

# Алгебра. Экзамен

Бобень Вячеслав

@darkkeks, GitHub

За билеты начиная с 17-го спасибо Даниэлю Хайбулину и Анастасии Григорьевой

@kiDaniel, @weifoll

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 1.1.** 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 1.2.** 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 1.3.** 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 1.4.** 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 1.5.** 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 1.6.** *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 1.7.** 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 1.1.** 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  $k \in H$ ,  $0 \leq r < k \implies r = a - qk \in H$ .

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 2.1.** 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 2.2.** Группа  $G$  называется *циклической*, если найдется такой элемент  $g \in G$ , что  $G = \langle g \rangle$ .

**Определение 2.3.** 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 2.1.** 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 3.1.**  $L_H$  — 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 3.1.** *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 3.2.** 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 3.1** (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 (предложение 3.1) и каждый из них содержит по  $|H|$  элементов (лемма 3.1). ■

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

**Следствие 4.2.** 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 4.3.** 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 4.4** (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 4.5.** 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 5.1.** 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 5.1.** 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 5.2.** 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 6.1.** 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 6.2.** Гомоморфизм групп  $\varphi: G \rightarrow F$  называется *изоморфизмом*, если отображение  $\varphi$  биективно.

**Определение 6.3.** 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 6.4.** 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 6.1.** Гомоморфизм групп  $\varphi: G \rightarrow F$  является изоморфизмом тогда и только тогда, когда  $\ker \varphi = \{e_G\}$  и  $\operatorname{Im} \varphi = F$ .

**Предложение 6.1.** 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 9.1.** *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 9.2.** 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

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

1. Корректность следует из того, что  $n : m$ ,  $n : l$ ;

2.  $\varphi$  — гомоморфизм:

$$\varphi((a+b) \bmod n) = \varphi(a \bmod n) + \varphi(b \bmod n).$$

3.  $\varphi$  инъективен:

Если  $\varphi(a \bmod n) = (0, 0)$ , то  $a$  делится на  $m$  и на  $l$ . Но так как  $\text{НОД}(m, l) = 1$ , получаем что  $a$  кратно  $n$ .

А значит  $a \equiv 0 \pmod{n}$ . То есть  $\ker \varphi = \{0\}$ .

4.  $\varphi$  сюръективно, так как  $|\mathbb{Z}_n| = n = m \cdot l = |\mathbb{Z}_m \times \mathbb{Z}_l|$ . ■

**Следствие 9.1.** 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 9.3.** 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 10.1.** 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  $\exp A = \text{НОК}\{\text{ord}(a) \mid a \in A\}$ .
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 10.1.**  $\exp A = |A| \iff A$  — 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

Пусть  $G$  — конечная абелева группа (например,  $G = (\mathbb{Z}_p \setminus \{0\}, \times)$ , где  $p$  — большое простое число) и  $g \in G$  — элемент достаточно большого порядка.

**Задача 11.1.** Задача дискретного логарифмирования.

Дано  $g \in G$ ,  $\text{ord}(g) \gg 0$ ,  $h \in \langle g \rangle$ . Найти такое  $k \in \mathbb{N}$ , что  $g^k = h$ .

При этом задача возведения в степень имеет быстрый алгоритм — повторное возведение в квадрат.

$$g^{16} = \left( \left( (g^2)^2 \right)^2 \right)^2 \quad g^{15} = \left( (g^2 \cdot g)^2 \cdot g \right)^2 \cdot g.$$

Сама же задача нахождения степени решается только переборными и близкими к перебору способами.

**Задача 11.2.** Система Диффи-Хеллмана обмена ключами (1976).

$G$  и  $g$  известны всем.

Алиса фиксирует свое секретное  $\alpha \in \mathbb{N}$  и сообщает всем пользователям  $g^\alpha$ .

Боб совершает аналогичные действия —  $\beta \in \mathbb{N}$ ,  $g^\beta$ .

Теперь Алиса и Боб возводят элемент другого в свою секретную степень, оба получают  $(g^\alpha)^\beta = (g^\beta)^\alpha = g^{\alpha\beta}$ .

Теперь по этому ключу можно устроить шифрованный канал связи, к которому никто не имеет доступа. При этом действительно в силу сложности задачи дискретного логарифмирования по  $g^\alpha$  и  $g^\beta$  нельзя быстро получить  $g^{\alpha\beta}$ .

**Задача 11.3.** Криптосистема Эль-Гамала.

Алиса фиксирует свое секретное  $\alpha \in \mathbb{N}$  и сообщает всем пользователям  $g^\alpha$ .

Боб хочет передать Алисе элемент  $h \in G$ .

Для этого Боб фиксирует какое-то  $\beta \in \mathbb{N}$  и объявляет пару  $\{g^\beta, h \cdot (g^\alpha)^\beta\}$ .

Отсюда  $h = (h \cdot (g^\alpha)^\beta) \cdot ((g^\beta)^\alpha)^{-1} = (h \cdot (g^\alpha)^\beta) \cdot (g^\beta)^{|G|-\alpha}$ , то есть зная  $\alpha$  можно легко получить  $h$ .

Следовательно, получить его может только Алиса, а всем остальным придется решать задачу дискретного логарифмирования.

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

**Определение 12.1.** *Кольцо* — это множество  $R$ , на котором заданы две бинарные операции « $+$ » (сложение) и « $\cdot$ » (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 12.2.** Кольцо  $R$  называется *коммутативным*, если  $ab = ba$  для всех  $a, b \in R$ .

**Определение 12.3.** 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 12.4.** 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 12.5.** 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  $a \cdot a^{n-1} = 0$ .

**Определение 12.6.** 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 12.1.** 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 13.1.** Подмножество  $I \subseteq R$  называется (двусторонним) идеалом, если

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

Обозначение  $I \triangleleft R$ .

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

**Определение 13.2.** 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 13.3.** 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 13.4.**  $R/I$  называется факторкольцом кольца  $R$  по идеалу  $I$ .

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

**Определение 13.5.** 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

Пусть  $K$  — поле,  $K[x]$  — кольцо многочленов от  $x$  с коэффициентами из  $K$ .

$$K[x] = \{a_n x^n + \dots + a_1 x + a_0 \mid n \geq 0, a_i \in K\}.$$

Тогда  $\forall f \in K[x] \setminus \{0\}$  определена степень  $\deg f$ .

Удобно полагать, что  $\deg 0 = -\infty$ .

Тогда  $\deg(fg) = \deg f + \deg g$ ,

$$\deg(f + g) \leq \max(\deg f, \deg g)$$

Обратимые элементы в  $K[x] : \{f \mid \deg f = 0\} \not\cong 0$ .

Делителей нуля нет.

**Теорема 14.1** (деление с остатком).  $\forall f \in K[x] \forall g \in K[x] \setminus \{0\} \exists! q, r \in K[x]$ , такие что  $f = q \cdot g + r$  и либо  $r = 0$ , либо  $\deg r < \deg g$ .

*Доказательство.*

**Существование** Индукция по  $\deg f$ .

Если  $f = 0$ , то можно взять  $q = r = 0$ . Далее считаем  $\deg f = n \geq 0$ .

