

№ 1 (1.1) Для любых $a, b, c \in K$ выполнены равенства

$\forall a, b, c \in K$:

а) $a0 = 0a = 0$

► $a0 = a(0 + 0) = a0 + a0 \Rightarrow a0 = 0$

$0a = 0$ — аналогично. ◀

б) $a(-b) = (-a)b = -ab$

► $0 = a0 = a(b - b) = ab + a(-b) \Rightarrow -ab = a(-b)$ ◀

с) $(a - b)c = ac - bc$ и $a(b - c) = ab - ac$

► $(a - b)c + bc = (a - b + b)c = ac \Rightarrow (a - b)c = ac - bc$

$a(b - c) + ac = a(b - c + c) = ab \Rightarrow a(b - c) = ab - ac$ ◀

№ 2(1.2)

а) В кольце не может быть двух различных единиц.

► $1_1 \underbrace{=}_{\text{т. к. } 1_2 \text{ — единица}} 1_1 \cdot 1_2 \underbrace{=}_{\text{т. к. } 1_1 \text{ — единица}} 1_2$ ◀

б) Пусть кольцо с единицей содержит не меньше двух элементов. Тогда $1 \neq 0$.

► $\forall a \in K \underbrace{a =}_{\text{св-во } 1} a \cdot e \underbrace{=}_{\text{св-во } 0} 0$ ◀

с) Может ли элемент ассоциативного кольца иметь более одного обратного элемента?

► Пусть $a_1 \neq a_2$ — обратные к a элементы. Тогда $a_1 a a_2 = \begin{cases} a_1 \cdot 1 = a_1 \\ 1 \cdot a_2 = a_2 \end{cases}$

Получается, они равны. ◀

№ 3(1.3, 2.4) Уметь отвечать на вопросы: является ли данное кольцо K коммутативным? ассоциативным? кольцом с единицей? областью целостности? полем? евклидово кольцо? Какие в K есть обратимые элементы? неразложимые? простые?

№ 4 (2.1(в)) Обратимый элемент кольца не может быть делителем нуля.

► Пусть $a \in K$ обратим, $\exists a^{-1} \in K : aa^{-1} = 1$. Если a — делитель нуля, то $\exists 0 \neq b \in K : ab = 0$. Тогда $a^{-1}ab = \begin{cases} a^{-1} \cdot 0 = 0 \\ 1 \cdot b = b \neq 0 \end{cases}$. Противоречие. ◀

№ 5(2.1(д)) Если K — кольцо без делителей нуля, то возможно сокращение: если $ac = bc$ и $c \neq 0$, то $a = b$.

► $ac = bc \Leftrightarrow (a - b)c = 0 \Rightarrow$ т. к. нет делителей нуля и $c \neq 0$, д. б. $a - b = 0$, т. е. $a = b$. ◀

№ 6(2.1(г)) В конечном коммутативном кольце если ненулевой элемент не является делителем нуля, то он обратим.

► Кольцо конечно \Rightarrow его элементы можно занумеровать: a_1, \dots, a_n . Элементы $a \cdot a_1, \dots, a \cdot a_n$ должны быть все разные (иначе $\forall i \neq j, a \neq 0 \ a \cdot a_i = a \cdot a_j \Rightarrow \underbrace{a}_{\neq 0} \underbrace{(a_i - a_j)}_{\neq 0, \text{ т. к. } i \neq j} = 0$, т. е. a — делитель нуля).

Тогда $\exists i : a \cdot a_i = 1$, т. к. $1 \in K$ (т. е. $a \cdot a_1, \dots, a \cdot a_n$ — n разных элементов кольца, а в кольце всего n элементов; значит, какое-то aa_i должно быть 1). ◀

№ 7 Конечная область целостности (состоящая из более чем одного элемента) — поле.

► В области целостности нет делителей нуля, а если в конечном коммутативном кольце элемент — не делитель нуля, то он обратим (№6). Т. е. все элементы обратимы. ◀

№ 8 Множество K^* обратимых элементов коммутативного кольца K является группой по умножению. Она называется мультипликативной группой, или группой обратимых элементов кольца K .

► Пусть K — кольцо, $a, b \in K^*$. Тогда $\exists a^{-1}, b^{-1} \in K^*$. Проверим групповые свойства.

1. $a(bc) = (ab)c$ — ассоциативность в K^* следует из свойств кольца K .

