

# Алгебра. Экзамен

Бобень Вячеслав  
[@darkkeks](#), [GitHub](#)

2020

“Какой-то ты слишком идеальный, редуцируем его!”.

---

— Bottom text

## Содержание

1	Бинарные операции. Полугруппы, моноиды и группы. Коммутативные группы. Примеры групп. Порядок группы. Подгруппы. Описание всех подгрупп в группе $(\mathbb{Z}, +)$	3
2	Подгруппы. Циклические подгруппы. Циклические группы. Порядок элемента. Связь между порядком элемента и порядком порождаемой им циклической подгруппы	5
3	Смежные классы. Индекс подгруппы. Теорема Лагранжа	6
4	Пять следствий из теоремы Лагранжа	7
5	Нормальные подгруппы и факторгруппы	8
6	Гомоморфизмы групп. Простейшие свойства гомоморфизмов. Изоморфизмы групп. Ядро и образ гомоморфизма групп, их свойства	9
7	Теорема о гомоморфизме для групп	10
8	Классификация циклических групп	11
9	Прямое произведение групп. Разложение конечной циклической группы. Теорема о строении конечных абелевых групп	12
10	Экспонента конечной абелевой группы и критерий цикличности	13
11	Криптография с открытым ключом. Задача дискретного логарифмирования. Система Диффи Хеллмана обмена ключами. Криптосистема Эль-Гамала	14
12	Кольца. Коммутативные кольца. Обратимые элементы, делители нуля и нильпотенты. Примеры колец. Поля. Критерий того, что кольцо вычетов является полем	15
13	Идеалы колец. Факторкольцо кольца по идеалу. Гомоморфизмы и изоморфизмы колец. Ядро и образ гомоморфизма колец. Теорема о гомоморфизме для колец	16
14	Кольцо многочленов от одной переменной над полем: деление с остатком, наибольший общий делитель двух многочленов, теорема о его существовании и линейном выражении	17
15	Теорема о том, что кольцо многочленов от одной переменной над полем является кольцом главных идеалов	18
16	Неприводимые многочлены. Факториальность кольца многочленов от одной переменной над полем	19

17	Критерий того, что факторкольцо $\mathbb{K}[x]/(h)$ является полем. Базис и размерность факторкольца $\mathbb{K}[x]/(h)$ как векторного пространства над полем $\mathbb{K}$	20
18	Лексикографический порядок на множестве одночленов от нескольких переменных. Лемма о конечности убывающих цепочек одночленов	21
19	Старший член многочлена от нескольких переменных. Элементарная редукция многочлена относительно другого многочлена. Лемма о конечности цепочек элементарных редукций относительно системы многочленов	22
20	Остаток многочлена относительно заданной системы многочленов. Системы Грёбнера. Характеризация систем Грёбнера в терминах цепочек элементарных редукций	23
21	$S$ -многочлены. Критерий Бухбергера	24
22	Базис Грёбнера идеала в кольце многочленов от нескольких переменных, теорема о трёх эквивалентных условиях. Решение задачи вхождения многочлена в идеал	25
23	Лемма о конечности цепочек одночленов, в которых каждый следующий одночлен не делится ни на один из предыдущих. Алгоритм Бухбергера построения базиса Грёбнера идеала	26
24	Теорема Гильберта о базисе идеала	27
25	Редуцируемость к нулю $S$ -многочлена двух многочленов с взаимно простыми старшими членами	28
26	Характеристика поля. Расширение полей. Конечное расширение и его степень. Степень композиции двух расширений	29
27	Присоединение корня неприводимого многочлена. Существование конечного расширения исходного поля, в котором заданный многочлен (а) имеет корень; (б) разлагается на линейные множители	30
28	Алгебраические и трансцендентные элементы. Минимальный многочлен алгебраического элемента и его свойства	31
29	Подполе в расширении полей, порождённое алгебраическим элементом	32
30	Порядок конечного поля. Автоморфизм Фробениуса	33
31	Теорема существования для конечных полей	34
32	Цикличность мультипликативной группы конечного поля и неприводимые многочлены над $\mathbb{Z}_p$	35

# 1 Бинарные операции. Полугруппы, моноиды и группы. Коммутативные группы. Примеры групп. Порядок группы. Подгруппы. Описание всех подгрупп в группе $(\mathbb{Z}, +)$

**Определение 1.** Множество с бинарной операцией — это множество  $M$  с заданным отображением

$$M \times M \rightarrow M, \quad (a, b) \mapsto a \circ b.$$

Множество с бинарной операцией обычно обозначают  $(M, \circ)$ .

**Определение 2.** Множество с бинарной операцией  $(M, \circ)$  называется *полугруппой*, если данная бинарная операция ассоциативна, то есть

$$a \circ (b \circ c) = (a \circ b) \circ c \quad \text{для всех } a, b, c \in M.$$

Не все естественно возникающие операции ассоциативны. Например, если  $M = \mathbb{N}$  и  $a \circ b = a^b$ , то

$$2^{(1^2)} = 2 \neq (2^1)^2 = 4.$$

Другой пример неассоциативной бинарной операции:  $M = \mathbb{Z}$  и  $a \circ b := a - b$ .

Полугруппу обычно обозначают  $(S, \circ)$ .

**Определение 3.** Полугруппа  $(S, \circ)$  называется *моноидом*, если в ней есть *нейтральный элемент*, то есть такое элемент  $e \in S$ , что  $e \circ a = a \circ e = a$  для любого  $a \in S$ .

**Замечание.** Если в полугруппе есть нейтральный элемент, то он один. В самом деле,  $e_1 \circ e_2 = e_1 = e_2$ .

**Определение 4.** Моноид  $(S, \circ)$  называется *группой*, если для каждого элемента  $a \in S$  найдется *обратный элемент*, то есть такой  $b \in S$ , что  $a \circ b = b \circ a = e$ .

Обратный элемент обозначается  $a^{-1}$ .