Пусть  $f = a_n x^n + \dots + a_1 x + a_0$  ( $a_n \neq 0$ ),  $g = b_m x^m + \dots + b_1 x + b_0$  ( $b_m \neq 0$ ).

Если  $\deg f < \deg g$ , то достаточно взять  $q = 0$  и  $r = f$ .

Иначе положим  $h = f - \frac{a_n}{b_m} x^{n-m} g$ , тогда  $\deg h < \deg f$ .

По предположению индукции  $h = q \cdot g + r$ , где либо  $r = 0$ , либо  $\deg r < \deg g$ . Тогда  $f = \left(q + \frac{a_n}{b_m} x^{n-m}\right) g + r$  — искомое представление.

**Единственность** Пусть  $f = q_1 g + r_1 = q_2 g + r_2$  — два представления.

Тогда  $(q_1 - q_2)g = r_2 - r_1$ . Если  $q_1 - q_2 \neq 0$ , то  $\deg(q_1 - q_2)g \geq \deg g > \deg(r_2 - r_1)$  — противоречие. Значит,  $q_1 = q_2$  и тогда  $r_1 = r_2$ . ■

**Замечание.** Доказательство дает алгоритм деления «в столбик».

**Определение 14.1.** Пусть  $f, g \in K[x]$ ,  $g \neq 0$ . Говорят, что  $f$  делится на  $g$  ( $g$  делит  $f$ ), если  $\exists h \in K[x]$ , такой что  $f = g \cdot h$ .

**Определение 14.2.** Наибольший общий делитель многочленов  $f, g \in K[x]$  — это такой  $h \in K[x]$ , что

1.  $h$  делит оба  $f, g$ ;
2.  $h$  имеет максимальную возможную степень.

**Теорема 14.2.** Пусть  $f, g \in K[x]$  и  $(f, g) \neq (0, 0)$ . Тогда

1.  $\exists \text{НОД}(f, g) =: h$ ;
2.  $\exists u, v \in K[x]$ , такие что  $h = u \cdot f + v \cdot g$ .

*Доказательство.*

1. Прямой ход алгоритма Евклида;
2. Обратный ход алгоритма Евклида. ■

**Замечание.** НОД( $f, g$ ) определен однозначно с точностью до пропорциональности.

$$2 = \text{НОД}(2x^2, 2x + 1) = 1.$$

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

**Определение 15.1.** Коммутативное кольцо  $R$  без делителей нуля называется *кольцом главных идеалов* (КГИ), если всякий идеал в  $R$  является главным.

*Пример.*  $\mathbb{Z}$  — все идеалы это  $k\mathbb{Z} = (k)$  ( $k \geq 0$ ) — главные.

**Предложение 15.1.**  $K[x]$  — КГИ.

*Доказательство.* Пусть  $I \triangleleft K[x]$ . Если  $I = \{0\}$ , то  $I = (0)$  — главный.

Если  $I \neq \{0\}$ , то выберем в  $I$  многочлен наименьшей степени  $g \neq 0$ .

Тогда  $(g) \subseteq I$ . Пусть  $f \in I$ , разделим  $f$  на  $g$  с остатком:

$f = q \cdot g + r$ , где либо  $r = 0$ , либо  $\deg r < \deg g$ . Но тогда  $r = f - q \cdot g \in I$ .

Так как  $\deg g$  минимально, то  $r = 0 \implies f \in (g) \implies I \subseteq (g)$ .

Итог:  $I = (g)$ . ■

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

**Определение 16.1.** Многочлен  $h \in K[x]$ ,  $\deg h > 0$  называется *неприводимым*, если его нельзя представить в виде  $h = h_1 h_2$ , где  $\deg h_1 < \deg h$  и  $\deg h_2 < \deg h$ .

Иначе  $h$  называется *приводимым*.

**Замечание.**

1.  $h \in K[x]$ ,  $\deg h = 1 \implies h$  неприводим;
2.  $h \in K[x]$ ,  $\deg h \geq 2$ ,  $h$  неприводим  $\implies h$  не имеет корней в  $K$  (следствие теоремы Безу);
3.  $h \in K[x]$ ,  $\deg h \in \{2, 3\} \implies [h \text{ неприводим} \iff h \text{ не имеет корней в } K]$ .

*Пример.*  $K = \mathbb{C}$ ,  $h \in \mathbb{C}[x]$ ,  $\deg h \geq 1$ .

Если  $\deg h \geq 2$ , то  $h$  имеет корень  $\implies h$  неприводим  $\iff \deg h = 1$ .

**Лемма 16.1.** Если  $h \in K[x]$  — неприводим и  $h$  делит  $g_1 \cdot \dots \cdot g_k$  для некоторых  $g_1, \dots, g_k \in K[x]$ , то  $\exists i : h$  делит  $g_i$ .

*Доказательство.* Индукция по  $k$ .

$k = 1$  — ясно.

$k = 2$ . Пусть  $g_1 \not\vdash h$ . Так как  $h$  неприводим, то  $\text{НОД}(g_1, h) = 1 \implies \exists u, v \in K[x]$ , такие что  $1 = ug_1 + vh$ . Умножим на  $g_2$ :

$$g_2 = u \cdot \underbrace{g_1 \cdot g_2}_{\vdash h} + v \cdot \underbrace{h \cdot g_2}_{\vdash h} \implies g_2 \vdash h.$$

Для  $k > 2$  надо применить предыдущее рассуждение для  $(g_1 \cdot \dots \cdot g_{k-1}) \cdot g_k$  и воспользоваться предположением индукции. ■

**Теорема 16.1.** Пусть  $f \in K[x]$  и  $\deg f \geq 1$ . Тогда

1.  $\exists$  разложение  $f = h_1 \cdot \dots \cdot h_k$ , где все  $h_i$  неприводимы;
2. это разложение единственно с точностью до перестановки множителей и пропорциональности. Точнее, если  $f = h'_1 \cdot \dots \cdot h'_m$  — другое такое разложение, то  $k = m$  и после подходящей перестановки множителей  $h_i$  и  $h'_i$  пропорциональны.

*Пример.*  $f = 6x^3 + 6x \implies f = (3x)(2x^2 + 2) = (x^2 + 1)(6x)$  — одинаковые разложения с точки зрения теоремы.

*Доказательство.* Пусть  $\deg f = n$ . Индукция по  $n$ .

$n = 1 \implies f$  неприводим, единственность есть.

$n > 1$

**Существование**  $f$  неприводим  $\implies$  уже есть разложение.

Если же  $f$  приводим, то  $f = f_1 \cdot f_2$ ,  $\deg f_i < n$ .

Тогда по предположению индукции  $f_1 = g_1 \cdot \dots \cdot g_p$ ,  $f_2 = h_1 \cdot \dots \cdot h_q$ , где  $g_i, h_j$  — неприводимы.

Значит,  $f = g_1 \cdot \dots \cdot g_p \cdot h_1 \cdot \dots \cdot h_q$  — разложение  $f$  на неприводимые.

**Единственность** Пусть  $f = h_1 \cdot \dots \cdot h_k = h'_1 \cdot \dots \cdot h'_m$  — два разложения на неприводимые множители.

