2 + 5x + 18.$$

Вычитать будем аналогично сложению в столбик.

$$\begin{array}{r} \\ \\ - \\ \hline - 3x^4 + 2x^3 + 12x^2 - 5x - 24 \end{array}$$

Полученный результат увидим под чертой.

3.2.3. Произведение многочленов

Произведением многочленов $P(x)$ и $Q(x)$ называется многочлен $M(x)$ степени $n+m$, с коэффициентами $c_0, c_1, \dots, c_{n+m}$, где коэффициент c_i есть сумма произведений коэффициентов a_l и b_k многочленов $P(x)$ и $Q(x)$ таких, что сумма их индексов равна $i = l + k$.

О многочлене $M(x)$ говорят, что он получен в результате умножения многочлена $P(x)$ на многочлен $Q(x)$, и пишут $M(x) = P(x) \cdot Q(x)$.

Пример. Определим произведение многочленов

$$2x^3 + 4x^2 - 6 \text{ и } 3x^4 - 8x^2 + 5x + 18.$$

Умножать будем также в столбик.

$$\begin{array}{r}
\begin{array}{r}
2x^3 + 4x^2 + 6 \\
3x^4 \quad - 8x^2 + 5x + 18
\end{array} \\
\times \\
\hline
36x^3 + 72x^2 + 108 \\
10x^4 + 20x^3 + 30x \\
- 16x^5 - 32x^4 - 18x^2 \\
6x^7 + 12x^6 + 18x^4 \\
\hline
6x^7 + 12x^6 - 16x^5 - 4x^4 + 56x^3 + 54x^2 + 30x + 108
\end{array}$$

В результате получим полином степени $3 + 4 = 7$.

3.2.4. Деление многочленов

Частным от деления многочлена $P(x)$ на $Q(x) \neq 0$ называется многочлен $D(x)$, такой что выполняется равенство:

$$P(x) = Q(x) \cdot D(x) + R(x),$$

где степень многочлена $R(x)$ меньше, чем степень многочлена $D(x)$.

Многочлен $D(x)$ называют остатком от деления многочлена $P(x)$ на многочлен $Q(x)$ и пишут:

$$\frac{P(x)}{Q(x)} = D(x) + \frac{R(x)}{Q(x)}.$$

Пример. Определим частное полиномов

$$9x^4 - 6x^3 - 46x + 35 \text{ и } -3x + 5.$$

Деление будем осуществлять аналогично делению действительных чисел (уголком).

$$\begin{array}{r}
9x^4 - 6x^3 + 0x^2 - 46x + 35 \quad \big| -3x + 5 \\
\underline{9x^4 - 15x^3} \qquad \qquad \qquad -3x^3 - 3x^2 - 5x + 7 \\
9x^3 + 0x^2 \\
\underline{9x^3 - 15x^2} \\
15x^2 - 46x \\
\underline{15x^2 - 25x} \\
-21x + 35 \\
\underline{-21x + 35} \\
0
\end{array}$$

В результате можем записать.

$$\frac{9x^4 - 6x^3 - 46x + 35}{-3x + 5} = -3x^3 + 3x^2 - 5x + 7.$$

Из вычислений видно, что остаток $D(x)$, получившийся при делении равен нулю. То есть деление многочленов прошло без остатка.

Пример: Вычислим частное и остаток от деления полиномов

$$x^4 - 4x^3 + 3 \text{ и } x^2 + 5x - 2.$$

Разделим полином $x^4 - 4x^3 + 3$ на полином $x^2 + 5x - 2$.

$$\begin{array}{r} x^4 - 4x^3 + 0x^2 + 0x + 3 \quad | \quad x^2 + 5x - 2 \\ \underline{x^4 + 5x^3 - 2x^2} \\ -9x^3 + 2x^2 + 0x \\ \underline{-9x^3 - 45x^2 + 18x} \\ 47x^2 - 18x + 3 \\ \underline{47x^2 + 235x - 94} \\ -253x + 97 \end{array}$$

В результате получим частное степени два и остаток степени один:

$$\frac{x^4 - 4x^3 + 3}{x^2 + 5x - 2} = x^2 - 9x + 47 + \frac{-253x + 97}{x^2 + 5x - 2}$$

3.3. Бином Ньютона. Треугольник Паскаля

3.3.1. Бином Ньютона.

Выдающийся английский математик Исаак Ньютон (1643–1727) составил алгоритм, позволяющий возводить сумму двух слагаемых в степень с любым показателем. Данный алгоритм можно записать в виде алгебраического выражения, которое получило название *бинома Ньютона*:

$$(a + b)^n = C_n^0 a^n + C_n^1 a^{n-1} b + \dots + C_n^m a^{n-m} b^m + \dots + C_n^n b^n. \quad (3.2)$$

Каждое m -тое слагаемое полинома n -й степени, полученного в правой части формулы, содержит произведение количества сочетаний из n по m и соответствующих степеней биномиальных слагаемых $C_n^m a^{n-m} b^m$.

Формулу можно записать, используя специальный знак суммы:

$$(a + b)^n = \sum_{i=0}^n C_n^i a^{n-i} b^i. \quad (3.3)$$

Пример. Возведем в пятую степень выражение $(2x - 1)$.

Используя формулу получим выражение, состоящее из шести слагаемых:

$$C_5^0(2x)^5(-1)^0 + C_5^1(2x)^4(-1)^1 + C_5^2(2x)^3(-1)^2 + C_5^3(2x)^2(-1)^3 + C_5^4(2x)^1(-1)^4 + C_5^5(2x)^0(-1)^5.$$

Вычисляя значения сочетаний и степеней, выражение преобразуется в следующий вид:

$$1 \cdot 32x^5 \cdot 1 + 5 \cdot 16x^4 \cdot (-1) + 10 \cdot 8x^3 \cdot 1 + 10 \cdot 4x^2 \cdot (-1) + 5 \cdot 2x \cdot 1 + 1 \cdot 1 \cdot (-1).$$

Преобразуя каждое слагаемое, окончательно получим:

$$32x^5 - 80x^4 + 80x^3 - 160x^2 + 10x - 1.$$

Пример. Раскроем скобки и приведем подобные члены в выражении $(3x + 2y)^4$.

Подставим выражение $(3x + 2y)^4$ в формулу бинома Ньютона:

$$C_4^4 \cdot (3x)^4 \cdot (2y)^0 + C_4^3 \cdot (3x)^3 \cdot (2y)^1 + C_4^2 \cdot (3x)^2 \cdot (2y)^2 + C_4^1 \cdot (3x)^1 \cdot (2y)^3 + C_4^0 \cdot (3x)^0 \cdot (2y)^4.$$

Рассчитаем числа сочетаний и коэффициенты при неизвестных:

$$1 \cdot 81x^4 \cdot 1 + 4 \cdot 27x^3 \cdot 2y + 6 \cdot 9x^2 \cdot 4y^2 + 4 \cdot 3x \cdot 8y^3 + 1 \cdot 1 \cdot 16y^4.$$

Перемножив коэффициенты, получим:

$$81x^4 + 216x^3y + 216x^2y^2 + 96xy^3 + 16y^4.$$

Пример. Найдем коэффициент, стоящий перед x^9 многочлена $(2x + 1,5)^{11}$.

Зная алгоритм разложения двучлена $2x + 1,5$ в 11-ую степень, рассчитаем числовой коэффициент третьего слагаемого:

$$C_{11}^9 2^9 (1,5)^{11-9} = \frac{11!}{9! \cdot 2!} \cdot 2^9 \cdot \left(\frac{3}{2}\right)^2 = 55 \cdot 512 \cdot \frac{9}{4} = 63360.$$

3.3.2. Треугольник Паскаля

Выдающийся французский ученый Блез Паскаль (1623–1662), работая с комбинаторными и алгебраическими задачами, выдвинул оригинальный метод упрощения расчета биномиальных коэффициентов. Суть метода сводится к построению треугольной таблицы, элементы которой являются числами сочетаний, используемых в разложении степени биномов.

Треугольник Паскаля имеет следующий вид:

				1			
			1		1		
		1		2		1	
	1		3		3		1
	1	4		6		4	1
	1	5	10		10	5	1
	1	6	15	20	15	6	1
...	...	...	...	...	...	...	...

Рис. 3.1. Треугольник Паскаля

Несложно заметить, что все внутренние коэффициенты таблицы (рис. 3.1) обладают следующим свойством: каждое число Треугольника Паскаля равно сумме двух чисел, над ним стоящих. Учитывая данное свойство можно неограниченно продолжать данную таблицу.

Пример. Раскроем скобки и приведем подобные слагаемые в выражении

$$(a + 2b)^4.$$

С помощью Треугольника Паскаля найдем биномиальные коэффициенты разложения выражения $(3x + 2y)^4$ на слагаемые. Обратимся к строке:

1	4	6	4	1

Эти числа можно интерпретировать, как набор чисел соответствующих сочетаний:

C_4^0	C_4^1	C_4^2	C_4^3	C_4^4

Учитывая этот факт, подставим выделенные коэффициенты Треугольника Паскаля в формулу бинома Ньютона:

$$1 \cdot a^4 \cdot (2b)^0 + 4 \cdot a^3 \cdot (2b)^1 + 6 \cdot a^2 \cdot (2b)^2 + 4 \cdot a^1 \cdot (2b)^3 + 1 \cdot a^0 \cdot (2b)^4$$

Упрощая данное выражение, окончательно получим:

$$a^4 + 8a^3b + 24a^2b^2 + 32ab^3 + b^4$$

3.4. Корни многочленов

Корнем многочлена $P(x)$ называется число, при подстановке которого в многочлен выполняется тождество:

$$P(x) = 0.$$

Пример. Число $5/3$ является корнем полинома $9x^4 - 6x^3 - 46x + 35$, так как

$$9 \cdot (5/3)^4 - 6 \cdot (5/3)^3 - 46 \cdot (5/3) + 35 = 0.$$

Теорема 8.1. Число корней (в том числе и комплексных) многочлена $P(x)$ степени n , учитывая кратные корни равно n .

Пример. Число корней полинома $x^4 - 3x^3 + 6x^2 - 12x + 8$ равно четырем. Из них два корня $x_1 = 1$ и $x_2 = 2$ являются действительными числами, а два корня $x_3 = -2i$ и $x_4 = 2i$ - комплексными.

Теорема 8.2. Полином $P(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x^1 + a_0$ с вещественными коэффициентами $a_0, a_1, \dots, a_n$ и корнями $x_1, x_2, \dots, x_n$ можно записать в виде:

$$P(x) = a_n (x - x_1) (x - x_2) \dots (x - x_n).$$

Пример. Полином $x^4 - 3x^3 + 6x^2 - 12x + 8$ можно записать как произведение:

$$(x - 1) (x - 2) (x + 2i) (x - 2i).$$

Для нахождения корней полиномов высоких степеней последовательно определяют очевидные корни и, используя теорему о разложении многочленов на множители, делят полиномы на $x - x_i$.

Пример. Найдём корни полинома $x^5 + x^4 - 5x^3 - 7x^2 + 10x$.

Так как степень полинома равна 5, то он будет иметь ровно 5 корней. Очевидно, что одним из корней полинома является число 0.

Пусть $x_1 = 0$. Разделим полином на бином $x - x_1 = x - 0 = x$. В результате получим многочлен $x^4 + x^3 - 5x^2 - 7x + 10$ степени 4.

Увидим ещё один корень $x_2 = 1$ и разделим новый полином на $x - 1$.

$$\begin{array}{r}
 x^4 + x^3 - 5x^2 - 7x + 10 \quad \Big| \quad x - 1 \\
 \underline{x^4 \quad - x^3} \\
 2x^3 - 5x^2 \\
 \underline{2x^3 - 2x^2} \\
 -3x^2 - 7x \\
 \underline{-3x^2 + 3x} \\
 -10x + 10 \\
 \underline{-10x + 10} \\
 0
 \end{array}$$

Очевидно, что одним из корней получившегося полинома 3-й степени

$$x^3 + 2x^2 - 3x - 10$$

является число 2. Таким образом, $x_3 = 2$.

Разделим этот многочлен на $x - 2$.

$$\begin{array}{r} x^3 + 2x^2 - 3x - 10 \quad \left| \begin{array}{l} x - 2 \\ x^2 + 4x + 5 \end{array} \right. \\ \underline{x^3 - 2x^2} \\ 4x^2 - 3x \\ \underline{4x^2 - 8x} \\ 5x - 10 \\ \underline{5x - 10} \\ 0 \end{array}$$

В результате получим многочлен $x^2 + 4x + 5$ степени 2. Найдем его корни.

$$\begin{aligned} D &= b^2 - 4ac = 4^2 - 4 \cdot 5 \cdot 1 = -4 \\ x_4 &= \frac{-b - \sqrt{D}}{2a} = \frac{-4 - \sqrt{-4}}{2 \cdot 1} = \frac{-4 - 2\sqrt{-1}}{2} = \frac{-4 - 2i}{2} = -2 - i \\ x_5 &= \frac{-b + \sqrt{D}}{2a} = \frac{-4 + \sqrt{-4}}{2 \cdot 1} = \frac{-4 + 2\sqrt{-1}}{2} = \frac{-4 + 2i}{2} = -2 + i \end{aligned}$$

Выпишем все полученные корни: $\{0; 1; 2; -2 - i; -2 + i\}$.

Пример. Разложим на множители полином $x^4 + 4x^3 - 31x^2 - 46x + 168$.

Так как степень полинома равна 4, то он будет иметь ровно 4 корня.

Очевидно, что одним из корней полинома является число 2. Пусть $x_1 = 2$.

Разделим полином на двучлен $x - 2$.

$$\begin{array}{r} x^4 + 4x^3 - 31x^2 - 46x + 168 \quad \left| \begin{array}{l} x - 2 \\ x^3 + 6x^2 - 19x - 84 \end{array} \right. \\ \underline{x^4 - 2x^3} \\ 6x^3 - 31x^2 \\ \underline{6x^3 - 12x^2} \\ -19x^2 - 46x \\ \underline{-19x^2 + 38x} \\ -84x + 168 \\ \underline{-84x + 168} \\ 0 \end{array}$$

В результате получим многочлен $x^3 + 6x^2 - 19x - 84$ степени 3.

Очевидно, что одним из корней получившегося полинома 3-й степени

$$x^3 + 6x^2 - 19x - 84$$

является число 4. Таким образом, $x_2 = 4$.

Разделим этот многочлен на выражение $x - 4$.

$$\begin{array}{r}
 x^3 + 6x^2 - 19x - 84 \quad \left| \begin{array}{l} x - 4 \\ x^2 + 10x + 21 \end{array} \right. \\
 \underline{x^3 - 4x^2} \\
 10x^2 - 19x \\
 \underline{10x^2 - 40x} \\
 21x - 84 \\
 \underline{21x - 84} \\
 0
 \end{array}$$

В результате получим многочлен $x^2 + 10x + 21$ степени 2. Найдем его корни.

$$D = b^2 - 4ac = 10^2 - 4 \cdot 21 \cdot 1 = 16$$

$$x_3 = \frac{-b - \sqrt{D}}{2a} = \frac{-10 - \sqrt{16}}{2 \cdot 1} = \frac{-10 - 4}{2} = -7$$

$$x_4 = \frac{-b + \sqrt{D}}{2a} = \frac{-10 + \sqrt{16}}{2 \cdot 1} = \frac{-10 + 4}{2} = -3$$

Выпишем в порядке возрастания полученные корни: $\{-7; -3; 2; 4\}$.

3.5. Разложение правильных дробей

Для упрощения вычислений, связанных с дробями, числители и знаменатели которых являются многочленами, дроби можно разложить на слагаемые.

Рассмотрим дробно-рациональное выражение $\frac{R(x)}{Q(x)}$, где $R(x)$ является

многочленом порядка m , а $Q(x)$ – многочленом порядка n . Тогда дробь $\frac{R(x)}{Q(x)}$

называется *правильной*, если $m < n$, то есть порядок многочлена $R(x)$, находящегося в числителе дроби меньше, чем порядок многочлена $Q(x)$,

находящегося в знаменателе. В противном случае дробь $\frac{R(x)}{Q(x)}$ будет называться

неправильной.

Пример. Дробь $\frac{2x^3 + 6x^2 - 8x + 5}{x^4 - 1}$ является правильной, поскольку порядок

многочлена $2x^3 + 6x^2 - 8x + 5$, находящегося в числителе дроби меньше порядка многочлена $x^4 - 1$, находящегося в знаменателе.

Пример. Дробь $\frac{-5x^2+2}{x^2-3x+8}$ является неправильной, поскольку порядки числителя и знаменателя дроби равны.

Пример. Дробь $\frac{x^4+16x^2-24}{6x^3-17x^2+13x+106}$ является неправильной, поскольку порядок числителя равен четырем, а порядок знаменателя – трем.

Для разложения неправильной дроби достаточно числитель разделить на знаменатель.

Пример. Разложим неправильную дробь $\frac{2x^3-4x^2-5x+1}{x^2+6}$

Разделим числитель на знаменатель уголком.

$$\begin{array}{r} 2x^3 - 4x^2 - 5x + 1 \bigg| x^2 + 6 \\ x^3 - 4x^2 - 5x + 1 \\ -17x + 25 \end{array}$$

Теорема. Правильную рациональную дробь $\frac{R(x)}{Q(x)}$, в которой знаменатель разложен на множители:

$$Q(x) = (x - x_1)^{k_1} \cdot (x - x_2)^{k_2} \cdot \dots \cdot (x^2 + p_1x + g_1)^{r_1} \cdot \dots \cdot (x^2 + p_mx + g_m)^{r_m},$$

а $x^2 + p_ix + g_i$ – трехчлен с отрицательным дискриминантом, можно единственным образом разложить на сумму элементарных делителей:

$$\begin{aligned} \frac{R(x)}{Q(x)} &= \frac{A_1}{(x-a)} + \frac{A_2}{(x-a)^2} + \dots + \frac{A_r}{(x-a)^r} + \dots \\ &\dots + \frac{M_1x + N_1}{x^2 + 2px + q} + \frac{M_2x + N_2}{(x^2 + 2px + q)^2} + \dots + \frac{M_lx + N_l}{(x^2 + 2px + q)^l} + \dots, \end{aligned}$$

где $A_1, A_2, \dots, A_r, \dots, M_1, N_1, M_2, N_2, \dots, M_l, N_l, \dots$ – некоторые вещественные числа.

Пример. Разложим правильную дробь $\frac{x+2}{x^2+5x-6}$.

Выполним преобразования дроби. Разложим знаменатель дроби на множители, предварительно отыскав корни квадратного трехчлена $x^2 + 5x - 6$.

$$\frac{x+2}{x^2+5x-6} = \frac{x+2}{(x-1)(x+6)}.$$

Разобьем получившуюся дробь на сумму двух дробей, числители которых представим в виде переменных А и В:

$$\frac{x+2}{(x-1)(x+6)} = \frac{A}{x-1} + \frac{B}{x+6}.$$

И, приводя к общему знаменателю, сложим их:

$$\frac{A}{x-1} + \frac{B}{x+6} = \frac{A(x+6)+B(x-1)}{(x-1)(x+6)} = \frac{(A+B)x+6A-B}{(x-1)(x+6)}.$$

Заметим, что $x+2 = (A+B)x+6A-B$.

Построим систему двух линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} A+B=1 \\ 6A-B=2 \end{cases}.$$

Решая систему, получим: $A = \frac{3}{7}, B = \frac{4}{7}$.

Отсюда следует: $\frac{x+2}{x^2+5x-6} = \frac{\frac{3}{7}}{x-1} + \frac{\frac{4}{7}}{x+6}.$

Рассмотрим более сложный пример.

Пример. Разложим дробь на слагаемые $\int \frac{dx}{x^2-3x+2}.$

Разложим знаменатель дроби на множители, предварительно отыскав корни квадратного трехчлена x^2-3x+2 .

1

$$\frac{1}{x^2-3x+2} = \frac{1}{(x-1)(x-2)}.$$

Разобьем получившуюся дробь на сумму двух дробей, числители которых представим в виде переменных А и В:

$$\frac{1}{(x-1)(x-2)} = \frac{A}{x-1} + \frac{B}{x-2}.$$

Приводя к общему знаменателю, сложим дроби:

$$\begin{aligned}\frac{A}{x-1} + \frac{B}{x-2} &= \frac{A(x-2)}{(x-1)(x-2)} + \frac{B(x-1)}{(x-1)(x-2)} = \frac{A(x-2) + B(x-1)}{(x-1)(x-2)} = \\ &= \frac{Ax - 2A + Bx - B}{(x-1)(x-2)} = \frac{(A+B)x - 2A - B}{(x-1)(x-2)} = \frac{0x + 1}{(x-1)(x-2)}.\end{aligned}$$

Заметим, что $1 = (A+B)x - 2A - B$.

Тогда получим систему двух линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} A + B = 0 \\ -2A - B = 1 \end{cases}.$$

Решая систему, получим: $A = -1, B = 1$.

Отсюда следует: $\frac{1}{(x-1)(x-2)} = \frac{-1}{x-1} + \frac{1}{x-2}$.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое полином? Как рассчитать полную степень полинома?
2. Сформулируйте определения понятий: моном, бином, мультииндекс.
3. Какие полиномы являются однородными, приведенными, приводимыми?

Приведите примеры таких полиномов.

4. Какие алгебраические операции над полиномами вы знаете? Приведите примеры.
5. Как осуществляется сложение и вычитание полиномов? Продемонстрируйте на примерах эти операции.
6. Каким образом удобно выполнять произведение полиномов?
7. Опишите особенности произведения полиномов, с содержащих в записи нулевые коэффициенты.
8. Опишите принципы нахождения частного от деления одного полинома на другой. Может ли при делении получиться остаток?
9. Каким образом находится остаток от деления многочленов? Продемонстрируйте нахождение остатка на примере.
10. Каким образом можно возвести бином в натуральную степень?

- 11.Опишите алгоритм использования формулы бинома Ньютона. Может ли при вычислении коэффициентов при использовании бинома Ньютона использоваться треугольник Паскаля?
- 12.С какой целью при работе с многочленами используется Треугольник Паскаля?
- 13.Что является корнем полинома? Как определить количество корней полинома?
- 14.Что такое разложение полинома? Опишите алгоритм нахождения корней полинома.
- 15.На примерах продемонстрируйте алгоритм нахождения корней полинома. Какие операции над полиномами были задействованы?
- 16.Сколько корней должен иметь полином n -й степени? Могут ли у полинома с целыми коэффициентами быть комплексные корни?
- 17.Как, зная корни полинома можно его разложить? Приведите примеры разложения полиномов с действительными и комплексными корнями.
- 18.Каким образом из неправильной дроби можно получить правильную? Каки слагаемые при этом образуются?
- 19.Опишите процесс разложения правильной дроби на слагаемые.

Раздел 2. Линейная алгебра и аналитическая геометрия

Линейная алгебра – это раздел алгебры, изучающий объекты линейной природы. К ним относятся такие структуры, как матрицы и определители, системы линейных алгебраических уравнений, векторы, линии и поверхности первого порядка, векторные пространства, тензоры, квадратичные и билинейные формы, линейные отображения. Геометрические линейные структуры: векторы, плоскости и прямые исследуются также средствами аналитической геометрии.

Глава 4. Матрицы и определители

При изучении различных по природе и физическим характеристикам явлений или процессов исследователь часто имеет дело с целым набором различных данных, которые оформляются в виде числовых прямоугольных таблиц. Дальнейшая обработка этих данных, анализ полученных результатов предполагает вычислительную работу с табличными формами.

Использование методов математической статистики, математического моделирования, алгоритмов построения прогнозов также предполагают глубокую аналитическую работу по исследованию табличных массивов, выполнению различных операций и преобразований исходных числовых данных.

Для математической обработки таблиц введено понятие матрицы, представляющей числовой двумерный массив. Матрицы являются алгебраическими структурами, для них установлены преобразования, определены алгебраические операции, предложены различные оценки их качественных характеристик.

Матричное счисление является мощным математическим инструментом в руках компетентного специалиста, который для получения оптимальных решений в своей области рассматривает проблему в комплексе, используя алгебраические приемы, методы системного анализа, математической статистики, опирается на большие массивы наблюдений, качественных и количественных показателей.

4.1. Основные понятия матричного счисления

4.1.1. Определение матрицы

Определение. Матрицей называется прямоугольная таблица чисел, содержащая m строк и n столбцов.

Числа m и n называются порядками матрицы. В случае если $m = n$, матрица называется квадратной, а число $m = n$ – ее порядком.

Для записи матрицы обычно применяются круглые скобки, а для краткого обозначения матрицы часто используются заглавные латинские буквы:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}. \quad (4.1)$$

Числа a_{ij} , входящие в состав данной матрицы, называются ее элементами. В записи a_{ij} первый индекс i означает номер строки, а второй индекс j – номер столбца.

Элементы матрицы могут иметь любые значения из множества действительных чисел.

Пример. Ниже представлена матрица порядков 3×2 .

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 3,5 & 9 & 9 \\ 0 & \frac{2}{3} & 65 & 400 & \sqrt{8} \\ \cos 3 & 17 & 0,8 & \pi & \log_2 5 \end{pmatrix}.$$

Две матрицы считаются равными, если они имеют одинаковые порядки и все их соответствующие элементы совпадают.

Матрица называется *нулевой* порядков m и n , если все ее элементы равны нулю. Она обозначается символом O . В качестве примера приведем нулевую матрицу порядков 2 и 3.

Пример. Нулевая матрица порядков 2×3 .

$$O = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

4.1.2. Квадратные матрицы

Матрица называется квадратной, если ее порядки совпадают. В этом случае количество строк матрицы совпадает с количеством ее столбцов.

В случае квадратной матрицы вводятся понятия главной и побочной диагоналей. Главной диагональю квадратной матрицы называется диагональ $a_{11}, a_{22}, \dots, a_{nn}$, идущая из левого верхнего угла этой матрицы в правый нижний ее угол. Побочной диагональю той же матрицы называется диагональ $a_{n1}, a_{(n-1)2}, \dots, a_{1n}$, идущая из левого нижнего угла в правый верхний угол:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}. \quad (4.2)$$

Среди квадратных матриц отметим, так называемые, симметричные матрицы. Действительно, для таких матриц наблюдается симметрия относительно их главных диагоналей. Таким образом, для каждой пары элементов a_{ij} и a_{ji} симметричной матрицы A выполняется равенство:

$$a_{ij} = a_{ji}.$$

Пример. Симметричная матрица порядков 4x4.

$$A = \begin{pmatrix} 2 & -4 & 1 & 5 \\ -4 & 3 & 0 & 3 \\ 1 & 0 & 1 & 6 \\ 5 & 3 & 6 & 8 \end{pmatrix}.$$

Еще одним классом квадратных матриц являются треугольные матрицы. Матрица A называется верхней треугольной, если все ее элементы, находящиеся ниже главной диагонали, равны нулю, и соответственно нижней треугольной, если все ее элементы, находящиеся выше главной диагонали, равны нулю.

Пример. Ниже представлены верхняя треугольная матрица B и нижняя треугольная матрица C .

$$B = \begin{pmatrix} 7 & 3 & -1 & -9 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 \end{pmatrix}; \quad C = \begin{pmatrix} 7 & 0 & 0 & 0 \\ -15 & 3 & 0 & 0 \\ 9 & -6 & 0 & 0 \\ 0 & 24 & 13 & 1 \end{pmatrix}.$$

Среди квадратных матриц выделим класс так называемых диагональных матриц, у каждой из которых элементы, расположенные вне главной диагонали, равны нулю. Каждая диагональная матрица порядка n имеет вид:

$$D = \begin{pmatrix} d_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_2 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & d_n \end{pmatrix},$$

где $d_1, d_2, \dots, d_n$ – произвольные числа.

В классе всех диагональных матриц рассмотрим матрицы с совпадающими элементами d_i , то есть такие матрицы у которых элементы главной диагонали равны между собой: $d_1 = d_2 = \dots = d_n$.

Особо важную роль из них играет матрица, все диагональные элементы которой равны единицам. Такая матрица называется единичной матрицей n -го порядка и обозначается символом E или E_n .

Пример. Единичная матрица порядков 4×4 .

$$E_4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

4.1.3. Транспонирование матриц

Преобразование матрицы, заключающееся в замене строк этой матрицы на ее столбцы с сохранением их порядка, называется *транспонированием матрицы*.

Пусть дана исходная матрица A :

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix},$$

тогда, согласно определению, транспонированная матрица A^T имеет вид:

$$A^T = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} & \dots & a_{m1} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} & \dots & a_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{1n} & a_{2n} & a_{3n} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}.$$

Пример. Пусть даны две матрицы F и G :

$$G = \begin{pmatrix} -1 & 8 & 7 \\ 3 & 2 & 0 \\ 4 & -2 & -4 \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 4 & 9 & 16 \end{pmatrix},$$

тогда соответствующие им транспонированные матрицы имеют вид:

$$G^T = \begin{pmatrix} -1 & 3 & 4 \\ 8 & 2 & -2 \\ 7 & 0 & -4 \end{pmatrix}, \quad F^T = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 4 \\ 3 & 9 \\ 4 & 16 \end{pmatrix}.$$

4.2. Операции над матрицами

Перейдем к определению основных линейных операций над матрицами.

4.2.1. Сложение матриц

Суммой двух матриц A и B одних и тех же порядков m и n называется матрица C тех же порядков m и n , элементы которой равны:

$$c_{ij} = a_{ij} + b_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n). \quad (4.3)$$

Для обозначения суммы двух матриц используется запись $C = A + B$.

Операция составления суммы матриц называется их *сложением*.

Итак, по определению

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} + b_{11} & a_{12} + b_{12} & \dots & a_{1n} + b_{1n} \\ a_{21} + b_{21} & a_{22} + b_{22} & \dots & a_{2n} + b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} + b_{n1} & a_{n2} + b_{n2} & \dots & a_{nn} + b_{nn} \end{pmatrix}.$$

Пример. Найдем сумму двух матриц.

$$A + B = \begin{pmatrix} 11 & 3 & -2 \\ 4 & -12 & 5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -6 & 20 & 8 \\ 5 & 2 & 14 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 11 + (-6) & 3 + 20 & -2 + 8 \\ 4 + 5 & -12 + 2 & 5 + 14 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 & 23 & 6 \\ 9 & -10 & 19 \end{pmatrix}$$

Из определения суммы матриц непосредственно вытекает, что операция сложения матриц обладает теми же свойствами, что и операция сложения вещественных чисел, а именно:

1) *коммутативностью* (переместительным свойством):

$$A + B = B + A;$$

2) *ассоциативностью* (сочетательным свойством):

$$(A + B) + C = A + (B + C);$$

3) *существованием нуля*:

$$A + O = O + A.$$

Эти свойства позволяют не заботиться о порядке следования слагаемых матриц при сложении двух или большего числа матриц.

4.2.2. Умножение матрицы на число

Произведением матрицы A на вещественное число k называется матрица C , элементы которой равны:

$$c_{ij} = ka_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m). \quad (4.4)$$

Для обозначения произведения матрицы на число используется запись $C = kA$ или $C = Ak$. Операция составления произведения матрицы на число называется *умножением матрицы на это число*.

$$k \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ka_{11} & ka_{12} & \dots & ka_{1n} \\ ka_{21} & ka_{22} & \dots & ka_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ ka_{n1} & ka_{n2} & \dots & ka_{nn} \end{pmatrix}.$$

Пример. Умножим матрицу A на число 3.

$$A \cdot 3 = \begin{pmatrix} 2 & 3 & 1 \\ 4 & 0 & -2 \\ 8 & 3 & 4 \end{pmatrix} \cdot 3 = \begin{pmatrix} 6 & 9 & 3 \\ 12 & 0 & -6 \\ 24 & 9 & 12 \end{pmatrix}.$$

Непосредственно из определения ясно, что умножение матрицы на число обладает следующими свойствами:

1) *коммутативностью*:

$$kA = Ak;$$

2) *ассоциативностью* относительно числового множителя:

$$(kp)A = k(pA);$$

3) *дистрибутивностью* (распределительным свойством) относительно суммы матриц:

$$k(A + B) = kA + kB;$$

4) *дистрибутивностью* относительно суммы чисел:

$$(k + p)A = kA + pA.$$

Замечание. Разностью двух матриц A и B , одинаковых порядков n и m , естественно назвать такую матрицу C тех же порядков n и m , которая в сумме с матрицей B дает матрицу A . Для обозначения разности двух матриц используется естественная запись: $C = A - B$.

Очень легко убедиться в том, что разность C двух матриц A и B может быть получена по правилу $C = A + (-1) \cdot B$.

4.2.3. Матричное произведение

Произведением матрицы A , имеющей порядки, соответственно равные n и m , на матрицу B , имеющую порядки, соответственно равные n и p , называется матрица C , имеющая порядки, соответственно равные m и p , и элементы c_{ij} определяемые формулой:

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^n a_{ik} \cdot b_{kj} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, p). \quad (4.5)$$

Выше указанная формула представляет собой правило составления элементов матрицы C , являющейся произведением матрицы A на матрицу B . Это правило можно сформулировать и словесно: элемент c_{ij} , стоящий на пересечении i -й строки и j -го столбца матрицы $C = AB$, равен сумме попарных произведений соответствующих элементов i -и строки матрицы A и j -го столбца матрицы B .

В качестве примера применения указанного правила приведем формулу перемножения квадратных матриц второго порядка:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11}b_{11} + a_{12}b_{21} & a_{11}b_{12} + a_{12}b_{22} \\ a_{21}b_{11} + a_{22}b_{21} & a_{21}b_{12} + a_{22}b_{22} \end{pmatrix}.$$

Для обозначения произведения матрицы A на матрицу B используют запись $C = AB$. Операция составления произведения матрицы A на матрицу B называется *перемножением* этих матриц.

Из сформулированного выше определения вытекает, что матрицу A можно умножить не на всякую матрицу B : необходимо, чтобы число столбцов матрицы A было равно числу строк матрицы B .

Пример. Умножим матрицу A на матрицу B .

$$\text{Если } A = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 2 \end{pmatrix} \text{ и } B = \begin{pmatrix} 4 & 1 & 2 \\ 0 & 3 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \text{ то}$$

$$AB = \begin{pmatrix} 2 \cdot 4 + 0 \cdot 0 + 1 \cdot 0 & 2 \cdot 1 + 0 \cdot 3 + 1 \cdot 1 & 2 \cdot 2 + 0 \cdot 1 + 1 \cdot 0 \\ 0 \cdot 4 + (-1) \cdot 0 + 2 \cdot 0 & 0 \cdot 1 + (-1) \cdot 3 + 2 \cdot 1 & 0 \cdot 2 + (-1) \cdot 1 + 2 \cdot 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 8 & 3 & 4 \\ 0 & -1 & -1 \end{pmatrix}.$$

В частности, оба произведения AB и BA можно определить лишь в том случае, когда число столбцов A совпадает с числом строк B , а число строк A совпадает с числом столбцов B . При этом обе матрицы AB и BA будут квадратными, но порядки их будут, вообще говоря, различными.

Пример. Найдём матричные произведения AB и BA .

$$\text{Если } A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 2 & -1 & 3 \end{pmatrix} \text{ и } B = \begin{pmatrix} 4 & 1 \\ -2 & 0 \\ 3 & 2 \end{pmatrix}, \text{ то}$$

$$AB = \begin{pmatrix} 1 \cdot 4 + 0 \cdot (-2) + 1 \cdot 3 & 1 \cdot 1 + 0 \cdot 0 + 1 \cdot 2 \\ 2 \cdot 4 + (-1) \cdot (-2) + 3 \cdot 3 & 2 \cdot 1 + (-1) \cdot 0 + 3 \cdot 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7 & 3 \\ 19 & 8 \end{pmatrix},$$

однако

$$BA = \begin{pmatrix} 4 \cdot 1 + 1 \cdot 2 & 4 \cdot 0 + 1 \cdot (-1) & 4 \cdot 1 + 1 \cdot 3 \\ -2 \cdot 1 + 0 \cdot 2 & -2 \cdot 0 + 0 \cdot (-1) & -2 \cdot 1 + 0 \cdot 3 \\ 3 \cdot 1 + 2 \cdot 2 & 3 \cdot 0 + 2 \cdot (-1) & 3 \cdot 1 + 2 \cdot 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 & -1 & 7 \\ -2 & 0 & -2 \\ 7 & -2 & 9 \end{pmatrix}.$$

Для того чтобы оба произведения AB и BA не только были определены, но и имели одинаковый порядок, необходимо и достаточно, чтобы обе матрицы A и B были квадратными матрицами одного и того же порядка.

Из определения вытекают следующие свойства произведения матрицы A на матрицу B :

1) *ассоциативность* относительно произведения матриц:

$$(AB)C = A(BC);$$

2) *дистрибутивность* относительно суммы матриц:

$$(A + B)C = AC + BC \text{ или } A(B + C) = AB + AC;$$

3) *существование единицы*:

$$AE = EA = A.$$

Вопрос о коммутативности произведения матрицы A на матрицу B имеет смысл лишь для квадратных матриц A и B одинакового порядка (так как только для таких матриц A и B оба произведения AB и BA определены и являются матрицами одинаковых порядков). Две матрицы, для произведения которых справедливо перестановочное свойство, принято называть *коммутирующими*. Элементарные примеры показывают, что произведение двух квадратных матриц одинакового порядка не обладает, вообще говоря, коммутативностью.

Пример. Рассмотрим две матрицы.

$$\text{Если } A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix} \text{ и } B = \begin{pmatrix} 5 & 6 \\ 7 & 8 \end{pmatrix}, \text{ то}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 5 & 6 \\ 7 & 8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \cdot 5 + 2 \cdot 7 & 1 \cdot 6 + 2 \cdot 8 \\ 3 \cdot 5 + 4 \cdot 7 & 3 \cdot 6 + 4 \cdot 8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 19 & 22 \\ 43 & 50 \end{pmatrix},$$

однако,

$$\begin{pmatrix} 5 & 6 \\ 7 & 8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \cdot 1 + 6 \cdot 3 & 5 \cdot 2 + 6 \cdot 4 \\ 7 \cdot 1 + 8 \cdot 3 & 7 \cdot 2 + 8 \cdot 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 23 & 34 \\ 31 & 46 \end{pmatrix}.$$

4.3. Определители

Рассмотрим произвольную квадратную матрицу A любого порядка n :

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}.$$

С каждой такой матрицей свяжем вполне определенную численную характеристику, называемую *определителем*, соответствующим этой матрице. В отличие от матрицы для обозначения определителя употребляют не круглые, а прямые скобки, а перед буквенным выражением указывается слово *det*. Определитель матрицы A обозначается:

$$\det A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{vmatrix}.$$

В дальнейшем мы будем говорить об элементах, строках или столбцах определителя, подразумевая под этими терминами соответственно элементы, строки или столбцы отвечающей этому определителю матрицы.

4.3.1. Вычисление определителей 1-го, 2-го и 3-го порядков

Если порядок n матрицы равен единице, то эта матрица состоит из одного элемента a_{11} .

Определителем первого порядка, соответствующим такой матрице, является величина ее единственного элемента:

$$\det A = |a_{11}| = a_{11}. \quad (4.6)$$

Пример. Если $A = (-7)$, то

$$\det A = |-7| = -7.$$

Если порядок n матрицы равен двум, т. е. если эта матрица имеет вид:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix},$$

то определителем второго порядка, соответствующим такой матрице, назовем число, равное $a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$. Таким образом, определитель второго порядка, соответствующий вышеуказанной матрице, равен разности произведения элементов, стоящих на главной диагонали этой матрицы, и произведения элементов, стоящих на побочной ее диагонали:

$$\det A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}. \quad (4.7)$$

Пример. Если $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{pmatrix}$, то

$$\det A = \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{vmatrix} = 1 \cdot 4 - 2 \cdot 3 = -2.$$

Если порядок n матрицы равен трем, эта матрица будет иметь вид

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix},$$

и ее определитель можно вычислить следующим образом:

$$\det A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22}a_{33} + a_{21}a_{32}a_{13} + a_{11}a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22}a_{31} - a_{23}a_{32}a_{11} - a_{33}a_{12}a_{31}. \quad (4.8)$$

Следует запомнить правило, по которому оно получается. Три первых слагаемых представляют собой произведения элементов, находящихся на главной диагонали матрицы, и элементов, находящихся на двух диагоналях

параллельных главной, соответственно. Для построения этих диагоналей перенесем элемент a_{13} , а также элементы a_{12} , a_{23} вниз.

$$\det A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22}a_{33} + a_{21}a_{32}a_{13} + a_{11}a_{12}a_{23} - \dots$$

$$a_{12} \quad a_{13}$$

$$a_{23}$$

Четвертое, пятое и шестое слагаемые представляют собой произведения элементов, находящихся на побочной диагонали матрицы, и элементов, находящихся на двух диагоналях параллельных побочной, взятые с противоположным знаком. Для построения этих диагоналей перенесем вниз элементы a_{13} и a_{23} .

$$\det A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22}a_{33} + a_{21}a_{32}a_{13} + a_{11}a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22}a_{31} - a_{23}a_{32}a_{11} - a_{33}a_{12}a_{31}$$

$$a_{11} \quad a_{12} \quad a_{13}$$

$$a_{21} \quad a_{23}$$

Пример. Если $A = \begin{pmatrix} 2 & 4 & -5 \\ 3 & 0 & 1 \\ -1 & -2 & 0 \end{pmatrix}$, то

$$\det A = \begin{vmatrix} -2 & -4 & -5 \\ 3 & 0 & 1 \\ -1 & 2 & 0 \end{vmatrix} = \begin{matrix} (-2) \cdot 0 \cdot 0 + 4 \cdot 2 \cdot (-5) + (-1) \cdot (-4) \cdot 1 - \\ -(-5) \cdot 0 \cdot (-1) - 1 \cdot 2 \cdot (-2) - \\ -(-1) \cdot (-4) \cdot 1 = 0 - 40 + 4 - 0 + 4 - 4 = -36. \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} -2 & -4 & -5 \\ 3 & & 1 \end{matrix}$$

Вычисление определителей 4-го и последующих порядков сводится к вычислению определителей 2-го и 3-го порядков.

4.3.2. Миноры и алгебраические дополнения элементов матрицы

Если в определителе n -го порядка вычеркнуть какую-нибудь строку и какой-нибудь столбец, то оставшиеся элементы образуют определитель $(n-1)$ -го

порядка, называемый минором элемента, стоящего на пересечении вычеркнутых рядов.

Минор элемента a_{ij} обозначается M_{ij} .

Пример. Минором для элемента a_{23} матрицы $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 2 & -1 & 1 \\ 4 & -2 & 5 \end{pmatrix}$

является

$$M_{23} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 4 & -2 \end{vmatrix} = -6.$$

Алгебраическим дополнением элемента a_{ij} называется минор этого элемента, взятый со знаком (-1) . Обозначается A_{ij}

$$A_{ij} = (-1)^{i+j} M_{ij}. \quad (4.9)$$

Пример. Алгебраическим дополнением элемента a_{23} матрицы

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 2 & -1 & 1 \\ 4 & -2 & 5 \end{pmatrix}$$

является

$$A_{23} = (-1)^{2+3} \cdot M_{23} = (-1)^5 \cdot (-6) = 6.$$

4.3.3. Вычисление определителей n-ого порядка

Естественно возникает вопрос, нельзя ли использовать для получения величины определителя матрицы их элементы и отвечающие им миноры. Ответ на этот вопрос дает следующая теорема.

Теорема 1.1. Лапласа (1749-1827). Определитель любой матрицы можно вычислить как сумму произведений элементов любой строки или любого столбца на их алгебраические дополнения.

$$\det A = \sum_{i=1}^n a_{ij} A_{ij}. \quad (4.10)$$

Пример. Найдем определитель четвертого порядка

$$\begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 3 & 0 & 0 & 1 \\ 8 & 1 & 2 & 6 \\ 3 & 9 & 8 & 0 \end{vmatrix}.$$

Для начала выберем строку или столбец, по которым можно разложить определитель. Естественно, нас интересуют строка или столбец, содержащие наибольшее количество нулевых элементов. Представим определитель матрицы в виде суммы произведений элементов второй строки на алгебраические дополнения этих элементов.

$$\begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 3 & 0 & 0 & 1 \\ 8 & 1 & 2 & 6 \\ 3 & 9 & 8 & 0 \end{vmatrix} = a_{21} \cdot A_{21} + a_{22} \cdot A_{22} + a_{23} \cdot A_{23} + a_{24} \cdot A_{24}.$$

Теперь достаточно вычислить только A_{21} и A_{24} , так как произведения $0 \cdot A_{22}$ и $0 \cdot A_{23}$ равны нулю.

$$A_{21} = (-1)^{2+1} \cdot M_{21} = -1 \cdot 26 = -26.$$

$$A_{24} = (-1)^{3+4} \cdot M_{24} = 1 \cdot 81 = 81.$$

Подставив найденные значения в вычисления получим окончательное решение:

$$\begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 3 & 0 & 0 & 1 \\ 8 & 1 & 2 & 6 \\ 3 & 9 & 8 & 0 \end{vmatrix} = 3 \cdot (-26) + 1 \cdot 81 = -78 + 81 = 3.$$

4.3.4. Свойства определителей

Установим ряд свойств, которыми обладает произвольный определитель n -го порядка.

1. Если какая-либо строка (столбец) матрицы состоит из одних нулей, то ее определитель равен нулю.

Пример. Определить матрицы $\begin{pmatrix} 1 & 3 & 0 & 3 \\ 3 & 2 & 0 & 1 \\ 2 & -1 & 0 & -3 \end{pmatrix}$ равен нулю, поскольку все

элементы третьего столбца равны нулю.

2. Если все элементы какой-либо строки (столбца) матрицы умножить на произвольное число λ , то ее определитель умножится на это число λ .

Пример. Если определитель матрицы второго порядка $\begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 3 & 2 \end{pmatrix}$ равен -7 , то определитель матрицы $\begin{pmatrix} 4 & 3 \\ 12 & 2 \end{pmatrix}$, полученной умножением второго столбца на 4 будет равен -28 .

3. При транспонировании матрицы ее определитель не изменяется.

Пример. Определитель матрицы $\begin{pmatrix} 4 & 6 & 9 \\ 4 & 5 & 8 \\ 3 & 9 & 5 \end{pmatrix}$ равен 25, после транспонирования определитель матрицы $\begin{pmatrix} 4 & 4 & 3 \\ 6 & 5 & 9 \\ 9 & 8 & 5 \end{pmatrix}$ также будет равен 25.

4. При перестановке двух строк (столбцов) матрицы ее определитель меняет знак на противоположный.

Пример. Определитель матрицы $\begin{pmatrix} 5 & 1 & 3 \\ 2 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ равен -1 . Если поменять местами второй и третий столбцы, то определитель матрицы $\begin{pmatrix} 5 & 3 & 1 \\ 2 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ будет равен единице.

5. Если матрица содержит две одинаковые строки (столбца), то ее определитель равен нулю.

Пример. Определитель матрицы $\begin{pmatrix} 8 & 8 & -5 \\ 7 & 7 & 6 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix}$ равен нулю, поскольку

первый и второй столбцы равны.

6. Если элементы двух строк (столбцов) матрицы пропорциональны, то ее определитель равен нулю.

Пример. Определитель матрицы $\begin{pmatrix} 4 & 8 & -12 \\ -3 & -6 & 9 \\ 7 & -6 & -7 \end{pmatrix}$ также равен нулю,

поскольку первая и вторая строки матрицы пропорциональны.

7. Сумма произведений элементов какой-либо строки (столбца) матрицы на алгебраические дополнения элементов другой строки (столбца) этой матрицы равна нулю.

Пример. Возьмем матрицу третьего порядка $\begin{pmatrix} 9 & 4 & 1 \\ 0 & 3 & 2 \\ 1 & 5 & 3 \end{pmatrix}$. Рассчитаем

произведение элементов первого столбца на алгебраические дополнения третьего столбца:

$$a_{11} \cdot A_{31} + a_{12} \cdot A_{32} + a_{13} \cdot A_{33}.$$

Найдем алгебраические дополнения A_{31}, A_{32}, A_{33} :

$$A_{31} = (-1)^{3+1} \begin{vmatrix} 0 & 3 \\ 1 & 5 \end{vmatrix} = -3; \quad A_{32} = (-1)^{3+2} \begin{vmatrix} 9 & 4 \\ 1 & 5 \end{vmatrix} = 41; \quad A_{33} = (-1)^{3+3} \begin{vmatrix} 9 & 4 \\ 0 & 3 \end{vmatrix} = 27.$$

Тогда

8. Определитель матрицы не изменится, если к элементам какой-либо строки (столбца) матрицы прибавить элементы другой строки (столбца), предварительно умноженные на одно и то же число.

Пример. Возьмем ту же матрицу третьего порядка $\begin{pmatrix} 9 & 4 & 1 \\ 0 & 3 & 2 \\ 1 & 5 & 3 \end{pmatrix}$.

Определитель этой матрицы равен -4 . Теперь прибавим к элементам первой строки элементы второй, предварительно умноженные на 10:

$$\begin{pmatrix} 9 + 0 \cdot 10 & 4 + 3 \cdot 10 & 1 + 2 \cdot 10 \\ 0 & 3 & 2 \\ 1 & 5 & 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 9 & 34 & 21 \\ 0 & 3 & 2 \\ 1 & 5 & 3 \end{pmatrix}.$$

Определитель полученной матрицы также будет равен -4 .

9. Определитель произведения двух квадратных матриц равен произведению их определителей.

Пример. Возьмем две матрицы $\begin{pmatrix} 0 & 3 & 3 \\ 8 & -11 & -2 \\ 2 & -1 & 1 \end{pmatrix}$ и $\begin{pmatrix} 4 & -1 & 0 \\ 8 & 0 & 1 \\ 5 & 3 & 3 \end{pmatrix}$.

Определители этих матриц соответственно будут равны:

$$\begin{vmatrix} 0 & 3 & 3 \\ 8 & -11 & -2 \\ 2 & -1 & 1 \end{vmatrix} = 6; \quad \begin{vmatrix} 4 & -1 & 0 \\ 8 & 0 & 1 \\ 5 & 3 & 3 \end{vmatrix} = 7.$$

Найдем произведение двух матриц:

$$\begin{pmatrix} 0 & 3 & 3 \\ 8 & -11 & -2 \\ 2 & -1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 4 & -1 & 0 \\ 8 & 0 & 1 \\ 5 & 3 & 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 39 & 9 & 12 \\ -66 & -14 & -17 \\ 5 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

Согласно девятому свойству $\begin{vmatrix} 39 & 9 & 12 \\ -66 & -14 & -17 \\ 5 & 1 & 2 \end{vmatrix} = 6 \cdot 7 = 42.$

4.4. Ранг матрицы

4.4.1. Понятие ранга матрицы и базисных миноров

Пусть дана матрица A , состоящая из m строк и n столбцов. Произвольным образом выделим k строк и k столбцов. Элементы, находящиеся на пересечении выделенных строк и столбцов, образуют квадратную матрицу k -го порядка.

Определитель полученной матрицы называется *минором k -го порядка* матрицы A :

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

$$M_3 = \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} & a_{2n} \\ a_{32} & a_{32} & a_{3n} \\ a_{m2} & a_{m3} & a_{mn} \end{vmatrix}$$

В матрице A порядков m, n вычеркиванием каких-либо строк и столбцов можно вычленить квадратные подматрицы k -го порядка, где $k \leq \min(m, n)$. Определители таких подматриц называются *минорами k -го порядка матрицы A* .

Миноров k -го порядка можно создать несколько, если только исходная матрица сама не является квадратной k -го порядка. При этом максимальный порядок миноров не будет превышать меньший порядок самой матрицы.

Из всех возможных миноров матрицы A выделим миноры отличные от нуля, тогда из всех ненулевых миноров можно найти, по крайней мере, один минор наибольшего порядка.

Наивысший порядок миноров матрицы A , отличных от нуля, называется рангом матрицы A , а отличный от нуля минор матрицы, порядок которого равен рангу матрицы A , называется базисным минором.

Столбцы и строки матрицы, участвующие в образовании базисного минора, обычно называются базисными столбцами и базисными строками. У каждой матрицы может быть один или несколько базисных миноров.

Следствия из определения

1. Ранг матрицы A_{mn} не превосходит меньшего из ее размеров, т.е. $r(A) \leq \min(m; n)$.
2. $r(A) = 0$ тогда и только тогда, когда все элементы матрицы равны нулю.
3. Для квадратной матрицы n -го порядка $r(A) = n$ тогда и только тогда, когда матрица A - невырожденная.

Пример. Вычислить ранг матрицы $A = \begin{vmatrix} 1 & 3 & 0 & 3 \\ 3 & 2 & 0 & 1 \\ 2 & -1 & 0 & -3 \end{vmatrix}$.

Для данной матрицы $r(A) \leq \min(3; 4) \Rightarrow r(A) \leq 3$.

Проверим, равен ли ранг 3, для этого вычислим все миноры третьего порядка, т.е. определители всех подматриц третьего порядка (их всего 4, они получаются при вычеркивании одного из столбцов матрицы):

$$\begin{vmatrix} 3 & 0 & 4 \\ 2 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & -3 \end{vmatrix} = 0; \quad \begin{vmatrix} 1 & 0 & 4 \\ 3 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & -3 \end{vmatrix} = 0; \quad \begin{vmatrix} 1 & 3 & 4 \\ 3 & 2 & 1 \\ 2 & -1 & -3 \end{vmatrix} = 0; \quad \begin{vmatrix} 1 & 3 & 0 \\ 3 & 2 & 0 \\ 2 & -1 & 0 \end{vmatrix} = 0.$$

Поскольку все миноры третьего порядка нулевые, $r(A) \leq 2$. Так существует ненулевой минор второго порядка, например,

$$\begin{vmatrix} 1 & 3 \\ 3 & 2 \end{vmatrix} = -7.$$

Таким образом, ранг матрицы равен двум.

4.4.2. Метод окаймляющих миноров

Нахождение ранга матрицы можно произвести методом окаймляющих миноров. Метод использует достаточно простой алгоритм.

1. Будем считать, что ранг матрицы не меньше единицы, если матрица содержит хотя бы один ненулевой элемент.
2. При вычислении ранга матрицы следует переходить от миноров меньших порядков к минорам больших порядков.

3. Если найден минор k -го порядка, определитель которого отличен от нуля, то требуется вычислить миноры $(k+1)$ -го порядка, окаймляющие этот минор.
4. Если все они равны нулю, то ранг матрицы равен k .

Пример. Найдем ранг матрицы A порядков 6 и 7.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 2 & 4 & 6 & 9 & 4 & 1 & 3 \\ 2 & 4 & 5 & 8 & 10 & 12 & 4 \\ 2 & 3 & 9 & 5 & 1 & 1 & 4 \\ 1 & 1 & 6 & 1 & -4 & -5 & -3 \\ 4 & 8 & 11 & 17 & 14 & 13 & 7 \end{pmatrix}.$$

Ранг матрицы больше нуля, поскольку матрица содержит ненулевые элементы. Переходим к минорам больших порядков. Найдем хотя бы один минор второго порядка. Если двигаться от левого верхнего угла, то можно взять минор, полученный выделением второй, третьей строк и второго, третьего столбцов:

$$M_2 = \begin{pmatrix} 4 & 6 \\ 4 & 5 \end{pmatrix} = -4 \neq 0.$$

Рассмотрим окаймляющие миноры порядка $2 + 1 = 3$. При добавлении, например, четвертой строки и четвертого столбца получим минор третьего порядка:

$$M_3 = \begin{pmatrix} 4 & 6 & 9 \\ 4 & 5 & 8 \\ 3 & 9 & 5 \end{pmatrix} = 25 \neq 0.$$

Рассмотрим окаймляющие миноры порядка $3 + 1 = 4$. При добавлении, например, пятой строки и пятого столбца получим минор четвертого порядка:

$$M_4 = \begin{pmatrix} 4 & 6 & 9 & 4 \\ 4 & 5 & 8 & 10 \\ 3 & 9 & 5 & 1 \\ 1 & 6 & 1 & -4 \end{pmatrix} = -25 \neq 0.$$

Все миноры, окаймляющие минор M_4 , равны нулю. Ранг матрицы A , таким образом, равен четырем.

4.4.3. Вычисление ранга матрицы методом Гаусса

Метод Гаусса сводится к приведению матрицы к верхнему треугольному виду с помощью элементарных преобразований. Эти преобразования можно определить так:

1. Транспонирование.
2. Перемена мест двух строк (столбцов).
3. Умножение всех элементов строки (столбца) на некоторое число $a \neq 0$.
4. Суммирование всех элементов одной строки (столбца) с соответствующими элементами иной строки (столбца), умноженными на некоторое действительное число.

Если после преобразований исходная матрица стала треугольной (трапециевидной), то ранг матрицы будет равен количеству ненулевых строк.

Пример. Найдем ранг матрицы $\begin{pmatrix} 0 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{pmatrix}$ методом Гаусса.

Для того, чтобы левый верхний элемент матрицы не был равен нулю, поменяем местами 1-ю и 2-ю строки.

$$\begin{pmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 0 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{pmatrix}.$$

Добьёмся того, чтобы в первом столбце все элементы, кроме верхнего, стали равными нулю. Для этого Из 3-й строки, умноженной на 2 вычтем 1-ю строку, умноженную на 3, а из 4-й строки вычитаем 1-ю строку, умноженную на 2. Получим:

$$\begin{pmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 0 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 0 & -1 & -2 & -3 & -4 \\ 0 & -1 & -2 & -3 & -4 \end{pmatrix}.$$

Первые две строки матрицы оставим без изменения, а к третьей и четвертой строкам, умноженным на 2, прибавим вторую строку:

$$\begin{pmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 0 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 0 & 0 & -1 & -2 & -3 \\ 0 & 0 & -1 & -2 & -3 \end{pmatrix}.$$

Для дальнейших преобразований оставим без изменения первые три строки, а из четвертой строки вычтем третью:

$$\begin{pmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 0 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 0 & 0 & -1 & -2 & -3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Из полученной матрицы вычеркнем четвертую строку, оказавшуюся нулевой:

$$\begin{pmatrix} 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 0 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 0 & 0 & -1 & -2 & -3 \end{pmatrix}.$$

Тогда ранг матрицы A будет равен количеству оставшихся после преобразования строк: $\text{rang}(A)=3$.

4.5. Обратная матрица

4.5.1. Определение обратной матрицы

Обратной матрицей для данной квадратной матрицы A называется такая матрица A^{-1} , произведение матрицы A на которую и справа и слева является единичной матрицей:

$$A \cdot A^{-1} = A^{-1} \cdot A = E.$$

Пример. Матрицы $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$ и $\begin{pmatrix} -1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 2 & -1 & 1 \end{pmatrix}$ являются

взаимобратными, поскольку

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 2 & -1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 2 & -1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Теорема 1.2. (необходимое и достаточное условие существования обратной матрицы). Обратная матрица A^{-1} существует (и единственна) тогда и только тогда, когда исходная матрица A невырожденная.

4.5.2. Нахождение обратной матрицы

Найти обратную матрицу можно по формуле:

$$A^{-1} = \frac{1}{\det A} \begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} & \dots & A_{n1} \\ A_{12} & A_{22} & \dots & A_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{1n} & A_{2n} & \dots & A_{nn} \end{pmatrix}, \quad (4.11)$$

где A_{ij} – алгебраические дополнения элементов a_{ij} матрицы A .

Пример. Найти матрицу, обратную к данной $A = \begin{pmatrix} 5 & 1 & 3 \\ 2 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \end{pmatrix}$.

Выясним, является ли матрица невырожденной. Для этого вычислим определитель этой матрицы:

$$\det A = \begin{vmatrix} 5 & 1 & 3 \\ 2 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \end{vmatrix} = -1.$$

Определитель не равен нулю, поэтому для матрицы A существует обратная.

Найдем все алгебраические дополнения матрицы A .

$$\begin{aligned} A_{11} &= \begin{vmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = 1; & A_{12} &= -\begin{vmatrix} 2 & 1 \\ 2 & 1 \end{vmatrix} = 0; & A_{13} &= \begin{vmatrix} 2 & 2 \\ 2 & 1 \end{vmatrix} = -4; \\ A_{21} &= -\begin{vmatrix} 1 & 3 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = 2; & A_{22} &= \begin{vmatrix} 5 & 3 \\ 2 & 1 \end{vmatrix} = -1; & A_{23} &= -\begin{vmatrix} 5 & 1 \\ 2 & 1 \end{vmatrix} = -3; \\ A_{31} &= \begin{vmatrix} 1 & 3 \\ 2 & 1 \end{vmatrix} = -5; & A_{32} &= -\begin{vmatrix} 5 & 3 \\ 2 & 1 \end{vmatrix} = 1; & A_{33} &= -\begin{vmatrix} 5 & 1 \\ 2 & 2 \end{vmatrix} = 8. \end{aligned}$$

Составим обратную матрицу

$$A^{-1} = \frac{1}{\det A} \begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} & A_{31} \\ A_{12} & A_{22} & A_{32} \\ A_{13} & A_{23} & A_{33} \end{pmatrix} = \frac{1}{-1} \begin{pmatrix} 1 & 2 & -5 \\ 0 & -1 & 1 \\ -2 & -3 & 8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & -2 & 5 \\ 0 & 1 & -1 \\ 2 & 3 & -8 \end{pmatrix}.$$

4.5.3. Вычисление обратной матрицы методом Гаусса

Еще одним методом нахождения обратной матрицы является метод Гаусса.

Алгоритм его использования достаточно прост.

К матрице A , по отношению к которой ищется обратная матрица, приписывается справа единичная матрица E :

$$A = \left(\begin{array}{ccccc|ccccc} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{array} \right).$$

Затем с помощью преобразований «прямым ходом» и «обратным ходом» метода Гаусса всей полученной системы матриц $(A|E)$, находящаяся слева матрица A приводится к виду единичной матрицы, а в то же время находящаяся справа единичная матрица одновременно превращается в матрицу A^{-1} .

Для выполнения элементарных преобразований можно использовать следующие правила:

1. Умножение всех элементов строки (столбца) на некоторое число $a \neq 0$.

2. Суммирование всех элементов одной строки с соответствующими элементами другой строки, умноженными на некоторое число.

Процесс нахождения обратной матрицы будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} & | & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} & | & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} & | & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & | & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} & | & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \dots$$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} a'_{11} & a'_{12} & a'_{13} & \dots & a'_{1n} & | & b'_{11} & b'_{12} & b'_{13} & \dots & b'_{1n} \\ 0 & a'_{22} & a'_{23} & \dots & a'_{2n} & | & b'_{21} & b'_{22} & b'_{23} & \dots & b'_{2n} \\ 0 & 0 & a'_{33} & \dots & a'_{3n} & | & b'_{31} & b'_{32} & b'_{33} & \dots & b'_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & | & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a'_{nn} & | & b'_{n1} & b'_{n2} & b'_{n3} & \dots & b'_{nn} \end{pmatrix} \Rightarrow \dots$$

$$\dots \Rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & | & a''_{11} & a''_{12} & a''_{13} & \dots & a''_{1n} \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & | & a''_{21} & a''_{22} & a''_{23} & \dots & a''_{2n} \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & | & a''_{31} & a''_{32} & a''_{33} & \dots & a''_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & | & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & | & a''_{n1} & a''_{n2} & a''_{n3} & \dots & a''_{nn} \end{pmatrix}.$$

Пример. Найдем обратную матрицу для матрицы $A = \begin{pmatrix} 3 & 2 & -12 \\ -1 & 1 & 6 \\ 3 & 3 & -11 \end{pmatrix}$.

Припишем к матрице A единичную матрицу E такого же размера и произведем эквивалентные преобразования полученной системы «прямым ходом» метода Гаусса:

$$\begin{pmatrix} 3 & 2 & -12 & | & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 6 & | & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 3 & -11 & | & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{matrix} 3c_2 + c_1 \\ c_3 - c_1 \end{matrix} \begin{pmatrix} 3 & 2 & -12 & | & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 6 & | & 1 & 3 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & | & -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 5c_3 - c_2 \left(\begin{array}{ccc|ccc} 3 & 2 & -12 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 6 & 1 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -6 & -3 & 5 \end{array} \right).$$

Продолжим преобразования «обратным ходом» метода Гаусса:

$$\begin{matrix} c_1 - 12c_3 \\ c_2 + 6c_3 \end{matrix} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 3 & 2 & 0 & 73 & 36 & -60 \\ 0 & 5 & 0 & -35 & -15 & 30 \\ 0 & 0 & -1 & -6 & -3 & 5 \end{array} \right) \Rightarrow$$

$$5c_1 - 2c_2 \left(\begin{array}{ccc|ccc} 15 & 0 & 0 & 435 & 210 & -360 \\ 0 & 5 & 0 & -35 & -15 & 30 \\ 0 & 0 & -1 & -6 & -3 & 5 \end{array} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{matrix} c_1/15 \\ c_2/5 \\ -c_3 \end{matrix} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 29 & 14 & -24 \\ 0 & 1 & 0 & -7 & -3 & 6 \\ 0 & 0 & 1 & 6 & 3 & -5 \end{array} \right).$$

Таким образом, обратная матрица для матрицы A равна

$$\Rightarrow A^{-1} = \begin{pmatrix} 29 & 14 & -24 \\ -7 & -3 & 6 \\ 6 & 3 & -5 \end{pmatrix}.$$

Вопросы для самоподготовки

1. Сформулируйте определение матрицы. Какие виды матриц вы знаете?
2. В чем заключается операция транспонирования матриц?
3. Какие операции над матрицами вы знаете?
4. Приведите примеры сложения двух матриц. Какие матрицы можно складывать?
5. Перечислите свойства матричного сложения.
6. Приведите примеры умножения двух матриц. Какие свойства матричного произведения вы знаете?
7. В чем заключаются алгоритмы нахождения определителей 1-го, 2-го и 3-го порядков?
8. Каким образом определяются миноры и алгебраические дополнения

элементов матриц?

9. С помощью какой теоремы можно вычислить определители матриц четвертого порядка? Каким образом можно найти определитель пятого порядка?

10. Какие свойства определителей вы знаете? Приведите примеры.

11. Как вы считаете, чему равен определитель диагональной матрицы?

12. Каким образом можно найти определители треугольных матриц?

13. Дайте определение обратной матрице? Какие методы нахождения обратной матрицы вы знаете? Приведите примеры.

14. Опишите алгоритм нахождения обратной матрицы методом Гаусса.

15. Приведите пример нахождения обратной матрицы методом Гаусса. В чем заключается основной принцип данного метода?

16. Что такое минор k -того порядка? Сколько миноров 4-го порядка содержится в матрице порядков 5×6 ?

17. Дайте определение ранга матрицы. В чем заключается метод окаймляющих миноров?

18. Приведите пример нахождения ранга матрицы методом Гаусса. Сколько строк осталось в результате преобразований?

19. Каким образом можно определить ранг верхней треугольной или нижней треугольной матриц?

20. Что можно сказать о ранге диагональной матрицы?

Глава 5. Системы линейных алгебраических уравнений

Системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) являются универсальным математическим аппаратом, применяемым в различных сферах профессиональной деятельности. Они используются для исследования больших массивов наблюдений, обработки качественных и количественных показателей изучаемых явлений.

Системы линейных уравнений, являясь частью линейной алгебры, имеют существенное значение не только с точки зрения линейных преобразований. Они востребованы во всех современных разделах высшей математики, в практических приложениях большинства естественнонаучных, технических, экономических и социальных наук.

Решение систем линейных алгебраических уравнений – одна из важнейших задач классической математики. Вопросы решения СЛАУ были сформированы еще в конце XVII века выдающимся немецким ученым Готфридом Лейбницем (1646 – 1716), а один из наиболее популярных методов решения определенных систем, метод Крамера, был опубликован в 1750 году швейцарским математиком Габриэлем Крамером (1704 – 1752) в трактате «Введение в анализ алгебраических кривых».

Метод Крамера получил дальнейшее развитие в работах французских ученых Этьена Безу (1730 – 1783), Александра Вандермонда (1735 – 1796), Огюстена Коши (1789 – 1857), которые внесли огромный вклад в становление линейной алгебры. В это время также был разработан метод обратной матрицы и получил научное обоснование классический метод последовательного исключения переменных, выполняемый с помощью элементарных преобразований, позже названный в честь выдающегося математика Карла Гаусса (1777 – 1855).

В настоящее время задача решения систем линейных алгебраических уравнений не потеряла актуальность и нередко применяется в классической или численной реализации в научных, инженерных, статистических и эконометрических расчетах.

5.1. Линейное уравнение

Линейным уравнением относительно неизвестных $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ называется выражение вида:

$$a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + \dots + a_n x_n = b, \quad (5.1)$$

где $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ – коэффициенты при неизвестных, b – свободный член.

Представленную форму записи уравнений принято называть общей.

Набор чисел $\{k_1, k_2, k_3, \dots, k_n\}$ является решением уравнения, если при подстановке этих чисел в уравнение выполняется равенство:

$$a_1 k_1 + a_2 k_2 + a_3 k_3 + \dots + a_n k_n = b.$$

Таких решений может быть либо бесчисленное множество, либо ни одного. Например, решением уравнения

$$3x_1 + x_2 - 2x_3 + 5x_4 = 5$$

являются наборы чисел $\{2; 0; 3; 1\}$, $\{-1; 4; -2; 0\}$, $\{0; 0; 0; 1\}$, ...

Иногда линейные уравнения записывают в виде

$$x_i = a_1 x_1 + \dots + a_{i-1} x_{i-1} + a_{i+1} x_{i+1} + \dots + a_n x_n + b. \quad (5.2)$$

Таким образом, записанные уравнения называются *разрешенными* относительно переменной x_i . В отличие от общей формы записи левая часть разрешенного уравнения содержит только одну переменную x_i с коэффициентом равным единице, а в правую часть переносятся все другие слагаемые. Любое линейное уравнение можно записать в виде разрешенного уравнения.

Например, для разрешения уравнения

$$-x_1 + 3x_2 - 2x_3 + 8x_4 = 7$$

относительно переменной x_3 , достаточно все другие слагаемые перенести в правую часть и разделить все коэффициенты уравнения на -2 . После выполнения вышеперечисленных операций получим уравнение:

$$x_3 = \frac{1}{2}x_1 - \frac{3}{2}x_2 - 4x_4 + \frac{7}{2}.$$

Среди линейных уравнений можно выделить некоторые типы уравнений:

1. Противоречивое уравнение

$$0x_1 + 0x_2 + 0x_3 + \dots + 0x_n = b, \quad (b \neq 0). \quad (5.3)$$

Противоречивые уравнения не имеют решений. Действительно, левая часть противоречивого уравнения при любых значениях переменных $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ равна нулю, а правая часть, содержащая свободный член $b \neq 0$, отлична от нуля. Примером противоречивого уравнения может служить уравнение

$$0x_1 + 0x_2 + 0x_3 + 0x_4 = 3.$$

2. Тривиальное уравнение

$$0x_1 + 0x_2 + 0x_3 + \dots + 0x_n = 0. \quad (5.4)$$

Этот тип уравнений отличается от противоречивого уравнения тем, что свободный член b равен нулю. Решением тривиальных уравнений является любой набор из n чисел. Например, присвоив произвольные значения переменным x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 в уравнении

$$0x_1 + 0x_2 + 0x_3 + 0x_4 + 0x_5 = 0,$$

всегда получим левую и правую части равными нулю.

3. Однородное уравнение

$$a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots + a_nx_n = 0. \quad (5.5)$$

Однородные уравнения имеют бесконечное множество решений. Например, решением однородного уравнения

$$2x_1 - 5x_2 - x_3 + 3x_4 = 0$$

являются наборы чисел $\{1; 1; 0; 1\}, \{1; 1; 6; 3\}, \{1; 1; 3; 2\}, \dots$

имеет единственное решение $\{1; 2; -1\}$. Следовательно, данная система является определенной.

Пример. Система уравнений

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 - x_3 = 1 \\ 2x_1 - 3x_2 + 4x_3 = 2 \\ -x_1 + 5x_2 - 5x_3 = -1 \end{cases}$$

является неопределенной, так как имеет бесконечное множество решений $(\{1; 0; 0\}, \{-4; 6; 7\}, \dots)$.

Если система не имеет ни одного решения, то она называется *несовместной*. Примером несовместной системы может служить система

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 - x_3 = 1 \\ 2x_1 + 4x_2 - 2x_3 = 4 \end{cases}$$

Очевидно, что данная система не может иметь ни одного решения.

Системы линейных уравнений называются *эквивалентными*, если они имеют одно и тот же множество решений. Например, системы

$$\begin{cases} 3x_1 + 3x_2 - 6x_3 = 36 \\ -7x_1 - x_2 + 6x_3 = -50; \\ 5x_1 - x_2 + 8x_3 = -24 \end{cases} \quad \begin{cases} -x_1 - x_2 + 2x_3 = -12 \\ -7x_1 - x_2 + 6x_3 = -50; \\ 5x_1 - x_2 + 8x_3 = -24 \end{cases} \quad \begin{cases} -7x_1 - x_2 + 6x_3 = -50 \\ 5x_1 - x_2 + 8x_3 = -24 \\ x_1 = 3 \\ x_2 - 2x_3 = 9 \end{cases}$$

являются эквивалентными, так как каждая из этих систем имеет единственное решение $\{3; -1; -5\}$.

5.2.2. Элементарные преобразования

Любую из систем линейных уравнений можно получить из другой эквивалентной системы с помощью *элементарных преобразований*.

К элементарным преобразованиям относятся:

- 1) *Перестановка уравнений в системе;*
- 2) *Добавление или вычеркивание тривиального уравнения;*
- 3) *Умножение уравнения на отличное от нуля число;*

4) Прибавление к обеим частям уравнения соответственных частей другого уравнения системы.

Все остальные эквивалентные преобразования можно представить, как комбинации четырех вышеперечисленных операций над системами линейных уравнений.

Пример. Легко увидеть, что первая система получается из второй, если умножить первую строку второй системы на -3 :

$$\begin{cases} -x_1 - x_2 + 2x_3 = -12 \\ -7x_1 - x_2 + 6x_3 = -50 \\ 5x_1 - x_2 + 8x_3 = -24 \end{cases} \Leftrightarrow -3c_1 \begin{cases} 3x_1 + 3x_2 - 6x_3 = 36 \\ -7x_1 - x_2 + 6x_3 = -50 \\ 5x_1 - x_2 + 8x_3 = -24 \end{cases}.$$

Первую систему можно получить также из третьей. К третьей строке третьей системы прибавим ее четвертую строку, а к четвертой строке прибавим третью.

$$\begin{cases} -7x_1 - x_2 + 6x_3 = -50 \\ 5x_1 - x_2 + 8x_3 = -24 \\ x_1 = 3 \\ x_2 - 2x_3 = 9 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{matrix} c_3 + c_4 \\ c_4 + c_3 \end{matrix} \begin{cases} -7x_1 - x_2 + 6x_3 = -50 \\ 5x_1 - x_2 + 8x_3 = -24 \\ x_1 + x_2 - 2x_3 = 3 + 9 \\ x_2 - 2x_3 + x_1 = 9 + 3 \end{cases}.$$

Из четвертой строки вычтем третью и полученное тривиальное уравнение вычеркнем.

$$\begin{cases} -7x_1 - x_2 + 6x_3 = -50 \\ 5x_1 - x_2 + 8x_3 = -24 \\ x_1 + x_2 - 2x_3 = 12 \\ x_1 + x_2 - 2x_3 = 12 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{matrix} c_4 - c_3 \end{matrix} \begin{cases} -7x_1 - x_2 + 6x_3 = -50 \\ 5x_1 - x_2 + 8x_3 = -24 \\ x_1 + x_2 - 2x_3 = 12 \\ 0x_1 + 0x_2 + 0x_3 = 0 \end{cases}.$$

Третью строку умножим на 3 и поставим ее на первое место в системе, сдвинув все остальные уравнения вниз:

$$\begin{cases} -7x_1 - x_2 + 6x_3 = -50 \\ 5x_1 - x_2 + 8x_3 = -24 \\ x_1 + x_2 - 2x_3 = 120x_1 + 0x_2 + 0x_3 = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{matrix} 3c_3 \\ c_1 \\ c_2 \end{matrix} \begin{cases} 3x_1 + 3x_2 - 6x_3 = 36 \\ -7x_1 - x_2 + 6x_3 = -50 \\ 5x_1 - x_2 + 8x_3 = -24 \end{cases}.$$

5.2.3. Матричная форма записи системы линейных уравнений

Выпишем коэффициенты при неизвестных в прямоугольную матрицу A порядков $m \times n$:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}. \quad (5.7)$$

Полученная матрица называется матрицей системы линейных уравнений или общей матрицей системы.

Введем еще две матрицы, каждая из которых состоит из одного столбца:

$$B = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}; \quad X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_m \end{pmatrix}. \quad (5.8)$$

Матрица B содержит коэффициенты $b_1, b_2, b_3, \dots, b_m$ и называется *матрицей свободных членов*.

Матрица X включает неизвестные x_1, x_2, x_3, x_n и называется *матрицей неизвестных*.

Тогда систему линейных уравнений можно записать в виде

$$AX = B. \quad (5.9)$$

Пример. Для системы линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 - x_3 = 6 \\ 2x_1 - 3x_2 + 4x_3 = -8 \\ -x_1 + 3x_2 - 2x_3 = 7 \end{cases}$$

выпишем общую матрицу A , матрицу свободных членов B и матрицу неизвестных X :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 2 & -3 & 4 \\ -1 & 3 & -2 \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} 6 \\ -8 \\ 7 \end{pmatrix}; \quad X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}.$$

Следовательно, система в матричной форме примет вид:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 2 & -3 & 4 \\ -1 & 3 & -2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 \\ -8 \\ 7 \end{pmatrix}.$$

Еще один способ записи систем линейных уравнений состоит в дополнении общей матрицы системы столбцом свободных членов.

$$A_B = \left(\begin{array}{ccccc|c} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} & b_2 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} & b_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} & b_m \end{array} \right). \quad (5.10)$$

Такая матрица называется *расширенной*.

Пример. Для системы линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 - x_3 = 6 \\ 2x_1 - 3x_2 + 4x_3 = -8 \\ -x_1 + 3x_2 - 2x_3 = 7 \end{cases}$$

расширенная матрица выглядит следующим образом:

$$A_B = \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & -1 & 6 \\ 2 & -3 & 4 & -8 \\ -1 & 3 & -2 & 7 \end{array} \right).$$

5.3. Теорема Кронекера-Капелли

Расширенная матрица имеет определяющее значение для установления совместности системы линейных алгебраических уравнений. Основным методом решения данного вопроса является использование следующей теоремы.

Теорема 1.3. (Кронекера-Капелли). Система линейных уравнений совместна тогда и только тогда, когда ранг общей матрицы системы равен рангу ее расширенной матрицы.

Пример. Определим, является ли совместной система линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 - x_3 = 6 \\ 2x_1 - 3x_2 + 4x_3 = -8 \\ -x_1 + 3x_2 - 2x_3 = 7 \end{cases}.$$

Для разрешения вопроса найдем ранги общей и расширенной матриц.

$$\text{rang} \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 2 & -3 & 4 \\ -1 & 3 & -2 \end{pmatrix} = 3; \quad \text{rang} \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & -1 & 6 \\ 2 & -3 & 4 & -8 \\ -1 & 3 & -2 & 7 \end{array} \right) = 3.$$

Ранг общей матрицы и ранг расширенной матрицы в нашем случае совпадают и равны трем, следовательно, представленная система линейных уравнений является совместной.

Пример. Система уравнений

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 - x_3 = 6 \\ 2x_1 - 3x_2 + 4x_3 = -8 \\ -x_1 + 5x_2 - 5x_3 = 3 \end{cases}$$

является несовместной, поскольку ранг общей матрицы равен двум, а ранг расширенной матрицы равен трем:

$$\text{rang} \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 2 & -3 & 4 \\ -1 & 5 & -5 \end{pmatrix} = 2; \quad \text{rang} \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & -1 & 6 \\ 2 & -3 & 4 & -8 \\ -1 & 5 & -5 & 3 \end{array} \right) = 3.$$

Для совместных систем линейных уравнений верны следующие утверждения.

1. Если ранг матрицы совместной системы равен числу переменных, то есть $r = n$, то система определенная и имеет единственное решение.

2. Если ранг матрицы совместной системы меньше числа переменных, то есть $r < n$, то система неопределенная и имеет бесконечное множество решений.

Пример. Определим количество решений системы линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 - x_3 = 6 \\ 2x_1 - 3x_2 + 4x_3 = -8 \\ -x_1 + 3x_2 - 2x_3 = 7 \end{cases}.$$

Найдем ранги общей и расширенной матриц данной системы

$$\text{rang} \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 2 & -3 & 4 \\ -1 & 3 & -2 \end{pmatrix} = 3; \quad \text{rang} \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & -1 & 6 \\ 2 & -3 & 4 & -8 \\ -1 & 3 & -2 & 7 \end{array} \right) = 3.$$

Система является совместной, так как ранг матрицы и ранг расширенной матрицы совпадают.

Так как ранг матрицы равен числу переменных, то система определенная и имеет единственное решение.

Пример. Определим количество решений системы линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} 2x_1 + x_2 = 1 \\ 3x_1 + 4x_2 + 2x_3 = 5 \\ x_1 + 3x_2 + 2x_3 = 4 \end{cases}.$$

Найдем ранги общей и расширенной матриц данной системы

$$\text{rang} \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 3 & 4 & 2 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix} = 2; \quad \text{rang} \left(\begin{array}{ccc|c} 2 & 1 & 0 & 1 \\ 3 & 4 & 2 & 5 \\ 1 & 3 & 2 & 4 \end{array} \right) = 2.$$

Система является совместной, так как ранг матрицы и ранг расширенной матрицы совпадают.

Так как ранг матрицы меньше числа переменных, то система является неопределенной и имеет бесконечное множество решений.

5.4. Методы решения определенных систем

5.4.1. Метод обратной матрицы

Рассмотрим систему из n линейных уравнений с n неизвестными

(5.11)

общая матрица также является квадратной.

Данную систему можно записать в матричном виде:

(5.12)

есть определитель основной матрицы отличен от нуля. Для таких матриц существует обратная матрица A^{-1} . Умножим обе части уравнения слева на A^{-1} .

$$A^{-1}AX = A^{-1}B.$$

Учитывая, что $A^{-1}A = E$, где E – единичная матрица, получим формулу

(5.13)

алгебраических уравнений будет либо несовместной, либо совместной, но неопределенной.

Пример. Решим систему линейных алгебраических уравнений методом обратной матрицы

$$\begin{cases} \mathbf{x}_1 + 5\mathbf{x}_2 - 3\mathbf{x}_3 = -13 \\ 8\mathbf{x}_1 + 3\mathbf{x}_2 + 2\mathbf{x}_3 = -38. \\ -3\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2 + 7\mathbf{x}_3 = -45 \end{cases}$$

Сначала выпишем общую матрицу A , матрицу свободных членов B , матрицу неизвестных X :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 5 & -3 \\ 8 & 3 & 2 \\ -3 & 1 & 7 \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} -13 \\ -38 \\ -45 \end{pmatrix}; \quad X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}.$$

Найдем обратную матрицу A^{-1} , используя формулу

$$A^{-1} = \frac{1}{\det A} \begin{pmatrix} A_{11} & A_{21} & A_{31} & \dots & A_{n1} \\ A_{12} & A_{22} & A_{32} & \dots & A_{n2} \\ A_{13} & A_{23} & A_{33} & \dots & A_{n3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{1n} & A_{2n} & A_{3n} & \dots & A_{nn} \end{pmatrix}. \quad (5.14)$$

Для этого вычислим определитель и алгебраические дополнения каждого элемента матрицы A :

$$\begin{aligned} \det A &= \begin{vmatrix} 1 & 5 & -3 \\ 8 & 3 & 2 \\ -3 & 1 & 7 \end{vmatrix} = -342; & A_{11} &= (-1)^{1+1} \begin{vmatrix} 3 & 2 \\ 1 & 7 \end{vmatrix} = 19; \\ A_{12} &= (-1)^{1+2} \begin{vmatrix} 8 & 2 \\ -3 & 7 \end{vmatrix} = -62; & A_{13} &= (-1)^{1+3} \begin{vmatrix} 8 & 3 \\ -3 & 1 \end{vmatrix} = 17; \\ A_{21} &= (-1)^{2+1} \begin{vmatrix} 5 & -3 \\ 1 & 7 \end{vmatrix} = -38; & A_{22} &= (-1)^{2+2} \begin{vmatrix} 1 & -3 \\ -3 & 7 \end{vmatrix} = -2; \\ A_{23} &= (-1)^{2+3} \begin{vmatrix} 1 & 5 \\ -3 & 1 \end{vmatrix} = -16; & A_{31} &= (-1)^{3+1} \begin{vmatrix} 5 & -3 \\ 3 & 2 \end{vmatrix} = 19; \\ A_{32} &= (-1)^{3+2} \begin{vmatrix} 1 & -3 \\ 8 & 2 \end{vmatrix} = -26; & A_{33} &= (-1)^{3+3} \begin{vmatrix} 1 & 5 \\ 8 & 3 \end{vmatrix} = -37. \end{aligned}$$

Подставив полученные значения в формулы 1.12 и 1.13, получим

$$X = A^{-1}B = \frac{1}{-342} \begin{pmatrix} 19 & -38 & 19 \\ -62 & -2 & -26 \\ 17 & -16 & -37 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -13 \\ -38 \\ -45 \end{pmatrix} = \frac{1}{-342} \begin{pmatrix} 342 \\ 2052 \\ 2052 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ -6 \\ -6 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, решением системы уравнений является набор чисел $\{-1; -6; -6\}$.