Группу принято обозначать  $(G, \circ)$  или просто  $G$ , когда понятно, о какой операции идёт речь. Обычно символ  $\circ$  обозначения операции опускают и пишут просто  $ab$ .

**Определение 5.** Группа  $G$  называется *коммутативной* или *абелевой*, если групповая операция *коммутативна*, то есть  $ab = ba$  для любых  $a, b \in G$ .

Если в случае произвольной группы  $G$  принято использовать мультипликативные обозначения для групповой операции —  $gh, e, g^{-1}$ , то в теории абелевых групп чаще используют аддитивные обозначения, то есть  $a + b, 0, -a$ .

**Определение 6.** *Порядок* группы  $G$  — это число элементов в  $G$ . Группа называется *конечной*, если её порядок конечен, и *бесконечной* иначе.

Порядок группы  $G$  обозначается  $|G|$ .

Приведем несколько серий примеров групп.

1. Числовые аддитивные группы:

$$(\mathbb{Z}, +), (\mathbb{Q}, +), (\mathbb{R}, +), (\mathbb{C}, +), (\mathbb{Z}_n, +).$$

2. Числовые мультипликативные группы:

$$(\mathbb{Q} \setminus \{0\}, \times), (\mathbb{R} \setminus \{0\}, \times), (\mathbb{C} \setminus \{0\}, \times), (\mathbb{Z}_p \setminus \{0\}, \times), \quad p - \text{простое.}$$

3. Группы матриц:

$$\text{GL}_n(\mathbb{R}) = \{A \in \text{Mat}_{n \times n}(\mathbb{R}) \mid \det A \neq 0\} - \text{полная линейная группа};$$

$$\text{SL}_n(\mathbb{R}) = \{A \in \text{Mat}_{n \times n}(\mathbb{R}) \mid \det A = 1\} - \text{специальная линейная группа.}$$

4. Группы перестановок (с операцией композиции):

$$\text{симметрическая группа } S_n - \text{все перестановки длины } n, \quad |S_n| = n!;$$

$$\text{знакопеременная группа } A_n - \text{чётные подстановки длины } n, \quad |A_n| = \frac{n!}{2}.$$

5. Группы преобразований: симметрия, движение.

**Определение 7.** Подмножество  $H$  группы  $G$  называется *подгруппой*, если выполнены следующие три условия:

1.  $e \in H$ ;
2.  $ab \in H$  для любых  $a, b \in H$ ;
3.  $a^{-1} \in H$  для любого  $a \in H$ .

В каждой группе  $G$  есть *несобственные* подгруппы  $H = \{e\}$  и  $H = G$ . Все прочие подгруппы называются *собственными*. Например, чётные числа  $2\mathbb{Z}$  образуют собственную подгруппу в  $(\mathbb{Z}, +)$ .

**Предложение.** Всякая подгруппа в  $(\mathbb{Z}, +)$  имеет вид  $k\mathbb{Z}$  для некоторого целого неотрицательного  $k$ .

*Доказательство.* Очевидно, что все подмножества вида  $k\mathbb{Z}$  являются подгруппами в  $\mathbb{Z}$ .

Пусть  $H \subseteq \mathbb{Z}$  — подгруппа. Если  $H = \{0\}$ , то  $H = 0\mathbb{Z}$ .

Иначе положим  $k = \min(H \cap \mathbb{N}) \neq 0$ . (это множество непусто, так как  $\forall x \implies -x \in H$ )

Тогда  $k\mathbb{Z} \subseteq H$ .

Покажем, что  $k\mathbb{Z} = H$ . Пусть  $a \in H$  — произвольный элемент. Поделим его на  $k$  с остатком.

$a = qk + r$ , где  $q \in \mathbb{Z}$ ,  $0 \leq r < k \implies r = a - qk \in H$ .

В силу выбора  $k$  получаем  $r = 0 \implies a = qk \in k\mathbb{Z}$ . ■

## 2 Подгруппы. Циклические подгруппы. Циклические группы. Порядок элемента. Связь между порядком элемента и порядком порождаемой им циклической подгруппы

Пусть  $G$  — группа,  $g \in G$  и  $n \in \mathbb{Z}$ . Определим степень следующим образом:

$$g^n = \begin{cases} \underbrace{g \cdots g}_n, & n > 0, \\ e, & n = 0 \\ \underbrace{g^{-1} \cdots g^{-1}}_n, & n < 0. \end{cases}$$

Свойства:

1.  $g^m \cdot g^n = g^{m+n}, \forall n, m \in \mathbb{Z};$
2.  $(g^k)^{-1} = g^{-k}, \forall k \in \mathbb{Z};$
3.  $(g^n)^m = g^{nm}, \forall n, m \in \mathbb{Z}.$

**Определение 8.** Пусть  $G$  — группа и  $g \in G$ . *Циклической подгруппой*, порожденной элементом  $g$ , называется подмножество  $\{g^n \mid n \in \mathbb{Z}\}$  в  $G$ .

Циклическая подгруппа, порождённая элементом  $g$ , обозначается  $\langle g \rangle$ . Элемент  $g$  называется *порождающим* или *образующим* для подгруппы  $\langle g \rangle$ .

Например, подгруппа  $2\mathbb{Z}$  в  $(\mathbb{Z}, +)$  является циклической, и в качестве порождающего элемента в ней можно взять  $g = 2$  или  $g = -2$ . Другими словами,  $2\mathbb{Z} = \langle 2 \rangle = \langle -2 \rangle$ .

**Определение 9.** Группа  $G$  называется *циклической*, если найдется такой элемент  $g \in G$ , что  $G = \langle g \rangle$ .

**Определение 10.** Пусть  $G$  — группа и  $g \in G$ . *Порядком* элемента  $g$  называется такое наименьшее натуральное число  $m$ , что  $g^m = e$ . Если такого натурального числа  $m$  не существует, говорят, что порядок элемента  $g$  равен бесконечности.