Если  $h_1$  делит  $h'_1 \cdot \dots \cdot h'_m$ , то по лемме существует  $i$ , такое что  $h_1$  делит  $h'_i$ .

Переставив множители, будем считать, что  $h_1$  делит  $h'_1$ . Так как  $h_1, h'_1$  неприводимы, то  $h'_1 = \varepsilon \cdot h_1$ , где  $\varepsilon \in K \setminus \{0\}$ . Так как в  $K[x]$  нет делителей нуля, то можем сократить на  $h_1$ , получим

$$h_2 \cdot \dots \cdot h_k = \varepsilon h'_2 \cdot \dots \cdot h'_m \quad \leftarrow \deg < n.$$

Осталось применить предположение индукции. ■

**Замечание.**

1. Всякое КГИ факториально;
2.  $K[x_1, \dots, x_n]$ ,  $n \geq 2$  — это не КГИ, но тоже факториально.

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

Пусть  $h = a_n x^n + \dots + a_1 x + a_0 \in K[x]$  — многочлен,  $\deg h = n > 0$ .

Тогда, рассмотрим  $F := K[x]/(h)$   $f \in K[x] \rightsquigarrow \bar{f} := f + (h) \in F$ .

**Замечание.**  $\bar{f} = \bar{0} \iff f \in (h)$ .

**Предложение 17.1.**  $F$  — поле  $\iff h$  неприводим.

*Доказательство.*

$\implies$  Если  $h = h_1 \cdot h_2$  и  $\deg h_i < n$ , то  $\bar{h} = \bar{h}_1 \cdot \bar{h}_2$ .

Так как  $\bar{h} = 0$ , то  $\bar{h}_1 \cdot \bar{h}_2 = 0$ . Значит в  $F$  есть делители нуля  $\implies F$  — не поле — противоречие.

$\impliedby$   $f \in K[x], \bar{f} \neq \bar{0} \implies f \not\in (h) \implies \text{НОД}(f, h) = 1$ .

Значит,  $\exists u, v \in K[x]$ , такие что  $1 = uf + vh$ . Отсюда  $\bar{1} = \bar{u} \cdot \bar{f} + \bar{v} \cdot \bar{h} = \bar{u} \cdot \bar{f}$ .

Получили, что  $\bar{f}$  обратим  $\implies F$  — поле. ■

*Пример.*

1.  $\mathbb{R}[x]/(x^2 + 1)$  — поле ( $\simeq \mathbb{C}$ ).

2.  $\mathbb{R}[x]/(x^2)$  — не поле,  $\bar{x}$  — нильпотент,  $\bar{x}^2 = \bar{0}$ .

Рассмотрим отображение  $K \rightarrow F, \lambda \mapsto \bar{\lambda} = \lambda + (h)$ , оно инъективно. Тогда  $K$  отождествляется с подполем в  $F$ , значит  $F$  становится векторным пространством над  $K$ .

**Предложение 17.2.** Элементы  $\bar{1}, \bar{x}, \dots, \bar{x}^{n-1}$  образуют базис в  $F$  над  $K$ . В частности  $\dim_K F = n$ .

*Доказательство.* Пусть  $\bar{f} \in F, f \in K[x]$ . Поделим  $f$  на  $h$  с остатком:

$f = q \cdot h + r$ , где  $r = 0$  или  $\deg r < n$ . Тогда,  $\bar{f} = \underbrace{\bar{q} \cdot \bar{h}}_{=\bar{0}} + \bar{r} = \bar{r} \in \langle \bar{1}, \bar{x}, \dots, \bar{x}^{n-1} \rangle$ .

Если  $b_0 \bar{1} + b_1 \bar{x} + \dots + b_{n-1} \bar{x}^{n-1} = \bar{0}$  для некоторых  $b_i \in K$ , то  $b_0 + b_1 x + \dots + b_{n-1} x^{n-1} \in (h) \implies b_0 + b_1 x + \dots + b_{n-1} x^{n-1} : h \implies b_0 = b_1 = \dots = b_{n-1} = 0$ . ■

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

Пусть  $K$  — поле,  $R = K[x_1, \dots, x_n]$ .

$M := \{ax_1^{k_1} \cdot \dots \cdot x_n^{k_n} \mid a \in K \setminus \{0\}, k_i \in \mathbb{N} \cup \{0\}\}$  — все одночлены от  $x_1, \dots, x_n$ .

**Определение 18.1** (Лексикографический порядок на  $M$ ).

$$ax_1^{i_1} \cdot \dots \cdot x_n^{i_n} \succ bx_1^{j_1} \cdot \dots \cdot x_n^{j_n} \iff \begin{array}{l} i_1 = j_1 \\ i_2 = j_2 \\ \dots \\ i_{k-1} = j_{k-1} \\ i_k > j_k. \end{array}$$

*Пример.*  $x_1^2 x_2 \succ x_1^2 x_3^{228}$ .

**Замечание.**

1.  $m_1, m_2, m_3 \in M, m_1 \prec m_2 \implies m_1 m_3 \prec m_2 m_3$ ;
2.  $m_1, m_2, m_3 \in M, m_1 \prec m_2, m_2 \prec m_3 \implies m_1 \prec m_3$ .

$g \in R \rightsquigarrow M(g) := \{\text{все одночлены входящие в } g\}$ .

**Лемма 18.1.** Не существует бесконечных убывающих цепочек  $m_1 \succ m_2 \succ m_3 \succ \dots$ , где  $m_i \in M \forall i$ .

*Доказательство.* От противного.

Пусть  $m_1 \succ m_2 \succ m_3 \succ \dots$  — бесконечная убывающая цепочка. Пусть  $m_i = a_i x_1^{k_1(i)} \cdot \dots \cdot x_n^{k_n(i)} \forall i \in \mathbb{N}$ .

Имеем

$$\begin{array}{ccccccccccc} k_1(1) & \geq & k_1(2) & \geq & k_1(3) & \geq & \dots & \implies & \exists i_1 \in \mathbb{N} : k_1(i) = k_1(i_1) \forall i \geq i_1 \\ k_2(i_1) & \geq & k_2(i_1 + 1) & \geq & k_2(i_1 + 2) & \geq & \dots & \implies & \exists i_2 \geq i_1 : k_2(i) = k_2(i_2) \forall i \geq i_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \implies & \exists i_n \geq i_{n-1} : k_n(i) = k_n(i_n) \forall i \geq i_n \end{array}$$

Итог: при  $i \geq i_n$  все  $m_i$  имеют одинаковые наборы степеней — противоречие. ■

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

**Определение 19.1.**  $f \in R \setminus \{0\} \implies$  старший член  $L(f)$  — это наибольший в лексикографическом порядке одночлен, присутствующий в  $f$ .