5.4.2. Метод Крамера

Рассмотрим квадратную систему из n линейных уравнений

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \\ a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + \dots + a_{3n}x_n = b_3, \\ \dots\dots\dots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + a_{n3}x_3 + \dots + a_{nn}x_n = b_n \end{cases}$$

которой соответствуют квадратная общая матрица A и матрица-столбец свободных членов B

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}.$$

Заменив первый столбец матрицы A на столбец B , получим дополнительную матрицу X_1

$$X_1 = \begin{pmatrix} b_1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ b_2 & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ b_3 & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_n & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}.$$

Заменив второй столбец матрицы A на столбец B , получим дополнительную матрицу X_2

$$X_2 = \begin{pmatrix} b_1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ b_2 & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ b_3 & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_n & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}.$$

Аналогично получим все другие дополнительные матрицы $X_3, \dots, X_n$.

Тогда для решения системы линейных алгебраических уравнений справедливы формулы Крамера:

$$x_1 = \frac{\det X_1}{\det A}; \quad x_2 = \frac{\det X_2}{\det A}; \quad \dots \quad x_n = \frac{\det X_n}{\det A}. \quad (5.15)$$

Пример. Решим систему линейных уравнений методом Крамера.

$$\begin{cases} 3x_1 - 5x_2 + 6x_3 = -106 \\ 5x_1 + 4x_2 + 7x_4 = 20 \\ 5x_1 - 4x_3 - x_4 = -16 \\ -4x_2 - 6x_3 - 5x_4 = -10 \end{cases}.$$

Данной системе соответствуют квадратная общая матрица A и матрица-столбец свободных членов B :

$$A = \begin{pmatrix} 3 & -5 & 6 & 0 \\ 5 & 4 & 0 & 7 \\ 5 & 0 & -4 & -1 \\ 0 & -4 & -6 & -5 \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} -106 \\ 20 \\ -16 \\ -10 \end{pmatrix}.$$

Заменим соответствующие столбцы матрицы A на столбец свободных членов B и выпишем дополнительные матрицы:

$$\begin{aligned} X_1 &= \begin{pmatrix} -106 & -5 & 6 & 0 \\ 20 & 4 & 0 & 7 \\ -16 & 0 & -4 & -1 \\ -10 & -4 & -6 & -5 \end{pmatrix}; & X_2 &= \begin{pmatrix} 3 & -106 & 6 & 0 \\ 5 & 20 & 0 & 7 \\ 5 & -16 & -4 & -1 \\ 0 & -10 & -6 & -5 \end{pmatrix}; \\ X_3 &= \begin{pmatrix} 3 & -5 & -106 & 0 \\ 5 & 4 & 20 & 7 \\ 5 & 0 & -16 & -1 \\ 0 & -4 & -10 & -5 \end{pmatrix}; & X_4 &= \begin{pmatrix} 3 & -5 & 6 & -106 \\ 5 & 4 & 0 & 20 \\ 5 & 0 & -4 & -16 \\ 0 & -4 & -6 & -10 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Найдем определители основной и дополнительных матриц

$$\det A = \begin{vmatrix} 3 & -5 & 6 & 0 \\ 5 & 4 & 0 & 7 \\ 5 & 0 & -4 & -1 \\ 0 & -4 & -6 & -5 \end{vmatrix} = -1228;$$

$$\det \mathbf{X}_1 = \begin{vmatrix} -106 & -5 & 6 & 0 \\ 20 & 4 & 0 & 7 \\ -16 & 0 & -4 & -1 \\ -10 & -4 & -6 & -5 \end{vmatrix} = 9824; \det \mathbf{X}_2 = \begin{vmatrix} 3 & -106 & 6 & 0 \\ 5 & 20 & 0 & 7 \\ 5 & -16 & -4 & -1 \\ 0 & -10 & -6 & -5 \end{vmatrix} = -9824;$$

$$\det \mathbf{X}_3 = \begin{vmatrix} 3 & -5 & -106 & 0 \\ 5 & 4 & 20 & 7 \\ 5 & 0 & -16 & -1 \\ 0 & -4 & -10 & -5 \end{vmatrix} = 8596; \det \mathbf{X}_4 = \begin{vmatrix} 3 & -5 & 6 & -106 \\ 5 & 4 & 0 & 20 \\ 5 & 0 & -4 & -16 \\ 0 & -4 & -6 & -10 \end{vmatrix} = -4912.$$

Теперь, согласно методу Крамера, подставляя вычисленные определители в формулы (2.5) получим решение.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_1 &= \frac{\det \mathbf{X}_1}{\det \mathbf{A}} = \frac{9824}{-1228} = -8; & \mathbf{x}_2 &= \frac{\det \mathbf{X}_2}{\det \mathbf{A}} = \frac{-9824}{-1228} = 8; \\ \mathbf{x}_3 &= \frac{\det \mathbf{X}_1}{\det \mathbf{A}} = \frac{8596}{-1228} = -7; & \mathbf{x}_2 &= \frac{\det \mathbf{X}_2}{\det \mathbf{A}} = \frac{-4912}{-1228} = 4. \end{aligned}$$

Таким образом, мы получили следующее решение системы $\{-8; 8; -7; 4\}$.

5.5. Метод Гаусса

Наиболее эффективным инструментом решения систем линейных алгебраических уравнений является метод Гаусса. Если вышеперечисленные метод обратной матрицы и метод Крамера можно использовать только для определенных систем линейных уравнений, то метод Гаусса применим для любой системы. Кроме того, в ходе решения этим методом определяется также совместность решаемой системы.

5.5.1. Описание метода Гаусса

Рассмотрим систему линейных уравнений общего вида и соответствующую ей расширенную матрицу:

[illegible]

Первая часть метода Гаусса называется «прямым ходом». Она заключается в том, чтобы, используя элементарные преобразования систем линейных уравнений, привести расширенную матрицу системы к виду, когда под элементами с одинаковыми индексами располагаются только нулевые элементы:

$$A'_B = \left(\begin{array}{cccccccc|c} a'_{11} & a'_{12} & a'_{13} & \dots & a'_{1m} & a'_{1m+1} & \dots & a'_{1n} & b'_1 \\ 0 & a'_{22} & a'_{23} & \dots & a'_{2m} & a'_{2m+1} & \dots & a'_{2n} & b'_2 \\ 0 & 0 & a'_{33} & \dots & a'_{3m} & a'_{3m+1} & \dots & a'_{3n} & b'_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a'_{mm} & a'_{mm+1} & \dots & a'_{mn} & b'_m \end{array} \right). \quad (5.16)$$

Если система несовместна, то полученная путем преобразований матрица будет содержать хотя бы одну строку вида

$$0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \mid b'_j \quad (b'_j \neq 0).$$

Если таких строк нет, то система уравнений является совместной.

В преобразованной матрице соответствующей совместной системе линейных уравнений могут появиться строки вида

$$0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \mid 0.$$

Этого означает, что соответствующие таким строкам уравнения представляют собой линейную комбинацию других уравнений системы. Эти строки в матрице необходимо удалить.

Предположим, что в преобразованной матрице осталось k строк из m . Тогда в случае определения совместности системы линейных уравнений используется вторая часть метода Гаусса, называемая «обратный ход», и все теми же элементарными преобразованиями полученная матрица преобразуется в вид:

$$A''_B = \left(\begin{array}{cccccccc|c} a''_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 & a''_{1,k+1} & \dots & a''_{1n} & b''_1 \\ 0 & a''_{22} & 0 & \dots & 0 & a''_{2,k+1} & \dots & a''_{2n} & b''_2 \\ 0 & 0 & a''_{33} & \dots & 0 & a''_{3,k+1} & \dots & a''_{3n} & b''_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a''_{kk} & a''_{k,k+1} & \dots & a''_{kn} & b''_k \end{array} \right). \quad (5.17)$$

Если $k < n$, то система линейных уравнений будет неопределенной, и иметь бесконечное множество решений. Переменные $x_1, \dots, x_k$, можно объявить базисными, а неизвестные $x_{k+1}, \dots, x_n$, соответственно, – свободными. Затем свободные переменные вместе с соответствующими коэффициентами переносятся в правую часть уравнений системы. Таким образом, решение системы будет выглядеть так:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = \frac{b_1'' - a_{1,k+1}'' x_{k+1} - \dots - a_{1n}'' x_n}{a_{11}''} \\ x_2 = \frac{b_2'' - a_{2,k+1}'' x_{k+1} - \dots - a_{2n}'' x_n}{a_{22}''} \\ x_3 = \frac{b_3'' - a_{3,k+1}'' x_{k+1} - \dots - a_{3n}'' x_n}{a_{33}''} \\ \dots \\ x_k = \frac{b_k'' - a_{k,k+1}'' x_{k+1} - \dots - a_{kn}'' x_n}{a_{kk}''} \end{array} \right. . \quad (5.18)$$

В случае если $k = n$, решаемая система линейных уравнений является определенной, а матрица, полученная «обратным ходом» будет иметь вид:

$$A_B'' = \left(\begin{array}{ccccc|c} a_{11}'' & 0 & 0 & \dots & 0 & b_1'' \\ 0 & a_{22}'' & 0 & \dots & 0 & b_2'' \\ 0 & 0 & a_{33}'' & \dots & 0 & b_3'' \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{nn}'' & b_n'' \end{array} \right). \quad (5.19)$$

Следовательно, единственное решение системы уравнений можно записать в виде:

$$\left\{ \frac{b_1''}{a_{11}''}; \frac{b_2''}{a_{22}''}; \frac{b_3''}{a_{33}''}; \dots; \frac{b_n''}{a_{nn}''} \right\}. \quad (5.20)$$

5.5.2. Решение определенных систем

С помощью метода Гаусса можно находить решение определенных систем линейных алгебраических уравнений. Рассмотрим пример.

Пример. Рассмотрим систему уравнений

$$\begin{cases} 5x_1 - 6x_2 + x_3 - 6x_4 = -57 \\ 3x_1 + 4x_2 - 2x_3 + 5x_4 = 24 \\ -2x_1 - x_2 + x_3 + 6x_4 = 34 \\ -4x_1 + 6x_2 + 7x_3 - 4x_4 = 4 \end{cases}.$$

Этой системе соответствует расширенная матрица

$$\left(\begin{array}{cccc|c} 5 & -6 & 1 & -6 & -57 \\ 3 & 4 & -2 & 5 & 24 \\ -2 & -1 & 1 & 6 & 34 \\ -4 & 6 & 7 & -4 & 4 \end{array} \right).$$

Применяя элементарные преобразования, добьемся того, чтобы все элементы матрицы, находящиеся ниже элемента a_{11} были равны нулю. Для обнуления элемента a_{21} достаточно из произведения второй строки на 5 вычесть первую строку, умноженную на 3. Для того чтобы $a_{31} = 0$, к первой строке, умноженной на пять, прибавить вторую, умноженную на 2, а для того, чтобы a_{41} равнялся нулю, можно сложить первую и третью строки, увеличенные в 5 и 4 раз соответственно:

$$\begin{matrix} 5c_2 - 3c_1 \\ 5c_3 + 2c_1 \\ 5c_4 + 4c_1 \end{matrix} \left(\begin{array}{cccc|c} 5 & -6 & 1 & -6 & -57 \\ 5 \cdot 3 - 3 \cdot 5 & 5 \cdot 4 - 3 \cdot (-6) & 5 \cdot (-2) - 3 \cdot 1 & 5 \cdot 5 - 3 \cdot (-6) & 5 \cdot 24 - 3 \cdot (-57) \\ 5 \cdot (-2) + 2 \cdot 5 & 5 \cdot (-1) + 2 \cdot (-6) & 5 \cdot 1 + 2 \cdot 1 & 5 \cdot 6 + 2 \cdot (-6) & 5 \cdot 34 + 2 \cdot (-57) \\ 5 \cdot (-4) + 4 \cdot 5 & 5 \cdot 6 + 4 \cdot (-6) & 5 \cdot 7 + 4 \cdot 1 & 5 \cdot (-4) + 4 \cdot (-6) & 5 \cdot 4 + 4 \cdot (-57) \end{array} \right).$$

В результате арифметических действий получим:

$$\left(\begin{array}{cccc|c} 5 & -6 & 1 & -6 & -57 \\ 0 & 38 & -13 & 43 & 291 \\ 0 & -17 & 7 & 18 & 56 \\ 0 & 6 & 39 & -44 & -208 \end{array} \right).$$

Теперь, добьемся того, чтобы под элементом a_{22} оставались только нулевые элементы, для этого мы выполняем соответствующие элементарные преобразования с системой. Первая и вторая строки остаются без изменений, преобразуются только третья и четвертая строки:

$$\begin{matrix} 38c_3 + 17c_2 \\ 19c_4 - 3c_2 \end{matrix} \begin{pmatrix} 5 & -6 & 1 & -6 & -57 \\ 0 & 38 & -13 & 43 & 291 \\ 0 & 38 \cdot (-17) + 17 \cdot 38 & 38 \cdot 7 + 17 \cdot (-13) & 38 \cdot 18 + 17 \cdot 43 & 38 \cdot 56 + 17 \cdot 291 \\ 0 & 19 \cdot 6 - 3 \cdot 38 & 19 \cdot 39 - 3 \cdot (-13) & 19 \cdot (-44) - 3 \cdot 43 & 19 \cdot (-208) - 3 \cdot 291 \end{pmatrix}.$$

Вычислив, получим систему, в которой коэффициенты третьей и четвертой строк которой можно сократить на 5:

$$\begin{pmatrix} 5 & -6 & 1 & -6 & -57 \\ 0 & 38 & -13 & 43 & 291 \\ 0 & 0 & 45 & 1415 & 7075 \\ 0 & 0 & 780 & -965 & -4825 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{matrix} c_3/5 \\ c_4/5 \end{matrix} \begin{pmatrix} 5 & -6 & 1 & -6 & -57 \\ 0 & 38 & -13 & 43 & 291 \\ 0 & 0 & 9 & 283 & 1415 \\ 0 & 0 & 156 & -193 & -965 \end{pmatrix}.$$

И, наконец, с помощью элементарных преобразований системы обнуляем элемент a_{43} , изменяя при этом всю четвертую строку:

$$3c_4 - 52c_3 \begin{pmatrix} 5 & -6 & 1 & -6 & -57 \\ 0 & 38 & -13 & 43 & 291 \\ 0 & 0 & 9 & 283 & 1415 \\ 0 & 0 & 3 \cdot 156 - 52 \cdot 9 & 3 \cdot (-193) - 52 \cdot 283 & 3 \cdot (-965) - 52 \cdot 1415 \end{pmatrix}.$$

Произведем соответствующие расчеты и сократим на 15295 элементы четвертой строки:

$$\begin{pmatrix} 5 & -6 & 1 & -6 & -57 \\ 0 & 38 & -13 & 43 & 291 \\ 0 & 0 & 9 & 283 & 1415 \\ 0 & 0 & 0 & 15295 & 76475 \end{pmatrix} \Rightarrow c_4/15295 \begin{pmatrix} 5 & -6 & 1 & -6 & -57 \\ 0 & 38 & -13 & 43 & 291 \\ 0 & 0 & 9 & 283 & 1415 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 5 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, исходная общая матрица решаемой системы приведена к верхнему треугольному виду. Полученная путем преобразований матрица не содержит ни одной строки вида

$$0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \mid b'_j \quad (b'_j \neq 0).$$

На основании этого заключим, что система уравнений является совместной.

Продолжим модификацию матрицы «обратным ходом». Для этого выполним преобразования первой, второй и третьей строк таким образом, чтобы все элементы, находящиеся выше элемента a_{44} , были равны нулю:

$$\begin{matrix} c_1 + 6c_4 \\ c_2 - 43c_4 \\ c_3 - 283c_4 \end{matrix} \begin{pmatrix} 5 & -6 & 1 & -6+6 \cdot 1 & \mid & -57+6 \cdot 5 \\ 0 & 38 & -13 & 43-43 \cdot 1 & \mid & 291-43 \cdot 5 \\ 0 & 0 & 9 & 283-283 \cdot 1 & \mid & 1415-283 \cdot 5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \mid & 5 \end{pmatrix}.$$

Выполнив действия, сократим на 9 элементы третьей строки:

$$\begin{pmatrix} 5 & -6 & 1 & 0 & \mid & -27 \\ 0 & 38 & -13 & 0 & \mid & 76 \\ 0 & 0 & 9 & 0 & \mid & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \mid & 5 \end{pmatrix} \Rightarrow c_3/9 \begin{pmatrix} 5 & -6 & 1 & 0 & \mid & -27 \\ 0 & 38 & -13 & 0 & \mid & 76 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \mid & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \mid & 5 \end{pmatrix}.$$

Аналогично добьемся того, чтобы элементы a_{13} и a_{23} были равны нулю:

$$\begin{matrix} c_1 - c_3 \\ c_2 + 13c_3 \end{matrix} \begin{pmatrix} 5 & -6 & 1-1 & 0 & \mid & -27+0 \\ 0 & 38 & -13+13 \cdot 1 & 0 & \mid & 76+13 \cdot 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \mid & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \mid & 5 \end{pmatrix}.$$

Произведем расчеты и разделим на 38 элементы второй строки:

$$\begin{pmatrix} 5 & -6 & 0 & 0 & \mid & -27 \\ 0 & 38 & 0 & 0 & \mid & 76 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \mid & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \mid & 5 \end{pmatrix} \Rightarrow c_2/38 \begin{pmatrix} 5 & -6 & 0 & 0 & \mid & -27 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \mid & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \mid & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \mid & 5 \end{pmatrix}.$$

К первой строке прибавим, умноженную на 6, вторую строку:

$$c_1 + 6c_2 \left(\begin{array}{cccc|c} 5 & -6+6\cdot 1 & 0 & 0 & -27+6\cdot 2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 5 \end{array} \right),$$

выполним действия и разделим на 5 коэффициенты первой строки:

$$\left(\begin{array}{cccc|c} 5 & 0 & 0 & 0 & -15 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 5 \end{array} \right) \Rightarrow c_1/5 \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 & -3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 5 \end{array} \right).$$

Таким образом, в результате элементарных преобразований мы получили систему:

$$\begin{cases} x_1 = -3 \\ x_2 = 2 \\ x_3 = 0 \\ x_4 = 5 \end{cases},$$

которой соответствует единственное решение $\{-3; 2; 0; 5\}$.

5.5.3. Решение неопределенных систем

С помощью метода Гаусса можно решать и неопределенные системы.

Пример. Рассмотрим систему линейных алгебраических уравнений и соответствующую ей расширенную матрицу:

$$\begin{cases} 2x_1 - 3x_3 + x_4 = 7 \\ x_1 + 4x_2 + x_3 - 5x_4 = -2 \\ -3x_2 + 5x_3 + 6x_4 = 11 \\ x_1 + 6x_2 + 16x_3 - 4x_4 = 9 \end{cases} \quad \left(\begin{array}{cccc|c} 2 & 0 & -3 & 1 & 7 \\ 1 & 4 & 1 & -5 & -2 \\ 0 & -3 & 5 & 6 & 11 \\ 1 & 6 & 16 & -4 & 9 \end{array} \right).$$

Выполним соответствующие шаги «прямого хода» метода Гаусса.

Используя обратные преобразования со второй и четвертой строками, добьемся того, чтобы все элементы первого столбца матрицы, кроме верхнего были равны нулю:

$$\begin{aligned}
 & \begin{matrix} 2c_2 - c_1 \\ 2c_4 - c_1 \end{matrix} \left(\begin{array}{cccc|c} 2 & 0 & -3 & 1 & 7 \\ 2 \cdot 1 - 2 & 2 \cdot 4 - 0 & 2 \cdot 1 - (-3) & 2 \cdot (-5) - 1 & 2 \cdot (-2) - 7 \\ 0 & -3 & 5 & 6 & 11 \\ 2 \cdot 1 - 2 & 2 \cdot 6 - 0 & 2 \cdot 16 - (-3) & 2 \cdot (-4) - 1 & 2 \cdot 9 - 7 \end{array} \right) \Rightarrow \\
 & \Rightarrow \left(\begin{array}{cccc|c} 2 & 0 & -3 & 1 & 7 \\ 0 & 8 & 5 & -11 & -11 \\ 0 & -3 & 5 & 6 & 11 \\ 0 & 12 & 35 & -9 & 11 \end{array} \right).
 \end{aligned}$$

Аналогично, преобразуя систему, работаем со вторым столбцом:

$$\begin{aligned}
 & \begin{matrix} 8c_3 + 3c_2 \\ 2c_4 - 3c_2 \end{matrix} \left(\begin{array}{cccc|c} 2 & 0 & -3 & 1 & 7 \\ 0 & 8 & 5 & -11 & -11 \\ 0 & 8 \cdot (-3) + 3 \cdot 8 & 8 \cdot 5 + 3 \cdot 5 & 8 \cdot 6 + 3 \cdot (-11) & 8 \cdot 11 + 3 \cdot (-11) \\ 0 & 2 \cdot 12 - 3 \cdot 8 & 2 \cdot 35 - 3 \cdot 5 & 2 \cdot (-9) - 3 \cdot (-11) & 2 \cdot 11 - 3 \cdot (-11) \end{array} \right) \Rightarrow \\
 & \left(\begin{array}{cccc|c} 2 & 0 & -3 & 1 & 7 \\ 0 & 8 & 5 & -11 & -11 \\ 0 & 0 & 55 & 15 & 55 \\ 0 & 0 & 55 & 15 & 55 \end{array} \right) \Rightarrow \left(\begin{array}{cccc|c} 2 & 0 & -3 & 1 & 7 \\ 0 & 8 & 5 & -11 & -11 \\ 0 & 0 & 11 & 3 & -11 \\ 0 & 0 & 11 & 3 & -11 \end{array} \right).
 \end{aligned}$$

И, наконец, обнуляем элемент, находящийся на пересечении четвертой строки и третьего столбца:

$$c_4 - c_3 \left(\begin{array}{cccc|c} 2 & 0 & -3 & 1 & 7 \\ 0 & 8 & 5 & -11 & -11 \\ 0 & 0 & 11 & 3 & 11 \\ 0 & 0 & 11 - 11 & 3 - 3 & 11 - 11 \end{array} \right) \Rightarrow \left(\begin{array}{cccc|c} 2 & 0 & -3 & 1 & 7 \\ 0 & 8 & 5 & -11 & -11 \\ 0 & 0 & 11 & 3 & 11 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right).$$

Вычеркнем из матрицы получившееся тривиальное уравнение, находящееся в четвертой строке:

$$c_4 \left(\begin{array}{cccc|c} 2 & 0 & -3 & 1 & 7 \\ 0 & 8 & 5 & -11 & -11 \\ 0 & 0 & 11 & 3 & 11 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \Rightarrow \left(\begin{array}{cccc|c} 2 & 0 & -3 & 1 & 7 \\ 0 & 8 & 5 & -11 & -11 \\ 0 & 0 & 11 & 3 & 11 \end{array} \right).$$

Полученный результат выявил, что система является совместной, значит можно переходить ко второй части метода – «обратному ходу».

Преобразуем матрицу так, чтобы в третьем столбце первой и второй строк появились нулевые элементы:

$$\begin{array}{l} 11c_1 + 3c_3 \\ 11c_2 - 5c_3 \end{array} \left(\begin{array}{cccc|c} 11 \cdot 2 + 3 \cdot 0 & 11 \cdot 0 + 3 \cdot 0 & 11 \cdot (-3 + 3) \cdot 11 & 11 \cdot 1 + 3 \cdot 3 & 11 \cdot 7 + 3 \cdot 11 \\ 0 & 11 \cdot 8 - 5 \cdot 0 & 11 \cdot 5 - 5 \cdot 11 & 11 \cdot (-11) - 5 \cdot 3 & 11 \cdot (-11) - 5 \cdot 11 \\ 0 & 0 & 11 & 3 & 11 \end{array} \right)$$

Разделим элементы первой и второй строк соответственно на 2 и 8:

$$\left(\begin{array}{cccc|c} 22 & 0 & 0 & 20 & 110 \\ 0 & 88 & 0 & -136 & -176 \\ 0 & 0 & 11 & 3 & 11 \end{array} \right) \Rightarrow \begin{array}{l} c_1 / 2 \\ c_2 / 8 \end{array} \left(\begin{array}{cccc|c} 11 & 0 & 0 & 10 & 55 \\ 0 & 11 & 0 & -17 & -22 \\ 0 & 0 & 11 & 3 & 11 \end{array} \right).$$

В нашем случае количество оставшихся после преобразования строк k меньше количества неизвестных n :

$$\begin{cases} 11x_1 + 10x_4 = 55 \\ 11x_2 - 17x_4 = -22. \\ 11x_3 + 3x_4 = 11 \end{cases}$$

Поэтому система линейных уравнений будет неопределенной, и иметь бесконечное множество решений. Переменные системы x_1, x_2, x_3 можно объявить базисными, а неизвестную x_4 – свободной. Свободные переменные вместе с соответствующими коэффициентами переносим в правую часть уравнений системы, а затем каждое уравнение делим на коэффициенты при базисных переменных.

Таким образом, решение системы будет выглядеть как система разрешенных уравнений относительно базисных переменных:

$$\begin{cases} 11x_1 = -10x_4 + 55 \\ 11x_2 = +17x_4 - 22 \\ 11x_3 = -3x_4 + 11 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_1 = -\frac{10}{11}x_4 + 5 \\ x_2 = \frac{17}{11}x_4 - 2 \\ x_3 = -\frac{3}{11}x_4 + 1 \end{cases}.$$

Поскольку x_4 принимает бесконечное множество решений, то решением системы можно представить в виде множества: $\left\{-\frac{10}{11}x_4; \frac{17}{11}x_4; -\frac{3}{11}x_4; x_4\right\}$.

5.6. Однородные системы линейных алгебраических уравнений

5.6.1. Основные понятия систем однородных уравнений

Рассмотрим систему, содержащую только однородные линейные алгебраические уравнения:

[illegible]

Такая система называется однородной системой линейных алгебраических уравнений. Однородная система всегда совместна, поскольку ранг ее общей матрицы будет равен рангу расширенной матрицы:

$$\text{rang} \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} = \text{rang} \left(\begin{array}{ccccc|c} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} & 0 \end{array} \right).$$

Очевидно, что у каждой однородной системы линейных уравнений обязательно существует нулевое решение $\{0; 0; 0; \dots; 0\}$.

Пример. Можно с уверенностью сказать, что для системы однородных уравнений:

$$\begin{cases} x_1 - 2x_2 + x_3 = 0 \\ 2x_1 + x_2 - 2x_3 + 2x_4 = 0 \\ -x_1 - x_3 + x_4 = 0 \\ -x_1 - 5x_2 + 3x_3 - x_4 = 0 \end{cases}$$

одним из решений будет $\{0; 0; 0; 0\}$.

Однако, у однородных уравнений могут быть и другие решения. Возникает вопрос о том, при каких условиях однородная система имеет, кроме указанного тривиального решения, еще и другие, нетривиальные решения. Такие однородные системы называются *нетривиально совместными*.

5.6.2. Условия совместности однородных систем

Существование нетривиального решения однородной системы эквивалентно линейной зависимости столбцов общей матрицы системы, а это возможно только при вырожденности этой матрицы. Из этого заключения вытекает следующая теорема.

Теорема 2.1. Однородная система линейных алгебраических уравнений нетривиально совместна тогда и только тогда, когда ранг ее общей матрицы меньше числа ее столбцов.

Пример. Проверим существование нетривиальных решений в вышеуказанном примере. Найдем ранг общей матрицы:

$$\text{rang} \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 \\ 2 & 1 & -2 & 2 \\ -1 & 0 & -1 & 1 \\ -1 & -5 & 3 & -1 \end{pmatrix} = 3.$$

Поскольку ранг матрицы равен трем и меньше числа столбцов, то данная система имеет нетривиальные решения.

Из этой теоремы вытекают следующие свойства.

Свойство 1. Если число уравнений однородной системы линейных алгебраических уравнений меньше числа ее неизвестных, то эта система имеет нетривиальные решения.

Это свойство очень удобно для использования. Например, все ниже перечисленные однородные системы являются нетривиально совместными:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 - x_2 = 0 \\ -2x_3 + 2x_4 = 0 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} 4x_1 - 2x_2 + 3x_4 = 0 \\ -x_3 = 0 \\ -5x_2 - x_4 = 0 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} -3x_1 - 2x_2 + x_5 = 0 \\ x_1 + x_2 - 5x_3 + 2x_4 = 0 \\ -x_1 - x_3 + x_4 = 0 \\ 3x_3 - x_4 = 0 \end{array} \right. .$$

Свойство 2. Квадратная однородная система линейных алгебраических уравнений имеет нетривиальные решения тогда и только тогда, когда общая матрица системы вырождена.

Данное свойство применимо только для однородных систем, в которых количество уравнений равно количеству неизвестных.

Рассмотрим две квадратные однородные системы линейных алгебраических уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 + x_3 = 0 \\ x_2 - 2x_3 = 0 \\ -x_1 + x_4 = 0 \\ -2x_2 + 4x_3 = 0 \end{array} \right. ; \quad \left\{ \begin{array}{l} x_1 - x_2 + x_3 + x_4 = 0 \\ x_1 + x_2 - 2x_3 + x_4 = 0 \\ x_1 + x_2 + x_3 - x_4 = 0 \\ x_1 - 2x_2 + 4x_3 + x_4 = 0 \end{array} \right. .$$

Первая система является нетривиально совместной, поскольку определитель общей матрицы равен нулю. Вторая система имеет только тривиальное решение, так как ее определитель равен шести.

5.6.3. Решение однородных систем линейных уравнений

Рассмотрим однородную систему из m линейных алгебраических уравнений с n неизвестными и соответствующую ей расширенную матрицу:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n = 0 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2n}x_n = 0 \\ a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + \dots + a_{3n}x_n = 0 \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + a_{m3}x_3 + \dots + a_{mn}x_n = 0 \end{cases}$$

Для отыскания нетривиальных решений однородных систем линейных уравнений можно воспользоваться методом Гаусса.

В качестве примера рассмотрим систему:

$$\begin{cases} x_1 - x_2 + x_3 + x_4 = 0 \\ 2x_1 + x_2 - 2x_3 = 0 \\ x_2 + x_3 - x_4 = 0 \\ x_1 - 2x_2 + 2x_4 = 0 \end{cases}.$$

Ей соответствует расширенная матрица:

$$\left(\begin{array}{cccc|c} 1 & -1 & 1 & 1 & 0 \\ 2 & 1 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & -2 & 0 & 2 & 0 \end{array} \right).$$

Используя алгоритм «прямого хода» метода Гаусса, выполним следующие преобразования системы:

$$c_2 - 2c_1 \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & 1 & | & 0 \\ 2-2\cdot 1 & 1-2\cdot(-1) & -2-2\cdot 1 & 0-2\cdot 1 & | & 0 \\ 0 & 1 & 1 & -1 & | & 0 \\ c_4 - c_1 & 1-1 & -2+1 & 0-1 & | & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & 1 & | & 0 \\ 0 & 3 & -4 & -2 & | & 0 \\ 0 & 1 & 1 & -1 & | & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 1 & | & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{matrix} 3c_3 - c_2 \\ 3c_4 + c_2 \end{matrix} \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & 1 & | & 0 \\ 0 & 3 & -4 & -2 & | & 0 \\ 0 & 3 \cdot 1 - 3 & 3 \cdot 1 + 4 & 3 \cdot (-1) + 2 & | & 0 \\ 0 & 3 \cdot (-1) - 3 & 3 \cdot (-1) - 4 & 3 \cdot 1 - 2 & | & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & 1 & | & 0 \\ 0 & 3 & -4 & -2 & | & 0 \\ 0 & 0 & 7 & -1 & | & 0 \\ 0 & 0 & -7 & 1 & | & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{matrix} 3c_3 - c_2 \\ c_4 + c_3 \end{matrix} \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & 1 & | & 0 \\ 0 & 3 & -4 & -2 & | & 0 \\ 0 & 0 & 7 & -1 & | & 0 \\ 0 & 0 & -7 + 7 & 1 - 1 & | & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & 1 & | & 0 \\ 0 & 3 & -4 & -2 & | & 0 \\ 0 & 0 & 7 & -1 & | & 0 \end{pmatrix}.$$

Поскольку количество оставшихся уравнений в системе меньше, чем количество неизвестных, будем считать переменные x_1, x_2, x_3 базисными, а неизвестную x_4 – свободной. Перенесем коэффициенты свободной переменной с противоположным знаком в правые части равенств и выполним преобразования системы «обратным ходом» метода Гаусса:

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & | & -1 \\ 0 & 3 & -4 & | & 2 \\ 0 & 0 & 7 & | & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{matrix} 7c_1 - c_3 \\ 7c_2 + 4c_3 \end{matrix} \begin{pmatrix} 7 \cdot 1 - 0 & 7 \cdot (-1) - 0 & 7 \cdot 1 - 7 & | & 7 \cdot (-1) - 1 \\ 0 & 7 \cdot 3 + 0 & 7 \cdot (-4) + 4 \cdot 7 & | & 7 \cdot 2 + 4 \cdot 1 \\ 0 & 0 & 7 & | & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{pmatrix} 7 & -7 & 0 & | & -8 \\ 0 & 21 & 0 & | & 18 \\ 0 & 0 & 7 & | & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{matrix} c_1 + c_2 \\ c_2 / 3 \end{matrix} \begin{pmatrix} 7 & -7 + 7 & 0 & | & 7 \cdot (-1) - 6 \\ 0 & 21/3 & 0 & | & 18/3 \\ 0 & 0 & 7 & | & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 7 & 0 & 0 & | & -2 \\ 0 & 7 & 0 & | & 6 \\ 0 & 0 & 7 & | & 1 \end{pmatrix}.$$

Полученная матрица соответствует однородной системе уравнений:

$$\begin{cases} 7x_1 = -2x_4 \\ 7x_2 = 6x_4 \\ 7x_3 = x_4 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_1 = -\frac{2}{7}x_4 \\ x_2 = \frac{6}{7}x_4 \\ x_3 = \frac{1}{7}x_4 \end{cases}.$$

Следовательно, общее решение системы можно получить в виде:

$$\left\{ -\frac{2}{7}x_4; \frac{6}{7}x_4; \frac{1}{7}x_4; x_4 \right\}.$$

5.7.1. Понятие фундаментальной системы

1. Если набор чисел $\{k_1, k_2, k_3, \dots, k_n\}$ – решение системы, то и $\{pk_1, pk_2, pk_3, \dots, pk_n\}$ также решение системы.

Из этих свойств следует, что любая линейная комбинация решений однородной системы линейных уравнений является решением этой системы. Следовательно, можно найти такую совокупность линейно независимых решений однородной системы, линейная комбинация которых порождает все решения системы.

Совокупность линейно независимых решений однородной системы линейных уравнений называется *фундаментальной системой решений*, если каждое решение системы уравнений является линейной комбинацией выбранных решений.

Теорема 2.2. Если ранг r однородной системы линейных уравнений меньше числа неизвестных n , то всякая ее фундаментальная система решений состоит из $n - r$ решений.

Если найдено общее решение однородной системы линейных уравнений и все базисных переменные $x_1, x_2, \dots, x_r$ линейно выражены через свободные переменные $x_{r+1}, \dots, x_n$:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1 = \alpha_{1,r+1}X_{r+1} + ... + \alpha_{1n}X_n \\ X_2 = \alpha_{2,r+1}X_{r+1} + ... + \alpha_{2n}X_n \\ X_3 = \alpha_{3,r+1}X_{r+1} + ... + \alpha_{3n}X_n , \\ \\ X_k = \alpha_{k,r+1}X_{r+1} + ... + \alpha_{kn}X_n \end{array} \right.$$

то для построения фундаментальной совокупности решений необходимо найти частные решения однородной системы.

Для нахождения первого решения примем значения свободных переменных

$$x_{r+1}=1, \quad x_{r+2}=0, \quad x_{r+3}=0, \quad \dots, \quad x_n=0.$$

Тогда первое частное решение примет вид:

$$F_1 = \{ \alpha_{1,r+1}, \alpha_{2,r+1}, \alpha_{3,r+1}, \dots, \alpha_{r,r+1}, 1, 0, 0, \dots, 0 \}.$$

Для второго решения свободные переменные будут равны

$$x_{r+1}=0, \quad x_{r+2}=1, \quad x_{r+3}=0, \quad \dots, \quad x_n=0,$$

Следовательно, второе частное решение

$$F_2 = \{ \alpha_{1,r+2}, \alpha_{2,r+2}, \alpha_{3,r+2}, \dots, \alpha_{r,r+2}, 0, 1, 0, \dots, 0 \}.$$

$$\dots, \quad \dots, \quad \dots, \quad \dots, \quad \dots, \quad \dots$$

для последнего решения возьмем значения

$$x_{r+1}=0, \quad x_{r+2}=0, \quad x_{r+3}=0, \quad \dots, \quad x_n=1,$$

соответственно, последнее частное решение

$$F_{n-r} = \{ \alpha_{1,n}, \alpha_{2,n}, \alpha_{3,n}, \dots, \alpha_{r,n}, 1, 0, 0, \dots, 0 \}.$$

Полученные частные решения $F_1, F_2, F_3, \dots, F_{n-r}$ и образуют фундаментальную систему решений.

5.7.2. Построение фундаментальной системы решений

Пример. Рассмотрим однородную систему:

$$\begin{cases} 2x_1 + x_2 - 2x_3 - x_4 + 2x_5 = 0 \\ x_1 + 3x_2 - x_3 - 3x_4 + 6x_5 = 0. \\ x_2 - x_4 + 2x_5 = 0 \end{cases}$$

Для получения фундаментального решения системы линейных уравнений найдем ее общее решение. Используя алгоритм «прямого хода» метода Гаусса, выполним следующие преобразования системы:

$$\begin{pmatrix} 2 & 1 & -2 & -1 & 2 & | & 0 \\ 1 & 3 & -1 & -3 & 6 & | & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 2 & | & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow 2c_2 - c_1 \begin{pmatrix} 2 & 1 & -2 & -1 & 2 & | & 0 \\ 0 & 5 & 0 & -5 & 10 & | & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 2 & | & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow$$

$$5c_3 - c_2 \begin{pmatrix} 2 & 1 & -2 & -1 & 2 & | & 0 \\ 0 & 5 & 0 & -5 & 10 & | & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & | & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow c_2/5 \begin{pmatrix} 2 & 1 & -2 & -1 & 2 & | & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 2 & | & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & | & 0 \end{pmatrix}.$$

Будем считать переменные x_1, x_2 базисными, а неизвестные x_3, x_4, x_5 – свободными. Перенесем коэффициенты свободной переменной с противоположным знаком в правые части равенств и выполним преобразования системы «обратным ходом» метода Гаусса:

$$\begin{pmatrix} 2 & 1 & | & 2 & 1 & -2 \\ 0 & 1 & | & 0 & 1 & -2 \end{pmatrix} \Rightarrow c_1 - c_2 \begin{pmatrix} 2 & 0 & | & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & | & 0 & 1 & -2 \end{pmatrix} \Rightarrow c_1/2 \begin{pmatrix} 1 & 0 & | & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & | & 0 & 1 & -2 \end{pmatrix}.$$

Полученная матрица соответствует однородной системе уравнений:

$$\begin{cases} x_1 = x_3 \\ x_2 = x_4 - 2x_5 \end{cases},$$

следовательно, общее решение системы можно записать следующим образом:

$$\{x_3; x_4 - 2x_5, x_3, x_4, x_5\}.$$

Поскольку ранг однородной системы равен двум, а число неизвестных – пяти, то ее фундаментальная система решений состоит из $5 - 2 = 3$ решений. Взяв последовательно для свободных переменных значения $\{1, 0, 0\}$, $\{0, 1, 0\}$, $\{0, 0, 1\}$, получим совокупность фундаментальных решений:

$$F_1 = \{1, 0, 1, 0, 0\};$$

$$F_2 = \{0, 1, 0, 1, 0\};$$

$$F_3 = \{1, -2, 0, 0, 1\}.$$

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение линейного алгебраического уравнения. Какие виды линейных алгебраических уравнений вы знаете?

2. Что такое система линейных алгебраических уравнений?
3. Чем отличаются определенные системы от неопределенных?
4. Как называются системы линейных алгебраических уравнений, которые не имеют ни одного решения?
5. Каким образом определяются матричные формы записи систем линейных алгебраических уравнений?
6. Чем отличаются общая и расширенная формы записи систем линейных алгебраических уравнений?
7. В каком случае система линейных алгебраических уравнений будет совместной, то есть иметь хотя бы одно решение?
8. Что можно сказать о ранге общей и расширенной матриц системы линейного алгебраического уравнения, если система является неопределенной?
9. Опишите матричный метод решения систем линейных алгебраических уравнений. В каких случаях можно использовать данный метод?
10. Приведите пример решения системы линейных алгебраических уравнений матричным методом.
11. Опишите метод Крамера решения системы линейных алгебраических уравнений. Что произойдет, если решаемая система будет несовместной или неопределенной?
12. Приведите пример решения системы линейных алгебраических уравнений методом Крамера.
13. Опишите метод Гаусса решения системы линейных алгебраических уравнений. В каких случаях можно применять данный метод?
14. Приведите пример решения определенной системы линейных алгебраических уравнений методом Гаусса.
15. Какие особенности можно указать при нахождении решений неопределенных систем линейных алгебраических уравнений методом Гаусса?
16. Приведите пример решения неопределенной системы линейных алгебраических уравнений методом Гаусса.
17. В каком случае при решении неопределенной системы линейных

алгебраических уравнений методом Гаусса не нужно выполнять преобразования «обратного хода»?

18. Какая система линейных алгебраических уравнений называется однородной?

19. Почему система однородных линейных алгебраических уравнений всегда совместна?

20. Какие системы однородных линейных алгебраических уравнений называются нетривиально совместными?

21. В каких случаях однородная система линейных алгебраических уравнений нетривиально совместна?

22. С помощью какого метода определяются решения однородных систем линейных алгебраических уравнений?

23. Какая совокупность линейно независимых решений однородной системы линейных уравнений называется фундаментальной системой решений?

24. Из скольких решений состоит фундаментальная система решений однородной системы линейных алгебраических уравнений?

25. Опишите алгоритм нахождения фундаментальной системы решений системы линейных однородных алгебраических уравнений?

Глава 6. Векторная алгебра

Векторная алгебра – это прикладной раздел математики, изучающий линейные операции над векторами и их свойства. Векторная алгебра является мощным инструментом для исследований и расчетов в аналитической геометрии, математическом анализе, математической статистике, физике, астрономии, химии, экономике, технических науках.

Векторная алгебра оперирует с понятием вектора. Обычно вектор связывают с геометрическим понятием, но часто в практических приложениях векторы задаются только численно с помощью координат, и все вычисление производят, не прибегая к графической интерпретации вектора.

Скалярными величинами или *скалярами* называют величины, полностью определяемые с помощью действительных чисел.

Пример. Площадь фигуры, длина объекта, масса тела, температура окружающей среды, работа, сопротивление металла – все это скалярные величины.

Величины, у которые важно не только числовое значение, но и направление называют *векторными*.

Пример. Перемещение тела, его скорость, импульс, ускорение, сила, напряженность поля, магнитная индукция, градиент – векторные величины.

Отметим, что направления здесь могут быть определены в геометрическом смысле не только в двумерном, трехмерном, но и четырехмерном, пятимерном, ..., n -мерном пространствах.

Пример. При исследовании функции пяти переменных можно построить пятимерный вектор-градиент.

Следует отметить, что если векторы по физическим или иным причинам привязаны к какому-то объекту или месту и их нельзя никуда переносить, то такие векторы называются *связанными*. Векторы, которые можно двигать вдоль прямых, на которых они расположены, называют *скользящими*. А если векторы можно переносить с помощью параллельного переноса в любое место пространства, то они называются *свободными*.

В данной главе мы будем рассматривать свободные векторы в трехмерном пространстве.

6.1. Основные понятия векторной алгебры

Вектором называется направленный отрезок AB , у которого определены начало – точка A и конец – точка B (рис. 6.1).

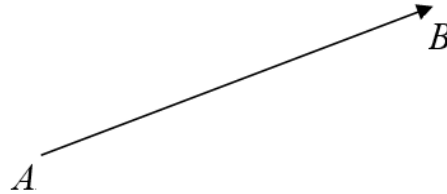


Рис. 6.1. Геометрическое изображение вектора.

Обозначения векторов такое же, как и у отрезков с использованием двух прописных или одной строчной буквы, но при этом для записи используется надчеркивание или верхняя стрелка, а иногда выделение жирным шрифтом и курсивом.

Пример. Обозначения векторов: $\vec{i}$, $\overline{PQ}$, $\vec{a}$, $\overrightarrow{DF}$, $\mathbf{r}$, $\mathbf{KM}$.

Модулем $|\vec{a}|$ вектора $\vec{a}$ называется скаляр, определяющий длину данного вектора.

Пример. Если начало L и конец M вектора $\vec{v}$ имеют координаты $(1; -2; 4)$ и $(-2; -2; 8)$, тогда для определения длины вектора по теореме Пифагора найдем расстояние между точками L и M :

$$|\vec{r}| = |LM| = \sqrt{(-2-1)^2 + (-2+2)^2 + (8-4)^2} = \sqrt{3^2 + 0^2 + 4^2} = \sqrt{25} = 5$$

Вектор $\vec{b}$, называется *противоположным* к вектору $\vec{a}$, если он имеет длину $|\vec{a}|$ и направление противоположное к вектору $\vec{a}$. В таком случае можно записать $\vec{b} = -\vec{a}$.

Пример. Противоположным к вектору $\overline{AB}$ является вектор $\overline{CD}$ (Рис. 6.2). Векторы $\overline{AB}$ и $\overline{CD}$ имеют одинаковую длину и противоположные направления.

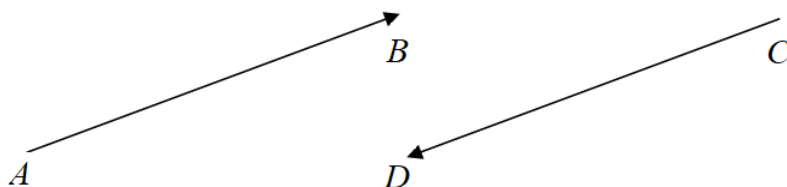


Рис. 6.2. Противоположные векторы.

Вектор, начало и конец которого совпадают, а длина равна нулю, называется *нулевым вектором*. Нулевой вектор направления не имеет.

Вектор, длина которого равна единице, называется *единичным вектором*. Часто такой вектор обозначают $\vec{e}$. Если направление единичного вектора $\vec{e}$ совпадает с направлением вектора $\vec{a}$, то такой вектор называют *ортом* вектора $\vec{a}$ и записывают $\vec{a}^o$.

Если два или более векторов лежат на одной прямой или на параллельных прямых, то такие вектора называются *коллинеарными*. Если вектор $\vec{a}$ коллинеарен вектору $\vec{b}$, то пишут $\vec{a} \parallel \vec{b}$. Коллинеарные вектора могут иметь разные длины, быть направлены как в одну сторону, так и иметь противоположные направления.

Если векторы коллинеарны, одинаково направлены и имеют одинаковые длины, то их называют *равными*. Если вектор $\vec{a}$ равен вектору $\vec{b}$, то можно записать $\vec{a} = \vec{b}$.

Пример. На рисунке 3.3 изображены векторы $\vec{a}$, $\vec{b}$, $\vec{c}$, $\vec{d}$, $\vec{e}$, $\vec{f}$. Векторы $\vec{a}$, $\vec{b}$ и $\vec{e}$ являются коллинеарными, кроме того, коллинеарными являются векторы $\vec{c}$ и $\vec{d}$, векторы $\vec{a}$ и $\vec{e}$ равны. Вектор $\vec{f}$ является нулевым вектором, его длина равна нулю, а направление не определено. Пусть длина вектора $\vec{e}$ равна единице, тогда вектор $\vec{e}$ является единичным вектором, кроме того, вектор $\vec{e}$ будет ортом вектора $\vec{b}$.

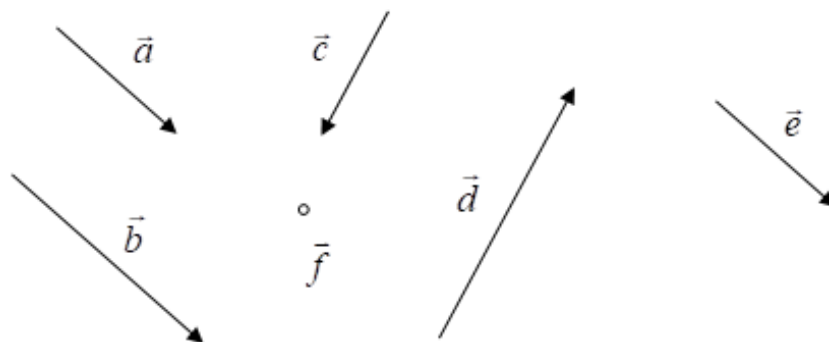


Рис. 6.3. Коллинеарные и равные векторы.

Три и более векторов в пространстве называются *компланарными*, если они лежат в одной плоскости или в параллельных плоскостях. Если среди трех векторов хотя бы один нулевой или два любые коллинеарны, то такие три вектора можно считать компланарными.

Пример. На рисунке 3.4 расположены три компланарных вектора: $\vec{r}$, $\vec{q}$, $\vec{s}$. Векторы $\vec{r}$ и $\vec{q}$ лежат в одной плоскости α , а вектор $\vec{s}$ в параллельной плоскости β .

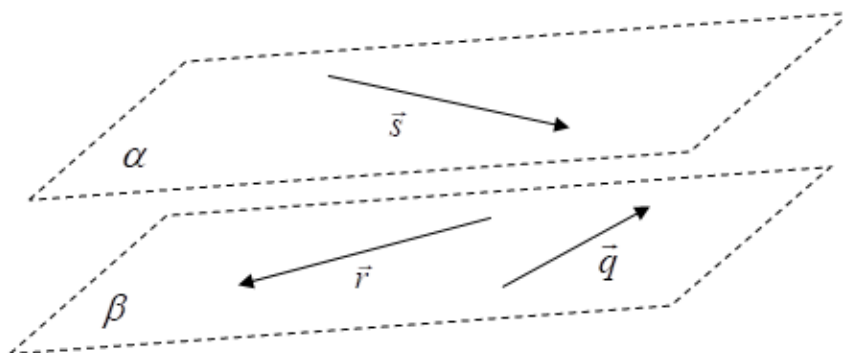


Рис. 6.4. Компланарные векторы.

6.2. Линейные операции над векторами

Рассмотрим линейные операции над векторами. К ним относятся сложение векторов, вычитание векторов, умножение вектора на число.

Сумой двух векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ называется вектор $\vec{a} + \vec{b}$, начало которого совпадает с началом вектора $\vec{a}$, а конец с концом вектора $\vec{b}$, при условии, что

начало вектора $\vec{b}$ совпадает с концом вектора $\vec{a}$ (рис.63.5.а). Данное определение называется *правилом треугольника*.

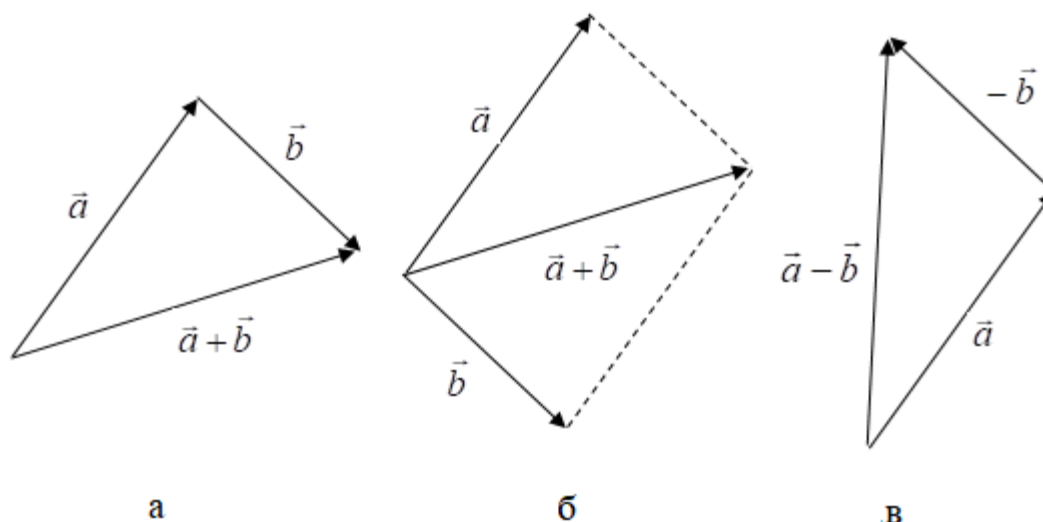


Рис. 6.5. Сумма и разность векторов.

Сумму векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ можно также представить, как вектор, совпадающий с диагональю параллелограмма, построенного на векторах $\vec{a}$ и $\vec{b}$. Начало вектора $\vec{a} + \vec{b}$ совпадает с началами векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$, а конец – с противоположной вершиной параллелограмма (рис. 6.5.б).

Разностью векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ называется вектор $\vec{a} - \vec{b}$, представляющий собой сумму вектора $\vec{a}$ и вектора $-\vec{b}$, противоположного вектору $\vec{b}$ (рис. 6.5.в). Таким образом, $\vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b})$.

Произведением вектора $\vec{a}$ на число λ называется вектор $\lambda \vec{a}$, коллинеарный вектору $\vec{a}$, имеющий длину $|\lambda| \cdot |\vec{a}|$ и направление вектора $\vec{a}$, если $\lambda > 0$ и противоположное направление, если $\lambda < 0$.

Пример. На рисунке 3.6 изображены вектор $\vec{a}$, вектор $2\vec{a}$, полученный, как произведение вектора $\vec{a}$ на два, и вектор $-3\vec{a}$, представляющий собой произведение вектора $\vec{a}$ на число -3 . Видно, что векторы $2\vec{a}$ и $-3\vec{a}$ коллинеарны вектору $\vec{a}$, вектор $2\vec{a}$ имеет направление вектора $\vec{a}$, а вектор $-3\vec{a}$ – направление противоположное вектору $\vec{a}$.

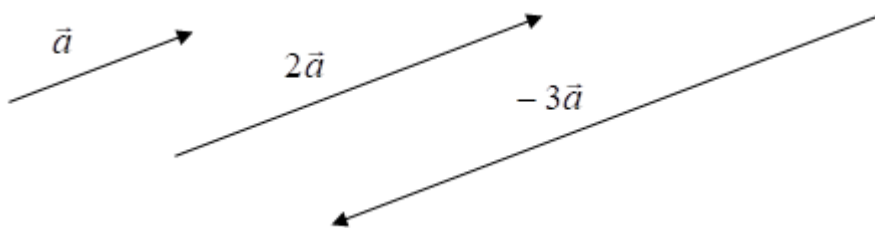


Рис. 6.6. Умножение вектора на число.

Если вектор $\vec{a}$ можно представить, как произведение вектора $\vec{b}$ на число λ , то есть $\vec{a} = \lambda \vec{b}$, то векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ коллинеарны. Верно и обратное утверждение. Если векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ коллинеарны, причем, $|\vec{a}| \neq 0$, то вектор $\vec{b}$ можно представить, как произведение вектора $\vec{a}$ на некоторое число λ : $\vec{b} = \lambda \vec{a}$.

В силу вышеизложенного можно определить произвольный ненулевой вектор $\vec{a}$, как произведение модуля $|\vec{a}|$ на его орт: $\vec{a} = |\vec{a}| \cdot \vec{a}^0$.

Определим свойства линейных операций над векторами.

Свойства линейных операций над векторами

1. $\vec{a} + \vec{b} = \vec{b} + \vec{a}$ – коммутативность сложения;
2. $\lambda \vec{a} = \vec{a} \lambda$ – коммутативность умножения на число;
3. $(\vec{a} + \vec{b}) + \vec{c} = \vec{a} + (\vec{b} + \vec{c})$ – ассоциативность сложения;
3. $(\lambda_1 \lambda_2) \vec{a} = \lambda_1 (\lambda_2 \vec{a})$ – ассоциативность умножения на число;
4. $(\lambda_1 + \lambda_2) \vec{a} = \lambda_1 \vec{a} + \lambda_2 \vec{a}$ – дистрибутивность суммы коэффициентов;
5. $\lambda (\vec{a} + \vec{b}) = \lambda \vec{a} + \lambda \vec{b}$ – дистрибутивность относительно суммы векторов.

6.3. Метод координат.

6.3.1. Разложение вектора по ортам координатных осей.

В декартовой системе координат любой свободный вектор можно представить в виде линейной комбинации орт координатных осей.

С помощью параллельного переноса поместим начало произвольного вектора $\vec{a}$ в начало прямоугольной декартовой системы координат (рис. 6.7).

Пусть векторы $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$ являются ортами координатных осей Ox , Oy , Oz , а числа

a_x, a_y, a_z – проекциями конца вектора $\vec{a}$ на соответствующие оси координат. Тогда вектор $\vec{a}$ можно получить в виде суммы произведений орт координатных осей $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ на его проекции a_x, a_y, a_z :

$$\vec{a} = a_x \cdot \vec{i} + a_y \cdot \vec{j} + a_z \cdot \vec{k}. \quad (6.1)$$

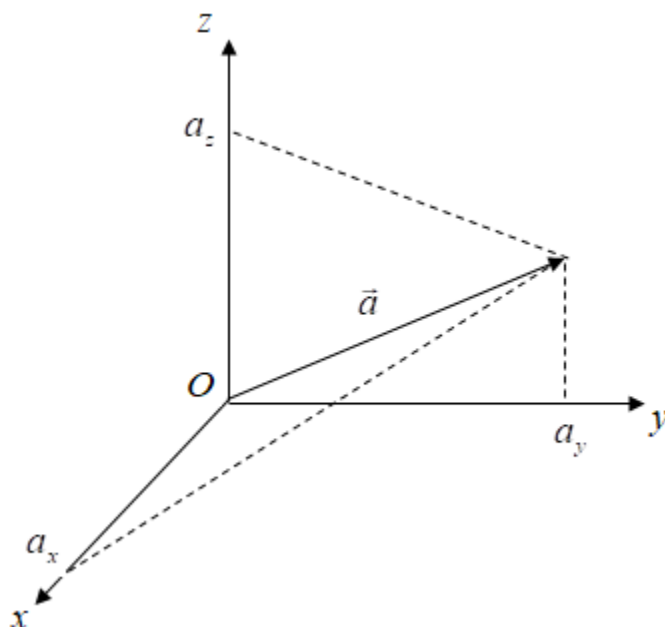


Рис. 6.7. Проекции вектора $\vec{a}$.

Числа a_x, a_y, a_z принято называть координатами вектора $\vec{a}$. В этом случае разложение вектора $\vec{a}$ можно записать в следующем виде:

$$\vec{a} = a_x \cdot \vec{i} + a_y \cdot \vec{j} + a_z \cdot \vec{k}.$$

Пример. Если проекции вектора $\vec{a}$ на координатные оси Ox, Oy, Oz равны соответственно 4, 1 и -7 , то говорят, что вектор $\vec{a}$ имеет координаты $(4; 1; -7)$, а его разложение можно представить в виде:

$$\vec{a} = 4\vec{i} + \vec{j} - 7\vec{k}.$$

В случае, если известны координаты начала $(x_1; y_1; z_1)$ и координаты конца $(x_2; y_2; z_2)$ вектора $\vec{a}$, то координаты вектора этого вектора можно получить, вычитывая из координат конца вектора соответствующие координаты его начала: $(x_2 - x_1; y_2 - y_1; z_2 - z_1)$.

Пример. Найдем координаты вектора $\vec{p}$, если известны координаты его начала $(3; -8; 5)$ и его конца $(2; 0; 11)$.

Для нахождения координат вектора $\vec{p}$ найдем разности его координат:

$$(2 - 3; 0 - (-8); 11 - 5) = (-1; 8; 6).$$

6.3.2. Модуль вектора.

Мы уже давали определение модуля вектора, как числа, определяющего длину вектора. Снова перенесем начало вектора $\vec{a}$ в начало координат. Тогда длину вектора $\vec{a}$ можно получить по теореме Пифагора, взяв квадратный корень из суммы квадратов проекций вектора $a_x^2 + a_y^2 + a_z^2$.

Таким образом, модуль вектора получим по формуле:

$$|\vec{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}. \quad (6.2)$$

Пример. Найдем модуль вектора k , имеющего координаты $(4, 1, -7)$.

Используя вышеприведенную формулу получим:

$$|\vec{k}| = \sqrt{4^2 + 1^2 + (-7)^2} = \sqrt{16 + 1 + 49} = \sqrt{66} \approx 8,124038.$$

6.3.3. Направляющие косинусы

Для определения направления векторов можно использовать углы α , β , γ , которые вектор образует с осями координат (рис. 6.8). Данные углы полностью определяют направление вектора.

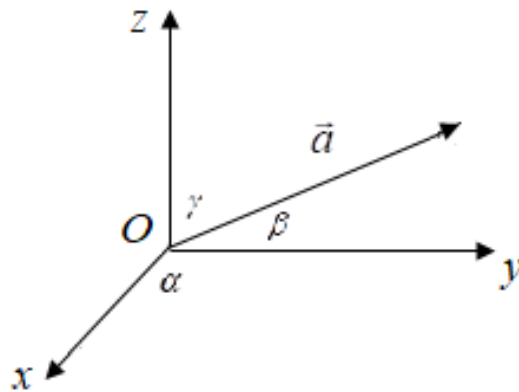


Рис. 6.8. Направляющие косинусы.

Косинусы этих углов называют *направляющими косинусами* вектора. Направляющие косинусы можно найти, как отношения соответствующих координат к модулю вектора:

$$\cos \alpha = \frac{a_x}{|a|}; \quad \cos \beta = \frac{a_y}{|a|}; \quad \cos \gamma = \frac{a_z}{|a|}. \quad (6.3)$$

Найдем сумму квадратов направляющих косинусов:

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = \frac{a_x^2}{|a|^2} + \frac{a_y^2}{|a|^2} + \frac{a_z^2}{|a|^2} = \frac{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}{|a|^2}.$$

Так как сумма квадратов координат равна квадрату модуля вектора, то значение дроби равно 1. Следовательно, сумма квадратов направляющих косинусов вектора равна единице:

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1. \quad (6.4)$$

Пример. Найти направляющие векторы вектора $\vec{p}$, если заданы координаты его начала и конца: $P_1(5; 3; 0)$, $P_2(1; 7; -2)$.

Вычислим координаты вектора $\vec{p}$:

$$p_x = 1 - 5 = -4; \quad p_y = 7 - 3 = 4; \quad p_z = -2 - 0 = -2.$$

Теперь определим модуль вектора $\vec{p}$:

$$|\vec{p}| = \sqrt{(-4)^2 + 4^2 + (-2)^2} = \sqrt{16 + 16 + 4} = \sqrt{36} = 6$$

Следовательно, направляющие косинусы вектора $\vec{p}$ будут равны:

$$\cos \alpha = \frac{-4}{6}; \quad \cos \beta = \frac{4}{6}; \quad \cos \gamma = \frac{-2}{6}.$$

Сократив дроби, окончательно получим:

$$\cos \alpha = -\frac{2}{3}; \quad \cos \beta = \frac{2}{3}; \quad \cos \gamma = -\frac{1}{3}.$$

6.3.4. Равенство и коллинеарность векторов

Два вектора считаются *равными*, если их координаты равны:

$$\vec{a} = \vec{b} \Leftrightarrow \begin{cases} a_x = b_x \\ a_y = b_y \\ a_z = b_z \end{cases} \quad (6.5)$$

Пример. Векторы $\vec{m}(-8;3;17)$ и $\vec{n}(-8;3;17)$ равны, так равны их координаты.

Рассмотрим два коллинеарных вектора: вектор $\vec{a}$ с координатами a_x, a_y, a_z и вектор $\vec{b}$, координаты которого равны b_x, b_y, b_z . Пусть векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ направлены в одну сторону, тогда их направляющие косинусы будут равны.

Из определения направляющих косинусов выразим координаты векторов:

$$a_x = |a| \cos \alpha; \quad a_y = |a| \cos \beta; \quad a_z = |a| \cos \gamma.$$

$$b_x = |b| \cos \alpha; \quad b_y = |b| \cos \beta; \quad b_z = |b| \cos \gamma.$$

Разделим теперь все координаты вектора $\vec{a}$ на соответствующие координаты вектора $\vec{b}$:

$$\frac{a_x}{b_x} = \frac{|a| \cos \alpha}{|b| \cos \alpha} = \frac{|a|}{|b|}; \quad \frac{a_y}{b_y} = \frac{|a| \cos \beta}{|b| \cos \beta} = \frac{|a|}{|b|}; \quad \frac{a_z}{b_z} = \frac{|a| \cos \gamma}{|b| \cos \gamma} = \frac{|a|}{|b|}.$$

Как видно, отношение любых координат сонаправленных векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ равно отношению их модулей.

Нетрудно понять, что в случае противоположно направленных векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ направляющие косинусы будут отличаться только знаком и отношение любых координат противонаправленных векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ равно отношению их модулей, взятому со знаком минус:

$$\frac{a_x}{b_x} = -\frac{|a|}{|b|}; \quad \frac{a_y}{b_y} = -\frac{|a|}{|b|}; \quad \frac{a_z}{b_z} = -\frac{|a|}{|b|}.$$

Таким образом, можно сказать, что координаты коллинеарных векторов пропорциональны. Верно и обратное утверждение: векторы, имеющие пропорциональные координаты являются коллинеарными:

$$\vec{a} \parallel \vec{b} \Leftrightarrow \frac{a_x}{b_x} = \frac{a_y}{b_y} = \frac{a_z}{b_z}. \quad (6.6)$$

Пример. Векторы $\vec{q}(4; -8; 2)$ и $\vec{r}(-6; 12; -3)$ являются коллинеарными, поскольку их координаты пропорциональны:

$$\frac{4}{-6} = \frac{-8}{12} = \frac{2}{-3}.$$

6.4. Скалярное произведение

6.4.1. Определение скалярного произведения

Скалярным произведением двух ненулевых векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ называется число, равное произведению модулей этих векторов на косинус угла между ними:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cos \varphi, \quad (6.7)$$

где φ – угол между векторами $\vec{a}$ и $\vec{b}$.

Иногда скалярное произведение векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ записывают $(\vec{a}; \vec{b})$.

Ввиду того, что $|\vec{a}|$, $|\vec{b}|$ и $\cos \varphi$ являются действительными числами, то для скалярного произведения выполняются следующие основные свойства:

Свойства скалярного произведения

1. $\vec{a} \cdot \vec{b} = \vec{b} \cdot \vec{a}$ – коммутативность скалярного произведения;
2. $\alpha \vec{a} \cdot \vec{b} = \alpha (\vec{a} \cdot \vec{b})$ – ассоциативность умножения на скаляр;
3. $\vec{a} \cdot (\vec{b} + \vec{c}) = \vec{a} \cdot \vec{b} + \vec{a} \cdot \vec{c}$ – дистрибутивность скалярного произведения.

Кроме того, можно заметить, что квадрат вектора равен квадрату его модуля: $\vec{a} \cdot \vec{a} = |\vec{a}|^2$.

Пример. Найдем скалярные квадраты ортов осей координат.

Вследствие того, что длины ортов равны единице, получим:

$$\vec{i} \cdot \vec{i} = \vec{j} \cdot \vec{j} = \vec{k} \cdot \vec{k} = 1.$$

Если ненулевые векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ взаимно перпендикулярны, то их скалярное произведение равно нулю.

Пример. Найдем скалярные произведения различных ортов осей координат.

Так как углы между ортами равно нулю, получим:

$$\vec{i} \cdot \vec{j} = \vec{i} \cdot \vec{k} = \vec{j} \cdot \vec{k} = 0.$$

6.4.2. Выражение скалярного произведения через координаты

Возьмем два произвольных вектора $\vec{a}(a_x; a_y; a_z)$ и $\vec{b}(b_x; b_y; b_z)$. Представим эти векторы в виде суммы произведений их координат на соответствующие орты:

$$\vec{a} = a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k}; \quad \vec{b} = b_x \vec{i} + b_y \vec{j} + b_z \vec{k}.$$

Найдем скалярное произведение векторов:

$$\begin{aligned} \vec{a} \cdot \vec{b} &= (a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k}) \cdot (b_x \vec{i} + b_y \vec{j} + b_z \vec{k}) = \\ &= a_x b_x \vec{i} \vec{i} + a_x b_y \vec{i} \vec{j} + a_x b_z \vec{i} \vec{k} + a_y b_x \vec{j} \vec{i} + a_y b_y \vec{j} \vec{j} + a_y b_z \vec{j} \vec{k} + a_z b_x \vec{k} \vec{i} + a_z b_y \vec{k} \vec{j} + a_z b_z \vec{k} \vec{k}. \end{aligned}$$

В силу того, что произведения $\vec{i} \cdot \vec{j}$, $\vec{i} \cdot \vec{k}$, $\vec{j} \cdot \vec{k}$, $\vec{j} \cdot \vec{i}$, $\vec{k} \cdot \vec{i}$ и $\vec{k} \cdot \vec{j}$ равны нулю, слагаемые, содержащие эти множители также будут равны нулю, и, следовательно, скалярное произведение векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ будет равно:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = a_x b_x \vec{i} \vec{i} + a_y b_y \vec{j} \vec{j} + a_z b_z \vec{k} \vec{k}$$

Учитывая, что скалярные произведения $\vec{i} \cdot \vec{i} = \vec{j} \cdot \vec{j} = \vec{k} \cdot \vec{k} = 1$, окончательно получим:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z \quad (6.8)$$

Таки образом, можно утверждать: скалярное произведение векторов равно сумме произведений их соответствующих координат.

Пример. Найдем скалярное произведение векторов $\vec{p}(-2; 1; 5)$ и $\vec{q}(4; 8; 3)$.

Для нахождения произведения $\vec{p} \cdot \vec{q}$ рассчитаем сумму произведений соответствующих координат векторов $\vec{p}$ и $\vec{q}$:

$$\vec{p} \cdot \vec{q} = p_x q_x + p_y q_y + p_z q_z = -2 \cdot 4 + 1 \cdot 8 + 5 \cdot 3 = -8 + 8 + 15 = 15.$$

6.4.3. Приложения скалярного произведения

Рассмотрим наиболее употребляемые приложения скалярного произведения.

Определение угла между векторами

Возьмем два ненулевых вектора $\vec{a}(a_x; a_y; a_z)$ и $\vec{b}(b_x; b_y; b_z)$. Выпишем формулу нахождения скалярного произведения этих векторов:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cos \varphi.$$

Выразим из уравнения $\cos \varphi$. Для этого разделим обе части уравнения на произведение модулей векторов $|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|$:

$$\cos \varphi = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|}.$$

Подставим вместо произведения векторов $\vec{a} \cdot \vec{b}$ сумму произведений координат $a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$, а вместо модулей векторов – их представления через координаты и таким образом получим формулу нахождения косинуса угла между указанными векторами:

$$\cos \varphi = \frac{a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \cdot \sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2}}. \quad (6.9)$$

Пример. Определим косинус угла между векторами $\vec{g}(6; -3; 11)$ и $\vec{h}(-3; 0; 1)$.

Сначала найдем скалярное произведение векторов $\vec{g}$ и $\vec{h}$:

$$\vec{g} \cdot \vec{h} = 6 \cdot (-3) + (-3) \cdot 0 + 11 \cdot 1 = -18 + 0 + 11 = -7.$$

Найдем модули векторов $\vec{g}$ и $\vec{h}$:

$$|\vec{g}| = \sqrt{6^2 + (-3)^2 + 11^2} = \sqrt{36 + 9 + 121} = \sqrt{166}.$$

$$|\vec{h}| = \sqrt{(-3)^2 + 0^2 + 1^2} = \sqrt{9 + 0 + 1} = \sqrt{10}.$$

Теперь для нахождения косинуса угла между векторами $\vec{g}$ и $\vec{h}$ осталось найти отношение $\vec{g} \cdot \vec{h}$ на произведение модулей $|\vec{g}| \cdot |\vec{h}|$:

$$\cos \varphi = \frac{\vec{g} \cdot \vec{h}}{|\vec{g}| \cdot |\vec{h}|} = \frac{-7}{\sqrt{166} \cdot \sqrt{10}} = -\frac{7}{2 \cdot \sqrt{415}}.$$

Определение перпендикулярности векторов

Из формулы векторного произведения органично следует условие перпендикулярности векторов.

Два ненулевых вектора $\vec{a}(a_x; a_y; a_z)$ и $\vec{b}(b_x; b_y; b_z)$ будут взаимно перпендикулярными тогда и только тогда, когда скалярное произведение векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ равно нулю:

$$\vec{a} \perp \vec{b} \Leftrightarrow \vec{a} \cdot \vec{b} = 0.$$

Пример. Определим, являются ли векторы $\vec{e}(4; 1; 9)$ и $\vec{f}(-3; 3; 1)$ перпендикулярными?

Для определения перпендикулярности найдем скалярное произведение векторов $\vec{e}$ и $\vec{f}$:

$$\vec{e} \cdot \vec{f} = 4 \cdot (-3) + 1 \cdot 3 + 9 \cdot 1 = -12 + 3 + 9 = 0.$$

Ввиду того, что скалярное произведение векторов $\vec{e}$ и $\vec{f}$ равно нулю, следовательно, векторы $\vec{e}$ и $\vec{f}$ являются взаимно перпендикулярными.

6.5. Векторное произведение

6.5.1. Определение и свойства векторного произведения

Три некопланарных упорядоченных вектора $\vec{a}$, $\vec{b}$ и $\vec{c}$ образуют *левую тройку*, если с конца третьего вектора $\vec{c}$ кратчайший поворот от первого вектора

$\vec{a}$ ко второму вектору $\vec{b}$ виден совершающимся по часовой стрелки, и *правую*, если против часовой (рис. 3.9).

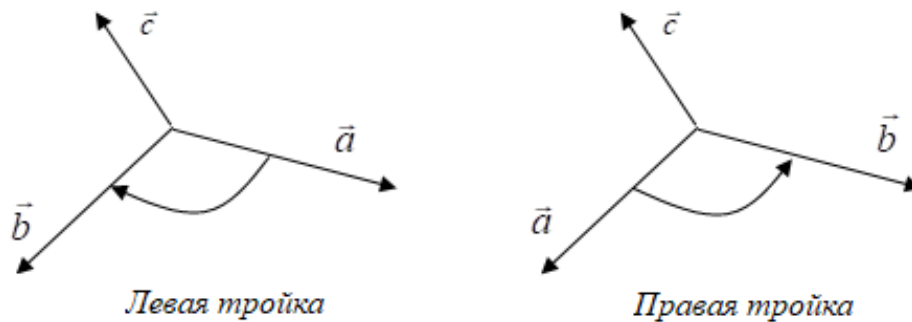


Рис. 6.9. Ориентация векторов.

Дадим теперь определение векторного произведения.

Векторным произведением двух ненулевых векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ называется вектор $\vec{c}$, который:

1. Перпендикулярен векторам $\vec{a}$ и $\vec{b}$;
2. Имеет длину, численно равную площади параллелограмма, построенного на векторах $\vec{a}$ и $\vec{b}$ как на сторонах

$$|\vec{c}| = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \sin \varphi, \text{ где } \varphi = \angle(\vec{a}; \vec{b}) \text{ (рис. 7.10);}$$

3. Векторы $\vec{a}$, $\vec{b}$ и $\vec{c}$ образуют правую тройку.

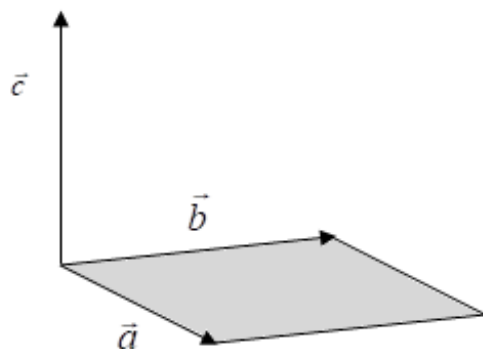


Рис. 6.10. Векторное произведение.

Векторное произведение обозначается $\vec{a} \times \vec{b}$ или $[\vec{a}; \vec{b}]$.

Пример. Определим векторные произведение ортов осей координат.

Вследствие того, что углы между ортами равны 90° , длины ортов $\vec{i}$, $\vec{j}$ и $\vec{k}$ равны единице и они образуют правую тройку получим:

$$\vec{i} \times \vec{j} = \vec{k}; \quad \vec{j} \times \vec{k} = \vec{i}; \quad \vec{k} \times \vec{i} = \vec{j}.$$

$$\text{Однако, } \vec{j} \times \vec{i} = -\vec{k}; \quad \vec{k} \times \vec{j} = -\vec{i}; \quad \vec{i} \times \vec{k} = -\vec{j}.$$

Рассмотрим основные свойства векторного произведения.

Свойства векторного произведения

1. $\vec{a} \times \vec{b} = -(\vec{b} \times \vec{a})$ – антикоммутативность векторного произведения;
2. $\alpha \vec{a} \times \vec{b} = \alpha(\vec{a} \times \vec{b})$ – ассоциативность умножения на скаляр;
3. $\vec{a} \times (\vec{b} + \vec{c}) = \vec{a} \times \vec{b} + \vec{a} \times \vec{c}$ – дистрибутивность векторного произведения.

Рассмотрим два коллинеарных ненулевых вектора $\vec{a}$ и $\vec{b}$. По определению длина векторного произведения $|\vec{a} \times \vec{b}|$ равна произведению модулей векторов $|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|$ на синус угла между ними. Так как вектора коллинеарны, то синус угла между ними будет равен нулю, а, следовательно, векторное произведение будет равно нулевому вектору. Очевидно, верно и обратное утверждение: если векторное произведение двух векторов равно нулю, то векторы коллинеарны.

Пример. Векторные квадраты ортов осей координат равны нулевому вектору:

$$\vec{i} \times \vec{i} = \vec{j} \times \vec{j} = \vec{k} \times \vec{k} = \vec{0}.$$

6.5.2. Векторное произведение в координатной форме

Возьмем два произвольных вектора $\vec{a}(a_x; a_y; a_z)$ и $\vec{b}(b_x; b_y; b_z)$. Представим эти векторы в виде суммы произведений их координат на соответствующие орты:

$$\vec{a} = a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k}; \quad \vec{b} = b_x \vec{i} + b_y \vec{j} + b_z \vec{k}.$$

Найдем векторное произведение $\vec{a} \times \vec{b}$:

$$\begin{aligned} \vec{a} \times \vec{b} &= (a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k}) \times (b_x \vec{i} + b_y \vec{j} + b_z \vec{k}) = a_x b_x \vec{i} \times \vec{i} + a_x b_y \vec{i} \times \vec{j} + a_x b_z \vec{i} \times \vec{k} + \\ &+ a_y b_x \vec{j} \times \vec{i} + a_y b_y \vec{j} \times \vec{j} + a_y b_z \vec{j} \times \vec{k} + a_z b_x \vec{k} \times \vec{i} + a_z b_y \vec{k} \times \vec{j} + a_z b_z \vec{k} \times \vec{k}. \end{aligned}$$

Как мы уже определили, векторные квадраты ортов осей координат равны нулевому вектору:

$$\vec{i} \times \vec{i} = \vec{j} \times \vec{j} = \vec{k} \times \vec{k} = \vec{0}.$$

Найдем оставшиеся векторные произведения ортов (рис. 6.11).

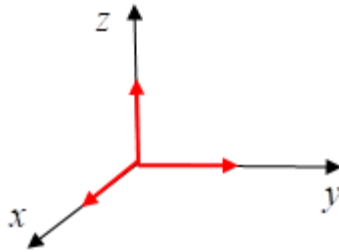


Рис. 6.11. Орты осей координат.

Результат вычисления векторных произведений поместим в таблицу:

	$\vec{i}$	$\vec{j}$	$\vec{k}$
$\vec{i}$	$\vec{0}$	$\vec{k}$	$-\vec{j}$
$\vec{j}$	$-\vec{k}$	$\vec{0}$	$\vec{i}$
$\vec{k}$	$\vec{j}$	$-\vec{i}$	$\vec{0}$

Подставляя значения таблицы в выражение векторного произведения, получим:

$$\vec{a} \times \vec{b} = a_x b_x \vec{0} + a_x b_y \vec{k} - a_x b_z \vec{j} - a_y b_x \vec{k} + a_y b_y \vec{0} + a_y b_z \vec{i} + a_z b_x \vec{j} - a_z b_y \vec{i} + a_z b_z \vec{0}.$$

Уберем из суммы нулевые векторы:

$$\vec{a} \times \vec{b} = a_x b_y \vec{k} - a_x b_z \vec{j} - a_y b_x \vec{k} + a_y b_z \vec{i} + a_z b_x \vec{j} - a_z b_y \vec{i}.$$

Приведем подобные слагаемые относительно ортов:

$$\vec{a} \times \vec{b} = (a_y b_z - a_z b_y) \vec{i} - (a_x b_z - a_z b_x) \vec{j} + (a_x b_y - a_y b_x) \vec{k}.$$

Выражения в скобках можно представить в виде определителей второго порядка:

$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{vmatrix} a_y & a_z \\ b_y & b_z \end{vmatrix} \vec{i} - \begin{vmatrix} a_x & a_z \\ b_x & b_z \end{vmatrix} \vec{j} + \begin{vmatrix} a_x & a_y \\ b_x & b_y \end{vmatrix} \vec{k}.$$

Как видно, последнее выражение является разложением определителя по теореме Лапласа:

$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix}. \quad (6.10)$$

Таким образом, векторное произведение можно представить в виде определителя третьего порядка, в первая строка которого содержит орты осей координат, а во второй и третьей строках находятся координаты перемножаемых векторов.

Пример. Найти координаты векторного произведения векторов $\vec{a} (3; -1; 2)$ и $\vec{b} (0; 5; 4)$.

Будем использовать полученную формулу, поместим в определитель координаты векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$:

$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 3 & -1 & 2 \\ 0 & 5 & 4 \end{vmatrix} =$$

Разложим определитель по первой строке и вычислим определители второго порядка:

$$= \vec{i} \begin{vmatrix} -1 & 2 \\ 5 & 4 \end{vmatrix} - \vec{j} \begin{vmatrix} 3 & 2 \\ 0 & 4 \end{vmatrix} + \vec{k} \begin{vmatrix} 3 & -1 \\ 0 & 5 \end{vmatrix} = -14\vec{i} + 12\vec{j} + 15\vec{k}.$$

Таким образом, мы получили вектор с координатами $(-14; 12; 15)$.

6.5.3. Некоторые приложения векторного произведения

Рассмотрим наиболее употребляемые приложения векторного произведения.

Установление коллинеарности векторов

Возьмем два ненулевых вектора $\vec{a}(a_x; a_y; a_z)$ и $\vec{b}(b_x; b_y; b_z)$. Если векторы $\vec{a}$ и $\vec{b}$ являются коллинеарными, то координаты этих векторов

пропорциональны $\frac{a_x}{b_x} = \frac{a_y}{b_y} = \frac{a_z}{b_z}$ и пропорциональными будут строки

определителя $\begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix}$, а значит этот определитель будет равен нулю и

произведение $\vec{a} \times \vec{b}$ будет равно нулевому вектору.

Это рассуждение можно провести и в обратную сторону: если векторное произведение двух ненулевых векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ равно нулю, то указанные векторы будут коллинеарными.

Пример. Проверим векторы $\vec{c}$ (6; 12; -9) и $\vec{d}$ (4; 8; -6) на коллинеарность.

Найдем произведение $\vec{c} \times \vec{d}$:

$$\vec{c} \times \vec{d} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 6 & 12 & -9 \\ 4 & 8 & -6 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 12 & -9 \\ 8 & -6 \end{vmatrix} \vec{i} - \begin{vmatrix} 6 & -9 \\ 4 & -6 \end{vmatrix} \vec{j} + \begin{vmatrix} 6 & 12 \\ 4 & 8 \end{vmatrix} \vec{k} = 0\vec{i} - 0\vec{j} + 0\vec{k} = \vec{0}.$$

Так как векторное произведение $\vec{c} \times \vec{d}$ равно нулевому вектору, то векторы $\vec{c}$ и $\vec{d}$ являются коллинеарными.