Порядок элемента обозначается  $\text{ord}(g)$ . Заметим, что  $\text{ord}(g) = 1$  тогда и только тогда, когда  $g = e$ .

**Предложение.** Пусть  $G$  — группа и  $g \in G$ . Тогда  $\text{ord}(g) = |\langle g \rangle|$ .

*Доказательство.* Заметим, что если  $g^k = g^s$ , то  $g^{k-s} = e$ . Поэтому если элемент  $g$  имеет бесконечный порядок, то все элементы  $g^n, n \in \mathbb{Z}$ , попарно различны, и подгруппа  $\langle g \rangle$  содержит бесконечно много элементов. Если же порядок элемента  $g$  равен  $m$ , то из минимальности числа  $m$  следует, что элементы  $e = g^0, g = g^1, g^2, \dots, g^{m-1}$  попарно различны. Далее, для всякого  $n \in \mathbb{Z}$  мы имеем  $n = mq + r$ , где  $0 \leq r < m$ , и

$$g^n = g^{mq+r} = (g^m)^q g^r = e^q g^r = g^r.$$

Следовательно,  $\langle g \rangle = \{e, g, g^2, \dots, g^{m-1}\}$  и  $|\langle g \rangle| = m$ . ■

Ясно, что всякая циклическая группа коммутативна и не более чем счётна. Примерами циклических групп являются группы  $(\mathbb{Z}, +)$  и  $(\mathbb{Z}_n, +), n \geq 1$ .

### 3 Смежные классы. Индекс подгруппы. Теорема Лагранжа

Пусть  $G$  — группа,  $H \subseteq G$  — подгруппа. Определим отношение  $L_H$  следующим образом:  $(a, b) \in L_H \iff a^{-1}b \in H$ .

**Предложение.**  $L_H$  — отношение эквивалентности.

*Доказательство.*

1.  $a^{-1}a = e \in H$ ;
2.  $a^{-1}b \in H \implies b^{-1}a = (a^{-1}b)^{-1} \in H$ ;
3.  $a^{-1}b \in H, b^{-1}c \in H \implies a^{-1}c = (a^{-1}b)(b^{-1}c) \in H$ .

■

Заметим, что  $a^{-1}b \in H \iff b \in aH$ , поэтому класс эквивалентности элемента  $a \in G$  совпадает с множеством  $aH$ .

**Определение 11.** *Левым смежным классом* элемента  $g$  группы  $G$  по подгруппе  $H$  называется подмножество

$$gH = \{gh \mid h \in H\}.$$

Наряду с левым смежным классом можно определить *правый смежный класс* элемента  $g$ :

$$Hg = \{hg \mid h \in H\}.$$

Все дальнейшие доказательства для правых смежных классов формулируются и доказываются аналогично.

**Лемма 3.1.** Пусть  $G$  — конечная группа и  $H \subseteq G$  — конечная подгруппа. Тогда  $|gH| = |H|$  для любого  $g \in G$ .

*Доказательство.* Поскольку  $gH = \{gh \mid h \in H\}$ , в  $gH$  элементов не больше, чем в  $H$ . Если  $gh_1 = gh_2$ , то домножаем слева на  $g^{-1}$  и получаем  $h_1 = h_2$ . Значит, все элементы вида  $gh$ , где  $h \in H$ , попарно различны, откуда  $|gH| = |H|$ . ■

**Определение 12.** Пусть  $G$  — группа и  $H \subseteq G$  — подгруппа. *Индексом* подгруппы  $H$  в группе  $G$  называется число левых смежных классов  $G$  по  $H$ .

Индекс группы  $G$  по подгруппе  $H$  обозначается  $[G : H]$ .

**Теорема 3.2** (Теорема Лагранжа). Пусть  $G$  — конечная группа и  $H \subseteq G$  — подгруппа. Тогда

$$|G| = |H| \cdot [G : H].$$

*Доказательство.* Каждый элемент группы  $G$  лежит в (своём) левом смежном классе по подгруппе  $H$ , разные смежные классы не пересекаются (лемма 1) и каждый из них содержит по  $|H|$  элементов (лемма 2). ■

## 4 Пять следствий из теоремы Лагранжа

**Теорема 4.1** (Теорема Лагранжа). Пусть  $G$  — конечная группа и  $H \subseteq G$  — подгруппа. Тогда

$$|G| = |H| \cdot [G : H].$$

Рассмотрим некоторые следствия из теоремы Лагранжа.

**Следствие.** Пусть  $G$  — конечная группа и  $H \subseteq G$  — подгруппа. Тогда  $|H|$  делит  $|G|$ .

**Следствие.** Пусть  $G$  — конечная группа и  $g \in G$ . Тогда  $\text{ord}(g)$  делит  $|G|$ .

*Доказательство.* Вытекает из следствия 1 и факта, что  $\text{ord}(g) = |\langle g \rangle|$ . ■

**Следствие.** Пусть  $G$  — конечная группа и  $g \in G$ . Тогда  $g^{|G|} = e$ .

*Доказательство.* Согласно следствию 2, мы имеем  $|G| = \text{ord}(g) \cdot s$ , откуда  $g^{|G|} = (g^{\text{ord}(g)})^s = e^s = e$ . ■

**Следствие** (малая теорема Ферма). Пусть  $\bar{a}$  — ненулевой вычет по простому модулю  $p$ . Тогда  $\bar{a}^{p-1} = 1$ .

*Доказательство.* Применим следствие 3 к группе  $(\mathbb{Z}_p \setminus \{0\}, \times)$ . ■

**Следствие.** Пусть  $G$  — группа. Предположим, что  $|G|$  — простое число. Тогда  $G$  — циклическая группа, порождаемая любым своим неединичным элементом.