**Лемма 19.1** (Лемма о старшем члене). Пусть  $f, g \in R \setminus \{0\}$ . Тогда,  $L(f, g) = L(f) \cdot L(g)$ .

*Доказательство.*  $u \in M(f), v \in M(g) \implies u \preccurlyeq L(f), v \preccurlyeq L(g)$ .

$$uv \preccurlyeq L(f) \cdot v \preccurlyeq L(f) \cdot L(g) \implies uv \preccurlyeq L(f) \cdot L(g), \text{ причем равенство достигается при } \begin{cases} u = L(f), \\ v = L(g). \end{cases}$$

Значит,  $L(f) \cdot L(g)$  больше любого другого одночлена в  $fg \implies L(f) \cdot L(g) = L(f \cdot g)$ . ■

Пусть  $f, g \in R \setminus \{0\}$ ,  $g$  содержит одночлен  $m$ , такой что  $m \preccurlyeq L(f)$ . Тогда  $m = L(f) \cdot m'$ , где  $m' \in M$ .

Элементарная редукция:  $g \xrightarrow{f} g' := g - m' \cdot f$ .

В  $g$  одночлен  $m$  заменяется суммой нескольких меньших одночленов.

Пусть  $F \subseteq R \setminus \{0\}$ .

**Определение 19.2.**  $g$  редуцируем к  $g'$  при помощи  $F$ , если существует конечная цепочка элементарных редукций

$$g \xrightarrow{f_1} g_1 \xrightarrow{f_2} g_2 \xrightarrow{f_3} \dots \xrightarrow{f_k} g_k = g', \text{ где } f_i \in F.$$

Обозначение:  $g \xrightarrow{F} g'$ .

$g$  нередуцируем относительно  $F$ , если  $\forall m \in M(g) \forall f \in F \quad m \not\preccurlyeq L(f)$ .

**Лемма 19.2** (Конечность цепочек элементарных редукций).  $F \subseteq R \setminus \{0\} \implies$  всякая последовательность элементарных редукций относительно  $F$  за конечное число шагов приводит к нередуцируемому многочлену.

Обозначение:  $L_k(g)$  —  $k$ -й по старшинству одночлен в  $g \in R$ .

*Доказательство.* От противного.

Пусть существует бесконечная цепочка элементарных редукций  $g_1 \xrightarrow{f_1} g_2 \xrightarrow{f_2} g_3 \xrightarrow{f_3} \dots$

В силу леммы о конечности убывающих цепочек одночленов имеем

$$\begin{array}{ccccccc} L(g_1) & \succ & L(g_2) & \succ & L(g_3) & \succ & \dots \implies \exists i_1 \in \mathbb{N} : L(g_i) = L(g_{i_1}) \quad \forall i \geq i_1 \\ L_2(g_{i_1}) & \succ & L_2(g_{i_1} + 1) & \succ & L_2(g_{i_1} + 2) & \succ & \dots \implies \exists i_2 \geq i_1 : L_2(g_i) = L_2(g_{i_2}) \quad \forall i \geq i_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{array}$$

Итог:  $L(g_{i_1}) = L(g_{i_2}) \succ L_2(g_{i_2}) = L_2(g_{i_3}) \succ L_3(g_{i_3}) = L_3(g_{i_4}) \succ \dots \implies L(g_{i_1}) \succ L_2(g_{i_2}) \succ L_3(g_{i_3}) \succ \dots$  — бесконечно убывающая цепочка одночленов — противоречие. ■

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

**Определение 20.1.** Если  $g \xrightarrow{F} r$  и  $r$  нередуцируем, то  $r$  называется *остатком* многочлена  $g$  относительно  $F$ .

**Замечание.** Вообще говоря, остаток определен неоднозначно.

**Определение 20.2.** Множество  $F$  называется *системой Грёбнера*, если  $\forall g \in R$  остаток  $g$  относительно  $F$  определен однозначно, то есть не зависит от цепочки приводящих к нему элементарных преобразований.

**Предложение 20.1.** Следующие условия эквивалентны:

1.  $F$  — система Грёбнера;
2.  $\forall g \in R$  обладает свойством:

Если  $g \xrightarrow{f_1} g_1$  и  $g \xrightarrow{f_2} g_2$  — две элементарных редукции, то  $\exists g' \in R$ , такой что  $g_1 \xrightarrow{F} g'$  и  $g_2 \xrightarrow{F} g'$ .

*Доказательство.*

(1)  $\implies$  (2) В качестве  $g'$  можно взять остаток  $g$  относительно  $F$ .

(2)  $\implies$  (1) Пусть

$B(F) :=$  «все многочлены из  $R$ , для которых остаток относительно  $F$  определен неоднозначно».

$E_F(g)$  — множество всех элементарных редукций многочлена  $g$  относительно  $F$ .

Пусть  $B(F) \neq \emptyset$  и  $g \in B(F)$ .

Если  $E_F(g) \cap B(F) \neq \emptyset$ , то возьмём  $g_1 \in E_F(g) \cap B(F)$ .

Если  $E_F(g_1) \cap B(F) \neq \emptyset$ , то возьмём  $g_2 \in E_F(g_1) \cap B(F)$ .

И так далее.

По лемме о конечности цепочек элементарных редукций,  $\exists i \in \mathbb{N}$ , такой что  $E_F(g_i) \cap B(F) = \emptyset$ .

Тогда  $\exists$  две такие цепочки элементарных редукций

$$\left. \begin{array}{l} g_i \rightarrow h_1 \rightarrow \cdots \rightarrow r_1 \\ g_i \rightarrow h_2 \rightarrow \cdots \rightarrow r_2 \end{array} \right\} \text{остатки } r_1 \neq r_2.$$

По условию  $\exists r \in R$  — нередуцируемый многочлен, такой что  $h_1 \rightsquigarrow r$ ,  $h_2 \rightsquigarrow r$ .

Так как  $h_1, h_2 \notin B(F)$ , то  $r_1 = r = r_2$  — противоречие. ■

**Замечание.**

1.  $g \xrightarrow{F} g_1 \implies \forall m \in M \quad mg \xrightarrow{F} mg_1$ ;
2.  $g_1 - g_2 \xrightarrow{F} 0 \implies \exists g' : g_1 \rightsquigarrow g' \text{ и } g_2 \rightsquigarrow g'$ .

## 21 $S$ -многочлены. Критерий Бухбергера

Пусть  $f_1, f_2 \in R$ .

Рассмотрим  $m = \text{НОК}(L(f_1), L(f_2)) \in M$ .

Пусть  $m_1, m_2 \in M$  таковы, что  $m = m_1 L(f_1) = m_2 L(f_2)$ .

**Определение 21.1.** Многочлен  $S(f_1, f_2) := m_1 f_1 - m_2 f_2$  называется  $S$ -многочленом, построенным по  $f_1, f_2$ .

**Замечание.**  $S(f_2, f_1) = -S(f_1, f_2)$ .

**Теорема 21.1** (Критерий Бухбергера). Для системы  $F \subseteq R \setminus \{0\}$  следующие условия эквивалентны:

1.  $F$  — система Грёбнера;
2.  $\forall f_1, f_2 \in F \quad S(f_1, f_2) \overset{F}{\rightsquigarrow} 0$ .

*Доказательство.*

(1)  $\implies$  (2)  $m = \text{НОК}(L(f_1), L(f_2)) = m_1 \cdot L(f_1) = m_2 \cdot L(f_2)$ .