Нахождение площадей параллелограммов и треугольников

Вспомним, что в определении векторного произведения указано, что вектор, полученный в результате векторного произведения двух векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$, имеет длину, численно равную площади параллелограмма, построенного на векторах $\vec{a}$ и $\vec{b}$.

Тогда для нахождения площади параллелограмма достаточно найти модуль векторного произведения векторов, совпадающих со смежными сторонами:

$$S_{\text{пар}} = |\vec{a} \times \vec{b}|. \quad (6.11)$$

Если взять только половину параллелограмма, разделенного диагональю, то для определения площади полученного треугольника достаточно площадь параллелограмма разделить на два:

$$S_{\Delta} = \frac{|\vec{a} \times \vec{b}|}{2}. \quad (6.12)$$

Пример. Найдём площадь треугольника с вершинами в точках $E(-2; 2; -4)$; $F(-4; -8; -8)$; $G(1; 4; 8)$.

Для решения задачи определим координаты двух векторов, исходящих из одной вершины, например, вершины E .

$$\overrightarrow{EF} = (-4 - (-2); -8 - 2; -8 - (-4)) = (-2; -10; -4);$$

$$\overrightarrow{EG} = (1 - (-2); 4 - 2; 8 - (-4)) = (3; 2; -12).$$

Найдём векторное произведение векторов $\overrightarrow{EF}$ и $\overrightarrow{EG}$:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{EF} \times \overrightarrow{EG} &= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ -2 & -10 & -4 \\ 3 & 2 & -12 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -10 & -4 \\ 2 & 12 \end{vmatrix} \vec{i} - \begin{vmatrix} -2 & -4 \\ 3 & 12 \end{vmatrix} \vec{j} + \begin{vmatrix} -2 & -10 \\ 3 & 2 \end{vmatrix} \vec{k} = \\ &= -112\vec{i} + 12\vec{j} + 26\vec{k}. \end{aligned}$$

А теперь найдём половину длины полученного векторного произведения:

$$S_{\Delta EFG} = \frac{1}{2} |\overrightarrow{EF} \times \overrightarrow{EG}| = \frac{1}{2} \sqrt{(-112)^2 + 12^2 + 26^2} = \sqrt{13364} \approx 115,6028.$$

Следовательно, площадь треугольника EFG приблизительно равна 115,6028.

6.6. Смешанное произведение векторов

6.6.1. Определение и свойства смешанного произведения

Возьмём три произвольных ненулевых вектора $\vec{a}$, $\vec{b}$ и $\vec{c}$. Определим тернарную операцию умножения этих векторов следующим образом: векторное произведение $\vec{a} \times \vec{b}$ скалярно умножим на вектор $\vec{c}$. Так как результат векторного произведения, являющийся вектором, второй раз мы умножаем скалярно, то в итоге получим числовое значение. Таким образом составленное произведение трех векторов называют *смешанным* или реже *векторно-скалярным*.

Геометрически смешанное произведение можно интерпретировать, как объем параллелепипеда, построенного на трех некопланарных векторах $\vec{a}$, $\vec{b}$ и $\vec{c}$, образующих правую тройку (рис. 6.12).

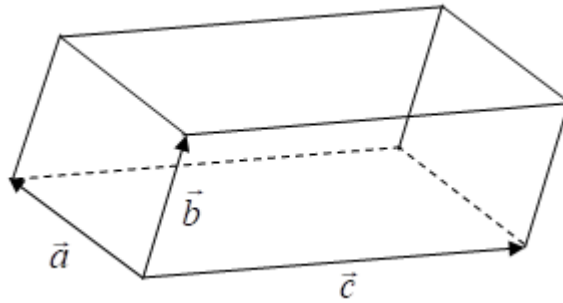


Рис. 6.12. Геометрическое представление смешанного произведения.

Ввиду антикоммутативности векторного произведения для векторов, образующих левую тройку, смешанное произведение будет иметь отрицательное значение.

Пример. Смешанное произведение ортов осей координат равно нулевому единице:

$$(\vec{i} \times \vec{j}) \cdot \vec{k} = 1.$$

Рассмотрим основные свойства смешанного произведения.

Свойства смешанного произведения

1. Для смешанного произведения не важен порядок векторного и скалярного произведений:

$$(\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{c} = \vec{a} \cdot (\vec{b} \times \vec{c}).$$

Важно, что сначала выполняется векторное произведение, а потом скалярное. Учитывая это свойство, можно вообще не указывать знаки векторного и скалярного произведений:

$$(\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{c} = \vec{a} \vec{b} \vec{c}.$$

2. При циклической перестановке значение смешанного произведения не изменится:

$$\vec{a} \vec{b} \vec{c} = \vec{c} \vec{a} \vec{b} = \vec{b} \vec{c} \vec{a}.$$

3. При перемене мест двумя любыми векторами значение смешанного произведения меняет знак:

$$\vec{a}\vec{b}\vec{c} = -\vec{b}\vec{a}\vec{c} = \vec{b}\vec{c}\vec{a} = -\vec{c}\vec{b}\vec{a} = \vec{c}\vec{a}\vec{b}.$$

4. Смешанное произведение трех ненулевых векторов $\vec{a}$, $\vec{b}$ и $\vec{c}$ равно нулю тогда и только тогда, когда векторы компланарны.

6.6.2. Смешанное произведение в координатах

Возьмем три произвольных ненулевых вектора $\vec{a}(a_x; a_y; a_z)$, $\vec{b}(b_x; b_y; b_z)$ и $\vec{c}(c_x; c_y; c_z)$. Представим эти векторы в виде суммы произведений их координат на соответствующие орты:

$$\vec{a} = a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k}; \quad \vec{b} = b_x \vec{i} + b_y \vec{j} + b_z \vec{k}; \quad \vec{c} = c_x \vec{i} + c_y \vec{j} + c_z \vec{k}.$$

Найдем смешанное произведение $\vec{a}\vec{b}\vec{c}$, представив векторное произведение $\vec{a} \times \vec{b}$ в виде определителя третьего порядка:

$$(\vec{a} \times \vec{b}) \cdot \vec{c} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix} \cdot (c_x \vec{i} + c_y \vec{j} + c_z \vec{k}) =$$

Разложим определитель по первой строке:

$$= \left(\begin{vmatrix} a_y & a_z \\ b_y & b_z \end{vmatrix} \vec{i} - \begin{vmatrix} a_x & a_z \\ b_x & b_z \end{vmatrix} \vec{j} + \begin{vmatrix} a_x & a_y \\ b_x & b_y \end{vmatrix} \vec{k} \right) \cdot (c_x \vec{i} + c_y \vec{j} + c_z \vec{k}) =$$

Теперь выполним скалярное произведение векторов в координатной форме:

$$= \begin{vmatrix} a_y & a_z \\ b_y & b_z \end{vmatrix} c_x - \begin{vmatrix} a_x & a_z \\ b_x & b_z \end{vmatrix} c_y + \begin{vmatrix} a_x & a_y \\ b_x & b_y \end{vmatrix} c_z.$$

Снова воспользуемся теоремой Лапласа и свернем полученное выражение в определитель третьего порядка. Окончательно получим:

$$\vec{a}\vec{b}\vec{c} = \begin{vmatrix} a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \\ c_x & c_y & c_z \end{vmatrix}. \quad (6.13)$$

Таким образом, смешанное произведение произвольных векторов $\vec{a}$, $\vec{b}$ и $\vec{c}$ равно определителю, составленному из координат указанных векторов.

Пример. Найдем смешанное произведение трех векторов $\vec{a}(1; -2; 3)$, $\vec{b}(4; 0; 6)$ и $\vec{c}(0; 10; 7)$.

$$\begin{aligned}\vec{a}\vec{b}\vec{c} &= \begin{vmatrix} a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \\ c_x & c_y & c_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & -2 & 3 \\ 4 & 0 & 6 \\ 0 & 10 & 7 \end{vmatrix} = -4 \begin{vmatrix} -2 & 3 \\ 10 & 7 \end{vmatrix} + 0 \begin{vmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 7 \end{vmatrix} - 6 \begin{vmatrix} 1 & -2 \\ 0 & 10 \end{vmatrix} = \\ &= -4 \cdot (-44) + 0 - 6 \cdot 10 = 116.\end{aligned}$$

Пример. Найдем смешанное произведение трех векторов $\vec{c}(2; -1; 8)$, $\vec{d}(3; -5; 0)$ и $\vec{e}(8; -11; 8)$.

$$\vec{c}\vec{d}\vec{e} = \begin{vmatrix} 2 & -1 & 8 \\ 3 & -5 & 0 \\ 8 & -11 & 8 \end{vmatrix} = 2 \begin{vmatrix} -5 & 0 \\ -11 & 8 \end{vmatrix} + 1 \begin{vmatrix} 3 & 0 \\ 8 & 8 \end{vmatrix} + 8 \begin{vmatrix} 3 & -5 \\ 8 & -11 \end{vmatrix} = -80 + 24 + 56 = 0.$$

6.6.3. Некоторые приложения смешанного произведения

Определение взаимной ориентации векторов

Как мы уже отмечали, смешанное произведение векторов, образующих правую тройку, является положительным числом, а для векторов, образующих левую тройку, – отрицательное. Использование знака смешанного произведения позволяет определять взаимную ориентацию векторов в пространстве.

Пример. Определим взаимную ориентацию трех векторов $\vec{k}(5; -1; 8)$, $\vec{l}(3; 2; 1)$ и $\vec{m}(-7; 0; 12)$, взятых в указанном порядке.

Для определения ориентации векторов, найдем их смешанное произведение:

$$\vec{k}\vec{l}\vec{m} = \begin{vmatrix} 5 & -1 & 8 \\ 3 & 2 & 1 \\ -7 & 0 & 12 \end{vmatrix} = 5 \begin{vmatrix} 2 & 1 \\ 0 & 12 \end{vmatrix} + 1 \begin{vmatrix} 3 & 1 \\ -7 & 12 \end{vmatrix} + 8 \begin{vmatrix} 3 & 2 \\ -7 & 0 \end{vmatrix} = 20 + 43 + 112 = 275.$$

Так как смешанное произведение положительно, векторы $\vec{k}$, $\vec{l}$ и $\vec{m}$ образуют правую тройку.

Пример. Три вектора $\vec{r}(6; 0; 4)$, $\vec{s}(-5; -2; 0)$ и $\vec{t}(0; 0; 4)$, взятые в указанном порядке, образуют левую тройку, так как их смешанное произведение имеет отрицательный знак.

$$\vec{r} \vec{s} \vec{t} = \begin{vmatrix} 6 & 0 & 4 \\ -5 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{vmatrix} = 6 \begin{vmatrix} -2 & 0 \\ 0 & 4 \end{vmatrix} - 0 \begin{vmatrix} -5 & 0 \\ 0 & 2 \end{vmatrix} + 4 \begin{vmatrix} -5 & -2 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} = -48 + 0 + 0 = -48.$$

Установление компланарности векторов

Возьмем три ненулевых вектора $\vec{a}(a_x; a_y; a_z)$, $\vec{b}(b_x; b_y; b_z)$ и $\vec{c}(c_x; c_y; c_z)$. Указанные векторы будут компланарны, тогда и только тогда, если их смешанное произведение будет равно нулю. На этом утверждении и основано установлении компланарности векторов.

Пример. Определим, являются ли компланарными векторы $\vec{f}(0; 3; 0)$, $\vec{g}(5; 4; 0)$ и $\vec{h}(0; 0; 6)$.

Для определения компланарности найдем смешанное произведение векторов:

$$\vec{f} \vec{g} \vec{h} = \begin{vmatrix} 0 & 3 & 0 \\ 5 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 6 \end{vmatrix} = 0 \begin{vmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 4 \end{vmatrix} - 3 \begin{vmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 6 \end{vmatrix} + 0 \begin{vmatrix} 5 & 4 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} = 0 - 90 + 0 = -90.$$

Так как произведение не равно нулю, то векторы $\vec{f}$, $\vec{g}$ и $\vec{h}$ являются компланарными.

Пример. Векторы $\vec{d}(2; 1; 1)$, $\vec{e}(3; 2; 2)$ и $\vec{f}(1; 1; 1)$ будут компланарными, поскольку их смешанное произведение равно нулю:

$$\vec{d} \vec{e} \vec{f} = \begin{vmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 3 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} = 2 \begin{vmatrix} 2 & 2 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} - 1 \begin{vmatrix} 3 & 2 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} + 1 \begin{vmatrix} 3 & 2 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = 0 - 1 + 1 = 0.$$

Вычисление объемов многогранников

Важным приложением смешанного произведения является вычисление объема различных многогранников. Достаточно просто вычисляется объем параллелепипеда, три любые грани которого совпадают с некомпланарными векторами (рис. 7.13).

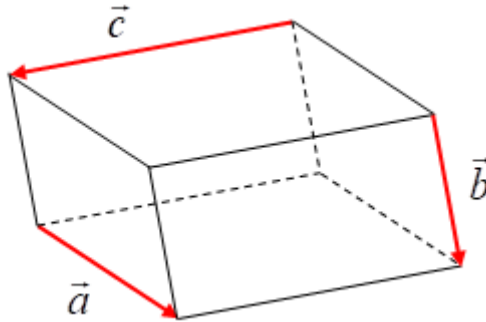


Рис. 6.13. Объем параллелепипеда.

Объем такого параллелепипеда будет численно равен абсолютному значению смешанного произведения векторов $\vec{a}$, $\vec{b}$ и $\vec{c}$:

$$V_{\text{пар}} = |\vec{a} \vec{b} \vec{c}|. \quad (6.14)$$

Пример. Определить объем параллелепипеда $AA_1BB_1CC_1DD_1$ (рис. 3.14), если известны координаты его вершин: $A(3;8;1)$, $B(5;13;1)$, $C(6;10;3)$, $C_1(6;12;3)$.

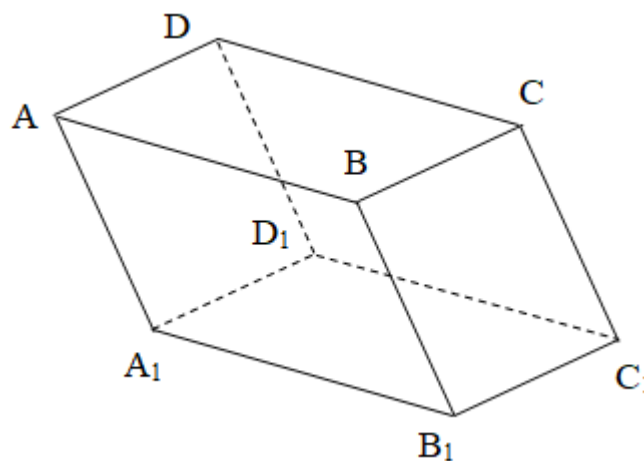


Рис. 6.14. Параллелепипед $AA_1BB_1CC_1DD_1$.

Для расчета объема параллелепипеда найдем смешанное произведение трех некопланарных векторов $\vec{a}(2; 5; 0)$, $\vec{b}(1; -3; 2)$ и $\vec{c}(0; 2; 0)$, совпадающих с ребрами параллелепипеда АВ, ВС и СС₁ соответственно.

$$\vec{a} \vec{b} \vec{c} = \begin{vmatrix} 2 & 5 & 0 \\ 1 & -3 & 2 \\ 0 & 2 & 0 \end{vmatrix} = -2 \begin{vmatrix} 2 & 0 \\ 1 & 2 \end{vmatrix} = -8.$$

Следовательно, объем параллелепипеда АА₁ВВ₁СС₁DD₁ будет равен 8.

Объем треугольной пирамиды, построенной на трех некопланарных векторах (рис. 3.15), можно легко получить, учитывая, что пирамида является шестой частью параллелограмма:

$$V_{\Delta} = \frac{|\vec{a} \vec{b} \vec{c}|}{6}. \quad (6.15)$$

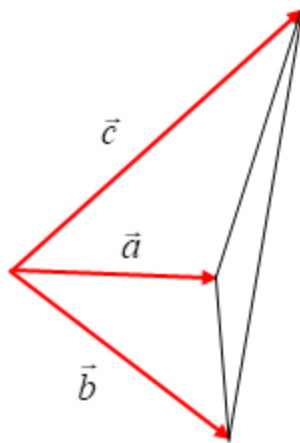


Рис. 6.15. Треугольная призма.

Пример. Вершинами пирамиды служат точки: $O(8; -4; 0)$, $P(-4; -5; -7)$, $R(0; -1; 7)$, $Q(1; 5; 7)$. Найдем объем этой пирамиды.

Для расчета объема построим некопланарные векторы: $\vec{OP}(-12; -1; -7)$, $\vec{OR}(-8; 3; 7)$ и $\vec{OQ}(-7; 9; 7)$. Затем найдем смешанное произведение этих векторов:

$$V_{nup} = \begin{vmatrix} -12 & -1 & -7 \\ -8 & 3 & 7 \\ -7 & 9 & 7 \end{vmatrix} = -12 \begin{vmatrix} 3 & 7 \\ 9 & 7 \end{vmatrix} + 1 \begin{vmatrix} -8 & 7 \\ -7 & 7 \end{vmatrix} - 7 \begin{vmatrix} -8 & 3 \\ -7 & 9 \end{vmatrix} = 854.$$

Разделив 854 на 6, получим искомый объем:

$$V_{nup} = \frac{854}{6} \approx 142,33.$$

Вопросы для самоконтроля

1. Какие вектора называются равными, противоположными, коллинеарными, компланарными? Приведите примеры.
2. Если два вектора являются противоположными, то как соотносятся их координаты?
3. Дайте понятие орты вектора. Какую роль играют орты в методе координат?
4. Каким образом осуществляется разложение вектора по ортам координатных осей?
5. Опишите линейные операции над векторами. Каким образом данные операции выполняются над векторами, координаты которых известны?
6. Какие вы знаете свойства линейных операций над векторами?
7. Как определить модуль вектора, координаты которого известны?
8. Опишите метод нахождения направляющих косинусов вектора. Для чего направляющие косинусы могут использоваться?
9. Как определить коллинеарность двух векторов с известными координатами?
10. Каким образом можно определить скалярное произведение векторов.
11. Какие свойства скалярного произведения векторов вы знаете?
12. Как можно выразить скалярное произведение векторов, зная координаты этих векторов?
13. Перечислите приложения скалярного произведения векторов. Каким образом находится угол между векторами?
14. Дайте определение векторного произведения векторов. Какие свойства векторного произведения вы знаете?

15. Как можно выразить векторное произведение через координаты перемножаемых векторов?

16. Перечислите основные приложения векторного произведения векторов. Как можно найти площади параллелограмма и треугольника, построенного на векторах?

17. Дайте определение смешанного произведения векторов. Укажите свойства смешанного произведения.

18. Каким образом можно перемножить смешанно три вектора, зная координаты векторов?

19. Как можно определить взаимную ориентацию трех векторов? В каком случае они будут компланарны?

20. Каким образом можно найти объемы параллелепипедов и треугольных пирамид, зная координаты вершин этих многогранников?

Глава 7. Основы аналитической геометрии

Аналитическая геометрия – это раздел математики, в котором геометрические фигуры и их свойства исследуются средствами алгебры. В основе этого метода лежит так называемый метод координат, впервые применённый Рене Декартом в 1637 году. Каждому геометрическому соотношению этот метод ставит в соответствие некоторое уравнение, связывающее координаты фигуры или тела.

Такой метод «алгебраизации» геометрических свойств доказал свою универсальность и плодотворно применяется во многих науках и сферах человеческой жизни: физике, химии, биологии, экономике, технике, машиностроении, строительстве. В математике аналитическая геометрия является также основой для других разделов геометрии, таких как дифференциальная геометрия, алгебраическая геометрия, комбинаторной геометрии, вычислительной геометрии.

В нашей главе мы изучим линии и поверхности первого порядка в двухмерном и трехмерном пространстве. Здесь будут различные формы записи плоскостей: общее уравнение плоскости, уравнение плоскости, проходящей через две точки, уравнение плоскости в отрезках, нормальное уравнение плоскости, определяются угол между двумя плоскостями, взаимное расположение плоскостей. Также в главе описаны общие уравнения прямой на плоскости и в пространстве, канонические уравнения прямой, уравнения прямой, проходящей через две точки, параметрические уравнения прямой, методы преобразования уравнений, взаимное расположение прямых и плоскостей, определение расстояний между точками, плоскостями и прямыми.

7.1. Метод координат на плоскости

7.1.1. Декартовы прямоугольные координаты

Совокупность координатных осей Ox , Oy и выбранной единицы масштаба называют *декартовой прямоугольной системой координат на плоскости*.

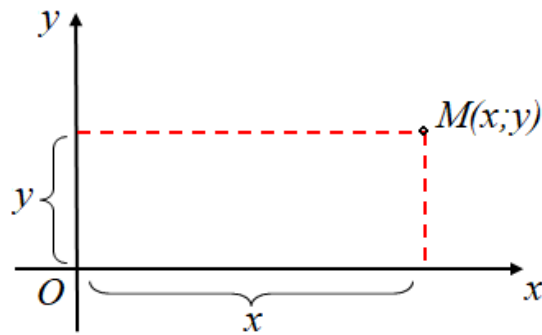


Рис. 7.1. Декартовы прямоугольные координаты.

Абсциссу x и ординату y называют *декартовыми прямоугольными координатами точки M* . Обозначение $M(x; y)$ означает: точка M с абсциссой, равной x , и ординатой, равной y .

Каждой точке плоскости соответствует одна пара действительных чисел x и y . Каждой паре действительных чисел x и y соответствует одна точка плоскости.

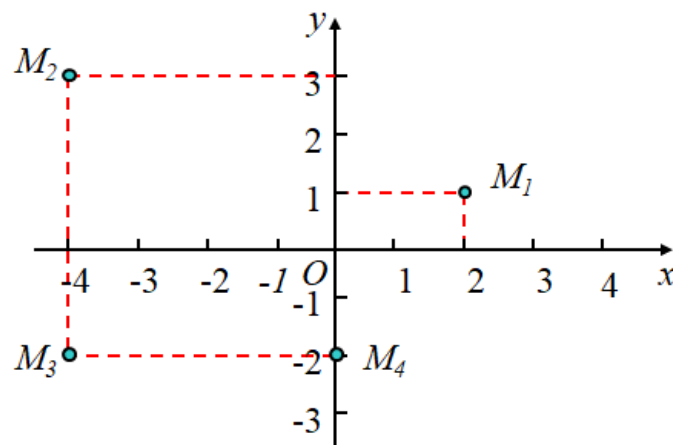


Рис. 7.2. Нанесение точек на координатную плоскость.

На рис. 7.2 показано нанесение точек $M_1(2; 1)$, $M_2(-4; 3)$, $M_3(-4; -2)$ и $M_4(0; -2)$ на координатную плоскость.

7.1.2. Полярные координаты

Также определять координаты точек можно в полярных координатах. Для этого необходимо задать полюс O и выбрать направление полярной оси p . Расстояние между точкой M и полюсом O (рис. 7.3) называется полярным радиусом, а угол между полярной осью p и вектором $\overline{OM}$ называется полярным углом.

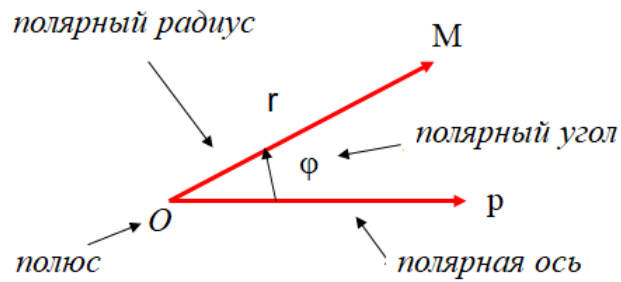


Рис. 7.3. Полярные координаты.

Координатами точки M будут считаться полярный радиус и полярный угол. На рисунке 7.4 показана точка M в декартовых и полярных координатах.

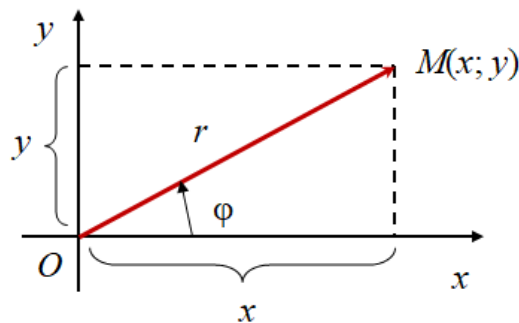


Рис. 7.4. Соотношения между декартовыми и полярными координатами.

Для точки M с декартовыми координатами $(x; y)$ или *полярными координатами* $(r; \varphi)$ справедливы следующие соотношения.

Для выражения прямоугольных координат через полярные координаты целесообразно использовать формулы

$$x = r \cdot \cos \varphi \qquad y = r \cdot \sin \varphi. \qquad (7.1)$$

Выражение полярных координат через прямоугольные координаты можно определить следующим образом:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \qquad \operatorname{tg} \varphi = \frac{y}{x}. \qquad (7.2)$$

Пример. Даны прямоугольные координаты точки A : $x = 1$, $y = 1$. Найдём её полярные координаты.

По формуле $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ найдём полярный радиус точки A :

$$r = \sqrt{1^2 + 1^2} = \sqrt{2}.$$

Вычислим тангенс полярного угла:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{1} = 1.$$

Из двух значений $\varphi = \frac{\pi}{4}$ и $\varphi = -\frac{3\pi}{4}$ выбираем $\varphi = \frac{\pi}{4}$, так как точка A находится в первом квадранте.

Таким образом, полярными координатами точки A будут

$$r = \sqrt{2}, \quad \varphi = \frac{\pi}{4}.$$

Пример. Полярные координаты точки B :

$$r = -2, \quad \varphi = \frac{\pi}{2}.$$

Тогда прямоугольные координаты этой точки будут

$$x = 2 \cos \frac{\pi}{2} = 0, \quad y = 2 \sin \frac{\pi}{2} = 2.$$

7.1.3. Основные задачи, решаемые методом координат

Задача о расстоянии между двумя точками

Одной из основных задач аналитической геометрии является нахождение расстояний между точками. Найдем расстояние d между двумя данными точками $M_1(x_1; y_1)$ и $M_2(x_2; y_2)$ (рис. 7.5).

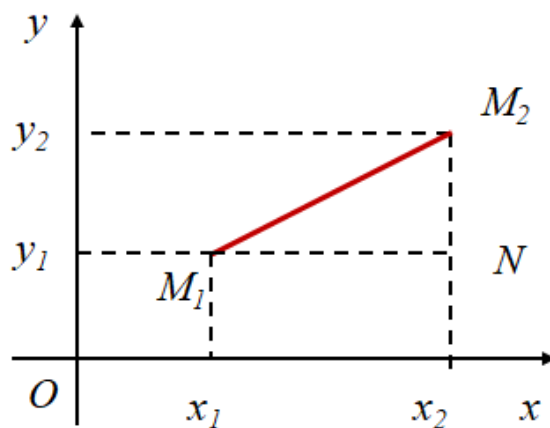


Рис. 7.5. Расстояние между точками M_1 и M_2 .

По теореме Пифагора:

$$d = M_1M_2 = \sqrt{M_1N^2 + M_2N^2}.$$

Так как расстояния M_1N и M_2N равны $M_1N = x_2 - x_1$ и $M_1N = y_2 - y_1$, следовательно,

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}.$$

Пример. Найдем расстояние между точками $A(-1; -2)$ и $B(-4; 2)$.

$$AB = \sqrt{(-4+1)^2 + (2+2)^2} = 5.$$

Задача о делении отрезка в данном отношении

Пусть даны точки $M_1(x_1; y_1)$ и $M_2(x_2, y_2)$. Найдем координаты точки $M(x; y)$, лежащую на отрезке $M_1 M_2$ и делящую его в данном отношении.

Опустим из точек M_1 , M и M_2 перпендикуляры на ось Ox (рис. 8.6).

Из подобия трапеций M_1MAA_1 и MM_2A_2A следует отношение

$$\frac{M_1M}{MM_2} = \frac{A_1A}{AA_2} = \lambda.$$

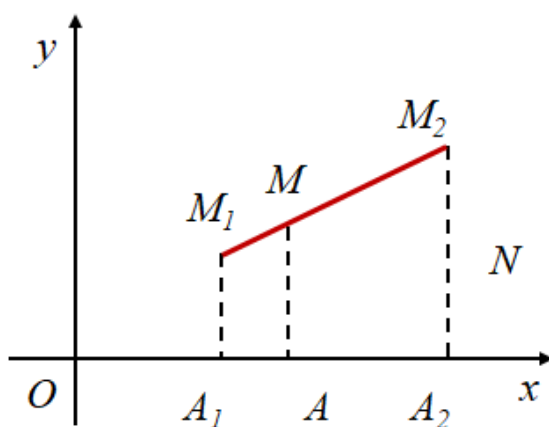


Рис. 7.6. Деление отрезка в данном отношении.

Так как $A_1A = x - x_1$, $AA_2 = x_2 - x$, то

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x} = \lambda.$$

Выражая координату x из данного соотношения, получим:

$$x = \frac{x_1 + \lambda x_2}{1 + \lambda}.$$

Похожие построения можно сделать и для координаты y .

Таким образом, координаты точки M можно найти по формулам:

$$x = \frac{x_1 + \lambda x_2}{1 + \lambda}; \quad y = \frac{y_1 + \lambda y_2}{1 + \lambda}. \quad (7.3)$$

При делении отрезка $M_1 M_2$ пополам, то есть если $\lambda = 1$, т.е., получаем:

$$x = \frac{x_1 + x_2}{2}; \quad y = \frac{y_1 + y_2}{2}. \quad (7.4)$$

Пример. Вычислим координаты точки $M(x, y)$, делящей отрезок $M_1 M_2$ между точками $M_1(1; 1)$ и $M_2(4; 7)$ в отношении 2:1.

Согласно ранее выведенным формулам,

$$x = \frac{x_1 + \lambda x_2}{1 + \lambda} = \frac{1 + 2 \cdot 4}{3} = 3; \quad y = \frac{y_1 + \lambda y_2}{1 + \lambda} = \frac{1 + 2 \cdot 7}{3} = 5.$$

Следовательно, точку M можно записать в виде $M(3, 5)$.

7.2. Уравнения прямой

Уравнением линии на плоскости в прямоугольной системе координат называется уравнение $f(x, y) = 0$ с переменными x и y , которому удовлетворяют координаты каждой точки данной линии и не удовлетворяют координаты любой точки плоскости, не лежащей на этой линии.

Здесь f – функция двух переменных, сопоставляющая каждой паре x, y число $f(x, y)$. Переменные x и y уравнения линии называются *текущими координатами*.

Линия может определяться на плоскости не только уравнением, содержащим декартовы координаты, но и уравнением в полярных координатах.

7.2.1. Уравнение прямой с угловым коэффициентом

Пусть $M(x; y)$ – произвольная точка прямой l с текущими координатами x и y , $x \neq 0$ (рис. 7.7).

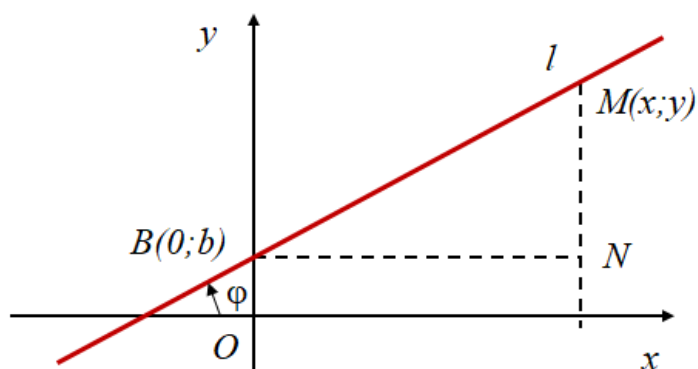


Рис. 7.7. Уравнение прямой с угловым коэффициентом.

Для произвольной точки $M(x, y)$, лежащей на прямой l , из прямоугольного треугольника BNM выразим ее координату y :

$$y = MN + b.$$

Выражая расстояние MN , как $\operatorname{tg} \varphi \cdot BN$, получим

$$y = \operatorname{tg} \varphi \cdot BN + b.$$

Обозначив $k = \operatorname{tg} \varphi$ и учитывая, что $x = BN$ окончательно получим уравнение прямой с угловым коэффициентом

$$y = kx + b. \quad (7.5)$$

Пример. Если $\varphi = \frac{\pi}{4}$, а $b = -7$, то $k = \operatorname{tg} \frac{\pi}{4} = 1$, и, следовательно, уравнение прямой с угловым коэффициентом будет иметь вид:

$$y = x - 7.$$

Если в уравнении $k = 0$, то имеем уравнение прямой $y = b$, параллельной оси Ox и проходящей через точку $B(0; b)$. При $b = 0$ уравнение координатной оси Ox : $y = 0$.

Пример. Уравнение $y = 5$ описывает прямую параллельную оси Ox , проходящую через точку $(0; 5)$.

По аналогии с уравнением $y = b$ уравнение $x = a$ - уравнение прямой, параллельной оси Oy и проходящей через точку $(a; 0)$. При $a = 0$, уравнение координатной оси Oy : $x = 0$.

Пример. Уравнение $x = -3$ описывает прямую параллельную оси Oy , проходящую через точку $(-3; 0)$.

7.2.2. Общее уравнение прямой

Уравнением с угловым коэффициентом может быть задана любая прямая на плоскости, не параллельная оси ординат.

Любая прямая на плоскости может быть задана общим уравнением:

$$Ax + By + C = 0. \quad (7.6)$$

Теорема. Каждая прямая на плоскости с прямоугольной декартовой системой координат определяется уравнением первой степени, и обратно, каждое уравнение первой степени определяет некоторую прямую на плоскости.

Пример. Найти общее уравнение прямой $y = 5x - 7$.

Перенесем элементы правой части уравнения в левую и поменяем знаки, получим общее уравнение прямой:

$$5x - y - 7 = 0.$$

7.2.3. Уравнение прямой с данным угловым коэффициентом, проходящей через данную точку

Выведем уравнение прямой, проходящей через точку $M(x_0; y_0)$, имеющей угловой коэффициент k .

Уравнение этой прямой имеет вид

$$y = kx + b.$$

Так как прямая проходит через точку M , то

$$y_0 = kx_0 + b.$$

Вычитая из первого уравнения второе, получим

$$y - y_0 = k(x - x_0). \quad (7.7)$$

Данное уравнение называется *уравнением прямой с данным угловым коэффициентом, проходящей через данную точку*.

Пример. Найти общее уравнение прямой, проходящей через точку $M(-1; 8)$, с угловым коэффициентом $k = 1$.

Сначала запишем наше уравнение как уравнение прямой с угловым коэффициентом $k = 1$, проходящей через точку $M(-1; 8)$:

$$y - 8 = 1(x + 1).$$

Раскроем скобки и перенесем правую часть уравнения в левую, приведем подобные слагаемые и поменяем знаки коэффициентов уравнения. В итоге получим общее уравнение прямой:

$$x - y + 9 = 0.$$

7.2.4. Уравнение прямой, проходящей через две точки

Выведем уравнение прямой, проходящей через точки $M_1(x_1; y_1)$ и $M_2(x_2; y_2)$.

Уравнение прямой, проходящей через точку $M_1(x_1; y_1)$ имеет вид:

$$y - y_1 = k(x - x_1).$$

Уравнение прямой, проходящей через точку $M_2(x_2; y_2)$ имеет вид:

$$y - y_2 = k(x - x_2).$$

Угловой коэффициент k должен быть выбран так, чтобы удовлетворять обоим уравнениям. Выразим коэффициент k из уравнений прямых:

$$k = \frac{y - y_1}{x - x_1} \qquad k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

Приравняем правые части уравнений:

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}. \quad (7.8)$$

Полученное уравнение называется уравнением прямой, проходящей через две точки.

Пример. Найдем общее уравнение прямой, проходящей через точки $M_1(1; 2)$ и $M_2(-2; -3)$.

Впишем координаты точек $M_1(1; 2)$ и $M_2(-2; -3)$ в уравнение прямой, проходящей через две точки:

$$\frac{y - 2}{3 - 2} = \frac{x - 1}{-2 - 1}.$$

Умножим полученное уравнение на 3:

$$3(y - 2) = -x + 1$$

Затем перенесем выражение из правой части уравнения в левую, раскроем скобки и приведем подобные слагаемые:

$$x - 3y - 9 = 0 /$$

Таким образом, мы получили общее уравнение прямой, проходящей через точки $M_1(1; 2)$ и $M_2(-2; -3)$.

7.2.5. Уравнение прямой в отрезках

Предположим, что общее уравнение прямой не содержит нулевых коэффициентов ($A \neq 0$, $B \neq 0$ и $C \neq 0$)

$$Ax + By + C = 0$$

Перенесем свободный член в правую часть равенства

$$Ax + By = -C$$

и разделим все коэффициенты уравнения на $-C$:

$$\frac{A}{-C}x + \frac{B}{-C}y = 1.$$

Перенесем числители коэффициентов при x и y в знаменатель и запишем наше выражение в следующем виде:

$$\frac{x}{-\frac{C}{A}} + \frac{y}{-\frac{C}{B}} = 1.$$

Отсюда, вводя обозначения $-\frac{C}{A} = a$, $-\frac{C}{B} = b$, приходим к уравнению:

$$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} = 1. \quad (7.9)$$

Полученное уравнение называется *уравнением прямой в отрезках*.

Геометрический смысл коэффициентов уравнения прямой в отрезках заключается в том, что прямая, заданная уравнением $\frac{x}{a} + \frac{y}{b} = 1$ отсекает на осях координат отрезки a и b (рис.8.8).

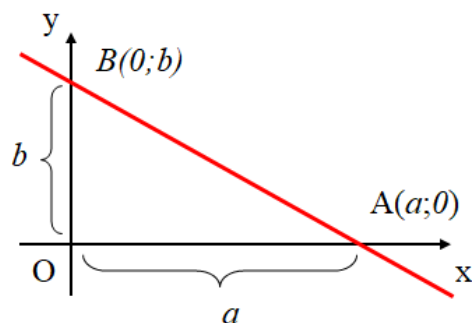


Рис. 7.8. Геометрический смысл уравнения прямой в отрезках.

Пример. Записать уравнение прямой $2x + 5y - 10 = 0$ в отрезках и построить эту прямую.

Преобразуем уравнение:

$$2x + 5y - 10 = 0$$

$$2x + 5y = 10$$

$$\frac{x}{5} + \frac{y}{2} = 1$$

Таким образом, мы получили уравнение прямой в отрезках с коэффициентами $a = 5, b = 2$. Следовательно, ось Ох наша прямая будет пересекать в точке $A(5; 0)$, а ось Оу в точке $B(0; 2)$. Построим прямую (рис. 7.9).



Рис. 7.9. Прямая $\frac{x}{5} + \frac{y}{2} = 1$.

7.3. Взаимное расположение т прямых

7.3.1. Угол между двумя прямыми

Рассмотрим на плоскости две прямые, заданные уравнениями с угловым коэффициентом $y = k_1x + b_1$ и $y = k_2x + b_2$ (рис. 7.10).

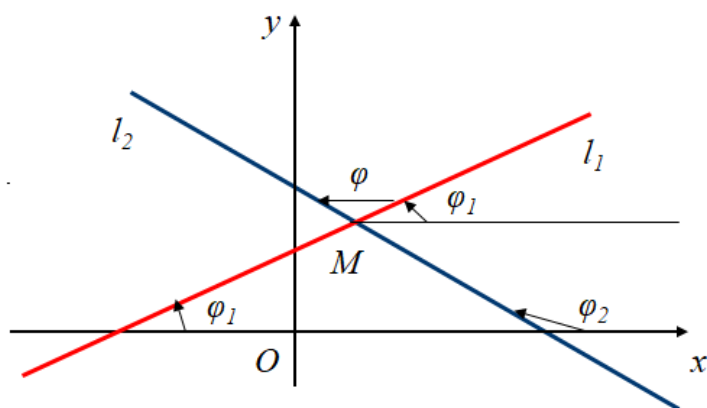


Рис. 7.10. Угол между прямыми.

Углом между прямыми l_1 и l_2 называется наименьший угол, на который надо повернуть первую прямую l_1 вокруг точки пересечения M против часовой стрелки до совпадения ее со второй прямой l_2 ($0 < \varphi < \pi$).

Найдем тангенс угла между прямыми. Для этого определим тангенс разности $\varphi_2 - \varphi_1$ и преобразуем его:

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg}(\varphi_2 - \varphi_1) = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2 - \operatorname{tg} \varphi_1}{1 + \operatorname{tg} \varphi_2 \cdot \operatorname{tg} \varphi_1}.$$

Так как $\operatorname{tg} \varphi_1$ и $\operatorname{tg} \varphi_2$ — это коэффициенты наших прямых k_1 и k_2 , то сделав соответствующие замены, получим:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{k_2 - k_1}{1 + k_1 \cdot k_2}. \quad (8.10)$$

Если прямые l_1 и l_2 параллельны, то $\varphi_1 = \varphi_2$ и, следовательно, $k_1 = k_2$. Значит, *параллельные прямые имеют равные угловые коэффициенты.*

Пусть прямые l_1 и l_2 перпендикулярны, следовательно, угол между ними будет равен $\varphi = \frac{\pi}{2}$. Тогда $\operatorname{tg} \varphi_2 = \operatorname{tg}\left(\varphi_1 + \frac{\pi}{2}\right) = -\operatorname{ctg} \varphi_1 = -\frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_1}$, откуда $\varphi_2 = \varphi_1 + \frac{\pi}{2}$

или $k_2 = -\frac{1}{k_1}$.

Значит угловые коэффициенты взаимно перпендикулярных прямых обратны по абсолютной величине и противоположны по знаку.

Пример. Найдем две прямые, проходящие через начало координат, одна из которых параллельна, а другая перпендикулярна к прямой $y = 2x - 3$.

Так как искомые прямые проходят через точку $(0, 0)$, то их уравнения имеют вид $y = k_1x$ и $y = k_2x$. Для данной прямой $k = 2$, и отсюда, на основании условий параллельности и перпендикулярности прямых, получаем

$$k_1 = 2 \text{ и } k_2 = -\frac{1}{2}.$$

Поэтому прямые можно записать уравнениями

$$y = 2x \text{ и } y = \frac{1}{2}x.$$

7.3.2. Взаимное расположение двух прямых

Рассмотрим на плоскости две прямые l_1 и l_2 , заданные общими уравнениями:

$$A_1x + B_1y + C_1 = 0 \text{ и } A_2x + B_2y + C_2 = 0.$$

Тогда,

1) если $A_1B_2 - A_2B_1 \neq 0$, то прямые *пересекаются* (т.е. имеют одну общую точку);

2) если $\frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2}$, то прямые *параллельны*, причем, если $\frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2} = \frac{C_1}{C_2}$, то прямые *совпадают*, а если $\frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2} \neq \frac{C_1}{C_2}$, то прямые *не совпадают*;

3) в случае $A_1A_2 + B_1B_2 = 0$, прямые *перпендикулярны*.

Пример. Прямые $3x + 4y - 1 = 0$ и $2x + 3y + 2 = 0$ пересекаются, так как $3 \cdot 3 - 2 \cdot 4 \neq 0$.

Пример. Прямые $2x - y + 2 = 0$ и $4x - 2y - 1 = 0$ параллельны, так как $(-2) \cdot (-1) - (-1) \cdot 4 = 0$.

Пример. Прямые $x - y + 2 = 0$ и $3x - 3y + 6 = 0$ совпадают, поскольку выполняется условие $\frac{1}{3} = \frac{-1}{-3} = \frac{2}{6}$.

Пример. Прямые $3x - 4y + 8 = 0$ и $4x + 3y - 9 = 0$ взаимно перпендикулярны, так как выполнено условие $3 \cdot 4 + (-4) \cdot 3 = 0$.

7.4. Плоскости в пространстве

7.4.1. Общее уравнение плоскости

Возьмем точку $M_0(x_0; y_0; z_0)$, принадлежащую плоскости π и произвольный вектор $\vec{n}(A; B; C)$, ортогональный указанной плоскости (рис. 7.11). Как мы видим, эта пара – точка плоскости и ортогональный вектор полностью определяют плоскость π . Ортогональный к плоскости π вектор $\vec{n}$ будем называть *нормальным* вектором.

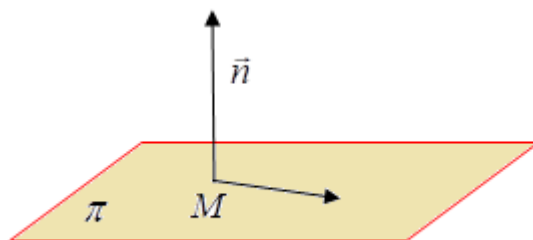


Рис. 7.11. Определение общего уравнения.

На плоскости π отметим также произвольную точку $M(x; y; z)$ и построим вектор $\overline{M_0M}$. Координаты вектора $\overline{M_0M}$ будут соответственно равны $x - x_0$, $y - y_0$, $z - z_0$.

Так как векторы $\vec{n}$ и $\overline{M_0M}$ ортогональны, то их скалярное произведение равно нулю:

$$\vec{n} \cdot \overline{M_0M} = 0.$$

Выразим скалярное произведение векторов $\vec{n}(A; B; C)$ и $\overline{M_0M}(x - x_0; y - y_0; z - z_0)$ в координатной форме, для этого возьмем сумму произведений соответствующих координат данных векторов:

$$A(x - x_0) + B(y - y_0) + C(z - z_0) = 0.$$

Раскроем скобки

$$Ax - Ax_0 + By - By_0 + Cz - Cz_0 = 0,$$

а затем сгруппируем слагаемые:

$$Ax + By + Cz - \underline{Ax_0 - By_0 - Cz_0} = 0.$$

Обозначив выражение $-Ax_0 - By_0 - Cz_0$ буквой D , получим общее уравнение плоскости:

$$Ax + By + Cz + D = 0. \quad (7.11)$$

Пример. Определим общее уравнение плоскости α , проходящей через точку $P(1; -3; 4)$, если ей ортогонален вектор $\vec{n}(6; 2; -1)$.

Возьмем произвольную точку $M(x; y; z)$. Найдем скалярное произведение $\vec{n} \cdot \overline{PM}$ и приравняем его к нулю:

$$6(x-1) + 2(y+3) - 1(z-4) = 0.$$

Раскрывая скобки и приводя подобные слагаемые получим общее уравнение плоскости α :

$$6x - 6 + 2y + 6 - z + 4 = 0$$

$$6x + 2y - z + 4 = 0.$$

Пример. Найдем общее уравнение плоскости β , проходящей через точку $Q(2; 1; 1)$, если ей параллельна плоскость $5x - z + 7 = 0$.

На плоскости β отметим произвольную точку $M(x; y; z)$ и построим вектор $\overline{QM}$. Решим уравнение $\vec{n} \cdot \overline{QM} = 0$ в координатной форме:

$$5(x-2) + 0(y-1) - 1(z-1) = 0$$

$$5x - 10 - z + 1 = 0$$

Таким образом, общее уравнение плоскости β будет иметь вид:

$$5x - z - 9 = 0.$$

Рассмотрим частные случаи построения плоскостей, перпендикулярных осям координат или, что тоже самое, параллельных плоскостям, образованным осями координат.

Пример. Определим общее уравнение плоскости γ , проходящей через точку $R(8; 2; 3)$, если она перпендикулярна оси Oy .

На плоскости γ отметим произвольную точку $M(x; y; z)$, а в качестве нормального можно использовать любой вектор, лежащий на оси Oy или на

любой прямой, параллельной этой оси. Возьмем, например, единичный вектор с координатами $(0;1;0)$, лежащий на оси Oy (рис. 7.12.а).

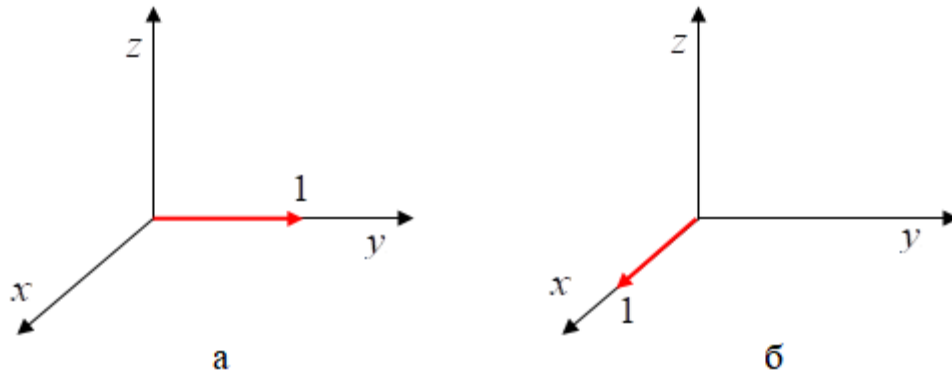


Рис. 7.12. Орты осей координат.

Решим уравнение $\vec{n} \cdot \overline{RM} = 0$:

$$0(x-8) + 1(y-2) + 0(z-3) = 0.$$

Раскроем скобки в левой части уравнения и приведем подобные слагаемые. В результате получим общее уравнение плоскости χ :

$$y - 2 = 0.$$

Пример. Найдем общее уравнение плоскости χ , проходящей через точку $S(-3;1;21)$, если ей параллельна плоскость yOz .

На плоскости χ отметим произвольную точку $M(x; y; z)$, а в качестве нормального можно использовать любой вектор, лежащий на оси Ox или на любой прямой, параллельной этой оси. Возьмем единичный вектор с координатами $(1;0;0)$, лежащий на оси Ox (рис. 7.12.б).

Решим уравнение $\vec{n} \cdot \overline{SM} = 0$:

$$1(x+3) + 0(y-1) + 0(z-21) = 0.$$

Решая уравнение, получим общее уравнение плоскости χ :

$$x + 3 = 0.$$

7.4.2. Уравнение плоскости, проходящей через три точки

Построим плоскость π , проходящую через три фиксированных точки: $M_1(x_1; y_1; z_1)$, $M_2(x_2; y_2; z_2)$, $M_3(x_3; y_3; z_3)$ (рис. 7.13).

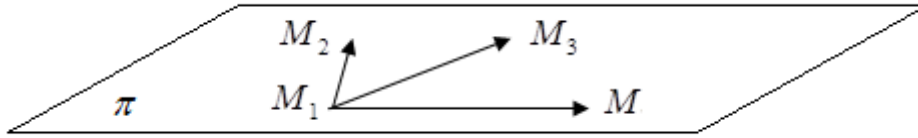


Рис. 7.13. Плоскость, проходящая через три точки.

Определим произвольную точку $M(x; y; z)$, принадлежащую плоскости π . Зная координаты точек M , M_1 , M_2 , M_3 , построим три вектора с началом в точке M_1 : $\overline{M_1M}$, $\overline{M_1M_2}$, $\overline{M_1M_3}$. В силу того, что все три вектора компланарны, то их смешанное произведение будет равно нулю. Запишем смешанное произведение векторов $\overline{M_1M}$, $\overline{M_1M_2}$, $\overline{M_1M_3}$ в координатной форме, получим:

$$\begin{vmatrix} x-x_1 & y-y_1 & z-z_1 \\ x_2-x_1 & y_2-y_1 & z_2-z_1 \\ x_3-x_1 & y_3-y_1 & z_3-z_1 \end{vmatrix} = 0. \quad (7.12)$$

Таким образом, мы получили уравнение плоскости, проходящей через три точки, в матричной форме.

Пример. Найдём общее уравнение плоскости, проходящей через точки $F_1(1; -1; 2)$, $F_2(5; 2; 6)$, $F_3(4; 0; 9)$.

Подставим в уравнение плоскости, проходящей через три точки, координаты точек F_1 , F_2 , F_3 :

$$\begin{vmatrix} x-1 & y+1 & z-2 \\ 5-1 & 2+1 & 6-2 \\ 4-1 & 0+1 & 9-2 \end{vmatrix} = 0.$$

Выполним действия в определителе:

$$\begin{vmatrix} x-1 & y+1 & z-2 \\ 4 & 3 & 4 \\ 3 & 1 & 7 \end{vmatrix} = 0.$$

Разложим определитель по теореме Лапласа:

$$(x-1)\begin{vmatrix} 3 & 4 \\ 1 & 7 \end{vmatrix} - (y+1)\begin{vmatrix} 4 & 4 \\ 3 & 7 \end{vmatrix} + (z-2)\begin{vmatrix} 4 & 3 \\ 3 & 1 \end{vmatrix} = 0.$$

Вычислим определители второго порядка и раскроем скобки:

$$(x-1) \cdot 17 - (y+1) \cdot 16 + (z-2) \cdot (-5) = 0$$

$$17x - 17 - 16y - 16 - 5z + 10 = 0.$$

Приведем подобные слагаемые и в итоге получим общее уравнение плоскости, проходящей через три точки F_1, F_2, F_3 :

$$17x - 16y - 5z - 23 = 0.$$

7.4.3. Уравнение плоскости в отрезках

Пусть плоскость π пересекает оси координат Ox, Oy, Oz в точках M_1, M_2, M_3 , откладывая на них значения a, b и c соответственно (рис. 7.14).

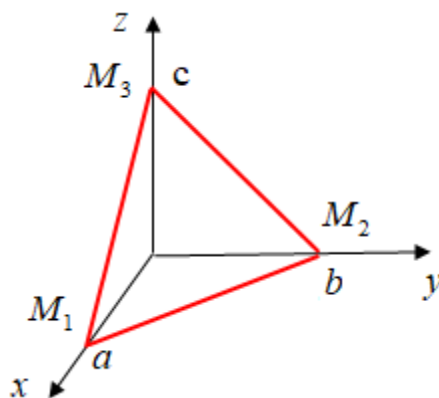


Рис. 7.14. Пересечение плоскости π с осями координат.

Точки $M_1(a;0;0)$, $M_2(0;b;0)$, $M_3(0;0;c)$ принадлежат плоскости π , следовательно, их координаты можно использовать в уравнении плоскости, проходящей через три точки:

$$\begin{vmatrix} x-a & y-0 & z-0 \\ 0-a & b-0 & 0-0 \\ 0-a & 0-0 & c-0 \end{vmatrix} = 0 \quad \text{или} \quad \begin{vmatrix} x-a & y & z \\ -a & b & 0 \\ -a & 0 & c \end{vmatrix} = 0.$$

Разложим определитель по первой строке:

$$(x-a) \begin{vmatrix} b & 0 \\ 0 & c \end{vmatrix} - y \begin{vmatrix} -a & 0 \\ -a & c \end{vmatrix} + z \begin{vmatrix} -a & b \\ -a & 0 \end{vmatrix} = 0.$$

Найдем определители второго порядка, раскроем скобки и приведем подобные слагаемые:

$$(x-a)bc + yac + zab = 0$$

$$xbc - abc + yac + zab = 0$$

$$xbc + yac + zab = abc.$$

Разделим обе части уравнения на произведение abc и окончательно получим:

$$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} + \frac{z}{c} = 1. \quad (7.13)$$

Полученное уравнение плоскости носит название *уравнения плоскости в отрезках*.

Пример. Определим общее уравнение плоскости, отсекающей на осях координат Ox , Oy , Oz значения 5, -4, 12.

Построим уравнение плоскости в отрезках. Мы уже знаем коэффициенты этого уравнения: $a = 5$, $b = -4$, $c = 12$. Учитывая это, получим:

$$\frac{x}{5} + \frac{y}{-4} + \frac{z}{12} = 1$$

Для того, чтобы избавиться от знаменателей, умножим обе части уравнения на наименьшее общее кратное чисел 5; 4; 12:

$$12x - 15y + 5z = 60.$$

Для получения общего уравнения плоскости осталось только перенести число 60 в левую часть уравнения:

$$12x - 15y + 5z - 60 = 0.$$

Пример. Найдем значения, отсекаемые на осях координат Ox , Oy , Oz плоскостью, заданной общим уравнением $2x - 6y + 4z - 5 = 0$.

Проведем преобразования уравнения, приводящие его к виду уравнения плоскости в отрезках. Перенесем в правую часть уравнения свободный член:

$$2x - 6y + 4z = 5.$$

Разделим обе части уравнения на 5, перенесем в знаменатели коэффициенты при неизвестных и получим уравнение в отрезках:

$$\frac{x}{\frac{5}{2}} + \frac{y}{-\frac{5}{6}} + \frac{z}{\frac{5}{4}} = 1.$$

Таким образом, значения, отсекаемые на осях координат Ox , Oy , Oz плоскостью $2x - 6y + 4z - 5 = 0$, равны $\frac{5}{2}$, $-\frac{5}{6}$ и $\frac{5}{4}$.

7.4.4. Нормальное уравнение плоскости

Частным случаем общего уравнения плоскости является нормальное уравнение. Его можно получить, используя в качестве нормального вектора единичный вектор.

Пусть $\vec{n}$ – единичный нормальный вектор плоскости π . Умножим общее уравнение плоскости $Ax + By + Cz + D = 0$ на число, обратное длине вектора $\vec{n}$. Данное число принято называть нормирующим множителем:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}. \quad (7.14)$$

Тогда координаты нового нормального вектора плоскости π будут представлены в виде направляющих косинусов вектора $\vec{n}$, а уравнение плоскости будет записано в виде:

$$x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma - p = 0, \quad (7.15)$$

где $\cos \alpha$, $\cos \beta$, $\cos \gamma$ – направляющие косинусы нормального вектора плоскости π , а p – расстояние от плоскости до начала координат.

Пример. Приведем уравнение плоскости $2x - 2y + z - 18 = 0$ к нормальному виду.

Рассчитаем нормирующий множитель:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{2^2 + 2^2 + 1^2}} = \frac{1}{\sqrt{9}} = \frac{1}{3}.$$

Для получения нормального уравнения плоскости умножим коэффициенты общего уравнения на нормирующий множитель:

$$\frac{2}{3}x - \frac{2}{3}y + \frac{1}{3}z - 6 = 0.$$

Направляющие косинусы нормального вектора будут равны:

$$\cos \alpha = \frac{2}{3}, \quad \cos \beta = -\frac{2}{3}, \quad \cos \gamma = \frac{1}{3}.$$

А расстояние от плоскости до начала координат будет равно шести.

7.5. Взаимное расположение плоскостей

7.5.1. Угол между двумя плоскостями

Пусть две плоскости π_1 и π_2 заданы общими уравнениями:

$$\pi_1 : A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0, \quad \pi_2 : A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0.$$

Для нахождения одного из двугранных углов φ или смежного угла $180^\circ - \varphi$ между плоскостями π_1 и π_2 достаточно рассмотреть угол между нормальными векторами данных плоскостей (рис. 7.15):

$$\cos(\vec{n}_1; \vec{n}_2) = \frac{\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2}{|\vec{n}_1| |\vec{n}_2|}.$$

Из уравнений плоскостей мы видим, что координаты векторов $\vec{n}_1$ и $\vec{n}_2$ соответственно равны A_1, B_1, C_1 и A_2, B_2, C_2 . Тогда косинус угла φ между плоскостями π_1 и π_2 будет равен

$$\cos \varphi = \pm \frac{A_1A_2 + B_1B_2 + C_1C_2}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2} \sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}}. \quad (7.16)$$

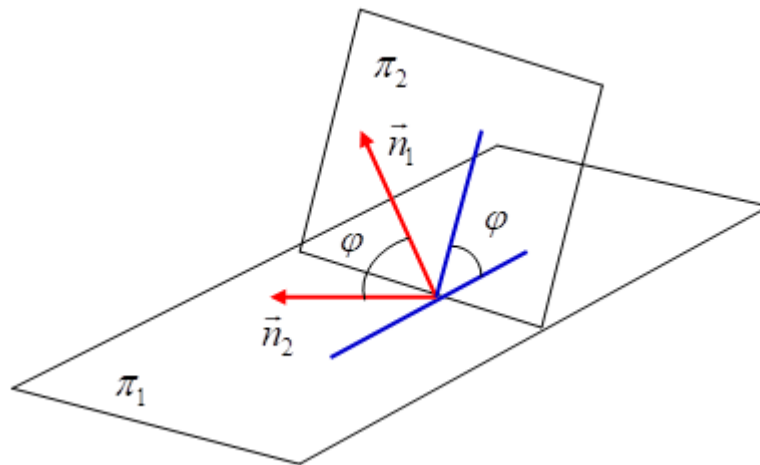


Рис. 7.15. Угол между плоскостями.

Со знаком плюс возьмем острый угол между плоскостями, а со знаком минус – смежный к нему тупой.

Пример. Определим угол между двумя плоскостями, заданными общими уравнениями:

$$x + 2y - 3z + 4 = 0 \text{ и } 2x + 3y + z - 15 = 0.$$

Найдем косинус строго угла между плоскостями:

$$\cos \varphi = \frac{A_1 A_2 + B_1 B_2 + C_1 C_2}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2} \sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}} = \frac{1 \cdot 2 + 2 \cdot 3 - 3 \cdot 1}{\sqrt{1 + 4 + 9} \sqrt{4 + 9 + 1}} = \frac{5}{14}.$$

Следовательно, величину угла между плоскостями можно определить, как

$$\varphi = \arccos\left(\frac{5}{14}\right) \approx 69^\circ.$$

Пример. Найдем угол между плоскостями

$$4x + 10y - 14z - 12 = 0 \text{ и } 6x + 15y - 21z + 18 = 0.$$

Вычислим косинус угла между плоскостями:

$$\varphi = \frac{4 \cdot 6 + 10 \cdot 15 + 14 \cdot 21}{\sqrt{16 + 100 + 196} \sqrt{36 + 225 + 441}} = \frac{468}{\sqrt{312} \sqrt{702}} = \frac{468}{468} = 1.$$

Ввиду того, что косинус угла равен единице, угол между плоскостями равен нулю, а заданные плоскости – параллельны.

Пример. Найдем угол между двумя плоскостями

$$x + 3y - 4z - 10 = 0 \text{ и } -2x + 2y + z - 7 = 0.$$

Вычислим косинус угла между плоскостями:

$$\cos \varphi = \frac{1 \cdot (-2) + 3 \cdot 2 - 4 \cdot 1}{\sqrt{1+9+16}\sqrt{4+4+1}} = \frac{0}{\sqrt{26}\sqrt{9}} = 0.$$

Косинус угла между плоскостями равен нулю, следовательно, плоскости перпендикулярны.

7.5.2. Условия параллельности и перпендикулярности плоскостей

Условия параллельности и перпендикулярности двух плоскостей можем напрямую связывать с параллельностью и перпендикулярностью их нормальных векторов.

Рассмотрим две плоскости:

$$\pi_1 : A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0, \quad \pi_2 : A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0.$$

Плоскости π_1 и π_2 будут параллельны тогда и только тогда, когда координаты их нормальных векторов $\vec{n}_1(A_1; B_1; C_1)$ и $\vec{n}_2(A_2; B_2; C_2)$ будут пропорциональными:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2} = \frac{C_1}{C_2}.$$

Пример. Составим уравнение плоскости α , проходящей через точку $M(-2; 1; 4)$ параллельно плоскости $3x + 2y - 7z + 9 = 0$.

Согласно условию параллельности плоскостей, первые три параметра нашей плоскости должны быть пропорциональны соответственным коэффициентам плоскости $3x + 2y - 7z + 9 = 0$:

$$\frac{A_1}{3} = \frac{B_1}{2} = \frac{C_1}{-7}.$$

В качестве коэффициентов общего уравнения плоскости α можно взять любые числа, удовлетворяющие пропорции, но проще взять $A_1 = 3, B_1 = 2, C_1 = -7$. Присвоив эти значения коэффициентам, получим:

$$3x + 2y - 7z + D = 0.$$

Однако мы еще не учли, что на плоскости находится точка M с координатами $(-2; 1; 4)$. Подставляя координаты точки M в уравнение легко найти значение параметра D :

$$3 \cdot (-2) + 2 \cdot 1 - 7 \cdot 4 + D = 0,$$

$$D = 32.$$

Учитывая полученное значение коэффициента D , можно окончательно записать общее уравнение плоскости α :

$$3x + 2y - 7z + 32 = 0.$$

Рассмотрим теперь условие перпендикулярности двух плоскостей.

Снова возьмем две плоскости:

$$\pi_1 : A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0, \quad \pi_2 : A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0.$$

Поскольку нормальные векторы плоскостей $\vec{n}_1(A_1; B_1; C_1)$ и $\vec{n}_2(A_2; B_2; C_2)$ определяют взаимную ориентацию плоскостей, то достаточно рассмотреть случай, когда нормальные векторы ортогональны. В этом случае сумма произведений их координат будет равна нулю:

$$A_1A_2 + B_1B_2 + C_1C_2 = 0.$$

Пример. Составим общее уравнение плоскости π , проходящей через точку $M(-2; 3; 6)$ перпендикулярно плоскостям $\beta_1 : 2x + 3y - 2z - 4 = 0$ и $\beta_2 : 3x + 5y + z = 0$.

В следствии того, что исследуемая плоскость π перпендикулярна плоскостям β_1 и β_2 , составим систему двух линейных уравнений, в которой переменные A , B и C являются параметрами плоскости π :

$$\begin{cases} 2A + 3B - 2C = 0 \\ 3A + 5B + C = 0 \end{cases}.$$

Выразим переменные системы A и B :

$$\begin{cases} 2A + 3B = 2C \\ 3A + 5B = -C \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 2A + 3B = 2C \\ B = -8C \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = 13C \\ B = -8C \end{cases}.$$

Возьмем для определенности значение $C=1$. Тогда общее уравнение плоскости π будет выглядеть так:

$$13x - 8y + z + D = 0.$$

Подставим в полученное уравнение координаты точки $M(-2; 3; 6)$ и найдем недостающий параметр D :

$$13 \cdot (-2) - 8 \cdot 3 + 6 + D = 0$$

$$D = 44.$$

Тогда окончательная запись общего уравнение плоскости π , проходящей через точку $M(-2; 3; 6)$ перпендикулярно плоскостям $\beta_1 : 2x + 3y - 2z - 4 = 0$ и $\beta_2 : 3x + 5y + z = 0$ будет следующей:

$$13x - 8y + z + 44 = 0.$$

Пример. Составим уравнение плоскости π , проходящей через точки $M_1(1; 1; 1)$, $M_2(0; 1; -1)$ перпендикулярно плоскости $\gamma : x + 2y - z - 6 = 0$.

Пусть уравнение плоскости π задана уравнением: $Ax + By + Cz + D = 0$.

В нашей задаче три условия:

- плоскость проходит через точку M_1 ;
- плоскость проходит через точку M_2 ;
- она перпендикулярна плоскости γ .

Эти условия можно задать системой из трех линейных уравнений с тремя переменными:

$$\begin{cases} A \cdot 1 + B \cdot 1 + C \cdot 1 + D = 0 \\ A \cdot 0 + B \cdot 1 + C \cdot (-1) + D = 0 \\ A \cdot 1 + B \cdot 2 + C \cdot (-1) = 0 \end{cases}.$$

Данная система эквивалентна следующей:

$$\begin{cases} A + B + D = -C \\ B + D = C \\ A + 2B = C \end{cases}.$$

Для определенности положим $C=1$, тогда

$$\begin{cases} A + B + D = -1 \\ B + D = 1 \\ A + 2B = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = -2 \\ B = 1 - D \\ A - 2D = 2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = -2 \\ B = 1 \\ D = 0 \end{cases}$$

Подставляя найденные коэффициенты в общее уравнения плоскости π , получим:

$$-2x + y + z = 0$$

7.5.3. Расстояние между точкой и плоскостью

Изучая нормальное уравнение плоскости, мы уже рассматривали расстояние от плоскости до начала координат.

Расстоянием между точкой и плоскостью принято считать длину наикратчайшего отрезка между заданной точкой и плоскостью, то есть длину перпендикуляра, опущенного из точки к плоскости.

Пусть заданы точка $M(x_0; y_0; z_0)$ и плоскость π , заданная уравнением $Ax + By + Cz + D = 0$.

Тогда расстояние между точкой M и плоскостью π можно определить по формуле:

$$\rho(M, \pi) = \frac{|Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}. \quad (7.17)$$

Пример. Найдём расстояние между точкой $M(1; 5; -4)$ и плоскостью $\pi: 2x - 2y + z - 3 = 0$.

Используя вышеприведенную формулу, произведем расчет:

$$\rho(M, \pi) = \frac{|2 \cdot 1 - 2 \cdot 5 + 1 \cdot (-4) - 3|}{\sqrt{2^2 + 2^2 + 1^2}} = \frac{|2 - 10 - 4 - 3|}{\sqrt{9}} = \frac{15}{3} = 5.$$

Таким образом, расстояние между точкой M и плоскостью π равно пяти.

7.6. Уравнения прямой в пространстве

7.6.1. Общие уравнения прямой в пространстве

Пусть заданы общие уравнения двух непараллельных плоскостей π_1 и π_2 :

$$\pi_1 : A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0, \quad \pi_2 : A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0.$$

Результатом их пересечения будет являться прямая L (рис. 7.16).

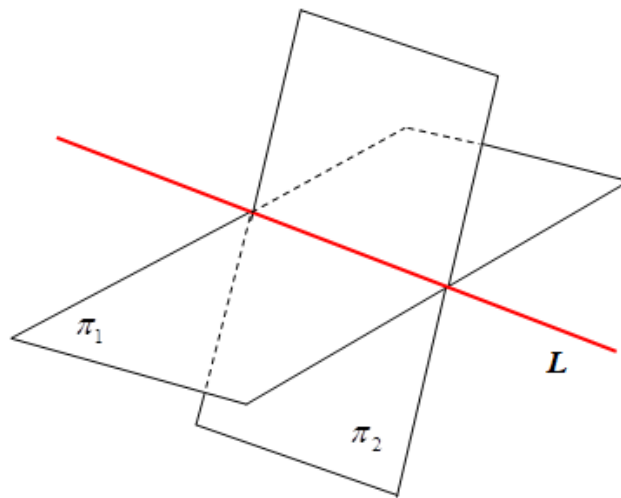


Рис. 7.16. Пересечение плоскостей.

Если заданы две непараллельные плоскости π_1 и π_2 , то их пересечением будет прямая L , каждая точка которой принадлежит плоскости π_1 и плоскости π_2 одновременно. Таким образом прямую можно задать системой из двух линейных уравнений с тремя переменными:

$$\begin{cases} A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0, \\ A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0. \end{cases} \quad (7.18)$$

Такая форма записи прямой называется общими уравнениями прямой в пространстве.

Пример. Пересечением плоскостей $\pi_1 : 2x + 7y - 12z + 15 = 0$ и $\pi_2 : -x + 6y + 4z - 18 = 0$ является прямая

$$\begin{cases} 2x + 7y - 12z + 15 = 0 \\ -x + 6y + 4z - 18 = 0 \end{cases}.$$

7.6.2. Канонические уравнения прямой

Рассмотрим ненулевые векторы, лежащие на прямой или на параллельных прямых к данной. Такие векторы называются *направляющими векторами* выбранной прямой. Направляющие векторы могут быть направлены в противоположные стороны.

Пусть для прямой L известен один из направляющих векторов $\vec{s}(l; m; n)$ и задана точка $M_0(x_0; y_0; z_0)$, принадлежащая этой прямой (рис. 7.17).

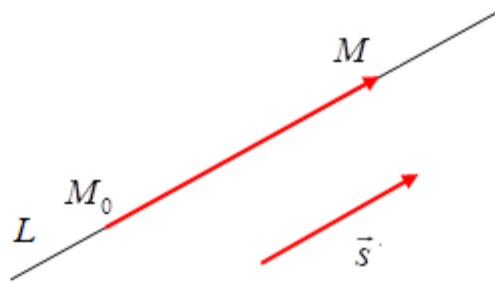


Рис. 7.17. Направляющий вектор.

Возьмем еще одну произвольную точку $M(x; y; z)$ прямой L и определим вектор $\overline{M_0M}(x - x_0; y - y_0; z - z_0)$. Векторы $\vec{s}$ и $\overline{M_0M}$ являются коллинеарными векторами, а значит, координаты этих векторов будут пропорциональными:

$$\frac{x - x_0}{l} = \frac{y - y_0}{m} = \frac{z - z_0}{n}. \quad (7.19)$$

Полученное двойное равенство называется каноническими уравнениями прямой L . В канонических уравнениях допускаются нули в знаменателях дробей.

Пример. Если для прямой L известен один из направляющих векторов $\vec{s}(4; -6; 3)$ и известна точка $M_0(8; -12; 7)$, лежащая на этой прямой, тогда каноническое уравнение прямой L будет иметь вид:

$$\frac{x - 8}{4} = \frac{y + 12}{-6} = \frac{z - 7}{3}.$$

7.6.3. Уравнения прямой, проходящей через две точки

Рассмотрим прямую L , заданную каноническими уравнениями $\frac{x-x_0}{l} = \frac{y-y_0}{m} = \frac{z-z_0}{n}$, и две точки $M_1(x_1; y_1; z_1)$ и $M_2(x_2; y_2; z_2)$, лежащие на указанной прямой.

В каноническом уравнении прямой L в качестве направляющего вектора возьмем вектор $\overline{M_1M_2}(x_2-x_1; y_2-y_1; z_2-z_1)$, а вместо точки $M_0(x_0; y_0; z_0)$ – точку $M_1(x_1; y_1; z_1)$. В этом случае уравнение прямой L будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{z-z_1}{z_2-z_1}. \quad (7.20)$$

Такое уравнение принято называть *уравнениями прямой, проходящей через две точки*.

Пример. Построим канонические уравнения прямой, проходящей через две точки $Q(3; 0; -1)$ и $R(4; -2; 7)$.

Для построения канонических уравнений воспользуемся формулой:

$$\frac{x-3}{4-3} = \frac{y-0}{-2-0} = \frac{z-(-1)}{7-(-1)}.$$

Выполнив все действия, окончательно получим канонические уравнения:

$$\frac{x-3}{1} = -\frac{y}{2} = \frac{z+1}{8}.$$

7.6.4. Параметрические уравнения прямой в пространстве

Рассмотрим прямую L , заданную каноническими уравнениями

$$\frac{x-x_0}{l} = \frac{y-y_0}{m} = \frac{z-z_0}{n}.$$

Пусть каждое из отношений равно некоторой скалярной величине t . Тогда уравнения прямой L можно записать следующим образом:

$$t = \frac{x-x_0}{l} = \frac{y-y_0}{m} = \frac{z-z_0}{n}.$$

Число t в дальнейшем будем называть *параметром*.

Данное выражение можно также записать в виде системы из трех уравнений:

$$\begin{cases} t = \frac{x - x_0}{l} \\ t = \frac{y - y_0}{m} \\ t = \frac{z - z_0}{n} \end{cases}$$

Преобразовав каждое из уравнений системы окончательно получим:

$$\begin{cases} x = x_0 + lt \\ y = y_0 + mt \\ z = z_0 + nt \end{cases} \quad (7.21)$$

Последняя записанная система получила название параметрических уравнений прямой.

Пример. Определим параметрические уравнения прямой L , если известны направляющий вектор $\vec{s}(-1; 6; 2)$ и точка $F(3; -3; 5)$, лежащая на этой прямой.

Подставим в систему координаты вектора $\vec{s}$ и точки F и получим параметрические уравнения прямой L .

$$\begin{cases} x = 3 - t \\ y = -3 + 6t \\ z = 5 + 2t \end{cases}$$

7.6.5. Преобразования уравнений

Часто для удобства использования необходимо перевести уравнения прямой из одной формы в другую. Чаще всего требуется преобразить уравнения прямой из общих уравнений в канонические, ведь с каноническими уравнениями работать легче, а с аналогичными действиями требуется меньше трудозатрат.

Для перехода из общей формы в каноническую достаточно определить произвольную точку прямой, а затем вычислить координаты одного из направляющих векторов.

Пример. Преобразуем систему общих уравнений $\begin{cases} x + y + 2z - 20 \\ x - 2y + z + 16 = 0 \end{cases}$ в

каноническую форму.

Для преобразования системы определим произвольную точку прямой L . Зафиксируем значение переменной $z = 0$. Тогда система общих уравнений примет вид:

$$\begin{cases} x + y - 20 = 0 \\ x - 2y + 16 = 0 \end{cases}.$$

Решая систему, получим

$$\begin{cases} x = 8, \\ y = 12 \end{cases}.$$

Таким образом, мы нашли точку прямой с координатами $(8; 12; 0)$.

В качестве направляющего вектора прямой L возьмем векторное произведение направляющих векторов $\vec{n}_1(1; 1; 2)$ и $\vec{n}_2(1; -2; 1)$:

$$\vec{n}_1 \times \vec{n}_2 = \begin{vmatrix} i & j & k \\ 1 & 1 & 2 \\ 1 & -2 & 1 \end{vmatrix} = i \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ -2 & 1 \end{vmatrix} - j \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} + k \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -2 \end{vmatrix} = 5i + j - 3k.$$

Подставив координаты направляющего вектора и точки прямой в каноническое уравнение, получим:

$$\frac{x-8}{5} = \frac{y-12}{1} = \frac{z}{-3}.$$

7.7. Взаимное расположение прямых и плоскостей

7.7.1. Угол между прямыми

Рассмотрим две прямые L_1 и L_2 , ориентация которых в трехмерном пространстве задана направляющими векторами $\vec{s}_1(l_1; m_1; n_1)$ и $\vec{s}_2(l_2; m_2; n_2)$ (рис. 7.18).

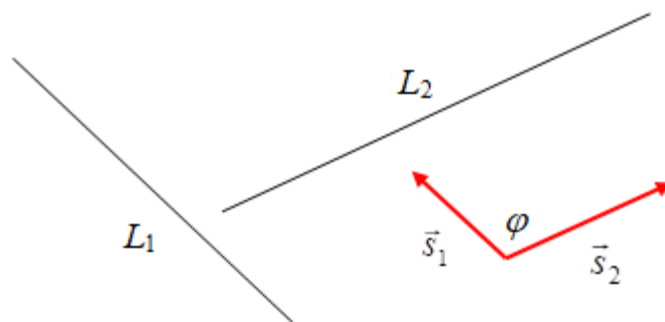


Рис.7.18. Угол между прямыми.

Принято считать, что острый угол между прямыми равен углу между их направляющими векторами или является дополнительным к нему, если угол между векторами тупой.

Как мы уже знаем, косинус угла между двумя векторами можно получить, разделив скалярное произведение этих векторов на произведение их модулей:

$$\cos \varphi = \frac{\vec{s}_1 \cdot \vec{s}_2}{|\vec{s}_1| \cdot |\vec{s}_2|}.$$

Однако, согласно представленной формуле, косинус угла φ может принимать, как положительные, так и отрицательные значения, то есть угол может быть острым или тупым. Значит, для получения острого угла между прямыми L_1 и L_2 необходимо взять абсолютное значение произведения векторов $\vec{s}_1$ и $\vec{s}_2$:

$$\cos \varphi = \frac{|\vec{s}_1 \cdot \vec{s}_2|}{|\vec{s}_1| \cdot |\vec{s}_2|}.$$

В координатной форме данную формулу можно представить в виде:

$$\cos \varphi = \frac{|l_1 l_2 + m_1 m_2 + n_1 n_2|}{\sqrt{l_1^2 + m_1^2 + n_1^2} \cdot \sqrt{l_2^2 + m_2^2 + n_2^2}}. \quad (7.22)$$

Пример. Найти угол между прямыми L_1 и L_2 , заданных каноническими уравнениями:

$$L_1: \frac{x+10}{1} = \frac{y-5}{3} = -\frac{z}{4} \text{ и } L_2: -\frac{x-12}{2} = \frac{y+3}{2} = \frac{z+7}{1}.$$

Для прямых L_1 и L_2 направляющими векторами будут $\vec{s}_1(1; 3; 4)$ и $\vec{s}_2(-2; 2; 1)$. Следовательно, косинус угла между прямыми будет равен:

$$\cos \varphi = \frac{|1 \cdot (-2) + 3 \cdot 2 - 4 \cdot 1|}{\sqrt{1+9+16}\sqrt{4+4+1}} = \frac{0}{\sqrt{26}\sqrt{9}} = 0.$$

Таким образом, мы видим, что прямые L_1 и L_2 перпендикулярны.

7.7.2. Взаимное расположение прямых

Пусть прямые L_1 и L_2 заданы каноническими уравнениями:

$$L_1: \frac{x-x_1}{l_1} = \frac{y-y_1}{m_1} = \frac{z-z_1}{n_1} \text{ и } L_2: \frac{x-x_2}{l_2} = \frac{y-y_2}{m_2} = \frac{z-z_2}{n_2}.$$

Рассмотрим всевозможные случаи и признаки взаимного расположения этих прямых.

1-й случай. Если координаты направляющих векторов прямых L_1 и L_2 пропорциональны, $\frac{l_1}{l_2} = \frac{m_1}{m_2} = \frac{n_1}{n_2}$, то эти прямые параллельны.

Пример. Прямые $\frac{x-2}{4} = -\frac{y+1}{10} = \frac{z}{8}$ и $\frac{x+1}{6} = -\frac{y-3}{15} = \frac{z+2}{12}$ параллельны, так как координаты их направляющих векторов пропорциональны. Действительно, $\frac{4}{6} = \frac{-10}{-15} = \frac{8}{12}$, а коэффициент пропорциональности равен $\frac{2}{3}$.

2-й случай. Если кроме условия пропорциональности координат направляющих векторов $\vec{s}_1$ и $\vec{s}_2$, им будет коллинеарен вектор $\overline{M_1M_2}(x_2 - x_1; y_2 - y_1; z_2 - z_1)$, то прямые L_1 и L_2 совпадают.

Пример. Прямые $\frac{x+7}{4} = \frac{y+7}{3} = \frac{z-21}{7}$ и $\frac{x-5}{12} = \frac{y-2}{9} = \frac{z}{21}$ совпадают, поскольку вектора $\vec{s}_1$ и $\vec{s}_2$ коллинеарны, кроме того им будет коллинеарен вектор $\overline{M_1M_2}(5+7; 2+7; 0+21)$.

Проверим коллинеарность векторов $\vec{s}_1$ и $\vec{s}_2$: $\frac{4}{12} = \frac{3}{9} = \frac{7}{21}$ – двойное равенство выполняется. Также коллинеарны векторы $\vec{s}_1$ и $\overline{M_1M_2}$, поскольку координаты их направляющих векторов пропорциональны: $\frac{12}{4} = \frac{9}{3} = \frac{21}{7}$.

3-й случай. Если не выполняется условие коллинеарности направляющих векторов, а три вектора $\vec{s}_1$, $\vec{s}_2$ и $\overline{M_1M_2}$ являются компланарными, то прямые L_1 и L_2 пересекаются. Компланарность векторов можно определить с помощью смешанного произведения векторов:

$$\begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \end{vmatrix} = 0.$$

Пример. Прямые $\frac{x-2}{4} = \frac{y+3}{3} = \frac{z+4}{7}$ и $\frac{x-3}{3} = \frac{y-15}{8} = \frac{z-6}{8}$

пересекаются, так как не выполняется условие коллинеарности направляющих векторов: $\frac{4}{3} \neq \frac{3}{8} \neq \frac{7}{8}$, а смешанное произведение векторов $\vec{s}_1$, $\vec{s}_2$ и $\overline{M_1M_2}$ равно

нулю: $\begin{vmatrix} 3-2 & 15+3 & 6+4 \\ 4 & 3 & 7 \\ 3 & 8 & 8 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 18 & 10 \\ 4 & 3 & 7 \\ 3 & 8 & 8 \end{vmatrix} = 0.$

4-й случай. Если не выполняется условие коллинеарности направляющих векторов, и векторы $\vec{s}_1$, $\vec{s}_2$ и $\overline{M_1M_2}$ не являются компланарными, то прямые L_1 и L_2 скрещиваются.

Пример. Прямые $\frac{x-1}{4} = \frac{y+2}{5} = \frac{z+1}{6}$ и $\frac{x-2}{3} = \frac{y}{2} = \frac{z+1}{1}$ скрещиваются,

так как не выполняется условие коллинеарности направляющих векторов:

$\frac{4}{3} \neq \frac{5}{2} = \frac{6}{1}$, а смешанное произведение векторов $\vec{s}_1$, $\vec{s}_2$ и $\overline{M_1M_2}$ не равно нулю:

$$\begin{vmatrix} 2-1 & 0+2 & -1+1 \\ 4 & 5 & 6 \\ 3 & 2 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 4 & 5 & 6 \\ 3 & 2 & 1 \end{vmatrix} = 9 \neq 0.$$

Рассмотрим теперь две прямые, заданные общими уравнениями:

$$L_1: \begin{cases} A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0 \\ A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0 \end{cases} \quad \text{и} \quad L_2: \begin{cases} A_3x + B_3y + C_3z + D_3 = 0 \\ A_4x + B_4y + C_4z + D_4 = 0 \end{cases}.$$

Тогда количество решений системы линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} A_1x + B_1y + C_1z + D_1 = 0 \\ A_2x + B_2y + C_2z + D_2 = 0 \\ A_3x + B_3y + C_3z + D_3 = 0 \\ A_4x + B_4y + C_4z + D_4 = 0 \end{cases},$$

составленной из общих уравнений прямых, будет определять взаимное расположение L_1 и L_2 .