*Доказательство.* Пусть  $g \in G$  — произвольный неединичный элемент. Тогда циклическая подгруппа  $\langle g \rangle$  содержит более одного элемента и  $|\langle g \rangle|$  делит  $|G|$  по следствию 1. Значит,  $|\langle g \rangle| = |G|$ , откуда  $G = \langle g \rangle$ . ■

## 5 Нормальные подгруппы и факторгруппы

**Определение 13.** Подгруппа  $H$  группы  $G$  называется *нормальной*, если  $gH = Hg$  для любого  $g \in G$ .

*Пример.*

1.  $G$  — абелева. Тогда любая подгруппа  $H$  нормальная.
2.  $G = S_3, H = \{\text{Id}, (12)\}$ . Тогда  $H$  не является нормальной.
3. Несобственные подгруппы  $H = G$  и  $H = \{0\}$  нормальны.

**Предложение.** Для подгруппы  $H \subseteq G$  следующие условия эквивалентны:

1.  $H$  нормальна;
2.  $gHg^{-1} = H$  для любого  $g \in G$ ;
3.  $gHg^{-1} \subseteq H$  для любого  $g \in G$ .

*Доказательство.*

$$(1) \implies (2) \quad gH = Hg \implies gHg^{-1} = H.$$

$$(2) \implies (3) \quad \text{Очев.}$$

$$(3) \implies (1) \quad gHg^{-1} \subseteq H \implies gH \subseteq Hg. \text{ Теперь возьмем } g = g^{-1}. \text{ Тогда } g^{-1}Hg \subseteq H \implies Hg \subseteq gH \implies gh = Hg. \quad \blacksquare$$

Рассмотрим множество смежных классов по нормальной подгруппе  $G/H$ .

Определим на  $G/H$  бинарную операцию, полагая  $(g_1H)(g_2H) = (g_1g_2)H$ .

**Корректность** Пусть  $g'_1H = g_1H$  и  $g'_2H = g_2H$ . Тогда  $g'_1 = g_1h_1, g'_2 = g_2h_2$ , где  $h_1, h_2 \in H$ .

$$(g'_1H)(g'_2H) = (g'_1g'_2)H = (g_1h_1g_2h_2)H = (g_1g_2 \underbrace{g_2^{-1}h_1g_2}_{\in H})h_2H \subseteq (g_1g_2)H \implies (g'_1g'_2)H = (g_1g_2)H.$$

Структура группы  $G/H$ .

1. Ассоциативность очевидна.
2. Нейтральный элемент —  $eH$ .
3. Обратный к  $gH$  —  $g^{-1}H$ .

**Определение 14.** Множество  $G/H$  с указанной операцией называется *факторгруппой* группы  $G$  по нормальной подгруппе  $H$ .

*Пример.* Если  $G = (\mathbb{Z}, +)$  и  $H = n\mathbb{Z}$ , то  $G/H$  — это в точности группа вычетов  $(\mathbb{Z}_n, +)$ .



## 6 Гомоморфизмы групп. Простейшие свойства гомоморфизмов. Изоморфизмы групп. Ядро и образ гомоморфизма групп, их свойства

**Определение 15.** Пусть  $(G, \circ)$  и  $(F, \cdot)$  — две группы.

Отображение  $\varphi: G \rightarrow F$  называется *гомоморфизмом*, если

$$\varphi(g_1 \circ g_2) = \varphi(g_1) \cdot \varphi(g_2), \quad \forall g_1, g_2 \in G.$$

**Замечание.** Пусть  $\varphi: G \rightarrow F$  — гомоморфизм групп, и пусть  $e_G$  и  $e_F$  — нейтральные элементы группы  $G$  и  $F$  соответственно. Тогда:

1.  $\varphi(e_G) = e_F$ .
2.  $\varphi(a^{-1}) = \varphi(a)^{-1}$  для любого  $a \in G$ .

*Доказательство.*

1. Имеем  $\varphi(e_G) = \varphi(e_G e_G) = \varphi(e_G) \varphi(e_G)$ .

Теперь умножая крайние части этого равенства на  $\varphi(e_G)^{-1}$ , получим  $e_F = \varphi(e_G)$ .

2.  $\varphi(g \cdot g^{-1}) = e_F = \varphi(g) \varphi(g^{-1})$ . Умножив обе части на  $\varphi(g)^{-1}$  получаем необходимое. ■

**Определение 16.** Гомоморфизм групп  $\varphi: G \rightarrow F$  называется *изоморфизмом*, если отображение  $\varphi$  биективно.

**Определение 17.** Группы  $G$  и  $F$  называют *изоморфными*, если между ними существует изоморфизм.

Обозначение:  $G \simeq F$ .

В алгебре рассматривают с точностью до изоморфизма: изоморфные группы считаются «одинаковыми».

**Определение 18.** С каждым гомоморфизмом групп  $\varphi: G \rightarrow F$  связаны его *ядро*

$$\ker \varphi = \{g \in G \mid \varphi(g) = e_F\},$$

и *образ*

$$\operatorname{Im} \varphi = \varphi(G) = \{a \in F \mid \exists g \in G : \varphi(g) = a\}.$$

Ясно, что  $\ker \varphi \subseteq G$  и  $\operatorname{Im} \varphi \subseteq F$  — подгруппы.

**Лемма 6.1.** Гомоморфизм групп  $\varphi: G \rightarrow F$  инъективен тогда и только тогда, когда  $\ker \varphi = \{e_G\}$ .

*Доказательство.* Ясно, что если  $\varphi$  инъективен то  $\ker \varphi = \{e_G\}$ .

Обратно, пусть  $g_1, g_2 \in G$  и  $\varphi(g_1) = \varphi(g_2)$ . Тогда  $g_1^{-1}g_2 \in \ker \varphi$ , поскольку  $\varphi(g_1^{-1}g_2) = \varphi(g_1^{-1})\varphi(g_2) = \varphi(g_1)^{-1}\varphi(g_2) = e_F$ . Отсюда  $g_1^{-1}g_2 = e_G$  и  $g_1 = g_2$ . ■

**Следствие.** Гомоморфизм групп  $\varphi: G \rightarrow F$  является изоморфизмом тогда и только тогда, когда  $\ker \varphi = \{e_G\}$  и  $\operatorname{Im} \varphi = F$ .