2. $\exists 1 \in K^*$ (т. к. $K^* \neq \emptyset$, $\exists a \in K^*$, по свойству обратимости $\exists a^{-1} \in K^* : aa^{-1} = 1$ — единица в K будет являться единицей в K^*).

3. $(b^{-1}a^{-1})(ab) = (ab)(b^{-1}a^{-1}) = 1 \Rightarrow (ab)^{-1} = b^{-1}a^{-1} \in K^*$ — обратимость.

Значит, K^* — группа по умножению. ◀

№ 9(1.5-1.7) Базовые знания про комплексные числа: сложение, умножение, модуль, аргумент, извлечение корней n -ой степени.

- **Компл'ексное число** z — это выражение вида $z = a + bi$, где a и b — числа из \mathbb{R} , а i — **мнимая единица**. По определению $i^2 = -1$. Число a называют **вещественной частью** комплексного числа z (пишется $a = \operatorname{Re}(z)$), а число b — **мнимой частью** z (пишется $b = \operatorname{Im}(z)$). Комплексные числа можно складывать и умножать, «раскрывая скобки и приводя подобные». Множество комплексных чисел обозначают буквой \mathbb{C} .

Каждому комплексному числу $z = a + bi$ сопоставим точку (a, b) и вектор (a, b) . Длина этого вектора называется **модулем** числа z и обозначается $|z|$. Пусть $z \neq 0$. Угол (в радианах), отсчитанный против часовой стрелки от вектора $(1, 0)$ до вектора (a, b) , называется **аргументом** числа z и обозначается $\operatorname{Arg}(z)$. Аргумент определен с точностью до прибавления числа вида $2\pi n$, где $n \in \mathbb{Z}$.

Тригонометрическая форма записи. Для любого ненулевого комплексного числа z имеет место равенство $z = r(\cos \varphi + i \sin \varphi)$, где $r = |z|$, $\varphi = \operatorname{Arg}(z)$.

Для комплексного числа $z = r(\cos \varphi + i \sin \varphi)$ и натурального числа $n \in \mathbb{N}$ выполнена **формула Муавра** $z^n = r^n(\cos n\varphi + i \sin n\varphi)$.

Для комплексного числа $z = a + bi$, где $a, b \in \mathbb{R}$ число $\bar{z} = a - bi$ называется **комплексно-сопряжённым** к z . Выполнены следующие равенства:

$$|z|^2 = z\bar{z}, \quad \overline{z+w} = \bar{z} + \bar{w}, \quad \overline{zw} = \bar{z}\bar{w}.$$

№ 10(2.2)

а) Следующие условия эквивалентны:

- (1) $x \sim y$;
- (2) $x \mid y$ и $y \mid x$;
- (3) множество делителей x и множество делителей y равны.

- • (1) \Rightarrow (2) : $\exists r \in K^* : x = ry \Rightarrow y \mid x$ по определению. Т. к. $r \in K^*$, $\exists r^{-1} \in K^* : r^{-1}x = y \Rightarrow x \mid y$ по определению.
- (2) \Rightarrow (3) : Пусть $x \mid y, x \mid a$. Тогда $y = xc, x = ab$ (по опр.) $\Rightarrow y = xc = abc = a(bc) \Rightarrow y \mid a$.
- (3) \Rightarrow (2) : Множества делителей x и y совпадают, $x \mid x \Rightarrow x$ будет во множестве делителей y , т. е. $x \mid y$. Симметрично, $y \mid x$.
- (2) \Rightarrow (1) : $\begin{cases} x \mid y \Rightarrow y = kx \\ y \mid x \Rightarrow x = ty \end{cases}$ Тогда $y = kty \Rightarrow kt = 1$ Значит, k и t обратимы. Значит, $x = ty, t \in K^* \Rightarrow x \sim y$ по определению.

б) Отношение \sim является отношением эквивалентности.

- 1. $x \sim x$, т. к. $\exists 1 \in K^* : x = 1x$

$$2. x \sim y \Rightarrow \exists r \in K^* : x = ry \Rightarrow y = r^{-1}x \Rightarrow y \sim x$$

$$3. x \sim y, y \sim z \Rightarrow \begin{cases} \exists r_1 \in K^* : x = r_1 y \\ \exists r_2 \in K^* : y = r_2 z \end{cases} \Rightarrow x = \underbrace{r_1 r_2}_{\in K^*, \text{ т. к. } (r_1 r_2)^{-1} = r_2^{-1} r_1^{-1}} z \Rightarrow x \sim z$$

№ 11 (2.5) Если $a, b, k \in \mathbb{Z}$, $u \notin \mathbb{Q}$, то $z = a + bu \in \mathbb{Z}[u]$ делится на k тогда и только тогда, когда a и b делятся на k .