1-й случай. Если система неопределенная и имеет бесконечное количество решений, то прямые L_1 и L_2 совпадают.

Пример. Определим взаимную ориентацию прямых

$$L_1: \begin{cases} x - y + 3z + 5 = 0 \\ 3x + 4y + 2z + 1 = 0 \end{cases} \quad \text{и} \quad L_2: \begin{cases} 2x + 4z + 6 = 0 \\ 2x + 3y + z = 0 \end{cases}.$$

Для этого составим систему уравнений

$$\begin{cases} x - y + 3z + 5 = 0 \\ 3x + 4y + 2z + 1 = 0 \\ 2x + 4z + 6 = 0 \\ 2x + 3y + z = 0 \end{cases}.$$

Найдем ранги общей матрицы и ранг расширенной матриц системы:

$$\text{rang} \begin{pmatrix} 1 & -1 & 3 \\ 3 & 4 & 2 \\ 2 & 0 & 4 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} = 2; \quad \text{rang} \begin{pmatrix} 1 & -1 & 3 & 5 \\ 3 & 4 & 2 & 1 \\ 2 & 0 & 4 & 6 \\ 2 & 3 & 1 & 0 \end{pmatrix} = 2.$$

Поскольку ранг общей матрицы равен рангу расширенной матрицы, но меньше количества переменных, то система линейных алгебраических

уравнений является совместной и неопределенной, следовательно, прямые L_1 и L_2 совпадают.

2-й случай. Если система уравнений определенная и имеет только одно решение, то прямые L_1 и L_2 пересекаются.

Пример. Определим взаимную ориентацию прямых

$$L_1: \begin{cases} 4x + 2y + 3z + 9 = 0 \\ 2x - y + 6z + 11 = 0 \end{cases} \quad \text{и} \quad L_2: \begin{cases} 5x + 4z + 14 = 0 \\ 3x + 8y + 9z + 7 = 0 \end{cases}.$$

Для этого составим систему уравнений

$$\begin{cases} 4x + 2y + 3z + 9 = 0 \\ 2x - y + 6z + 11 = 0 \\ 5x + 4z + 14 = 0 \\ 3x + 8y + 9z + 7 = 0 \end{cases}.$$

Найдем ранги общей и расширенной матриц:

$$\text{rang} \begin{pmatrix} 4 & 2 & 3 \\ 2 & -1 & 6 \\ 5 & 0 & 4 \\ 3 & 8 & 9 \end{pmatrix} = 3; \quad \text{rang} \begin{pmatrix} 4 & 2 & 3 & 9 \\ 2 & -1 & 6 & 11 \\ 5 & 0 & 4 & 14 \\ 3 & 8 & 9 & 7 \end{pmatrix} = 3.$$

Поскольку ранг общей матрицы равен рангу расширенной матрицы и количеству переменных, то система линейных алгебраических уравнений является совместной и определенной, следовательно, прямые L_1 и L_2 пересекаются.

3-й случай. Если система является несовместной, то есть не имеет решений, то прямые параллельны или скрещиваются.

Пример. Определим взаимную ориентацию прямых, заданных общими

уравнениями $L_1: \begin{cases} x + 6z + 3 = 0 \\ 3x + 7y + 2z + 4 = 0 \end{cases}$ и $L_2: \begin{cases} 2x + 3y + 2 = 0 \\ 2x + y + 8z + 5 = 0 \end{cases}$.

Составим систему линейных уравнений

$$\begin{cases} x + 6z + 3 = 0 \\ 3x + 7y + 2z + 4 = 0 \\ 2x + 3y + 2 = 0 \\ 2x + y + 8z + 5 = 0 \end{cases}.$$

Найдем ранги общей и расширенной матриц системы:

$$\text{rang} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 6 \\ 3 & 7 & 2 \\ 2 & 3 & 0 \\ 2 & 1 & 8 \end{pmatrix} = 3; \quad \text{rang} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 6 & 3 \\ 3 & 7 & 2 & 4 \\ 2 & 3 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 8 & 5 \end{pmatrix} = 4.$$

Поскольку ранг общей матрицы не равен рангу расширенной матрицы, то система уравнений несовместна, а значит прямые L_1 и L_2 параллельны или скрещиваются.

7.7.3. Взаимное расположение прямой и плоскости

Пусть прямая L задана каноническими уравнениями $\frac{x-x_0}{l} = \frac{y-y_0}{m} = \frac{z-z_0}{n}$, а плоскость π общим уравнением $Ax + By + Cz + D = 0$. Исследуя взаимное расположение прямой L и плоскости π , следует отметить, что здесь существует четыре возможных случая.

1-й случай. Если заданная точка $M_0(x_0; y_0; z_0)$ принадлежит плоскости π , а нормальный вектор плоскости $\vec{n}(A; B; C)$ и направляющий вектор прямой $\vec{s}(l; m; n)$ ортогональны, то *прямая L принадлежит плоскости π .*

На практике эти условия описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D = 0 \\ Al + Bm + Cn = 0 \end{cases}.$$

Пример. Пусть прямая L задана каноническими уравнениями $\frac{x-1}{-2} = \frac{y-2}{5} = \frac{z-3}{3}$, а плоскость π – уравнением $2x - y + 3z - 9 = 0$.

Прямая L принадлежит плоскости π , так как заданная точка $M_0(1; 2; 3)$ принадлежит плоскости π , а нормальный вектор плоскости $\vec{n}(2; -1; 3)$ и направляющий вектор прямой $\vec{s}(-2; 5; 3)$ ортогональны:

$$\begin{cases} 2 \cdot 1 + (-1) \cdot 2 + 3 \cdot 3 - 9 = 0 \\ 2 \cdot (-2) + (-1) \cdot 5 + 3 \cdot 3 = 0 \end{cases}.$$

2-й случай. Если заданная точка $M_0(x_0; y_0; z_0)$ не принадлежит плоскости π , а нормальный вектор плоскости $\vec{n}(A; B; C)$ и направляющий вектор прямой $\vec{s}(l; m; n)$ ортогональны, то *прямая L параллельна плоскости π* .

Эти условия можно описать системой:

$$\begin{cases} Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D \neq 0 \\ Al + Bm + Cn = 0 \end{cases}.$$

Пример. Пусть прямая L задана каноническими уравнениями $\frac{x-2}{-2} = \frac{y}{5} = \frac{z-3}{3}$, а плоскость π – уравнением $2x - y + 3z - 9 = 0$.

Прямая L параллельна плоскости π , так как заданная точка $M_0(1; 2; 3)$ не принадлежит плоскости π , а нормальный вектор плоскости $\vec{n}(2; -1; 3)$ и направляющий вектор прямой $\vec{s}(-2; 5; 3)$ ортогональны:

$$\begin{cases} 2 \cdot 2 + (-1) \cdot 0 + 3 \cdot 3 - 9 = 4 \neq 0 \\ 2 \cdot (-2) + (-1) \cdot 5 + 3 \cdot 3 = 0 \end{cases}.$$

3-й случай. Если нормальный вектор плоскости $\vec{n}(A; B; C)$ и направляющий вектор прямой $\vec{s}(l; m; n)$ не ортогональны, то *прямая L пересекается с плоскостью π* .

Пример. Пусть прямая L задана каноническими уравнениями $\frac{x-2}{2} = \frac{y}{1} = \frac{z-3}{3}$, а плоскость π – уравнением $2x - y + 3z - 9 = 0$.

Прямая L пересекает плоскость π , поскольку нормальный вектор плоскости $\vec{n}(2; -1; 3)$ и направляющий вектор прямой $\vec{s}(2; 1; 3)$ ортогональными не являются: $2 \cdot 2 + (-1) \cdot 1 + 3 \cdot 3 = 12 \neq 0$.

4-й случай. Если нормальный вектор плоскости $\vec{n}(A; B; C)$ и направляющий вектор прямой $\vec{s}(l; m; n)$ коллинеарны, то *прямая L перпендикулярна плоскости π* .

Координаты векторов $\vec{n}$ и $\vec{s}$ в этом случае будут пропорциональны: $\frac{A}{l} = \frac{B}{m} = \frac{C}{n}$.

Пример. Пусть прямая L задана каноническими уравнениями $\frac{x-2}{6} = \frac{y}{8} = \frac{z-3}{4}$, а плоскость π – уравнением $3x+4y+2z+1=0$.

Прямая L перпендикулярна плоскости π , поскольку нормальный вектор плоскости $\vec{n}(3;4;2)$ и направляющий вектор прямой $\vec{s}(6;8;4)$ являются коллинеарными и их координаты пропорциональны: $\frac{3}{6} = \frac{4}{8} = \frac{2}{4}$.

7.8. Определение расстояний

7.8.1. Расстояние от точки до прямой

Рассмотрим точку $M_1(x_1; y_1; z_1)$ и прямую L , заданную каноническими уравнениями $\frac{x-x_0}{l} = \frac{y-y_0}{m} = \frac{z-z_0}{n}$.

Тогда расстояние между точкой M_1 и прямой L можно вычислить по формуле:

$$\frac{\sqrt{\left| \begin{matrix} y_1 - y_0 & z_1 - z_0 \\ m & n \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} x_1 - x_0 & z_1 - z_0 \\ l & n \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} x_1 - x_0 & y_1 - y_0 \\ l & m \end{matrix} \right|^2}}{\sqrt{l^2 + m^2 + n^2}}. \quad (7.23)$$

Пример. Найдем расстояние между точкой $P(2; 0; 7)$ и прямой L , заданной каноническими уравнениями $\frac{x-5}{3} = \frac{y-2}{4} = \frac{z}{1}$.

Воспользуемся формулой, подставим в нее координаты точки P и параметры прямой L :

$$\rho(P, L) = \frac{\sqrt{\left| \begin{matrix} 0-2 & 7-0 \\ 4 & 1 \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} 2-5 & 7-0 \\ 3 & 1 \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} 2-5 & 0-2 \\ 3 & 4 \end{matrix} \right|^2}}{\sqrt{3^2 + 4^2 + 1^2}} = \frac{\sqrt{32^2 + 24^2 + 18^2}}{\sqrt{26}} \approx 8,6023$$

Таким образом, расстояние между точкой P и прямой L приближенно равно 8,6023.

7.8.2. Расстояние между прямыми

Рассмотрим две прямые, заданные каноническими уравнениями:

$$L_1 : \frac{x-x_1}{l_1} = \frac{y-y_1}{m_1} = \frac{z-z_1}{n_1} \text{ и } L_2 : \frac{x-x_2}{l_2} = \frac{y-y_2}{m_2} = \frac{z-z_2}{n_2}.$$

В случае параллельных прямых расстояние между ними можно вычислить по формуле:

$$\rho(L_1, L_2) = \sqrt{\frac{\begin{vmatrix} y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ m_1 & n_1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & z_2 - z_1 \\ l_1 & n_1 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ l_1 & m_1 \end{vmatrix}^2}{\sqrt{l_1^2 + m_1^2 + n_1^2}}}. \quad (7.24)$$

Пример. Найдем расстояние между параллельными прямыми

$$L_1 : \frac{x-3}{2} = \frac{y-1}{6} = \frac{z}{4} \text{ и } L_2 : \frac{x}{3} = \frac{y+1}{9} = \frac{z-2}{6}.$$

Подставляя в формулу коэффициенты уравнений прямых L_1 и L_2 , получим:

$$\begin{aligned} \rho(L_1, L_2) &= \sqrt{\frac{\begin{vmatrix} -1-3 & 2-0 \\ 6 & 4 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} 0-3 & 2-0 \\ 2 & 4 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} 0-3 & -1-3 \\ 2 & 6 \end{vmatrix}^2}{\sqrt{2^2 + 6^2 + 4^2}}} = \\ \rho(L_1, L_2) &= \sqrt{\frac{(-28)^2 + (-16)^2 + (-10)^2}{\sqrt{2^2 + 6^2 + 4^2}}} = \sqrt{\frac{1140}{56}} \approx 4,511889. \end{aligned}$$

Если прямые L_1 и L_2 скрещиваются, то расстояние определяется следующим образом:

$$\rho(L_1, L_2) = \frac{\left| \begin{vmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \end{vmatrix} \right|}{\sqrt{\begin{vmatrix} m_1 & n_1 \\ m_2 & n_2 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} l_1 & n_1 \\ l_2 & n_2 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} l_1 & m_1 \\ l_2 & m_2 \end{vmatrix}^2}}}. \quad (7.25)$$

Пример. Найдем расстояние между скрещивающимися прямыми

$$L_1 : \frac{x+1}{1} = \frac{y}{-1} = \frac{z-4}{3} \text{ и } L_2 : \frac{x-3}{2} = \frac{y-1}{0} = \frac{z-5}{4}.$$

Подставим параметры уравнений прямых L_1 и L_2 в формулу:

$$\rho(L_1, L_2) = \frac{\left| \begin{vmatrix} 1 & -1 & 3 \\ 2 & 0 & 4 \\ 3+1 & 1-0 & 5-4 \end{vmatrix} \right|}{\sqrt{\begin{vmatrix} -1 & 3 \\ 0 & 4 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} 1 & 3 \\ 2 & 4 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} 1 & -1 \\ 2 & 0 \end{vmatrix}^2}} = \frac{|-12|}{\sqrt{(-4)^2 + (-2)^2 + 2^2}} = 0,5.$$

Таким образом, расстояние между прямыми L_1 и L_2 равно 0,5.

7.8.3. Расстояние между прямой и плоскостью

Рассмотрим прямую L , заданную каноническими уравнениями $\frac{x-x_0}{l} = \frac{y-y_0}{m} = \frac{z-z_0}{n}$ и плоскость π , определяемую общим уравнением $Ax + By + Cz + D = 0$.

В случае пересечения прямой L и плоскости π определение расстояния между ними смысла не имеет. Однако, если прямая L параллельна плоскости π , то достаточно определить расстояние между любой точкой прямой L и плоскостью π . Если взять фиксированную точку $M_0(x_0; y_0; z_0)$, принадлежащую прямой L , координаты которой можно взять из уравнения прямой, то расстояние можно получить из формулы:

$$\rho(L, \pi) = \frac{|Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}. \quad (7.26)$$

Пример. Пусть прямая L задана каноническими уравнениями $\frac{x+6}{5} = \frac{y-3}{0} = -\frac{z}{4}$, а плоскость π – уравнением $x - 2y + 3z - 20 = 0$.

Прямая L пересекает плоскость π , поскольку нормальный вектор плоскости $\vec{n}(1; -2; 3)$ и направляющий вектор прямой $\vec{s}(5; 0; -4)$ ортогональными не являются: $1 \cdot 5 + (-2) \cdot 0 + 3 \cdot (-4) = -7 \neq 0$.

Таким образом, расстояние между прямой L и плоскостью π равно нулю.

Пример. Найдём расстояние между прямой $L: \frac{x-1}{2} = \frac{y+2}{1} = \frac{z-5}{6}$ и плоскостью $\pi: 12y - 2z + 7 = 0$.

Прямая L параллельна плоскости π . Действительно, нормальный вектор плоскости $\vec{n}(0;12;-2)$ и направляющий вектор прямой $\vec{s}(2;1;6)$ являются ортогональными: $0 \cdot 2 + 12 \cdot 1 + (-2) \cdot 6 = 0$.

Теперь можно использовать формулу расстояния между точкой и плоскостью:

$$\rho(L, \pi) = \frac{|0 \cdot 1 + 12 \cdot (-2) - 2 \cdot 5 + 7|}{\sqrt{0^2 + 12^2 + (-2)^2}} = \frac{|-27|}{\sqrt{144 + 4}} = \frac{27}{\sqrt{148}} \approx 2,219386.$$

Таким образом, расстояние между параллельными прямой L и плоскостью π приближенно равно 2,219386.

Вопросы для самоконтроля

1. Опишите метод координат на плоскости. Каким образом осуществляется переход из декартовых прямоугольных координат в полярные координаты?
2. Опишите основные задачи, решаемые методом координат.
3. Каким образом можно найти расстояние между двумя точками? Как определить координаты точки, делящей отрезок в данном отношении?
4. Каким образом общее уравнение прямой на плоскости, можно записать как уравнение прямой с угловым коэффициентом?
5. Приведите записи прямой записанной в виде общего уравнения и уравнения прямой с угловым коэффициентом, проходящей через данную точку.
6. Опишите принципы на уравнения прямой на плоскости, проходящей через две точки.
7. Приведите примеры уравнений прямой в отрезках. Каким образом осуществляется преобразование этого уравнения в общую форму?
8. Как найти угол между двумя прямыми на плоскости?
9. Каким образом можно исследовать взаимное расположение двух прямых, заданных общими уравнениями, на плоскости?

10. Какими уравнениями можно задать плоскость в трехмерном пространстве?

Приведите примеры.

11. Каким уравнением определяется уравнение плоскости, проходящей через три точки? В каких случаях три точки не определяют плоскость?

12. Каким образом можно получить уравнение плоскости в отрезках? Объясните смысл коэффициентов уравнения в отрезках.

13. Дайте характеристику коэффициентов нормального уравнения плоскости. Каким образом из общего уравнения плоскости можно получить коэффициенты нормального уравнения?

14. Каким образом можно найти угол между двумя плоскостями?

15. Продемонстрируйте на примерах условие параллельности двух плоскостей.

16. В чем заключается условие перпендикулярности двух плоскостей?

17. Как можно найти расстояние от точки до плоскости? Какое направление выбирается для расчета?

18. Каким образом прямая в пространстве задается общими уравнениями? В чем смысл коэффициентов уравнений?

19. Объясните принципы построения параметрических уравнений прямой в пространстве.

20. Каким образом определяются коэффициенты канонических уравнений прямой в пространстве?

21. Продемонстрируйте методы построения уравнений прямой, проходящей через две точки.

22. В чем заключается алгоритм нахождения угла между прямыми в пространстве?

23. Каким образом можно определить взаимное расположение прямых, заданных каноническими уравнениями?

24. Продемонстрируйте принципы определения взаимного расположения прямых, заданных общими уравнениями.

25. Каким образом можно найти угол между прямой и плоскостью?

26. Как определить взаимное расположение прямой и плоскости?

27. Опишите методы нахождения расстояний от точки до прямой, между прямыми и расстояние между прямой и плоскостью.

Раздел 3. Математический анализ

Математический анализ – это раздел математики, посвящённый исследованию функциональных зависимостей элементов двух или нескольких числовых множеств средствами дифференциального и интегрального исчисления.

Хотя предпосылки математического анализа появились значительно раньше, но основы дифференциального и интегрального исследования функций появились только в XVII веке в работах Джона Валлиса (1616–1703), Джеймса Грегори (1638–1675), Исаака Барроу (1630–1677), и окончательно математический анализ, как раздел математики, сформировался в работах Исаака Ньютона (1643–1727), Готфрида Лейбница (1646–1716), Якоба (1654–1705) и Иоганна (1667–1748) Бернулли, Гийома Лопиталя (1661–1704).

В XVII веке появились такие разделы математического анализа, как вариационное исчисление, дифференциальные уравнения, преобразования Фурье и производящие функции. Огромный вклад в развитие математического анализа внесли Леонард Эйлер (1707–1783), Жозеф Лагранжа (1736–1813), Жан-Батист Фурье (1768–1830), Симеон Пуассон (1781–1840), Огюстен Коши (1789–1857), Жозеф Лиувилль (1809–1882).

Текущий раздел включает темы, связанные с изучением функций и пределов одной переменной, дифференциальным исчислением функций одной переменной, функций нескольких переменных интегралов, числовых и функциональных рядов, методов решений дифференциальных уравнений.

Глава 8. Теория пределов и непрерывных функций

8.1. Функция одной переменной

8.1.1. Определение функции

Одним из основных математических понятий является понятие функции. Понятие функции связано с установлением зависимости (связи) между элементами двух множеств.

Определение. Если каждому элементу x множества X ставится в соответствие вполне определенный единственный элемент y множества Y , то говорят, что на множестве X задана функция $y = f(x)$ (рис. 8.1).

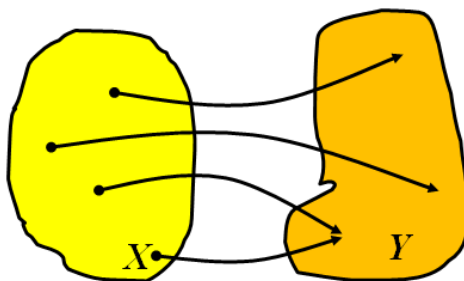


Рис. 8.1. Определение функции.

Функцию можно понимать, как закон соответствия между зависимой переменной y и независимой переменной x . При этом переменную y называют функцией, а переменную x – аргументом этой функции. Множество X для такого соответствия является *областью определения функции*, а множество Y называется *множеством значений*.



Рис.8.2. Функция и ее аргумент.

Запись $y = f(x)$ означает, что y является функцией x . Значение функции $f(x)$ при $x = a$ обозначают через $f(a)$ (рис. 8.2).

8.1.2. Способы задания функций

Обычно функцию описывают тремя способами: *табличным*, *графическим* и *аналитическим*.

В табличной форме перечисляются некоторые значения аргумента и соответствующие им значения функции. Такой способ задания функции обычно применяется, если известны только некоторые значения функции (таблица 8.1).

Таблица 8.1.

Табличное описание функции

X	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Y	0,756	1,223	3,006	2,168	1,983	1,766	1,612	1,529	1472

Обычно в таблицу записывают данные, полученные в результате наблюдений или измерений. Значения аргумента, как правило, определяются через заданный интервал, чем меньше интервал, тем точнее задана функция. Однако с уменьшением интервала значений аргумента таблица становится громоздкой.

Из таблицы можно определить не только указанные значения функции, но и с помощью математических расчетов найти приближенные значения функции, для любого значения аргумента на заданной области.

Второй способ задания функции – графический. На оси абсцисс откладываются значения аргумента x , а на оси ординат – значения функции $f(x)$ (рис. 9.3). Функциональная зависимость отображается с помощью кривой, каждая точка которой имеет координаты $(x; f(x))$.

В графической форме нагляднее прослеживается поведение функции в области ее отображения на графике. По графику функции можно всегда составить таблицу с любым интервалом значений аргумента, однако при этом теряется точность значений функции. Кроме того, графики дают лишь условное представление о поведении функции при стремлении аргумента к бесконечности или значительного удаления самой функции от начала координат.

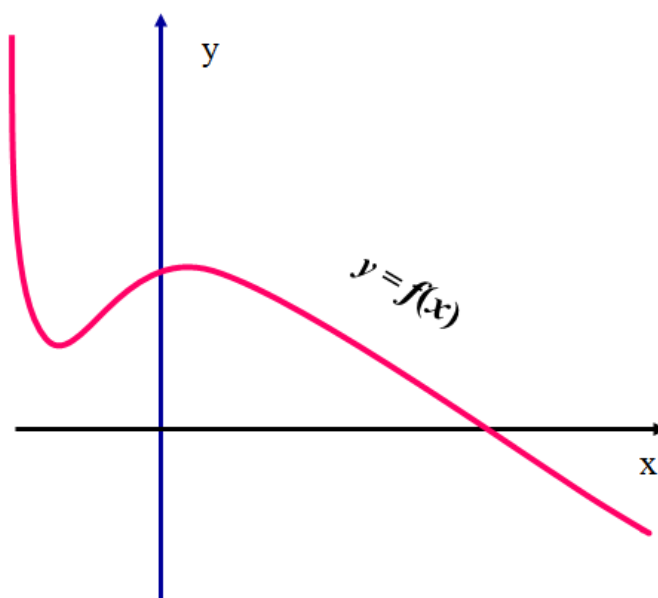


Рис. 8.3. График функции.

Наиболее общим способом задания функции является аналитический. В этом способе с помощью математических операций четко описывается правило f , по которому значениям аргумента x ставятся в соответствие значения функции y .

Пример. Рассмотрим функцию $y = f(x)$, заданную аналитически:

$y = \frac{x-5}{x^2-2x-3}$. Для каждого значения аргумента из области определения из заданной формулы можно найти соответствующее ему значение функции. Найдем значение функции для аргумента $x = 2$, для этого подставим число 2 вместо переменной x в указанную формулу: $y(2) = \frac{2-5}{2^2-2 \cdot 2-3} = \frac{-3}{-3} = 1$.

Любую функцию, заданную аналитически, можно всячески исследовать: найти значения функции для любых аргументов, определить область определения функции и множество значений, ее монотонность, области возрастания и убывания функции, экстремальные точки, выпуклость и перегибы графика функции.

8.1.3. Область определения функции

Областью определения функции $y = f(x)$ называется множество значений переменной x , при котором данная функция существует и обозначается $D(x)$.

Область определения функции $y = f(x)$ может представлять собой:

- *интервал* (открытый промежуток) – множество значений x , удовлетворяющих условию $a < x < b$, записывается $(a; b)$;
- *сегмент* (отрезок или замкнутый промежуток) – множество значений x , удовлетворяющих условию $a < x < b$, записывается $[a; b]$;
- *полуинтервал* – множество значений x , удовлетворяющих условиям $a \leq x < b$ или $a < x \leq b$, записываются $[a; b)$ или $(a; b]$;
- *бесконечный интервал* вида: $-\infty < x < +\infty$, $a < x < +\infty$, $-\infty < x < b$, $a \leq x < +\infty$, $-\infty < x \leq b$, записывается $(-\infty; +\infty)$, $(a; +\infty)$, $(-\infty; b)$, $[a; +\infty)$, $(-\infty; b]$;
- совокупность нескольких интервалов или сегментов и т.п.

Пример. Областью определения функции $y = 2x^3 - 3x^2 + 5x - 17$ является бесконечный интервал $(-\infty; +\infty)$.

Пример. Областью определения функции $y = \sqrt{4 - x^2}$ является сегмент $[-2; 2]$, поскольку под квадратным корнем могут быть только положительные числа.

Пример. Областью определения функции $y = \frac{x-5}{\sqrt{3-x}}$ является бесконечный интервал $(-\infty; 3)$.

Пример. Областью определения функции $y = \frac{x-5}{x^2 - 2x - 3}$ является объединение интервалов $(-\infty; -1) \cup (-1; 3) \cup (3; +\infty)$.

Множеством значений $E(x)$ данной функции является совокупность всех ее возможных значений, принимаемых данной функцией на области определения. Для определения множества значений функции необходимо детально исследовать функцию.

8.2. Основные свойства функций

8.2.1. Четность, нечетность функции

Функция $y = f(x)$ называется *четной*, если для любых значений аргументов x из ее области определения выполняется равенство $f(-x) = f(x)$. График четной функции расположен симметрично относительно оси ординат Oy (рис. 8.4).

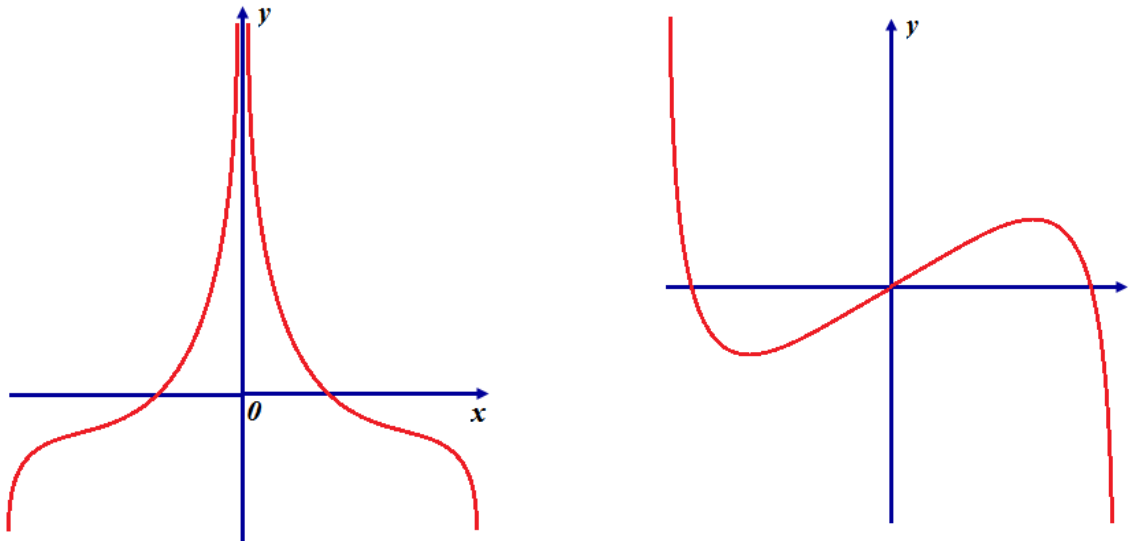


Рис. 8.4. Графики четной (слева) и нечетной (справа) функций.

Функция $f(x)$ называется *нечетной*, если для любых значений аргументов x из ее области определения выполняется равенство $f(-x) = -f(x)$. для любого значения x . График нечетной функции расположен симметрично относительно начала координат. Если оба этих условия не выполняются, то функция $y = f(x)$ называется *функцией общего вида*. Соответственно, график функции общего вида не будет симметричным ни относительно оси ординат, ни обладать центральной симметрией относительно начала координат.

Следует отметить области определений у четных и нечетных функций будут симметричны относительно точки 0 , а у функций общего вида это может не выполняться.

Пример. Определить вид функции $y = \frac{x^3}{x^2 - 1}$.

Найдем область определения данной функции. В нашем случае при аргументе равном -1 и 1 знаменатель дроби будет равен нулю, следовательно, $D(x) = (-\infty; -1) \cup (-1; 1) \cup (1; +\infty)$, область определения функции – симметрична. Подставим в правую часть равенства вместо x значение $-x$, раскроем скобки и вынесем минус из числителя дроби:

$$f(-x) = \frac{(-x)^3}{(-x)^2 - 1} = \frac{-x^3}{x^2 - 1} = -\frac{x^3}{x^2 - 1}.$$

Получившееся выражение отличается от первоначального только знаком перед дробью, то есть $f(-x) = -f(x)$, значит функция является нечетной.

Пример. Определить вид функции $y = 3\sin(x^4 + 3) + \cos x$.

Область определения функции $D(x) = (-\infty; +\infty)$ является симметричной. Подставив вместо аргумента $-x$, и учитывая, что $\cos(x) = \cos(-x)$, получим:

$$f(-x) = 3\sin((-x)^4 + 3) + \cos(-x) = 3\sin(x^4 + 3) + \cos x,$$

что полностью совпадает с выражением функции $f(-x) = f(x)$, а значит функция является четной.

Пример. Определить вид функции $y = \frac{2\log_7(x-1)}{x-2}$. Область определения функции $D(x) = (-\infty; 2) \cup (2; +\infty)$ не является симметричной относительно точки 0, следовательно функция общего вида.

8.2.2. Периодичность

Функция $y = f(x)$ называется *периодической*, если существует такое положительное число $T > 0$, что для любого значения x из области определения функции выполняется равенство $f(x + T) = f(x)$. Число T называют периодом функции. Периодическими бывают только функции, содержащие тригонометрические выражения.

Пример. Исследовать на периодичность функцию $y = 3\sin(2x + 3) - 8$.

Решим уравнение относительно переменной T , в левой части которого будет $f(x + T)$, а справа $f(x)$:

$$3\sin(2(x+T)+3)-8=3\sin(2x+3)-8$$

Упростим уравнение и разделим обе части уравнения на 3:

$$\sin(2(x+T)+3)=\sin(2x+3)$$

Так как функция $\sin$ периодична с периодом $2\pi k$, то из полученного равенства следует, что

$$2(x+T)+3=2x+3+2\pi k.$$

Раскроем скобки:

$$2x+2T+3=2x+3+2\pi k,$$

Затем, приведем подобные слагаемые:

$$2T=2\pi k,$$

Отсюда получим значение $T=\pi k$. Таким образом, исследуемая функция $y=3\sin(2x+3)-8$ является периодической с периодом πk .

8.2.3. Монотонность функции

Функция $y=f(x)$ называется *возрастающей* (*убывающей*) на промежутке X , если большему значению аргумента из этого промежутка соответствует большее (меньшее) значение функции.

Пусть $x_1, x_2 \in X$ и $x_2 > x_1$, тогда функция возрастает на промежутке X , если $f(x_2) > f(x_1)$, и убывает, если $f(x_2) < f(x_1)$. Функции возрастающие и убывающие называются *монотонными* функциями.

Пример. Функция $y=x^2+2x-3$ (рис. 8.5) убывает при $x \in (-\infty; 0]$ и возрастает при $x \in [0; +\infty)$.

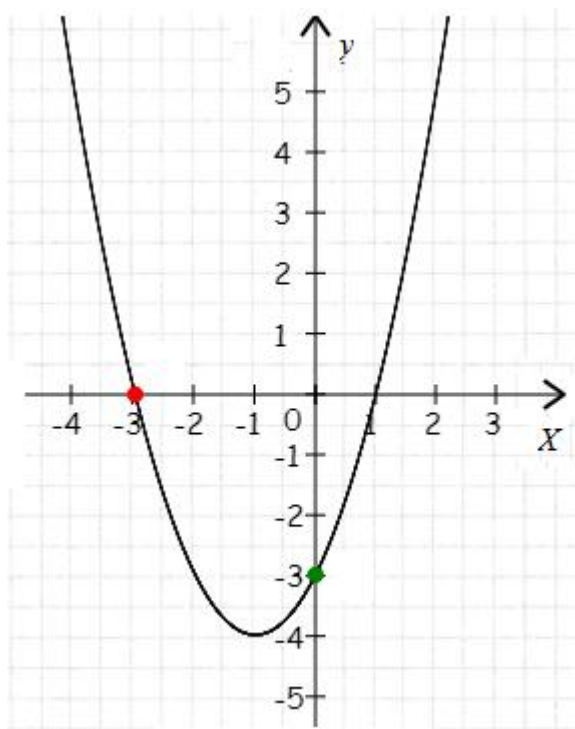


Рис. 8.5. График функции $y = x^2 + 2x - 3$.

Функция $y = f(x)$ называется *ограниченной* на промежутке X , если существует такое положительное число $M > 0$, что для всех $x \in X$ выполняется неравенство $|f(x)| \leq M$. В противном случае функция называется *неограниченной*.

Пример. Функция $y = 2\sin(x - 3) + 2$ (рис. 9.6) является ограниченной, так как ее минимальное значение равно нулю, а максимальное равно 4.

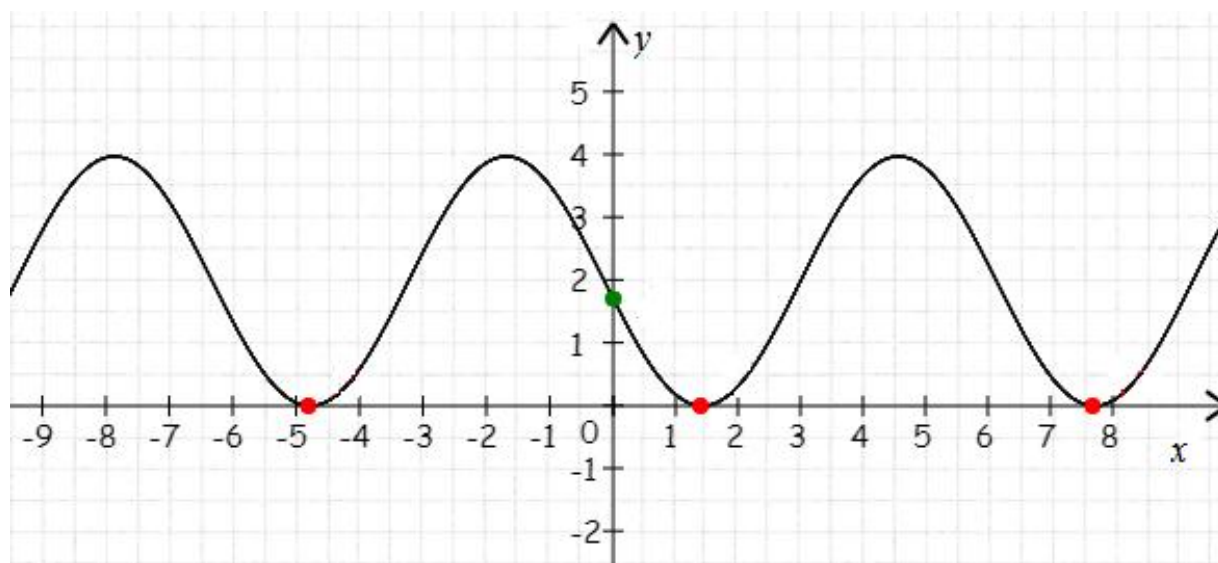


Рис. 8.6. График функции $y = 2\sin(x - 3) + 2$.

Пример. Функция $y=2^{x-1}-2$ (рис. 8.7) является неограниченной, так как при удалении аргумента x от начала координат вправо, значение функции $y = f(x)$ стремится к бесконечности.

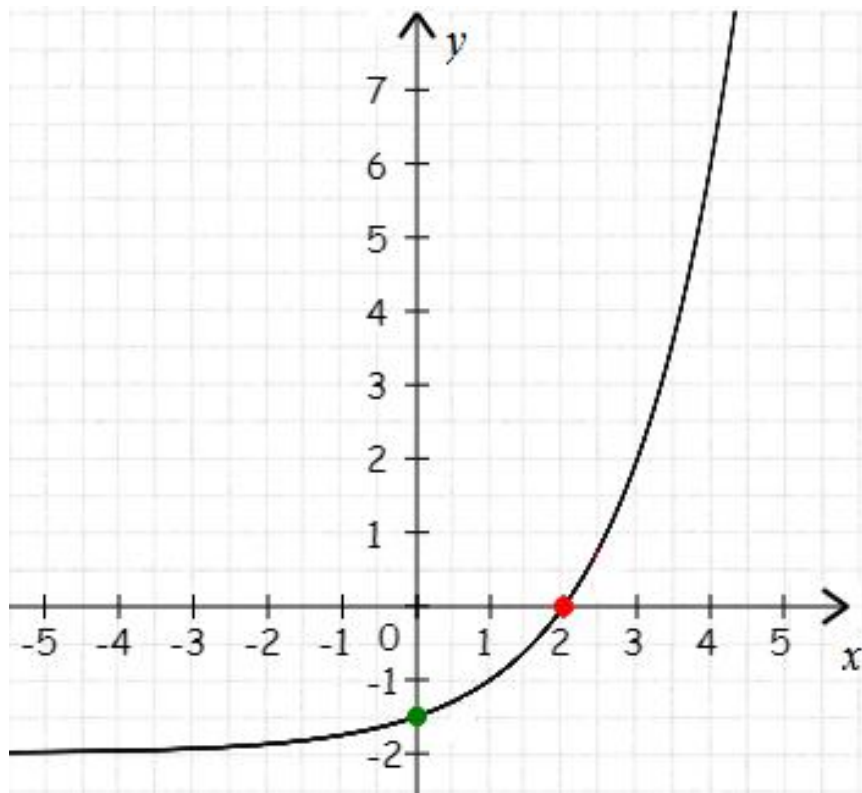


Рис. 8.7. График функции $y=2^{x-1}-2$.

8.3. Классификация функций

8.3.1. Явные и неявные функции

Функция $y = f(x)$ называется *явной*, если она задана равенством, в которой правая часть не содержит зависимой переменной. В противном случае функцию называют *неявной*. Часто неявная функция задается уравнением $F(x, y) = 0$, не разрешенным относительно зависимой переменной.

Пример. Функция $x^2 - y + 3x = 0$ задана неявно. Однако после преобразований данную функцию можно получить в явном виде. Если оставить переменную y слева от знака равенства, а остальные слагаемые перенести вправо и умножить уравнение на -1 , то получим выражение функции в явном виде: $x^2 - y + 3x = 0$.

8.3.2. Обратные функции

Пусть $y = f(x)$ является явной функцией от независимой переменной x , определенной на множестве X с областью значений Y . Поставим в соответствие каждому значению y из множества Y единственное значение $x \in X$, при котором $f(x) = y$. Тогда полученная функция $x = \varphi(y)$, определенная на множестве Y с областью значений X , называется *обратной*.

Однако для обратных функций приняты традиционные обозначения: y для функции и x для аргумента, поэтому вместо $x = \varphi(y)$ пишут $y = \varphi(x)$.

Графики взаимно обратных функций $y = f(x)$ и $y = \varphi(x)$ симметричны относительно прямой $y = x$.

Пример. Для функции $y = 3^x$ обратной будет функция $y = \log_3 x$.

Изобразим графики взаимно обратных функций $y = 3^x$ и $y = \log_3 x$ на одной координатной плоскости (рис. 8.8). Из рисунка видно, что графики взаимно обратных функций $y = 3^x$ и $y = \log_3 x$ симметричны относительно прямой $y = x$.

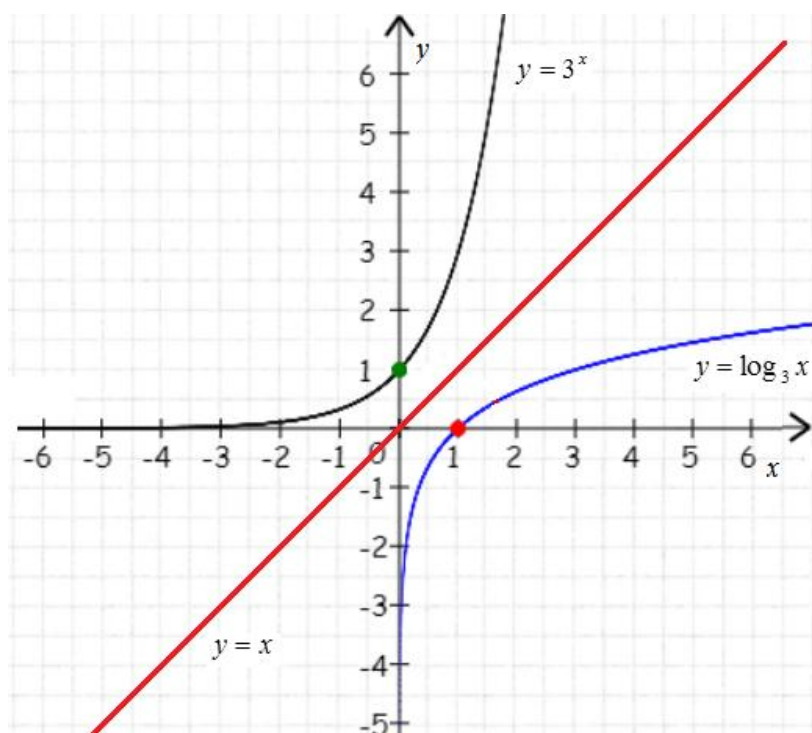


Рис. 8.8. Графики функций $y = 3^x$ и $y = \log_3 x$.

8.3.3. Сложные функции

Пусть $y = f(u)$ есть функция от переменной u , определенной на множестве U с областью значений Y , а переменная u в свою очередь является функцией $u = \varphi(x)$ от переменной x , определенной на множестве X с областью значений U . Тогда заданная на множестве X функция $y = f(\varphi(x))$ называется *сложной функцией (композицией функций)*.

Пример. Функция $y = \cos(2x - 5)$ является сложной функцией, где $y = \cos(u)$, а $u = 2x - 5$.

Из простых функций новые сложные функции могут быть получены двумя способами при помощи *алгебраических действий* и *операций образования сложной функции*.

8.3.4. Понятие элементарной функции

Функции, построенные из основных элементарных функций с помощью конечного числа алгебраических действий и конечного числа операций образования сложной функции, называются *элементарными*.

Пример. Функция $y = \left(\frac{\sin(x^3 - \cos 5x)}{\sqrt{\lg(4x - 2)}} \right)^{3x}$ является элементарной функцией.

Пример. Функция $y = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n!}{x^n} = \frac{1}{x} + \frac{2}{x^2} + \frac{6}{x^3} + \frac{24}{x^4} + \dots + \frac{n!}{x^n} + \dots$ элементарной функцией не является, так как она построена с помощью бесконечного числа алгебраических действий.

Все элементарные функции можно разделить на два класса: алгебраические и неалгебраические. На рисунке 8.9. представлена классификация элементарных функций.

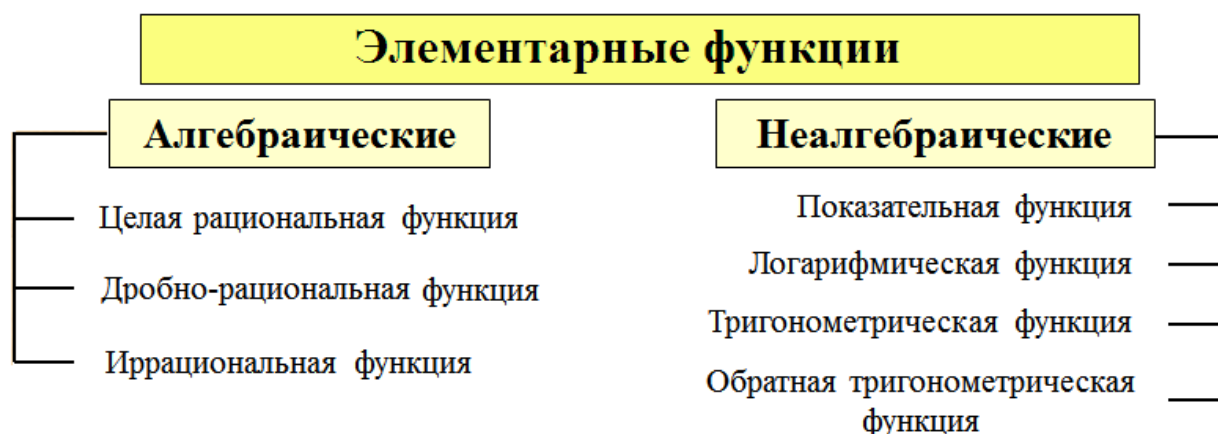


Рис. 8.9. Классификация элементарных функций.

Элементарная функция вида $y = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0$ называется *целой рациональной* функцией.

Пример. Функция $y = 2x^4 - 4x^3 + 7x^2 + 12x - 17$ является целой рациональной функцией.

Элементарная функция вида $y = \frac{a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0}{b_m x^m + b_{m-1} x^{m-1} + \dots + b_2 x^2 + b_1 x + b_0}$ называется *дробно-рациональной* функцией.

Пример. Функция $y = \frac{5x^3 - 6x}{x^2 + 2x - 3}$ является дробно-рациональной функцией.

Если для образования функции использована операция извлечения корня какой-либо степени, то такая функция называется *иррациональной алгебраической* функцией.

Пример. Функции $y = \sqrt[3]{x}$ и $y = (7x - 1)^{\frac{3}{5}}$ являются иррациональными алгебраическими функциями.

Функции, составленные из алгебраических функций, с помощью алгебраических операций или путем образования сложных функций также будут алгебраическими.

Пример. Функция $y = \frac{x\sqrt[7]{1-x^2}}{\left(\frac{x^4-2}{2x+3}\right)^{\frac{2}{5}}}$ является алгебраической функцией.

К неалгебраическим функциям относятся показательные, логарифмические, тригонометрические и обратные тригонометрические функции, а также сложные функции их содержащие.

Пример. Показательная функция $y = 2^{3x-5}$, логарифмическая функция $y = \log_5(5x^2 - 3x + 6)^3$, тригонометрическая функция $y = 6\sin^2(3x - 4)$ и обратная тригонометрическая функция $y = \operatorname{arctg}(x^2 - 1)$ являются неалгебраическими функциями.

Элементарные функции, содержащие хотя бы одну из неалгебраических функций, также являются неалгебраическими.

Пример. Дробная функция $y = \frac{3^{2x+2} + x^4}{\sin^2 5x}$ является неалгебраической функцией.

8.4. Понятие предела функции

8.4.1. Предел числовой последовательности

Если по некоторому закону каждому натуральному числу n поставлено в соответствие вполне определенное число a_n , то говорят, что задана *числовая последовательность* $\{a_n\}$: $a_1; a_2; \dots; a_n, \dots$.

Определение. Числа $a_1; a_2; \dots; a_n$ называют *членами* последовательности, а число a_n – *общим* или *n -м членом* данной последовательности.

Пример. Члены арифметической прогрессии: $-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6, 8, \dots$ образуют числовую последовательность с общим членом $a_n = -6 + 2(n - 1)$.

Пример. Члены геометрической прогрессии: $-256, 64, -16, 4, -1, 0,125, \dots$ образуют числовую последовательность с общим членом $a_n = -256 \cdot (-0,25)^{n-1}$.

Определение. Число A называется *пределом* числовой последовательности $\{a_n\}$, если для любого сколь угодно малого положительного числа $\varepsilon > 0$ найдется

такой номер N (зависящий от ε , $N=N(\varepsilon)$), что для всех членов последовательности с номерами $n > N$ верно неравенство $|a_n - A| < \varepsilon$.

Предел числовой последовательности обозначается: $\lim a_n = A$.

Пример. Члены геометрической прогрессии: 8, 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125, ... образуют числовую последовательность с общим членом $a_n = 8 \cdot 0,5^{(n-1)}$.

Предел этой числовой последовательности равен нулю.

Последовательность, имеющая предел, называется *сходящейся*, в противном случае – *расходящейся*.

Пример. Предел числовой последовательности 8, 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125, ..., члены которой образуют геометрическую прогрессию, равен нулю, следовательно, числовая последовательность будет сходящейся.

Пример. Числовая последовательность –6, –4, –2, 0, 2, 4, 6, 8, ..., члены которой образуют арифметическую прогрессию, не имеет предела, следовательно, числовая последовательность будет расходящейся.

Пример. Числа 1, 2, 6, 24, 120, 720, ..., образуют числовую последовательность с общим членом $a_n = n!$ не имеющую предела, следовательно, числовая последовательность будет расходящейся.

8.4.2. Предел функции в бесконечности

С понятием предела числовой последовательности $a_n = f(n)$ тесно связано понятие предела функции $y = f(x)$ в бесконечности. Если в первом случае переменная n , возрастая, принимает лишь целые значения, то во втором случае переменная x , изменяясь, принимает любые значения.

Определение. Число A называется пределом функции $y = f(x)$ при $x \rightarrow \infty$, если для любого сколь угодно малого положительного числа $\varepsilon > 0$ найдется такое положительное число $S > 0$ (зависящее от ε ; $S = S(\varepsilon)$), что для всех x , таких, что $|x| > S$, верно неравенство: $|f(x) - A| < \varepsilon$.

Предел функции обозначается: $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = A$.

Рассмотрим геометрический смысл предела функции в бесконечности (рис. 8.10).

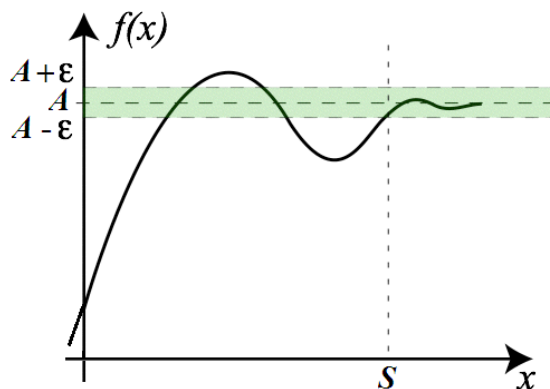


Рис. 8.10. Геометрический смысл предела функции в бесконечности.

Определение. Число A есть предел функции $y=f(x)$ при $x \rightarrow \infty$, если для любого $\varepsilon > 0$ найдется такое число $S > 0$, что для всех x , таких, что $|x| > S$, соответствующие ординаты графика функции $f(x)$ будут заключены в полосе $A - \varepsilon < y < A + \varepsilon$, какой бы узкой эта полоса ни была.

Пример. Найдём предел функции $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{2x+11}{x+5}$.

Для нахождения предела разделим числитель дроби на знаменатель и выделим целую часть. В итоге получим:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{2x+11}{x+5} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \left(2 + \frac{1}{x+5} \right).$$

Графиком этой функции является гипербола $y = \frac{1}{x}$, смещенная на 5 единиц влево и 2 единицы вверх (рис. 9.11).

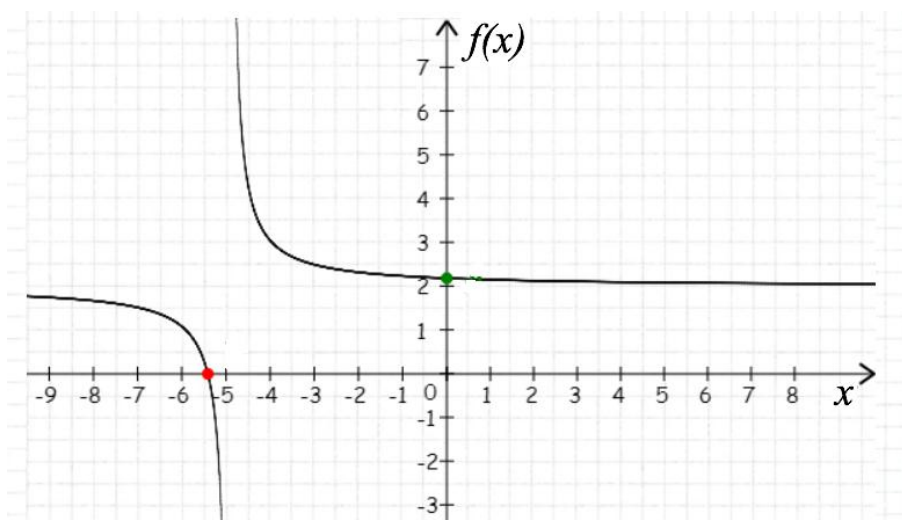


Рис. 8.11. График функции $f(x) = 2 + \frac{1}{x+5}$.

Следовательно, при $x \rightarrow \infty$ значение функции будет заключаться в полосе $(2-\varepsilon; 2+\varepsilon)$ и стремиться к двум. Таким образом,

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{2x+11}{x+5} = 2.$$

8.4.3. Предел функции в точке

Пусть функция $y=f(x)$ задана в некоторой окрестности точки x_0 , кроме, быть может, самой точки x_0 .

Определение. Число A называется пределом функции $y=f(x)$ при $x \rightarrow x_0$, если для любого сколь угодно малого положительного числа $\varepsilon > 0$ найдется такое положительное число $\delta > 0$ (зависящее от ε ; $\delta = \delta(\varepsilon)$), что для всех x , не равных x_0 и удовлетворяющих условию $|x-x_0| < \delta$, выполняется неравенство:

$$|f(x) - A| < \varepsilon.$$

Этот предел функции обозначается: $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = A$.

Рассмотрим геометрический смысл предела функции в точке (рис. 8.12).

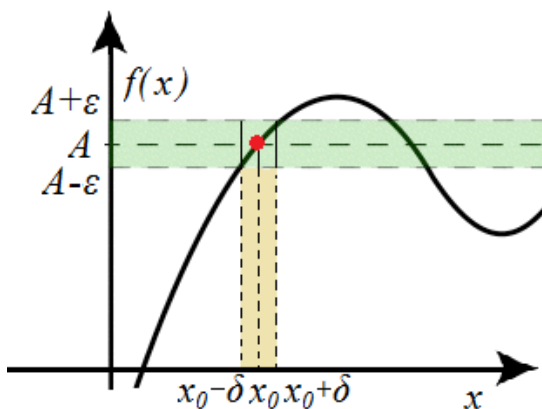


Рис. 8.12. Геометрический смысл предела функции в точке.

Число A есть предел функции $f(x)$ при $x \rightarrow x_0$, если для любого $\varepsilon > 0$ найдется такая δ -окрестность точки x_0 , что для всех $x \neq x_0$ из этой окрестности соответствующие ординаты графика функции $f(x)$ будут заключены в полосе $- \varepsilon < y < A + \varepsilon$, какой бы узкой эта полоса ни была.

Замечание 1. Определение предела не требует существования функции в самой точке x_0 , ибо рассматривает значения $x \neq x_0$ в некоторой окрестности точки x_0 .

Другими словами, рассматривая предел $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$, мы предполагаем, что x стремится к x_0 , но не достигает значения x_0 . Поэтому наличие или отсутствие предела при $x \rightarrow x_0$ определяется поведением функции в окрестности точки x_0 , но не связано со значением функции (или его отсутствием) в самой точке x_0 .

Пример. Найдем предел функции $\lim_{x \rightarrow 1} \frac{-(x-1)^3}{2x-2} + 4$.

Функция в точке $x=1$ не существует, так как при подстановке в $f(x)$ единицы знаменатель дроби обращается в ноль. В окрестности точки $x=1$ и слева и справа от точки $x=1$ функция существует, а числитель и знаменатель дроби можно сократить на выражение $x-1$. Приведя подобные слагаемые, получим:

$$\lim_{x \rightarrow 1} \frac{-(x-1)^3}{2x-2} + 4 = \lim_{x \rightarrow 1} \frac{-(x-1)^2}{2} + 4 = \lim_{x \rightarrow 1} \frac{-(x^2 - 2x + 1) + 8}{2} = \lim_{x \rightarrow 1} \frac{-x^2 + 2x + 7}{2}.$$

Таким образом, для всех значений $x \neq 1$ функцию $f(x) = \frac{-(x-1)^3}{2x-2} + 4$

можно заменить параболой $f(x) = \frac{-x^2 + 2x + 7}{2}$ (рис. 8.13).

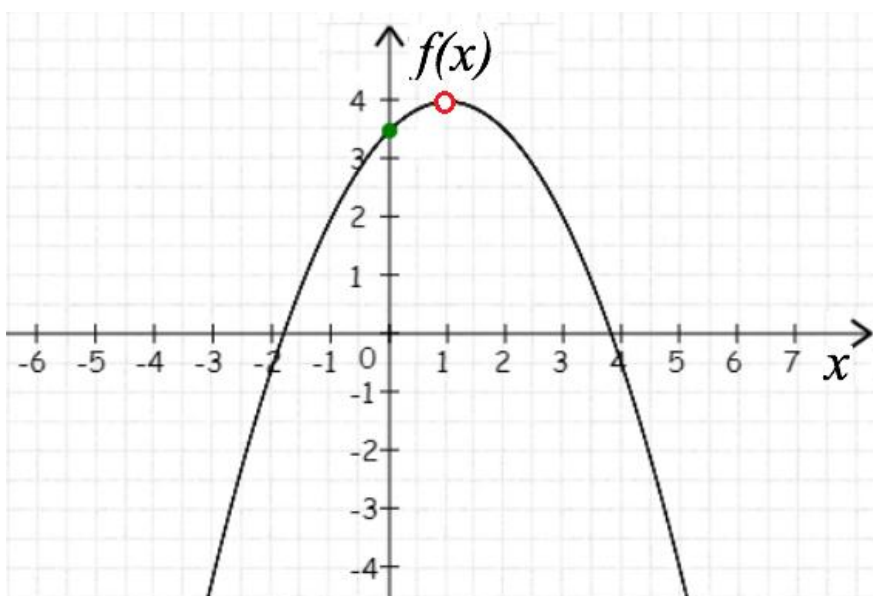


Рис. 8.13. График функции $f(x) = \frac{-(x-1)^3}{2x-2} + 4$.

Подставив в квадратный трехчлен вместо x единицу получим число 4.

Таким образом, $\lim_{x \rightarrow 1} \frac{-(x-1)^3}{2x-2} + 4 = 4$

Замечание 2. Если при стремлении x к x_0 переменная x принимает лишь значения, меньшие x_0 , или наоборот, лишь значения, большие x_0 , и при этом функция $f(x)$ стремится к некоторому числу A , то говорят об односторонних пределах функции $f(x)$ соответственно слева и справа:

$$f(x_0 - 0) = \lim_{x \rightarrow x_0 - 0} f(x) \text{ — левосторонний предел;}$$

$$f(x_0 + 0) = \lim_{x \rightarrow x_0 + 0} f(x) \text{ — правосторонний предел.}$$

Пример. Рассмотрим функцию $f(x) = \frac{\sqrt{x^2 + 2x - 3}}{x - 1}$.

Областью определения данной функции является объединение промежутков $(-\infty; -3] \cup (1; +\infty)$. В окрестности точки $x = 1$ функция существует только справа от нее, следовательно, в точке $x = 1$ мы можем рассматривать

только правосторонний предел: $\lim_{x \rightarrow 1+0} f(x) = \frac{\sqrt{x^2 + 2x - 3}}{x - 1}$.

8.5. Бесконечно малые и бесконечно большие величины

8.5.1. Бесконечно малые величины

Определение. Функция $\alpha(x)$ называется *бесконечно малой величиной* при $x \rightarrow x_0$ (или при $x \rightarrow \infty$), если ее предел равен нулю.

Пример. Функция $f(x) = \frac{x^2 - 4}{x + 2}$ является бесконечно малой величиной

при $x \rightarrow 2$, так как $\lim_{x \rightarrow 2} f(x) = \lim_{x \rightarrow 2} \frac{x^2 - 4}{x + 2} = \lim_{x \rightarrow 2} x - 2 = 0$.

Пример. Функция $f(x) = \frac{4}{x^3}$ является бесконечно малой величиной при

$x \rightarrow \infty$, так как $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{4}{x^3} = 0$.

Зная определение предела функции при $x \rightarrow x_0$ и при $x \rightarrow \infty$, можно дать развернутое определение бесконечно малой величины.

Определение. Функция $\alpha(x)$ называется *бесконечно малой величиной* при $x \rightarrow x_0$, если для любого сколь угодно малого положительного числа $\varepsilon > 0$ найдется такое положительное число $\delta > 0$ (зависящее от ε ; $\delta = \delta(\varepsilon)$), что для всех x , не равных x_0 и удовлетворяющих условию $|x - x_0| < \delta$, выполняется неравенство: $|\alpha(x)| < \varepsilon$.

Рассмотрим связь бесконечно малых величин с пределами функций.

Теорема 9.1. Если функция $f(x)$ имеет при $x \rightarrow x_0$ ($x \rightarrow \infty$) предел, равный A , то ее можно представить в виде суммы этого числа A и бесконечно малой $\alpha(x)$ при $x \rightarrow x_0$ ($x \rightarrow \infty$), т.е. $f(x) = A + \alpha(x)$.

Верна и обратная теорема.

Теорема 9.2. Если функцию $f(x)$ можно представить, как сумму числа A и бесконечно малой $\alpha(x)$ при $x \rightarrow x_0$ ($x \rightarrow \infty$), то число A есть предел этой функции при $x \rightarrow x_0$ ($x \rightarrow \infty$).

Свойства бесконечно малых величин

1. Алгебраическая сумма конечного числа бесконечно малых величин есть величина бесконечно малая.

Пример. Функции $y_1 = \frac{1}{x^2}$ и $y_2 = \frac{1}{x^3}$ являются бесконечно малыми величинами при $x \rightarrow \infty$.

Сумма этих величин $y_1 + y_2 = \frac{1}{x^2} + \frac{1}{x^3} = \frac{x+1}{x^3}$ также является бесконечно малой величиной при $x \rightarrow \infty$.

2. Произведение бесконечно малой величины на ограниченную функцию (в том числе на постоянную, на другую бесконечно малую) есть величина бесконечно малая.

Пример. Функцию $y = \frac{1}{x^3} \sin x$ при $x \rightarrow \infty$ можно представить как

произведение бесконечно малой величины $\frac{1}{x^2}$ на ограниченную функцию $\sin x$, следовательно, она является бесконечно малой величиной.

3. Частное от деления бесконечно малой величины на функцию, предел которой отличен от нуля, есть величина бесконечно малая.

Пример. Функция $y = \frac{x+5}{x^3(2x+11)}$ также является бесконечно малой

величиной при $x \rightarrow \infty$, так как она представляет собой частное от деления

бесконечно малой величины $\frac{1}{x^3}$ на функцию $\frac{2x+11}{x+5}$, предел которой

$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{2x+11}{x+5}$ равен двум.

8.5.2. Бесконечно большие величины

Определение. Функция $f(x)$ называется *бесконечно большой величиной* при $x \rightarrow x_0$, если для любого сколь угодно большого положительного числа $M > 0$ найдется такое положительное число $\delta > 0$ (зависящее от M ; $\delta = \delta(M)$), что для всех x , не равных x_0 и удовлетворяющих условию $|x - x_0| < \delta$, выполняется неравенство: $|f(x)| > M$.

Запись того, что функция $f(x)$ бесконечно большая при $x \rightarrow x_0$, следующая:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \infty.$$

Рассмотрим связь между бесконечно малыми и бесконечно большими величинами.

1. Если функция $\alpha(x)$ есть бесконечно малая величина при $x \rightarrow x_0$ ($x \rightarrow \infty$), то функция $f(x) = \frac{1}{\alpha(x)}$ является бесконечно большой при $x \rightarrow x_0$ ($x \rightarrow \infty$).

Пример. Функция $y = \frac{1}{x^2}$ является бесконечно малой величиной при $x \rightarrow \infty$.

Тогда функция $y = x^2$ при $x \rightarrow \infty$ будет бесконечно большой величиной.

Верно и обратное утверждение.

2. Если функция $f(x)$ бесконечно большая при $x \rightarrow x_0$ ($x \rightarrow \infty$), то функция

$\alpha(x) = \frac{1}{f(x)}$ является бесконечно малой при $x \rightarrow x_0$ ($x \rightarrow \infty$).

Пример. Функция $y = 2^x$ является бесконечно большой величиной при

$x \rightarrow \infty$. Тогда функция $y = \frac{1}{2^x}$ при $x \rightarrow \infty$ – величина бесконечно малая.

Свойства бесконечно больших величин

1. Произведение бесконечно большой величины на функцию, предел которой отличен от нуля, есть величина бесконечно большая.

Функция $y = \frac{1}{2x^2 - 18}$ является бесконечно большой величиной при $x \rightarrow 3$.

Тогда функция $y = \frac{5 \sin x}{2x^2 - 18}$ при $x \rightarrow 3$ также является бесконечно большой

функцией, как произведение бесконечно большой величины $y = \frac{1}{2x^2 - 18}$ при $x \rightarrow 3$ на функцию $y = 5 \sin x$, предел которой при $x \rightarrow 3$ отличен от нуля.

Пример. Функция $y = 3x^2 + 6x + 8$ является бесконечно большой

величиной при $x \rightarrow \infty$. Произведение $y \cdot \left(\frac{1}{x} + 1\right) = (3x^2 + 6x + 8) \cdot \left(\frac{1}{x} + 1\right)$ при $x \rightarrow \infty$

также будет бесконечно большой величиной, так как $\lim_{x \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{x} + 1\right) = 1$.

2. Сумма бесконечно большой величины и ограниченной функции есть величина бесконечно большая.

Пример. Функция $y = 3x^2 + 6x + 8$ является бесконечно большой

величиной при $x \rightarrow \infty$, тогда $y = 3x^2 + 6x + 8 + \cos 2x$ при $x \rightarrow \infty$ является бесконечно большой величиной, так как $\cos 2x$ является ограниченной функцией.

3. Частное от деления бесконечно большой величины на функцию, имеющую предел, не равный бесконечности, есть величина бесконечно большая.

Пример. Функция $y = 3x^2 + 6x + 8$ является бесконечно большой величиной при $x \rightarrow \infty$, тогда $y = \frac{3x^2 + 6x + 8}{\frac{x^2 + 3}{2x^2}}$ также бесконечно большая величина при $x \rightarrow \infty$, так как $\lim_{x \rightarrow +\infty} \left(\frac{x^2 + 3}{2x^2} \right) = \frac{1}{2}$.

8.5.3. Сравнение бесконечно малых и бесконечно больших величин

Пусть при $x \rightarrow x_0$ функции $\alpha(x)$ и $\beta(x)$ являются бесконечно малыми величинами, тогда:

1. Если $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\alpha(x)}{\beta(x)} = 0$, то функция $\alpha(x)$ является бесконечно малой величиной более высокого порядка, чем функция $\beta(x)$.

Пример. Функция $y = \frac{1}{3x^2 + 6x + 1}$ является бесконечно малой величиной более высокого порядка, чем функция $y = \frac{1}{x}$ при $x \rightarrow \infty$, так как

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{3x^2 + 6x + 1}}{\frac{1}{x}} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x}{3x^2 + 6x + 1} = 0.$$

2. Если $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\alpha(x)}{\beta(x)} = A \neq 0$, то $\alpha(x)$ и $\beta(x)$ являются бесконечно малыми величинами одного порядка.

Пример. Функции $y = \sin 5x$ и $y = \sin x$ при $x \rightarrow 0$ являются бесконечно малыми одного порядка, так как

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin 5x}{\sin x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{\sin 5x}{5x}}{\frac{\sin x}{5x}} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{5 \frac{\sin 5x}{5x}}{\frac{\sin x}{5x}} = 5 \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin 5x}{5x} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x}{\sin x} = 5.$$

3. Если $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\alpha(x)}{\beta(x)} = 1$, то $\alpha(x)$ и $\beta(x)$ являются эквивалентными бесконечно

малыми величинами. Эквивалентность бесконечно малых величин $\alpha(x)$ и $\beta(x)$ обозначается: $\alpha(x) \sim \beta(x)$.

Пример. Функции $y = \sin x$ и $y = x$ являются при $x \rightarrow 0$ эквивалентными бесконечно малыми, так как

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1.$$

4. Для оценки порядков двух бесконечно малых величин можно придерживаться следующего правила.

Если $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\alpha(x)}{\beta^n(x)} = A \neq 0$, то $\alpha(x)$ является бесконечно малой величиной n -

го порядка относительно $\beta(x)$.

Пример. Функция $y = 1 - \cos x$ является при $x \rightarrow 0$ бесконечно малой второго порядка относительно бесконечно малой величины $y = x$, так как

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos x}{x^2} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{2 \sin^2\left(\frac{x}{2}\right)}{x^2} = \frac{1}{2} \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{\sin\left(\frac{x}{2}\right)}{\left(\frac{x}{2}\right)} \right)^2 = \frac{1}{2}.$$

Аналогичные правила сравнения можно использовать и для бесконечно больших величин.

Пример. Функция $y = x - 2$ является бесконечно большой более низкого порядка, чем $y = 2x^4 - x + 7$ при $x \rightarrow \infty$, так как

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x - 2}{2x^4 - x + 7} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1 - 2/x}{2x^3 - 1 + 7/x} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{2x^3 - 1} = 0.$$

Пример. Функции $y = x^2 + 3$ и $y = 5x^2 - 4x + 5$ при $x \rightarrow \infty$ являются бесконечно большими величинами одного порядка, так как

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x^2 + 3}{5x^2 - 4x + 5} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1 + 3/x^2}{5 - 4/x + 5/x^2} = \frac{1}{5}.$$

Функция $y = x^3 - 4$ является бесконечно большой третьего порядка по отношению к бесконечно большой $y = 2x$ при $x \rightarrow \infty$, так как

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x^3 - 4}{(2x + 1)^3} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x^3 - 4}{8x^3 + 12x^2 + 6x + 1} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1 - 4/x^3}{8 + 12/x + 6/x^2 + 1/x^3} = \frac{1}{8}.$$

8.6. Основные теоремы о пределах

8.6.1. Свойства пределов

Пусть $f(x)$ и $\varphi(x)$ – функции, для которых существует предел при $x \rightarrow x_0$ (или при $x \rightarrow \infty$): $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = A$, $\lim_{x \rightarrow x_0} \varphi(x) = B$, тогда:

1. Функция не может иметь более одного предела.
2. Предел алгебраической суммы (разности) конечного числа функций равен такой же сумме (разности) пределов этих функций:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} [f(x) \pm \varphi(x)] = \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) \pm \lim_{x \rightarrow x_0} \varphi(x) = A \pm B.$$

Пример. Если $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{3x} = \frac{1}{3}$, а $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos x}{x^2} = \frac{1}{2}$, то предел суммы функций

$\frac{\sin x}{3x} + \frac{1 - \cos x}{x^2}$ при $x \rightarrow 0$ будет равен

$$\lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{\sin x}{3x} + \frac{1 - \cos x}{x^2} \right) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{3x} + \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos x}{x^2} = \frac{1}{3} + \frac{1}{2} = \frac{5}{6}.$$

3. Предел произведения конечного числа функций равен произведению пределов этих функций, в частности:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} [f(x) \cdot \varphi(x)] = \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) \cdot \lim_{x \rightarrow x_0} \varphi(x) = A \cdot B.$$

А в случае константы:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} [c \cdot f(x)] = c \cdot \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = c \cdot A.$$

Пример. Предел произведения $\frac{\sin x}{3x} \cdot \frac{1 - \cos x}{x^2}$ при $x \rightarrow 0$ равен:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{\sin x}{3x} \cdot \frac{1 - \cos x}{x^2} \right) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{3x} \cdot \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos x}{x^2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{6}.$$

4. Предел частного двух функций равен частному пределов этих функций:

$$\lim_{x \rightarrow x_0 (\infty)} \frac{f(x)}{\varphi(x)} = \frac{\lim_{x \rightarrow x_0 (\infty)} f(x)}{\lim_{x \rightarrow x_0 (\infty)} \varphi(x)} = \frac{A}{B} \quad (B \neq 0).$$

Пример. Предел частного $\frac{\sin x}{3x} : \frac{1 - \cos x}{x^2}$ при $x \rightarrow 0$ равен:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{\sin x}{3x} : \frac{1 - \cos x}{x^2} \right) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{3x} : \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos x}{x^2} = \frac{1}{3} : \frac{1}{2} = \frac{2}{3}.$$

5. Предел показательно-степенной функции равен пределу основания, возведенного в степень предела степени:

$$\lim_{x \rightarrow a} [f(x)^{g(x)}] = \lim_{x \rightarrow a} f(x)^{\lim_{x \rightarrow a} g(x)} = A^B.$$

Пример. Предел показательно-степенной функции $\left(\frac{\sin x}{3x} \right)^{\frac{1 - \cos x}{x^2}}$ при $x \rightarrow 0$

равен:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \left(\left(\frac{\sin x}{3x} \right)^{\frac{1 - \cos x}{x^2}} \right) = \left(\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{3x} \right)^{\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos x}{x^2}} = \left(\frac{1}{3} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}}{3}.$$

6. Если $\lim_{u \rightarrow u_0} f(u) = A$, $\lim_{x \rightarrow x_0} \varphi(x) = u_0$, то предел сложной функции

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f[\varphi(x)] = A.$$

Пример. Пусть $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{3x} = \frac{1}{3}$, а $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x}{x^2 - 1} = 0$, тогда

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\sin \left(\frac{x}{x^2 - 1} \right)}{\frac{x}{x^2 - 1}} = \frac{1}{3}.$$

8.6.2. Признаки существования пределов

С помощью признаков существования предела можно выяснить вопроса о существовании предела использовать определения предела, сформулированные выше, не всегда удобно.

Теорема 9.3. Если числовая последовательность $\{a_n\}$ монотонна и ограничена, то она имеет предел.

Пример. Числа 257, 65, 17, 5, 2, 1,125, ... образуют числовую последовательность с общим членом $a_n = 256 \cdot 0,25^{n-1} + 1$. Очевидно, данная последовательность монотонно убывает и ограничена числом 1. Следовательно, она имеет предел равный единице.

Теорема 9.4. Если в некоторой окрестности точки x_0 (или при $x \rightarrow \infty$) функция $f(x)$ заключена между двумя функциями $\varphi(x)$ и $\psi(x)$, имеющими одинаковый предел A при $x \rightarrow x_0$ (или при $x \rightarrow \infty$), то функция $f(x)$ имеет тот же предел A .

Пример. Функция $y = \frac{x}{x^2 + 1}$ заключена между функциями $y = \frac{1}{x}$ и $y = 0$, имеющими при $x \rightarrow \infty$ одинаковый предел, равный нулю, следовательно,

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x}{x^2 + 1} = 0.$$

8.6.3. Замечательные пределы

На практике при вычислении пределов применяются следующие пределы, которые принято называть *замечательными*:

$$1. \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1 \quad (\text{первый замечательный предел});$$

$$2. \lim_{x \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{x}\right)^x = \lim_{\alpha \rightarrow 0} (1 + \alpha)^{\frac{1}{\alpha}} = e, \quad (\text{второй замечательный предел})$$

где $e = 2,71828182... .$

Пример. Найти предел функции: $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{2 \sin 3x}{5x}$.

Для нахождения предела функции числитель и знаменатель дроби умножим на 3 и вынесем множитель $\frac{6}{5}$ за знак предела:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{2 \sin 3x}{5x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{3 \cdot 2 \sin 3x}{5 \cdot 3x} = \frac{6}{5} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin 3x}{3x}.$$

Теперь наш предел полностью соответствует первому замечательному

пределу, следовательно, все выражение будет равно 1,2:

$$\frac{6}{5} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin 3x}{3x} = \frac{6}{5} \cdot 1 = \frac{6}{5} = 1,2.$$

Пример. Найти предел функции: $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\operatorname{tg} 5x}{2x}$.

Для нахождения предела функции числитель и знаменатель дроби умножим на 5 и вынесем множитель $\frac{5}{2}$ за знак предела:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\operatorname{tg} 5x}{2x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{5 \operatorname{tg} 5x}{5 \cdot 2x} = \frac{5}{2} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\operatorname{tg} 5x}{5x}.$$

Учитывая, что $\operatorname{tg} 5x = \frac{\sin 5x}{\cos 5x}$ и $\cos 0 = 1$ получим:

$$\frac{5}{2} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\operatorname{tg} 5x}{5x} = \frac{5}{2} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin 5x}{5x \cos 5x} = \frac{5}{2} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin 5x}{5x \cdot 1} = \frac{5}{2} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin 5x}{5x} = \frac{5}{2}.$$

Следовательно, значение предела $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\operatorname{tg} 5x}{2x}$ будет равно $\frac{5}{2}$.

Пример. Найти предел: $\lim_{x \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{2}{3x}\right)^{6x}$.

Преобразуем функцию, предел которой необходимо найти:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{2}{3x}\right)^{6x} = \lim_{x \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{\frac{3}{2}x}\right)^{\frac{3}{2}x \cdot 4} = \lim_{x \rightarrow \infty} \left(\left(1 + \frac{1}{\frac{3}{2}x}\right)^{\frac{3}{2}x} \right)^4 = \left(\lim_{x \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{\frac{3}{2}x}\right)^{\frac{3}{2}x} \right)^{\lim_{x \rightarrow \infty} 4}.$$

Выражение в скобках является вторым замечательным пределом и равно e , а предел $\lim_{x \rightarrow \infty} 4$ равен четырем. Учитывая это, получим значение предела:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{2}{3x}\right)^{6x} = e^4.$$

8.7. Непрерывность функции

Определение. Функция $y = f(x)$ называется *непрерывной в точке x_0* , если она определена в точке x_0 , имеет конечный предел функции при $x \rightarrow x_0$ и этот предел равен значению функции в точке x_0 : $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$.

Функция является непрерывной на интервале или сегменте, если она непрерывна в каждой точке исследуемой области.

Определение. Точка x_0 называется *точкой разрыва функции $f(x)$* , если эта функция в данной точке не является непрерывной.

Если существуют три конечных предела: $\lim_{x \rightarrow x_0 - 0} f(x)$, $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$ и $\lim_{x \rightarrow x_0 + 0} f(x)$, и хотя бы одно из значений пределов не равно другим, то точка x_0 называется *точкой разрыва 1-го рода*.

В случае, если левый и правый пределы функции в точке x_0 равны между собой: $\lim_{x \rightarrow x_0 - 0} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0 + 0} f(x)$, но не равны $f(x)$, то x_0 называется *устранимой точкой разрыва*.

Пример. Для функции $y = \frac{\sin x}{x}$ значение аргумента $x = 0$ является *устранимой точкой разрыва*, так как значение функции в точке $x_0 = 0$ не определено, а $\lim_{x \rightarrow 0 - 0} \frac{\sin x}{x} = \lim_{x \rightarrow 0 + 0} \frac{\sin x}{x} = 1$.

В случае, если левосторонний и правосторонний пределы не равны между собой, то точка разрыва называется *неустранимой*.

Во всех остальных случаях, когда хотя бы один из пределов $\lim_{x \rightarrow x_0 - 0} f(x)$ или $\lim_{x \rightarrow x_0 + 0} f(x)$ не определен или равен бесконечности, точки разрыва считаются *точками разрыва второго рода*.

Пример. Для функции $y = \frac{1}{x-2}$ значение аргумента $x = 2$ является точкой разрыва второго рода, так как левосторонний предел функции в точке $x = 2$ равен $+\infty$, а правосторонний $-\infty$.

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте понятие функции одной переменной. Какое соответствие можно назвать функцией?
2. Перечислите способы задания функций. Какой способ задания функции вы считаете наиболее эффективным?
3. Как определяется область определения функции? Что является множеством значений функции одной переменной?
4. Какие основные свойства функций одной переменной вы знаете?
5. Какие особенности имеют графики четных и нечетных функций?
Начертите графики четных и нечетных функций.
6. Как вы понимаете понятия «монотонность» и «ограниченность».
Приведите примеры монотонных и ограниченных функций.
7. Каким образом можно определить периодичность функции и вычислить ее период?
8. Чем отличаются явные функции от неявных? Приведите примеры записей таких функций.
9. Дайте понятия сложной и обратной функции. Приведите примеры сложных и обратных функций.
10. Какие функции называются элементарными? Приведите классификацию элементарных функций.
11. Дайте определение пределу числовой последовательности. Какие числовые последовательности являются сходящимися, а какие расходящимися?
12. Что представляет собой предел функции в бесконечности. Каков геометрический смысл предела функции в бесконечности?

13. Дайте определение предела функции в точке. Каков геометрический смысл предела функции в точке? Чем отличаются левосторонние и правосторонние пределы?

14. Перечислите основные свойства бесконечно малых величин. С помощью примеров проиллюстрируйте перечисленные свойства.

15. Перечислите основные свойства бесконечно больших величин. С помощью примеров проиллюстрируйте перечисленные свойства.

16. Какая связь существует между бесконечно малыми и бесконечно большими величинами.

17. Какие признаки сравнения бесконечно малых и бесконечно больших величин вы знаете?

18. Перечислите изученные признаки существования предела.

19. На примерах продемонстрируйте 1-й и 2-й замечательные пределы.

20. Какие функции называются непрерывными? Приведите классификацию точек разрыва функции.

Глава 9. Дифференциальное исчисление функции одной переменной

Дифференцирование функций является одной из важнейших задач математики. В различных областях научных исследований, инженерных и производственных расчетах, производная функции используется всюду для изучения неравномерного протекания процессов. Это может быть механическое движение, ток в электрической цепи, химические реакции, радиоактивный распад вещества, факторы социальных, экономических явлений в человеческом обществе.

В данной главе мы предложим определение производной, ее геометрический смысл, познакомимся с понятием дифференцирования функции, рассмотрим основные формулы дифференцирования, правила дифференцирования, методы нахождения производной сложной функции, обратной функции, алгоритмы нахождения производных высших порядков. Для нахождения пределов функций, представляющих неопределенности вида $\left[\frac{0}{0} \right]$

или $\left[\frac{\infty}{\infty} \right]$, познакомимся с правилом Лопиталья.

Также мы рассмотрим методы нахождения нулей функции с помощью графической и аналитической локализации корней, введем понятие асимптот функции, изучим принципы определения вертикальных и наклонных асимптот, предложим алгоритмы исследования функций с помощью первой и второй производной, изучим необходимые и достаточные условия возрастания и убывания функции, существования экстремальных значений, выпуклости вогнутости функции, точек перегиба, определим общую схему исследования функций и предложим примеры исследования конкретных функций.

9.1. Основные понятия дифференциального исчисления

9.1.1. Определение производной

Пусть функция $y = f(x)$ определена и непрерывна на промежутке X . Возьмем произвольную точку $x \in X$ из области определения функции и дадим значению x приращение $\Delta x \neq 0$, тогда функция $y = f(x)$ получит приращение:

$$\Delta y = f(x + \Delta x) - f(x) \quad (9.1)$$

Определение. Производной функции $y = f(x)$ называется предел отношения приращения функции Δy к приращению аргумента Δx при стремлении последнего к нулю (если этот предел существует):

$$y' = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (9.2)$$

Обычно производная функции $y = f(x)$ обозначается следующим образом: y' , $f'(x)$, $\frac{dy}{dx}$, $\frac{df(x)}{dx}$.

Нахождение производной функции $y = f(x)$ называется дифференцированием этой функции.

Пример. Используя определение производной (10.2) найдем производную функции $f(x) = 3x^2$.

Определим сначала приращение функции (10.1) в произвольной точке x :

$$\begin{aligned} \Delta y &= f(x + \Delta x) - f(x) = 3(x + \Delta x)^2 - 3x^2 = 3x^2 + 6x\Delta x + 3(\Delta x)^2 - 3x^2 = \\ &= 6x\Delta x + 3(\Delta x)^2. \end{aligned}$$

По формуле (5.2) найдем производную в точке x :

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{6x\Delta x + 3(\Delta x)^2}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta x(6x + 3\Delta x)}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} (6x + 3\Delta x) = 6x.$$

Мы видим, что по определению (10.2) найти производную даже очень простой функции $f(x) = 3x^2$ оказалось достаточно трудоемко.