**Предложение.** Пусть  $\varphi: G \rightarrow F$  — гомоморфизм групп. Тогда подгруппа  $\ker \varphi$  нормальна в  $G$ .

*Доказательство.* Достаточно проверить, что  $g^{-1}hg \in \ker \varphi$  для любых  $g \in G$  и  $h \in \ker \varphi$ . Это следует из цепочки равенств

$$\varphi(g^{-1}hg) = \varphi(g^{-1})\varphi(h)\varphi(g) = \varphi(g^{-1})e_F\varphi(g) = \varphi(g^{-1})\varphi(g) = \varphi(g)^{-1}\varphi(g) = e_F. \quad \blacksquare$$

## 7 Теорема о гомоморфизме для групп

**Теорема 7.1** (Теорема о гомоморфизме). Пусть  $\varphi: G \rightarrow F$  — гомоморфизм групп. Тогда группа  $\text{Im } \varphi$  изоморфна факторгруппе  $G/\ker \varphi$ .

*Доказательство.* Рассмотрим отображение  $\psi: G/\ker \varphi \rightarrow \text{Im } \varphi$ , заданное формулой  $\psi(g \ker \varphi) = \varphi(g)$ .

1. Корректность.

$$g_1 \ker \varphi = g_2 \ker \varphi \implies g_1 h_1 = g_2 h_2 \text{ для некоторых } h_1, h_2 \in \ker \varphi.$$

$$\psi(g_1 \ker \varphi) = \varphi(g_1) = \varphi(g_1 h_1) = \varphi(g_2 h_2) = \varphi(g_2) = \psi(g_2 \ker \varphi).$$

2.  $\psi$  — гомоморфизм.

$$\psi((g_1 \ker \varphi)(g_2 \ker \varphi)) = \psi((g_1 g_2) \ker \varphi) = \varphi(g_1 g_2) = \varphi(g_1) \varphi(g_2) = \psi(g_1 \ker \varphi) \psi(g_2 \ker \varphi).$$

3. Сюръективность из построения.

4. Инъективность.

$$\psi(g_1 \ker \varphi) = \psi(g_2 \ker \varphi) \implies \varphi(g_1) = \varphi(g_2) \implies \varphi(g_1) \varphi(g_2)^{-1} = e_F \implies \varphi(g_1 g_2^{-1}) = e_F \implies g_1 g_2^{-1} \in \ker \varphi \implies g_1 \ker \varphi = g_2 \ker \varphi. \quad \blacksquare$$

Тем самым, чтобы удобно реализовать факторгруппу  $G/H$ , можно найти такой гомоморфизм  $\varphi: G \rightarrow F$  в некоторую группу  $F$ , что  $H = \ker \varphi$ , и тогда  $G/H \simeq \text{Im } \varphi$ .

*Пример.* Пусть  $G = (\mathbb{R}, +)$  и  $H = (\mathbb{Z}, +)$ . Рассмотрим группу  $F = (\mathbb{C} \setminus \{0\}, \times)$  и гомоморфизм

$$\varphi: G \rightarrow F, \quad a \mapsto e^{2\pi i a} = \cos(2\pi a) + i \sin(2\pi a).$$

Тогда  $\ker \varphi = H$  и факторгруппа  $G/H$  изоморфна окружности  $S^1$ , рассматриваемой как подгруппа в  $F$ , состоящая из комплексных чисел с модулем 1.

## 8 Классификация циклических групп

Пусть  $G$  — циклическая группа. Тогда

1. Если  $|G| = \infty$ , то  $G \simeq (\mathbb{Z}, +)$ ,
2. Если  $|G| = n < \infty$ , то  $G \simeq (\mathbb{Z}_n, +)$ .

*Доказательство.* Пусть  $G = \langle g \rangle$ . Рассмотрим отображение  $\varphi: \mathbb{Z} \rightarrow G$ ,  $k \mapsto g^k$ .

Тогда  $\varphi(k+l) = g^{k+l} = g^k g^l = \varphi(k)\varphi(l)$ , поэтому  $\varphi$  — гомоморфизм. Из определения циклической группы следует, что  $\varphi$  сюръективен, то есть  $\text{Im } \varphi = G$ . Тогда по теореме о гомоморфизме мы получаем  $G \simeq \mathbb{Z}/\ker \varphi$ . Так как  $\ker \varphi$  — подгруппа в  $\mathbb{Z}$ , то получаем  $\ker \varphi = m\mathbb{Z}$  для некоторого  $m \geq 0$ . (так как любая подгруппа  $\mathbb{Z}$  имеет вид  $k\mathbb{Z}$ ) Если  $m = 0$ , то  $\ker \varphi = \{0\}$ , откуда  $G \simeq \mathbb{Z}/\{0\} \simeq \mathbb{Z}$ . Если  $m > 0$ , то  $G \simeq \mathbb{Z}/m\mathbb{Z} = \mathbb{Z}_m$ . ■

## 9 Прямое произведение групп. Разложение конечной циклической группы. Теорема о строении конечных абелевых групп

**Определение 19.** *Прямым произведением* групп  $G_1, \dots, G_m$  называется множество

$$G_1 \times \dots \times G_m = \{(g_1, \dots, g_m) \mid g_1 \in G_1, \dots, g_m \in G_m\}$$

с операциями  $(g_1, \dots, g_m)(g'_1, \dots, g'_m) = (g_1g'_1, \dots, g_mg'_m)$ .

Ясно, что эта операция ассоциативна, обладает нейтральным элементом  $(e_{G_1}, \dots, e_{G_m})$  и для каждого элемента  $(g_1, \dots, g_m)$  есть обратный элемент  $(g_1^{-1}, \dots, g_m^{-1})$ .