Значит  $m_1 f_1 \xrightarrow{f_1} 0$  и  $m_1 f_1 \xrightarrow{f_2} [m_1 f_1 - m_2 f_2] = S(f_1, f_2) \overset{F}{\rightsquigarrow} r$  — остаток.

Но так как  $F$  — система Грёбнера,  $r = 0$ .

(2)  $\implies$  (1) Пусть  $g \in R$ ,  $m_1, m_2 \in M(g)$  и мы сделали элементарную редукцию  $m_1$  при помощи  $f_1 \in F$  и  $m_2$  при помощи  $f_2$ .

$$\begin{aligned} m_1 &= m'_1 \cdot L(f_1), & m_2 &= m'_2 \cdot L(f_2) \\ g \xrightarrow{f_1} g_1 &= g - m'_1 f_1, & g \xrightarrow{f_2} g_2 &= g - m'_2 f_2. \end{aligned}$$

Достаточно показать, что  $\underbrace{g_1 - g_2}_{m'_2 f_2 - m'_1 f_1} \overset{F}{\rightsquigarrow} 0$ .

**Случай 1**  $L(m'_2 f_2)$  и  $L(m'_1 f_1)$  не пропорциональны, можно считать  $L(m'_2 f_2) \succ L(m'_1 f_1)$ .

$$m'_2 f_2 - m'_1 f_1 \xrightarrow{f_2} -m'_1 f_1 \xrightarrow{f_1} 0.$$

**Случай 2**  $L(m'_2 f_2) = L(m'_1 f_1)$ . Тогда  $\exists m \in M$ , такое что  $m'_2 f_2 - m'_1 f_1 = m S(f_1, f_2) \overset{F}{\rightsquigarrow} 0$ .

**Случай 3**  $L(m'_2 f_2) = \alpha L(m'_1 f_1)$  при  $\alpha \neq 1$ . Тогда  $L(m'_2 f_2 - m'_1 f_1) = (\alpha - 1)L(m'_1 f_1)$ . Значит,

$$m'_2 f_2 - m'_1 f_1 \xrightarrow{f_1} m'_2 f_2 - m'_1 f_1 - (\alpha - 1)m'_1 f_1 = m'_2 f_2 - \alpha m'_1 f_1.$$

Получили  $L(m'_2 f_2) = L(\alpha m'_1 f_1)$ , а значит попали в случай 2. ■

**Следствие 21.1.** Если  $f_1, f_2 \in F$ ,  $S(f_1, f_2) \overset{F}{\rightsquigarrow} r$  — остаток и  $r \neq 0$ , то  $F$  — не система Грёбнера.

*Доказательство.* Если  $F$  — система Грёбнера, то  $S(f_1, f_2) \rightsquigarrow 0$  и  $S(f_1, f_2) \rightsquigarrow r$ . Так как остаток определен однозначно, то  $r = 0$  — противоречие. ■



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

Пусть  $I \triangleleft R$  – идеал.

**Определение.** Множество  $F$  называется **базисом Грёбнера** идеала  $I$ , если

- (1)  $I = (F)$
- (2)  $F$  – система Грёбнера.

**Теорема.**  $F \subseteq I \setminus \{0\} \Rightarrow$  следующие условия эквивалентны:

- (1)  $F$  – базис Грёбнера в  $I$
- (2)  $\forall g \in I \ g \xrightarrow{F} 0$
- (3)  $\forall g \in I \setminus \{0\} \exists f \in F : L(g) \dot{=} L(f)$

*Доказательство.* (1)  $\Rightarrow$  (2): пусть  $I_0 = \{g \in I \mid g \xrightarrow{F} 0\}$ , тогда

$$1) 0 \in I_0$$

$$2) g \in I_0 \Rightarrow -g \in I_0$$

3)  $g_1, g_2 \in I_0 \Rightarrow g_1 + g_2 \in I_0$  Пусть  $g = (g_1 + g_2) - g_2 \xrightarrow{F} 0 \Rightarrow$  существует остаток  $r$ , такой что  $g_1 + g_2 \xrightarrow{F} r, g_2 \xrightarrow{F} r$   
Но  $F$  – базис Грёбнера  $\Rightarrow$  остаток определён однозначно и для  $g_2$  получаем  $r = 0$ .

$$\Rightarrow g_1 + g_2 \xrightarrow{F} 0$$

$$4) g \in I_0 \Rightarrow \forall m \in M \ mg \in I_0$$

$$1) - 3) \Rightarrow I_0 - \text{подгруппа в } I \text{ по сложению.}$$

$$3) - 4) \Rightarrow I_0 - \text{идеал в } R.$$

$$F \subseteq I_0 \Rightarrow I = (F) \subseteq I_0 \Rightarrow I_0 = I$$

$$(2) \Rightarrow (1) \ g \in I \Rightarrow g \xrightarrow{F} 0 \Rightarrow g = m_1 f_1 + \dots + m_k f_k, \text{ где } m_1, \dots, m_k \in M, f_1, \dots, f_k \in F$$

$$\Rightarrow g \in (F) \Rightarrow I \subseteq (F). \text{ Но } F \subseteq I \Rightarrow (F) \subseteq I \Rightarrow I = (F)$$

$$f_1 f_2 \in F \Rightarrow S(f_1, f_2) \in (F) = I \Rightarrow S(f_1, f_2) \xrightarrow{F} 0 \Rightarrow F - \text{система Грёбнера по критерию Бухбергера.}$$

$$(3) \Rightarrow (2) \ g \in I, g \xrightarrow{F} r, \text{ где } r - \text{остаток.} \Rightarrow r = g - \underset{I}{m_1 f_1} - \dots - \underset{I}{m_k f_k}, \ m_i \in M, f_i \in F$$

$$\Rightarrow r \in I, \text{ если } r \neq 0, \text{ то } L(r) \dot{=} L(f) \text{ для некоторого } f \in F$$

$$\Rightarrow r \text{ редуцируем дальше} - \text{противоречие} \Rightarrow r = 0 \quad (2) \Rightarrow (3) \forall g \in I, g \xrightarrow{F} 0 \Rightarrow \text{в соотв. цепочке элементарных редукций}$$

$$\text{есть одна, применяемая к } L(g) \Rightarrow \exists f \in F : L(g) \dot{=} L(f) \quad \blacksquare$$

**Следствие.**  $F$  – базис Грёбнера в  $I \Rightarrow$

- 1)  $\forall g \in I$  любая цепочка элементарных редукций относительно  $F$  приводит к 0
- 2)  $\forall g \in R : g \in I \Leftrightarrow \text{остаток } g \text{ относительно системы } f \text{ равен } 0$

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

**Лемма.** Д бесконечных последовательностей одночленов  $m_1, m_2, \dots$ , таких что  $m_i \nmid m_j \quad \forall i > j$ .

*Доказательство.* Индукция по  $n$ :  $n = 1 \Rightarrow$  степени убывают  $\Rightarrow$  цепочка конечна.