9.1.2. Геометрический смысл производной

Пусть на плоскости Oxy дана непрерывная кривая $y=f(x)$ и необходимо найти уравнение касательной к этой кривой в точке $M_0(x_0; y_0)$. Дадим аргументу x_0 приращение Δx (рис. 10.1) и перейдем на кривой $y = f(x)$ от точки $M_0(x_0; f(x_0))$ к точке $M_1(x_0 + \Delta x; f(x_0 + \Delta x))$. Проведем секущую M_0M_1 .

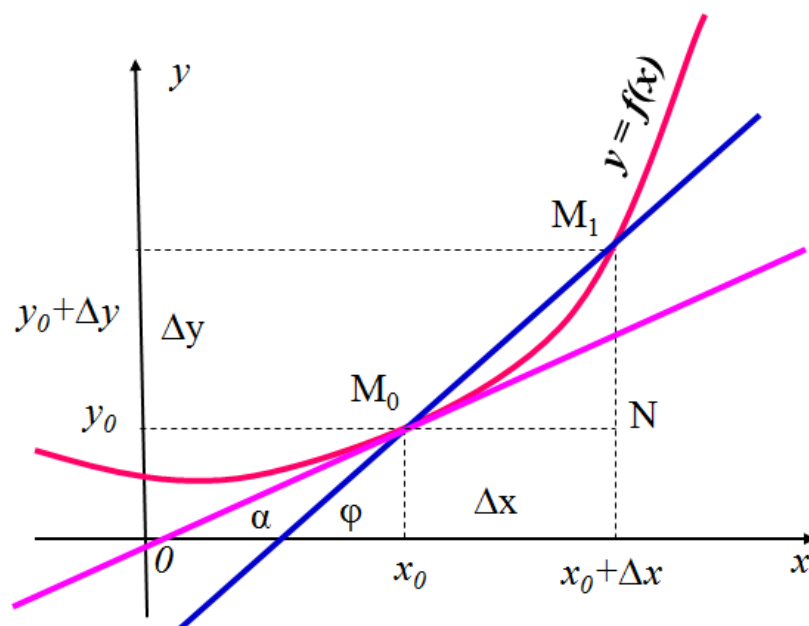


Рис. 9.1. Геометрический смысл производной.

Под касательной к кривой $y=f(x)$ в точке M_0 будем понимать предельное положение секущей M_0M_1 при приближении точки M_1 к точке M_0 , т.е. при $\Delta x \rightarrow 0$. Уравнение прямой, проходящей через точку M_0 имеет вид:

$$y - f(x_0) = k (x - x_0).$$

Угловым коэффициентом или тангенсом угла φ наклона секущей $k_{M_1M_0}$ может быть найден из $\triangle M_0M_1N$: $k_{M_1M_0} = \operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta y}{\Delta x}$, тогда переходя к предельному положению прямой M_0M_1 при $\Delta x \rightarrow 0$, получим тангенс угла касательной к функции $y=f(x)$ в точке x_0 :

$$\operatorname{tg} \varphi = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = f'(x_0). \quad (9.3)$$

Таким образом, производная равна тангенсу угла наклона касательной к кривой в точке определения производной.

9.2. Дифференцирование функций

Дифференцировать по определению функции, даже очень простые – довольно трудоемкое занятие. Гораздо эффективнее использовать готовые формулы для нахождения производных элементарных функций и правила дифференцирования.

9.2.1. Основные формулы дифференцирования

Приведем готовые формулы для дифференцирования основных элементарных функций:

$$(x^m)' = mx^{m-1}$$

$$(e^x)' = e^x$$

$$(a^x)' = a^x \ln a$$

$$(\log_a x)' = \frac{1}{x \ln a}$$

$$(\sin x)' = \cos x$$

$$(\cos x)' = -\sin x$$

$$(\operatorname{tg} x)' = \frac{1}{\cos^2 x}$$

$$(\operatorname{ctg} x)' = -\frac{1}{\sin^2 x}$$

$$(\arcsin x)' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$$

$$(\arccos x)' = -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$$

$$(\operatorname{arctg} x)' = \frac{1}{1+x^2}$$

$$(\operatorname{arcctg} x)' = -\frac{1}{1+x^2}$$

С помощью основных формул дифференцирования можно найти только производные основных функций.

Пример. Найдем производную функции $y = x^4$.

Для нахождения производной воспользуемся формулой $(x^m)' = mx^{m-1}$.

$$y' = (x^4)' = 4x^{4-1} = 4x^3.$$

Пример. Найдем производную функции $y = \log_7 x$.

Сейчас воспользуемся формулой $(\log_a x)' = \frac{1}{x \ln a}$.

$$y' = (\log_7 x)' = \frac{1}{x \ln 7}.$$

9.2.2. Правила дифференцирования

Для нахождения производных можно также использовать основные правила дифференцирования:

1. Производная постоянной равна нулю:

$$C' = 0.$$

Пример. Найдем производную функции $y = -20$.

Используя свойство $C' = 0$, получим

$$y' = (-20)' = 0.$$

2. Производная аргумента равна 1:

$$x' = 1.$$

3. Производная алгебраической суммы (разности) конечного числа дифференцируемых функций равна такой же сумме (разности) производных этих функций:

$$(u \pm v)' = u' \pm v'.$$

Пример. Найдем производную функции $y = x^4 + 3x^3 - 5x^2 + 2x - 6$.

Применяя свойство производной алгебраической суммы (разности) конечного числа дифференцируемых функций, получим:

$$\begin{aligned} y' &= (x^4 + 3x^3 - 5x^2 + 2x - 6)' = (x^4)' + (3x^3)' - (5x^2)' + (2x)' - (6)' = \\ &= 4x^3 + 9x^2 - 10x + 2. \end{aligned}$$

Пример. Найдем производную функции $y = 3x^2 + \sin x$.

$$y' = (3x^2 + \sin x)' = (3x^2)' + (\sin x)' = 3 \cdot 2x + \cos x = 6x + \cos x.$$

4. Производная произведения двух дифференцируемых функций равна произведению производной первого сомножителя на второй плюс произведение первого сомножителя на производную второго:

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

Пример. Найдем производную функции $y = \cos x \cdot \log_3 x$.

Применяя свойство производной произведения двух дифференцируемых функций, получим:

$$\begin{aligned} y' &= (\cos x \cdot \log_3 x)' = (\cos x)' \cdot \log_3 x + \cos x \cdot (\log_3 x)' = \\ &= -\sin x \cdot \log_3 x + \cos x \cdot \frac{1}{x \ln 3}. \end{aligned}$$

Пример. Найдем производную функции $y = (3x^2 + 5)e^x$.

$$y' = ((3x^2 + 5)e^x)' = (3x^2 + 5)' \cdot e^x + (3x^2 + 5) \cdot (e^x)' = 6xe^x + (3x^2 + 5)e^x =$$

$$= (3x^2 + 6x + 5)e^x.$$

Следствие 1. Постоянный множитель можно выносить за знак производной: $(cu)' = cu'$.

Пример. Найдем производную функции $y = 3x^5$.

Используя следствие 1, получим:

$$y' = (3x^5)' = 3(x^5)' = 3 \cdot 5x^4 = 15x^4.$$

Следствие 2. Производная произведения нескольких дифференцируемых функций равна сумме произведений производной каждого из сомножителей на все остальные.

Пример. Найдем производную функции $y = x^2 \cdot \sin x \cdot 3^x$.

Согласно следствию 2 производная произведения трех функций u , v и w равна:

$$(uvw)' = u'vw + uv'w + uvw'.$$

Учитывая это, найдем y' :

$$\begin{aligned} y' &= (x^2 \cdot \sin x \cdot 3^x)' = (x^2)' \cdot \sin x \cdot 3^x + x^2 \cdot (\sin x)' \cdot 3^x + x^2 \cdot \sin x \cdot (3^x)' = \\ &= 2x \cdot \sin x \cdot 3^x + x^2 \cdot \cos x \cdot 3^x + x^2 \cdot \sin x \cdot 3^x \ln 3. \end{aligned}$$

5. Производная частного двух дифференцируемых функций может быть найдена по формуле:

$$\left(\frac{u}{v} \right)' = \frac{u'v - uv'}{v^2}.$$

Пример. Найти производную функции $y = \left(\frac{3x^2 - 5}{x} \right)'$.

$$\begin{aligned} y' &= \left(\frac{3x^2 - 5}{x} \right)' = \frac{(3x^2 - 5)' \cdot x - (3x^2 - 5) \cdot x'}{x^2} = \frac{6x \cdot x - (3x^2 - 5) \cdot 1}{x^2} = \\ &= \frac{6x^2 - 3x^2 + 5}{x^2} = \frac{3x^2 + 5}{x^2}. \end{aligned}$$

Пример. Найти производную функции $y = \frac{\arcsin x}{3x-2}$.

$$\begin{aligned} y' &= \left(\frac{\arcsin x}{3x-2} \right)' = \frac{(\arcsin x)' \cdot (3x-2) - \arcsin x \cdot (3x-2)'}{(3x-2)^2} = \\ &= \frac{\frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \cdot (3x-2) - \arcsin x \cdot 3}{(3x-2)^2} = \frac{3x-2-3\sqrt{1-x^2} \arcsin x}{(3x-2)^2 \sqrt{1-x^2}}. \end{aligned}$$

9.3. Методы нахождения производных

9.3.1. Производная сложной функции

Пусть переменная y есть функция от переменной u ($y=f(u)$), а переменная u в свою очередь есть функция от независимой переменной x , т.е. задана сложная функция $y=f[\varphi(x)]$.

Теорема 10.1. Если $y=f(u)$ и $u=\varphi(x)$ – дифференцируемые функции от своих аргументов, то производная сложной функции существует и равна производной данной функции по промежуточному аргументу u , умноженной на производную самого промежуточного аргумента по независимой переменной x , т.е.

$$y' = f'(u) \cdot u'(x).$$

Пример. Найдем производную сложной функции $y = (\sqrt{x} + 5)^3$.

$$y' = \left((\sqrt{x} + 5)^3 \right)' = 3(\sqrt{x} + 5)^2 \cdot (\sqrt{x} + 5)' = 3(\sqrt{x} + 5)^2 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot x^{-1/2} \right) = \frac{3(\sqrt{x} + 5)^2}{2\sqrt{x}}.$$

Пример. Найдем производную функции $y = \ln(x^2 + 3x - 1)$.

$$y' = \left(\ln(x^2 + 3x - 1) \right)' = \frac{1}{x^2 + 3x - 1} (x^2 + 3x - 1)' = \frac{2x + 3}{x^2 + 3x - 1}.$$

9.3.2 Производная обратной функции

Теорема 10.2. Для дифференцируемой функции с производной, не равной нулю, производная обратной функции равна обратной величине производной:

$$x'_y = \frac{1}{y'_x}.$$

Пример. Для функции $y = \sin x$ обратной является функция $y = \arcsin x$. Используя формулу производной синуса $(\sin x)' = \cos x$ и выше приведенную теорему, найдем производную для арксинуса:

$$(\arcsin x)' = \frac{1}{(\sin y)'} = \frac{1}{\cos y} = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2 y}}$$

Поскольку мы имеем дело с обратной функцией $y = \arcsin x$, то после подстановки этого выражения вместо переменной y производная примет вид:

$$(\arcsin x)' = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2(\arcsin x)}} = \frac{1}{\sqrt{1 - x^2}}.$$

9.3.3. Производные высших порядков

Если производную функции $y' = f'(x)$ еще один раз продифференцировать, то полученная функция будет называться второй производной функции и обозначается y'' или $f''(x)$. Большинство функций можно дифференцировать неоднократно. Если продифференцировать вторую производную функции, то получим третью производную, продолжая дифференцирование найдем четвертую производную, пятую, ..., n -ую:

$$f''(x) = (f'(x))', \quad f'''(x) = (f''(x))', \quad f^{(4)}(x) = (f'''(x))', \quad \dots, \quad f^{(n)}(x) = (f^{(n-1)}(x))'.$$

Начиная со второго порядка производные называются производными высших порядков.

Пример. Найти вторую производную $2x^4 - x^3 + 2x^2 - 5x - 6$.

$$2x^4 - x^3 + 2x^2 - 5x - 6 = (8x^3 - 3x^2 + 4x - 5)' = 24x^2 - 6x + 4.$$

Пример. Найти седьмую производную функции $y = \sin 2x$.

Последовательно дифференцируя функцию $y = \sin 2x$ семь раз, получим результат:

$$\begin{aligned} (\sin 2x)^{(7)} &= 2(\cos 2x)^{(6)} = -4(\sin 2x)^{(5)} = -8(\cos 2x)^{(4)} = 16(\sin 2x)^{(3)} = \\ &= 32(\cos 2x)'' = -64(\sin 2x)' = -128\sin 2x. \end{aligned}$$

9.4. Правило Лопиталя

Часто на практике требуется найти предел функций, аналитическое выражение которых представимо в виде дроби, содержащей в числителе и знаменателе одновременно бесконечно большие или бесконечно малые величины.

В этих случаях предел $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)}$ часто называют неопределенностью вида $\left[\frac{0}{0} \right]$, если $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = 0$, $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = 0$, и неопределенностью вида $\left[\frac{\infty}{\infty} \right]$, если $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \infty$, $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = \infty$.

Для упрощения нахождения предела отношения двух функций можно воспользоваться правилом Лопиталя (1661 – 1704).

Правила Лопиталя. Предел отношения двух бесконечно малых или бесконечно больших дифференцируемых функций равен пределу отношения их производных.

Таким образом, если имеется неопределенность вида: $\left[\frac{0}{0} \right]$ или $\left[\frac{\infty}{\infty} \right]$, тогда:

$$\lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ (x \rightarrow \infty)}} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ (x \rightarrow \infty)}} \frac{f'(x)}{g'(x)}.$$

Пример. Найдем предел $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x}$.

Решая данную задачу, с помощью Правила Лопиталя мы получим доказательство 1-го замечательного предела. При стремлении аргумента к нулю числитель и знаменатель дроби представляют собой бесконечно малые величины. Применяя Правило Лопиталя, продифференцируем одновременно числитель и знаменатель дроби, а после преобразования получим ответ.

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = \left[\frac{0}{0} \right] = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{(\sin x)'}{x'} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos x}{1} = \frac{1}{1} = 1.$$

Пример. Найдем предел $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{2x^3 + x - 1}{x^3 + 4x^2}$.

Условия задачи также позволяют применить Правило Лопиталя, поскольку здесь имеется неопределенность $\left[\frac{\infty}{\infty} \right]$.

Для нахождения пределов можно использовать Правило Лопиталя неоднократно, если после каждого дифференцирования будем получать неопределенности $\left[\frac{0}{0} \right]$ или $\left[\frac{\infty}{\infty} \right]$. В нашем случае Правило Лопиталя необходимо применить три раза.

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{2x^3 + x - 1}{x^3 + 4x^2} = \left[\frac{\infty}{\infty} \right] = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{6x^2 + 1}{3x^2 + 8x} = \left[\frac{\infty}{\infty} \right] = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{12x}{6x + 8} = \left[\frac{\infty}{\infty} \right] = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{12}{6} = 2.$$

Пример. Найдем предел $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos x}{x^2}$.

В этом примере также необходимо использовать Правило Лопиталя три раза, поскольку после каждого дифференцирования числителя и знаменателя дроби получается неопределенность $\left[\frac{0}{0} \right]$.

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos x}{x^2} = \left[\frac{0}{0} \right] = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{2x} = \left[\frac{0}{0} \right] = \frac{1}{2} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = \left[\frac{0}{0} \right] = \frac{1}{2} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\cos x}{1} = \frac{1}{2}.$$

Пример. Найдем предел $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^x - 1}{x}$.

При стремлении аргумента к нулю, числитель и знаменатель дроби также будут стремиться к нулю. Следовательно, получается неопределенность $\left[\frac{0}{0} \right]$.

Используя правило Лопиталя один раз получим значение:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^x - 1}{x} = \left[\frac{0}{0} \right] = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^x}{1} = \lim_{x \rightarrow 0} e^x = 1.$$

Пример. Найдем предел $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\ln x}{x}$.

При стремлении аргумента к бесконечности, числитель и знаменатель дроби также будут представлять бесконечно большие величины. Применив правило Лопиталя получим:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\ln x}{x} = \left[\frac{\infty}{\infty} \right] = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\frac{1}{x}}{1} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x} = 0.$$

Пример. Найдем предел $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x^n}{e^x}$.

В этом примере мы также имеем неопределенность $\left[\frac{\infty}{\infty} \right]$. Однако, после применения правила Лопиталя первый, второй, третий, ... разы мы будем получать в числителе и знаменателе дроби бесконечно большие величины. Таким образом, правило Лопиталя придется применять ровно n раз:

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x^n}{e^x} &= \left[\frac{\infty}{\infty} \right] = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{nx^{n-1}}{e^x} = \left[\frac{\infty}{\infty} \right] = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{n(n-1)x^{n-2}}{e^x} = \left[\frac{\infty}{\infty} \right] = \dots = \\ &= \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{n!}{e^x} = 0 \end{aligned}$$

9.5. Локализация корней функции

Локализация корней уравнения $f(x) = 0$ производится графическим или аналитическим способами.

9.5.1. Графическая локализация корней

Если несложно построить эскиз графика функции, на котором можно с уверенностью определить сегменты на каждом из которых функция $f(x)$ принимает только одно нулевое значение, то следует воспользоваться графическим способом. В этом случае размер сегментов существенного значения не имеет. Если по графику мы видим, что на отрезке $[-100; 100]$ функция пересекает ось абсцисс только один раз, и неважно в каком месте, следовательно, на выбранном отрезке локализован 1 корень. Однако, если мы выберем меньший сегмент, например, $[-1; 2]$, то впоследствии при уточнении корня, будет

потрачено меньше времени и вычислительных ресурсов на получение результата с заданной точностью.

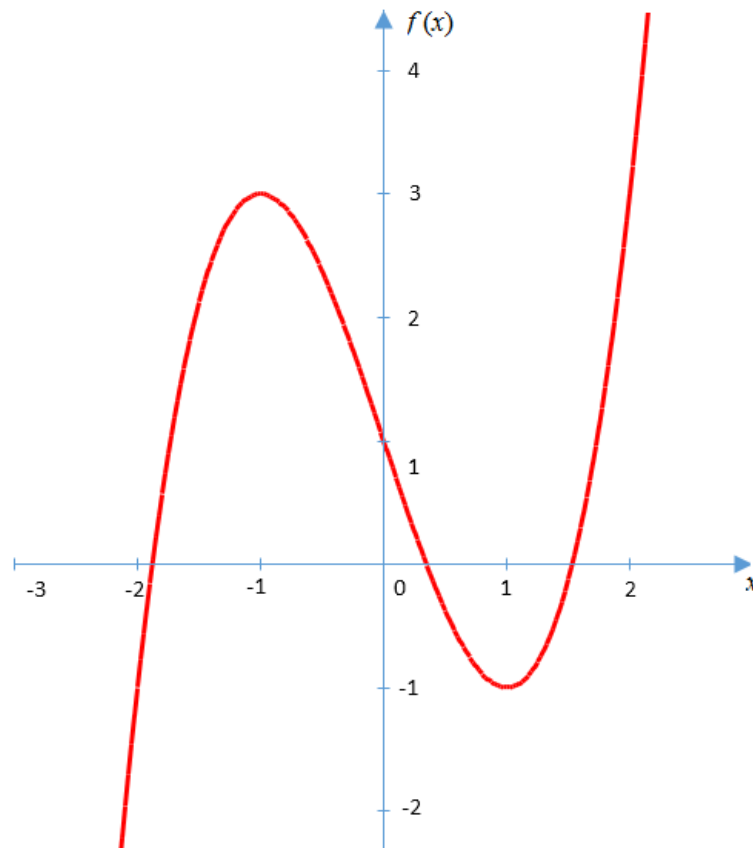


Рис. 9.2 График функции $f(x) = x^3 - 3x + 1$.

Пример. Локализуем корни уравнения $x^3 - 3x + 1 = 0$. Построим эскиз графика функции $f(x) = x^3 - 3x + 1$. Зная, что функция представляет собой кубическую параболу и может иметь от одного до 3-х различных корней, достаточно найти ее значения в некоторых точках, а затем дорисовать кривую, определяющую график функции (рис. 9.2).

Из графика видно, что первый корень находится на промежутке $[-2; -1]$, второй – на отрезке $[0; 1]$, а третий – на отрезке $[1; 2]$. Такая точность отделения корней вполне удовлетворяет первому этапу локализации корней.

Но графического способа есть ряд недостатков. Во-первых, не всегда без предварительного анализа можно построить график функции. Во-вторых, если корни существенно удалены друг от друга, то график будет довольно

громоздким. И, наконец, если корни достаточно близки друг к другу сложно выделить сегменты локализации.

9.5.2. Аналитическая локализация корней

Наиболее универсален аналитический способ. Исследуя функции с помощью первой производной найдем все локальные максимумы и минимумы функции $f(x)$, а затем рассчитаем значения функции в точках полученных экстремумов.

Если знаки функции $f(a)$ и $f(b)$ в соседних экстремальных точках различны, а функция непрерывна тогда она будет непрерывно возрастать или убывать на данном отрезке $[a, b]$, и, следовательно, иметь на этом отрезке ровно один корень.

Пример. Локализовать корни уравнения $x^4 - x^3 - 2x^2 + 3x - 3 = 0$.

Найдем производную функции $f(x) = x^4 - x^3 - 2x^2 + 3x - 3$. Получим:

$$f'(x) = 4x^3 - 3x^2 - 4x + 3.$$

Определим корни полученной производной $f'(x)$. Для этого решим уравнение:

$$4x^3 - 3x^2 - 4x + 3 = 0.$$

Вынесем множитель $x^2 - 1$ из выражений $4x^3 - 3x^2$ и $4x + 3$:

$$4x(x^2 - 1) - 3(x^2 - 1) = 0.$$

Сгруппируем полученное выражение:

$$(x^2 - 1)(4x - 3) = 0$$

В результате получим три различных корня производной $f'(x)$: $x_1 = -1$; $x_2 = \frac{3}{4}$; $x_3 = 1$. Эти значения являются экстремальными точками для функции $f(x)$.

Составим таблицу знаков функции $f(x)$:

X	$-\infty$	-1	$0,75$	1	$+\infty$
$Sign f(x)$	$+$	$-$	$-$	$-$	$+$

Исследуемая функция $f(x) = x^4 - x^3 - 2x^2 + 3x - 3$ непрерывна на всей области действительных чисел, а из таблицы видно, что знаки функции $f(x)$ в соседних экстремальных точках различны только в двух случаях. Следовательно, уравнение имеет равно два действительных корня, находящихся на промежутках: $(-\infty; -1]$ и $[1; +\infty)$.

Уменьшим промежутки, в которых находятся корни. Это можно сделать, подобрав значения таким образом, чтобы знаки функции $f(x)$ на границах интервалов были различны:

X	-2	-1	1	2
$Sign f(x)$	$+$	$-$	$-$	$+$

Следовательно первый корень $x_1 \in [-2; -1]$, а второй корень $x_2 \in [1; 2]$.

9.6. Асимптоты функции

Для исследования функций часто бывает нужно знать, как ведет себя функция в окрестностях точек разрыва второго рода или при бесконечном удалении аргумента от начала координат. Решение этой проблемы можно получить, исследуя асимптоты функции.

Определение. Прямая называется *асимптотой* функции $y=f(x)$, если расстояние от точки графика функции к этой прямой стремится к нулю, при неограниченном удалении указанной точки от начала координат.

Пример. Для гиперболы асимптотами являются оси абсцисс и ординат.

Пример. Для дробно-рациональной функции $y = \frac{x^3 + 6x + 16}{2x^2 + 2}$ асимптотой является наклонная прямая $y = 0,5x + 3$ (рис 10.3).

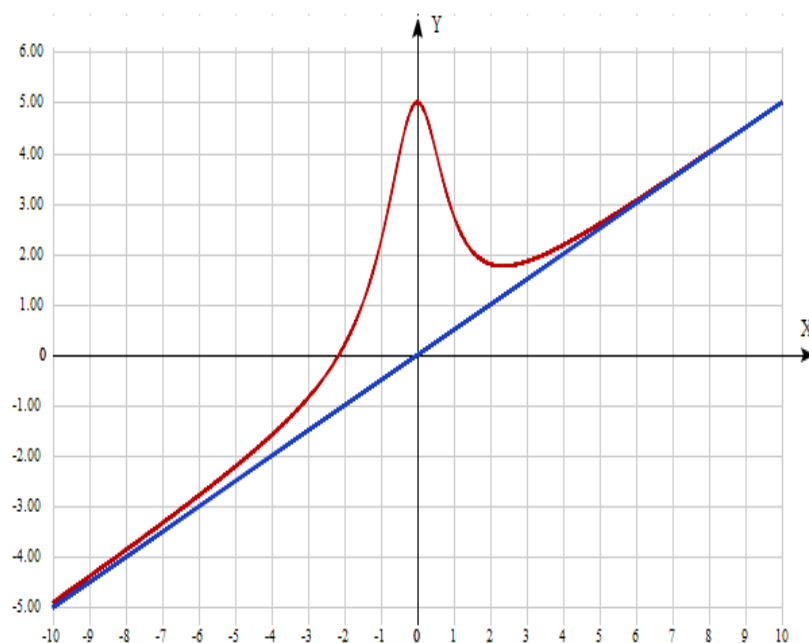


Рис. 9.3. График функции $y = \frac{x^3 + 6x + 16}{2x^2 + 2}$.

График функции может бесконечно приближаться к своей асимптоте справа, слева, сверху, снизу, никогда ее не пересекая при бесконечном удалении от начала координат. В некоторых случаях график функции может бесконечное множество раз пересекать свою асимптоту (рис. 10.4).

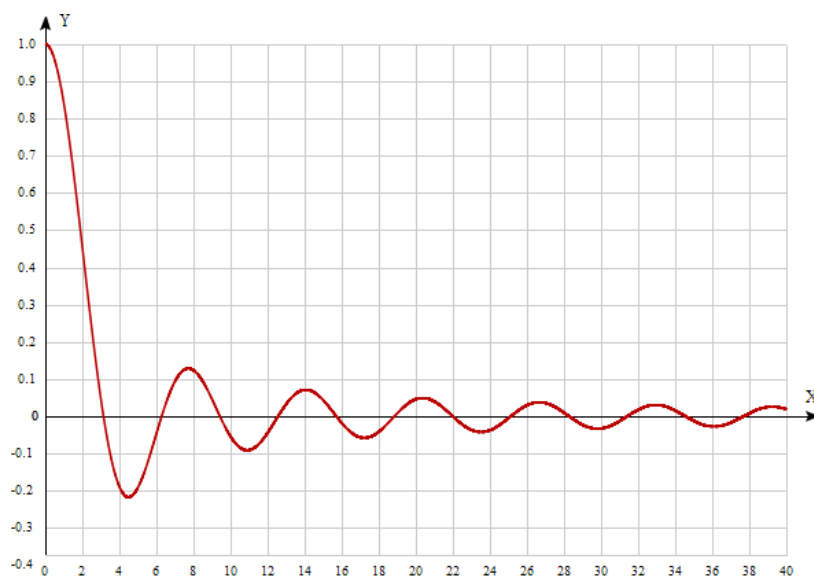


Рис. 9.4. График функции $y = \frac{\sin x}{x}$.

9.6.1. Вертикальные асимптоты

Асимптоты подразделяются на вертикальные и наклонные.

Прямая $x=a$ является *вертикальной асимптотой* функции $y=f(x)$, если существует и равен бесконечности хотя бы один из односторонних пределов:

$$\lim_{x \rightarrow a-0} f(x) = \infty \text{ или } \lim_{x \rightarrow a+0} f(x) = \infty.$$

Вертикальные асимптоты часто встречаются у *дробно-рациональных функций* в точках, где знаменатель равен нулю, а числитель не равен нулю (в точках разрыва второго рода). Вертикальных асимптот может быть любое количество.

Прямая не может быть вертикальной асимптотой, если функция непрерывна в точке a . Поэтому вертикальные асимптоты следует искать только в *точках разрыва функции второго рода*.

Пример. Найдем вертикальную асимптоту функции $f(x) = \frac{x}{x+1}$.

Функция имеет разрыв второго рода в точке $x = -1$. Найдем левосторонний и правосторонний пределы функции в этой точке:

$$\lim_{x \rightarrow -1-0} f(x) = \lim_{x \rightarrow -1-0} \frac{x}{x+1} = \frac{-1}{(-1-0)+1} = +\infty;$$

$$\lim_{x \rightarrow -1+0} f(x) = \lim_{x \rightarrow -1+0} \frac{x}{x+1} = \frac{-1}{(-1+0)+1} = -\infty.$$

Следовательно, прямая $x=-1$ является вертикальной асимптотой.

9.6.2. Наклонные асимптоты

Прямая $y=kx+b$ является *наклонной асимптотой* функции $y=f(x)$, если выполняется хотя бы одно из равенств:

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} (f(x) - kx) = b \text{ или } \lim_{x \rightarrow +\infty} (f(x) - kx) = b.$$

Если $\lim_{x \rightarrow -\infty} (f(x) - kx) = b$, то прямая $y=kx+b$ является асимптотой при стремлении аргумента к $-\infty$, а если $\lim_{x \rightarrow +\infty} (f(x) - kx) = b$, то асимптотой при стремлении аргумента к $+\infty$.

Если хотя бы один из пределов не существует или равен бесконечности, то не существует и наклонной асимптоты функции на $-\infty$ или на $+\infty$.

Коэффициенты наклонных асимптоты находятся отдельно на $-\infty$ и на $+\infty$.

Для асимптоты функции при стремлении аргумента к $-\infty$

$$k_1 = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f(x)}{x}, \quad b_1 = \lim_{x \rightarrow -\infty} [f(x) - k_1 x];$$

Для асимптоты при стремлении аргумента к $+\infty$.

$$k_2 = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{x}, \quad b_2 = \lim_{x \rightarrow +\infty} [f(x) - k_2 x].$$

Пример. Найдем наклонную асимптоту функции $f(x) = \frac{x}{(x-1)^2}$.

Определим коэффициенты наклонной асимптоты при $x \rightarrow -\infty$. Для нахождения пределов воспользуемся правилом Лопиталя:

$$k_1 = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{x}{x(x-1)^2} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{1}{(x-1)} = 0;$$

$$b_1 = \lim_{x \rightarrow -\infty} [f(x) - k_1 x] = \left[\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{x}{(x-1)^2} - 0 \cdot x \right] = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{x}{(x-1)^2} = \left[\frac{\infty}{\infty} \right] = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{1}{2(x-1)} = 0.$$

Таким образом, наклонная асимптота функции при $x \rightarrow -\infty$ существует и ее уравнение: $y = 0x + 0$ или $y = 0$.

Аналогично рассчитаем коэффициенты наклонной асимптоты функции при $x \rightarrow +\infty$.

$$k_1 = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x}{x(x-1)^2} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{(x-1)} = 0;$$

$$b_1 = \lim_{x \rightarrow +\infty} [f(x) - k_1 x] = \left[\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x}{(x-1)^2} - 0 \cdot x \right] = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x}{(x-1)^2} = \left[\frac{\infty}{\infty} \right] = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{2(x-1)} = 0.$$

Следовательно, наклонная асимптота функции при $x \rightarrow +\infty$ также существует и ее уравнение совпадает с уравнение предыдущей асимптоты.

9.7. Исследование функции с помощью производных

Понятия монотонности, возрастания, убывания и ограниченности функции мы рассмотрели в пункте 1.2. Основные свойства функций. Однако точно определить точное поведение функции на интервалах нам поможет только исследование функции по первой и второй производным.

9.7.1. Монотонность функции

Рассмотрим необходимые и достаточные условия монотонности функции одной переменной.

Теорема 10.3. (необходимые условия). Если дифференцируемая на интервале $(a; b)$ функция $f(x)$ монотонно возрастает (убывает), то $f'(x) \geq 0$ ($f'(x) \leq 0$) для любых $x \in (a; b)$.

Пример. Функция $y = x^2 - 6x - 5$ монотонно возрастает на интервале $(-\infty; 3)$, следовательно, на интервале $(-\infty; 3)$ ее производная $y' = 2x - 6$ будет принимать только положительные значения.

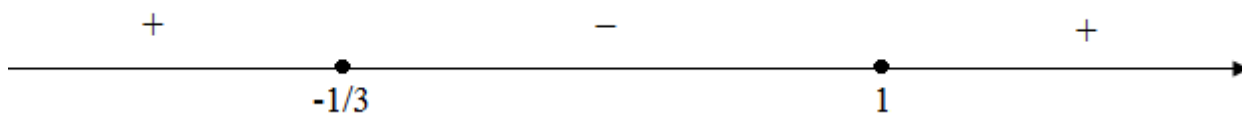
Теорема 10.4. (достаточные условия). Если функция $f(x)$ дифференцируема на интервале $(a; b)$ и $f'(x) > 0$ ($f'(x) < 0$) для любых аргументов из этого интервала, то функция $f(x)$ монотонно возрастает (убывает) на интервале $(a; b)$.

Пример. Для дифференцируемой функции $y = x^3 - x^2 - x + 4$ определим интервалы возрастания и убывания.

Найдем производную функции: $y' = (x^3 - x^2 - x + 4)' = 3x^2 - 2x - 1$.

Приравняем полученное выражение производной к нулю и решим уравнение: $3x^2 - 2x - 1 = 0$.

Уравнение имеет два корня: $x_1 = -1/3$ и $x_2 = 1$. Пометим значения корней на числовой прямой и отметим знаки производной функции.



На интервалах $(-\infty; -1/3)$ и $(1; +\infty)$ производная функции $y' = 3x^2 - 2x - 1$ принимает положительные значения, следовательно, на этих интервалах функция $y = x^3 - x^2 - x + 4$ возрастает. На интервале $(-1/3; 1)$ производная принимает отрицательные значения, значит, на этом интервале функция убывает.

9.7.2. Экстремумы функции

Точка x_1 называется точкой *максимума функции* $f(x)$, если в некоторой окрестности точки x_1 выполняется неравенство: $f(x) \leq f(x_1)$.

Точка x_2 называется точкой *минимума функции* $f(x)$, если в некоторой окрестности точки x_2 выполняется неравенство: $f(x) \geq f(x_2)$.

Значения функции в точках x_1 и x_2 называют соответственно *максимумом* и *минимумом* функции. Максимум и минимум функции называются *экстремумами функции*.

Теорема 10.5. (Необходимое условие экстремума). Если функция $f(x)$ в точке x_0 имеет экстремум, то $f'(x_0)=0$ или не существует.

Точки, в которых выполнено необходимое условие экстремума, т.е. производная равна нулю или не существует, называются *критическими* (или *стационарными*).

Теорема 10.6. (Первое достаточное условие экстремума). Если при переходе через точку x_0 производная дифференцируемой функции $y=f(x)$ меняет свой знак с плюса на минус, то точка x_0 есть точка максимума функции $y=f(x)$, а если с минуса на плюс, то точка минимума.

Пример. Функция $y = x^3 - x^2 - x + 4$ имеет критические точки $x_1 = -1/3$ и $x_2 = 1$, поскольку значение производной функции $y' = 3x^2 - 2x - 1$ в этих точках равно нулю.

Точка $x_1 = -1/3$ является точкой максимума, так как при переходе через точку x_1 производная функции меняет свой знак с плюса на минус. Значение функции $f(x_1) \approx 3,5926$ является максимумом функции.

Точка $x_2 = 1$ является точкой минимума, так как при переходе через точку x_2 производная функции меняет свой знак с минуса на плюс. Значение функции $f(x_2) = 3$ является минимумом функции.

Теорема 10.7. (Второе достаточное условие экстремума). Если первая производная $f'(x)$ дважды дифференцируемой функции равна нулю в некоторой

точке x_0 , а вторая производная в этой точке $f''(x_0)$ положительна, то x_0 есть точка минимума функции $f'(x)$; если $f''(x_0)$ отрицательна, то x_0 – точка максимума.

Пример. Продифференцируем функцию $y = x^3 - x^2 - x + 4$ второй раз:

$$y'' = (y')' = (3x^2 - 2x - 1)' = 6x - 2.$$

В точке $x_1 = -1/3$ первая производная равна нулю, а вторая производная $f''(-1/3) = 6 \cdot (-1/3) - 2 = -4$ меньше нуля, следовательно, $x_1 = -1/3$ является точкой максимума.

В точке $x_2 = 1$ первая производная равна нулю, а вторая производная $f''(1) = 6 \cdot 1 - 2 = 4$ больше нуля, следовательно, $x_2 = 1$ является точкой минимума.

9.7.3. Выпуклость и вогнутость функции

График дважды дифференцируемой функции $y=f(x)$ называется *вогнутым* (*выпуклым вниз*) на интервале $(a; b)$, если он расположен выше любой ее касательной на этом интервале (рис. 9.5).

График дважды дифференцируемой функции $y=f(x)$ называется *выпуклым* (*выпуклым вверх*) на интервале $(a;b)$, если он расположен ниже любой ее касательной на этом интервале.

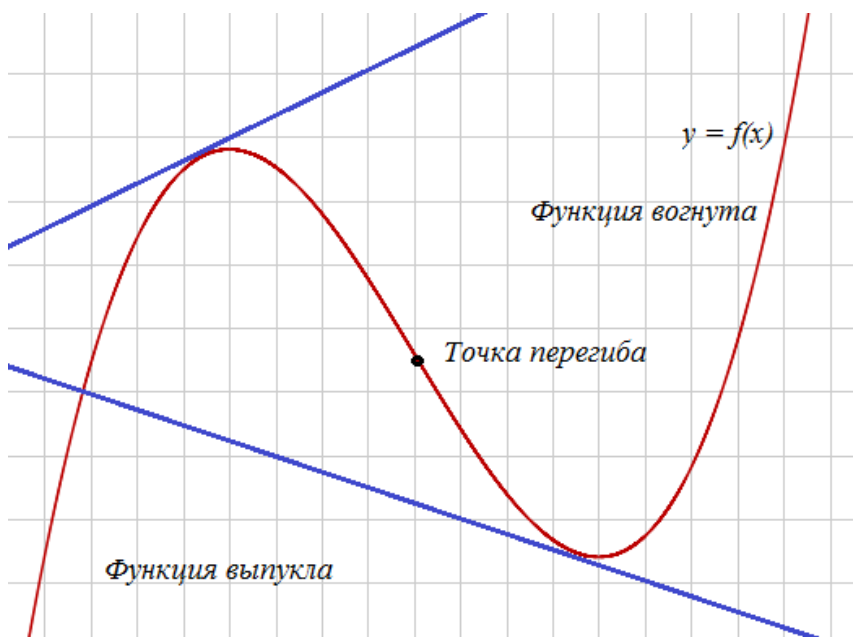


Рис. 90.5. Выпуклость и вогнутость функции.

Точка графика непрерывной функции $y=f(x)$, отделяющая его части разной выпуклости, называется *точкой перегиба*.

Интервалы выпуклости, вогнутости функции находят с помощью следующих теорем.

Теорема 10.8. Если функция $y=f(x)$ во всех точках интервала $(a; b)$ имеет отрицательную вторую производную, т.е. $f''(x)<0$, то график функции в этом интервале выпуклый. Если же $f''(x)>0$, для любых $x \in (a; b)$ – график вогнутый.

Пример. Найдем интервалы выпуклости и вогнутости функции $y = x^3 - x^2 - x + 4$.

Приравняем вторую производную исследуемой функции к нулю и решим уравнение: $6x - 2 = 0$. Очевидно, единственным решением уравнения будет значение $x_0 = 1/3$. На числовой прямой рассмотрим значения второй производной слева и справа от решения (рис. 9.6).

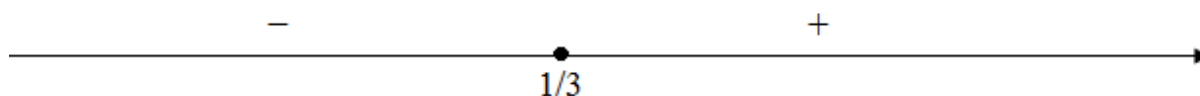


Рис. 9.6. Значения второй производной на числовой оси.

Слева от $x_0 = 1/3$ вторая производная функции принимает отрицательные значения, следовательно, на интервале $(-\infty; 1/3)$ график функции выпуклый.

Справа от $x_0 = 1/3$ вторая производная функции принимает положительные значения, следовательно, на интервале $(1/3; +\infty)$ график функции вогнутый.

9.7.4. Точки перегиба

Теорема 10.9. (необходимое условие перегиба). Вторая производная $f''(x)$ дважды дифференцируемой функции в точке перегиба x_0 равна нулю.

Теорема 10.10. (достаточное условие перегиба). Если вторая производная $f''(x)$ дважды дифференцируемой функции при переходе через некоторую точку x_0 меняет свой знак, то x_0 есть точка перегиба ее графика.

Пример. Определим точку перегиба функции $y = x^3 - x^2 - x + 4$.

Мы уже выяснили, что в точке $x_0 = 1/3$ вторая производная равна нулю. Кроме того, при переходе через точку x_0 вторая производная меняет знак с минуса на плюс, тогда согласно приведенному выше достаточному условию точка $x_0 = 1/3$ является точкой перегиба.

9.8. Исследование функций по общей схеме

При помощи дифференциального исчисления, во многих случаях можно получить представление о поведении графика функции, не заполняя подробных таблиц значений функции, которые в большинстве своем неудовлетворительно отражают важнейшие качественные свойства функции, такие, как точки разрыва, экстремальные точки, поведение функции в значительном удалении от начала координат.

Ниже приведена общая схема исследования функций.

1. Найти область определения функции.
2. Исследовать функции на четность, нечетность, периодичность.
3. Найти интервалы знакопостоянства функции.
4. Построить асимптоты функции.
5. Определить экстремальные точки. Интервалы возрастания (убывания) функции.
6. Определить интервалы выпуклости, вогнутости и точки перегиба функции.
7. Контрольные точки. Схематичное изображение функции.

Рассмотрим примеры исследования функций по общей схеме.

Пример. Исследуем функцию $f(x) = x^3 - 3x^2 + 2x$ по общей схеме.

1. Найдем область определения функции:

$$D(f) = (-\infty; +\infty).$$

2. Четность, нечетность функции, периодичность:

$$f(-x) = (-x)^3 - 3(-x)^2 + 2(-x) = -x^3 - 3x^2 - 2x.$$

Таким образом, функция общего вида.

3. Определим интервалы знакопостоянства функции, для этого функцию

приравняем к нулю:

$$x^3 - 3x^2 + 2x = 0.$$

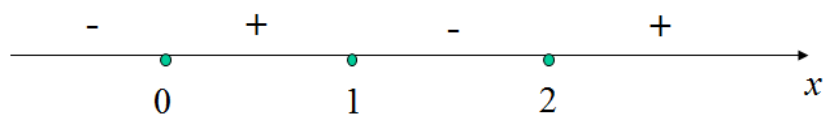
Преобразуем выражение функции:

$$x(x^2 - 3x + 2) = 0$$

Решая уравнение, получим три корня:

$$x_1 = 0, \quad x_2 = 1, \quad x_3 = 2.$$

Разместим полученные значения на числовой прямой и отметим интервалы знакопостоянства функции:



Из нашего исследования мы видим, что функция знакоположительна на интервалах $(0; 1)$ и $(2; +\infty)$; функция принимает отрицательные значения на интервалах $(-\infty; 0)$ и $(1; 2)$.

4. Найдем асимптоты графика функции.

Функция определена на всем множестве действительных чисел, следовательно, вертикальных асимптот нет.

Найдем коэффициенты наклонной асимптоты $y = kx + b$.

$$k = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{x^3 - 3x^2 + 2x}{x} = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} (x^2 - 3x + 2) = +\infty.$$

Таким, образом, наклонных асимптот также нет.

5. Исследуем функцию по первой производной.

Первая производная функции имеет вид:

$$f'(x) = 3x^2 - 6x + 2.$$

Найдем критические точки. Для этого приравняем к нулю найденную производную функции:

$$3x^2 - 6x + 2 = 0.$$

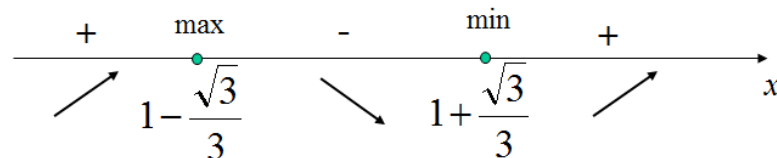
Решим квадратное уравнение:

$$D = 36 - 4 \cdot 3 \cdot 2 = 12; \text{ тогда}$$

$$x_1 = \frac{6 - \sqrt{12}}{2 \cdot 3} = \frac{3 - \sqrt{3}}{3} = 1 - \frac{\sqrt{3}}{3} \approx 0,42;$$

$$x_2 = \frac{6 + \sqrt{12}}{2 \cdot 3} = \frac{3 + \sqrt{3}}{3} = 1 + \frac{\sqrt{3}}{3} \approx 1,58.$$

Поместим корни уравнения на числовую прямую и найдем интервалы возрастания и убывания исследуемой функции.



При переходе через точку x_1 функция меняет знак с плюса на минус, следовательно, x_1 является точкой максимума.

При переходе через точку x_2 функция меняет знак с минуса на плюс, следовательно, x_2 является точкой минимума.

Вычислим приближенные значения функции в точках максимума и минимума:

$$f(x_1) \approx f(0,42) = 0,42^3 - 3 \cdot 0,42^2 + 2 \cdot 0,42 = 0,38;$$

$$f(x_2) \approx f(1,58) = 1,58^3 - 3 \cdot 1,58^2 + 2 \cdot 1,58 = -0,38.$$

6. Исследуем функцию по второй производной:

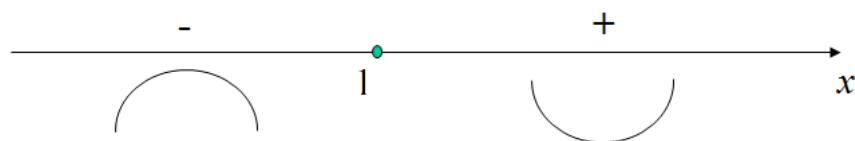
Найдем вторую производную функции:

$$f''(x) = (3x^2 - 6x + 2)' = 6x - 6.$$

Найдем критические точки. Для этого приравняем к нулю полученной выражение: $6x - 6 = 0$.

Как видно, решением уравнения является значение $x = 1$.

Нанесем значение $x = 1$ на числовую прямую:



На интервале $(-\infty; 6)$ функция является выпуклой вверх (выпуклой). На интервале $(6; +\infty)$ функция является выпуклой вниз (вогнутой).

Точка $x = 6$ является точкой перегиба.

Нанесем на координатную плоскость найденные точки и, используя наше исследование, построим график функции (рис. 9.7).

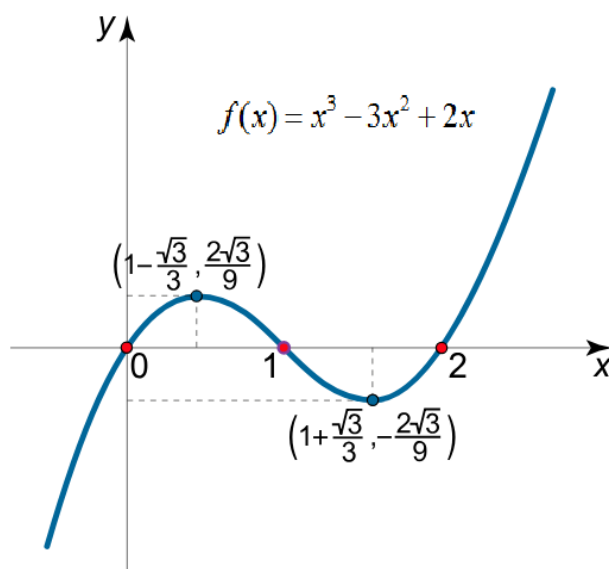


Рис. 9.7. График функции $f(x) = x^3 - 3x^2 + 2x$.

Рассмотрим еще один пример.

Пример. Исследуем функцию $f(x) = \frac{x^2 - 1}{x^3}$.

1. Найдем область определения функции. Так как в знаменатель дроби не может быть равен нулю, то:

$$D(f) = (-\infty; 0) \cup (0; +\infty).$$

2. Проверим функцию на четность, нечетность и периодичность:

$$f(-x) = \frac{(-x)^2 - 1}{(-x)^3} = \frac{x^2 - 1}{-x^3} = -\frac{x^2 - 1}{x^3} = -f(x).$$

Так как $f(-x) = -f(x)$, то функция является нечетной.

3. Найдем интервалы знакопостоянства функции. Приравняем к нулю функцию и решим уравнение:

$$x^2 - 1 = 0.$$

В результате решения получим два решения:

$$x_1 = -1, \quad x_2 = 1.$$

Разместим на числовой прямой полученные корни, а также точку разрыва функции (рис. 9.8):

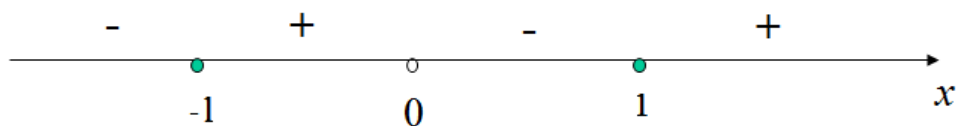


Рис. 9.8. Корни и точка разрыва исследуемой функции.

Функция знакоположительна на интервалах $(-1; 0)$ и $(1; +\infty)$; функция принимает отрицательные значения на интервалах $(-\infty; -1)$ и $(0; 1)$.

4. Определим асимптоты графика функции:

Функция определена на $\mathbb{R}$, кроме точки $x = 0$. Найдем односторонние пределы в этой точке.

$$\lim_{x \rightarrow 0-0} \frac{x^2 - 1}{x^3} = +\infty; \quad \lim_{x \rightarrow 0+0} \frac{x^2 - 1}{x^3} = -\infty.$$

Следовательно, прямая $x = 0$ является вертикальной асимптотой.

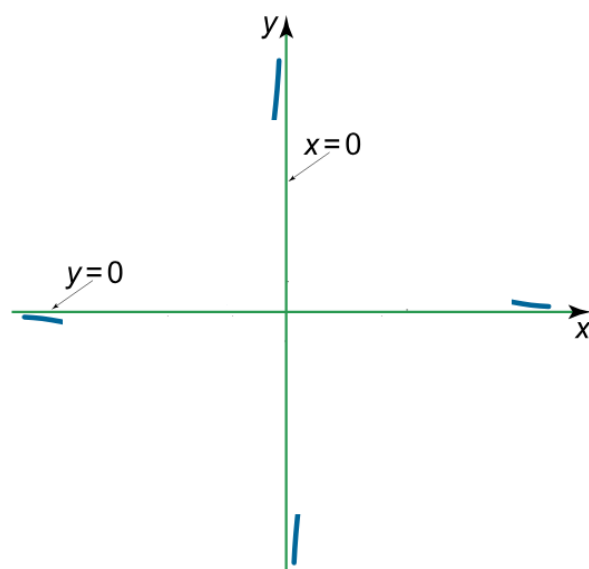
Выясним существование наклонных и горизонтальных асимптот:

$$k_{1,2} = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{\frac{x^2 - 1}{x^3}}{x} = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{x^2 - 1}{x^4} = 0;$$

$$b_{1,2} = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} (f(x) - kx) = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \left(\frac{x^2 - 1}{x^3} - 0 \right) = \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{x^2 - 1}{x^3} = 0.$$

Таким образом, график функции имеет горизонтальную асимптоту $y = 0$.

Нанесем полученные асимптоты на координатную плоскость (рис. 9.9).



9.9. Асимптоты исследуемой функции.

5. Исследуем функцию по первой производной. Найдём производную функции:

$$y' = \left(\frac{x^2 - 1}{x^3} \right)' = \left(\frac{x^2}{x^3} - \frac{1}{x^3} \right)' = -\frac{1}{x^2} + \frac{3}{x^4} = \frac{3 - x^2}{x^4}.$$

Определим критические точки, для этого приравняем к нулю полученное выражение:

$$\frac{3 - x^2}{x^4} = 0.$$

Решением данного уравнения будет два корня:

$$x_1 = -\sqrt{3} \approx -1,73; \quad x_2 = \sqrt{3} \approx 1,73.$$

Поместим критические точки на числовую прямую (рис. 9.10).

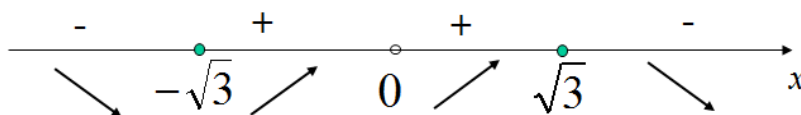


Рис. 9.10. Критические точки исследуемой функции.

Вычислим значения функции в точках максимума и минимума:

$$y(-\sqrt{3}) \approx -0,38; \quad y(\sqrt{3}) \approx 0,38.$$

Отметим полученные точки на координатной плоскости (рис. 9.11):

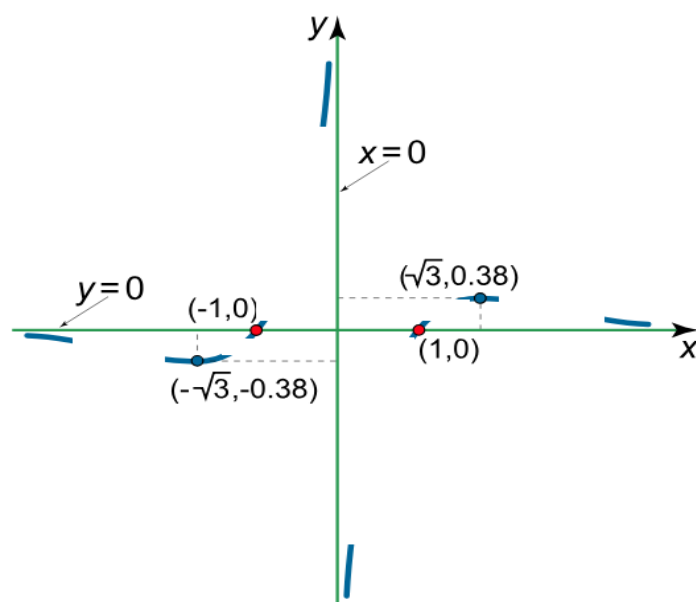


Рис. 9.11. Точки максимума и минимума функции.

Произведем исследование по второй производной. Найдём вторую производную функции.

$$y'' = \left(\frac{3-x^2}{x^4} \right)' = \left(\frac{3}{x^4} - \frac{x^2}{x^4} \right)' = \frac{2}{x^3} - \frac{12}{x^5} = \frac{2(x^2-6)}{x^5}.$$

Определим критические точки:

$$\frac{2(x^2-6)}{x^5} = 0.$$

Корнями данного уравнения будут значения:

$$x_1 = -\sqrt{6} \approx -2,45; \quad x_2 = \sqrt{6} \approx 2,45.$$

Отметим точки на числовой прямой и определим выпуклость и вогнутость исследуемой функции (рис. 9.12):

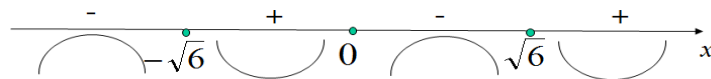


Рис. 9.12. Выпуклость и вогнутость функции.

Исследуя выпуклость функции, можно отметить, что значения $x_1 = -\sqrt{6}$, $x_2 = \sqrt{6}$ являются точками перегиба.

8. Построим график исследуемой функции (рис. 9.13):

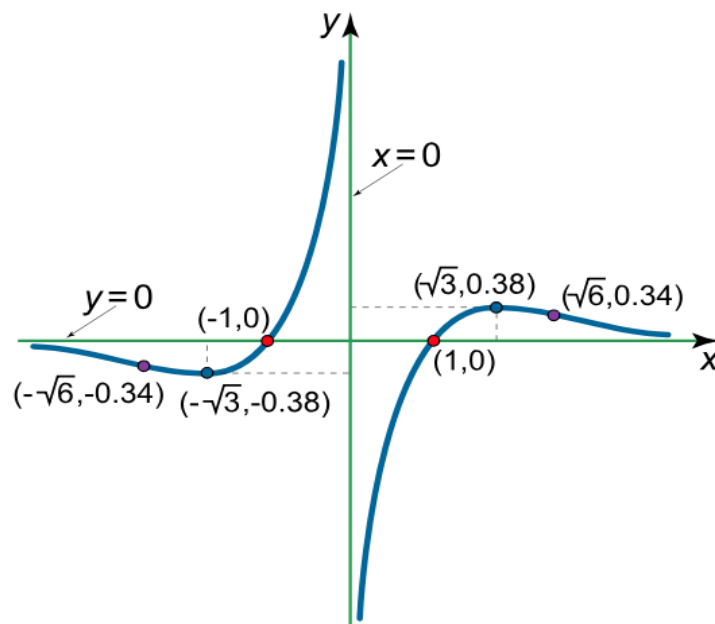


Рис 9.13. График функции $f(x) = \frac{x^2-1}{x^3}$.

Пример. Проведем исследование по общей схеме функции $f(x) = \frac{x^3}{x^2 - 1}$ и

построим ее график.

1) Найдем область определения функции.

Так как знаменатель дроби не может быть равен нулю, то областью определения функции является вся числовая прямая, кроме точек $x = -1$ и $x = 1$. Таким образом, $D(f) = (-\infty; -1) \cup (-1; 1) \cup (1; +\infty)$.

2) Проверим нашу функцию на четность, нечетность, и периодичность.

Подставим в функцию вместо аргумента выражение $-x$:

$$f(-x) = \frac{(-x)^3}{(-x)^2 - 1} = \frac{-x^3}{x^2 - 1} = -f(x).$$

Так как $f(-x) = -f(x)$, то функция является нечетной. В силу нечетности функция является симметричной относительно начала координат и четной быть не может. Кроме того, функция не содержит никаких тригонометрических выражений, следовательно, периодичности тоже не будет.

4) Найдем интервалы знакопостоянства функции.

Определим нули функции, решив уравнение $f(x) = 0$.

Уравнение $\frac{x^3}{x^2 - 1}$ имеет единственное решение $x = 0$.

На числовой прямой отметим три точки: точки разрыва функции и точку, в которой $x = 0$ функция принимает нулевое значение. Вычислив значение функции в произвольных точках, отметим символами «+» и «-» знаки функции на выделенных интервалах (рис. 9.14).

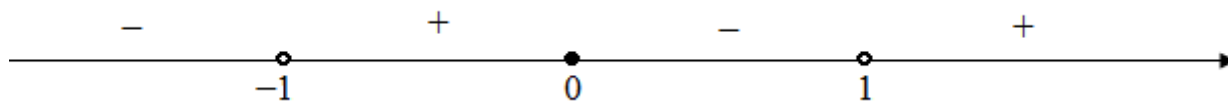


Рис. 9.14. точки разрыва исследуемой функции.

Таким образом, на интервалах $(-\infty; -1)$ и $(0; 1)$ функция принимает отрицательные значения, а на интервалах $(-1; 0)$ и $(1; +\infty)$ функция знакоположительна.

5) Рассчитаем асимптоты функции.

Для определения параметров вертикальных асимптот найдем правосторонние и левосторонние пределы в каждой точке разрыва функции.

Прямая $x = -1$ является вертикальной асимптотой исследуемой функции

поскольку $\lim_{x \rightarrow -1-0} \frac{x^3}{x^2 - 1} = -\infty$; $\lim_{x \rightarrow -1+0} \frac{x^3}{x^2 - 1} = +\infty$.

Аналогично, прямая $x = -1$ также является асимптотой исследуемой функции, так как $\lim_{x \rightarrow -1-0} \frac{x^3}{x^2 - 1} = -\infty$; $\lim_{x \rightarrow -1+0} \frac{x^3}{x^2 - 1} = +\infty$.

Найдем наклонные асимптоты нашей функции.

Рассмотрим поведение функции при стремлении аргумента к $-\infty$. Для этого определим коэффициенты асимптоты $y = k_1x + b_1$:

$$k_1 = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{x^3}{x(x^2 - 1)} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{x^3}{x^3 - x} = 1;$$

$$b_1 = \lim_{x \rightarrow -\infty} (f(x) - k_1 \cdot x) = \lim_{x \rightarrow -\infty} \left(\frac{x^3}{x^2 - 1} - 1 \cdot x \right) = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{x^3 - x^3 + x}{x^2 - 1} = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{x}{x^2 - 1} = 0.$$

Таким образом, мы получили асимптоту: $y = 1 \cdot x + 0$ или $y = x$.

Аналогично определим коэффициенты асимптоты $y = k_2x + b_2$ при $x \rightarrow +\infty$:

$$k_1 = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x^3}{x(x^2 - 1)} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x^3}{x^3 - x} = 1;$$

$$b_1 = \lim_{x \rightarrow +\infty} (f(x) - k_1 \cdot x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \left(\frac{x^3}{x^2 - 1} - 1 \cdot x \right) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x^3 - x^3 + x}{x^2 - 1} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x}{x^2 - 1} = 0.$$

Мы снова получили асимптоту $y = x$. В силу симметричности функции относительно начала координат обе асимптоты совпадают. Нанесем асимптоты на систему координат (рис. 9.15):

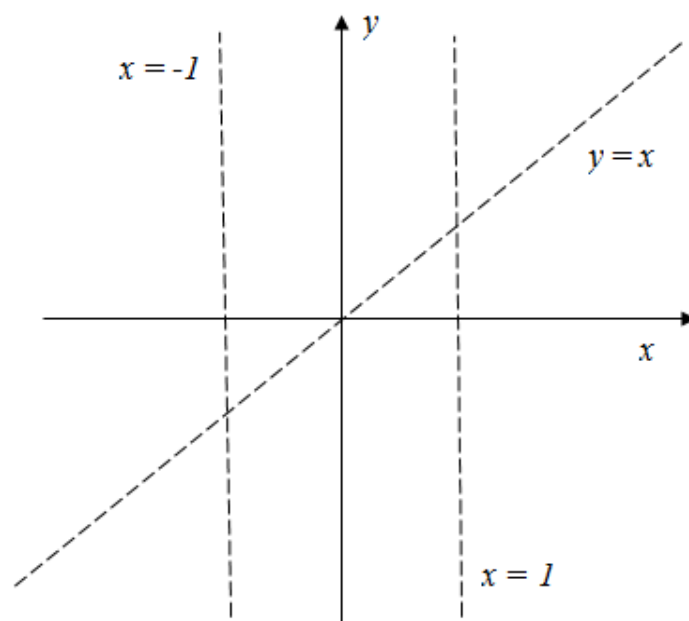


Рис. 9.15. Асимптоты исследуемой функции.

б) Определим интервалы возрастания и убывания функции, экстремальные значения. Сначала продифференцируем нашу функцию:

$$f'(x) = \left(\frac{x^3}{x^2-1} \right)' = \frac{(x^3)'(x^2-1) - x^3(x^2-1)'}{(x^2-1)^2} = \frac{3x^3(x^2-1) - x^3 \cdot 2x}{(x^2-1)^2} = \frac{3x^4 - 3x^2 - 2x^4}{(x^2-1)^2} =$$

$$= \frac{x^4 - 2x^2}{(x^2-1)^2} = \frac{x^2(x^2-2)}{(x^2-1)^2}.$$

Приравняем полученную производную к нулю: $\frac{x^2(x^2-2)}{(x^2-1)^2} = 0$.

Решая уравнение, получим три корня: $x_1 = -\sqrt{2}$, $x_2 = 0$, $x_3 = \sqrt{2}$. Нанесем эти значения и точки разрыва функции на числовую ось и укажем знаки производной на полученных промежутках (рис. 9.16).

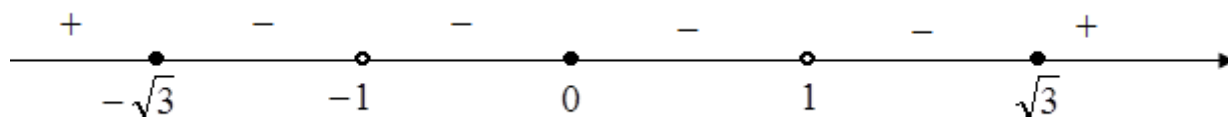


Рис. 9.16. Знаки производной исследуемой функции.

На интервалах $(-\infty; -\sqrt{2})$ и $(\sqrt{2}; +\infty)$ первая производная функция принимает положительные значения, следовательно на этих интервалах функция возрастает. На интервалах $(-\sqrt{2}; -1)$, $(-1; 0)$, $(0; 1)$ и $(1; \sqrt{2})$ первая производная функция принимает отрицательные значения, значит здесь функция

убывает.

Рассмотрим поведение функции в критических точках. В точке $x_1 = -\sqrt{3}$ функция достигает своего локального максимума $f(-\sqrt{3}) = -\frac{3\sqrt{3}}{2} \approx -2,5981$. В точке $x_2 = 0$ экстремума нет, поскольку слева и справа от нее производная принимает отрицательные значения. В точке $x_3 = \sqrt{3}$ функция имеет локальный минимум: $f(\sqrt{3}) = \frac{3\sqrt{3}}{2} \approx 2,5981$.

7) Найдем интервалы выпуклости, вогнутости функции и точки перегиба. Продифференцируем нашу функцию второй раз:

$$\begin{aligned} f''(x) &= \left(\frac{x^2(x^2-3)}{(x^2-1)^2} \right)' = \left(\frac{x^4-3x^2}{(x^2-1)^2} \right)' = \frac{(x^4-3x^2)'(x^2-1)^2 - (x^4-3x^2)[(x^2-1)^2]'}{(x^2-1)^4} = \\ &= \frac{(4x^3-6x)(x^2-1)^2 - (x^4-3x^2) \cdot 2(x^2-1) \cdot 2x}{(x^2-1)^4} = \frac{(x^2-1)[(4x^3-6x)(x^2-1) - 4x(x^4-3x^2)]}{(x^2-1)^4} = \\ &= \frac{4x^5-6x^3-4x^3+6x-4x^5+12x^3}{(x^2-1)^3} = \frac{2x(x^2+3)}{(x^2-1)^3}. \end{aligned}$$

Решим уравнение $\frac{2x(x^2+3)}{(x^2-1)^3} = 0$ и получим единственный корень $x = 0$.

Нанесем значение корня уравнения и точки разрыва функции на числовую ось и укажем знаки второй производной на полученных промежутках.

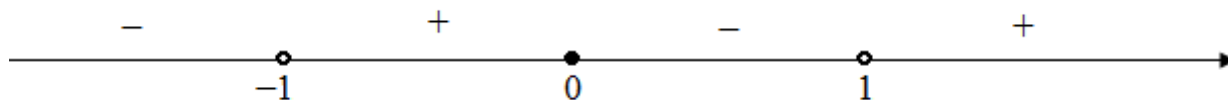


Рис. 9.17. Знаки второй производной функции.

На интервалах $(-\infty; -1)$ и $(0; 1)$ вторая производная функции принимает отрицательные значения, следовательно, является выпуклой, а интервалах $(-1; 0)$ и $(1; +\infty)$ вторая производная знакоположительна, а значит, вогнута.

В точке $x = 0$ вогнутость функции меняется на выпуклость, таким

образом, точка $x = 0$ является точкой перегиба.

На несем на график с асимптотами точки минимума и максимума и, учитывая интервалы знакопостоянства функции, ее возрастание и убывание, промежутки вогнутости и выпуклости построим эскиз графика (рис. 10.18).

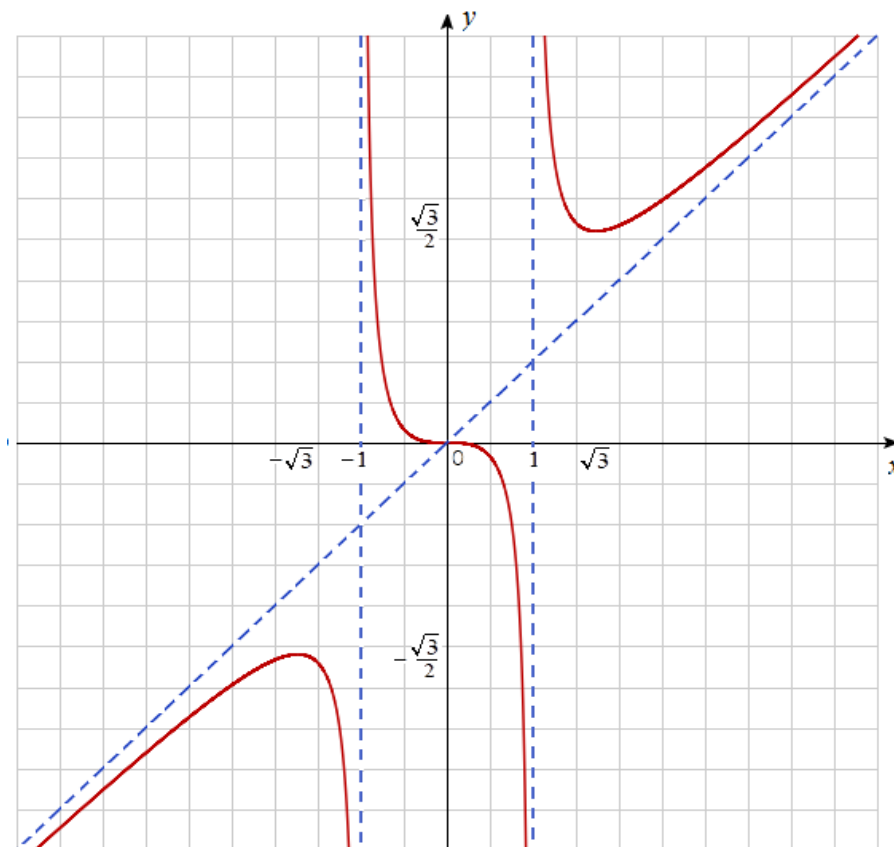


Рис. 9.18. График функции $f(x) = \frac{x^3}{x^2 - 1}$.

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте понятие производной функции одной переменной. Каким образом можно найти производной функции по определению?
2. В чем состоит геометрический смысл производной функции одной переменной?
3. В чем заключается зависимость между непрерывностью функции одной переменной и дифференцируемостью.
4. Какие функции называются гладкими и кусочно-гладкими?
5. Какие основные правила дифференцирования вы знаете? Приведите примеры использования правил дифференцирования.

6. Каким образом находятся производные сложных и обратных функций?
7. Как можно вычислить производные второго, третьего и четвертого порядков?
8. В каких случаях для нахождения предела функции можно использовать Правило Лопиталя? Приведите примеры использования правила Лопиталя.
9. Сколько раз можно использовать правило Лопиталя?
10. Каким образом осуществляется локализация корней уравнений графически? Приведите пример.
11. Опишите алгоритм локализация корней уравнений аналитическим способом. Приведите пример. Какой из методов локализации вы считаете более эффективным?
12. Дайте определение асимптот графика функции? Какие вы знаете типы асимптот?
13. Опишите метод нахождения вертикальных асимптот. Сколько вертикальных асимптот может быть у графика функции?
14. Продемонстрируйте на примере метод нахождения наклонных асимптот. Сколько наклонных асимптот может быть у графика функции?
15. Какие необходимые и достаточные условия монотонности функции вы знаете? Приведите примеры нахождения интервалов монотонности функции.
16. Опишите принципы нахождения экстремумов функции одной переменной.
17. На примере продемонстрируйте методы нахождения выпуклости и вогнутости функции одной переменной.
18. Перечислите необходимые и достаточные условия перегиба функции одной переменной. Приведите пример нахождения точек перегиба функции одной переменной.
19. Опишите алгоритм исследования функции одной переменной.
20. Приведите пример исследования функции одной переменной.

Глава 10. Функции нескольких переменных

При рассмотрении многих вопросов фундаментальных и прикладных наук приходится иметь дело с такими зависимостями между переменными величинами, в которых числовые значения одной из них полностью определяются значениями нескольких других.

Для рассмотрения такого рода зависимостей вводится понятие функции нескольких переменных и развивается аппарат для исследования таких функций. Аналогично функции одной переменной вводится понятие функции двух переменных.

Настоящая глава посвящена описанию математического аппарата исследования функций нескольких переменных. В ней мы дадим определение функции нескольких переменных, области определения, множеству значений, принимаемых функцией нескольких переменных. Важное значение в теории функций нескольких переменных имеет понятие предела. Также мы рассмотрим классификацию и основные свойства непрерывных функций двух переменных.

Важное место в главе занимают вопросы, посвященные дифференциальному исчислению функции нескольких переменных. Мы определим методы нахождения частных производных, особенности дифференцирования сложных функций, алгоритмы вычисления дифференциала, частных и смешанных производных высших порядков, нахождения производной по направлению и градиента.

Завершается глава исследованием функций нескольких переменных на экстремальные значения, нахождением максимальных и минимальных значений на замкнутой области определения.

10.1. Понятие функции нескольких переменных

Функции одной независимой переменной не охватывают все зависимости, существующие в природе. Многим явлениям, в том числе физическим, экономическим и социальным присуща многофакторная зависимость. Исследование таких зависимостей потребовало совершенствования

математического аппарата, в частности введения понятия функции нескольких переменных.

10.1.1. Основные определения

Определение. Пусть имеется n переменных величин, и каждому набору их значений $x_1, x_2, \dots, x_n$ из некоторого множества X соответствует одно вполне определенное значение переменной величины z . Тогда говорят, что задана функция нескольких переменных $z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Переменные $x_1, x_2, \dots, x_n$ называются независимыми переменными (аргументами); z – зависимой переменной (функцией), а символ f означает закон соответствия.

Множество X называется областью определения функции и обозначается $D(f)$. Множество значений, принимаемых z в области определения, называется областью изменения этой функции, обозначается $E(f)$.

Исследование функций нескольких переменных является достаточно сложная и трудоемкая задача. Далее в этой главе для простоты будем рассматривать функции двух переменных $z = f(x, y)$. Все определения, свойства и принципы решения задач с поправками можно будет перенести и на случай функций трех и более переменных.

Пример. Найдем область определения функции: $z = \sqrt{1 - x^2 - y^2}$.

Так как подкоренное выражение должно быть больше или равно нулю, то область определения задается условием: $1 - x^2 - y^2 \geq 0$ или $x^2 + y^2 \leq 1$. Таким образом, $D(f)$ представляет собой единичный круг с центром в начале координат (рис 11.1).

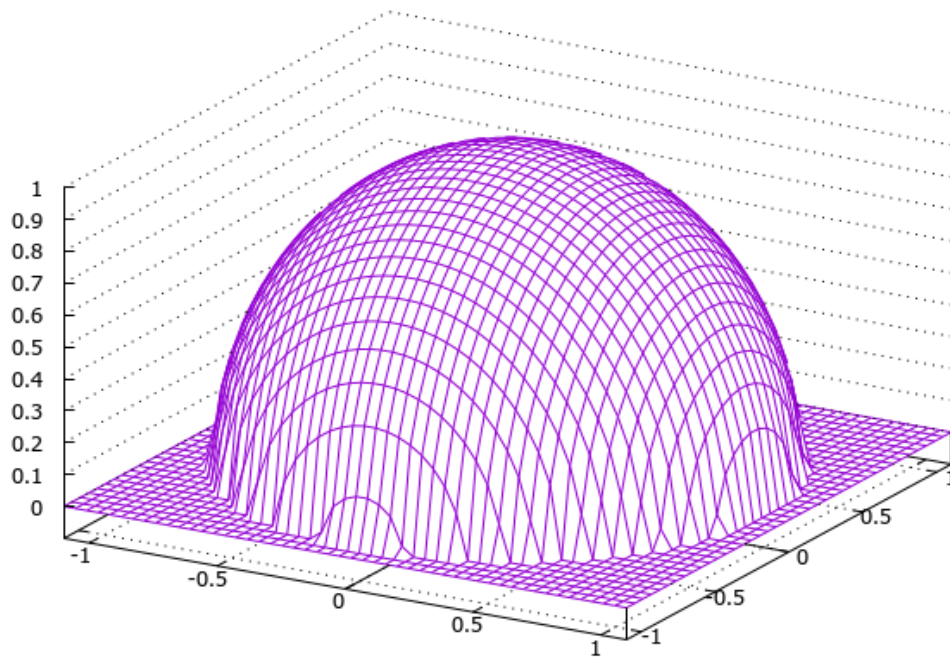


Рис. 10.1. Функция $z = \sqrt{1 - x^2 - y^2}$.

Большая часть, определенных для функции одной переменной, может быть перенесена на случай двух переменных.

10.1.2. Предел функции нескольких переменных

Определение. Число A называется пределом функции $z=f(x,y)$ при $x \rightarrow x_0$ и $y \rightarrow y_0$ (или в точке (x_0, y_0)), если для любого сколь угодно малого положительного числа $\varepsilon > 0$ найдется такое положительное число $\delta > 0$ (зависящее от ε ; $\delta = \delta(\varepsilon)$), что для всех точек (x, y) , отстоящих от точки (x_0, y_0) на расстояние ρ , меньшее, чем δ (т.е. при $0 < \rho < \delta$), выполняется неравенство: $|f(x, y) - A| < \varepsilon$.

Обозначается предел: $A = \lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ y \rightarrow y_0}} f(x, y)$.

Пример. Найдём предел функции: $\lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow 0}} \frac{\ln(1 - x^2 - y^2)}{\sqrt{x^2 + y^2}}$.

Для нахождения предела сделаем замену: $z = \sqrt{x^2 + y^2}$, а затем вычислим получившийся предел одной переменной, используя Правило Лопиталя:

$$\lim_{\substack{x \rightarrow 0 \\ y \rightarrow 0}} \frac{\ln(1 - x^2 - y^2)}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \lim_{z \rightarrow 0} \frac{\ln(1 - z^2)}{z} = \left[\frac{0}{0} \right] = \lim_{z \rightarrow 0} \frac{(\ln(1 - z^2))'}{z'} = \lim_{z \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{1 - z^2}(-2z)}{1} = 1.$$

Определение. Функция $z = f(x, y)$ называется непрерывной в точке (x_0, y_0) , если $z = f(x, y)$ определена в точке (x_0, y_0) , имеет конечный предел $A = \lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ y \rightarrow y_0}} f(x, y)$ и этот предел равен значению функции в точке (x_0, y_0) :

$$\lim_{\substack{x \rightarrow x_0 \\ y \rightarrow y_0}} f(x, y) = f(x_0, y_0).$$

Функция, непрерывная в каждой точке некоторой области, называется непрерывной в этой области. Точки, в которых не выполняется хотя бы одно из условий непрерывности функции, называются точками разрыва этой функции.

Пример. Функция $z = x^2 + y^2$ непрерывна в каждой точке пространства R^2 .

Пример. Функция $z = \frac{2x+1}{y-3}$ претерпевает разрыв во всех точках, лежащих на прямой $y - 3 = 0$, поскольку в этой области функция не определена.

График функции, непрерывной в некоторой области, представляет собой сплошную, без разрывов и расслоений, поверхность (рис. 11.2).

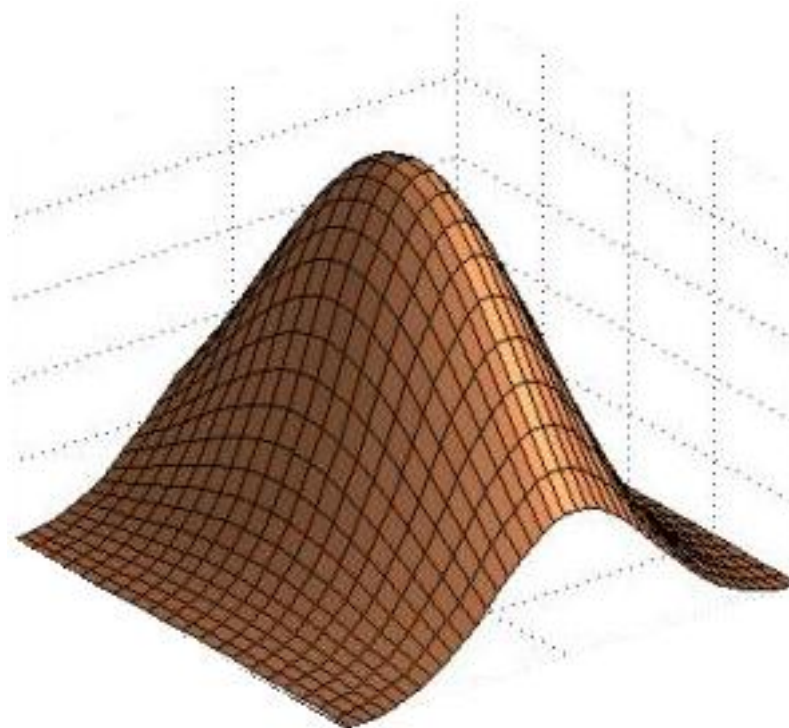


Рис. 10.2. График функции, непрерывной в прямоугольной области.

10.1.3. Основные свойства непрерывных функций двух переменных

Рассмотрим основные свойства непрерывных функций двух переменных. Для этого введем предварительно ряд понятий для множеств $\{M\}$ точек плоскости.

Множество $\{M\}$ точек плоскости называется *связным*, если любые две точки этого множества можно соединить непрерывной линией, состоящей из точек данного множества.

Пример. Круг – связное множество, а множество, состоящее из двух кругов, не имеющих общих точек, не является связным.

Точка M называется *внутренней точкой* множества $\{M\}$, если существует δ -окрестность этой точки, состоящая из точек данного множества.

Множество $\{M\}$, состоящее лишь из внутренних точек, называется *открытым множеством*.

Связное открытое множество $\{M\}$ точек называется *открытой областью*, или просто областью.

Пример. Простейшие области: внутренность треугольника, квадрата, круга, эллипса и т.п.

Точка M называется *граничной точкой* области, если в любой ее δ -окрестности есть точки как принадлежащие, так и не принадлежащие этой области. Множество всех граничных точек области называется *границей* этой области.

Пример. Для области, которая состоит из точек, лежащих внутри круга, границей является окружность.

Множество $\{M\}$ точек, образованное областью и ее границей, называется *замкнутой областью*.

Множество $\{M\}$ называется *ограниченным*, если существует круг, внутри которого оно содержится.

Пример. Отрезок и треугольник – ограниченные множества. Прямая не является ограниченным множеством.

Замкнутая ограниченная область, в которой определена функция двух переменных, является аналогом отрезка для функции одной переменной.

Перечислим основные свойства функций двух переменных.

Свойство 1. Если функция $z = f(M)$ непрерывна в замкнутой ограниченной области, то она ограничена в этой области, т. е. существует число k такое, что для всех точек области выполняется неравенство $|f(M)| \leq k$.

Свойство 2. Если функция $z = f(M)$ непрерывна в области, то она принимает все промежуточные значения между любыми двумя своими значениями, т. е. если $A < C < B$, где A и B – какие-то значения функции $z = f(M)$ в данной области, то в этой области существует точка M_0 , в которой $f(M_0) = C$.

Отсюда, в частности, следует, что если M_1 и M_2 – точки данной области и $f(M_1) < 0$, а $f(M_2) > 0$, то в области существует точка M_0 , в которой $f(M_0) = 0$.

10.2. Дифференцирование функции нескольких переменных

10.2.1. Частные производные первого порядка

Пусть в некоторой области задана функция $z = f(x, y)$. Так как аргументы функции x и y независимы, то можно только одну из них изменить, а у другой оставить ее значение неизменным. Дадим аргументу x приращение Δx , не меняя значение переменной y . Тогда функция z получит приращение, которое назовем *частным приращением z по x* :

$$\Delta_x z = f(x + \Delta x; y) - f(x; y).$$

Таким же образом можно получить и частное приращение z по y :

$$\Delta_y z = f(x; y + \Delta y) - f(x; y).$$

Если дать приращение обоим аргументам функции z одновременно, то получим полное приращение Δz функции z :

$$\Delta z = f(x + \Delta x; y + \Delta y) - f(x; y).$$

Если существует предел функции: $\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta_x z}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x; y) - f(x; y)}{\Delta x}$, то он называется частной производной функции $z=f(x;y)$ в точке $(x;y)$ по переменной x .

Аналогично, предел: $\lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\Delta_y z}{\Delta y} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{f(x; y + \Delta y) - f(x; y)}{\Delta y}$, называется частной производной функции $z=f(x;y)$ в точке $(x;y)$ по переменной y .

Определение. Частной производной функции нескольких переменных по одной из переменных называется предел отношения соответствующего частного приращения функции к приращению рассматриваемой независимой переменной при стремлении последнего к нулю (если этот предел существует).

Частные производные могут обозначаться следующим образом:

$$z'_x, \quad z'_y, \quad \frac{\partial z}{\partial x}, \quad \frac{\partial z}{\partial y}, \quad f'_x(x, y), \quad f'_y(x, y).$$

Частные производные функций по какому-либо аргументу находят по формулам и правилам, использовавшимися нами для дифференцирования функции одной переменной, причем все остальные переменные считаются постоянными величинами.

Пример. Найдем частные производные функции $z = x^2 - 2xy^2 + y^3$.