**Замечание.** Группа  $G_1 \times \dots \times G_m$  коммутативна в точности тогда, когда коммутативна каждая из групп  $G_1, \dots, G_m$ .

**Замечание.** Если все группы  $G_1, \dots, G_m$  конечны, то  $|G_1 \times \dots \times G_m| = |G_1| \dots |G_m|$ .

**Определение 20.** Группа  $G$  *раскладывается в прямое произведение* своих подгрупп  $H_1, \dots, H_m$  если отображение  $H_1 \times \dots \times H_m \rightarrow G$ ,  $(h_1, \dots, h_m) \mapsto h_1 \dots h_m$ , является изоморфизмом.

**Теорема 9.1.** Пусть  $n = ml$  — разложение натурального числа  $n$  на два взаимно простых сомножителя. Тогда имеет место изоморфизм групп

$$\mathbb{Z}_n \simeq \mathbb{Z}_m \times \mathbb{Z}_l.$$

*Доказательство.* Рассмотрим отображение

$$\varphi: \mathbb{Z}_n \rightarrow \mathbb{Z}_m \times \mathbb{Z}_l, \quad (k \bmod n) \mapsto (k \bmod m, k \bmod l).$$

Поскольку  $m$  и  $l$  делят  $n$ , отображение  $\varphi$  определено корректно. Ясно, что  $\varphi$  — гомоморфизм. Далее,  $a \bmod n \in \ker \varphi \implies a \bmod m = 0, a \bmod l = 0 \implies a : m, a : l$ .

Так как  $\text{НОД}(m, l) = 1$ , то  $a : n \implies a \bmod n = 0 \implies \ker \varphi = \{0\}$ .

Отсюда следует, что гомоморфизм  $\varphi$  инъективен. Поскольку множества  $\mathbb{Z}_n$  и  $\mathbb{Z}_m \times \mathbb{Z}_l$  содержат одинаковое число элементов, отображение  $\varphi$  биективно. ■

**Следствие.** Пусть  $n \geq 2$  — натуральное число и  $n = p_1^{k_1} \dots p_s^{k_s}$  — его разложение в произведение простых множителей (где  $p_i \neq p_j$  при  $i \neq j$ ). Тогда имеет место изоморфизм групп

$$\mathbb{Z}_n \simeq \mathbb{Z}_{p_1^{k_1}} \times \dots \times \mathbb{Z}_{p_s^{k_s}}.$$

**Определение 21.** Конечная абелева группа  $A$  называется *примарной*, если  $|A| = p^k$ , где  $p$  — простое и  $k \in \mathbb{N}$ .

**Теорема 9.2.** Пусть  $A$  — конечная абелева группа. Тогда  $A \simeq \mathbb{Z}_{p_1^{k_1}} \times \dots \times \mathbb{Z}_{p_t^{k_t}}$ , где  $p_1, \dots, p_t$  — простые числа (не обязательно различные!) и  $k_1, \dots, k_t \in \mathbb{N}$ . Более того, набор примарных циклических множителей  $\mathbb{Z}_{p_1^{k_1}}, \dots, \mathbb{Z}_{p_t^{k_t}}$  определен однозначно с точностью до перестановки (в частности, число этих множителей определено однозначно).

## 10 Экспонента конечной абелевой группы и критерий цикличности

**Определение 22.** Экспонентой конечной абелевой группы  $A$  называется число

$$\exp A := \min\{m \in \mathbb{N} \mid ma = 0 \ \forall a \in A\}.$$

**Замечание.**

1. Так как  $ma = 0 \iff m : \text{ord}(a) \ \forall a \in A$  и  $m \in \mathbb{Z}$ , то определение экспоненты можно переписать ещё в виде  $\exp A = \text{НОД}\{\text{ord}(a) \mid a \in A\}$ .
2. Так как  $|A| : \text{ord}(a) \ \forall a \in A$ , то  $|A|$  — общее кратное множества  $\{\text{ord}(a) \mid a \in A\}$ , а значит,  $|A| : \exp A$ .  
В частности,  $\exp A \leq |A|$ .

**Предложение.**  $\exp A = |A| \iff A$  — циклическая группа.

*Доказательство.* Пусть  $|A| = n = p_1^{k_1} \cdot \dots \cdot p_s^{k_s}$  — разложение на простые множители, где  $p_i$  — простое и  $k_s \in \mathbb{N}$ . ( $p_i \neq p_j$  при  $i \neq j$ )

$\Leftarrow$  Если  $A = \langle a \rangle$ , то  $\text{ord } a = n$ , откуда сразу получаем  $\exp A = n$ .

$\Rightarrow$  Если  $\exp A = n$ , то для  $i = 1, \dots, s$  существует элемент  $c_i \in A$ , такой что  $\text{ord } c_i = p_i^{k_i} m_i$ , где  $m_i \in \mathbb{N}$ . Для каждого  $i = 1, \dots, s$  положим  $a_i = m_i c_i$ , тогда  $\text{ord}(a_i) = p_i^{k_i}$ . Теперь рассмотрим элемент  $a = a_1 + \dots + a_s$  и покажем, что  $\text{ord}(a) = n$ . Пусть  $ma = 0$  для некоторого  $m \in \mathbb{N}$ , то есть  $ma_1 + \dots + ma_s = 0$ . При фиксированном  $i \in \{1, \dots, s\}$  умножим обе части последнего равенства на  $n_i := n/p_i^{k_i}$ . Легко видеть, что  $mn_i a_j = 0$  при всех  $i \neq j$ , поэтому в левой части выживет только слагаемое  $mn_i a_i$ , откуда получаем  $mn_i a_i = 0$ . Следовательно,  $mn_i : p_i^{k_i}$ , а так как  $n_i$  не делится на  $p_i$ , то  $m : p_i^{k_i}$ . В силу произвольности выбора  $i$  отсюда вытекает, что  $m : n$ . Так как  $na = 0$ , то мы окончательно получаем  $\text{ord}(a) = n$ . Значит,  $A = \langle a \rangle$  — циклическая группа. ■