Пусть доказано для  $< n$ , докажем для  $n$ . Пусть есть бесконечная последовательность  $m_1, m_2, \dots, m_i \nmid m_j \quad \forall i > j$ :  
 $m_i = a_i x_1^{k_1(i)} \cdot \dots \cdot x_n^{k_n(i)}$ . Тогда  $\forall j \geq 2 \quad m_j \nmid m_1 \Rightarrow \exists i \in \{1, \dots, n\}$ , такое что  $k_i(j) < k_i(1)$  для **бесконечного числа значений**  $j$ .

Без ограничения общности считаем  $i = n$ . Перейдя к подпоследовательности, можем считать, что  $k_n(j) < k_n(1)$ ,  $\forall j \geq 2$ . Тогда  $k_n(j)$  принимает лишь конечное число значений  $\Rightarrow$  какое-то из этих значений встретится бесконечно много раз. Снова перейдя к подпоследовательности, можем считать, что  $k_n(1) = k_n(2) = \dots$ , полагая  $x_n = 1$ , получим последовательность от  $x_1, \dots, x_{n-1}$  с тем же свойством – противоречие. ■

**Алгоритм Бухбергера построения базиса Грёбнера идеала.**

Дано:  $I = (F), F = f_1, \dots, f_k$

Перебираем все пары  $i < j$ . Если  $\exists i < j$ , такое что  $S(f_i, f_j) \xrightarrow{F} r_1 \neq 0$ ,  $r_1$  - остаток, то добавляем  $r_1$  в  $F$  и повторяем процедуру для  $F \cup \{r_1\}$ . В итоге получаем  $\forall i, j : S(f_i, f_j) \xrightarrow{F \cup \{r_n\}} 0$ . Полученное  $F$  – это система Грёбнера по критерию Бухбергера  $\Rightarrow F$  - базис Грёбнера в  $I$ . Если алгоритм не закончится за конечное число шагов, то получим бесконечную последовательность  $r_1, r_2, r_3, \dots$ , такую что  $L(r_i) \nmid L(r_j)$  при  $i > j$  – противоречие с леммой.

## 24 Теорема Гильберта о базисе идеала

**Теорема.** Всякий идеал в  $R$  порождается конечным числом элементов.

*Доказательство.*  $I \triangleleft R$ .

$I = \{0\} = I = (0)$  – ок.

$I \neq 0$ . Выберем  $r_1 \in I \setminus \{0\}$ . Если  $I = (r_1)$ , то ок;

Иначе выберем  $f_2 \in I \setminus (r_1)$ ,  $f_2 \xrightarrow{\{r_1\}} r_2$  – остаток.

Тогда  $r_2 \in I \setminus (r_1)$ ,  $L(r_2) \not\subset L(r_1)$ . Если  $I = (r_1, r_2)$ , то ок.

Иначе выберем  $f_3 \in I \setminus (r_1, r_2)$ ,  $f_3 \xrightarrow{\{r_1, r_2\}} r_3$  – остаток.

Тогда  $r_3 \in I \setminus (r_1, r_2)$ ,  $L(r_3) \not\subset L(r_1), L(r_2)$ .

...

Если процесс не закончится, то получится бесконечная последовательность  $r_1, r_2, \dots$ , такая что  $L(r_i) \not\subset L(r_j)$  при  $i > j$  – невозможно по лемме  $\Rightarrow \exists k : I = (r_1, \dots, r_k)$  ■

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

**Предложение.**  $f_1, f_2 \in R \setminus \{0\}, \text{НОД}(L(f_1), L(f_2)) = 1 \Rightarrow S(f_1, f_2) \xrightarrow{\{f_1, f_2\}} 0$

*Доказательство.* Достаточно показать, что  $f_1, f_2$  – базис Грёбнера в идеале  $(f_1, f_2)$ .

Пусть  $g \in (f_1, f_2)$  и  $g = h_1 f_1 + h_2 f_2$ , где  $h_1, h_2 \in R$ . Покажем, что  $L(g) \dot{\prec} L(f_1)$  или  $L(g) \dot{\prec} L(f_2)$ .

Пусть это не так, тогда  $L(h_1 f_1) = -L(h_2 f_2) \Rightarrow$  [по лемме о старшем члене]  $\Rightarrow L(h_1) = L(f_2) \cdot m, L(h_2) = -L(f_1) \cdot m, m \in M$ .

Положим  $h'_1 = h_1 - f_2 m, h'_2 = h_2 + f_1 m; L(h'_1) \prec L(h_1), L(h'_2) \prec L(h_2)$ . Имеем  $g = (h'_1 + f_2 m) f_1 + (h'_2 - f_1 m) f_2 = h'_1 f_1 + h'_2 f_2$  и  $L(h'_1 f_1) = -L(h'_2 f_2)$ . Повторяя процедуру, получим бесконечную цепочку равенств  $g = h_1 f_1 + h_2 f_2 = h'_1 f_1 + h'_2 f_2 = \dots = h_1^{(i)} f_1 + h_2^{(i)} f_2 = \dots$ , причём  $L(h_1) \succ L(h'_1) \succ \dots \succ L(h_1^{(i)}) \succ \dots$  – противоречие. ■

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

Поля  $\mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}, \mathbb{Z}_p$ , где  $p$  – простое.  $K[x]/(h)$  ( $K$  – поле,  $h$  – неприводимый многочлен)

**Определение. Характеристика** поля  $K$  – наименьшее  $p \in \mathbb{N}$ , такое что  $\underbrace{1 + 1 + \dots + 1}_p = 0$

Если такого  $p$  не существует, то говорят, что характеристика поля  $K$  равна 0.

Обозначение:  $\text{char } K$

Примеры:  $\text{char } \mathbb{Q} = \text{char } \mathbb{C} = \text{char } \mathbb{R} = 0$ ,  $\text{char } \mathbb{Z}_p = p$

**Предложение.**  $K$  – поле  $\Rightarrow$  либо  $\text{char } K = 0$ , либо  $\text{char } K$  – простое число.

*Доказательство.*  $\text{char } K = p$ , пусть  $p > 0$ . Так как  $0 \neq 1$ , то  $p \geq 2$ .

Если  $p = m \cdot k$ , тогда  $0 = \underbrace{1 + \dots + 1}_p = \underbrace{1 + \dots + 1}_{m \cdot k} = \underbrace{(1 + \dots + 1)}_m \cdot \underbrace{(1 + \dots + 1)}_k$ . Но мы знаем, что  $\underbrace{1 + \dots + 1}_k \neq 0$  и  $\underbrace{1 + \dots + 1}_m \neq$

0, а значит в  $K$  есть делители нуля, из чего следует, что  $K$  – не поле. Противоречие.

$\Rightarrow p$  – простое. ■

**Определение.**  $K, F$  – поля,  $K \subseteq F \Rightarrow F$  называется **расширением** поля  $K$ .

( $K \subseteq F''$  – расширение полей)

**Определение. Степень** расширения полей  $K \subseteq F$  – это размерность  $F$  как векторного пространства над  $K$ .