Для нахождения частной переменной по аргументу x , представим, что переменная y является константой:

$$\frac{\partial z}{\partial x} = (x^2 - 2xy^2 + y^3)'_x = 2x - 2y^2.$$

Таким же образом, считая x постоянной величиной, найдем частную производную по y :

$$\frac{\partial z}{\partial y} = (x^2 - 2xy^2 + y^3)'_y = -4xy + 3y^2.$$

Пример. Найдем частные производные функции $z = x^2 \sin y$.

$$\frac{\partial z}{\partial x} = 2x \sin y; \quad \frac{\partial z}{\partial y} = x^2 \cos y.$$

Пример. Найдем частные производные функции $z = xye^{x+2y}$.

$$\frac{\partial z}{\partial x} = e^{x+2y} y(1+x); \quad \frac{\partial z}{\partial y} = e^{x+2y} x(1+2y).$$

Пример. Найдем частные производные функции $z = \operatorname{arctg} \frac{x}{y}$.

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{y}{x^2 + y^2}; \quad \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{-x}{x^2 + y^2}.$$

10.2.2. Производные сложных функций

Пусть $z = f(M)$ – функция двух переменных x и y , каждая из которых, в свою очередь, является функцией независимой переменной t : $x = x(t)$, $y = y(t)$. Тогда функция $z = f[x(t), y(t)]$ является сложной функцией независимой переменной t , а переменные x и y – промежуточные переменные. Имеет место следующая теорема.

Теорема 10.1. Если функции $x = x(t)$ и $y = y(t)$ дифференцируемы в точке t , а функция $z = f(M)$ дифференцируема в точке $M = f[x(t), y(t)]$, то сложная функция $z = f[x(t), y(t)]$ также дифференцируема в точке t . При этом производная этой сложной функции вычисляется по формуле

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\partial z}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial z}{\partial y} \frac{dy}{dt}.$$

Замечание. Обратите внимание на то, когда в обозначениях производных пишется « ∂ » и когда « d ».

Пример. Пусть $z = f(M)$, $x = t^3 + 2$, $y = 3t^4 - 1$.

По формуле производной сложной функции получим:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\partial z}{\partial x} 3t^2 + \frac{\partial z}{\partial y} 12t^3.$$

Пример. Пусть $z = x \sin \frac{x}{y}$, $x = 1 + 3t$, $y = \sqrt{1 + t^2}$.

По формуле производной сложной функции получим:

10.2.3. Дифференциал функции.

Если $z = f(x, y)$, где $y = \varphi(x)$, то $z = f[x, \varphi(x)]$ – сложная функция. На основании формулы, записанной выше, в которой роль t играет теперь x , получим

$$\frac{dz}{dx} = \frac{\partial z}{\partial x} \frac{dx}{dx} + \frac{\partial z}{\partial y} \frac{dy}{dx},$$

а так как $\frac{dx}{dx} = 1$, то

$$\frac{dz}{dx} = \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial y} \frac{dy}{dx}.$$

Напомним, что если функция $z = f(M)$ дифференцируема в точке M , то ее полное приращение в этой точке может быть представлено в виде

$$\Delta z = A\Delta x + B\Delta y - \alpha(\Delta x, \Delta y)\Delta x + \beta(\Delta x, \Delta y)\Delta y,$$

где $\alpha(\Delta x, \Delta y)$ и $\beta(\Delta x, \Delta y)$ – бесконечно малые функции при $\Delta x \rightarrow 0$ и $\Delta y \rightarrow 0$.

Дифференциалом dz дифференцируемой в точке M функции $z = f(M)$ называется линейная относительно приращений Δx и Δy часть полного приращения этой функции в точке M , т. е.

$$dz = A\Delta x + B\Delta y.$$

Это выражение можно переписать следующим образом:

$$dz = f'_x(x, y)\Delta x + f'_y(x, y)\Delta y.$$

Дифференциалами независимых переменных x и y назовем приращения этих переменных: $dx = \Delta x$, $dy = \Delta y$. Тогда дифференциал функции можно записать в виде

$$dz = f'_x(x, y)dx + f'_y(x, y)dy.$$

10.2.4. Частные производные высших порядков

Если продифференцировать по переменным x и y частные производные z'_x и z'_y , то получим частные производные второго порядка.

Определяются они следующим образом:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right) &= \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = z''_{xx} = f''_{x^2}(x; y); & \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right) &= \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = z''_{yx} = f''_{yx}(x; y); \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right) &= \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x} = z''_{xy} = f''_{xy}(x; y); & \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right) &= \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = z''_{yy} = f''_{y^2}(x; y).\end{aligned}$$

Если продифференцировать частные производные второго порядка, то получим восемь частных производных третьего порядка. Дифференцируя дальше – 16 частных производных четвертого порядка, затем 32 производные пятого, 64 производные шестого порядка, ...

Частная производная второго или более высокого порядков, взятая по различным переменным, называется *смешанной частной производной*.

Пример. Найдем все частные производные второго порядка функции

$$z = x^4 + 4x^2y^3 + 7xy + 1.$$

Найдем сначала первые частные производные z'_x и z'_y :

$$z'_x = (x^4 + 4x^2y^3 + 7xy + 1)'_x = 4x^3 + 8xy^3 + 7y;$$

$$z'_y = (x^4 + 4x^2y^3 + 7xy + 1)'_y = 12x^2y^2 + 7x.$$

Затем обе полученные частные производные z'_x и z'_y продифференцируем еще раз по каждому аргументу. Получим четыре частных производных второго порядка:

$$z''_{xx} = (4x^3 + 8xy^3 + 7y)'_x = 12x^2 + 8y^3; \quad z'_{yx} = (12x^2y^2 + 7x)'_x = 24xy^2 + 7;$$

$$z''_{xy} = (4x^3 + 8xy^3 + 7y)'_y = 24xy^2 + 7; \quad z'_{yy} = (12x^2y^2 + 7x)'_y = 24x^2y.$$

Заметим, что вторые частные производные z''_{xy} и z''_{yx} равны. Действительно, для непрерывных смешанных частных производных одного порядка, отличающихся только порядком дифференцирования, всегда можно сказать, что они равны между собой.

Пример. Найдем все частные производные второго порядка функции

$$z = \sin x \cos y.$$

Найдем сначала производные первого порядка:

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \cos x \cos y; \quad \frac{\partial z}{\partial y} = -\sin x \sin y.$$

А теперь еще раз продифференцируем нашу функцию:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = -\sin x \cos y; \quad \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x} = -\cos x \sin y;$$

$$\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = -\sin x \cos y.$$

10.3. Производные по направлению. Градиент

10.3.1. Производная по направлению

Пусть функция $z = f(x, y)$ определена в некоторой окрестности точки $M(x, y)$, вектор $l^0 = (\cos \alpha, \cos \beta)$ – единичный вектор, задающий направление прямой L , проходящей через точку $M(x, y)$ (рис. 10.3).

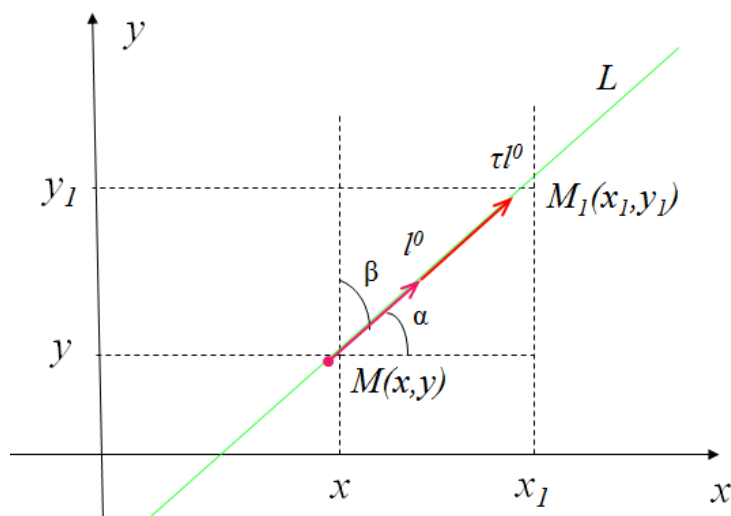


Рис. 10.3. Производная по направлению.

Выберем на прямой L точку $M_1(x_1, y_1) = M(x, y) + \tau \cdot l^0$ и рассмотрим приращение $\Delta z = z(M_1) - z(M) = f(x + \tau \cos \alpha, y + \tau \cos \beta) - f(x, y)$ в точке $M(x, y)$.

Определение. Предел отношения $\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{f(x + \tau \cos \alpha, y + \tau \cos \beta) - f(x, y)}{\tau}$, если

он существует, называется производной функции $z = f(x, y)$ в точке $M(x, y)$ по направлению $l^0 = (\cos \alpha, \cos \beta)$.

Обозначается производная функции по направлению $\frac{\partial z}{\partial l}$.

Если функция $z=f(x,y)$ имеет в точке непрерывные частные производные, то в этой точке существует и производная по любому направлению, исходящему из точки $M(x,y)$.

Производную функции по направлению $\frac{\partial z}{\partial l}$ можно вычислить следующим образом:

$$\frac{\partial z}{\partial l} = \frac{\partial z}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial z}{\partial y} \cos \beta.$$

Пример. Вычислить производную функции $z = x^2 + xy + y^2 + 2x + 2y$ в точке $M(1; 1)$ по направлению вектора $l = (3; 4)$.

Сначала определим единичный вектор l^0 , совпадающий с направлением вектора l : $l^0 = \frac{l}{|l|} = \left(\frac{3}{\sqrt{3^2 + 4^2}}; \frac{4}{\sqrt{3^2 + 4^2}} \right) = \left(\frac{3}{5}; \frac{4}{5} \right)$, следовательно, направляющие векторы будут равны

$$\cos \alpha = \frac{3}{5} \text{ и } \cos \beta = \frac{4}{5}.$$

Найдем частные производные:

$$\frac{\partial z}{\partial x} = 2x + y + 2; \quad \frac{\partial z}{\partial y} = x + 2y + 2.$$

Подставим в частные производные координаты точки $M(1; 1)$ и получим

$$\frac{\partial z}{\partial x} = 2 \cdot 1 + 1 + 2 = 5 \text{ и } \frac{\partial z}{\partial y} = 1 + 2 \cdot 1 + 2 = 5.$$

Тогда значение производной функции $z = x^2 + xy + y^2 + 2x + 2y$ в точке $M(1; 1)$ по направлению вектора $l = (3; 4)$ будет равно: $\frac{\partial z}{\partial l} = 5 \cdot \frac{3}{5} + 5 \cdot \frac{4}{5} = 7$.

10.3.2. Градиент

Определение. Градиентом функции $z = f(x, y)$ в точке $M_0(x_0, y_0)$ называется вектор с началом в точке M_0 , координаты которого равны соответствующим частным производным z'_x и z'_y , вычисленным в точке $M_0(x_0, y_0)$.

Обозначается градиент: $\text{grad } z = \left(\frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y} \right)$.

Геометрически градиент представляет собой вектор, указывающий направление, в котором из точки $M_0(x_0, y_0)$ функция $z = f(x, y)$ возрастает наибольшим образом.

Пример. Найти градиент функции $u = x^2 + 3xy^2 - y$ в точке $M(2, -1)$.

Для решения задачи найдем частные производные представленной функции:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 2x + 3y^2 \quad \frac{\partial u}{\partial y} = 6xy - 1.$$

Подставим в частные производные координаты точки $M(2, -1)$:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 2 \cdot 2 + 3 \cdot (-1)^2 = 4 - 3 = 1; \quad \frac{\partial u}{\partial y} = 6 \cdot 2 \cdot (-1) - 1 = -12 - 1 = -13.$$

Таким образом, градиент функции $u = x^2 + 3xy^2 - y$ в точке $M(2, -1)$ представляет собой вектор $(1, -13)$. Именно в этом направлении наша функция будет возрастать наибольшим образом.

10.4. Экстремумы функции двух переменных

Понятие максимума, минимума, экстремума функции двух переменных аналогичны соответствующим понятиям функции одной независимой переменной.

Пусть функция $z = f(x, y)$ определена в некоторой окрестности точки $M_0(x_0, y_0)$.

Определение. Точка $M_0(x_0, y_0)$ называется точкой максимума (минимума) функции $z = f(x, y)$, если существует такая окрестность точки $M_0(x_0, y_0)$, что для каждой точки $M(x, y)$, отличной от точки $M_0(x_0, y_0)$, из этой окрестности выполняется неравенство: $f(x, y) < f(x_0, y_0)$ ($f(x, y) > f(x_0, y_0)$) (рис. 11.14).

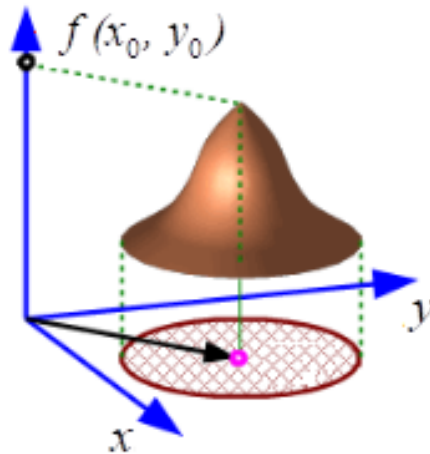


Рис. 10.4. Максимум функции двух переменных.

Значение функции в точке максимума (минимума) называется максимумом (минимумом) функции. Максимум и минимум функции называют ее экстремумами.

10.4.1. Необходимые условия экстремума

Теорема 10.2. (необходимые условия экстремума). Если в точке $M_0(x_0, y_0)$ дифференцируемая функция $z = f(x, y)$ имеет экстремум, то ее частные производные в этой точке равны нулю: $f'_x(x_0, y_0) = f'_y(x_0, y_0) = 0$.

Точка, в которой частные производные первого порядка функции $z = f(x, y)$ равны нулю, т.е. $f'_x(x_0, y_0) = f'_y(x_0, y_0) = 0$, называется *стационарной точкой* функции z .

Стационарные точки и точки, в которых хотя бы одна частная производная не существует, называют *критическими точками*.

Пример. Найдем точки возможного экстремума функции $z = -2x^2 + y^2 + 32x$ и значения функции в этих точках.

Для решения задачи продифференцируем функцию $z = -2x^2 + y^2 + 32x$ по аргументам x и y :

$$z'_x = (-2x^2 + y^2 + 32x)'_x = -4x + 32;$$

$$z'_y = (-2x^2 + y^2 + 32x)'_y = 2y.$$

Приравняем каждую из частных производных к нулю и составим систему уравнений:

$$\begin{cases} -4x + 32 = 0 \\ 2y = 0 \end{cases}.$$

Решая ее, получим координаты стационарной точки

$$\begin{cases} x = 8 \\ y = 0 \end{cases}.$$

Найдем значение функции в этой точке:

$$z(8; 0) = -2 \cdot 8^2 + 0^2 + 32 \cdot 8 = 128.$$

Пример. Найти точки возможного экстремума (стационарные точки) и значение функции в этих точках, если

$$z = 4x^2 - 5y^2 + 48x - 70y - 5.$$

Найдем частные производные z'_x и z'_y :

$$z'_x = (4x^2 - 5y^2 + 48x - 70y - 5)'_x = 8x + 48;$$

$$z'_y = (4x^2 - 5y^2 + 48x - 70y - 5)'_y = -10y - 70.$$

Решим систему уравнений:

$$\begin{cases} z'_x = 0 \\ z'_y = 0 \end{cases}; \quad \begin{cases} 8x + 48 = 0 \\ -10y - 70 = 0 \end{cases}; \quad \begin{cases} x = -6 \\ y = -7 \end{cases}.$$

Найдем значение функции в этой точке:

$$z(-6; -7) = 4(-6)^2 - 5(-7)^2 + 48 \cdot (-6) - 70 \cdot (-7) - 5 = 96.$$

Пример. Найти точки возможного экстремума (стационарные точки) и значение функции в этих точках, если

$$z = 2x^2 + 7xy + 6y^2 - 2x - y.$$

Найдем частные производные функции:

$$z'_x = (2x^2 + 7xy + 6y^2 - 2x - y)'_x = 4x + 7y - 2;$$

$$z'_y = (2x^2 + 7xy + 6y^2 - 2x - y)'_y = 7x + 12y - 1.$$

Решим систему уравнений:

$$\begin{cases} z'_x = 0 \\ z'_y = 0 \end{cases}; \quad \begin{cases} 4x + 7y - 2 = 0 \\ 7x + 12y - 1 = 0 \end{cases}; \quad \begin{cases} x = -17 \\ y = 10 \end{cases}.$$

Найдем значение функции в этой точке:

$$z(-17;10) = 2(-17)^2 + 7 \cdot (-17) \cdot 10 + 6 \cdot 10^2 - 2 \cdot (-17) - 10 = 12.$$

Пример. Для функции $z = x^3 + 18x^2 - 2y^2 + 105x - 4y$ определим стационарные точки и значение функции в этих точках.

Найдем частные производные z'_x и z'_y :

$$z'_x = (x^3 + 18x^2 - 2y^2 + 105x - 4y)'_x = 3x^2 + 36x + 105;$$

$$z'_y = (x^3 + 18x^2 - 2y^2 + 105x - 4y)'_y = -4y - 4.$$

Решим систему уравнений:

$$\begin{cases} 3x^2 + 36x + 105 = 0 \\ -4y - 4 = 0 \end{cases}.$$

Первое квадратное уравнение системы имеет 2 решения:

$$x_1 = -7 \text{ и } x_2 = -5.$$

Второе уравнение – одно: $y = 0$.

Очевидно, функция $z = x^3 + 18x^2 - 2y^2 + 105x - 4y$ будет иметь две стационарные точки с координатами: $(-7; 0)$ и $(-5; 0)$.

Для определения значений функции подставим в функцию значения аргументов стационарных точек:

$$z_1(-7;-1) = (-7)^3 + 18 \cdot (-7)^2 - 2(-1)^2 + 105 \cdot (-7) - 4 \cdot (-1) = -194;$$

$$z_1(-5;-1) = (-5)^3 + 18 \cdot (-5)^2 - 2(-1)^2 + 105 \cdot (-5) - 4 \cdot (-1) = -198.$$

10.4.2. Достаточные условия экстремума

В критических точках функция может иметь экстремум, а может и не иметь. Равенство нулю частных производных является необходимым, но не достаточным условием существования экстремума.

Теорема 11.3. (достаточное условие экстремума). Пусть в стационарной точке $M_0(x_0, y_0)$ и некоторой ее окрестности функция $z = f(x, y)$ имеет непрерывные частные производные до второго порядка включительно.

Вычислим определитель:

$$\Delta = \begin{vmatrix} f''_{xx}(x_0; y_0) & f''_{xy}(x_0; y_0) \\ f''_{xy}(x_0; y_0) & f''_{yy}(x_0; y_0) \end{vmatrix}.$$

Тогда в зависимости от значения определителя Δ возможны три случая.

1-й случай $\Delta > 0$.

Если $f''_{xx}(x_0; y_0) < 0$; то функция $z = f(x, y)$ в точке $M_0(x_0, y_0)$ имеет максимум, если $f''_{xx}(x_0, y_0) > 0$, то минимум.

2-й случай $\Delta < 0$.

Функция в точке $M_0(x_0, y_0)$ экстремума не имеет.

3-й случай $\Delta = 0$.

В этом случае нельзя с определенностью сказать о наличии экстремума исследуемой функции.

Пример. Исследуем функцию $z = x^2 - 4y^2 + 4x - 8y - 3$ на экстремумы.

Найдем частные производные функции:

$$z'_x = (x^2 - 4y^2 + 4x - 8y - 3)'_x = 2x + 4;$$

$$z'_y = (x^2 - 4y^2 + 4x - 8y - 3)'_y = -8y - 8.$$

Для определения критических точек решим систему:

$$\begin{cases} 2x + 4 = 0 \\ -8y - 8 = 0 \end{cases}.$$

В результате решения получим единственную точку возможного экстремума: $(-2, -1)$.

Продифференцируем функцию еще один раз. Получим:

$$z''_{xx} = (2x + 4)'_x = 2; \quad z''_{xy} = z''_{yx} = (2x + 4)'_y = 0;$$

$$z''_{yy} = (-8y - 8)'_y = -8.$$

Вычислим определитель:

$$\Delta = \begin{vmatrix} f''_{xx}(x_0, y_0) & f''_{xy}(x_0, y_0) \\ f''_{xy}(x_0, y_0) & f''_{yy}(x_0, y_0) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2 & 0 \\ 0 & -8 \end{vmatrix} = -16.$$

Поскольку $\Delta < 0$, то функция $z = x^2 - 4y^2 + 4x - 8y - 3$ экстремумов не имеет.

Пример. Исследуем функцию $z = -x^2 - 5xy - 6y^2 - 4x - 5y - 9$ на экстремумы.

Найдем частные производные функции:

$$z'_x = (-x^2 - 5xy - 6y^2 - 4x - 5y - 9)'_x = -2x - 5y - 4;$$

$$z'_y = (-x^2 - 5xy - 6y^2 - 4x - 5y - 9)'_y = -5x - 12y - 5.$$

Решим систему уравнений:

$$\begin{cases} z'_x = 0 \\ z'_y = 0 \end{cases}; \quad \begin{cases} -2x - 5y - 4 = 0 \\ -5x - 12y - 5 = 0 \end{cases}; \quad \begin{cases} x = 23 \\ y = -10 \end{cases}.$$

Найдем частные производные функции второго порядка:

$$z''_{xx} = (-2x - 5y - 4)'_x = -2; \quad z''_{xy} = z''_{yx} = (-2x - 5y - 4)'_y = -5;$$

$$z''_{yy} = (-5x - 12y - 5)'_y = -12.$$

Вычислим определитель:

$$\Delta = \begin{vmatrix} f''_{xx}(x_0, y_0) & f''_{xy}(x_0, y_0) \\ f''_{xy}(x_0, y_0) & f''_{yy}(x_0, y_0) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -2 & -5 \\ -5 & -12 \end{vmatrix} = 24 - 25 = -1.$$

Так как $\Delta < 0$, то в точке $M_0(23; -10)$ нет экстремума.

Пример. Найдем экстремумы функции $z = x^3 + 6x^2 - 2y^2 + 9x - 4y + 2$.

Определим критические точки функции $z = x^3 + 6x^2 - 2y^2 + 9x - 4y + 2$. Для этого найдем частные производные нашей функции:

$$z'_x = (x^3 + 6x^2 - 2y^2 + 9x - 4y + 2)'_x = 3x^2 + 12x + 9;$$

$$z'_y = (x^3 + 6x^2 - 2y^2 + 9x - 4y + 2)'_y = -4y - 4.$$

Решая систему уравнений: $\begin{cases} 3x^2 + 12x + 9 = 0 \\ -4y - 4 = 0 \end{cases}$, получим две критические

точки: $(-3; -1)$ и $(-1; -1)$.

Найдем частные производные функции второго порядка и рассчитаем их значения в найденных критических точках: $z''_{1xx} = (3x^2 + 12x + 9)'_x = 6x + 12;$

$$z''_{1xy} = z''_{yx} = (3x^2 + 12x + 9)'_y = 0; \quad z''_{1yy} = (-4y - 4)'_y = -4.$$

Рассчитаем определители Δ_1 и Δ_2 для соответствующих критических точек.

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} f''_{xx}(x_1, y_1) & f''_{xy}(x_1, y_1) \\ f''_{xy}(x_1, y_1) & f''_{yy}(x_1, y_1) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -6 & 0 \\ 0 & -4 \end{vmatrix} = 24 > 0;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} f''_{xx}(x_2, y_2) & f''_{xy}(x_2, y_2) \\ f''_{xy}(x_2, y_2) & f''_{yy}(x_2, y_2) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 6 & 0 \\ 0 & -4 \end{vmatrix} = -24 < 0.$$

Так как $\Delta_1 > 0$, а $f''_{xx}(x_1, y_1) < 0$, то в точке $(-3; -1)$ наблюдается локальный максимум. Однако в силу того, что $\Delta_2 < 0$, точка $(-1; -1)$ не является экстремумом.

10.5. Исследование функции в замкнутой области

10.5.1. Общая схема исследования функций в замкнутой области

Пусть функция $z=f(x;y)$ определена и непрерывна в ограниченной замкнутой области D . Тогда она достигает в некоторых точках D своего наибольшего M и наименьшего m значений (т.н. глобальный экстремум). Эти значения достигаются функцией в точках, расположенных внутри области D , или в точках, лежащих на границе области (рис. 10.5).

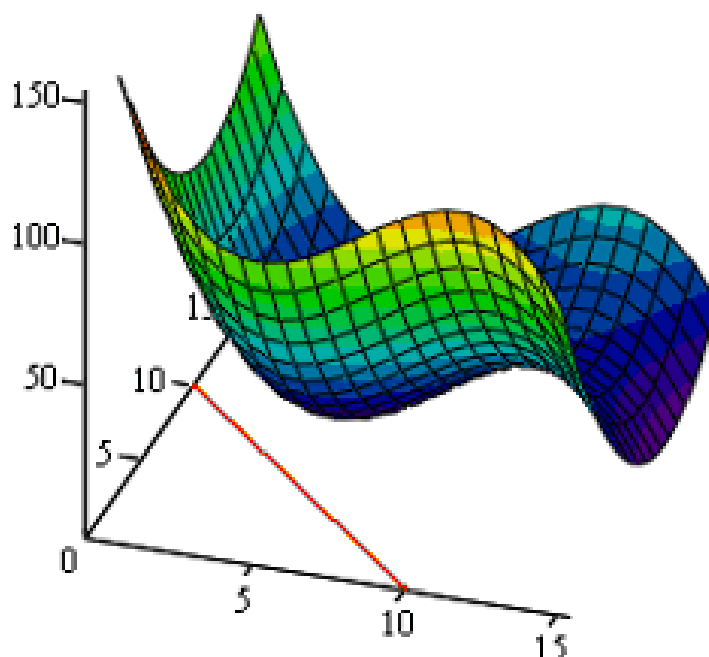


Рис. 10.5. Функция двух переменных.

Правило нахождения наибольшего и наименьшего значений дифференцируемой в области D функции $z=f(x,y)$ состоит в следующем:

1. Найти все критические точки функции, принадлежащие D , и вычислить значения функции в них.
2. Найти наибольшее и наименьшее значения функции $z=f(x,y)$ на границах области.
3. Сравнить все найденные значения функции и выбрать из них наибольшее M и наименьшее m .

10.5.2. Нахождение наибольшего и наименьшего значений

Пример. Найти наибольшее и наименьшее значения функции

$$z = f(x, y) = x^2 + 2xy - y^2 - 4x$$

в ограниченной замкнутой области $D: y=0; x=3; x-y+1=0$.

Изобразим область определения функции D (рис. 10.6). На рисунке будут изображены все точки, которые мы будем находить в процессе исследования функции:

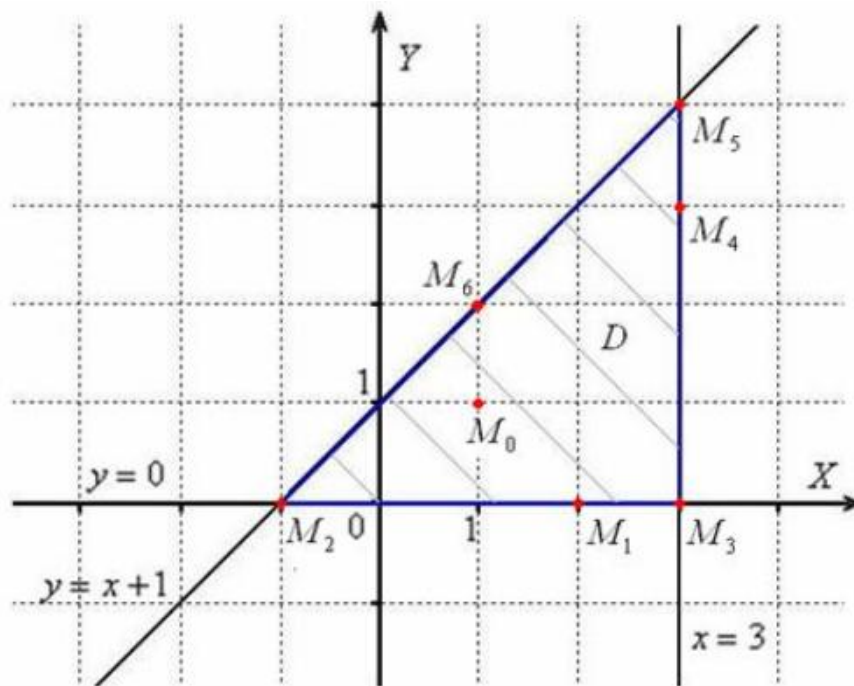


Рис. 10.6. Область определения функции.

1. Найдем все критические точки функции, принадлежащие D , и вычислим значения функции в них.

Найдем частные производные функции z :

$$z'_x = (x^2 + 2xy - y^2 - 4x)'_x = 2x + 2y - 0 - 4 = 2x + 2y - 4;$$

$$z'_y = (x^2 + 2xy - y^2 - 4x)'_y = 0 + 2x - 2y - 0 = 2x - 2y.$$

Решим систему уравнений:

$$\begin{cases} z'_x = 0 \\ z'_y = 0 \end{cases}; \quad \begin{cases} 2x + 2y - 4 = 0 \\ 2x - 2y = 0 \end{cases}; \quad \begin{cases} x = 1 \\ y = 1 \end{cases}.$$

Найденная стационарная точка $M_0(1; 1)$ принадлежит области D . Определим значение функции в этой точке:

$$z(M_0) = z(1; 1) = 1 + 2 - 1 - 4 = -2.$$

2. Найдем наибольшее и наименьшее значения функции $z = f(x, y)$ на границах области. Поскольку граница состоит из сторон треугольника, то исследование удобно проводить в 3 этапа.

1 этап

Рассмотрим нижнюю сторону треугольника. Подставим уравнение границы $y = 0$ в функцию $z = x^2 + 2xy - y^2 - 4x$. Получим:

$$z = x^2 - 4x.$$

Найдем производную полученной функции и приравняем ее к нулю:

$$z' = (x^2 - 4x)' = 2x - 4 = 0.$$

Найденная стационарная точка $M_1(2; 0)$ принадлежит нижней стороне границы области D . Найдем значение функции в точке M_1 :

$$z(M_1) = z(2; 0) = 4 + 0 - 0 - 8 = -4.$$

Вычислим значения функции на концах отрезка в точках $M_2(-1; 0)$ и $M_3(3; 0)$:

$$z(M_2) = z(-1; 0) = (-1)^2 + 2 \cdot (-1) \cdot 0 - 0^2 - 4 \cdot (-1) = 1 - 0 + 0 + 4 = 5.$$

$$z(M_3) = z(3; 0) = 3^2 + 2 \cdot 3 \cdot 0 - 0^2 - 4 \cdot 3 = 9 + 0 - 0 - 12 = -3.$$

2 этап

Рассмотрим правую сторону треугольника. Подставим уравнение границы $x = 3$ в функцию $z = x^2 + 2xy - y^2 - 4x$. Получим:

$$z = -y^2 + 6y - 3.$$

Найдем производную полученной функции и приравняем ее к нулю:

$$z' = (-y^2 + 6y - 3)' = -2y + 6 = 0.$$

Найденная стационарная точка $M_4(3; 3)$ принадлежит нижней правой стороне границы области D .

$$z(M_4) = z(3; 3) = 3^2 + 2 \cdot 3 \cdot 3 - 3^2 - 4 \cdot 3 = 9 + 18 - 12 = 6.$$

Вычислим значения функции на верхнем конце отрезка в точке $M_5(3; 4)$:

$$z(M_5) = z(3; 4) = 3^2 + 2 \cdot 3 \cdot 4 - 4^2 - 4 \cdot 3 = 9 + 24 - 16 - 12 = 5.$$

3 этап

Рассмотрим правую сторону треугольника. Подставим уравнение границы $y = x + 1$ в функцию $z = x^2 + 2xy - y^2 - 4x$. Получим:

$$z = x^2 + 2x(x+1) - (x+1)^2 - 4x = 2x^2 - 4x - 1.$$

Найдем производную и приравняем ее к нулю:

$$z' = (2x^2 - 4x - 1)' = 4x - 4.$$

Найденная стационарная точка $M_6(1; 2)$ принадлежит левой стороне границы области D . Найдем значение функции z в этой точке:

$$z(M_6) = z(1; 2) = 1^2 + 2 \cdot 1 \cdot 2 - 2^2 - 4 \cdot 1 = 1 + 4 - 4 - 4 = -3.$$

Составим список значений полученных точек:

$$z(M_0) = z(1; 1) = -2;$$

$$z(M_1) = z(2, 0) = -4;$$

$$z(M_2) = z(-1, 0) = 5;$$

$$z(M_3) = z(3, 0) = -3;$$

$$z(M_4) = z(3, 3) = 6;$$

$$z(M_5) = z(3, 4) = 5;$$

$$z(M_6) = z(1, 2) = -3.$$

Анализируя список, мы видим, что наибольшее значение, равное шести, функция z достигает в точке $M_4(3, 3)$, а наименьшее, равное минус четыре, в точке $M_1(2, 0)$.

Вопросы для самоконтроля

1. Сформулируйте понятие функции нескольких переменных. Что является областью определения функции двух переменных?
2. В чем заключается геометрический смысл непрерывности функции двух переменных?
3. Продемонстрируйте на примере принцип нахождения частных производных функций двух и трех переменных.
4. Каким образом можно найти частные и смешанные производные высших порядков функций нескольких переменных? Приведите примеры.
5. Каким образом осуществляется нахождение производной сложной функции двух переменных.

6. Раскройте понятие дифференциала. Опишите метод нахождения дифференциала.
7. Что такое производная по направлению? Каким образом определяется производная по направлению?
8. Раскройте понятие градиента. Опишите метод нахождения градиента для функции двух переменных в заданной точке.
9. Какой геометрический смысл несет понятие градиента. Покажите на примере принцип использования градиента.
10. Как определяется понятие «экстремум» для функции двух переменных? Приведите примеры экстремальных точек функции двух переменных.
11. Опишите алгоритм нахождения стационарных и критических точек функции двух переменных.
12. Каковы необходимые условия экстремума функции двух переменных?
13. На примере покажите принципы нахождения стационарных точек.
14. Опишите достаточные условия экстремума функции двух переменных.
15. Как осуществляется исследование функции двух переменных на экстремумы?
16. Перечислите этапы нахождения наибольшего и наименьшего значения функции двух переменных в замкнутой области.
17. На примере продемонстрируйте алгоритм нахождения наибольшего и наименьшего значения функции двух переменных в замкнутой области. Могут ли искомые значения находиться на границах области?

Глава 11. Неопределенные интегралы

Задачи интегрирования функций одной или нескольких переменных являются широко востребованными при решении многих прикладных научных и технических задач в различных областях математики, физики, астрономии, химии, биологии, медицине, технике, производстве и строительстве.

Начиная с классических задач по определению перемещений, массы тел, центра тяжести, длин дуг, площадей поверхностей, объема фигур, количества работы, вычислению электрического заряда, количества теплоты, давления в жидкостях и газах до сложнейших расчетов в производстве современных автомобилей, самолетов, морских судов, космических кораблей, проектирования компьютерных систем, сложных технических приборов, строительства атомных электростанций и небоскребов – нигде невозможно обойтись без интегрального исчисления.

Глава «Неопределенные интегралы» содержит учебный материал, описывающий математический аппарат интегрального исчисления. В рамках данной главы мы изучим основные понятия дифференциального исчисления, рассмотрим методы нахождения неопределенных интегралов, определим принципы использования интегралов для решения прикладных задач.

Изучая вопросы интегрирования мы дадим понятие первообразной функции и неопределенного интеграла, покажем графическую интерпретацию первообразной, опишем основные свойства неопределенного интеграла, представим наиболее употребимые табличные интегралы. Здесь мы также рассмотрим простейшие методы нахождения неопределенных интегралов: с помощью непосредственного интегрирования, внесения под знак дифференциала, изучим метод замены переменных и метод интегрирования по частям. Большой интерес представляют собой алгоритмы интегрирования дробно-рациональных функций с действительными или комплексными корнями знаменателей и некоторых типов иррациональных функций.

11.1. Понятие неопределенного интеграла

Основной задачей дифференциального исчисления является нахождение производной или дифференциала данной функции. Интегральное исчисление решает обратную задачу – нахождение самой функции по ее производной или дифференциалу.

Функция $F(x)$ называется *первообразной* функцией для функции $f(x)$ на промежутке X , если в каждой точке x этого промежутка $F'(x) = f(x)$.

Пример. Первообразной для функции $f(x) = x^2$ является функция $F(x) = \frac{x^3}{3}$, так как $F'(x) = \left(\frac{x^3}{3}\right)' = x^2$. Однако первообразными для $f(x) = x^2$ будут и любые функции вида $F(x) = \frac{x^3}{3} + C$, поскольку продифференцировав $\frac{x^3}{3} + C$ мы также получим x^2 .

Теорема 12.1. Если функция $F(x)$ является первообразной функции $f(x)$ на промежутке X , то множество всех первообразных для $f(x)$ задается формулой $F(x) + C$, где C – постоянное число.

Учитывая все сказанное выше, дадим определение неопределенного интеграла:

Множество всех первообразных функций $F(x) + C$ для заданной функции $f(x)$ называется *неопределенным интегралом* от $f(x)$.

Обозначается неопределенный интеграл $\int f(x) dx$. В данной записи $f(x)$ называют *подынтегральной функцией*, $f(x) dx$ – *подынтегральным выражением*, а x – *переменной интегрирования*.

Операция отыскания неопределенного интеграла от функции называется *интегрированием* этой функции.

Пример. Одной из первообразных для функции $f(x) = x^2$ является функция $F(x) = \frac{x^3}{3}$, тогда неопределенный интеграл $\int f(x) dx$ можно записать в виде $\int x^2 dx$, а значение полученного неопределенного интеграла равно:

$$\int x^2 dx = F(x) + C = \frac{x^3}{3} + C.$$

Геометрически неопределенный интеграл представляет собой семейство «параллельных» кривых $F(x) + C$, где каждому числовому значению C соответствует определенная кривая. График первообразной называется интегральной кривой (рис. 12.1).

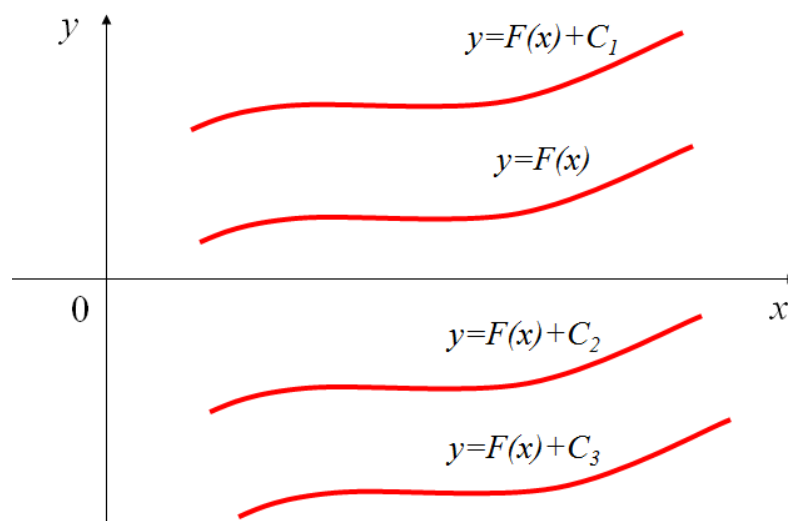


Рис. 11.1. Семейство кривых $F(x) + C$.

11.2. Основные свойства и табличные интегралы

11.2.1. Основные свойства неопределенного интеграла

Из определения непосредственно следуют его основные свойства.

1. Дифференциал от неопределенного интеграла равен подынтегральному выражению, а производная неопределенного интеграла равна подынтегральной функции:

$$d \int f(x) dx = f(x) dx \text{ и } \left(\int f(x) dx \right)' = f(x).$$

2. Неопределенный интеграл от дифференциала некоторой функции равен

сумме этой функции и произвольной постоянной:

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

3. Постоянный множитель можно выносить за знак интеграла:

$$\int k f(x) dx = k \int f(x) dx.$$

4. Неопределенный интеграл от алгебраической суммы (разности) двух функций равен алгебраической сумме (разности) интегралов от этих функций:

$$\int [f(x) \pm g(x)] dx = \int f(x) dx \pm \int g(x) dx.$$

5. Инвариантность формулы интегрирования.

Если $\int f(x) dx = F(x) + C$ и $u = \varphi(x)$ – произвольная функция, имеющая непрерывную производную, то $\int f(u) du = F(u) + C$.

11.2.2. Табличные интегралы

Путем обращения формул дифференцирования основных элементарных функций можно получить табличные интегралы:

$$1) \int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} + C, \quad (n \neq -1);$$

$$2) \int \frac{dx}{x} = \ln|x| + C, \quad (x \neq 0);$$

$$3) \int a^x dx = \frac{a^x}{\ln a} + C, \quad (0 < a \neq 1);$$

$$4) \int e^x dx = e^x + C;$$

$$5) \int \sin x dx = -\cos x + C;$$

$$6) \int \cos x dx = \sin x + C;$$

$$7) \int \frac{dx}{\cos^2 x} = \operatorname{tg} x + C;$$

$$8) \int \frac{dx}{\sin^2 x} = -\operatorname{ctg} x + C;$$

$$9) \int \frac{dx}{1+x^2} = \operatorname{arctg} x + C;$$

$$10) \int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \arcsin(x) + C;$$

$$11) \int \frac{dx}{x^2 - a^2} = \frac{1}{2a} \ln \left| \frac{x-a}{x+a} \right| + C \quad (a \neq 0);$$

$$12) \int \frac{dx}{\sqrt{x^2 \pm k}} = \ln \left| x + \sqrt{x^2 \pm k} \right| + C;$$

$$13) \int \frac{dx}{x^2 + a^2} = \frac{1}{a} \operatorname{arctg} \frac{x}{a} + C;$$

$$14) \int \frac{dx}{\sqrt{a^2 - x^2}} = \arcsin \frac{x}{a} + C.$$

11.3. Простейшие методы интегрирования

Нахождение интегралов – это сложный, творческий и иногда непредсказуемый процесс, однако в ряде стандартных случаев можно выделить основные методы интегрирования, выбираемые в зависимости от вида интегрируемых выражений.

11.3.1. Непосредственное интегрирование

Метод интегрирования, при котором данный интеграл путем тождественных преобразований подынтегральной функции (или выражения) и применения свойств неопределенного интеграла приводится к одному или нескольким табличным интегралам, называется *непосредственным интегрированием*.

Пример. Найдем интеграл $\int (12x - 9) dx$.

Используя табличную формулу интегрирования степенной функции

$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} + C$ и свойство интеграла суммы функций получим:

$$\int (12x - 9) dx = \int 12x dx - \int 9 dx = 12 \frac{x^2}{2} - 9x + C = 6x^2 - 9x + C.$$

Пример. Найдем интеграл $\int (18x^2 + 16x - 20) dx$.

Аналогично предыдущему примеру здесь также можно применить свойство интеграла суммы функций:

$$\int (18x^2 + 16x - 20) dx = \int 18x^2 dx + \int 16x dx - \int 20 dx.$$

Затем будем использовать формулу интегрирования степенной функции

$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} + C$ для каждого из полученных интегралов:

$$\begin{aligned} \int 18x^2 dx + \int 16x dx - \int 20 dx &= 18 \cdot \frac{x^3}{3} + 16 \frac{x^2}{2} - 20x + C = \\ &= 6x^3 + 8x^2 - 20x + C. \end{aligned}$$

Пример. Найдем интеграл $\int (10x+8)x^3 dx$.

Перед интегрированием раскроем скобки в выражении подынтегральной функции:

$$\int (10x+8)x^3 dx = \int (10x^4 + 8x^3) dx.$$

Теперь разобьем наш интеграл на два слагаемых и, используя табличные формулы интегрирования степенной функции, получим:

$$\int (10x^4 + 8x^3) dx = \int 10x^4 dx + \int 8x^3 dx = 10 \cdot \frac{x^5}{5} + 8 \frac{x^4}{4} + C = 2x^5 + 8x^4 + C.$$

Пример. Найдем интеграл $\int (10x^{10} + 3^x) dx$.

Используя свойство интеграла суммы двух функций и табличные формулы интегрирования степенной $\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} + C$ и показательной $\int a^x dx = \frac{a^x}{\ln a} + C$ функций, получим:

$$\int (10x^{10} + 3^x) dx = 10 \cdot \frac{x^{11}}{11} + \frac{3^x}{\ln 3} + C.$$

Пример. Найдем интеграл $\int (2x^2 + 1)^2 dx$.

Для нахождения интеграла раскроем скобки в записи функции, а затем разобьем интеграл на три элементарных слагаемых:

$$\begin{aligned} \int (2x^2 + 1)^2 dx &= \int (4x^4 + 4x^2 + 1) dx = 4 \int x^4 dx + 4 \int x^2 dx + \int dx = \\ &= \frac{4}{5} x^5 + \frac{4}{3} x^3 + x + C. \end{aligned}$$

Пример. Найдем интеграл $\int (19 \cos x - 5 \sin x) dx$.

Учитывая, что $\int \sin x dx = -\cos x + C$ и $\int \cos x dx = \sin x + C$, найдем значение неопределенного интеграла:

$$\int (19 \cos x - 5 \sin x) dx = 19 \int \cos x dx - 5 \int \sin x dx = 19 \sin x - 5 \cos x + C.$$

Пример. Найдем интеграл $\int \frac{\cos 2x}{\sin^2 x \cos^2 x} dx$.

В этом примере разложим $\cos 2x$ на разность $\cos^2 x - \sin^2 x$, а затем разобьем функцию на две дроби, которые проинтегрируем с помощью табличных интегралов $\int \frac{dx}{\sin^2 x} = -\operatorname{ctg} x + C$ и $\int \frac{dx}{\cos^2 x} = \operatorname{tg} x + C$:

$$\begin{aligned}\int \frac{\cos 2x}{\sin^2 x \cos^2 x} dx &= \int \frac{\cos^2 x - \sin^2 x}{\sin^2 x \cos^2 x} dx = \int \left(\frac{1}{\sin^2 x} - \frac{1}{\cos^2 x} \right) dx = \\ &= -\operatorname{ctg} x - \operatorname{tg} x + C.\end{aligned}$$

Пример. Найдем интеграл $\int \frac{10x^2 + 14x - 1}{x} dx$.

В подынтегральном выражении $\frac{10x^2 + 14x - 1}{x}$ разделим числитель на знаменатель с остатком:

$$\int \frac{10x^2 + 14x - 1}{x} dx = \int \left(10x + 14 - \frac{1}{x} \right) dx.$$

Теперь можно разбить интеграл на три части и, используя соответствующие табличные интегралы, найти неопределенный интеграл:

$$\int \left(10x + 14 - \frac{1}{x} \right) dx = \int 10x dx + \int 14 dx - \int \left(\frac{1}{x} \right) dx = 10 \frac{x^2}{2} + 14x - \ln|x| + C.$$

Пример. Найдем интеграл $\int \frac{10(x^2 - 3x - 270)}{x - 18} dx$.

В подынтегральном выражении $\frac{10(x^2 - 3x - 270)}{x - 18}$ попробуем сократить дробь. Для этого разложим трехчлен $x^2 - 3x - 270$ на множители.

Найдем дискриминант $D = b^2 - 4ac = 9 + 4 \cdot 270 = 1089$.

Тогда $x_1 = \frac{3 - \sqrt{1089}}{2} = \frac{3 - 33}{2} = -15$, а $x_2 = \frac{3 + \sqrt{1089}}{2} = \frac{3 + 33}{2} = 18$. Таким

образом, трехчлен $x^2 - 3x - 270$ можно представить, как $(x + 15)(x - 18)$.

Упростим неопределенный интеграл:

$$\int \frac{10(x^2 - 3x - 270)}{x - 18} dx = \int \frac{10(x + 15)(x - 18)}{x - 18} dx = \int (10(x + 15)) dx.$$

Теперь раскроем скобки, разобьем интеграл на два неопределенных интеграла:

$$\int (10(x + 15)) dx = \int (10x + 150) dx = 10 \int x dx + 150 \int dx.$$

И, наконец, используя табличный интеграл степенной функции получим решение:

$$10 \int x dx + 150 \int dx = 10 \frac{x^2}{2} + 150x + C = 5x^2 + 150x + C.$$

11.3.2. Внесение под знак дифференциала

При сведении заданного интеграла к табличному часто используются преобразования, использующие внесение под знак дифференциала интегрируемых выражений.

Метод основан на определении дифференциала: $f'(x)dx = d(f(x))$. Он используется, если в произведении подынтегральной функции и дифференциала можно увидеть произведение другой функции и дифференциала от нее.

При внесении под знак дифференциала можно использовать некоторые преобразования дифференциала:

$$1) du = d(u \pm a), \quad a - const; \qquad 2) du = \frac{1}{a} d(au), \quad a - const;$$

$$3) u^n du = \frac{1}{n+1} d(u^{n+1}); \qquad 4) \frac{du}{u} = d(\ln u);$$

$$5) \sin u du = -d(\cos u); \qquad 6) \cos u du = d(\sin u).$$

Пример. Найдём интеграл $\int 4\cos(x-12) dx$.

Используя преобразование $du = d(u \pm a)$, можно получить под знаком дифференциала выражение $x-12$. Заодно вынесем четверку за знак дифференциала. Таким образом,

$$\int 4\cos(x-12)dx = 4\int \cos(x-12)d(x-12).$$

Теперь вспомним, что $\int \cos x dx = \sin x + C$. Учитывая этот факт получим значение неопределенного интеграла:

$$4\int \cos(x-12)d(x-12) = 4\sin(x-12) + C.$$

Пример. Найдем интеграл $\int \frac{dx}{x-4}$.

Воспользуемся преобразованием $du = d(u \pm a)$ и изменим дифференциал с dx на $d(x-4)$. В результате получим:

$$\int \frac{dx}{x-4} = \int \frac{d(x-4)}{x-4}.$$

Теперь мы видим, что наш интеграл приведен к табличному виду $\int \frac{dx}{x} = \ln|x| + C$. Зная, что если $\int f(x)dx = F(x) + C$ и $u = \varphi(x)$ – произвольная функция, имеющая непрерывную производную, то $\int f(u)du = F(u) + C$. Окончательно получим:

$$\int \frac{d(x-4)}{x-4} = \ln|x-4| + C.$$

Пример. Найдем интеграл $\int \frac{2xdx}{x^2-5}$.

Воспользуемся преобразованием $u^n du = \frac{1}{n+1} d(u^{n+1})$. Для этого внесем под знак дифференциала переменную x . В результате получим:

$$\int \frac{2xdx}{x^2-5} = \int \frac{2x^0 dx}{x^2-5} = \int \frac{2 \cdot \frac{1}{2} dx^2}{x^2-5} = \int \frac{dx^2}{x^2-5}.$$

Теперь, согласно преобразованию $du = d(u \pm a)$, отнимем от значения x^2 , находящегося под знаком дифференциала, значение 5:

$$\int \frac{dx^2}{x^2-5} = \int \frac{d(x^2-5)}{x^2-5}.$$

Полученное выражение можно рассматривать, как табличный интеграл

$\int \frac{dx}{x} = \ln|x| + C$, где роль переменной x выполняет выражение $x^2 - 5$.

$$\int \frac{d(x^2 - 5)}{x^2 - 5} = \ln|x^2 - 5| + C.$$

Пример. Найдем интеграл $\int (2x + 3)^{17} dx$.

Для нахождения интеграла используем преобразования

$u^n du = \frac{1}{n+1} d(u^{n+1})$ степенной функции:

$$\int (2x + 3)^{17} dx = \int (2x + 3)^{17} \cdot \frac{1}{2} d(2x + 3) = \frac{1}{2} \int (2x + 3)^{17} d(2x + 3).$$

Используя табличный интеграл $\int a^x dx = \frac{a^x}{\ln a} + C$ получим окончательный

ответ:

$$\frac{1}{2} \int (2x + 3)^{17} d(2x + 3) = \frac{1}{2} \cdot \frac{(2x + 3)^{18}}{18} + C = \frac{(2x + 3)^{18}}{36} + C.$$

Пример. Найдем интеграл $\int e^{2x+1} dx$.

Внесем под знак дифференциала выражение $2x + 1$. Для этого

воспользуемся преобразованием $u^n du = \frac{1}{n+1} d(u^{n+1})$:

$$\int e^{2x+1} dx = \int e^{2x+1} \cdot \frac{1}{2} d(2x + 1).$$

Вынесем за знак интеграла $\frac{1}{2}$, а затем воспользуемся табличным

интегралом $\int e^x dx = e^x + C$:

$$\int e^{2x+1} \cdot \frac{1}{2} d(2x + 1) = \frac{1}{2} \int e^{2x+1} d(2x + 1) = \frac{1}{2} e^{2x+1} + C.$$

Пример. Найдем интеграл $\int \frac{dx}{x \ln x}$.

Запишем интеграл в стандартном виде:

$$\int \frac{dx}{x \ln x} = \int \frac{1}{\ln x} \cdot \frac{1}{x} \cdot dx$$

Зная, что $\frac{du}{u} = d(\ln u)$, внесем под знак дифференциала $\frac{1}{x}$, а затем,

используя табличный интеграл $\frac{du}{u} = d(\ln u)$, получим:

$$\int \frac{1}{\ln x} \cdot \frac{1}{x} \cdot dx = \int \frac{1}{\ln x} d(\ln x) = \ln(\ln x) + C.$$

Пример. Найдем интеграл $\int \operatorname{tg} x dx$.

Выполним тождественные преобразования подынтегральной функции:

$$\int \operatorname{tg} x dx = \int \frac{\sin x dx}{\cos x}.$$

Используя преобразование $\sin u du = -d(\cos u)$, внесем под знак дифференциала $\sin x$:

$$\int \frac{\sin x dx}{\cos x} = \int \frac{d(-\cos x)}{\cos x}.$$

Вынесем за знак дифференциала и за знак интеграла минус, стоящий перед $\cos x$, а затем, используя табличный интеграл $\frac{du}{u} = d(\ln u)$, найдем неопределенный интеграл:

$$\int \frac{d(-\cos x)}{\cos x} = - \int \frac{d(\cos x)}{\cos x} = -\ln |\cos x| + C.$$

Пример. Найдем интеграл $\int \sin^2 x \cos x dx$.

В данном примере будем преобразовать преобразование $\cos du = d(\sin u)$.

Внесем под знак дифференциала $\cos x$:

$$\int \sin^2 x \cos x dx = \int \sin^2 x d(\sin x).$$

А теперь, учитывая, что $\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} + C$, получим:

$$\int \sin^2 x d(\sin x) = \frac{\sin^3 x}{3} + C.$$

Пример. Найдем интеграл $\int \frac{10x^4 dx}{x^5 + 12}$.

Внесем под знак дифференциала выражение $2x^4$. Для этого воспользуемся преобразованием $u^n du = \frac{1}{n+1} d(u^{n+1})$:

$$\int \frac{10x^4 dx}{x^5 + 12} = \int \frac{10 \cdot \frac{1}{5} d(x^5)}{x^5 + 12} = \int \frac{2d(x^5)}{x^5 + 12}.$$

Так как $du = d(u \pm a)$, то

$$\int \frac{2d(x^5)}{x^5 + 12} = \int \frac{2d(x^5 + 12)}{x^5 + 12}.$$

Теперь воспользуемся табличным интегралом $\int \frac{dx}{x} = \ln|x| + C$ и окончательно найдем решение:

$$\int \frac{2d(x^5 + 12)}{x^5 + 12} = 2 \ln|x^5 + 12| + C.$$

11.3.3. Метод замены переменных

Метод интегрирования заменой переменных (подстановкой) заключается во введении новой переменной интегрирования. При этом заданный интеграл приводится к новому интегралу, который является табличным или к нему сводящимся.

Для нахождения неопределенного интеграла сделаем подстановку $x = \varphi(t)$, где $\varphi(t)$ — функция, имеющая непрерывную производную. Тогда $dx = \varphi'(t)dt$ и на основании свойства инвариантности формулы интегрирования неопределенного интеграла получим *формулу интегрирования подстановкой*:

$$\int f(x) dx \Big|_{x=\varphi(t)} = \int f[\varphi(t)] \varphi'(t) dt.$$

Следует запомнить, что после нахождения интеграла следует перейти от новой переменной интегрирования t назад к переменной x .

Пример. Найдем интеграл $\int (3x+2)^5 dx$.

Введем новую переменную $t = 3x + 2$, выразим аргумент x через t , продифференцируем полученное равенство $x = \frac{t-2}{3}$, а затем, перейдя к новой переменной, найдем новый интеграл:

$$\begin{aligned}\int (3x+2)^5 dx &= \left[t = 3x+2, x = \frac{t-2}{3}, dx = \frac{dt}{3} \right] = \\ &= \int t^5 \frac{dt}{3} = \frac{1}{3} \int t^5 dt = \frac{1}{3} \cdot \frac{t^6}{6} + C.\end{aligned}$$

Теперь перейдем от новой переменной интегрирования t назад к переменной x :

$$\frac{1}{3} \cdot \frac{t^6}{6} + C = \frac{1}{18} (3x+2)^6 + C.$$

Пример. Найдем интеграл $\int \cos(3x+2)^5 dx$.

Снова вводим новую переменную $t = 3x + 2$ и выразим аргумент x через t . Продифференцируем полученное равенство $x = \frac{t-2}{3}$, а затем, перейдя к новой переменной, найдем новый интеграл:

$$\begin{aligned}\int \cos(3x+2)^5 dx &= \left[t = 3x+2, x = \frac{t-2}{3}, dx = \frac{dt}{3} \right] = \\ &= \frac{1}{3} \int \cos t dt = \frac{1}{3} \int \sin t dt + C.\end{aligned}$$

Переходя от переменной t назад к переменной x , получим:

$$\frac{1}{3} \int \sin t dt + C = \frac{1}{3} \int \sin(3x+2) dt + C.$$

Пример. Найдем интеграл $\int \frac{x^3}{x^8+1} dx$.

Выполняя замену $t = x^4$ найдем интеграл методом замены переменных:

$$\int \frac{x^3}{x^8+1} dx = \left[t = x^4, dt = 4x^3 dx, x^3 dx = \frac{dt}{4} \right] = \frac{1}{4} \int \frac{dt}{1+t^2} = \frac{1}{4} \arctgt + C.$$

Перейдем от переменной t назад к переменной x . В результате получим:

$$\frac{1}{4} \arctgt + C = \frac{1}{4} \arctgx^4 + C.$$

Пример. Найдем неопределенный интеграл $\int \frac{5x dx}{5x^2 - 3}$.

Для нахождения неопределенного интеграла сделаем замену $5x^2 - 3 = t$ и продифференцируем полученное равенство. Выражение $10x dx = dt$ разделим на 2 и подставим $5x dx = \frac{dt}{2}$ в исследуемый интеграл:

$$\int \frac{5x dx}{5x^2 - 3} = \left[5x^2 - 3 = t, \quad 10x dx = dt, \quad 5x dx = \frac{dt}{2} \right] = \int \frac{dt}{2} \cdot \frac{1}{t}.$$

Теперь вынесем $\frac{1}{2}$ за знак интеграла и найдем получившийся табличный интеграл:

$$\frac{1}{2} \int \frac{dt}{t} = \frac{1}{2} \ln|t| + C.$$

Переходя от переменной t назад к переменной x , получим:

$$\frac{1}{2} \ln|t| + C = \frac{1}{2} \ln|5x^2 - 3| + C.$$

Пример. Найдем неопределенный интеграл $\int x\sqrt{x-1} dx$.

Очевидно, что для нахождения неопределенного интеграла нужно сделаем замену $\sqrt{x-1} = t$ и продифференцируем полученное равенство. Выразим x через t и продифференцируем полученное равенство. Полученные выражения $\sqrt{x-1} = t$ и $dx = 2dt$ подставим в исследуемый интеграл:

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

Выполним действия умножения в подынтегральной функции и разобьем интеграл на два слагаемых и найдем неопределенный интеграл:

$$\int (t^2 + 1) \cdot t \cdot 2t dx = 2 \int (t^4 + t^2) dx = 2 \int t^4 dx + 2 \int t^2 dx = \frac{2}{5} \int t^5 + \frac{2}{3} \int t^3 + C.$$

Переходя от переменной t назад к переменной x , окончательно получим:

$$\frac{2}{5} \int \sqrt{(x-1)^5} + \frac{2}{3} \int \sqrt{(x-1)^3} + C.$$

11.3.4. Метод интегрирования по частям

Пусть $u = u(x)$ и $v = v(x)$ – две функции дифференцируемые функции от аргумента x . Тогда по правилу дифференцирования произведения $d(uv) = u dv + v du$ или $u dv = d(uv) - v du$.

Интегрируя левую и правую части последнего равенства, получим:

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

Полученная формула называется формулой интегрирования по частям. Она дает возможность свести вычисление сложного интеграла $\int u dv$ к возможно более простому интегралу $\int v du$.

Существует три типа интегралов, интегрируемых по частям.

1-й тип интегралов, интегрируемых по частям

К этому типу относятся интегралы вида: $\int P(x)e^{kx} dx$, $\int P(x)\sin kx dx$, $\int P(x)\cos kx dx$, где $P(x)$ – многочлен произвольной степени, k – константа.

В этом случае можно взять $u = P(x)$, а за dv обозначить остальные сомножители.

Пример. Найдём методом интегрирования по частям интеграл $\int x \sin 2x dx$.

Положим $u = x$, а все остальные множители подынтегрального выражения $\sin 2x dx$ обозначим, как $dv = \sin 2x dx$. Продифференцируем равенство $u = x$, тогда $du = dx$. Интегрируя уравнение $dv = \sin 2x dx$, получим $v = \int \sin 2x dx = -\frac{1}{2} \cos 2x$.

$$\int x \sin 2x dx = \left[\begin{array}{l} u = x \Rightarrow du = dx \\ dv = \sin 2x \Rightarrow v = \int \sin 2x dx = -\frac{1}{2} \cos 2x \end{array} \right] =$$

Используя формулу интегрирования по частям, получим решение:

$$= -\frac{x}{2} \cos 2x + \frac{1}{2} \int \cos 2x dx = -\frac{x}{2} \cos 2x + \frac{1}{4} \sin 2x + C.$$

Пример. Найдем неопределенный интеграл $\int x e^x dx$.

Положим $u = x$, а все остальное множителем подынтегрального выражения $x e^x dx$ обозначим, как $dv = e^x dx$. Продифференцируем равенство $u = x$, тогда $du = dx$. Интегрируя уравнение $dv = e^x dx$, получим $v = \int \sin 2x dx = -\frac{1}{2} \cos 2x$.

$$\int x \sin 2x dx = \left[\begin{array}{l} u = x \Rightarrow du = dx \\ dv = e^x dx \Rightarrow v = \int \sin 2x dx = -\frac{1}{2} \cos 2x \end{array} \right] =$$

Используя формулу интегрирования по частям, получим решение:

$$= x e^x - \int e^x dx = x e^x - e^x + C$$

2-й тип интегралов, интегрируемых по частям

К этому типу относятся интегралы вида: $\int P(x) \ln x dx$, $\int P(x) \arcsin x dx$, $\int P(x) \arccos x dx$, $\int P(x) \arctg x dx$, $\int P(x) \operatorname{arccotg} x dx$.

Для нахождения интеграла необходимо за $P(x) dx$ определить dv , а за u взять все остальные множители подынтегрального выражения.

Пример. Найдем интеграл $\int \frac{\ln x}{x^2} dx$.

Задачу будем решать методом интегрирования по частям. Для решения задачи положим $u = \ln x$ и $dv = \frac{dx}{x^2}$. Учитывая это, получим $du = \frac{dx}{x}$ и

$$v = \int \frac{dx}{x^2} = -\frac{1}{x}.$$

$$\int \frac{\ln x}{x^2} dx = \left[\begin{array}{l} u = \ln x \Rightarrow du = \frac{dx}{x} \\ dv = \frac{dx}{x^2} \Rightarrow v = \int \frac{dx}{x^2} = -\frac{1}{x} \end{array} \right] =$$

Подставляя выражения du и v в формулу интегрирования по частям найдем неопределенный интеграл:

$$= \ln x \cdot \left(-\frac{1}{x}\right) - \int \left(-\frac{1}{x}\right) \frac{dx}{x} = -\ln x \cdot \frac{1}{x} + \int \frac{dx}{x^2} = -\ln x \cdot \frac{1}{x} - \frac{1}{x} + C.$$

3-й тип интегралов, интегрируемых по частям

К этому типу относятся интегралы вида: $\int e^{ax} \sin bx dx$, $\int e^{ax} \cos bx dx$, где a и b – константы.

В этом случае за u можно принять тригонометрические функции $\sin bx$ или $\cos bx$, а все остальные множители в подынтегральном выражении обозначить, как dv .

Пример. Найдем интеграл $\int e^x \sin 3x dx$, интегрируя его по частям.

Введем обозначения: $u = \sin 3x$ и $dv = e^x dx$. Тогда $du = 3 \cos 3x dx$, а $v = \int e^x dx = e^x$.

$$\int e^x \sin 3x dx = \left[\begin{array}{l} u = \sin 3x \Rightarrow du = 3 \cos 3x dx \\ dv = e^x dx \Rightarrow v = \int e^x dx = e^x \end{array} \right] =$$

Подставив полученные выражения в интеграл получим:

$$\int e^x \sin 3x dx = e^x \sin 3x - \int e^x \cdot 3 \cos 3x dx = e^x \sin 3x - 3 \int e^x \cos 3x dx.$$

В результате преобразований мы снова получили интеграл третьего типа. Еще раз применим метод интегрирования по частям. Введем новые обозначения: $u = \cos 3x$ и $dv = e^x dx$. Тогда $du = -3 \sin 3x dx$, а $v = \int e^x dx = e^x$.

$$e^x \sin 3x - 3 \int e^x \cos 3x dx = \left[\begin{array}{l} u = \cos 3x \Rightarrow du = -3 \sin 3x dx \\ dv = e^x dx \Rightarrow v = \int e^x dx = e^x \end{array} \right] =$$

И снова подставим полученные выражения в интеграл:

$$e^x \sin 3x - 3 \int e^x \cos 3x dx = e^x \sin 3x - 3e^x \cos 3x - 9 \int e^x \sin 3x dx.$$

Заметим, что в полученном выражении содержится начальное значение интеграла. Запишем уравнение, в левую часть которого поместим исходный интеграл, а в правую его преобразованный на последнем шаге вид:

$$\int e^x \sin 3x dx = e^x \sin 3x - 3e^x \cos 3x - 9 \int e^x \sin 3x dx.$$

Решим это уравнение:

$$10 \int e^x \sin 3x dx = e^x \sin 3x - 3e^x \cos 3x$$

Разделив обе части уравнения на 10 получим значение интеграла:

$$\int e^x \sin 3x dx = \frac{1}{10} e^x \sin 3x - \frac{3}{10} e^x \cos 3x + C.$$

11.4. Интегрирование рациональных дробей

11.4.1. Приведение дроби к правильной

Для интегрирования дробно-рациональных функций часто достаточно привести дробь к правильной, разделив числитель на знаменатель с остатком.

Пример. Найдем интеграл $\int \frac{2x^2 - 9x - 34}{2x + 5} dx$.

Разделим числитель дроби на знаменатель: $\frac{2x^2 - 9x - 34}{2x + 5} = x - 7 + \frac{1}{2x + 5}$, а

затем проинтегрируем полученное выражение. В результате получим:

$$\int \frac{2x^2 - 9x - 34}{2x + 5} dx = \int \left(x - 7 + \frac{1}{2x + 5} \right) dx.$$

Разобьем интеграл на два слагаемых:

$$\int \left(x - 7 + \frac{1}{2x + 5} \right) dx = \int x dx - 7 \int dx + \int \frac{dx}{2x + 5}.$$

Два первых интеграла являются табличными, а третий найдем внесение под знак дифференциала:

$$\int x dx - 7 \int dx + \int \frac{dx}{2x + 5} = \frac{x^2}{2} - 7x + \frac{1}{2} \int \frac{d(2x + 5)}{2x + 5}.$$

Окончательно получим решение, сделав соответствующие преобразования:

$$\frac{x^2}{2} - 7x + \frac{1}{2} \int \frac{d(2x+5)}{2x+5} = \frac{x^2}{2} - 7x + \frac{1}{2} \ln|2x+5| + C.$$

Некоторые интегралы, содержащие дробно-рациональные подынтегральные функции, находятся методом внесения под знак дифференциала или замены переменной:

$$\begin{aligned} \int \frac{dx}{(6x-1)^7} &= \frac{1}{6} \int \frac{d(6x-1)}{(6x-1)^7} = \frac{1}{6} \int (6x-1)^{-7} d(6x-1) = \\ &= \frac{1}{6} (6x-1)^{-6} + C = \frac{1}{6(6x-1)^6} + C. \end{aligned}$$

11.4.2. Разложение правильной дроби

Для упрощения интегрирования сложных правильных дробей их можно разложить в сумму элементарных дробей, а затем проинтегрировать полученные слагаемые.

Теорема 12.2. Правильную рациональную дробь $\frac{R(x)}{Q(x)}$, в которой знаменатель разложен на множители:

$$Q(x) = (x-x_1)^{k_1} \cdot (x-x_2)^{k_2} \cdot \dots \cdot (x^2 + p_1x + g_1)^{r_1} \cdot \dots \cdot (x^2 + p_mx + g_m)^{r_m},$$

а $x^2 + p_ix + g_i$ – трехчлен с отрицательным дискриминантом, можно единственным образом разложить на сумму элементарных делителей:

$$\begin{aligned} \frac{R(x)}{Q(x)} &= \frac{A_1}{(x-a)} + \frac{A_2}{(x-a)^2} + \dots + \frac{A_r}{(x-a)^r} + \dots \\ &\dots + \frac{M_1x + N_1}{x^2 + 2px + q} + \frac{M_2x + N_2}{(x^2 + 2px + q)^2} + \dots + \frac{M_lx + N_l}{(x^2 + 2px + q)^l} + \dots, \end{aligned}$$

где $A_1, A_2, \dots, A_r, \dots, M_1, N_1, M_2, N_2, \dots, M_l, N_l, \dots$ – некоторые вещественные числа.

Пример. Найдем интеграл от правильной дроби $\int \frac{x+2}{x^2+5x-6} dx$.

Выполним преобразования подынтегрального выражения. Разложим знаменатель дроби на множители, предварительно отыскав корни квадратного трехчлена $x^2 + 5x - 6$.

$$\frac{x+2}{x^2+5x-6} = \frac{x+2}{(x-1)(x+6)}.$$

Разобьем получившуюся дробь на сумму двух дробей, числители которых представим в виде переменных A и B :

$$\frac{x+2}{(x-1)(x+6)} = \frac{A}{x-1} + \frac{B}{x+6}.$$

И, приводя к общему знаменателю, сложим их:

$$\frac{A}{x-1} + \frac{B}{x+6} = \frac{A(x+6) + B(x-1)}{(x-1)(x+6)} = \frac{(A+B)x + 6A - B}{(x-1)(x+6)}.$$

Заметим, что $x+2 = (A+B)x + 6A - B$.

Тогда получим систему двух линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} A+B=1 \\ 6A-B=2 \end{cases}.$$

Решая систему, получим: $A = \frac{3}{7}, B = \frac{4}{7}$.

Отсюда следует: $\frac{x+2}{x^2+5x-6} = \frac{\frac{3}{7}}{x-1} + \frac{\frac{4}{7}}{x+6}$.

Найдем интеграл от преобразованного выражения:

$$\int \frac{x+2}{x^2+5x-6} dx = \frac{3}{7} \int \frac{dx}{x-1} + \frac{4}{7} \int \frac{dx}{x+6} = \frac{3}{7} \ln|x-1| + \frac{4}{7} \ln|x+6| + C.$$

Пример. Найдем интеграл $\int \frac{dx}{x^2-3x+2}$.

Выполним преобразования подынтегрального выражения. Разложим знаменатель дроби на множители, предварительно отыскав корни квадратного трехчлена $x^2 - 3x + 2$.

$$\int \frac{dx}{x^2 - 3x + 2} = \int \frac{dx}{(x-1)(x-2)}.$$

Разобьем получившуюся дробь на сумму двух дробей, числители которых представим в виде переменных A и B :

$$\frac{1}{(x-1)(x-2)} = \frac{A}{x-1} + \frac{B}{x-2}.$$

Приводя к общему знаменателю, сложим дроби:

$$\begin{aligned} \frac{A}{x-1} + \frac{B}{x-2} &= \frac{A(x-2)}{(x-1)(x-2)} + \frac{B(x-1)}{(x-1)(x-2)} = \frac{A(x-2) + B(x-1)}{(x-1)(x-2)} = \\ &= \frac{Ax - 2A + Bx - B}{(x-1)(x-2)} = \frac{(A+B)x - 2A - B}{(x-1)(x-2)} = \frac{0x + 1}{(x-1)(x-2)}. \end{aligned}$$

Заметим, что $1 = (A+B)x - 2A - B$.

Тогда получим систему двух линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} A + B = 0 \\ -2A - B = 1 \end{cases}.$$

Решая систему, получим: $A = -1, B = 1$.

Отсюда следует: $\frac{1}{(x-1)(x-2)} = \frac{-1}{x-1} + \frac{1}{x-2}$.

Найдем интеграл от преобразованного выражения:

$$\int \left(-\frac{1}{x-1} + \frac{1}{x-2} \right) dx = -\ln|x-1| + \ln|x-2| + C = \ln \left| \frac{x-2}{x-1} \right| + C.$$

11.4.3. Знаменатели дробей с комплексными корнями

Если знаменатель нельзя разложить на множители, то необходимо выполнить тождественные преобразования дробей и использовать уже изученные методы интегрирования

Пример. Найдем интеграл $\int \frac{dx}{x^2 - 4x + 6}$.

Знаменатель дроби не разлагается на множители в области действительных чисел, поскольку дискриминант трехчлена меньше нуля. Преобразуем знаменатель дроби:

$$\int \frac{dx}{x^2 - 4x + 6} = \int \frac{dx}{(x^2 - 4x + 4) + 2} = \int \frac{dx}{(x - 2)^2 + 2}.$$

Заметим, что полученный интеграл соответствует табличному $\int \frac{dx}{x^2 + a^2} = \frac{1}{a} \operatorname{arctg} \frac{x}{a} + C$. Используя это, получим:

$$\int \frac{dx}{(x - 2)^2 + 2} = \int \frac{d(x - 2)}{(x - 2)^2 + (\sqrt{2})^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \operatorname{arctg} \frac{x - 2}{\sqrt{2}} + C = \frac{\sqrt{2}}{2} \operatorname{arctg} \frac{x - 2}{\sqrt{2}} + C.$$

Пример. Найдём интеграл $\int \frac{x + 3}{x^2 + 2x + 2} dx =$.

Здесь также знаменатель нельзя разложить на множители. Теперь преобразуем числитель:

$$\int \frac{x + 3}{x^2 + 2x + 2} dx = \int \frac{x + 1 + 2}{x^2 + 2x + 2} dx.$$

Разобьём интеграл на две части:

$$\int \frac{x + 1 + 2}{x^2 + 2x + 2} dx = \int \frac{x + 1}{x^2 + 2x + 2} dx + \int \frac{2}{x^2 + 2x + 2} dx =$$

Найдём полученные интегралы методом внесения под дифференциал:

$$\begin{aligned} \int \frac{x + 1}{x^2 + 2x + 2} dx + \int \frac{2}{x^2 + 2x + 2} dx &= \frac{1}{2} \int \frac{(2x + 2) dx}{x^2 + 2x + 2} + 2 \int \frac{dx}{(x^2 + 2x + 1) + 1} = \\ &= \frac{1}{2} \int \frac{d(x^2 + 2x + 2)}{x^2 + 2x + 2} + 2 \int \frac{d(x + 1)}{(x + 1)^2 + 1} = \frac{1}{2} \ln(x^2 + 2x + 2) + 2 \operatorname{arctg}(x + 1) + C. \end{aligned}$$

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте понятия первообразной функции и неопределенного интеграла. Каким образом записывается определенный интеграл?
2. Как называется операция отыскания неопределенного интеграла от функции?

3. Какие свойства неопределенного интеграла вы знаете? На примерах продемонстрируйте перечисленные свойства.
4. Для чего нужны табличные интегралы. Выпишите все табличные интегралы, показанные в лекции.
5. Какие методы нахождения неопределенного интеграла вы знаете?
6. Опишите метод непосредственного интегрирования. На чем основан этот метод?
7. Объясните суть метода внесения под знак дифференциала. Приведите примеры использования этого метода.
8. Какие методы нахождения неопределенного интеграла вы знаете?
9. Объясните суть метода замены переменной нахождения неопределенного интеграла. Приведите пример интегрирования функций методом замены переменных.
10. В чем состоит принцип нахождения неопределенного интеграла методом интегрирования по частям?
11. Какие интегралы каких типов можно находить, используя метод интегрирования по частям?
12. В чем заключается различие нахождения интегралов первого, второго и третьего типов?
13. Укажите особенности интегрирования неправильных рациональных дробей.
14. В каком случае можно разложить правильную дробь на слагаемые, упрощая процедуру интегрирования?
15. Каким образом можно интегрировать рациональные дроби, знаменатели которых имеют комплексные корни?

Глава 12. Определенные, несобственные и кратные интегралы

12.1. Понятие определенного интеграла

12.1.1. Основные определения

Исторически задача нахождения определенного интеграла сводится к задаче об определении площади криволинейной трапеции.

Криволинейной трапецией называют фигуру, ограниченную графиком функции $y = f(x)$, прямыми $x = a$ и $x = b$.

Рассмотрим криволинейную трапецию ABCD (рис. 12.1). Разделим основание AB нашей фигуры произвольным образом на части и проведем ординаты, соответствующие точкам деления. Тогда криволинейная трапеция разобьется на ряд полосок:

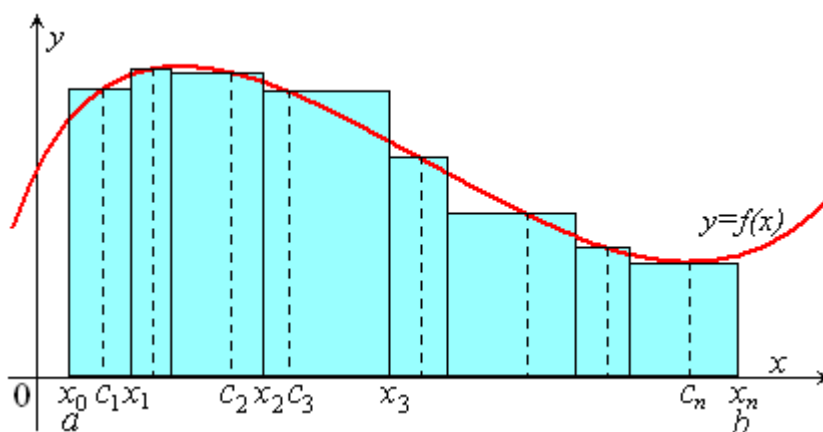


Рис. 12.1. Разбиение интеграла.

Заменяем теперь приблизительно каждую полоску некоторым прямоугольником, основание которого то же, что и у полоски, а высота совпадает с одной из ординат полоски, скажем, с крайней слева. Таким образом, криволинейная фигура заменится некоторой ступенчатой фигурой, составленной из отдельных прямоугольников.

Обозначим абсциссы точек деления через

$$x_0 = a < x_1 < x_2 < \dots < x_i < x_{i+1} < \dots < x_n = b.$$

Основание i -того прямоугольника ($i = 0, 1, 2, \dots, n-1$), очевидно, равно разности $x_{i+1} - x_i$, которую будем обозначать Δx_i . Высота, исходя из сказанного,

будет равна $y_i = f(x_i)$. Поэтому площадь i -того прямоугольника будет $y_i \Delta x_i = f(x_i) \Delta x_i$. Просуммировав площади всех прямоугольников, получим приближенное значение площади P криволинейной трапеции:

$$P = \sum_{i=0}^{n-1} y_i \Delta x_i \quad \text{или} \quad P = \sum_{i=0}^{n-1} f(x_i) \Delta x_i.$$

Погрешность этого равенства при увеличении количества разбиений отрезка $[a, b]$ стремится к нулю, т.е. при безграничном убывании всех Δx_i точное значение площади получится равным пределу

$$P = \lim \sum_{i=0}^{n-1} y_i \Delta x_i = \lim \sum_{i=0}^{n-1} f(x_i) \Delta x_i$$

в предположении что все длины Δx_i стремятся к нулю одновременно.

Для обозначения предельного значения суммы $\sum y \Delta x$ Готфрид Лейбниц ввел символ $\int y dx$, где $y dx$ напоминает типичное слагаемое суммы, а $\int$ – это стилизованная буква S (от лат. "Summa" – сумма). Так как площадь, представляющая это предельное значение, в то же время является первообразной для функции $f(x)$, то тот же символ сохранился и для обозначения первообразной функции.

Возвращаясь к выше сказанному, выберем в каждом из отрезков Δx_i произвольно точку ξ_i ($x_i \leq \xi_i \leq x_{i+1}$) и образуем сумму

$$\sigma = f(\xi_1) \Delta x_1 + f(\xi_2) \Delta x_2 + \dots + f(\xi_n) \Delta x_n = \sum_{i=1}^n f(\xi_i) \Delta x_i,$$

которая называется *интегральной суммой* для функции $f(x)$ на отрезке $[a, b]$, соответствующая данному разбиению $[a, b]$ на частичные отрезки и данному выбору промежуточных точек ξ_i . При этом сохранился геометрический смысл: σ есть сумма площадей прямоугольников с основаниями Δx_i и высотами $f(\xi_i)$, если $f(x) \geq 0$.

Обозначим через λ длину наибольшего отрезка разбиения Δx_i , т.е.

$$\lambda = \max_{1 \leq i \leq n} \{\Delta x_i\}.$$

Если существует конечный предел I интегральной суммы

$$\sigma = f(\xi_1)\Delta x_1 + f(\xi_2)\Delta x_2 + \dots + f(\xi_n)\Delta x_n = \sum_{i=1}^n f(\xi_i)\Delta x_i$$

при $\lambda \rightarrow 0$, то этот предел называется *определенным интегралом* от функции $f(x)$ по отрезку $[a, b]$ и обозначается следующим образом:

$$I = \int_a^b f(x)dx$$

или

$$I = \int_a^b f(x)dx = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n f(\xi_i)\Delta x_i.$$

В этом случае функция $f(x)$ называется *интегрируемой* на $[a, b]$, числа a и b называются соответственно *нижним* и *верхним пределами интегрирования*, $f(x)$ – *подынтегральной функцией*, x – *переменной интегрирования*.

12.1.2. Формула Ньютона-Лейбница

Вычисление определенных интегралов как пределов интегральных сумм как правило связано с некоторыми трудностями. Наряду с этим методом, существует более удобный метод вычисления определенных интегралов, который основывается на ранее установленной связи между определенным и неопределенным интегралами.

Функция $f(x)$, непрерывная на отрезке $[a, b]$, имеет на этом отрезке первообразные, причем одной из них является функция

$$\Phi(x) = \int_a^x f(t)dt + C.$$

Пусть $F(x)$ – любая другая первообразная для функции $f(x)$ на том же отрезке $[a, b]$. Имеет место равенство:

$$\int_a^x f(t)dt = F(x) + C, \quad a \leq x \leq b,$$

где C – некоторое число.

Подставляя в него значение $x = a$, получим:

$$\int_a^a f(t)dt = F(a) + C, \quad 0 = F(a) + C, \quad C = -F(a).$$

Тогда для любого $x \in [a, b]$

$$\int_a^x f(t)dt = F(x) - F(a).$$

Полагая $x = b$, получаем основную формулу интегрального исчисления

$$\int_a^b f(t)dt = F(b) - F(a),$$

которая называется *формулой Ньютона – Лейбница*.

Разность $F(b) - F(a)$ принято условно записывать так:

$$F(x) \Big|_a^b \text{ или } [F(x)]_a^b.$$

Отметим, что в формуле Ньютона-Лейбница в качестве $F(x)$ можно взять любую первообразную для $f(x)$ на $[a, b]$. Эта формула дает простой метод вычисления определенного интеграла:

Теорема 12.1. Определенный интеграл от непрерывной функции равен разности значений любой ее первообразной, вычисленных для верхнего и нижнего пределов интегрирования.

Пример. Найдём определенный интеграл $\int_1^3 x^3 dx$.

$$\int_1^3 x^3 dx = \frac{x^4}{4} \Big|_1^3 = \frac{3^4}{4} - \frac{1^4}{4} = \frac{81}{4} - \frac{1}{4} = \frac{80}{4} = 20.$$

Пример. Найдем определенный интеграл $\int_a^b \sin x dx$.

$$\int_a^b \sin x dx = -\cos x \Big|_a^b = \cos a - \cos b.$$

Заметим, что при использовании формулы Ньютона – Лейбница задача вычисления определенного интеграла сводится к нахождению неопределенного интеграла. При этом здесь оказывается удобным использование табличных интегралов.