- 11 Криптография с открытым ключом. Задача дискретного логарифмирования. Система Диффи Хеллмана обмена ключами. Криптосистема Эль-Гамала

## 12 Кольца. Коммутативные кольца. Обратимые элементы, делители нуля и нильпотенты. Примеры колец. Поля. Критерий того, что кольцо вычетов является полем

**Определение 23.** *Кольцо* — это множество  $R$ , на котором заданы две бинарные операции «+» (сложение) и «·» (умножение), удовлетворяющее следующим условиям:

1.  $(R, +)$  — абелева группа;
2.  $\forall a, b, c \in R \quad a(b + c) = ab + ac$  и  $(a + b)c = ac + bc$ ;
3.  $\forall a, b, c \in R \quad (ab)c = a(bc)$ .
4.  $\exists 1 \in R$ , такой что  $1 \cdot a = a \cdot 1 = a \quad \forall a \in R$ .

**Замечание.**

1.  $0 \cdot a = a \cdot 0 = 0 \quad \forall a \in R$ ;
2. Если  $|R| > 1$ , то  $1 \neq 0$ .

*Доказательство.*

1.  $a0 = a(0 + 0) = a0 + a0$ , откуда  $0 = a0$ .
2. Следует из условий выше.

■

*Пример.*

1. числовые кольца  $\mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$ ;
2. кольцо  $\mathbb{Z}_n$  вычетов по модулю  $n$ ;
3. кольцо матриц  $\text{Mat}_{n \times n}(\mathbb{R})$ ;
4.  $\mathbb{R}[x]$  — кольцо многочленов от переменной  $x$  с коэффициентами из  $\mathbb{R}$ ;
5.  $\mathbb{R}[x_1, \dots, x_n]$  — кольцо многочленов от нескольких переменных  $x_1, \dots, x_n$  с коэффициентами из  $\mathbb{R}$ ;
6.  $F(M, \mathbb{R})$  — кольцо функций из множества  $M$  в  $\mathbb{R}$  (с поточечными операциями сложения и умножения):  
 $(f_1 + f_2)(m) := f_1(m) + f_2(m), \quad (f_1 \cdot f_2)(m) := f_1(m) \cdot f_2(m)$ .

**Определение 24.** Кольцо  $R$  называется *коммутативным*, если  $ab = ba$  для всех  $a, b \in R$ .

**Определение 25.** Элемент  $a \in R$  называется *обратимым*, если найдется такой  $b \in R$ , что  $ab = ba = 1$ .

**Замечание.** Все обратимые элементы кольца  $R$  образуют группу по умножению.

**Определение 26.** Элемент  $a \in R$  называется *левым* (соответственно *правым*) *делителем нуля*, если  $a \neq 0$  и  $\exists b \in R, b \neq 0$ , такой что  $ab = 0$  (соответственно  $ba = 0$ ).

**Замечание.** Если  $R$  коммутативно, то множества левых и правых делителей нуля совпадают. Тогда левые и правые делители нуля называются просто «делителями нуля».

**Замечание.** Все делители нуля в  $R$  необратимы. Если  $ab = 0, a \neq 0, b \neq 0$  и существует  $a^{-1}$ , то получаем  $a^{-1}ab = a^{-1}0$ , откуда  $b = 0$  — противоречие.

**Определение 27.** Элемент  $a \in R$  называется *нильпотентным* (*нильпотентом*), если  $a \neq 0$  и найдется такое  $n \in \mathbb{N}$ , что  $a^n = 0$ .

**Замечание.** Всякий нильпотент является делителем нуля: если  $a \neq 0$  и  $n$  минимально, то  $a = a^{n-1} = 0$ .

**Определение 28.** Кольцо  $R$  называется *полем*, если оно коммутативно (ассоциативно с 1),  $0 \neq 1$  и любой ненулевой элемент обратим.

*Пример.*  $\mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}, \mathbb{Z}_2$ .

**Предложение.** Кольцо вычетов  $\mathbb{Z}_n$  является полем  $\iff n$  — простое число.

*Доказательство.* Соглашение:  $a \in \mathbb{Z} \rightsquigarrow \bar{a} \in \mathbb{Z}_n$  — вычет  $a \bmod n$ .

$\implies$  Если  $n = 1$ , то  $\mathbb{Z}_n = \{0\}$  — не поле.

Если  $n > 1$  и  $n = m \cdot k$ , где  $1 < m, k < n$ , то  $\bar{m} \cdot \bar{k} = \bar{0} \implies$  в  $\mathbb{Z}_n$  есть делитель нуля  $\implies \mathbb{Z}_n$  — не поле.

$\impliedby$   $n = p$  — простое. Пусть  $\bar{a} \in \mathbb{Z}_p \setminus \{\bar{0}\}$ .

Тогда  $\text{НОД}(a, p) = 1 \implies \exists k, l \in \mathbb{Z}$ , такие что  $ak + pl = 1$ .

Значит,  $\bar{a} \cdot \bar{k} + \bar{p} \cdot \bar{l} = \bar{1} \implies \bar{a} \cdot \bar{k} = \bar{1} \implies \bar{a}$  обратим.

■

### 13 Идеалы колец. Факторкольцо кольца по идеалу. Гомоморфизмы и изоморфизмы колец. Ядро и образ гомоморфизма колец. Теорема о гомоморфизме для колец

**Определение 29.** Подмножество  $I \subseteq R$  называется (*двусторонним*) *идеалом*, если

1.  $I$  — подгруппа по сложению;
2.  $\forall \in I \forall r \in R \quad ar \in I, ra \in I$ .

Обозначение  $I \triangleleft R$ .

*Пример.* Несобственные идеалы  $\{0\}, R$ . Остальные называются *собственными*.