Обозначение:  $[F : K]$

Примеры:  $[\mathbb{C} : \mathbb{R}] = 2$ ,  $[\mathbb{R} : \mathbb{Q}] = \infty$

**Определение.** Расширение полей  $K \subseteq F$  называется **конечным**, если  $[F : K] < \infty$

**Лемма о степени композиции расширения полей.**

Пусть  $K \subseteq F, F \subseteq L$  – конечные расширения полей. Тогда  $K \subseteq L$  – тоже конечное расширение, причём  $[L : K] = [L : F] \cdot [F : K]$

*Доказательство.* Пусть  $e_1, \dots, e_n$  – базис  $F$  над  $K$ ,  $f_1, \dots, f_m$  – базис  $L$  над  $F$ .

Покажем, что  $\{e_i f_j\}$  – базис  $L$  над  $K$ .

1)  $a \in L \Rightarrow a = \sum_{j=1}^m a_j f_j$ , где  $a_j \in F$ .

При этом  $a_j$  раскладывается по базису  $e_1, \dots, e_n$ :  $a_j = \sum_{i=1}^n b_{ij} e_i$ , где  $b_{ij} \in K$

$\Rightarrow a = \sum_{j=1}^m (\sum_{i=1}^n b_{ij} e_i) f_j = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n b_{ij} e_i f_j$  Итог:  $L = \langle e_i f_j \rangle$

2) Если  $\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n c_{ij} e_i f_j = 0$ , где  $c_{ij} \in K$ , то  $= \sum_{j=1}^m (\sum_{i=1}^n c_{ij} e_i) f_j = 0$

$\{f_j\}$  – базис  $L$  над  $F \Rightarrow \forall j \sum_{i=1}^n c_{ij} e_i = 0$ , знаем, что  $\{e_i\}$  – базис  $F$  над  $K$

$\Rightarrow \forall i, j : c_{ij} = 0 \Rightarrow$  Система  $\{e_i f_j\}$  линейно независима. ■

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

$K$  – поле,  $h = a_n x^n + \dots + a_1 x + a_0 \in K[x], a_n \neq 0, \deg h = n$

$h$  неприводим  $\Rightarrow F := K[x]/(h) \quad K \subseteq F \quad [F : K] = n$

$\forall f \in K[x] \rightsquigarrow \bar{f} = f + (h) \in F$

**Предложение.** Элемент  $\bar{x}$  является корнем многочлена  $h$  в  $F$ .

*Доказательство.*  $h(\bar{x}) = a_n \bar{x}^n + \dots + a_1 \bar{x} + a_0 = \bar{h} = \bar{0}$  в поле  $F$ . ■

**Замечание.** Переход от  $K$  к  $F$  называется присоединением корня неприводимого многочлена  $h$ .

**Следствие.**  $f \in K[x], \deg f \geq 1 \exists$  конечное расширение  $K \subseteq F$ , такое что  $f$  имеет корень в  $F$ .

*Доказательство.* Достаточно взять  $F := K[x]/(h)$ , где  $h$  – неприводимый делитель  $f$ . ■

**Следствие.**  $\forall f \in K[x], \deg f \geq 1 \exists$  конечное расширение  $K \subseteq F$ , такое что  $f$  разлагается на линейные множители над  $F$ .

*Доказательство.* Предыдущее следствие + следствие из теоремы Безу + индукция по  $\deg f$ . ■

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

$$K \subseteq F$$

**Определение.** Элемент  $\alpha \in F$  называется **алгебраическим** над  $K$ , если  $\exists f \in K[x], \deg f \geq 1$ , такой что  $f(\alpha) = 0$  и **трансцендентным** иначе.

**Определение.** **Минимальным многочленом** элемента  $\alpha \in F$ , алгебраического над  $K$ , называется такой  $h \in K[x], \deg h \geq 1$ , что  $h(\alpha) = 0$  и  $h$  имеет минимальную степень.

### Свойства минимального многочлена

Пусть  $K \subseteq F$  – расширение полей,  $\alpha \in F$  – элемент, алгебраический над  $K$ , и  $h \in K[x]$  – его минимальный многочлен. Тогда:

1)  $h$  определён однозначно с точностью до пропорциональности.

2) Для всякого  $f \in K[x]$  имеем  $f(\alpha) = 0 \Leftrightarrow f : h$

3)  $h$  неприводим над  $K$

*Доказательство.* Положим  $I = \{f \in K[x] \mid f(\alpha) = 0\}$ . Тогда  $I$  – идеал в  $K[x]$ .

Так как  $K[x]$  – КГИ, то  $\exists g \in I : I = (g)$ .

$h(\alpha) = 0 \Rightarrow h \in I \Rightarrow h : g \Rightarrow h$  пропорционален  $g$  в силу минимальности  $\Rightarrow$  (1) и (2)

(3) Если  $h = h_1 h_2, \deg h_i < \deg h, i = 1, 2$ . Тогда либо  $h_1(\alpha) = 0$  либо  $h_2(\alpha) = 0$ , ну а это противоречие, так как мы выбирали минимальный  $h$ . ■

## 29 Подполе в расширении полей, порождённое алгебраическим элементом

$K \subseteq F, \alpha \in F$  – элемент, алгебраический над  $K$ ,  $h_\alpha$  – минимальный многочлен для  $\alpha$   
 $K(\alpha) :=$  пересечение всех подполей в  $F$ , содержащих  $K$  и  $\alpha$  = наименьшее подполе в  $F$ , содержащее  $K$  и  $\alpha$ .

**Замечание.**  $K(\alpha) = \left\{ \frac{f(\alpha)}{g(\alpha)} \mid f, g \in K[x], g(\alpha) \neq 0 \right\}$

**Теорема.** Существует изоморфизм  $\psi : K[x]/(h_\alpha) \xrightarrow{\sim} K(\alpha)$ , такое что  $\psi(\bar{x}) = \alpha$

*Доказательство.* Рассмотрим гомоморфизм  $\varphi : K[x] \rightarrow F, f \mapsto f(\alpha)$

Тогда  $\ker \varphi = (h_\alpha) \Rightarrow$  по теореме о гомоморфизме для колец получаем изоморфизм  $\psi : K[x]/(h_\alpha) \xrightarrow{\sim} \text{Im} \varphi, \bar{x} \mapsto \alpha$

Так как  $K[x]/(h_\alpha)$  – поле, то  $\text{Im} \varphi$  – подполе в  $F$ ,  $K \subseteq \text{Im} \varphi$ ,  $\alpha = \psi(\bar{x}) \in \text{Im} \varphi$

$\Rightarrow K[\alpha] \subseteq \text{Im} \varphi$

С другой стороны,  $\text{Im} \varphi = \{f(\alpha) \mid f \in K[x]\}$  – содержится в любом поле, содержащем  $K$  и  $\alpha$ .

$\Rightarrow \text{Im} \varphi \subseteq K(\alpha)$  ■

**Следствие.**  $\forall y \in K(\alpha)$  единственным образом представим в виде  $y = \beta_0 + \beta_1 \alpha + \dots + \beta_{n-1} \alpha^{n-1}$ , где  $\beta_i \in K$ .



## 30 Порядок конечного поля. Автоморфизм Фробениуса

$K$  – конечное поле  $\text{char } K = p > 0$  – простое число.

Пусть  $\langle 1 \rangle \subseteq K$  – подгруппа по сложению, порождаемая 1.