12.1.3. Свойства определенного интеграла

Рассмотрим наиболее общие свойства, используемые для вычисления определенных интегралов.

1. Если функция $f(x)$ интегрируема на отрезке $[a; b]$ и k – постоянное число, то

$$\int_a^b k f(x) dx = k \int_a^b f(x) dx.$$

2. Если функции $f(x)$ и $g(x)$ интегрируемы на отрезке $[a; b]$, то

$$\int_a^b [f(x) \pm g(x)] dx = \int_a^b f(x) dx \pm \int_a^b g(x) dx.$$

3. Определенный интеграл с одинаковыми пределами интегрирования равен нулю:

$$\int_a^a f(x) dx = 0.$$

4. При перемене мест верхнего и нижнего пределов интегрирования определенный интеграл меняет знак:

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

5. Если функции $f(x)$ интегрируема на отрезке $[a; b]$ и $a < c < b$, то

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

6. *Теорема о «среднем».* Если функция $f(x)$ непрерывна на отрезке $[a; b]$, то существует точка $c \in [a; b]$, такая что

$$\int_a^b f(x)dx = f(c)(b-a).$$

7. Если функции $f(x)$ интегрируема на отрезке $[a; b]$ и $f(x) \geq 0$, то

$$\int_a^b f(x)dx \geq 0.$$

8. Оценка интеграла. Если m и M – соответственно наименьшее и наибольшее значения функции $f(x)$ на отрезке $[a; b]$, ($a < b$), то

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

12.2. Особенности вычисления определенных интегралов

Для вычисления определенного интеграла используется формула Ньютона-Лейбница и все методы для нахождения неопределенных интегралов, описанные ранее.

12.2.1. Непосредственное интегрирование

При использовании непосредственного интегрирования вычисление определенного интеграла сводится к нахождению первообразной, с использованием основных свойств неопределенных и определенных интегралов, а затем применению формулы Ньютона-Лейбница.

Пример. Найдём определенный интеграл $\int_1^2 (x^2 - 2x + 3)dx$.

$$\int_1^2 (x^2 - 2x + 3)dx = \left(\frac{x^3}{3} - x^2 + 3x \right) \Big|_1^2 = \left(\frac{2^3}{3} - 2^2 + 3 \cdot 2 \right) - \left(\frac{1^3}{3} - 1^2 + 3 \cdot 1 \right) =$$

$$= \frac{8}{3} - 4 + 6 - \left(\frac{1}{3} - 1 + 3 \right) = \frac{7}{3}.$$

Пример. Найдем определенный интеграл $\int_{\pi}^{\pi} \frac{\sin(3x^2 e^x + 3)}{\lg(4x - 5)} dx$.

Мы видим, что оба предела интегрирования равны между собой, то значение данного определенного интеграла будет равно нулю:

$$\int_{\pi}^{\pi} \frac{\sin(3x^2 e^x + 3)}{\lg(4x - 5)} dx = 0.$$

Пример. Найдем определенный интеграл $\int_2^1 (x^2 - 2x + 3) dx$.

Учитывая, что интеграл $\int_2^1 (x^2 - 2x + 3) dx$ можно получить, поменяв местами пределы интегрирования найденного ранее определенного интеграла $\int_1^2 (x^2 - 2x + 3) dx$, значение данного интеграла будет равно

$$\int_2^1 (x^2 - 2x + 3) dx = - \int_1^2 (x^2 - 2x + 3) dx = -\frac{7}{3}.$$

Пример. Найдем сумму интегралов $\int_2^e (x^2 - 1) dx + \int_e^3 (x^2 - 1) dx$.

Учитывая, что $2 < e \approx 2,71928 < 3$ сумму $\int_2^e (x^2 - 1) dx + \int_e^3 (x^2 - 1) dx$ можно представить, как определенный интеграл $\int_2^3 (x^2 - 1) dx$:

$$\begin{aligned} \int_2^e (x^2 - 1) dx + \int_e^3 (x^2 - 1) dx &= \int_2^3 (x^2 - 1) dx = \left(\frac{x^3}{3} - x \right) \Big|_2^3 = \\ &= \left(\frac{3^3}{3} - 3 \right) - \left(\frac{2^3}{3} - 2 \right) = 6 \cdot \frac{2}{3} = 4. \end{aligned}$$

12.2.2. Интегрирование подстановкой (замена переменной)

Пусть выполняются следующие условия:

- 1) функция $f(x)$ непрерывна на отрезке $[a; b]$;
- 2) функция $x=\varphi(t)$ непрерывна вместе со своей производной $\varphi(t)'$ на отрезке $[\alpha; \beta]$;
- 3) $a = \varphi(\alpha)$, $b = \varphi(\beta)$;
- 4) функция $f(\varphi(t))$ определена и непрерывна на отрезке $[\alpha; \beta]$, тогда

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

При вычислении определенных интегралов методом замены переменной следует иметь ввиду, что возвращаться к старой переменной, как это было в случае с неопределенными интегралами, не требуется, кроме того, не следует забывать менять пределы интегрирования при замене переменных.

Пример. Вычислим определенный интеграл $\int_0^3 e^{2x+1}dx$.

Решение осуществим методом замены переменной. Сделаем замену

$$2x+1=t, \text{ тогда } dx = \frac{1}{2}dt.$$

Заменим пределы интегрирования, подставляя значения пределов в нашу замену. Если $x=0$, то $t=1$, если $x=3$, то $t=7$.

Выполним дальнейшие преобразования и применяя формулу Ньютона-Лейбница вычислим интеграл:

$$\int_0^3 e^{2x+1}dx = \frac{1}{2} \int_1^7 e^t dt = \frac{1}{2} e^t \Big|_1^7 = \frac{1}{2} e^7 - \frac{1}{2} e^1 = \frac{1}{2} (e^7 - e^1).$$

Пример. Вычислим определенный интеграл $\int_0^4 \frac{dx}{1+\sqrt{x}}$.

$$\text{Сделаем замену } 1+\sqrt{x}=t, \text{ тогда } dx = 2(t-1)dt.$$

$$\text{Изменим пределы интегрирования: } x=0 \Rightarrow t=1, \quad x=4 \Rightarrow t=3.$$

Теперь вычислим интеграл:

$$\int_0^4 \frac{dx}{1+\sqrt{x}} = \int_1^3 \frac{2(t-1)dt}{t} = 2 \int_1^3 \left(1 - \frac{1}{t}\right) dt = 2(t - \ln|t|) \Big|_1^3 =$$

$$= 2(3 - \ln|3|) - 2(1 - \ln|1|) = 6 - 2\ln 3 - 2 + 0 = 4 - 2\ln 3.$$

Пример. Вычислим определенный интеграл $\int_1^e \frac{1+\ln x}{x} dx$.

Сделаем замену $1 + \ln x = t$, тогда $dt = \frac{dx}{x}$. Заменим пределы интегрирования, подставляя значения пределов в нашу замену. Если $x_1 = 1$ и $x_2 = e$ то нижний и верхний пределы станут равны $t_1 = 1$ и $t_2 = 2$. Выполним дальнейшие преобразования и применяя формулу Ньютона-Лейбница вычислим интеграл:

$$\int_1^e \frac{1+\ln x}{x} dx = \int_1^2 t dt = \frac{4}{2} - \frac{1}{2} = \frac{3}{2}.$$

Пример. Вычислим определенный интеграл $\int_{\frac{\pi^2}{9}}^{\pi^2} \frac{\cos \sqrt{x}}{\sqrt{x}} dx$.

В этом случае применим замену $t = \sqrt{x}$. Продифференцируем выражение $\frac{dx}{\sqrt{x}} = 2dt$, тогда $dt = \frac{dx}{2\sqrt{x}}$, а пределы интегрирования станут равны $t_1 = \frac{\pi}{3}$ и $t_2 = \pi$. Теперь вычислим определенный интеграл:

$$\int_{\frac{\pi^2}{9}}^{\pi^2} \frac{\cos \sqrt{x}}{\sqrt{x}} dx = 2 \int_{\frac{\pi}{3}}^{\pi} \cos t dt = 2 \sin t \Big|_{\frac{\pi}{3}}^{\pi} = 2(\sin \pi - \sin \frac{\pi}{3}) = -\sqrt{3}.$$

12.2.3. Интегрирование по частям

Использование методов интегрирования по частям для определенных интегралов отличается только использованием Формулы Ньютона-Лейбница, замены пределов интегрирования здесь не требуется.

Пример. Вычислим интеграл $\int_0^{\pi} x \sin 2x dx$.

Для решения задачи положим $u = x$ и $dv = \sin 2x dx$. Тогда выражения для du и v будут следующими: $du = dx$, $v = \int \sin 2x dx = -\frac{1}{2} \cos 2x$. Используя эти факты рассчитаем значение определенного интеграла:

$$\begin{aligned} \int_0^{\pi} x \sin 2x dx &= x \left(-\frac{1}{2} \cos 2x \right) \Big|_0^{\pi} - \int_0^{\pi} \left(-\frac{1}{2} \right) \cos 2x dx = \pi \left(-\frac{1}{2} \cos 2\pi \right) - \\ &- 0 \left(-\frac{1}{2} \cos 0 \right) + \frac{1}{2} \int_0^{\pi} \cos 2x dx = -\frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \sin 2x \Big|_0^{\pi} = -\frac{\pi}{2}. \end{aligned}$$

Пример. Вычислим интеграл $\int_1^e (3x - 1) \ln x dx$.

Для решения задачи положим $u = \ln x$ и $dv = (3x - 1) dx$. Тогда выражения для du и v будут следующими:

$$du = \frac{1}{x} dx; \quad v = \int (3x - 1) dx = \frac{3x^2}{2} - x = -\frac{1}{2} \cos 2x.$$

Используя значения du и v рассчитаем значение определенного интеграла:

$$\begin{aligned} \int_1^e (3x - 1) \ln x dx &= \ln x \left(\frac{3x^2}{2} - x \right) \Big|_1^e - \int_1^e \left(\frac{3x^2}{2} - x \right) \frac{dx}{x} = \\ &= \ln e \left(\frac{3e^2}{2} - e \right) - \ln 1 \left(\frac{3 \cdot 1^2}{2} - 1 \right) - \int_1^e \left(\frac{3x}{2} - 1 \right) dx = \frac{3e^2}{2} - e - 0 - \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{x^2}{2} - x \right) \Big|_1^e = \\ &= \frac{3e^2}{2} - e - \left(\left(\frac{3}{2} \cdot \frac{e^2}{2} - e \right) - \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{1^2}{2} - 1 \right) \right) = \frac{3e^2}{4} - \frac{1}{4}. \end{aligned}$$

12.2.4. Интегрирование четных и нечетных функций в симметричных пределах

Пусть функция $f(x)$ непрерывна на отрезке $[-a; a]$, симметричном относительно точки $x=0$. Тогда

$$\int_{-a}^a f(x)dx = \begin{cases} 2\int_0^a f(x)dx, & \text{если } f(x) - \text{четная функция,} \\ 0, & \text{если } f(x) - \text{нечетная функция.} \end{cases}$$

Пример. Найти значение определенного интеграла $\int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} x^2 \sin \frac{\pi x}{2} dx$.

Пример. Найти значение определенного интеграла $\int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} x^2 \sin \frac{\pi x}{2} dx$.

Мы видим, что наша функция $f(x) = x^2 \sin \frac{\pi x}{2}$ непрерывна и определена симметричном отрезке $\left[-\frac{\pi}{3}; \frac{\pi}{3}\right]$. Исследуем функцию $f(x)$ на четность-нечетность:

$$f(-x) = (-x)^2 \sin \frac{\pi(-x)}{2} = -x^2 \sin \frac{\pi x}{2} = -f(x).$$

Так как $f(-x) = -f(x)$, то можно заключить, что функция $f(x) = x^2 \sin \frac{\pi x}{2}$ является нечетной, а, следовательно, значение определенного интеграла $\int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} x^2 \sin \frac{\pi x}{2} dx$ равно нулю.

12.3. Геометрические приложения определенного интеграла

12.3.1. Вычисление площадей плоских фигур

Пусть функция $y=f(x)$ неотрицательна и непрерывна на отрезке $[a, b]$. Тогда по геометрическому смыслу определенного интеграла (определенный интеграл от неотрицательной функции численно равен площади криволинейной трапеции):

$$S = \int_a^b f(x) dx.$$

На рисунке 12.2 показана криволинейная трапеция соответствующая интегралу $\int_a^b f(x) dx$.

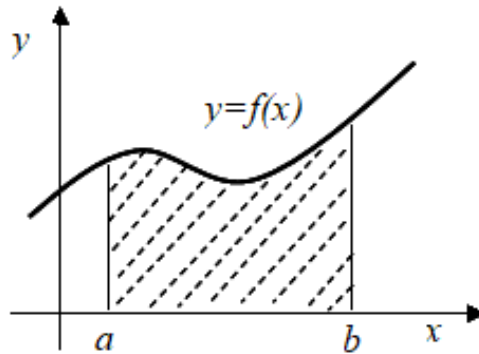


Рис. 12.2. Нахождение площади криволинейной трапеция.

Площадь фигуры (рис. 12.3), ограниченной кривыми $y=f_1(x)$ и $y=f_2(x)$, прямыми $x=a$ и $x=b$, при условии $f_1(x) \leq f_2(x)$, можно найти по формуле:

$$S = \int_a^b (f_2(x) - f_1(x)) dx.$$

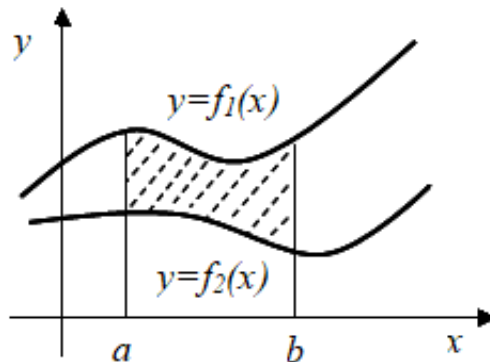


Рис. 12.3. Площадь фигуры, ограниченная кривыми $y=f_1(x)$ и $y=f_2(x)$.

Если функция $y = f(x)$ неположительна и непрерывна на отрезке $[a, b]$ (рис. 12.4), то площадь над кривой $y = f(x)$ на $[a, b]$ равна определенному интегралу от $f(x)$ на $[a, b]$, взятому со знаком минус:

$$S = -\int_a^b f(x) dx.$$

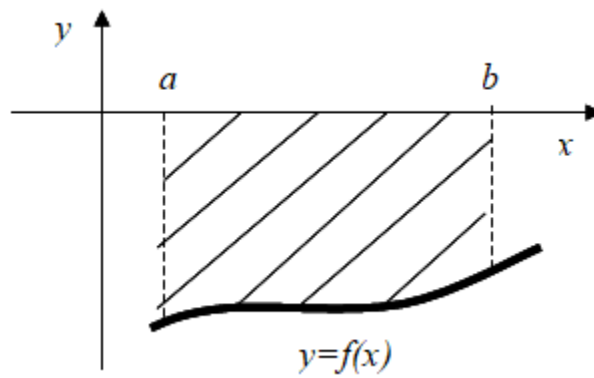


Рис. 12.4. Случай неположительной функции $y = f(x)$.

Если плоская фигура имеет «сложную» конфигурацию (рис. 12.5), то ее необходимо разбить на части, найти площади составных частей, а затем их сложить:

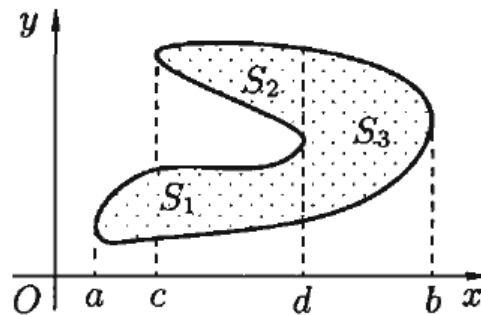


Рис. 12.5. Площадь фигуры, имеющей «сложную» конфигурацию.

Пример. Найти площадь фигуры, ограниченной линиями:

$$x = \sqrt{y}, x = 0, y = 4.$$

Искомая площадь равна площади криволинейного треугольника OAB (рис. 12.6).

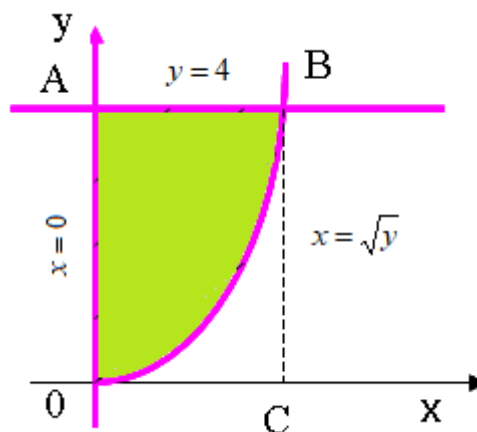


Рис. 12.6. Площадь криволинейного треугольника.

Решая систему: $\begin{cases} y = 4, \\ x = \sqrt{y} \end{cases}$, найдем координаты точки B : $B(2; 4)$.

Тогда площадь криволинейного треугольника OAB равна:

$$\begin{aligned} S_{OAB} &= \int_0^2 (f_2(x) - f_1(x)) dx = \int_0^2 4 dx - x^2 dx = \\ &= 4x \Big|_0^2 - \frac{x^3}{3} \Big|_0^2 = (4 \cdot 2 - 0 \cdot 2) - \left(\frac{2^3}{3} - \frac{0^3}{3} \right) = 8 - \frac{8}{3} = \frac{16}{3}. \end{aligned}$$

Пример. Найти площадь фигуры (рис. 12.7), ограниченной линиями:

$$y = x^2 - 2, y = x.$$

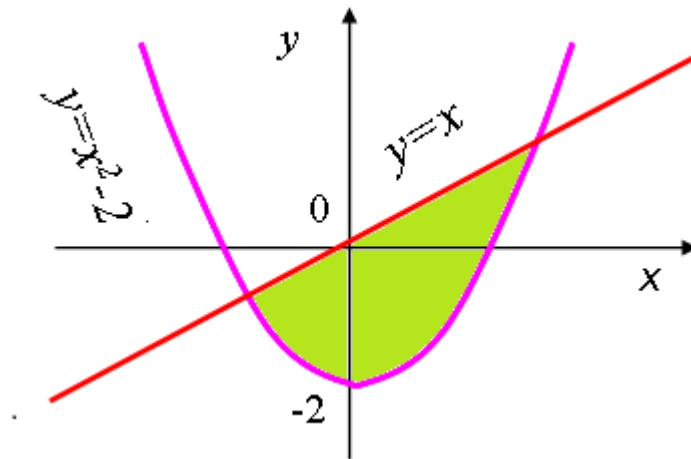


Рис. 12.7. Площадь фигуры.

Найдем координаты точек пересечения параболы и прямой, решив систему

уравнений: $\begin{cases} y = x^2 - 2, \\ y = x. \end{cases}$. Решением являются две точки: $(-1; -1)$ и $(2; 2)$.

Полагая, $f_2(x) = x$, $f_1(x) = x^2 - 2$, найдем площадь фигуры:

$$\begin{aligned} S &= \int_{-1}^2 (x - (x^2 - 2)) dx = \left(\frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3} + 2x \right) \Big|_{-1}^2 = \\ &= \left(\frac{4}{2} - \frac{8}{3} + 4 \right) - \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} - 2 \right) = 4,5. \end{aligned}$$

Пример. Найти площадь фигуры, изображенной на рисунке 12.8.

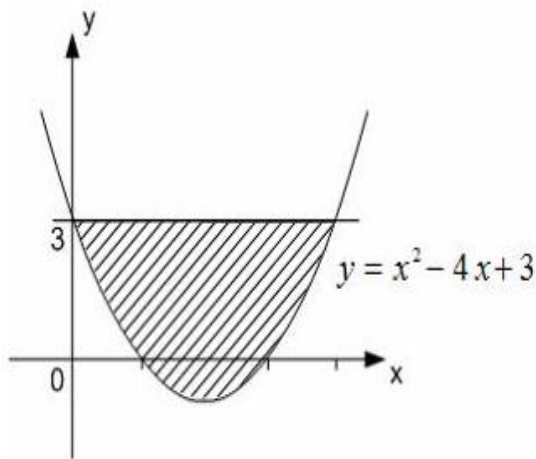


Рис. 12.8. Площадь фигуры.

Площадь фигуры найдем по формуле $S = \int_a^b (f_2(x) - f_1(x)) dx$, где

$$f_1(x) = x^2 - 4x + 3, \text{ а } f_2(x) = 3.$$

Определим пределы интегрирования a и b :

$$x^2 - 4x + 3 = 3 \Rightarrow x(x - 4) = 0 \Rightarrow x_1 = 0; x_2 = 4.$$

Тогда площадь фигуры будет равна:

$$S = \int_0^4 (3 - (x^2 - 4x + 3)) dx = \int_0^4 (4x - x^2) dx = \left(2x^2 - \frac{x^3}{3} \right) \Big|_0^4 = 32 - \frac{64}{3} = \frac{32}{3}.$$

12.3.2. Вычисление длины дуги плоской кривой

Если плоская кривая задана уравнением $y = f(x)$ и производная $f'(x)$ непрерывна, то длина дуги этой кривой выражается интегралом:

$$l = \int_a^b \sqrt{1 + (f'(x))^2} dx$$

Пример. Вычислить длину дуги полукубической параболы, заключенной между точками с абсциссами $x=0$, $x=4$.

$$l = \int_0^4 \sqrt{1 + ((x^{3/2})')^2} dx = \int_0^4 \sqrt{1 + \left(\frac{3}{2} \sqrt{x} \right)^2} dx =$$

$$\frac{4}{9} \cdot \frac{2}{3} \left(1 + \frac{9}{4} x \right)^{3/2} \Big|_0^4 = \frac{8}{27} (10\sqrt{10} - 1)$$

12.3.3. Вычисление объемов тел вращения

Пусть на отрезке $[a, b]$ задана непрерывная знакопостоянная функция $y=f(x)$. Объем V_x тела, образованного при вращении вокруг оси абсцисс криволинейной трапеции, ограниченной линиями $y=f(x)$, $y=0$, $x=a$, $x=b$ равен:

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

Пример. Вычислить объем тела, полученного от вращения фигуры, ограниченной линиями $y=e^{-x}$, $y=0$, $x=0$, $x=1$ вокруг оси Ox .

$$V_x = \pi \int_0^1 (e^{-x})^2 dx = \pi \left(-\frac{1}{2} e^{-2x} \right) \Big|_0^1 = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{1}{e^2} \right) \approx 1,36.$$

12.4. Несобственные интегралы

12.4.1. Несобственные интегралы с бесконечными пределами интегрирования

Пусть функция $y=f(x)$ определена и интегрируема на произвольном отрезке $[a; t]$, т.е. функция $\Phi(t) = \int_a^t f(x) dx$ определена для произвольного $t \geq a$.

Определение. Несобственным интегралом $\int_a^{+\infty} f(x) dx$ от функции $f(x)$ на полуинтервале $[a; +\infty)$ называется предел функции $\Phi(t)$ при $t \rightarrow +\infty$

$$\int_a^{+\infty} f(x) dx = \lim_{t \rightarrow +\infty} \int_a^t f(x) dx.$$

Если предел, стоящий в правой части равенства, существует и конечен, то несобственный интеграл называется *сходящимся*, в противном случае – *расходящимся*.

При работе с несобственными интегралами обычно выделяют следующие две задачи:

1. Исследование вопроса о сходимости заданного несобственного интеграла.

2. Вычисление значения интеграла в случае, если последний сходится.

Если несобственный интеграл от неотрицательной функции сходится, то он равен площади бесконечной криволинейной трапеции, ограниченной сверху графиком функции $y=f(x)$, снизу – осью Ox , слева и справа прямыми $x=a$ и $x=b$ (если эти ограничения существуют).

Для несобственных интегралов с верхним бесконечным пределом интегрирования бесконечная криволинейная трапеция может выглядеть следующим образом (рис. 12.9).

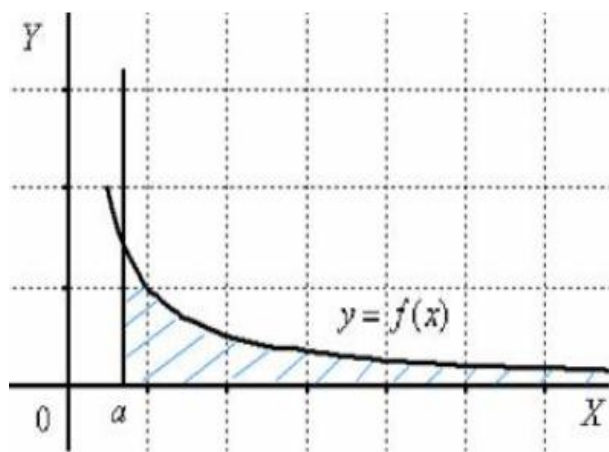


Рис. 12.9. Несобственный интеграл с верхним бесконечным пределом интегрирования.

Пример. Вычислим несобственный интеграл $\int_1^{+\infty} \frac{dx}{x^2}$.

По определению несобственного интеграла представим интеграл $\int_a^{+\infty} f(x)dx$

в виде предела функции $\lim_{t \rightarrow +\infty} \int_a^t f(x)dx$. Получим:

$$\int_1^{+\infty} \frac{dx}{x^2} = \lim_{t \rightarrow +\infty} \int_1^t \frac{dx}{x^2}.$$

Вычислим полученный интеграл $\int_1^t \frac{dx}{x^2}$. Интеграл является табличным,

следовательно, останется только использовать формулу Ньютона-Лейбница:

$$\int_1^t \frac{dx}{x^2} = \left. \frac{x^{-1}}{-1} \right|_1^t = 1 - \frac{1}{t}.$$

Найдем предел полученного выражения при $t \rightarrow +\infty$:

$$\int_1^{+\infty} \frac{dx}{x^2} = \lim_{t \rightarrow +\infty} \left(1 - \frac{1}{t}\right) = 1.$$

Таким образом, исследуемый интеграл $\int_1^{+\infty} \frac{dx}{x^2}$ сходится, а значение интеграла равно 1.

Пример. Вычислим несобственный интеграл $\int_e^{+\infty} \frac{dx}{x \ln^3 x}$.

Согласно определению, несобственный интеграл $\int_e^{+\infty} \frac{dx}{x \ln^3 x}$ представим в

виде предела $\lim_{t \rightarrow +\infty} \int_e^t \frac{dx}{x \ln^3 x}$:

$$\int_e^{+\infty} \frac{dx}{x \ln^3 x} = \lim_{t \rightarrow +\infty} \int_e^t \frac{dx}{x \ln^3 x}.$$

Найдем интеграл $\int_e^t \frac{dx}{x \ln^3 x}$, с учетом того, что верхний предел

интегрирования является переменной величиной. Для интегрирования будем использовать метод внесения под знак дифференциала:

$$\int_e^t \frac{dx}{x \ln^3 x} = \int_e^t \frac{d(\ln x)}{\ln^3 x} = \int_e^t (\ln x)^{-3} d(\ln x) = -\frac{1}{2 \ln^2 x} \Big|_e^t.$$

Подставив в первообразную значения t и e , получим:

$$-\frac{1}{2 \ln^2 x} \Big|_e^t = -\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\ln^2 x} \Big|_e^t = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\ln^2 t} - \frac{1}{\ln^2 e} \right).$$

Найдем предел выражения $-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{\ln^2 t} - \frac{1}{\ln^2 e}\right)$ при $t \rightarrow +\infty$:

$$\int_e^{+\infty} \frac{dx}{x \ln^3 x} = -\frac{1}{2} \lim_{t \rightarrow +\infty} \left(\frac{1}{\ln^2 t} - \frac{1}{\ln^2 e} \right) = \frac{1}{2}.$$

Таким образом, несобственный интеграл $\int_e^{+\infty} \frac{dx}{x \ln^3 x}$ сходится к $\frac{1}{2}$.

Несобственный интеграл на полуинтервале $(-\infty, b]$ определяется таким же образом, как и на полуинтервале $[a; +\infty)$:

$$\int_{-\infty}^b f(x) dx = \lim_{t \rightarrow -\infty} \int_t^b f(x) dx.$$

Определение сходимости несобственного интеграла $\int_{-\infty}^b f(x) dx$

осуществляется, также как и для интеграла $\lim_{t \rightarrow +\infty} \int_a^t f(x) dx$.

Пример. Вычислим несобственный интеграл $\int_{-\infty}^0 x dx$.

По определению несобственного интеграла представим интеграл $\int_{-\infty}^b f(x) dx$

в виде предела функции $\lim_{t \rightarrow -\infty} \int_t^b f(x) dx$. Получим:

$$\int_{-\infty}^0 x dx = \lim_{t \rightarrow -\infty} \int_t^0 x dx.$$

Вычислим полученный интеграл $\int_t^0 x dx$:

$$\int_t^0 x dx = \left. \frac{x^2}{2} \right|_t^0 = \frac{0^2}{2} - \frac{t^2}{2} = -\frac{t^2}{2}.$$

Найдем предел выражения при $t \rightarrow -\infty$:

$$\int_{-\infty}^0 \frac{dx}{x^2} = \lim_{t \rightarrow -\infty} \left(-\frac{t^2}{2} \right) = -\infty.$$

Таким образом, исследуемый интеграл $\int_{-\infty}^0 x dx$ расходится.

Несобственный интеграл на интервале $(-\infty; +\infty)$ определяется, как сумма

интегралов $\int_{-\infty}^b f(x) dx$ и $\lim_{t \rightarrow +\infty} \int_a^t f(x) dx$:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = \int_{-\infty}^c f(x) dx + \int_c^{+\infty} f(x) dx, \quad c - \text{const.}$$

В этом случае интеграл сходится, если сходятся оба интеграла.

Пример. Вычислим несобственный интеграл $\int_{-\infty}^{+\infty} e^x dx$.

Для нахождения интеграла $\int_{-\infty}^{+\infty} e^x dx$ исследуем на сходимость

несобственные интегралы $\int_{-\infty}^0 e^x dx$ и $\int_0^{+\infty} e^x dx$.

$$\int_{-\infty}^0 e^x dx = \lim_{t \rightarrow -\infty} \int_t^0 e^x dx = \lim_{t \rightarrow -\infty} (e^0 - e^t) = 1.$$

Первый интеграл $\int_{-\infty}^0 e^x dx$ сходится к единице.

$$\int_0^{+\infty} e^x dx = \lim_{t \rightarrow +\infty} \int_0^t e^x dx = \lim_{t \rightarrow +\infty} (e^t - e^0) = +\infty.$$

Второй интеграл $\int_{-\infty}^0 e^x dx$ расходится.

Так как не все интегралы сходятся, то несобственный интеграл $\int_{-\infty}^{+\infty} e^x dx$ расходится.

12.4.2. Несобственные интегралы от разрывных функций

Пусть функция $f(x)$ непрерывна на интервале $[a, b)$ и терпит разрыв при $x=b$.

Если существует конечный предел $\lim_{t \rightarrow b-0} \int_a^t f(x) dx$, то он называется *несобственным интегралом II рода* и обозначается:

$$\int_a^b f(x) dx = \lim_{t \rightarrow b-0} \int_a^t f(x) dx.$$

Если предел существует, несобственный интеграл II рода *сходится*, в противном случае интеграл *расходится*.

На рисунке 12.10 схематично показаны криволинейные трапеции, соответствующие несобственным интегралам второго рода.

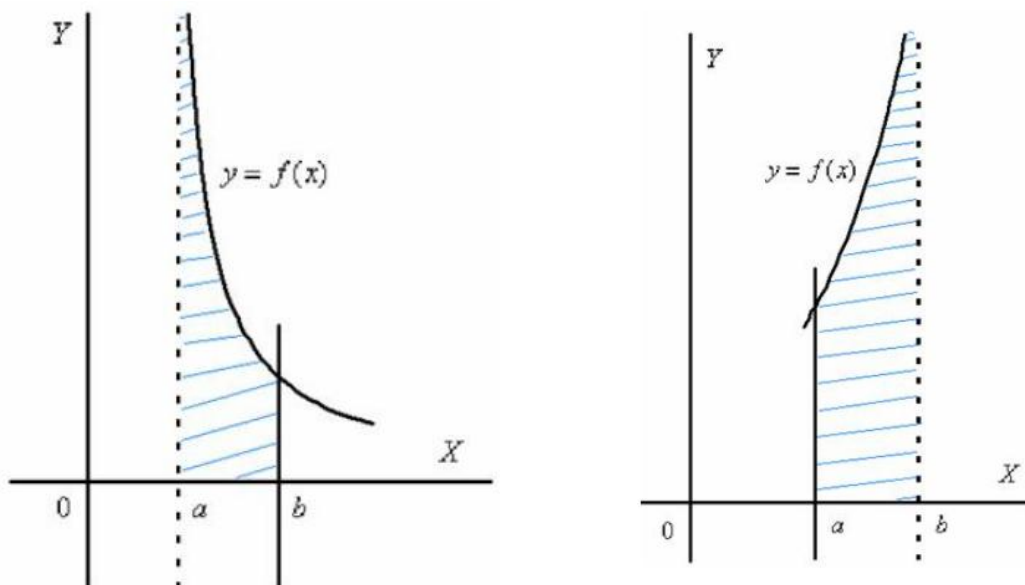


Рис. 12.10 Несобственные интегралы второго рода.

Пример. Вычислим несобственный интеграл: $\int_{-1}^0 \frac{dx}{\sqrt[3]{x}}$.

Данный интеграл является несобственным второго рода, так как в верхнем пределе интегрирования подынтегральная функция $f(x) = \frac{1}{\sqrt[3]{x}}$ терпит разрыв.

В этом случае наш интеграл можно представить в виде:

$$\int_{-1}^0 \frac{dx}{\sqrt[3]{x}} = \lim_{t \rightarrow 0-0} \int_{-1}^t \frac{dx}{\sqrt[3]{x}}.$$

Найдем полученный предел интеграла:

$$\lim_{t \rightarrow 0-0} \int_{-1}^t \frac{dx}{\sqrt[3]{x}} = \lim_{t \rightarrow 0-0} \int_{-1}^t x^{-\frac{1}{3}} dx = \lim_{t \rightarrow 0-0} \left(\frac{3}{2} x^{\frac{2}{3}} \Big|_{-1}^t \right) = -\frac{3}{2}.$$

Таким образом, несобственный интеграл сходится и его значение равно

$$-\frac{3}{2}.$$

Если функция $f(x)$, непрерывна на интервале $(a, b]$, терпит разрыв при $x=a$,

то конечный предел $\lim_{t \rightarrow a+0} \int_t^b f(x) dx$ также будет *несобственным интегралом II рода*:

$$\int_a^b f(x) dx = \lim_{t \rightarrow a+0} \int_t^b f(x) dx.$$

Если предел существует и *сходится*, то несобственный интеграл II рода *сходится*, в противном случае – *расходится*.

Пример. Найдем интеграл $\int_0^1 \frac{dx}{x^3}$.

Данный интеграл является несобственным II рода, так как в нижнем пределе интегрирования подынтегральная функция $f(x) = \frac{1}{x^3}$ терпит разрыв.

Тогда несобственный интеграл можно представить в виде:

$$\int_0^1 \frac{dx}{x^3} = \lim_{t \rightarrow 0+} \int_t^1 \frac{dx}{x^3}.$$

Для нахождения интеграла, представим подынтегральное выражение $\frac{1}{x^3}$ в виде x^{-3} , а затем найдем предел:

$$\lim_{t \rightarrow 0+} \int_t^1 \frac{dx}{x^3} = \lim_{t \rightarrow 0+} \int_t^1 x^{-3} dx = \lim_{t \rightarrow 0+} \left(-\frac{1}{2x^2} \right) \Big|_t^1 = -\frac{1}{2} \lim_{t \rightarrow 0+} \left(1 - \frac{1}{t^2} \right) = \infty.$$

Таким образом, несобственный интеграл расходится.

Если пределы интегрирования $x=a$ и $x=b$ являются точками разрыва, то

несобственный интеграл $\int_a^b f(x)dx$ можно разбить на слагаемые:

$$\int_a^b f(x)dx = \int_a^c f(x)dx + \int_c^b f(x)dx, \quad c \in (a; b).$$

где c принадлежит интервалу $(a; b)$.

Пример. Исследуя несобственный интеграл $\int_1^3 \frac{dx}{x^2 - 4x + 3}$ мы видим что

подынтегральная функция $f(x) = \frac{1}{x^2 - 4x + 3}$ терпит разрыв одновременно в нижнем пределе интегрирования $x=1$ и в верхнем пределе $x=3$.

Разобьём интеграл $\int_1^3 \frac{dx}{x^2 - 4x + 3}$ на слагаемые:

$$\int_1^3 \frac{dx}{x^2 - 4x + 3} = \int_1^2 \frac{dx}{x^2 - 4x + 3} + \int_2^3 \frac{dx}{x^2 - 4x + 3}.$$

Первое слагаемое является несобственным интегралом второго рода с точкой разрыва в нижнем пределе интегрирования, в второе слагаемое – несобственным интегралом с точкой разрыва в верхнем пределе интегрирования.

Если на отрезке $[a; b]$ существует точка разрыва $c \in [a; b]$, то несобственный интеграл можно представить в виде суммы:

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

Пример. Рассмотрим несобственный интеграл $\int_0^4 \frac{dx}{x^2 - 4}$.

Интеграл будет несобственным, причем второго рода, поскольку на отрезке интегрирования $[0; 4]$ подынтегральная функция терпит разрыв в точке $x=2$.

Для нахождения данного несобственного интеграла достаточно разбить его на два слагаемых:

$$\int_0^4 \frac{dx}{x^2 - 4} = \int_0^2 \frac{dx}{x^2 - 4} + \int_2^4 \frac{dx}{x^2 - 4}.$$

Если оба несобственных интеграла $\int_a^c f(x)dx$ и $\int_c^b f(x)dx$ сходятся, то будет

сходиться исследуемый интеграл. Если же хотя бы один из интегралов $\int_a^c f(x)dx$ и $\int_c^b f(x)dx$ расходится, то будет расходиться и интеграл $\int_a^b f(x)dx$.

12.5. Двойные интегралы

12.5.1. Определение двойного интеграла

Обобщением определенного интеграла на случай функций двух переменных является двойной интеграл. В отличие от случая одной переменной здесь не удастся ввести простого понятия первообразной и неопределенного интеграла. В то же время определенный интеграл вводится аналогично: интегрирование рассматривается как «суммирование бесконечного числа бесконечно малых величин».

Двойной интеграл обозначается $\iint_D f(x; y)dx dy$, где

$f(x; y)$ – функция интегрируемая в области D ;

D – область интегрирования;

x и y – переменные интегрирования.

Теорема (достаточное условие интегрируемости функции). Если функция $z = f(x, y)$ непрерывна в замкнутой области D , то она интегрируема в этой области.

Интегрирование функции двух переменных значительно более трудная задача по сравнению с аналогичной задачей для одной переменной. Однако в некоторых случаях можно получить завершённый результат. Рассмотрим один из таких важнейших случаев.

12.5.2. Вычисление двойного интеграла

Множество D на плоскости Oxy называется элементарным относительно оси Ox , если его граница состоит из графиков двух непрерывных функций $g(x)$ и $h(x)$, определенных на некотором отрезке $[a, b]$ и таких, что $g(x) \leq h(x)$, и из отрезков прямых $x = a$ и $x = b$ (рис. 12.11).

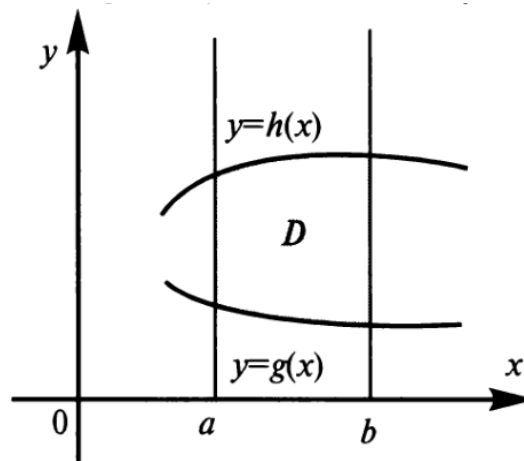


Рис. 12.11. Элементарное множество относительно оси Ox .

Двойной интеграл может быть вычислен с помощью теоремы, представляющей двумерный аналог формулы Ньютона-Лейбница.

Теорема. Если функция $z = f(x, y)$ непрерывна на элементарном множестве D , то

$$\iint_D f(x; y) dx dy = \int_a^b \left(\int_{g(x)}^{h(x)} f(x; y) dy \right) dx.$$

Интеграл, стоящий в правой части, называется *повторным интегралом*:

$$I = \int_a^b dx \int_{g(x)}^{h(x)} f(x; y) dy.$$

Часть повторного интеграла $\int_{g(x)}^{h(x)} f(x; y) dy$ называют *внутренним интегралом*.

Для вычисления двукратного интеграла сначала берем внутренний интеграл, считая x постоянным, затем берем внешний интеграл, т.е. результат первого интегрирования интегрируем по x в пределах от a до b .

Пример. Найдём значение повторного интеграла $\int_1^5 dx \int_0^4 (x + y) dy$.

Считая x постоянным, возьмём сперва внутренний интеграл:

$$\int_1^5 dx \int_0^4 (x + y) dy = \int_1^5 dx \left(xy + \frac{y^2}{2} \Big|_0^4 \right) = \int_1^5 (4x + 8) dx.$$

А теперь вычислим получившийся определенный интеграл:

$$\int_1^5 (4x + 8) dx = \left(2x^2 + 8x \right) \Big|_1^5 = 80.$$

Таким образом, повторный интеграл $\int_1^5 dx \int_0^4 (x + y) dy$ равен 80.

Пример. Вычислим повторный интеграл $\int_1^4 dx \int_0^6 (x - y) dy$.

Взяв внутренний интеграл, получим определенный интеграл:

$$\int_1^4 dx \int_0^6 (x - y) dy = \int_1^4 dx \left(xy - \frac{y^2}{2} \Big|_0^6 \right) = \int_1^4 (6x - 18) dx.$$

Найдём теперь определенный интеграл:

$$\int_1^4 (6x - 18) dx = \left(3x^2 - 18x \right) \Big|_1^4 = -9.$$

Таким образом, повторный интеграл $\int_1^4 dx \int_0^6 (x - y) dy$ равен -9.

Пример. Вычислим двойной интеграл $\iint_S dx dy$ по области S , ограниченной

линиями $x = 1$, $x = 2$, $y = x^2$, $y = 3x$.

Построим область интегрирования S .

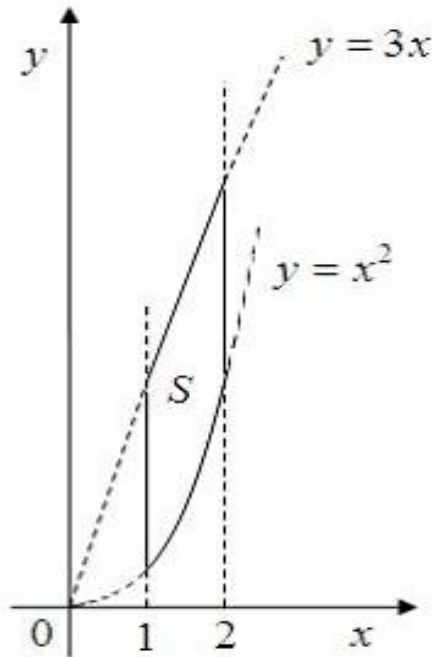


Рис. 12.12. Область интегрирования S , ограниченная линиями

$$x = 1, x = 2, y = x^2, y = 3x.$$

Тогда, двойной интеграл можно будет записать в виде

$$\iint_S dx dy = \int_1^2 dx \int_{x^2}^{3x} dy.$$

Найдем повторный интеграл

$$\int_1^2 dx \int_{x^2}^{3x} dy = \int_1^2 (3x - x^2) dx.$$

Теперь решим полученный определенный интеграл

$$\int_1^2 (3x - x^2) dx = \left(\frac{3x^2}{2} - \frac{x^3}{3} \right) \Big|_1^2 = \left(6 - \frac{8}{3} \right) - \left(\frac{3}{2} - \frac{1}{3} \right) = \frac{13}{6}.$$

Таким образом, двойной интеграл $\iint_S dx dy$ по области S , ограниченной

линиями $x = 1$, $x = 2$, $y = x^2$, $y = 3x$ равен $\frac{13}{6}$.

Вопросы для самоконтроля

1. Сформулируйте понятие определенного интеграла. Что означают все компоненты записи определенного интеграла?
2. Каким образом применяется формула. Ньютона-Лейбница?
3. Какими свойствами обладает определенный интеграл? Приведите примеры.
4. Какие методы вычисления определенного интеграла вы знаете?
5. В чем заключается метод непосредственного интегрирования? Продемонстрируйте на примерах принципы использования метода непосредственного интегрирования.
6. На чем основан метод интегрирования подстановкой (заменой переменной)? Какие особенности имеет метод интегрирования подстановкой для нахождения определенного интеграла?
7. Опишите алгоритмы нахождения определенного интеграла с помощью метода интегрирования по частям. Приведите примеры.
8. Каковы особенности интегрирования четных и нечетных функций в симметричных пределах?
9. Приведите примеры вычисления определенного интеграла методом непосредственного интегрирования? Какие свойства определенного интеграла вы использовали?
10. В чем заключается суть метода интегрирования заменой переменных? Приведите примеры использования метода интегрирования заменой переменных.
11. Каким образом при нахождении определенного интеграла используется метод интегрирования по частям? В чем особенности этого метода?
12. Какие геометрические приложения определенного интеграла вы знаете?
13. Каким образом определенный интеграл можно использовать для вычисления площадей плоских фигур? Постройте график и приведите пример.
14. Продемонстрируйте на примере метод вычисления длины дуги плоской кривой. С какими проблемами здесь можно столкнуться?

15. Каким образом с помощью определенного интеграла можно вычислить объемы тел вращения? Приведите пример.
16. Сформулируйте понятие несобственного интеграла. Какого рода бывают несобственные интегралы?
17. Какие основные задачи выделяют при исследовании несобственных интегралов?
18. Приведите пример несобственного интеграла с бесконечными пределами интегрирования. Что вы можете сказать о его сходимости?
19. Каким образом происходит исследование вопроса о сходимости несобственного интеграла с бесконечными пределами интегрирования?
20. Расскажите об особенностях интегрирования несобственных интегралов второго рода. Приведите примеры нахождения таких интегралов?
21. В чем заключается графический смысл несобственных интегралов?
22. Сформулируйте понятие двойного интеграла. В каком случае функция двух переменных интегрируема на заданной замкнутой области?
23. Что представляют собой повторный и внутренний интегралы?
24. Опишите алгоритм нахождения двойного интеграла. Приведите примеры нахождения двойного интеграла.

Глава 13. Ряды

Одним из основных понятий математического анализа являются числовые ряды. В простейшем случае ряд представляет собой сумму бесконечной последовательности чисел. Понятие бесконечного ряда и его суммы можно ввести не только для чисел, но и для других математических понятий, таких как функции одной или нескольких переменных, векторы и матрицы.

Еще в античные времена древнегреческие ученые в своих вычислениях использовали суммы бесконечно убывающих геометрических прогрессий. В пятнадцатом веке в Индийской Керальской школе астрономии и математики уже находили разложение тригонометрических функций в числовые ряды.

Начиная с семнадцатого века бесконечные ряды начали появляться в работах европейских ученых: Трегуара и Сен-Венсана (1584 – 1667), Николаса Меркатора (1620—1687), Пьетро Менголи (1626 – 1686), Джеймса Грегори (1638 – 1675), Исаака Ньютона (1642 – 1727), Готфрида Лейбница (1646 – 1716) и Якоба Бернулли (1655 – 1705).

Однако теория рядов в основном была сформирована только в восемнадцатом и девятнадцатом веках. Огромный вклад в числовые и функциональные ряды внесли Брук Тейлор (1685 – 731), Леонард Эйлер (1707 – 1783), Жан Даламбер (1717 – 1783), Жан-Батист Фурье (1768 – 1830), Огюстен Коши (1789 – 1857), Нильс Абель (1802 – 1829), Пьер Лоран (1813 – 1854), Карл Вейерштрасс (1815 – 1897).

Глава посвящена исследованию числовых и функциональных рядов. В ней мы дадим понятия числового ряда и его сходимости, опишем основные свойства сходящихся рядов, определим необходимые достаточные признаки сходимости знакопостоянных, знакопеременных и знакочередующихся рядов. Рассмотрим методы исследования функциональных рядов, а также принципы использования степенных рядов для разложения функций в ряды Тейлора и Маклорена.

13.1. Числовые ряды и их свойства

При решении математических задач, в том числе и в приложениях связанных с органами внутренних дел, приходится рассматривать суммы, составленные из бесконечного множества слагаемых. Из теории множеств известно лишь, что означает сумма любого конечного числа действительных чисел. Задача суммирования бесконечного множества слагаемых решается в *теории рядов*.

13.1.1. Понятие числового ряда

Числовым рядом (рядом) называется бесконечная последовательность чисел $u_1, u_2, \dots, u_n, \dots$ соединенных знаком сложения:

$$\sum_{n=1}^{\infty} u_n = u_1 + u_2 + \dots + u_n + \dots .$$

Числа $u_1, u_2, \dots, u_n, \dots$ называются членами ряда, а u_n – общий член ряда.

Ряд считается заданным, если известен общий член ряда u_n , выраженный как функция его номера n : $u_n = f(n)$.

Пример. Члены бесконечной арифметической прогрессии: -6, -4, -2, 0, 2, 4, 6, 8, ... образуют числовой ряд с общим членом $u_n = -6 + 2(n - 1)$.

Рассмотрим суммы конечного числа членов ряда:

$$S_1 = u_1; S_2 = u_1 + u_2; S_n = u_1 + u_2 + \dots + u_n,$$

тогда сумма n первых членов ряда S_n называется n -й частичной суммой ряда.

Ряд называется *сходящимся*, если существует конечный предел последовательности его частичных сумм, то есть

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = S .$$

Число S называется *суммой ряда*:

$$u_1 + u_2 + \dots + u_n + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} u_n = S$$

Если $\lim_{n \rightarrow \infty} S_n$ не существует или $\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = \infty$, то ряд $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ называют

расходящимся. Расходящийся ряд суммы не имеет.

Пример. Члены бесконечно убывающей геометрической прогрессии 8, 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125 ... образуют ряд с общим членом $u_n = 8 \cdot 0,5^{(n-1)}$

Сумма этого ряда равна

$$S = \frac{u_1}{1-q} = \frac{8}{1-0.5} = 16.$$

Пример. Ряд, составленный из членов арифметической прогрессии: -6, -4, -2, 0, 2, 4, 6, 8, ... является расходящимся и суммы ряда не имеет.

Пример. Найдём сумму ряда $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{14}{49n^2 - 70n - 24}$.

Разложение знаменателя дроби на множители имеет вид:

$$49n^2 - 70n - 24 = 49 \left(n - \frac{12}{7} \right) \left(n + \frac{2}{7} \right) = (7n - 12)(7n + 2).$$

Разложив общий член ряда u_n на сумму простейших дробей, получим:

$$u_n = \frac{14}{(7n - 12)(7n + 2)} = \frac{A}{7n - 12} + \frac{B}{7n + 2}.$$

Приведём дроби к общему знаменателю, раскроем скобки и приведем подобные слагаемые:

$$\begin{aligned} \frac{A}{7n - 12} + \frac{B}{7n + 2} &= \frac{A(7n + 2) + B(7n - 12)}{(7n - 12)(7n + 2)} = \\ &= \frac{7An + 2A + 7Bn - 12B}{(7n - 12)(7n + 2)} = \frac{(7A + 7B)n + 2A - 12B}{(7n - 12)(7n + 2)}. \end{aligned}$$

Приравняем числители первоначальной дроби и дроби, получившейся после преобразований:

$$0n + 14 = (7A + 7B)n + 2A - 12B.$$

Данное равенство можно представить в виде системы из двух линейных алгебраических уравнения, решая которую найдем значения параметров A и B :

$$\begin{cases} 7A+7B=0 \\ 2A-12B=14 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A=1 \\ B=-1 \end{cases}.$$

Учитывая полученные значения A и B общий элемент ряда примет вид:

$$u_n = \frac{A}{7n-12} + \frac{B}{7n+2} = \frac{1}{7n-12} - \frac{1}{7n+2}.$$

Рассчитаем последовательно несколько первых значений u_n ;

$$u_1 = \frac{1}{7-12} - \frac{1}{7+2} = -\frac{1}{5} - \frac{1}{9}; \quad u_2 = \frac{1}{2 \cdot 7-12} - \frac{1}{2 \cdot 7+2} = \frac{1}{2} - \frac{1}{16};$$

$$u_3 = \frac{1}{3 \cdot 7-12} - \frac{1}{3 \cdot 7+2} = \frac{1}{9} - \frac{1}{23}; \quad u_4 = \frac{1}{4 \cdot 7-12} - \frac{1}{4 \cdot 7+2} = \frac{1}{16} - \frac{1}{30};$$

$$u_5 = \frac{1}{5 \cdot 7-12} - \frac{1}{5 \cdot 7+2} = \frac{1}{23} - \frac{1}{37}; \quad u_6 = \frac{1}{6 \cdot 7-12} - \frac{1}{6 \cdot 7+2} = \frac{1}{30} - \frac{1}{44}.$$

Составим частичную сумму ряда:

$$S_n = \left(-\frac{1}{5} - \frac{1}{9}\right) + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{16}\right) + \left(\frac{1}{9} - \frac{1}{23}\right) + \left(\frac{1}{16} - \frac{1}{30}\right) + \left(\frac{1}{23} - \frac{1}{37}\right) + \left(\frac{1}{30} - \frac{1}{44}\right) + \\ + \dots + \left(\frac{1}{7n-26} - \frac{1}{7n-12}\right) + \left(\frac{1}{7n-19} - \frac{1}{7n-5}\right) + \left(\frac{1}{7n-12} - \frac{1}{7n+2}\right).$$

Раскроем скобки в полученном выражении:

$$S_n = -\frac{1}{5} - \frac{1}{9} + \frac{1}{2} - \frac{1}{16} + \frac{1}{9} - \frac{1}{23} + \frac{1}{16} - \frac{1}{30} + \frac{1}{23} - \frac{1}{37} + \frac{1}{30} - \frac{1}{44} + \\ + \dots + \frac{1}{7n-26} - \frac{1}{7n-12} + \frac{1}{7n-19} - \frac{1}{7n-5} + \frac{1}{7n-12} - \frac{1}{7n+2}.$$

Сократим одинаковые по абсолютному значению слагаемые с противоположными знаками, в результате получим выражение:

$$S_n = -\frac{1}{5} + \frac{1}{2} - \frac{1}{7n-5} - \frac{1}{7n+2}.$$

Найдем предел частичной суммы ряда:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(-\frac{1}{5} + \frac{1}{2} - \frac{1}{7n-5} - \frac{1}{7n+2}\right) = -\frac{1}{5} + \frac{1}{2} = \frac{3}{10}.$$

Следовательно, ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{14}{49n^2 - 70n - 24}$ сходится, а его сумма равна 0,3.

13.1.2. Свойства сходящихся рядов

Свойство 1. Если ряд $u_1 + u_2 + \dots + u_n + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} u_n$ сходится и его сумма равна S , то ряд $cu_1 + cu_2 + \dots + cu_n + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} cu_n$, где c – произвольное число, также сходится и его сумма равна cS . Если же ряд $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ расходится и $c \neq 0$, то и ряд $\sum_{n=1}^{\infty} cu_n$ расходится.

Свойство 2. Если ряды $u_1 + u_2 + \dots + u_n + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} u_n$ и $v_1 + v_2 + \dots + v_n + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} v_n$ сходятся и их суммы соответственно равны S_1 и S_2 , то и ряд $(u_1 + v_1) + (u_2 + v_2) + \dots + (u_n + v_n) + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} (u_n + v_n)$, (представляющий сумму рядов $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ и $\sum_{n=1}^{\infty} v_n$ также сходится, и его сумма равна $S_1 + S_2$).

Свойство 3. Если ряд сходится, то сходится и ряд, полученный из данного путем отбрасывания или приписывания конечного числа членов.

13.1.3. Ряд геометрической прогрессии

Ряд $a + aq + aq^2 + aq^3 + \dots + aq^{n-1} + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} aq^{n-1}$ ($a \neq 0$), называется рядом *геометрической прогрессии*, который при $|q| < 1$ сходится, а при $|q| \geq 1$ расходится.

Пример. Исследовать сходимость ряда $2^3 + 2^2 + 2 + 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \dots$.

Ряд представляет собой ряд геометрической прогрессии, где $a = 2^3$, $q = 0,5$. Найдем сумму ряда:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a(1-q^n)}{1-q} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2^3(1-0.5^n)}{1-0.5} = \frac{2^3}{0.5} = 16.$$

Ряд $2^3 + 2^2 + 2 + 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \dots$ *сходится*, так как предел

последовательности его частичных сумм равен 16.

13.1.4. Признак сходимости и условие расходимости числового ряда

Теорема 13.1. (необходимый признак сходимости). Если ряд $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$

сходится, то предел его общего члена u_n при $n \rightarrow \infty$ равен нулю:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} u_n = 0.$$

Следствие 1 (достаточное условие расходимости ряда). Если предел

общего члена u_n ряда $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ при $n \rightarrow \infty$ не равен нулю:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} u_n \neq 0$$

или этот предел не существует, то ряд расходится.

Пример. Исследовать на сходимость ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{3n-2}{n+5}$.

Найдем предел общего члена ряда u_n при $n \rightarrow \infty$:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3n-2}{n+5} = \left[\frac{\infty}{\infty} \right] = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(3n-2)'}{(n+5)'} = \frac{3}{1} = 3.$$

Ряд расходится, поскольку предел общего члена ряда u_n при $n \rightarrow \infty$ не равен нулю.

Пример. Исследовать сходимость ряда $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^3 + 2n^2 - 1}{n-1}$.

Найдем предел общего члена ряда u_n при $n \rightarrow \infty$:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^3 + 2n^2 - 1}{n-1} = \left[\frac{\infty}{\infty} \right] = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n^3 + 2n^2 - 1)'}{(n-1)'} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3n^2 + 4n}{1} = \infty.$$

Ряд расходится, поскольку предел его общего ряда u_n при $n \rightarrow \infty$ не равен нулю.

13.2. Достаточные признаки сходимости знакопостоянных рядов

Необходимый признак сходимости не дает возможности судить о том, сходится данный ряд или нет. Если общий член ряда стремится к нулю, то еще нельзя сделать вывод о сходимости ряда.

Сходимость или расходимость ряда можно установить с помощью *достаточных признаков*. Рассмотрим некоторые из них для *знакоположительных рядов*, т.е. рядов с неотрицательными членами.

13.2.1. Признаки сравнения

Теорема 13.2. (Признак сравнения). Пусть даны два знакоположительных ряда $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ и $\sum_{n=1}^{\infty} v_n$, причем члены первого ряда не превосходят членов второго, то есть при любом n выполняется неравенство: $u_n \leq v_n$.

Тогда, из сходимости ряда $\sum_{n=1}^{\infty} v_n$ следует сходимость ряда $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$, а из расходимости ряда $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ следует расходимость ряда $\sum_{n=1}^{\infty} v_n$.

Теорема 13.3. (предельный признак сравнения). Пусть даны два знакоположительных ряда $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ и $\sum_{n=1}^{\infty} v_n$, причем члены первого ряда не превосходят членов второго, то есть при любом n выполняется неравенство: $u_n \leq v_n$.

Если существует конечный, отличный от нуля, предел $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_n}{v_n} = A \neq 0$, ($0 < A < \infty$), то ряды $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ и $\sum_{n=1}^{\infty} v_n$ сходятся или расходятся одновременно.

13.2.2. «Эталонные» ряды, используемые для сравнения

Для приведенных признака сравнения и предельного признака сравнения можно использовать некоторые типы рядов, которые обычно называют эталонными. Рассмотрим некоторые из них.

1. Геометрический ряд: $\sum_{n=1}^{\infty} aq^{n-1}$ – $\begin{matrix} \text{сходится при } |q| < 1 \\ \text{расходится при } |q| \geq 1 \end{matrix}$;

2. Гармонический ряд: $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}$ – расходится;

3. Обобщенный гармонический ряд:

$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{\alpha}} = \frac{1}{1^{\alpha}} + \frac{1}{2^{\alpha}} + \frac{1}{3^{\alpha}} + \dots + \frac{1}{n^{\alpha}} + \dots$ – $\begin{matrix} \text{сходится при } \alpha > 1 \\ \text{расходится при } \alpha \leq 1 \end{matrix}$.

Нестандартность применения признака сравнения заключается в том, что необходимо не только подобрать соответствующий «эталонный» ряд, но доказать неравенство $u_n \leq v_n$, для чего часто требуется преобразование рядов (например, отбрасывание или приписывание конечного числа членов, умножение на определенные числа и т.п.). В ряде случаев более простым оказывается предельный признак сравнения $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_n}{v_n} = A$, $(0 < A < \infty)$.

Пример. Исследуем на сходимость ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{3 + 2^n}$.

Сравним данный ряд с рядом геометрической прогрессии $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n}$.

Выбранный эталонный ряд сходится, поскольку $q = \frac{1}{2} < 1$. В соответствии с признаком сравнения (теорема 13.2) проверим неравенство $u_n \leq v_n$:

$$\frac{1}{3 + 2^n} < \frac{1}{2^n}.$$

Умножим оба неравенства на $3 + 2^n$, а затем на 2^n . В результате получим:

$$2^n < 3 + 2^n.$$

Очевидно, что данное неравенство выполняется для всех n , следовательно,

ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{3+2^n}$ сходится.

Пример. Исследуем на сходимость ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{4n-1}{2n^3-n-25}$.

В исследовании применим предельный признак сравнения. В качестве эталонного возьмем сходящийся гармонический ряд $\frac{1}{n^2}$.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_n}{v_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{4n-1}{2n^3-n-25}}{\frac{1}{n^2}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{4n^3-n^2}{2n^3-n-25}.$$

Для нахождения предела воспользуемся правилом Лопиталя:

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{4n^3-n^2}{2n^3-n-25} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(4n^3-n^2)'}{(2n^3-n-25)'} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{12n^2-n}{6n^2-1} = \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(12n^2-n)'}{(6n^2-1)'} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{24n-1}{12n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(24n-1)'}{(12n)'} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{24}{12} = 2. \end{aligned}$$

Значение предела $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_n}{v_n}$ конечно и отлично от нуля, следовательно, ряд

$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{4n-1}{2n^3-n-25}$ является сходящимся.

13.2.3. Признак Даламбера

В отличие от признаков сравнения, где все зависит от запаса известных сходящихся и расходящихся рядов, признак Даламбера позволяет часто решить вопрос о сходимости ряда, проделав лишь некоторые операции над самим рядом.

Теорема 13.4. (признак Даламбера). Пусть дан ряд $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ с положительными членами и существует конечный или бесконечный предел

$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_{n+1}}{u_n} = q$. Тогда ряд сходится при $q < 1$ и расходится при $q > 1$.

Признак Даламбера целесообразно применять, когда общий член ряда содержит выражения вида $n!$ или a^n .

Замечание 1. Если $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_{n+1}}{u_n} = \infty$, то ряд расходится.

Замечание 2. Если $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_{n+1}}{u_n} = 1$, то признак Даламбера ответа о сходимости ряда не дает, и рекомендуется исследовать ряд другими методами.

Пример. Исследуем на сходимость ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!}$.

Найдем предел отношения $\frac{u_{n+1}}{u_n}$ при $n \rightarrow \infty$:

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_{n+1}}{u_n} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{(n+1)!}}{\frac{1}{n!}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n!}{(n+1)!} = \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (n-1) \cdot n}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (n-1) \cdot n \cdot (n+1)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n+1} = 0 \end{aligned}$$

Поскольку $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_{n+1}}{u_n} < 1$, то согласно признаку Даламбера ряд сходится.

Пример. Исследуем на сходимость ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^n}{n^3}$.

Найдем предел отношения $\frac{u_{n+1}}{u_n}$ при $n \rightarrow \infty$:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_{n+1}}{u_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{2^{n+1}}{(n+1)^3}}{\frac{2^n}{n^3}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2^{n+1} \cdot n^3}{2^n \cdot (n+1)^3} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2 \cdot 2^n \cdot n^3}{2^n \cdot (n+1)^3} = 2 \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^3}{(n+1)^3}$$

Полученный предел представляет неопределенность вида $\left[\frac{\infty}{\infty} \right]$. Используя

правило Лопиталя для нахождения предела, получим:

$$\begin{aligned}\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_{n+1}}{u_n} &= 2 \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n^3)'}{((n+1)^3)'} = 2 \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3n^2}{3(n+1)^2} = \left[\frac{\infty}{\infty} \right] = \\ &= 2 \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{6n}{6(n+1)} = \left[\frac{\infty}{\infty} \right] = 2 \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{6}{6} = 2.\end{aligned}$$

Поскольку $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_{n+1}}{u_n} > 1$, то согласно признаку Даламбера ряд расходится.

Пример. Исследуем на сходимость ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 \cdot 4 \cdot 7 \cdot \dots \cdot 7(3n-2)}{2^{n+1} \cdot n!}$.

Применим признак Даламбера к элементам данного ряда. Найдем предел

отношения $\frac{u_{n+1}}{u_n}$ при $n \rightarrow \infty$:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_{n+1}}{u_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1 \cdot 4 \cdot 7 \cdot \dots \cdot 7(3n-2)(3n+1)}{2^{n+2} \cdot (n+1)!}}{\frac{1 \cdot 4 \cdot 7 \cdot \dots \cdot 7(3n-2)}{2^{n+1} \cdot n!}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 \cdot 4 \cdot 7 \cdot \dots \cdot 7(3n-2)(3n+1) \cdot 2^{n+1} \cdot n!}{1 \cdot 4 \cdot 7 \cdot \dots \cdot 7(3n-2) \cdot 2^{n+2} \cdot (n+1)!}.$$

Сократим полученную дробь и воспользуемся правилом Лопиталья:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_{n+1}}{u_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(3n+1) \cdot 2^{n+1} \cdot n!}{2 \cdot 2^{n+1} \cdot 2 \cdot n! \cdot (n+1)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3n+1}{2(n+1)} = \left[\frac{\infty}{\infty} \right] = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3}{2}.$$

Поскольку $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_{n+1}}{u_n} > 1$, то согласно признаку Даламбера ряд расходится.

13.2.4. Радикальный признак Коши

Теорема 13.5. (радикальный признак Коши). Пусть дан ряд $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ с

положительными членами и существует конечный или бесконечный предел

$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{u_n} = q$. Тогда ряд сходится при $q < 1$ и расходится при $q > 1$.

Признак Коши целесообразно применять, когда общий член ряда содержит выражения вида a^n .

Замечание 1. Если $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{u_n} = \infty$, то ряд расходится.

Замечание 2. Как и для признака Даламбера, в случае, когда $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{u_n} = 1$,

вопрос о сходимости ряда остается открытым.

Пример. Исследуем на сходимость ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{3^n}$.

Найдем предел радикала $\sqrt[n]{\frac{1}{3^n}}$:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{u_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\frac{1}{3^n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{3} = \frac{1}{3}$$

Поскольку $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{u_n} < 1$, то согласно радикальному признаку Коши ряд сходится.

Пример. Исследуем на сходимость ряд $\sum_{n=1}^{\infty} 5^n \left(\frac{n}{n+1} \right)^{n^2}$.

Найдем предел радикала $\sqrt[n]{5^n \left(\frac{n}{n+1} \right)^{n^2}}$:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{u_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{5^n \left(\frac{n}{n+1} \right)^{n^2}} = 5 \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{n}{n+1} \right)^n = \frac{5}{\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{n+1}{n} \right)^n} = \frac{5}{\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n} \right)^n}.$$

Для вычисления $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n} \right)^n$ применим второй замечательный предел:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{u_n} = \frac{5}{\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n} \right)^n} = \frac{5}{e} \approx \frac{5}{1,718281828...}.$$

Поскольку $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{u_n} > 1$, то согласно радикальному признаку Коши ряд расходится.

13.2.5. Интегральный признак Коши

Теорема 13.6. (интегральный признак Коши). Если члены знакоположительного ряда $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$ могут быть представлены как числовые значения некоторой непрерывной монотонно убывающей на промежутке $[1; +\infty)$ функции $f(x)$ так, что $u_1 = f(1)$, $u_2 = f(2)$, ..., $u_n = f(n)$, ..., тогда:

- 1) если $\int_1^{+\infty} f(x)dx$ сходится, то сходится и ряд $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$;
- 2) если $\int_1^{+\infty} f(x)dx$ расходится, то расходится и ряд $\sum_{n=1}^{\infty} u_n$.

Пример. Исследуем сходимость ряда $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3}$.

Определим значение несобственного интеграла $\int_1^{\infty} \frac{dx}{x^3}$:

$$\int_1^{\infty} f(x)dx = \int_1^{\infty} \frac{dx}{x^3} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{x^{-3+1}}{-3+1} \Big|_1^t = \lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{-2t^2} - \frac{1}{-2} \right) = \frac{1}{2}.$$

Несобственный интеграл $\int_1^{\infty} \frac{dx}{x^3}$ сходится, значит и числовой ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3}$

также сходится.

Пример. Исследуем ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{n+1}}$ на сходимость.

Рассмотрим несобственный интеграл: $\int_1^{\infty} \frac{dx}{\sqrt{x+1}}$:

$$\int_1^{\infty} f(x)dx = \int_1^{\infty} \frac{dx}{\sqrt{x+1}} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{(x+1)^{-\frac{1}{2}+1}}{-\frac{1}{2}+1} \Big|_1^t = 2 \lim_{t \rightarrow \infty} \sqrt{t+1} = \infty.$$

Так как несобственный интеграл $\int_1^{\infty} \frac{dx}{\sqrt{x+1}}$ расходится, то и числовой ряд

$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{n+1}}$ также будет сходиться.

Пример. Исследуем на сходимость ряд $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{(2n+5) \cdot \ln^3(2n+5)}$.

Воспользуемся интегральным признаком Коши:

$$\begin{aligned} \int_2^{+\infty} \frac{dx}{(2x+5) \cdot \ln^3(2x+5)} &= \frac{1}{2} \int_2^{+\infty} \ln^{-3}(2x+5) \cdot d(\ln(2x+5)) = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\ln^{-2}(2x+5)}{-2} \Big|_2^{+\infty} = -\frac{1}{4} \cdot \frac{1}{\ln^2(2x+5)} \Big|_2^{+\infty} = -\frac{1}{4} \left(0 - \frac{1}{\ln^2 9} \right) = \frac{1}{4 \ln^2 9} \end{aligned}$$

Значит, ряд $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{(2n+5) \cdot \ln^3(2n+5)}$ также сходится.

13.3. Знакопередающие и знакопеременные ряды

13.3.1. Знакопередающие ряды. Признак Лейбница

Под *знакопередающим рядом* понимается ряд, в котором члены попеременно то положительны, то отрицательны:

$$u_1 - u_2 + u_3 - u_4 + \dots + (-1)^{n+1} u_n + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} u_n, \quad \text{где } u_n > 0.$$

Для знакопередающихся рядов имеет место *достаточный признак сходимости*, установленный в 1714 г. Готфридом Лейбницем.

Теорема 13.7. (признак Лейбница). Если члены знакопередающегося ряда

$\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} u_n$ убывают по абсолютной величине $u_1 > u_2 > u_3 > u_4 > \dots > u_n > \dots$ и

предел его общего члена при $n \rightarrow \infty$ равен нулю, то есть $\lim_{n \rightarrow \infty} u_n = 0$, то ряд сходится, а его сумма не превосходит первого члена:

$$S < u_1.$$

Пример. Рассмотрим знакочередующийся ряд $1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{9} - \frac{1}{16} + \frac{1}{25} - \frac{1}{36} + \dots$

Члены знакочередующегося ряда убывают по абсолютной величине:

$$1 > \frac{1}{2} > \frac{1}{9} > \frac{1}{16} > \frac{1}{25} > \frac{1}{36} > \dots > \frac{1}{n^2} > \dots$$

Общий член данного ряда можно представить в виде $u_n = \frac{(-1)^{n+1}}{n^2}$.

Предел общего члена $\lim_{n \rightarrow \infty} u_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^2} = 0$, следовательно, согласно

признаку Лейбница знакочередующийся ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2}$ сходится.

13.3.2. Знакопеременные ряды

Числовой ряд, содержащий бесконечное множество положительных и бесконечное множество отрицательных членов, называется *знакопеременным*.

Теорема 13.8. (достаточный признак сходимости знакопеременного ряда). Пусть дан знакопеременный ряд $u_1 + u_2 + u_3 + u_4 + \dots + u_n + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} u_n$.

Тогда, если сходится ряд $|u_1| + |u_2| + |u_3| + |u_4| + \dots + |u_n| + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} |u_n|$, составленный из модулей членов ряда, то сходится и сам знакопеременный ряд.

Знакопеременный ряд называется *абсолютно сходящимся*, если сходится как сам ряд, так и ряд, составленный из модулей его членов.

Пример. Ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2}$ абсолютно сходится, поскольку, как мы уже

выяснили ранее, сходится сам ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2}$, а также сходится ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left| \frac{(-1)^{n+1}}{n^2} \right| = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2}, \text{ являющийся обобщенным гармоническим рядом с}$$

показателем $\alpha = 2$, большим единицы.

Знакопеременный ряд называют *условно сходящимся*, если сам он сходится, а ряд, составленный из модулей его членов, расходится.

Пример. Ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n}$ сходится условно, поскольку согласно признаку

Лейбница сам ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n}$ сходится, однако, обобщенный гармонический ряд

$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^{\alpha}}$, с параметром $\alpha = 1$, расходится.

13.3.3. Свойства абсолютно сходящихся рядов

Абсолютно сходящиеся ряды имеют большое прикладное значение не только в математическом анализе, но и в прикладных задачах в разделах теории вероятностей, математической статистики, теоретической механики, физике, теории информации, программных методах защиты информации. Рассмотрим основные свойства абсолютно сходящихся рядов.

1. (*Теорема Дирихле*). Если ряд абсолютно сходится и имеет сумму S , то ряд, полученный из него перестановкой членов, также сходится и имеет ту же сумму S , что и исходный ряд.

2. Абсолютно сходящиеся ряды с суммами S_1 и S_2 можно почленно складывать (вычитать). В результате получается абсолютно сходящийся ряд, сумма (разность) которого равна $S_1 + S_2$ ($S_1 - S_2$).

Под *произведением* двух рядов $\sum_{n=1}^{\infty} u_n = u_1 + u_2 + u_3 + u_4 + \dots + u_n + \dots$ и

$\sum_{n=1}^{\infty} v_n = v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + \dots + v_n + \dots$ понимают ряд вида:

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} u_n \cdot \sum_{n=1}^{\infty} v_n = & (u_1 v_1) + (u_1 v_2 + u_2 v_1) + (u_1 v_3 + u_2 v_2 + u_3 v_1) + \dots + \\ & + (u_1 v_n + u_2 v_{n-1} + u_3 v_{n-2} + \dots + u_{n-2} v_3 + u_{n-1} v_2 + u_n v_1) + \dots \end{aligned}$$

3. Произведение двух абсолютно сходящихся рядов с суммами S_1 и S_2 есть абсолютно сходящийся ряд, сумма которого равна $S_1 \cdot S_2$.

Таким образом, абсолютно сходящиеся ряды суммируются, вычитаются и перемножаются, а суммы таких рядов *не зависят от порядка записи членов*.

В случае условно сходящихся рядов данные свойства не выполняются. Более того, путем перестановки членов условно сходящегося ряда можно получить сходящийся ряд с заранее заданной суммой или расходящийся ряд (*теорема Римана*). Таким образом, действия над рядами нельзя производить, не убедившись в их абсолютной сходимости.

13.4. Понятие функционального ряда

13.4.1. Определение функционального ряда

Ряд, члены которого являются функциями от некоторого аргумента x , называется *функциональным*:

$$\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x) = u_1(x) + u_2(x) + \dots + u_n(x) + \dots$$

Пример. Рассмотрим ряды:

$$\sum_{n=1}^{\infty} x^n = x + x^2 + x^3 + x^4 + \dots + x^n + \dots ;$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin nx}{n+1} = \frac{\sin x}{2} + \frac{\sin 2x}{3} + \frac{\sin 3x}{4} + \frac{\sin 4x}{5} + \dots + \frac{\sin nx}{n+1} + \dots ;$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n!}{3nx^{2n}} = \frac{1}{3x^2} + \frac{2}{6x^4} + \frac{6}{9x^6} + \frac{24}{12x^8} + \dots + \frac{n!}{3nx^{2n}} + \dots ;$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n!}{(x-n)^2} = \frac{1}{(x-1)^2} + \frac{2}{(x-2)^2} + \frac{6}{(x-3)^2} + \frac{24}{(x-4)^2} + \dots + \frac{n!}{(x-n)^2} + \dots ;$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^n (x+2)^n}{n^2} = 2(x+2) + (x+2)^2 + \frac{8(x+2)^3}{9} + \frac{16(x+2)^4}{16} + \dots + \frac{2^n (x+2)^n}{n^2} + \dots$$

В каждом из представленных примеров члены ряда представляют собой

функции от аргумента x ; x^n , $\frac{\sin nx}{n+1}$, $\frac{n!}{3nx^{2n}}$, $\frac{n!}{(x-n)^2}$, $\frac{2^n (x+2)^n}{n^2}$.

13.4.2. Сходимость функционального ряда

Придавая аргументу x определенное числовое значение x_0 , получим числовой ряд:

$$\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x_0) = u_1(x_0) + u_2(x_0) + \dots + u_n(x_0) + \dots$$

Полученный ряд $\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x_0)$, в зависимости от взятого значения x_0 может быть как сходящимся, так и расходящимся.

Если числовой ряд $\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x_0)$ сходится, то точка x_0 называется *точкой сходимости* функционального ряда, если же ряд расходится, то *точкой расходимости* функционального ряда.

Если полученный числовой ряд сходится, то точка x_0 называется *точкой сходимости* функционального ряда; если же ряд расходится – *точкой расходимости* функционального ряда.

Пример. Рассмотрим числовой ряд:

$$\sum_{n=1}^{\infty} x^n = x + x^2 + x^3 + x^4 + \dots + x^n + \dots$$

Точка $x_1 = 0,1$ является точкой сходимости ряда $\sum_{n=1}^{\infty} x^n$, поскольку ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} 0,1^n = 0,1 + 0,01 + 0,001 + 0,0001 + \dots + 0,1^n + \dots \text{ является сходящимся.}$$

Точка $x_2 = 2$ является точкой расходимости ряда $\sum_{n=1}^{\infty} x^n$, так как ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} 2^n = 2 + 2^2 + 2^3 + 2^4 + \dots + 2^n + \dots \text{ расходится.}$$

Совокупность числовых значений аргумента x , при которых функциональный ряд $\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x)$ сходится, называется его *областью сходимости*.

В области сходимости функционального ряда $\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x)$ его сумма является некоторой функцией от x : $S = S(x)$. Определяется она в области сходимости равенством:

$$S(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n(x),$$

где $S_n(x) = u_1(x) + u_2(x) + \dots + u_n(x)$ – частичная сумма ряда $\sum_{n=1}^{\infty} u_n(x)$.

Пример. Рассмотрим функциональный ряд:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^x} = 1 + \frac{1}{2^x} + \frac{1}{3^x} + \frac{1}{4^x} + \dots + \frac{1}{n^x} + \dots$$

Обобщенный гармонический ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^x}$ сходится при $x > 1$, следовательно, областью сходимости нашего ряда будет интервал $(1; +\infty)$;

Обобщенный гармонический ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^x}$ расходится при $x \leq 1$, значит, областью расходимости данного ряда будет интервал $(-\infty; 1]$.

13.4.3. Определение степенного ряда

Среди функциональных рядов в математике и ее приложениях особое место занимают ряды, членами которых являются степенные функции аргумента x .

Степенным рядом называется ряд вида:

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots + a_n x^n + \dots$$

Действительные (или комплексные) числа $a_0, a_1, a_2, a_3, \dots, a_n, \dots$ называются *коэффициентами ряда*. Степенной ряд расположен по степеням переменной x .

Рассматривают также степенной ряд, расположенный по степеням $(x - x_0)$, то есть ряд вида:

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n (x - x_0)^n = a_0 + a_1 (x - x_0) + a_2 (x - x_0)^2 + a_3 (x - x_0)^3 + \dots + a_n (x - x_0)^n + \dots$$

где x_0 – некоторое постоянное число.

Пример. Рассмотрим степенной ряд:

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n (x - 3)^n = 4 - 6(x - 3) + 8(x - 3)^2 - 10(x - 3)^3 + \dots + a_n (x - 3)^n + \dots$$

Полагая $z = x - 3$, приведем его к виду:

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n (z)^n = 4 - 6z + 8z^2 - 10z^3 + \dots + a_n z^n + \dots$$

13.5. Сходимость степенных рядов

13.5.1. Теорема Абеля

Область сходимости степенного ряда устанавливается с помощью *теоремы Абеля*.

Теорема 13.9. (Абеля). Если степенной ряд $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ сходится при $x = x_0 \neq 0$, то он абсолютно сходится при всех значениях x , удовлетворяющих неравенству $|x| < |x_0|$.

Пример. Рассмотрим степенной ряд $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n^2}$. При $x = \frac{1}{2}$ ряд примет вид

$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2^n n^2}$. Определим сходимость полученного числового ряда, используя признак Даламбера:

$$\begin{aligned}\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{2^{n+1}(n+1)^2}}{\frac{1}{2^n n^2}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2^n n^2}{2^{n+1}(n+1)^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2^n n^2}{2 \cdot 2^n (n+1)^2} = \\ &= \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^2}{n^2 + 2n + 1} = \left[\frac{\infty}{\infty} \right] = \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n^2)'}{(n^2 + 2n + 1)'} = \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2n}{2n + 2} = \left[\frac{\infty}{\infty} \right] = \\ &= \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(2n)'}{(2n + 2)'} = \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2}{2} = \frac{1}{2} < 1.\end{aligned}$$

Ввиду того, что $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} < 1$, ряд $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2^n n^2}$ сходится, следовательно, будет

абсолютно сходиться и ряд $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n^2}$ при всех значениях $|x| < \frac{1}{2}$.

Следствие. Если ряд $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ расходится при $x = x_0 \neq 0$, то он расходится

и при всех x , удовлетворяющих неравенству $|x| > |x_0|$.

Пример. Снова рассмотрим степенной ряд $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n^2}$. При $x = 3$ ряд примет

вид $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{3^n}{n^2}$. Определим сходимость полученного числового ряда, используя

признак Даламбера:

$$\begin{aligned}\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{3^{n+1}}{(n+1)^2}}{\frac{3^n}{n^2}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3^{n+1} n^2}{3^n (n+1)^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3 \cdot 3^n n^2}{3^n (n+1)^2} = \\ &= 3 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^2}{n^2 + 2n + 1} = \left[\frac{\infty}{\infty} \right] = 3 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n^2)'}{(n^2 + 2n + 1)'} = 3 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2n}{2n + 2} = \left[\frac{\infty}{\infty} \right] = \\ &= 3 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(2n)'}{(2n + 2)'} = 3 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2}{2} = 3 > 1.\end{aligned}$$

Так как $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} > 1$, ряд $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{3^n}{n^2}$ расходится, следовательно, будет расходиться и ряд $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n^2}$ при всех значениях $|x| > 3$.

13.5.2. Интервал и радиус сходимости степенного ряда

Из теоремы Абеля следует, что если $x_0 \neq 0$ является точкой сходимости степенного ряда $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$, то интервал $(-x_0; x_0)$ весь будет состоять из точек сходимости данного ряда, а при всех значениях x вне этого интервала ряд $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ расходится (рис. 13.1).

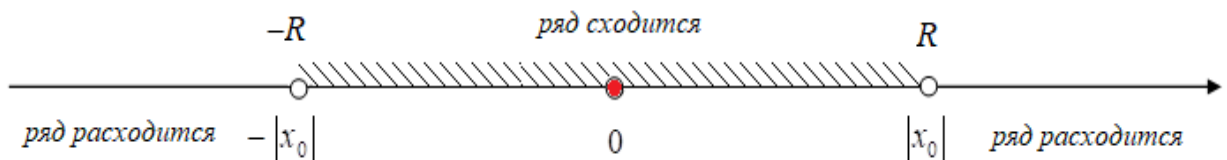


Рис. 13.1. Сходимость степенного ряда.

Интервал $(-|x_0|; |x_0|)$ называют *интервалом сходимости* степенного ряда.

Положив $|x_0| = R$, интервал сходимости можно записать в виде $(-R; R)$.

Число R называют *радиусом сходимости* степенного ряда $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$, то есть

$R > 0$ – это такое число, что при всех x , для которых $|x_0| < R$, ряд абсолютно сходится, а при $|x_0| > R$ ряд расходится.