**Определение 30.** Множество  $(a) := \{ra \mid r \in R\}$  называется *главным идеалом*, порождаемым элементом  $a$ .

*Пример.*  $(k) = k\mathbb{Z}$  — главный идеал в  $\mathbb{Z}$ .

**Замечание.**  $(a) = R \iff a$  обратим  
 $(a) = \{0\} \iff a = 0$ .

**Определение 31.** Если  $S \subseteq R$  — подмножество, то

$$(S) := \{r_1 s_1 + \dots + r_k s_k \mid r_i \in R, s_i \in S\}$$

называется *идеалом, порожденным подмножеством  $S$* .

Рассмотрим факторгруппу  $(R/I, +)$  и введём на ней операцию умножения, полагая  $(a + I) \cdot (b + I) := ab + I$ .

**Корректность**  $a + I = a' + I, b + I = b' + I \implies a' = a + x, b' = b + y$ , где  $x, y \in I$ . Тогда,

$$(a' + I)(b' + I) = a'b' + I = (a + x)(b + y) + I = ab + \underbrace{ay + xb + xy}_{\in I} + I = ab + I.$$

**Замечание.**  $R/I$  — кольцо.

**Определение 32.**  $R/I$  называется *факторкольцом* кольца  $R$  по идеалу  $I$ .

*Пример.*  $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z} = \mathbb{Z}_n$ .

**Определение 33.** Если  $R, S$  — два кольца, то отображение  $\varphi: R \rightarrow S$  называется *гомоморфизмом* колец, если  $\varphi(a + b) = \varphi(a) + \varphi(b)$  и  $\varphi(ab) = \varphi(a) \cdot \varphi(b)$ .

*Изоморфизм* — биективный гомоморфизм.

Пусть  $\varphi: R \rightarrow R'$  — гомоморфизм колец.

Тогда  $\ker \varphi := \{r \in R \mid \varphi(r) = 0\} \subseteq R$

$$\operatorname{Im} \varphi := \varphi(R) \subseteq R'$$

**Замечание.**

1.  $\ker \varphi \triangleleft R$ ;
2.  $\operatorname{Im} \varphi$  — подкольцо в  $R'$ .

*Доказательство.*

1. Так как  $\varphi$  — гомоморфизм абелевых групп, то  $\ker \varphi$  является подгруппой в  $R$  по сложению. Покажем теперь, что  $ra \in \ker \varphi$  и  $ar \in \ker \varphi$  для произвольных элементов  $a \in \ker \varphi$  и  $r \in R$ .

Имеем  $\varphi(ra) = \varphi(r)\varphi(a) = \varphi(r)0 = 0$ , откуда  $ra \in \ker \varphi$ . Аналогично для  $ar \in \ker \varphi$ . ■

**Теорема 13.1** (Теорема о гомоморфизме колец).  $R/\ker \varphi \simeq \operatorname{Im} \varphi$ .

*Доказательство.* Пусть  $I := \ker \varphi$ . Тогда из доказательства теоремы о гомоморфизме для групп отображение  $\psi: R/I \rightarrow \operatorname{Im} \varphi$ ,  $\psi(a + I) := \varphi(a)$  является изоморфизмом групп (по сложению).

Остается проверить, что  $\psi$  — гомоморфизм колец.

$$\psi((a + I)(b + I)) = \psi(ab + I) = \varphi(ab) = \varphi(a)\varphi(b) = \psi(a + I)\psi(b + I). \quad \blacksquare$$

*Пример.*  $K$  — поле,  $a \in K$ ,  $\varphi: K[x] \rightarrow K$ ,  $f \mapsto f(a)$ .

Это гомоморфизм, он сюръективен ( $b = \varphi(b)$ ).

$$\ker \varphi = (x - a) \implies K[x]/(x - a) \simeq K.$$



- 14 Кольцо многочленов от одной переменной над полем: деление с остатком, наибольший общий делитель двух многочленов, теорема о его существовании и линейном выражении

- 15 Теорема о том, что кольцо многочленов от одной переменной над полем является кольцом главных идеалов

**16    Неприводимые многочлены. Факториальность кольца многочленов от одной переменной над полем**

- 17 Критерий того, что факторкольцо  $\mathbb{K}[x]/(h)$  является полем. Базис и размерность факторкольца  $\mathbb{K}[x]/(h)$  как векторного пространства над полем  $\mathbb{K}$

**18    Лексикографический порядок на множестве одночленов от нескольких переменных. Лемма о конечности убывающих цепочек одночленов**

- 19 Старший член многочлена от нескольких переменных. Элементарная редукция многочлена относительно другого многочлена. Лемма о конечности цепочек элементарных редукций относительно системы многочленов

**20**    Остаток многочлена относительно заданной системы многочленов. Системы Грёбнера. Характеризация систем Грёбнера в терминах цепочек элементарных редукций





**22** Базис Грёбнера идеала в кольце многочленов от нескольких переменных, теорема о трёх эквивалентных условиях. Решение задачи вхождения многочлена в идеал

- 23 Лемма о конечности цепочек одночленов, в которых каждый следующий одночлен не делится ни на один из предыдущих. Алгоритм Бухбергера построения базиса Грёбнера идеала



**25** Редуцируемость к нулю  $S$ -многочлена двух многочленов с взаимно простыми старшими членами

**26 Характеристика поля. Расширение полей. Конечное расширение и его степень. Степень композиции двух расширений**

- 27 Присоединение корня неприводимого многочлена. Существование конечного расширения исходного поля, в котором заданный многочлен (а) имеет корень; (б) разлагается на линейные множители

**28 Алгебраические и трансцендентные элементы. Минимальный многочлен алгебраического элемента и его свойства**

## 29 Подполе в расширении полей, порождённое алгебраическим элементом





## 31 Теорема существования для конечных полей

## 32 Цикличность мультипликативной группы конечного поля и неприводимые многочлены над $\mathbb{Z}_p$