Заметим, что  $\langle 1 \rangle$  – подкольцо, изоморфное  $\mathbb{Z}_p \Rightarrow \langle 1 \rangle$  – поле, изоморфное  $\mathbb{Z}_p$ .

**Теорема.**  $|K| = p^n$ , где  $n = \dim_{\mathbb{Z}_p} K$

*Доказательство.*  $K \supseteq \mathbb{Z}_p \Rightarrow K$  – векторное пространство над  $\mathbb{Z}_p$ .

Пусть  $n = \dim_{\mathbb{Z}_p} K$ . Выберем базис  $e_1, \dots, e_n$  в  $K$  над  $\mathbb{Z}_p$ .

Тогда  $K = \{a_1 e_1 + \dots + a_n e_n \mid a_i \in \mathbb{Z}_p\}$

$\forall a_i$  есть ровно  $p$  вариантов  $\Rightarrow |K| = p^n$  ■

**Общая конструкция конечных полей.**

Выбираем неприводимый многочлен  $h \in \mathbb{Z}_p[x]$ ,  $\deg h = n$ . Тогда  $F := \mathbb{Z}_p[x]/(h)$  – поле, векторное пространство над  $\mathbb{Z}_p$  размерности  $n \Rightarrow |F| = p^n$ .

**Аutomорфизм Фробениуса.**

$a, b \in K \Rightarrow$

$(a + b)^p = a^p + C_p^1 a^{p-1} b + C_p^2 a^{p-2} b^2 + \dots + C_p^{p-1} a b^{p-1} + b^p = a^p + b^p$ , так как  $C_p^k \vdots p$  при  $1 \leq k \leq p-1$

Рассмотрим отображение  $\varphi : K \rightarrow K, a \rightarrow a^p$ . Имеем:

$\varphi(a + b) = (a + b)^p = a^p + b^p = \varphi(a) + \varphi(b)$ ,

$\varphi(ab) = (ab)^p = a^p b^p = \varphi(a) \cdot \varphi(b)$

$\Rightarrow \varphi$  – гомоморфизм колец.

$\ker \varphi$  – идеал в  $K$ , но в поле нет собственных идеалов  $\Rightarrow$  либо  $\ker \varphi = K$ , либо  $\ker \varphi = \{0\}$ . Так как  $\varphi(1) = 1$ , то  $\ker \varphi \neq K \Rightarrow \ker \varphi = \{0\} \Rightarrow \varphi$  инъективно.

Если  $|K| < \infty$ , то  $\varphi$  – биекция. В этом случае  $\varphi$  называется **автоморфизмом Фробениуса**. (“автоморфизм”=“изоморфизм в себя”)

## 31 Теорема существования для конечных полей

**Замечание.** Если  $K$  – поле и  $\psi : K \rightarrow K$  – автоморфизм, то подмножество  $K^\psi := \{x \in K \mid \psi(x) = x\}$  неподвижных элементов всегда является подполем в  $K$ .

**Теорема.** Для любого простого числа  $p$  и всякого  $n \in \mathbb{N}$  существует единственное с точностью до изоморфизма поле  $K$ , такое что  $|K| = p^n$

*Доказательство. Существование.* Положим  $q = p^n$ .

Рассмотрим многочлен  $f = x^q - x \in \mathbb{Z}_p[x]$ . Пусть  $F \subseteq \mathbb{Z}_p, |F| < \infty$  – конечное расширение, такое что  $f$  разлагается в  $F$  на линейные множители.

Пусть  $K \subseteq F$  – это множество всех корней многочлена  $f$  в  $F$ .

Покажем, что  $|K| = q = p^n$ . Если это не так, то  $\exists \alpha \in K$ , такое что  $f : (x - \alpha)^2 \Rightarrow f = (x - \alpha)^2 \cdot g$ , где  $g \in K[x]$ . Тогда  $f' = 2(x - \alpha) \cdot g + (x - \alpha)^2 \cdot g' : (x - \alpha)$ .

Но  $f = x^q - x \Rightarrow f' = q \cdot x^{q-1} - 1 = p^n \cdot x^{q-1} - 1 = -1 \nmid (x - \alpha)$  – противоречие  $\Rightarrow |K| = q$ .

$a \in K \Leftrightarrow f(a) = 0 \Leftrightarrow a^q - a = 0 \Leftrightarrow a^q = a \Leftrightarrow a^{p^n} = a \Leftrightarrow \varphi^n(a) = a \Leftrightarrow a$  – неподвижный элемент для автоморфизма  $\psi = \varphi^n$

Вывод:  $K = F^\psi \Rightarrow K$  – подполе в  $F$ . ■

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

Обозначение: Поле из  $q$  элементов обозначается  $\mathbb{F}_q$

Обозначение:  $K$  – поле  $\Rightarrow K^\times = (K \setminus \{0\}, \times)$  – мультипликативная группа поля  $K$ .

**Предложение.** Группа  $\mathbb{F}_q^\times$  является циклической.

*Доказательство.* Положим  $m = \exp(\mathbb{F}_q^\times)$ ,  $m \leq q - 1$ . Если  $\mathbb{F}_q^\times$  не циклическая, то  $m < q - 1$ . Но тогда  $a^m = 1 \ \forall a \in \mathbb{F}_q^\times \Rightarrow$  многочлен  $x^m - 1$  имеет  $\mathbb{F}_q$  не меньше  $q - 1$  корней, но это невозможно, так как  $m < q - 1$  ■

**Предложение.** Пусть  $p$  – простое и  $n \in \mathbb{N}$ . Тогда поле  $\mathbb{F}_q$  можно реализовать в виде  $\mathbb{Z}_p[x]/(h)$ , где  $h \in \mathbb{Z}_p[x]$  – неприводимый многочлен,  $\deg h = n$ . В частности,  $\forall n \in \mathbb{N}$  в  $\mathbb{Z}_p[x]$  существуют неприводимые многочлены степени  $n$ .

*Доказательство.* Пусть  $\alpha \in \mathbb{F}_q^\times$  – порождающий элемент циклической группы  $\mathbb{F}_q^\times$ .  $\mathbb{Z}_p \subseteq \mathbb{F}_q \Rightarrow \mathbb{Z}_p(\alpha)$  содержит  $\alpha, \dots, \alpha^{q-1}$  ( $q = p^n$ )  $\Rightarrow \mathbb{Z}_p(\alpha) = \mathbb{F}_q \Rightarrow \mathbb{F}_q \simeq \mathbb{Z}_p[x]/(h)$ , где  $h$  – минимальный многочлен для  $\alpha$  над  $\mathbb{Z}_p$ . Если  $\deg h = d$ , то  $|\mathbb{Z}_p[x]/(h)| = p^d \Rightarrow p^d = p^n \Rightarrow d = n$  ■

**Теорема.** Пусть  $q = p^n$ , где  $p$  – простое.

1)  $F \subseteq \mathbb{F}_q$  – подполе, то  $F \simeq \mathbb{F}_{p^m}$ , где  $m|n$

2)  $\forall m \in \mathbb{N}, m|n$ , существует единственное подполе  $F \subseteq \mathbb{F}_q$ , такое что  $|F| = p^m$