В частности, если степенной ряд сходится лишь в одной точке $x_0 = 0$, что считают, что $R = 0$. Если же степенной ряд сходится при всех значениях $x \in R$, то считают, что $R = \infty$.

На концах интервала сходимости ($x = -R$ и $x = R$) сходимость ряда проверяется в каждом случае отдельно.

Для степенного ряда радиус абсолютной сходимости можно определить с помощью формулы Даламбера

$$R = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_n}{a_{n+1}} \right|,$$

либо воспользовавшись радикальной формулой Коши

$$R = \frac{1}{\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|}}.$$

Замечание 1. Если $R = \infty$, то степенной ряд $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ абсолютно сходится на всей числовой оси, а если $R = 0$, то ряд всюду расходящийся.

Замечание 2. Интервал сходимости степенного ряда $\sum_{n=0}^{\infty} a_n (x - x_0)^n$ находят из неравенства $|x - x_0| < R$, он имеет вид $(x_0 - R; x_0 + R)$.

Замечание 3. Если степенной ряд содержит не все степени x , то есть задан неполный степенной ряд, то интервал сходимости ряда находят без определения радиуса сходимости, непосредственно применяя признаки *Даламбера* или *Коши* для ряда, составленного из членов данного ряда.

Пример. Найдем область сходимости степенного ряда $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$.

Радиус сходимости степенного ряда $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$ будем находить с помощью признака *Даламбера*:

$$R = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_n}{a_{n+1}} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{\frac{1}{n!}}{\frac{1}{(n+1)!}} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{(n+1)!}{n!} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} (n+1) = \infty.$$

Так как радиус сходимости $R = \infty$, то исследуемый ряд $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$ абсолютно сходится на всей числовой оси.

Пример. Найдем область сходимости степенного ряда $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{3^n x^n}{(2n+1)^4 \sqrt{5^n}}$.

Найдем радиус сходимости ряда:

$$\begin{aligned} R &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_n}{a_{n+1}} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{3^n}{(2n+1)^4 \sqrt{5^n}} : \frac{3^{n+1}}{(2(n+1)+1)^4 \sqrt{5^{n+1}}} \right| = \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{3^n}{(2n+1)^4 \sqrt{5^n}} \cdot \frac{(2(n+1)+1)^4 \sqrt{5^{n+1}}}{3^{n+1}} \right| = \frac{\sqrt{5}}{3} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(2n+3)^4}{(2n+1)^4} = \frac{\sqrt{5}}{3}. \end{aligned}$$

Тогда интервал сходимости ряда будет равен $\left(-\frac{\sqrt{5}}{3}; \frac{\sqrt{5}}{3} \right)$.

Выясним поведение ряда на концах интервала сходимости. При $x = -\frac{\sqrt{5}}{3}$

степенной ряд примет вид:

$$1 - \frac{1}{3^4} + \frac{1}{5^4} - \dots + \frac{(-1)^n}{(2n+1)^4} + \dots$$

Предел общего члена $\lim_{n \rightarrow \infty} u_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{(2n+1)^4} = 0$, тогда согласно признаку

Лейбница знакочередующийся ряд $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^4}$ сходится.

При $x = \frac{\sqrt{5}}{3}$ получим ряд:

$$1 + \frac{1}{3^4} + \frac{1}{5^4} + \dots + \frac{1}{(2n+1)^4} + \dots$$

Данный ряд представляет собой обобщенный гармонический ряд с параметром $\alpha = 4$. Так как $\alpha = 4 > 1$ то этот ряд также сходится.

Таким образом, область сходимости данного ряда: $\left[-\frac{\sqrt{5}}{3}; \frac{\sqrt{5}}{3} \right]$.

Пример. Найти область сходимости ряда $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(x+2)^n}{n \cdot 2^{n-1}}$.

Найдем радиус сходимости степенного ряда воспользовавшись формулой Даламбера:

$$R = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_n}{a_{n+1}} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{1}{n \cdot 2^{n-1}} : \frac{1}{(n+1) \cdot 2^n} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n+1) \cdot 2^n}{n \cdot 2^{n-1}} = 2 \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{(n+1)}{n} \right| = 2.$$

Таким образом, ряд $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(x+2)^n}{n \cdot 2^{n-1}}$ сходится при $-2 < x+2 < 2$, а следовательно интервал сходимости данного ряда будет равен $(-4; 0)$.

Рассмотрим сходимость степенного ряда на концах интервала сходимости.

При $x = -4$ получим ряд

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

который сходится по признаку Лейбница.

При $x = 0$ получим расходящийся гармонический ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2)^n}{n \cdot 2^{n-1}} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}.$$

Таким образом, областью сходимости данного ряда является полуинтервал $[-4; 0)$.

13.6. Разложение функций в степенные ряды

Для исследования сложных функций важно уметь данную функцию $f(x)$ разлагать в степенной ряд, то есть представлять ее в виде суммы степенного ряда.

13.6.1. Ряд Тейлора

Известно, что для любой функции $f(x)$, определенной в окрестности точки x_0 и имеющей в ней производные до $n+1$ порядка включительно, справедлива *формула Тейлора*:

$$f(x) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}(x-x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x-x_0)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}(x-x_0)^n + R_n(x)$$

, где $R_n(x) = \frac{f'(c)}{(n+1)!}(x-x_0)^{n+1}$, $c \in (x_0; x)$ – остаточный член в Форма

Лагранжа.

Если функция $f(x)$ имеет производные любых порядков в окрестности точки x_0 и остаточный член $R_n(x)$ стремится к нулю при $n \rightarrow \infty$, то из формулы Тейлора получается разложение функции $f(x)$ по степеням $(x-x_0)$, называемое *рядом Тейлора*:

$$f(x) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}(x-x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x-x_0)^2 + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}(x-x_0)^n$$

Ряд Тейлора можно формально построить для любой бесконечно дифференцируемой функции в окрестности точки x_0 . Но отсюда еще не следует, что он будет сходиться к данной функции $f(x)$. Он может оказаться расходящимся или сходиться к другой функции.

Пусть для функции $f(x)$ составлен ряд Тейлора.

Теорема 13.10. Для того, чтобы ряд Тейлора функции $f(x)$ сходиллся в точке x , необходимо и достаточно, чтобы в этой точке остаточный член формулы Тейлора стремился к нулю при $n \rightarrow \infty$:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} R_n(x) = 0.$$

Таким образом, задача разложения функции $f(x)$ в степенной ряд сведена по существу к определению значений x , при которых $R_n(x) \rightarrow 0$ (при $n \rightarrow \infty$). Если сделать это сложно, то следует каким-либо иным способом убедиться, что данный ряд Тейлора сходится к данной функции.

На практике часто пользуются следующей теоремой, которая дает простое достаточное условие разложимости функции в ряд Тейлора.

Теорема 13.11. Если модули всех производных функций $f(x)$ ограничены в окрестности точки x_0 одним и тем же числом $M > 0$, то для любого x из этой окрестности ряд Тейлора функции $f(x)$ сходится к функции $f(x)$.

13.6.2. Разложение функции в ряд Маклорена

Если в ряде Тейлора положить $x_0 = 0$, то получим разложение функции $f(x)$ по степеням x в ряд Маклорена:

$$f(x) = f(0) + \frac{f'(0)}{1!}x + \frac{f''(0)}{2!}x^2 + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(0)}{n!}x^n.$$

Рассмотрим алгоритм разложения функции в ряд Маклорена.

1. Найдем производные функции $f(x)$ до n -того порядка включительно.
2. Вычислим значения производных в точке $x_0=0$.
3. Запишем ряд Маклорена для заданной функции и найдем его интервал сходимости.

4. Найдем интервал $(-R; R)$ сходимости полученного ряда Маклорена.

Если такой интервал $(-R; R)$ существует, то в нем функция $f(x)$ и сумма ряда Маклорена совпадают.

Замечание. В интервале сходимости степенного ряда остаточный член стремится к нулю при $n \rightarrow \infty$.

Пример. Разложим в ряд Маклорена функцию e^x .

1. Все производные исследуемой функции до n -того порядка включительно равны e^x :

$$(e^x)' = e^x, (e^x)'' = e^x, (e^x)''' = e^x, \dots, (e^x)^{(n)} = e^x.$$

2. Значения всех производных в точке $x_0 = 0$ равны $e^0 = 1$.

3. Запишем ряд Маклорена для заданной функции

$$e^x = e^0 + \frac{e^0}{1!}x + \frac{e^0}{2!}x^2 + \frac{e^0}{3!}x^3 + \dots + \frac{e^0}{n!}x^n + \dots = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots + \frac{x^n}{n!} + \dots$$

4. Найдем интервал сходимости полученного ряда.

Радиус сходимости степенного ряда $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$ будем находить с помощью признака Даламбера:

$$R = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_n}{a_{n+1}} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{\frac{1}{n!}}{\frac{1}{(n+1)!}} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{(n+1)!}{n!} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} (n+1) = \infty.$$

Так как радиус сходимости $R = \infty$, то исследуемый ряд $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$ абсолютно сходится на всей числовой оси.

Таким образом, $e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots + \frac{x^n}{n!} + \dots$, $x \in (-\infty; +\infty)$.

Пример. Разложим в ряд Маклорена функцию $\sin x$.

1. Определим производные исследуемой функции до n -го порядка включительно:

$$(\sin x)' = \cos(x), (\sin x)'' = -\sin(x), (\sin x)''' = -\cos(x), (\sin x)^{(4)} = \sin(x) \dots$$

2. Значения производных в точке $x_0 = 0$ равны:

$$f'(0) = \cos(0) = 1, f''(0) = -\sin(0) = 0, f'''(0) = -\cos(0) = -1, f^{(4)}(x) = \sin(0) = 0 \\ , \dots, f^{(2n)}(x) = 0, f^{(2n+1)}(x) = (-1)^n.$$

3. Запишем ряд Маклорена для заданной функции

$$\sin x = \sin(0) + \frac{\sin'(0)}{1!}x + \frac{\sin''(0)}{2!}x^2 + \frac{\sin'''(0)}{3!}x^3 + \frac{\sin^{(4)}(0)}{4!}x^4 + \\ + \frac{\sin^{(5)}(0)}{5!}x^5 + \dots + \frac{\sin^{(2n)}(0)}{(2n)!}x^{2n} + \frac{\sin^{(2n+1)}(0)}{(2n+1)!}x^{2n+1} + \dots$$

Подставляя значения вычисленных ранее производных, получим:

$$\sin x = 0 + \frac{1}{1!}x + \frac{0}{2!}x^2 - \frac{1}{3!}x^3 + \frac{0}{4!}x^4 + \frac{1}{5!}x^5 + \dots + \frac{0}{(2n)!}x^{2n} + \frac{(-1)^n}{(2n+1)!}x^{2n+1} + \dots + \\ = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots + (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} + \dots$$

4. Ряд $\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!}$ абсолютно сходится на всей числовой оси,

поскольку согласно признаку Даламбера радиус сходимости равен бесконечности:

$$R = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_n}{a_{n+1}} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{\frac{1}{(2n+1)!}}{\frac{1}{(2n+2)!}} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{(2n+2)!}{(2n+1)!} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} (2n+2) = \infty.$$

Таким образом,

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots + (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} + \dots, \quad x \in (-\infty; +\infty).$$

Пример. Разложим в ряд Маклорена функцию $\frac{1}{1-x}$.

1. Определить производные функции $y = \frac{1}{1-x}$ до n -го порядка

включительно достаточно просто:

$$\left(\frac{1}{1-x} \right)' = \frac{1}{(1-x)^2}, \quad \left(\frac{1}{1-x} \right)'' = \frac{1 \cdot 2}{(1-x)^3} = \frac{2!}{(1-x)^3}, \quad \left(\frac{1}{1-x} \right)^{(3)} = \frac{2! \cdot 3}{(1-x)^4} = \frac{3!}{(1-x)^4},$$

$$\left(\frac{1}{1-x} \right)^{(4)} = \frac{3! \cdot 4}{(1-x)^5} = \frac{4!}{(1-x)^5}, \dots, \quad \left(\frac{1}{1-x} \right)^{(n)} = \frac{(n-1)! \cdot n}{(1-x)^{n+1}} = \frac{n!}{(1-x)^{n+1}}.$$

2. Значения функции и ее производных в точке $x_0 = 0$ будут соответственно равны:

$$f(0) = 1, \quad f'(0) = 1, \quad f''(0) = 2!, \quad f'''(0) = 3!, \quad f^{(4)}(0) = 4!, \quad \dots, \quad f^{(n)}(0) = n!.$$

3. Запишем ряд Маклорена для заданной функции

$$\left(\frac{1}{1-x} \right) = 1 + \frac{1}{1!}x + \frac{2!}{2!}x^2 + \frac{3!}{3!}x^3 + \frac{4!}{4!}x^4 + \dots + \frac{n!}{n!}x^n + \dots$$

Сокращая каждое слагаемое окончательно получим:

$$\left(\frac{1}{1-x} \right) = 1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + \dots + x^n + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} x^n.$$

4. Найдем интервал сходимости полученного ряда.

Радиус сходимости степенного ряда $\sum_{n=0}^{\infty} x^n$ будем находить с помощью

признака Даламбера:

$$R = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{a_n}{a_{n+1}} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \left| \frac{1}{1} \right| = 1.$$

Рассмотрим сходимость степенного ряда на концах интервала сходимости.

При $x = -1$ получим знакочередующийся ряд

$$\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n = 1 - 1 + 1 - 1 + 1 - 1 + \dots, \text{ сумма которого вообще не существует.}$$

А при $x = 1$ получим расходящийся знакопостоянный ряд

$$\sum_{n=0}^{\infty} 1^n = 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + \dots.$$

$$\text{Таким образом, } \left(\frac{1}{1-x} \right) = 1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + \dots + x^n + \dots, x \in (-1; 1).$$

Предложим формулы разложения в ряд Маклорена некоторых элементарных функций, среди которых будут и рассмотренные нами ранее:

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \dots + \frac{x^n}{n!} + \dots, x \in (-\infty; +\infty),$$

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots + (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} + \dots, x \in (-\infty; +\infty),$$

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \dots + (-1)^n \frac{x^{2n}}{(2n)!} + \dots, x \in (-\infty; +\infty),$$

$$(1+x)^a = 1 + \frac{a}{1!}x + \frac{a(a-1)}{2!}x^2 + \dots + \frac{a(a-1)\dots(a-n+1)}{n!}x^n + \dots, x \in \begin{cases} [-1; 1], & a \geq 0, \\ (-1; 1], & -1 < a < 0, \\ (-1; 1), & a \leq -1. \end{cases}$$

$$\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + \dots + x^n + \dots, x \in (-1; 1),$$

$$\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \dots + (-1)^n \frac{x^{n+1}}{n+1} + \dots, x \in (-1; 1],$$

$$\operatorname{arctg} x = x - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} - \dots + (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{2n+1} + \dots, x \in [-1; 1],$$

$$\arcsin x = x + \frac{1}{2} \cdot \frac{x^3}{3} + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} \cdot \frac{x^5}{5} + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6} \cdot \frac{x^7}{7} + \dots + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \dots (2n-1)}{2 \cdot 4 \cdot 6 \dots (2n)} \cdot \frac{x^{2n+1}}{2n+1} + \dots, x \in [-1; 1].$$

13.6.3. Нахождение приближенных значений функций

С помощью ряда Маклорена можно находить приближенные значения функций.

Пример. Найдем приближенное значение числа e .

Для вычисления приближенного значения числа e будем использовать уже известное нам разложение в ряд Маклорена:

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots + \frac{x^n}{n!} + \dots, \quad x \in (-\infty; +\infty).$$

В нашем случае $x=1$, а от величины n будет зависеть точность рассчитанного приближения. В случае $n=8$ имеем:

$$e \approx 1 + \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} + \frac{1}{4!} + \frac{1}{5!} + \frac{1}{6!} + \frac{1}{7!} + \frac{1}{8!} \approx 2,71827876.$$

А если взять $n=12$, то получим более точное значение:

$$e \approx 1 + \frac{1}{1!} + \frac{1}{2!} + \frac{1}{3!} + \frac{1}{4!} + \frac{1}{5!} + \frac{1}{6!} + \frac{1}{7!} + \frac{1}{8!} + \frac{1}{9!} + \frac{1}{10!} + \frac{1}{11!} + \frac{1}{12!} \approx 2,718281828.$$

Как мы видим, точность полученного результата увеличивается с ростом n . Абсолютная погрешность этого приближения равна модулю остатка ряда.

Пример. Найдем приближенное значение $\sin 2$.

Воспользуемся разложением по формуле Маклорена:

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots + (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} + \dots, \quad x \in (-\infty; +\infty).$$

Тогда для $x=2$, а $n=7$ значение функции $\sin x$ приближенно будет равно:

$$\sin 2 \approx \frac{2}{1!} - \frac{2^3}{3!} + \frac{2^5}{5!} - \frac{2^7}{7!} + \frac{2^9}{9!} - \frac{2^{11}}{11!} + \frac{2^{13}}{13!} \approx 0,90929745$$

Для знакопеременных рядов обычно оценивается модулем первого отброшенного члена: $|R_n| \leq a_{n+1}$, однако на практике для любых рядов заранее установленную точность приближения ε можно получить, последовательно сравнивая частичные суммы ряда. Если разность модулей членов ряда $|a_n| - |a_{n+1}|$

по абсолютному значению не превышает ε , то для взятого n полученное приближение удовлетворяет установленной точности.

Вопросы для самоконтроля

1. Сформулируйте понятие числового ряда. Какие числовые ряды называют сходящимися?
2. Какие свойства сходящихся рядов вы знаете? Приведите примеры сходящегося и расходящегося рядов.
3. Сформулируйте необходимый признак сходимости и достаточное условие расходимости числовых рядов. На примере покажите принципы использования достаточного условия расходимости.
4. Каким образом осуществляется сравнение знакоположительных рядов?
5. Приведите пример использования признака сравнения двух числовых рядов? Как осуществляется данное сравнение?
6. Расскажите, каким образом сравниваются ряды с помощью предельного признака сравнения. Для всех ли рядов можно использовать данный признак?
7. Какие ряды считаются эталонными? Как с помощью эталонных рядов можно определять сходимость числовых рядов?
8. Сформулируйте признак Даламбера сходимости знакоположительных рядов. Приведите пример определения сходимости рядов с помощью признака Даламбера.
9. Сходимость какого вида рядов можно определить с помощью признака Даламбера?
10. Как осуществляется исследование на сходимость знакоположительного ряда с помощью радикального признака Коши? Приведите примеры.
11. Опишите алгоритм определения сходимости знакоположительного ряда с помощью интегрального признака Коши. Почему признак так называется?
12. Сформулируйте определение знакочередующегося ряда. Как для установления сходимости ряда используется достаточный признак сходимости Лейбница?

13. Сформулируйте определение знакопеременного ряда. Какой достаточный признак сходимости используется для знакопеременного ряда?
14. Какие знакопеременные ряды называются абсолютно сходящимися, а какие условно сходящимися? Приведите примеры.
15. Дайте определения функционального ряда. Приведите примеры функциональных рядов.
16. Что является областью сходимости функционального ряда? Приведите пример функционального ряда и его области сходимости.
17. Приведите пример степенного ряда. Каковы коэффициенты этого ряда?
18. С помощью какой теоремы устанавливается область сходимости степенного ряда? Приведите пример определения области сходимости.
19. Что такое интервал сходимости степенного ряда? Как определяется интервал сходимости степенного ряда?
20. Дайте определение радиусу сходимости степенного ряда. Приведите пример нахождения радиуса сходимости степенного ряда.
21. Может ли на концах интервала сходимости степенной ряд расходиться? Приведите пример.
22. Каким образом находится радиус абсолютной сходимости для степенного ряда?
23. Что такое ряд Тейлора? Для всех ли функций можно построить ряд Тейлора? Всегда ли ряд Тейлора будет сходиться к функции, для которой он был построен?
24. Опишите алгоритм разложения функции в ряд Маклорена. Приведите пример разложения функции в ряд Маклорена.
25. Каким образом с помощью ряда Маклорена можно находить приближенные значения функций?

Глава 14. Дифференциальные уравнения

Дифференциальные уравнения – это раздел математики, изучающий теорию и способы решения уравнений, содержащих искомую функцию и ее производные различных порядков одного аргумента (обыкновенные дифференциальные) или нескольких аргументов (дифференциальные уравнения в частных производных). Дифференциальные уравнения широко используются на практике, в частности для описания переходных процессов.

Первоначально дифференциальные уравнения возникли из задач механики, в которых требовалось определить координаты тел, их скорости и ускорения, рассматриваемые как функции времени при различных воздействиях. К дифференциальным уравнениям приводили также некоторые рассмотренные в то время геометрические задачи.

Основой теории дифференциальных уравнений стало дифференциальное исчисление, созданное Готфридом Лейбницем (1646 – 1716) и Исааком Ньютоном (1642 – 1727). Сам термин «дифференциальное уравнение» был предложен в 1676 году Г. Лейбницем.

Из огромного числа работ XVIII века по дифференциальным уравнениям выделяются работы Эйлера (1707 – 1783) и Лагранжа (1736 – 1813). В этих работах была прежде развита теория малых колебаний, а следовательно – теория линейных систем дифференциальных уравнений; попутно возникли основные понятия линейной алгебры (собственные числа и векторы в n -мерном случае). Вслед за Ньютоном Лаплас и Лагранж, а позже Гаусс (1777 – 1855) развивают также методы теории возмущений.

Когда была доказана неразрешимость алгебраических уравнений в радикалах, Жозеф Лиувиль (1809 – 1882) построил аналогичную теорию для дифференциальных уравнений, установив невозможность решения ряда уравнений (в частности таких классических, как линейные уравнения второго порядка) в элементарных функциях и квадратуре. Позже Софус Ли (1842 – 1899), анализируя вопрос об интегрировании уравнений в квадратурах, пришёл к необходимости подробно исследовать группы диффеоморфизмов (получившие

впоследствии имя групп Ли) – так по теории дифференциальных уравнений возникла одна из самых плодотворных областей современной математики, дальнейшее развитие которой было тесно связано совсем с другими вопросами (алгебры Ли ещё раньше рассматривали Симеон-Дени Пуассон (1781 – 1840) и, особенно, Карл Густав Якоб Якоби (1804 – 1851)).

Новый этап развития теории дифференциальных уравнений начинается с работ Анри Пуанкаре (1854 – 1912), созданная им «качественная теория дифференциальных уравнений» вместе с теорией функций комплексных переменных легла в основу современной топологии. Качественная теория дифференциальных уравнений, или, как теперь её чаще называют, теория динамических систем, сейчас активно развивается и имеет важные применения в естествознании.

14.1. Обыкновенные дифференциальные уравнения

14.1.1. Понятие дифференциального уравнения

При решении задач математики, физики химии и др. пользуются математическими моделями в виде уравнений, содержащих не только функцию и ее аргументы, но и различные производные этой функции.

Дифференциальным уравнением называется уравнение, которое связывает некоторую функцию, ее производные и независимые аргументы

$$F(x_1, \dots, x_n, y, y', y'', \dots, y^{(n)}) = 0.$$

Если функция, относительно которой составлено дифференциальное уравнение, зависит только от одной независимой переменной, то это уравнение называется *обыкновенным дифференциальным уравнением*.

Пример. Уравнение $y''' + 2y'' - y' + 4y = -xy^2 + ux^3 + 5x$ является обыкновенным дифференциальным уравнением.

Если искомая функция y зависит от нескольких независимых переменных $x_1, x_2, \dots, x_n$ и дифференциальное уравнение содержит частные производные по этим переменным, то это уравнение называется *дифференциальным уравнением с частными производными*.

Пример. Уравнение $\frac{z''_{xx} + 2z_y}{z''_{xy} - 1} = x^2 y$ является дифференциальным

уравнением с частными производными.

Порядком дифференциального уравнения называется наивысший порядок производной, входящей в это уравнение.

Пример. Уравнение $\sqrt[4]{y'x^3} + 12\frac{y'}{yx^2} = 7x^2y - 5x$ является

дифференциальным уравнением первого порядка.

Пример. Уравнение $5y'''x + 2y''x^2 - 4y'x^3 - 5x^4y^2 + x^3y^{12} + 5 = 0$ является дифференциальным уравнением третьего порядка.

Решением дифференциального уравнения называется функция $y = \varphi(x)$, которая при подстановке в уравнение превращает его в тождество.

Пример. Функция $y = 3x^2 - x$ является решением уравнения $xy' - 2y = x$.

Для проверки этого утверждения найдем производную функции $y(x)$:

$$y' = 6x - 1.$$

Подставим функцию и ее производную в заданное дифференциальное уравнение:

$$xy' - 2y = x(6x - 1) - 2(3x^2 - x) = 6x^2 - x - 6x^2 + 2x = x.$$

Если функция, удовлетворяющая дифференциальному уравнению, задана неявно, то говорят об *интеграле уравнения*.

Пример. Уравнение $x^2 + y^2 = 2y$ является решением уравнения

$$x^2y' - xy = yy'.$$

Решение дифференциального уравнения, содержащее столько независимых производных постоянных, каков порядок уравнения, называется *общим решением* этого уравнения.

Пример. Уравнение $(y - C)^2 = 2x$ является общим решением дифференциального уравнения первого порядка $y'^2 = 4y$.

Таким образом, функция вида $\varphi(y, x, C) = 0$ является общим решением для любого уравнения первого порядка.

Пример. Уравнение $C_1x + (y - C_2)^2 = 0$ является общим решением дифференциального уравнения второго порядка $y' + 2xy'' = 0$.

Тогда, функция $\varphi(y, x, C_1, C_2) = 0$ представляет собой общее решение для уравнения второго порядка.

Функции, получаемые из общего решения при различных числовых значениях произвольных постоянных называются *частным решением* этого дифференциального уравнения.

Пример. Частным решением уравнения $y' + 2xy'' = 0$ при $C_1 = 2$, а $C_2 = 1$ является выражение

$$2x + (y - 1)^2 = 0.$$

График решения называется *интегральной кривой уравнения*.

14.1.2. Типы задач получения частного решения

Различные *частные* решения получают с помощью дополнительных условий, которым должны удовлетворять искомые решения. При этом константы $C_1, C_2, \dots, C_n$ получают конкретные значения, определяемые дополнительными условиями.

В зависимости от способа задания дополнительных условий для получения частного решения дифференциального уравнения рассматривают три типа задач: *задача Коши, краевая задача и задача на собственные значения*.

Задача Коши

Если дополнительные условия задаются в одной точке, то такая задача называется *задачей Коши*. Дополнительные условия в задаче Коши называются *начальными условиями*, а точка $x = x_0$, в которой они задаются, – *начальной точкой*.

Для обыкновенного дифференциального уравнения начальные условия могут быть заданы следующим образом:

$$y(x_0) = y_0; \quad y'(x_0) = y_{1,0}; \quad \dots; \quad y^{(n-1)}(x_0) = y_{n-1,0}.$$

Краевая задача

Если дополнительные условия задаются более чем в одной точке, то есть при разных значениях независимой переменной, то такая задача называется *краевой*. Сами дополнительные условия называются при этом *граничными* или *краевыми условиями*.

На практике, обычно граничные условия задаются в двух точках, являющихся границами отрезка, на котором рассматривается решение дифференциального уравнения. Функции, получаемые из общего решения при различных числовых значениях произвольных постоянных называются *частным решением* этого дифференциального уравнения.

Задача на собственные значения

Задачи на собственные значения отличаются тем, что кроме искомым функций $y = f(x)$ и их производных в уравнения входят дополнительно m неизвестных параметров $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$, которые называются *собственными значениями*. При этом для нахождения единственного (частного) решения на интервале $[a; b]$ необходимо задать $n + m$ граничных условий.

Выводы: Если функция, относительно которой составлено дифференциальное уравнение, зависит только от одной независимой переменной, то это уравнение называется *обыкновенным дифференциальным уравнением*. *Порядком дифференциального уравнения* называется *наивысший порядок производной, входящей в это уравнение*. *Решением дифференциального уравнения* называется функция $y = \varphi(x)$, которая при подстановке в уравнение превращает его в тождество. В зависимости от способа задания дополнительных условий для получения частного решения дифференциального уравнения рассматривают три типа задач: *задача Коши, краевая задача и задача на собственные значения*.

14.2. Дифференциальные уравнения первого порядка

14.2.1. Основные понятия

Дифференциальным уравнением первого порядка называется уравнение, которое связывает некоторую функцию y , ее первую производную y' и независимый аргумент x :

$$F(x, y, y') = 0.$$

Пример. Дифференциальными уравнениями первого порядка являются уравнения:

$$y' + 2xy = x;$$

$$2y \frac{dx}{dy} + (y-1)^2 x = 0;$$

$$2y \sin x dx = y^2 \frac{dy}{(x+2)}.$$

Если дифференциальное уравнение первого порядка можно разрешить относительно y' , то его записывают в виде $y' = f(x; y)$ и называют *дифференциальным уравнением первого порядка, разрешенным относительно производной*.

Уравнение $y' = f(x; y)$ устанавливает зависимость между координатами точки (x, y) и угловым коэффициентом y' касательной к интегральной кривой, проходящей через эту точку. В этом заключается *геометрический смысл* ДУ первого порядка.

14.2.2. Задача Коши

Чтобы решение дифференциального уравнения приобрело конкретный смысл, его необходимо подчинить некоторым дополнительным условиям.

Пусть дано дифференциальное уравнение $y' = f(x; y)$. И пусть при $x = x_0$ функция $y = y(x_0) = y_0$.

Пару чисел $(x_0; y_0)$ называют начальными условиями, если $y(x_0) = y_0$.

Данные условия часто записывают в виде:

$$y|_{x=x_0} = y_0.$$

Задача отыскания решения ДУ первого порядка $y' = f(x; y)$, удовлетворяющего заданному начальному условию $y(x_0) = y_0$, называется *задачей Коши*.

Справедлива следующая теорема.

Теорема (существования и единственности решения задачи Коши). Если в уравнении $y' = f(x; y)$ функция $f(x; y)$ и ее частная производная $f'_y(x; y)$ непрерывны в некоторой области D , содержащей точки $(x_0; y_0)$, то существует единственное решение $y = \varphi(x)$ этого уравнения, удовлетворяющее начальному условию $y(x_0) = y_0$.

Геометрический смысл теоремы состоит в том, что при выполнении ее условий существует единственная интегральная кривая дифференциального уравнения, проходящая через точку $(x_0; y_0)$.

14.3. Дифференциальные уравнения с разделяющимися переменными

14.3.1. Уравнения с разделенными переменными

Наиболее простым дифференциальным уравнением первого порядка является уравнение вида:

$$P(x)dx + Q(y)dy = 0.$$

В этом уравнении первое слагаемое $P(x)dx$ зависит только от x , а второе $Q(y)dy$ – только от y . Такие дифференциальные уравнения называют *дифференциальными уравнениями с разделенными переменными*.

Для решения уравнения с разделенными переменными достаточно перенести в правую часть второе слагаемое

$$P(x)dx = -Q(y)dy,$$

а затем проинтегрировать полученное уравнение

$$\int P(x)dx = -\int Q(y)dy + C.$$

В результате мы получим общий интеграл дифференциального уравнения.

Пример. Решим дифференциальное уравнение: $x dx + y dy = 0$.

Данное уравнения является дифференциальным уравнением с разделенными переменными, решим его.

Перенесем слагаемое, содержащее x в правую часть равенства.

$$y dy = -x dx.$$

Проинтегрируем получившееся уравнение:

$$\int y dy = -\int x dx + C_1;$$

Получим,

$$\frac{y^2}{2} = -\frac{x^2}{2} + C_1.$$

Умножим уравнение на 2:

$$y^2 = -x^2 + 2C_1.$$

Введя обозначения $C = 2C_1$, окончательно получим:

$$y^2 = -x^2 + C.$$

Таким образом, решением дифференциального уравнения $x dx + y dy = 0$ является уравнение $y^2 = -x^2 + C$.

14.3.2. Дифференциальные уравнения с разделяющимися переменными

Более общий случай описывают уравнения с *разделяющимися переменными*:

$$P_1(x)dxQ_1(y)dy + P_2(x)dxQ_2(y)dy = 0.$$

Особенность такого уравнения состоит в том, что коэффициенты при dx и dy представляют собой произведения двух функций, одна из которых зависит только от x , другая – только от y .

Пример. Найдем общий интеграл дифференциального уравнения:

$$y' = \operatorname{tg} x \cdot \operatorname{tg} y.$$

Представим производную y' в виде $\frac{dy}{dx}$:

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} x \cdot \operatorname{tgy}.$$

Умножим обе части уравнения на dx :

$$dy = \operatorname{tg} x \cdot \operatorname{tgy} \cdot dx.$$

Разделим переменные:

$$\frac{dy}{\operatorname{tgy}} = \operatorname{tg} x dx \quad \text{или} \quad \operatorname{ctg} y dy = \operatorname{tg} x dx.$$

Проинтегрируем последнее уравнение:

$$\int \operatorname{ctg} y dy = \int \operatorname{tg} x dx.$$

Используя тригонометрические соотношения, получим:

$$\int \frac{\cos y}{\sin y} dy = \int \frac{\sin x}{\cos x} dx.$$

Внесем числители под знак дифференциала:

$$\int \frac{d(\sin y)}{\sin y} = - \int \frac{d(\cos x)}{\cos x}.$$

В результате получим:

$$\ln|\sin y| = -\ln|\cos x| + C.$$

Перенесем в левую часть $-\ln|\cos x|$ и получим:

$$\ln|\sin y| + \ln|\cos x| = C.$$

Откуда,

$$\sin y \cdot \cos x = C, \quad C \neq 0.$$

Пример. Решим дифференциальное уравнение: $\frac{dy}{dx} = y(y+2)$.

Для решения разделим переменные:

$$\frac{dy}{y(y+2)} = dx.$$

Проинтегрируем уравнение:

$$\int \frac{dy}{y(y+2)} = \int dx + C.$$

Найдем интеграл от дробно-рациональной функции в левой части равенства. Для этого разложим дробь:

$$\frac{1}{y(y+2)} = \frac{A}{y} + \frac{B}{y+2} = \frac{A(y+2) + By}{y(y+2)} = \frac{Ay + 2A + By}{y(y+2)}.$$

Получим систему уравнений и решим ее:

$$\begin{cases} A+B=0 \\ 2A=1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A=\frac{1}{2} \\ B=-\frac{1}{2} \end{cases}.$$

Тогда,

$$\int \frac{dy}{y(y+2)} = \frac{1}{2} \int \left(\frac{1}{y} - \frac{1}{y+2} \right) dx = \frac{1}{2} (\ln|y| - \ln|y+2|) + C.$$

Интеграл правой части равен

$$\int dx = x + C.$$

Приравняем полученные значения интегралов:

$$\frac{1}{2} (\ln|y| - \ln|y+2|) = x + C.$$

Тогда,

$$\ln \left| \frac{y}{y+2} \right| = 2x + 2C.$$

Проверим значения $y = -2$ и $y = 0$ и выпишем окончательное решение:

$$\ln \left| \frac{y}{y+2} \right| = 2x + C, \quad y = -2, \quad y = 0.$$

14.4. Однородные дифференциальные уравнения

14.4.1. Понятие однородного дифференциального уравнения

Дифференциальное уравнение первого порядка называется *однородным* (ОДУ), если оно может быть представлено в виде:

$$y' = g\left(\frac{x}{y}\right).$$

Пример. Дифференциальное уравнение $y' = \frac{y}{x} \cos\left(\ln \frac{y}{x}\right)$ является

однородным.

Понятие однородного дифференциального уравнения связано с однородными функциями.

Функция $y = f(x; y)$ называется *однородной степени k* , если для произвольного числа α выполняется равенство:

$$f(\alpha x; \alpha y) = \alpha^k f(x; y).$$

Пример. Определим, является ли функция $f(x; y) = x^2 - 2xy$ однородной?

Проверим однородность функции с помощью вышеприведенного определения:

$$f(\alpha x; \alpha y) = (\alpha x)^2 - 2\alpha x \alpha y.$$

Вынесем α^2 :

$$(\alpha x)^2 - 2\alpha x \alpha y = \alpha^2(x^2 - 2xy) = \alpha^2 f(x; y).$$

Следовательно, исследуемая функция $f(x; y) = x^2 - 2xy$ является однородной степени 2.

14.4.2. Решение однородного дифференциального уравнения

Однородное уравнение преобразуется в уравнение с разделяющимися переменными при помощи следующей замены:

$$u = \frac{y}{x}.$$

Докажем данное утверждение.

Преобразуем выражение $u = \frac{y}{x}$, выразив из него y :

$$y = ux,$$

Продифференцируем полученное уравнение:

$$y' = u'x + u.$$

Подставив это уравнение в дифференциальное однородное уравнение, получим:

$$u'x + u = g(u) \text{ или } \frac{du}{dx} x = g(u) - u.$$

Разделив последнее уравнение на du , получим дифференциальное уравнение с разделенными переменными:

$$\frac{x}{dx} = (g(u) - u) du.$$

Найдя общее решение данного уравнения, следует заменить в нем u на $\frac{y}{x}$, таким образом, получим общее решение исходного уравнения.

Однородное уравнение часто задается в дифференциальной форме:

$$P(x; y)dx + Q(x; y)dy = 0.$$

Данное дифференциальное уравнение будет однородным, если $P(x; y)$ и $Q(x; y)$ – однородные функции одинакового порядка.

Пример. Рассмотрим дифференциальное уравнение $xy' = xe^{\frac{y}{x}} + y$.

Для решения выполним замену:

$$u = \frac{y}{x}.$$

Выразим y :

$$y = ux.$$

Продифференцируем равенство:

$$y' = u'x + u.$$

Подставим в уравнение вместо y' правую часть полученного уравнения:

$$x(u'x + u) = xe^u + ux.$$

Раскроем скобки:

$$u'x^2 + ux = xe^u + ux.$$

Приведем подобные слагаемые:

$$\frac{du}{dx} x = e^u.$$

Разделим переменные:

$$e^{-u} du = \frac{dx}{x}.$$

Проинтегрировав обе части уравнения, можно получить решение.

Пример. Найдём общее решение ДУ: $x \cdot y' \cdot \sin\left(\frac{y}{x}\right) + x = y \cdot \sin\left(\frac{y}{x}\right)$.

Для решения дифференциального уравнения выполним следующие замены:

$$y = ux; \quad u = \frac{y}{x}; \quad y' = u'x + u.$$

В результате уравнение примет вид:

$$x \cdot (u'x + u) \cdot \sin u + x = ux \cdot \sin u$$

Раскроем скобки, приведем подобные слагаемые, а затем перенесем аргумент x в правую часть равенства:

$$u'x^2 \sin u + ux \sin u + x = ux \sin u;$$

$$u'x^2 \sin u + x = 0;$$

$$u'x^2 \sin u = -x.$$

Сократим обе части уравнения на x :

$$u'x \cdot \sin u = -1.$$

Разделим переменные:

$$\frac{du}{dx} x \cdot \sin u = -1;$$

$$-\sin u du = \frac{dx}{x}.$$

Проинтегрируем полученное уравнение:

$$-\int \sin u du = \int \frac{dx}{x};$$

$$\cos u = \ln|x| + C.$$

Преобразуем решение:

$$\cos u = \ln|x| + \ln|C|;$$

$$\cos u = \ln|Cx|.$$

Возвращаясь к переменным x и y окончательно получим:

$$\cos \frac{y}{x} = \ln|Cx|.$$

Пример. Решим уравнение: $xy' = \sqrt{x^2 + y^2} + y$.

Сделаем замену:

$$y = ux; \quad u = \frac{y}{x}; \quad y' = u'x + u.$$

Получим:

$$u'x^2 + ux = \sqrt{x^2 + u^2x^2} + ux.$$

Разделим переменные:

$$\frac{du}{dx} x = \sqrt{1 + u^2};$$

$$\frac{du}{\sqrt{1 + u^2}} = \frac{dx}{x}.$$

Проинтегрируем уравнение:

$$\int \frac{du}{\sqrt{1 + u^2}} = \int \frac{dx}{x};$$

$$\ln|u + \sqrt{1 + u^2}| = \ln|x| + \ln|C|;$$

$$u + \sqrt{1 + u^2} = Cx.$$

Вернемся к переменной y :

$$\frac{y}{x} + \sqrt{1 + \frac{y^2}{x^2}} = Cx.$$

Преобразуя решение окончательно получим:

$$\frac{y}{x} + \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{x^2}} = Cx;$$

$$Cx^2 = y + \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Пример. Найдём общее решение дифференциального уравнения:

$$(x^2 - xy)y' + y^2 = 0.$$

Выразим y и сделаем замену:

$$y' = -\frac{y^2}{x^2 - xy};$$

$$u'x + u = -\frac{u^2 x^2}{x^2 - ux^2}.$$

Сократим обе части уравнения на x^2 :

$$u'x + u = \frac{u^2}{u - 1}.$$

Разделим переменные:

$$\frac{du}{dx}x = \frac{u^2}{u - 1} - u;$$

$$\frac{du}{dx}x = \frac{u^2 - u^2 + u}{u - 1};$$

$$\frac{u - 1}{u} du = \frac{dx}{x}.$$

Проинтегрируем полученное равенство:

$$\int \frac{u - 1}{u} du = \int \frac{dx}{x};$$

$$\int du - \int \frac{du}{u} = \int \frac{dx}{x};$$

$$u - \ln|u| = \ln|x| + \ln|C|, \quad C \neq 0;$$

$$u = \ln|u| + \ln|x| + \ln|C|;$$

$$Cxu = e^u.$$

Возвращаясь к переменной y , получим общее решение уравнения:

$$Cy = e^{\frac{y}{x}}, C \neq 0.$$

14.5. Линейные дифференциальные уравнения

14.5.1. Понятие линейного дифференциального уравнения

Дифференциальное уравнение первого порядка называется *линейным* (ЛДУ), если его можно записать в виде:

$$y' + p(x) \cdot y = g(x),$$

где $p(x)$ и $g(x)$ – заданные функции, в частности – постоянные.

Особенность линейных дифференциальных уравнений первого порядка заключается в том, что искомая функция y и ее производная y' входят в уравнение в первой степени, не перемножаясь между собой.

В случае, когда функция $g(x)$ тождественно равна нулю, уравнение называется *однородным*, в противном случае – *неоднородным*.

Пример. Линейное дифференциальное уравнение

$$y' + 5x^2 y = 0$$

является однородным.

Пример. Линейное дифференциальное уравнение

$$y' + \sin 3xy = 8x - 4$$

является неоднородным.

14.5.2. Метод Иоганна Бернулли

Метод Иоганна Бернулли – один из наиболее популярных алгоритмов решения линейных однородных уравнений.

Решение будем искать в виде $y = u(x)v(x)$. Искомыми будут являться функции $u(x)$ и $v(x)$, одна из которых может быть выбрана произвольно, а другая должна определяться из самого уравнения $y' + p(x) \cdot y = g(x)$.

Так как $y' = u'v + uv'$, то линейное дифференциальное уравнение $y' + p(x) \cdot y = g(x)$ примет вид:

$$u'v + uv' + p(x)uv = g(x);$$

$$u'v + u(v' + p(x)v) = g(x).$$

Сначала можно найти какое-либо частное решение $v=v(x)$ уравнения

$$v' + p(x)v = 0.$$

Тогда функция $u=u(x)$ – решение уравнения

$$vu' = g(x).$$

Тем самым решение исходного линейного дифференциального уравнения сводится к решению двух уравнений с разделяющимися переменными.

Пример. Найдём общее решение ДУ: $y' - y \cdot \operatorname{tg} x = \frac{1}{\cos x}$.

Для нахождения решения будем использовать замены

$$y = uv; \quad y' - y \cdot \operatorname{tg} x = \frac{1}{\cos x}. \quad y' = u'v + uv'.$$

Получим:

$$u'v + uv' - uv \cdot \operatorname{tg} x = \frac{1}{\cos x};$$

$$u'v + u(v' - v \cdot \operatorname{tg} x) = \frac{1}{\cos x}.$$

Для нахождения частного решения решим систему уравнений:

$$\begin{cases} v' - v \cdot \operatorname{tg} x = 0 \\ u'v = \frac{1}{\cos x} \end{cases}.$$

Решаем первое из уравнений:

$$v' - v \cdot \operatorname{tg} x = 0;$$

$$\frac{dv}{v} = \operatorname{tg} x dx;$$

$$\int \frac{dv}{v} = \int \frac{\sin x}{\cos x} dx;$$

$$\ln|v| = -\ln|\cos x|;$$

$$v = \frac{1}{\cos x}.$$

Решим второе дифференциальное уравнение:

$$u'v = \frac{1}{\cos x};$$

$$u' \cdot \frac{1}{\cos x} = \frac{1}{\cos x};$$

$$\frac{du}{dx} = 1;$$

$$\int du = \int dx;$$

$$u = x + C.$$

Учитывая подстановку $y = uv$, получим решение дифференциального уравнения:

Пример. Найдём общее решение уравнения $xy' - y = x^2 \cdot \cos x$.

Введём замену

$$y = uv; \quad y' = u'v + uv'.$$

Тогда наше уравнение примет вид:

$$x(u'v + uv') - uv = x^2 \cdot \cos x;$$

$$xu'v + u(xv' - v) = x^2 \cdot \cos x.$$

Найдём частное решение, решая систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} xv' - v = 0 \\ xu'v = x^2 \cdot \cos x \end{cases}.$$

Решим первое уравнение:

$$xv' - v = 0;$$

$$xv' = v;$$

$$x \frac{dv}{dx} = v;$$

$$\frac{dv}{v} = \frac{dx}{x};$$

$$\int \frac{dv}{v} = \int \frac{dx}{x};$$

$$\ln|v| = \ln|x|;$$

$$v = x.$$

Решим второе уравнение:

$$xu'v = x^2 \cdot \cos x;$$

$$u'v = x \cdot \cos x;$$

$$u' \cdot x = x \cdot \cos x;$$

$$u' = \cos x;$$

$$u = \int \cos x dx;$$

$$u = \sin x + C.$$

Учитывая подстановку $y = uv$, получим общее решение:

$$y = (\sin x + C)x.$$

14.6. Уравнение Якоба Бернулли

Уравнением Бернулли называется уравнение вида:

$$y' + p(x)y = y^n q(x)$$

При $n=0$ данное дифференциальное уравнение является *линейным*.

При $n=1$ данное дифференциальное уравнение является *с разделяющимися переменными*.

Уравнение Бернулли можно привести к линейному. Однако на практике решение данного уравнения удобнее искать методом Иоганна Бернулли в виде $y = uv$, не сводя его к линейному.

Задача Коши для дифференциального уравнения первого порядка

Задача отыскания решения дифференциального уравнения первого порядка $P(x; y)dx + Q(x; y)dy = 0$, удовлетворяющего заданному начальному условию $y(x_0) = y_0$, называется *задачей Коши*.

Рассмотрим пример.

Пример. Найдём частное решение дифференциального уравнения $y' = \ln x + 1$, удовлетворяющее условию $y(1) = 0$.

Для нахождения решения разделим переменные:

$$y' = \ln x + 1;$$

$$\frac{dy}{dx} = \ln x + 1;$$

$$dy = \ln x dx + dx.$$

Проинтегрируем обе части уравнения и получим общее решение дифференциального уравнения:

$$\int dy = \int (\ln x + 1) dx;$$

$$y = x \ln x + C.$$

Учитывая условие $y(1) = 0$, решим задачу Коши:

$$1 \cdot \ln 1 + C = 0$$

$$C = 0 \Rightarrow y = x \ln x.$$

Пример. Найдём частное решение дифференциального уравнения

$$y' = \frac{y}{x} + \sin \frac{y}{x}, \text{ удовлетворяющее условию } y(1) = \frac{\pi}{2}.$$

Для решения уравнения сделаем замену $u = \frac{y}{x}$, тогда

$$y = ux; \quad y' = u'x + u;$$

$$u'x + u = u + \sin u;$$

$$u'x = \sin u.$$

Разделим переменные:

$$\frac{du}{\sin u} = \frac{dx}{x}.$$

Проинтегрируем полученное уравнение:

$$\int \frac{du}{\sin u} = \int \frac{dx}{x}.$$

Найдём интеграл в левой части уравнения:

$$\int \frac{du}{\sin u} = \int \frac{\sin u du}{\sin^2 u} = -\int \frac{d(\cos u)}{(1 - \cos^2 u)} = \left\langle \int \frac{dx}{x^2 - a^2} = \frac{1}{2a} \ln \left| \frac{x-a}{x+a} \right| + C \right\rangle =$$

$$\begin{aligned}
&= \int \frac{d(\cos u)}{(\cos^2 u - 1)} = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 - \cos u}{1 + \cos u} \right) = \left\langle tg^2 x = \frac{1 - \cos 2x}{1 + \cos 2x} \right\rangle = \frac{1}{2} \ln \left(tg^2 \frac{u}{2} \right) = \\
&= \ln \left(tg^2 \frac{u}{2} \right)^{1/2} = \ln \left| tg \frac{u}{2} \right|.
\end{aligned}$$

Интеграл в правой части уравнения равен:

$$\int \frac{dx}{x} = \ln|x| + \ln|C|.$$

Таким образом,

$$\ln \left| tg \frac{u}{2} \right| = \ln|x| + \ln|C|;$$

$$g \frac{u}{2} = Cx;$$

$$u = 2 \arctg(Cx).$$

Учитывая выполненную замену $u = \frac{y}{x}$, можно записать:

$$y = 2x \cdot \arctg(Cx).$$

Подставим в найденное общее решение начальное условие $y(1) = \frac{\pi}{2}$.

$$\frac{\pi}{2} = 2 \cdot 1 \cdot \arctg(1 \cdot C);$$

$$\arctg(C) = \frac{\pi}{4};$$

$$C = tg \frac{\pi}{4}.$$

При $C=1$ частное решение будет иметь вид:

$$y = 2x \cdot \arctgx.$$

Пример. Найти уравнение кривой, проходящей через точку $A(2;1)$, подкасательная которой в любой ее точке равна 4.

Подкасательная в произвольной точке равна $\frac{y}{y'} = 4$, тогда

$$\frac{ydx}{dy} = 4;$$

$$\frac{4dy}{y} = dx;$$

$$\ln|y| = \frac{x}{4} + C;$$

$$y = e^{\frac{x}{4} + C}.$$

Для вычисления значения C подставим в найденное решение координаты точки $A(2;1)$:

$$1 = e^{\frac{2}{4} + C};$$

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

Тогда уравнение кривой будет иметь вид:

$$y = e^{\frac{x}{4} - \frac{1}{2}}.$$

14.7. Дифференциальные уравнения высших порядков

14.7.1. Понятия дифференциальных уравнений высших порядков

Определение. Дифференциальное уравнение порядка выше первого называется *дифференциальным уравнением высших порядков*.

Дифференциальное уравнение второго порядка в общем случае записывается в виде:

$$F(x, y, y', y'') = 0,$$

или, если это возможно, в виде, разрешенном относительно старшей производной:

$$y'' = f(x, y, y') \quad (1)$$

Решением дифференциального уравнения 2-го порядка называется всякая функция $y = \varphi(x)$, которая при подстановке в уравнение обращает его в тождество.

Общим решением дифференциального уравнения 2-го порядка называется функция $y=\varphi(x, C_1, C_2)$, где C_1 и C_2 – не зависящие от x произвольные постоянные, удовлетворяющая условиям:

1. $\varphi(x, C_1, C_2)$ является решением ДУ для каждого фиксированного значения C_1 и C_2 .

2. Каковы бы ни были начальные условия

$$y|_{x=x_0} = y_0, \quad y'|_{x=x_0} = y'_0 \quad (2)$$

существуют единственные значения постоянных $C_1 = C_1^0$ и $C_2 = C_2^0$ такие, что функция $y=\varphi(x, C_1^0, C_2^0)$ является решением уравнения (1) и удовлетворяет начальным условиям (2).

Всякое решение $y=\varphi(x; C_1^0; C_2^0)$ уравнения (1), получающееся из общего решения $y=\varphi(x; C_1; C_2)$ при конкретных значениях постоянных $C_1=C_1^0$ и $C_2=C_2^0$, называется *частным решением*.

Решение дифференциального уравнения (1), записанные в виде

$$\Phi(x, y, C_1, C_2) = 0, \quad \Phi(x, y, C_1^0, C_2^0) = 0,$$

называются *общим* и *частным* интегралом соответственно.

График всякого решения ДУ второго порядка называется *интегральной кривой*.

Общее решение ДУ (1) представляет собой множество интегральных кривых.

Частное решение – одна интегральная кривая этого множества, проходящая через точку $(x_0; y_0)$ и имеющая в ней касательную с заданным угловым коэффициентом $y'(x_0) = y'_0$.

Как и в случае уравнения первого порядка, задача нахождения решения ДУ (1), удовлетворяющего заданным начальным условиям (2), называется *задачей Коши*.

Теорема (существования и единственности задачи Коши).

Если в уравнении (1) функция $f(x; y; y')$ и ее частные производные f'_x и f'_y , непрерывны в некоторой области D изменения переменных x, y и y' , то для всякой

точки $(x_0; y_0; y'_0)$ принадлежащей D существует единственное решение $y = \varphi(x)$ уравнения (1), удовлетворяющее начальным условиям (2).

14.7.2. Дифференциальные уравнения, допускающие понижение порядка

Одним из методов интегрирования ДУ высших порядков является *метод понижения порядка*. Суть метода состоит в том, что с помощью замены переменной (подстановки) данное ДУ сводится к уравнению, порядок которого ниже.

Существует три типа дифференциальных уравнений, при решении которых используется метод понижения порядков.

Дифференциальные уравнения I-го типа $y^{(n)} = f(x)$

Дифференциальное уравнение такого типа решают, интегрируя обе части уравнения последовательно n раз.

Рассмотрим пример.

Пример. Найдём общее решение дифференциального уравнения $y''' = \cos 2x$.

Решение. Последовательно интегрируем 3 раза данное уравнение $y''' = \cos 2x$.

Интегрируем первый раз:

$$y'' = \int \cos 2x dx = \frac{1}{2} \sin 2x + C_1$$

После второго интегрирования получим:

$$y' = \int \left(\frac{1}{2} \sin 2x + C_1 \right) dx = -\frac{1}{4} \cos 2x + C_1 x + C_2$$

И, наконец, интегрируя третий раз найдём общее решение:

$$y = \int \left(-\frac{1}{4} \cos 2x + C_1 x + C_2 \right) dx = -\frac{1}{8} \sin 2x + C_1 \frac{x^2}{2} + C_2 x + C_3$$

Таким образом, решением дифференциального уравнения третьего порядка $y''' = \cos 2x$ является уравнение $y = -\frac{1}{8} \sin 2x + C_1 \frac{x^2}{2} + C_2 x + C_3$.

Дифференциальные уравнения II -го типа $y'' = f(x; y')$

Дифференциальное уравнение такого типа не содержит явно искомой функции y . Для решения таких дифференциальных уравнений нужно ввести замену:

$$y' = z,$$

где $z = z(x)$ – новая искомая функция.

Тогда $y'' = z'$ и уравнение примет вид $z' = f(x; z)$. Таким образом, мы приходим к дифференциальному уравнению первого порядка.

Рассмотрим пример.

Пример. Найдём общее решение дифференциального уравнения:

$$y'' - \frac{y'}{x} = 0.$$

Решение. Введём функцию $z = z(x)$. Сделаем замены: $y' = z$, $y'' = z'$.

Тогда получим дифференциальное уравнение первого порядка

$$z' - \frac{z}{x} = 0.$$

Выразим производную z :

$$z' = \frac{z}{x};$$

$$\frac{dz}{dx} = \frac{z}{x}.$$

Разделим переменные

$$\frac{dz}{z} = \frac{dx}{x}.$$

Проинтегрируем полученное равенство

$$\int \frac{dz}{z} = \int \frac{dx}{x}.$$

$$\ln z = \ln x + \ln C_1.$$

Тогда решение можно представить в виде

$$z = C_1 x.$$

Так как $z = y'$, то

$$y' = C_1 x.$$

Проинтегрируем полученное дифференциальное уравнение:

$$y = \int C_1 x dx.$$

В результате получим общий интеграл:

$$y = C_1 \frac{x^2}{2} + C_2.$$

Таким образом, решением дифференциального уравнения второго порядка

$$y'' = \cos 2x \text{ является уравнение } y = C_1 \frac{x^2}{2} + C_2.$$

Дифференциальные уравнения III -го типа $y'' = f(y; y')$.

Дифференциальные уравнения такого типа не содержат явно независимой переменной x .

Введем замену:

$$y' = z,$$

где $z = z(y)$ – новая искомая функция.

Тогда

$$y'' = (y')'_x = (z)'_x = \frac{dz}{dy} \cdot \frac{dy}{dx} = z \cdot \frac{dz}{dy}.$$

и уравнение примет вид:

$$z \cdot \frac{dz}{dy} = f(y; z).$$

Таким образом, мы получили дифференциальное уравнение первого порядка.

Рассмотрим пример.

Пример. Найдём общее решение дифференциального уравнения

$$y'' - \frac{(y')^2}{y} = 0.$$

Решение. Введём новую функцию $z = z(y)$.

Сделаем замены:

$$y' = z, \quad y'' = z \cdot z'.$$

После замен получим следующее дифференциальное уравнение:

$$z \cdot z' - \frac{z^2}{y} = 0.$$

Преобразуем уравнение и разделим переменные:

$$z \cdot z' = \frac{z^2}{y}$$

$$z \cdot \frac{dz}{dy} = \frac{z^2}{y}$$

$$\frac{dz}{z} = \frac{dy}{y}$$

Проинтегрируем полученное уравнение:

$$\int \frac{dz}{z} = \int \frac{dy}{y}$$

$$\ln z = \ln y + \ln C_1$$

В результате мы пришли к дифференциальному уравнению первой степени:

$$z = C_1 y$$

Так как $z = y'$, то

$$y' = C_1 y$$

Решим это уравнение. Сначала его преобразуем:

$$\frac{dy}{dx} = C_1 y$$

$$\frac{dy}{y} = C_1 dx,$$

а затем проинтегрируем:

$$\int \frac{dy}{y} = \int C_1 dx$$

$$\ln y = C_1 x + C_2$$

Потенцируя уравнение, окончательно получим общий интеграл:

$$y = e^{C_1 x + C_2}.$$

Таким образом, решением дифференциального уравнения второго порядка

$$y'' - \frac{(y')^2}{y} = 0 \text{ является уравнение } y = e^{C_1 x + C_2}.$$

Рассмотрим еще один пример.

Пример. Найдем общее решение дифференциального уравнения $y'' = 2(\ln x + 1)$.

Решение. Сделаем замену $y' = z(x)$, откуда получим $y'' = z'(x)$ $y'' = z'(x)$.

Тогда исходное уравнение примет вид:

$$z' = 2(\ln x + 1).$$

Разделим переменные

$$\frac{dz}{dx} = 2(\ln x + 1)$$

$$dz = 2(\ln x + 1)dx$$

Проинтегрируем полученное дифференциальное уравнение:

$$\int dz = \int 2(\ln x + 1)dx$$

Второй интеграл найдем, используя метод интегрирования по частям:

$$\int 2(\ln x + 1)dx = 2 \int (\ln x + 1)dx = \left\langle \begin{array}{l} u = \ln x \\ du = \frac{dx}{x} \end{array} \quad \begin{array}{l} dv = 2x dx \\ v = \frac{2x^2}{2} \end{array} \right\rangle =$$

$$= x^2 \ln x - \int x^2 \frac{dx}{x} = x^2 \ln x - \frac{x^2}{2} + C_2.$$

Окончательно получим: $y = x^2 \ln x - \frac{x^2}{2} + C_1 x + C_2$.

Таким образом, решением дифференциального уравнения второго порядка

$$y'' = 2(\ln x + 1) \text{ является уравнение } y = x^2 \ln x - \frac{x^2}{2} + C_1 x + C_2.$$

Рассмотрим пример решения дифференциального уравнения третьего порядка.

Пример. Найти общее решение дифференциального уравнения $2xy'''y'' = (y'')^2 - 1$.

Решение. Выполним замену $y'' = z(x)$. Тогда $y''' = z'$. Тогда исходное уравнение примет вид:

$$2x \cdot z' \cdot z = z^2 - 1.$$

Разделим переменные:

$$\frac{2zdz}{z^2 - 1} = \frac{dx}{x}.$$

Проинтегрируем полученное уравнение, используя метод внесения под знак дифференциала:

$$\int \frac{2zdz}{z^2 - 1} = \int \frac{dx}{x}$$

$$\int \frac{d(z^2 - 1)}{z^2 - 1} = \int \frac{dx}{x}$$

$$\ln|z^2 - 1| = \ln|x| + \ln|C_1|$$

Откуда получим:

$$z^2 = C_1x + 1$$

$$z = \pm\sqrt{C_1x + 1}, \quad C_1 \neq 0$$

Так как $z = y''$, то

$$y'' = \pm\sqrt{C_1x + 1}, \quad C_1 \neq 0$$

Проинтегрируем полученное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$y' = \int (\pm\sqrt{C_1x + 1})dx, \quad C_1 \neq 0$$

$$y' = \pm \frac{1}{C_1} \int (\sqrt{C_1x + 1})d(C_1x + 1)$$

$$y' = \pm \frac{2}{3C_1} (C_1 x + 1)^{3/2} + C_2$$

Еще раз проинтегрируем уравнение:

$$y = \int \left(\pm \frac{2}{3C_1} (C_1 x + 1)^{3/2} + C_2 \right) dx$$

Окончательно получим:

$$\pm \frac{4}{15C_1^2} (C_1 x + 1)^{5/2} + C_2 x + C_3; \quad C_1 \neq 0.$$

Таким образом, решением дифференциального уравнения третьего порядка $2xy'''y'' = (y'')^2 - 1$ является уравнение

$$\pm \frac{4}{15C_1^2} (C_1 x + 1)^{5/2} + C_2 x + C_3; \quad C_1 \neq 0.$$

Пример. Найдём общее решение дифференциального уравнения второго порядка: $(1-x^2)y'' - xy' = 2$.

Решение. Сделаем замены $y' = z(x)$, $y'' = z' y' = z'$, тогда исходное уравнение примет вид:

$$(1-x^2)z' - xz = 2.$$

Данное уравнение является линейным относительно z уравнением, которое решается заменами $z = uv$ и $z' = u'v + u'v$.

После выполнения замен получим:

$$(1-x^2)(u'v + uv') - xuv = 2.$$

Раскроем скобки и сгруппируем слагаемые:

$$u'v + uv' - x^2u'v - x^2uv' - xuv = 2;$$

$$v(u' - x^2u' - xu) + v'u(1-x^2) = 2.$$

Пусть $u' - x^2u' - xu = 0$, тогда $u'(1-x^2) = xu$.

Проинтегрируем полученное равенство:

$$\int \frac{du}{u} = \int \frac{x dx}{(1-x^2)};$$

$$\ln|u| = -\frac{1}{2} \int \frac{d(1-x^2)}{(1-x^2)};$$

$$\ln|u| = -\frac{1}{2} \ln|1-x^2|;$$

$$\ln|u| = \ln(1-x^2)^{-1/2}.$$

После потенцирования уравнения получим явное выражение $u(x)$

$$u = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}.$$

Подставим найденное значение u в уравнение $v(u' - x^2 u' - xu) + v' u(1-x^2) = 2$:

$$0 \cdot (u' - x^2 u' - xu) + v' \frac{1-x^2}{\sqrt{1-x^2}} = 2.$$

Разделив переменные получим:

$$dv = \frac{2dx}{\sqrt{1-x^2}}.$$

Проинтегрируем уравнение:

$$\int dv = \int \frac{2dx}{\sqrt{1-x^2}};$$

$$v = 2 \arcsin x + C_1.$$

Тогда

$$z = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} (2 \arcsin x + C_1);$$

$$\begin{aligned} y &= \int \frac{2 \arcsin x + C_1}{\sqrt{1-x^2}} dx = 2 \int \frac{\arcsin x}{\sqrt{1-x^2}} dx + \int \frac{C_1}{\sqrt{1-x^2}} dx = \\ &= 2 \int \arcsin x d(\arcsin x) + C_1 \int \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = \arcsin^2 x + C_1 \arcsin x + C_2. \end{aligned}$$

Таким образом, решением дифференциального уравнения второго порядка $(1-x^2)y'' - xy' = 2$ является уравнение $y = \arcsin^2 x + C_1 \arcsin x + C_2$.

14.8. Линейные дифференциальные уравнения высших порядков

Уравнение вида

$$b_0(x)y^{(n)} + b_1(x)y^{(n-1)} + \dots + b_{n-1}(x)y' + b_n(x)y = g(x) \quad (1),$$

где $b_0(x) \neq 0, b_1(x), \dots, b_n(x), g(x)$ – заданные функции, называется *линейным дифференциальным уравнением n-го порядка*.

Данное ДУ содержит функцию y и все ее производные лишь в первой степени. Функции $b_0(x), b_1(x), \dots, b_n(x)$ называются *коэффициентами уравнения* (1), а функция $g(x)$ – его *свободным членом*.

Если свободный член $g(x) \equiv 0$, то уравнение (1) называется *линейным однородным уравнением*; если $g(x) \neq 0$, то уравнение (1) называется *неоднородным*.

Разделим уравнение (1) на $b_0(x) \neq 0$ и обозначив

$$\frac{b_1(x)}{b_0(x)} = a_1(x), \dots, \frac{b_{n-1}(x)}{b_0(x)} = a_{n-1}(x), \frac{g(x)}{b_0(x)} = f(x),$$

запишем уравнение (1) в виде приведенного

$$y^{(n)} + a_1(x)y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1}(x)y' + a_n(x)y = f(x).$$

В дальнейшем будем ориентироваться именно на данную запись линейного ДУ высшего порядка.

14.8.1. Линейные однородные дифференциальные уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами

Частным случаем рассмотренных выше линейных однородных дифференциальных уравнений (ЛОДУ) является уравнение с *постоянными коэффициентами*. Рассмотрим линейных однородное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$y'' + py' + qy = 0 \quad (2),$$

где p и q постоянны.

Общим решением этого уравнения является функция

$$y = c_1 y_1 + c_2 y_2,$$

где c_1 и c_2 – произвольные постоянные.

Таким образом, для нахождения общего решения уравнения (2) достаточно найти два его частных решения y_1 и y_2 .

Частные решения уравнения (2) будем искать в виде: $y = e^{kx}$, k – некоторое число. Дифференцируя эту функцию два раза и подставляя выражения для y , y' , y'' в уравнение (2), получим:

$$k^2 e^{kx} + p \cdot k \cdot e^{kx} + q \cdot e^{kx} = 0.$$

Вынесем e^{kx}

$$e^{kx} (k^2 + pk + q) = 0.$$

Следовательно,

$$k^2 + pk + q = 0 \quad (e^{kx} \neq 0).$$

Данное уравнение называется *характеристическим уравнением* дифференциального уравнения (2). Для составления характеристического уравнения достаточно в уравнении (2) заменить y'' на k^2 , y' на k , а y на 1.

При решении характеристического уравнения возможны следующие три случая.

Случай 1. Корни характеристического уравнения k_1 и k_2 действительные и различные: $k_1 \neq k_2$ ($D > 0$). Общее решение уравнения (2) в этом случае имеет вид:

$$y = c_1 e^{k_1 x} + c_2 e^{k_2 x}.$$

Рассмотрим пример.

Пример. Найдем общее решение линейного однородного дифференциального уравнения второго порядка $3y'' + 8y' - 3y = 0$.

Характеристическое уравнение будет иметь вид: $3k^2 + 8k - 3 = 0$.

Решая уравнение, получим $k_1 = -3$, $k_2 = \frac{1}{3}$

Тогда решение дифференциального уравнения можно записать в виде:

$$y = c_1 e^{-3x} + c_2 e^{\frac{1}{3}x}.$$

Случай 2. Корни характеристического уравнения k_1 и k_2 действительные и равны между собой: $k_1=k_2$ ($D=0$).

Общее решение уравнения (2) в этом случае будет иметь вид:

$$y = c_1 e^{k_1 x} + c_2 x e^{k_1 x}.$$

Рассмотрим пример.

Пример. Найдем общее решение линейного однородного дифференциального уравнения второго порядка $4y'' - 20y' + 25y = 0$.

Характеристическое уравнение будет иметь вид: $4k^2 - 20k + 25 = 0$, следовательно, корни характеристического уравнения будут равны между собой $k_1 = k_2 = 2,5$, а значит, решение дифференциального уравнения можно записать в виде:

$$y = c_1 e^{k_1 x} + c_2 x e^{k_1 x} = (c_1 + c_2 x) e^{2,5x}.$$

Случай 3. Корни характеристического уравнения k_1 и k_2 являются комплексно сопряженными числами: $k_1 = \alpha - \beta i$, $k_2 = \alpha + \beta i$ ($D < 0$).

Общее решение уравнения (2) в этом случае имеет вид:

$$y = e^{\alpha x} (c_1 \cos \beta x + c_2 \sin \beta x).$$

Рассмотрим пример.

Пример. Найти общее решение линейного однородного дифференциального уравнения второго порядка $y'' + 3y' + 5y = 0$.

В нашем случае корни характеристического уравнения k_1 и k_2 являются комплексно сопряженными числами:

$$k_{1,2} = \frac{-3 \pm \sqrt{9 - 20}}{2} = -\frac{3}{2} \pm \frac{\sqrt{11}}{2} i.$$

Тогда решение дифференциального уравнения можно записать в виде:

$$y = e^{-\frac{3}{2}x} (c_1 \cos \frac{\sqrt{11}}{2} x + c_2 \sin \frac{\sqrt{11}}{2} x).$$

14.8.2. Линейные неоднородные дифференциальные уравнения второго порядка

Линейное неоднородное дифференциальное уравнение (ЛНДУ) второго порядка имеет вид:

$$y'' + a_1(x)y' + a_2(x)y = f(x) \quad (3),$$

где $a_1(x)$, $a_2(x)$, $f(x)$ – заданные, непрерывные на $(a;b)$ функции.

Структура общего решения линейного неоднородного дифференциального уравнения второго порядка определяется с помощью теоремы.

Теорема. Общим решением y уравнения (3) является сумма его произвольного частного решения y^* и общего решения $\hat{y} = c_1 y_1 + c_2 y_2$, соответствующего однородного уравнения $y'' + a_1(x)y' + a_2(x)y = 0$.

Одним из методов нахождения частного решения y^* является метод вариации произвольных постоянных.

Метод вариации произвольных постоянных

Частное решение y^* уравнения (3) можно найти, если известно общее решение $\hat{y} = c_1 y_1 + c_2 y_2$ соответствующего однородного уравнения, методом вариации произвольных постоянных (метод Лагранжа).

Суть метода состоит в следующем:

1. Находится общее решение $\hat{y} = c_1 y_1 + c_2 y_2$ однородного уравнения, имеющего ту же левую часть, что и исходное неоднородное уравнение.

2. Затем решение ЛНДУ находится в виде $y^* = c_1(x)y_1 + c_2(x)y_2$, то есть предполагается, что постоянные c_1 и c_2 являются функциями независимой переменной x . При этом функции $c_1(x)$ и $c_2(x)$ могут быть найдены как решения системы:

$$\begin{cases} c_1' y_1 + c_2' y_2 = 0, \\ c_1' y_1' + c_2' y_2' = f(x) \end{cases} \quad (4)$$

Пример. Найти общее решение линейного неоднородного дифференциального уравнения второго порядка $y'' + y = \frac{1}{\sin x}$.

Найдем общее решение $\hat{y}$ соответствующего однородного уравнения $y'' + y = 0$.

Характеристическое уравнение имеет вид $k^2 + 1 = 0$, следовательно, $k_1 = i$; $k_2 = -i$.

Так как решение однородного дифференциального уравнения можно записать в виде $y = e^{\alpha x}(c_1 \cos \beta x + c_2 \sin \beta x)$, где $\alpha = 0$; $\beta = 1$, то решение является уравнение

$$\hat{y} = c_1 \cos x + c_2 \sin x.$$

Найдем теперь частное решение y^* исходного уравнения с помощью метода вариации произвольных постоянных: $y^* = c_1(x) \cos x + c_2(x) \sin x$.

Для нахождения $c_1(x)$ и $c_2(x)$ составляем систему уравнений вида (4):

$$\begin{cases} c_1'(x) \cos x + c_2'(x) \sin x = 0, \\ c_1'(x)(-\sin x) + c_2'(x) \cos x = \frac{1}{\sin x}. \end{cases}$$

Решим данную систему уравнений методом Крамера.

$$\det A = \begin{vmatrix} \cos x & \sin x \\ -\sin x & \cos x \end{vmatrix} = \cos^2 x + \sin^2 x = 1;$$

$$\det X = \begin{vmatrix} 0 & \sin x \\ \frac{1}{\sin x} & \cos x \end{vmatrix} = -1;$$

$$\det Y = \begin{vmatrix} \cos x & 0 \\ -\sin x & \frac{1}{\sin x} \end{vmatrix} = \operatorname{ctgx}.$$

Тогда $c_1'(x) = \frac{\det X}{\det A} = -1$, значит, $c_1(x) = \int -dx = -x$;

$$c_2'(x) = \frac{\det Y}{\det A} = \operatorname{ctgx}, \text{ следовательно, } c_2(x) = \int \operatorname{ctgx} dx = \ln|\sin x|.$$

Запишем частное решение данного уравнения:

$$y^* = c_1(x) \cos x + c_2(x) \sin x = -x \cdot \cos x + \ln|\sin x| \cdot \sin x.$$

Следовательно, общее решение данного уравнения имеет вид:

$$y = \hat{y} + y^* = c_1 \cos x + c_2 \sin x = -x \cdot \cos x + \ln|\sin x| \cdot \sin x.$$

Таким образом, решением дифференциального уравнения второго порядка

$$y'' + y = \frac{1}{\sin x}, \text{ является уравнение } y = -x \cdot \cos x + \ln|\sin x| \cdot \sin x.$$

Вопросы для самоконтроля

1. Сформулируйте понятие дифференциального уравнения. Как определить порядок дифференциального уравнения?
2. Что является решением дифференциального уравнения? Сколько констант будет содержать общее решение дифференциального уравнения третьего порядка?
3. В чем различие общего и частного решений дифференциального уравнения? Как из общего решения можно получить частное решение?
4. Какие типы задач решаются в зависимости от способа задания дополнительных условий для получения частного решения дифференциального уравнения? Кратко охарактеризуйте каждую из задач.
5. Дайте определение дифференциальному уравнению первого порядка, разрешенному относительно производной. Какую зависимость устанавливает уравнение $y' = f(x; y)$ между координатами точки (x, y) и угловым коэффициентом y' касательной к интегральной кривой, проходящей через эту точку?
6. В чем заключается задача Коши для дифференциальных уравнений первого порядка? Приведите пример решения задачи Коши.
7. Что представляют собой дифференциальные уравнения с разделенными переменными? Опишите алгоритм решения уравнений с разделенными переменными.

8. Дайте определение дифференциальных уравнений с разделяющимися переменными. В чем состоит особенность решения дифференциальных уравнений с разделяющимися переменными?

9. Какие дифференциальные уравнения являются однородными? Какие вы знаете методы нахождения общего решения однородных уравнений первого порядка?

10. Дайте определение однородной функции. Приведите примеры однородных и неоднородных функций.

11. Каким образом можно преобразовать однородное дифференциальное уравнение первого порядка в дифференциальное уравнение с разделенными переменными? Какую замену для этого следует делать?

12. Дайте определение линейного дифференциального уравнения первого порядка. Приведите примеры.

13. В чем отличие алгоритмов решения линейных однородных дифференциальных уравнений первого порядка от линейных неоднородных? Приведите примеры.

14. В чем заключается метод Иоганна Бернулли решения линейных однородных дифференциальных уравнений первого порядка? Приведите пример нахождения общего решения линейного однородного уравнения методом Иоганна Бернулли.

15. Что представляет собой задача Коши для дифференциального уравнения первого порядка? Каким образом записывается решение задачи Коши?

16. Каким образом уравнение Якоба Бернулли можно привести к линейному? В каких случаях уравнение Якоба Бернулли является линейным, а в каких – с разделяющимися переменными?

17. Приведите пример нахождения решений задачи Коши для уравнений Якоба Бернулли.

18. Дайте понятие дифференциального уравнения высшего порядка. Что является общим решением дифференциальных уравнений второго и третьего порядка?

19. Как можно получить частное решение дифференциального уравнения высшего порядка?

20. В чем заключается метод понижения порядка интегрирования дифференциальных уравнений высшего порядка. Сколько раз необходимо интегрировать обе части уравнения $y^{(n)} = f(x)$ для получения решения дифференциального уравнения? Приведите пример нахождения общего решения дифференциального уравнения такого типа.

21. Как находится общее решение дифференциального уравнения вида $y'' = f(x; y')$? Приведите пример.

22. Какие замены следует производить для решения дифференциального уравнения второго порядка, если оно не содержит явно независимой переменной x ?

23. Опишите алгоритм нахождения общего решения дифференциального уравнения типа $y'' = f(y; y')$. Приведите пример решения дифференциального уравнения такого типа.

24. Какие уравнения являются линейными дифференциальными уравнениями высших порядков? Какие из них являются однородными, а какие – неоднородными?

25. Опишите методы решения линейных однородных дифференциальных уравнений второго порядка с постоянными коэффициентами.

26. Что такое характеристическое уравнение? В каких случаях характеристическое уравнение используется?

27. Опишите структуру общего решения линейного неоднородного дифференциального уравнения. Приведите пример.

Заключение

Общая алгебра, линейная алгебра и аналитическая геометрия, математический анализ – это три тесно связанных классических раздела математики. Они играют важную роль в фундаментальных и прикладных исследованиях как универсальный инструмент для расчета и математической обработки большого объема количественных результатов опытов и наблюдений, теоретических расчетов значений предполагаемых результатов и параметров, автоматизации вычислений сложных многофакторных процессов.

В первой части мы изучили основные классы числовых множеств, определили их формы, операции и свойства, познакомились с положениями теории делимости и теории сравнений, рассмотрели методы использования полиномов. В работе раскрыты основные положения матричной алгебры, алгоритмы исследования систем линейных алгебраических уравнений, методы векторной алгебры и аналитической геометрии на плоскости и в трехмерном пространстве. Посредством методов дифференциального и интегрального анализа исследованы различные функциональные зависимости от одной и нескольких переменных. Помимо этого, использованы числовые и функциональные ряды, а также различные способы решения дифференциальных уравнений.

Автор учебника благодарен коллективу кафедры информатики и математики Краснодарского университета МВД России за творческую помощь и активную поддержку.

Литература

1. Бубнова О.Ю. Математика. Элементы линейной алгебры и аналитической геометрии: учеб.-метод. пособие / О.Ю. Бубнова, Т.Е. Чикина, С.В. Крыгин // Труды сотрудников Нижегородской академии МВД России. – Н. Новгород: Нижегородская академия МВД России, 2017. – 86 с.
2. Горошко И.В. Математические методы исследования социальных систем: курс лекций / И.В. Горошко, Б.А. Торопов, Ш.Х. Гонов. – М.: Академия управления МВД России, 2019. – 80 с.
3. Думачев В.Н. Математика. Дифференциальные уравнения. Вариационное исчисление: учеб. / В.Н. Думачев, С.А. Телкова. – Электрон. текстовые дан. – Текст: электронный // Труды сотрудников Воронежского института МВД России. – Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2015.
4. Михайленко Е.В. Автоматизация обработки табличных данных для сбора и анализа социально-экономических показателей сотрудниками подразделений ОВД: учеб. пособие / Е.В. Михайленко, А.А. Хромых. – Краснодар: Краснодарский университет МВД России, 2021. – 148 с.
5. Михайленко Е.В. Введение в высшую математику: лекция / Е.В. Михайленко. – Краснодар: Краснодарский университет МВД России, 2008. – 30 с.
6. Михайленко Е.В. Введение в общую алгебру: учеб. пособие / Е.В. Михайленко, А.А. Хромых. – Краснодар: Краснодарский университет МВД России, 2015. – 400 с.
7. Михайленко Е.В. Дискретная математика: учеб. пособие / Е.В. Михайленко, А.А. Хромых. – Краснодар: Краснодарский университет МВД России, 2016. – 104 с.
8. Михайленко Е.В. Дискретная математика: учеб. пособие / Е.В. Михайленко, А.А. Хромых. – Краснодар: Краснодарский университет МВД России, 2016. – 104 с.
9. Михайленко Е.В. Комбинаторный анализ: лекция / Е.В. Михайленко. – Краснодар: Краснодарский университет МВД России, 2015. – 26 с.

10. Михайленко Е.В. Линейная алгебра и аналитическая геометрия: учеб. пособие / Е.В. Михайленко, М.А. Жукова. – Краснодар: Краснодарский университет МВД России, 2010. – 163 с.
11. Михайленко Е.В. Математика: учеб. / Е.В. Михайленко. – Краснодар: Краснодарский университет МВД России, 2023. – 478 с.
12. Михайленко Е.В. Математика и информатика: курс лекций / Е.В. Михайленко, И.Н. Старостенко. – Краснодар: Краснодарский университет МВД России, 2009. – 420 с.
13. Михайленко Е.В. Математика: курс лекций. Ч. 1. Элементы общей алгебры / Е.В. Михайленко. – Краснодар: Краснодарский университет МВД России, 2019. – 120 с.
14. Михайленко Е.В. Математика: курс лекций. Ч. 2. Линейная алгебра и аналитическая геометрия / Е.В. Михайленко. – Краснодар: Краснодарский университет МВД России, 2021. – 98 с.
15. Михайленко Е.В. Математика: курс лекций. Ч. 3. Математический анализ / Е.В. Михайленко. – Краснодар: Краснодарский университет МВД России, 2020. – 90 с.
16. Михайленко Е.В. Методы оптимизации: сб. задач / Е.В. Михайленко, А.А. Хромых. – Краснодар: Краснодарский университет МВД России, 2015. – 140 с.
17. Михайленко Е.В. Прикладная математика: курс лекций / Е.В. Михайленко, А.А. Хромых. – Краснодар: Краснодарский университет МВД России, 2014. – 192 с.
18. Михайленко Е.В. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие / Е.В. Михайленко, М.А. Жукова, Ф.Ф. Бараненко. – Краснодар: Краснодарский университет МВД России, 2011. – 142 с.
19. Михайленко Е.В. Экономико-математические методы и модели: учеб. пособие / Е.В. Михайленко, М.А. Жукова, Ф.Ф. Бараненко. – Краснодар: Краснодарский университет МВД России, 2011.

20. Путилов А.О. Дискретная математика: логика, теория множеств и комбинаторика: учеб. пособие / А.О. Путилов, Э.Р. Зарипова. – Электрон. текстовые дан. – Текст: электронный // Труды сотрудников Московского университета МВД России им. В.Я. Кикотя: сб. трудов. – М.: Московский университет МВД России им. В.Я. Кикотя, 2022.

21. Путилов А.О. Интегральное исчисление: учеб. пособие / А.О. Путилов. – Электрон. текстовые дан. – Текст: электронный // Труды сотрудников Московского университета МВД России им. В.Я. Кикотя. – М.: Московский университет МВД России им. В.Я. Кикотя, 2015. – URL: <http://ebs.libkrumvd.ru/elib/1168>

22. Сандрюкова Е.А. Математика. Элементы аналитической геометрии: учеб. пособие / Е.А. Сандрюкова. – Электрон. текстовые дан. – Текст: электронный // Труды сотрудников Московского университета МВД России им. В.Я. Кикотя. – М.: Московский университет МВД России им. В.Я. Кикотя, 2016.

23. Старостенко И.Н. Прикладная математика: учеб. / И.Н. Старостенко, Е.В. Михайленко, А.А. Хромых. – Краснодар: Краснодарский университет МВД России, 2023. – 346 с.

24. Старостенко И.Н. Элементы статистической обработки данных: учеб. пособие / И.Н. Старостенко, А.А. Хромых. – Краснодар: Краснодарский университет МВД России, 2020. – 74 с.

25. Старостенко И.Н. Высшая математика для экономистов. Элементы линейной алгебры: учеб.-практ. пособие / И.Н. Старостенко. – Краснодар: Краснодарский университет МВД России, 2021. – 76 с.

Учебное издание

Михайленко Евгений Владимирович

ВЫСШАЯ МАТЕМАТИКА

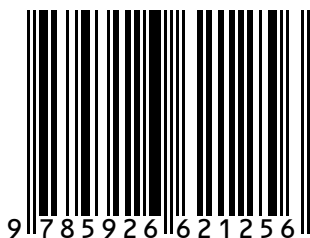
Учебник

В двух частях

Часть 1

В авторской редакции

ISBN 978-5-9266-2125-6



Подписано в печать 29.02.2024. Формат 60х84 1/16.
Усл. печ. л. 25,0. Тираж 100 экз. Заказ 220.

Краснодарский университет МВД России.
350005, г. Краснодар, ул. Ярославская, 128.