► • \Rightarrow : $\begin{cases} a : k \\ b : k \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a = ka' \\ b = kb' \end{cases} \Rightarrow z = a + bu = ka' + kb'u = k(a' + b'u) \Rightarrow z : k$

• \Rightarrow : Пусть $z = a + bu = ka' + kb'u$. Тогда $(a - ka') = u(b - kb')$.

Обе части целые \Rightarrow нули, потому что u не рациональное.

Отсюда $\begin{cases} a = ka' \\ b = kb' \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a : k \\ b : k \end{cases}$.

№ 12(2.9 \Leftarrow) K — евклидово кольцо. Верно ли, что для $a \neq 0, b \in K^*$ выполнено равенство $N(ab) = N(a)$?

► $b \in K^* \Rightarrow N(a) \leq N(ab) \leq N(abb^{-1}) = N(a)$

№ 13 (3.2) Для $u = i, \omega$ и простого целого числа $p \leq 40$ выясните, существует ли $z \in D$ с $N(z) = p$. Сформулируйте гипотезу о том, какие простые целые числа являются простыми в D .

► Выпишем все варианты a, b с нормой ≤ 40 .

Зам. Можно опустить перебор по ka', kb' при $k > 1$, потому что тогда обе нормы делятся на k^2 .

TODO: отрицательные значения.

a	b	$\mathbb{Z}[i], N = a^2 + b^2$	$\mathbb{Z}[\omega], N = a^2 - ab + b^2$
1	1	2	1
1	2	5	3
1	3	10	7
1	4	17	13
1	5	26	21
1	6	37	31
2	2	-	-
2	3	13	7
2	4	-	-
2	5	29	19
2	6	-	-
2	7	53	39
3	3	-	-
3	4	25	13
3	5	34	19
3	6	-	-
3	7	58	37
4	4	-	-
4	5	41	21
4	6	-	-
4	7	65	37
5	5	-	-
5	6	61	31
5	7	74	39
6	6	-	-

Пользуемся утверждением с лекции: Пусть p – простое целое, $\forall z \in D : N(z) \neq p \Rightarrow p$ неразложим в D .

Выпишем все простые числа ≤ 40 и вычеркнем те, которые являются нормой. Берём оставшиеся.

	$\mathbb{Z}[i]$		$\mathbb{Z}[\omega]$	
	2	✗	✓	2
✓	3		3	✗
	5	✗	✓	5
✓	7		7	✗
✓	11		✓	11
	13	✗		13
	17	✗	✓	17
✓	19			19
✓	23		✓	23
	29	✗	✓	29
✓	31			31
	37	✗		37

Гипотеза: * у $\mathbb{Z}[i]$ $4k + 3$ * у $\mathbb{Z}[\omega]$ $3k + 2$ или TODO.

№ 14 (3.9)

► а) $0 \subset K, K \subset K$ — идеалы. Они называются **тривиальными**.

• $\{0\}$:

1. Тривиальная группа по сложению:
– Ассоциативность наследуется

- 0 — нейтральный элемент, т. к. $0 + a = a + 0 = 0 \forall a \in \{0\}$
- $0^{-1} = 0 = -0$
- 2. Замкнутость относительно умножения: $\forall a \in K 0a = 0 \in \{0\}$
- K :
 1. Тривиальная группа по сложению:
 - Ассоциативность наследуется
 - 0 — нейтральный элемент, т. к. $0 + a = a + 0 = 0 \forall a \in K$
 - $a^{-1} = -a \in K$
 2. Замкнутость относительно умножения: $\forall a \in K \forall b \in I = K \quad ab \in I = K$ — по свойству кольца
- б) $(a) = \{ax \mid x \in K\}$ — **главный идеал** или **идеал, порождённый одним элементом**
 1. Подгруппа по сложению:
 - $ax_1 + ax_2 = a(x_1 + x_2) \in (a)$ — замкнутость относительно сложения
 - Ассоциативность наследуется
 - 0 — нейтральный элемент: $ax + 0 = 0 + ax = ax$
 - $ax + a(-x) = a(x - x) = a \cdot 0 = 0$
 2. Замкнутость относительно умножения: $\forall b \in K \forall ax \in (a) \quad b \cdot ax = bx \cdot a \in (a)$
- с) $(a_1, \dots, a_n) = \{a_1x_1 + \dots + a_nx_n \mid x_1, \dots, x_n \in K\}$ — **конечно-порождённый идеал**, то есть идеал, порождённый конечным количеством элементов.
 1. Подгруппа по сложению:
 - $(a_1x_1 + \dots + a_nx_n) + (a_1y_1 + \dots + a_ny_n) = a_1(x_1 + y_1) + \dots + a_n(x_n + y_n) \in I$ — замкнутость относительно сложения
 - Ассоциативность наследуется
 - $0 = a_1 \cdot 0 + \dots + a_n \cdot 0$ — нейтральный элемент: $ax + 0 = 0 + ax = ax$
 - $(a_1x_1 + \dots + a_nx_n) + (a_1(-x_1) + \dots + a_n(-x_n)) = 0$
 2. Замкнутость относительно умножения: $\forall y \in K \quad y \cdot (a_1x_1 + \dots + a_nx_n) = a_1(x_1y) + \dots + a_n(x_ny) \in I$

№ 15(3.11) а) Докажите, что $(a) \subset (b)$ тогда и только тогда, когда $b \mid a$.

б) Докажите, что $a \sim b$ тогда и только тогда, когда $(a) = (b)$.

- а) • $\Leftarrow: b \mid a \Rightarrow \exists c : a = cb \Rightarrow ka = (kc)b \Rightarrow (a) \subset (b)$
- $\Rightarrow: (a) \subset (b) \Rightarrow a \in (b) \Rightarrow a = cb \Rightarrow a \mid b$
- б) • $\Rightarrow: a \sim b \Rightarrow \begin{cases} a \mid b \\ b \mid a \end{cases} \Rightarrow (a) \subset (b) \subset (a) \Rightarrow (a) = (b)$
- $\Leftarrow: (a) = (b) \Rightarrow \begin{cases} a \mid b \\ b \mid a \end{cases} \Rightarrow a \sim b$

№ 16(3.12) Пусть $I, J \subset K$ — идеалы. Сумма $I + J = \{x + y \mid x \in I, y \in J\}$ и пересечение $I \cap J$ идеалов являются идеалами.

- а) 1. • $(x_1 + y_1) + (x_2 + y_2) = \underbrace{(x_1 + x_2)}_{\in I} + \underbrace{(y_1 + y_2)}_{\in J} \in I + J$
- Ассоциативность следует.
 - 0 — нейтральный.
 - $(x + y) + \underbrace{(-x - y)}_{\in I + J} = (x - x) + (y - y) = 0$ — обратный
2. $\forall a \in K \hookrightarrow a(x + y) = \underbrace{ax}_{\in I} + \underbrace{ay}_{\in J} \in I + J$
- б) 1. • $x, y \in I \cap J \Rightarrow \begin{cases} x, y \in I \\ x, y \in J \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x + y \in I \\ x + y \in J \end{cases} \Rightarrow x + y \in I + J$
- Ассоциативность следует.
 - 0 — нейтральный
 - $x \in I \cap J \Rightarrow \begin{cases} x \in I \\ x \in J \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x^{-1} \in I \\ x^{-1} \in J \end{cases} \Rightarrow x^{-1} \in I + J$ — обратный
2. $\forall a \in K \quad \forall x \in I \cap J \hookrightarrow \begin{cases} x \in I \\ x \in J \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} ax \in I \\ ax \in J \end{cases} \Rightarrow ax \in I \cap J$

№ 17(3.15) Пусть $K \neq 0$. Докажите, что K является полем тогда и только тогда, когда K не содержит нетривиальных идеалов.

► • \Rightarrow : Пусть K — поле, $I \subset K$ — идеал.

- $x = 0 \Rightarrow (x) = \{0\}$ — тривиальный идеал.
- $\forall x \in I, x \neq 0$, x обратим по свойству поля, значит, $I \supset (x) = (1) = K$.

• \Leftarrow : Пусть K — коммутативное кольцо без нетривиальных идеалов. Пусть $x \in K, x \neq 0$, — произвольный элемент. Тогда $(x) \neq \{0\}$. Значит, поскольку у нас нет нетривиальных идеалов, $(x) = K$.

В частности, $1 \in (x) = K \Rightarrow \exists x^{-1}$, т. е. элемент x обратим.

В силу произвольности x , любой ненулевой элемент обратим $\Rightarrow K$ — поле (в $K \geq 2$ элементов, т. к. $0 \in K$, и мы брали $0 \neq x \in K$).

№ 18(4.1) Верно ли, что при гомоморфизме колец $\varphi : K \rightarrow L$ а) образ; б) прообраз идеала является идеалом?

а)

► Неверно. Контрпример: $\varphi : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Q}, \varphi(x) = x$ — поэлементное вложение.

$I = \mathbb{Z}$ в \mathbb{Z} — тривиальный идеал. Но $\varphi(I) = \mathbb{Z}$ — не идеал в \mathbb{Q} , ибо, например, $\underbrace{\frac{1}{2}}_{\in \mathbb{Q}} \cdot \underbrace{1}_{\in \mathbb{Z}} = \frac{1}{2} \notin I$.

б)

► Верно. Пусть J — идеал в L . $\varphi^{-1}(J) = \{a \in K : \varphi(a) \in J\}$.

$$\forall a, b \in \varphi^{-1}(J) : \begin{cases} \varphi(a+b) = \varphi(a) + \varphi(b) \Rightarrow a+b \in \varphi^{-1}(J) \\ \varphi(a^{-1}) = (\varphi(a))^{-1} \in J \end{cases}$$

$$\forall x \in K \forall a \in \varphi^{-1}(J) \quad \varphi(ax) = \varphi(a)\varphi(x) \in J.$$

Значит, $\varphi^{-1}(J)$ — действительно идеал.

№ 19(4.2)

а) Всегда ли факторкольцо коммутативного кольца является коммутативным кольцом?

- • Ассоциативность по сложению — из ассоциативности коммутативного кольца.
- $0 \in K$ — ноль в $K \Rightarrow 0 + I = I$ — ноль в K^* : $(I)(a+I) = (a+I)(I) = aI + I^2 = I$.
 - Обратный по сложению: $(a+I) + (-a+I) = (-a+I) + (a+I) = I$.
 - Дистрибутивность: $(a+I)(b+I+c+I) = (ab+I) + (ac+I)$.
 - $1 \in K$ — единица в $K \Rightarrow 1+I$ — единица в K^* : $(1+I)(a+I) = (a+I)(1+I) = a+I + aI + I^2 = a+I$.
 - Ассоциативность по умножению — из ассоциативности коммутативного кольца.
 - $(a+I)(b+I) = ab + aI + bI + II = ab + I = ba + I = ba + bI + aI + II = (b+I)(a+I)$ — коммутативность.

б) Имеется **канонический** гомоморфизм $\varphi : K \rightarrow K/I$, который переводит $a \mapsto a+I$.

► Проверим свойства гомоморфизма:

- $\varphi(a) + \varphi(b) = a+I + b+I = (a+b)+I = \varphi(a+b)$
- $\varphi(a)\varphi(b) = (a+I)(b+I) = ab + aI + bI + II = ab + I = \varphi(ab)$
- $\varphi(1) = 1+I = 1_{K/I}$

№ 20(4.5) Пусть K — область целостности. Идеал (x) является простым тогда и только тогда, когда x прост.

► (x) — простой \Leftrightarrow если $ab \in (x)$, то $\begin{cases} a \in (x) \\ b \in (x) \end{cases}$

$$x \text{ — простой} \Leftrightarrow \text{если } ab : x, \text{ то } \begin{cases} a : x \\ b : x \end{cases}$$

Но $ab \in (x) \Leftrightarrow ab : x$ (ибо $(x) = \{ax \mid a \in K\}$ по определению, и $ab \in K$).

№ 21(4.6) Пусть K — область целостности. Нетривиальный идеал I является максимальным тогда и только тогда, когда K/I поле.

► Знаем (№17): K/I — поле \Leftrightarrow в K/I нет нетривиальных идеалов.

Пусть K/I — поле, пусть $\exists I : I \subset J \subset K$ — нетривиальный идеал. Подействуем на него каноническим гомоморфизмом $\varphi : K \rightarrow K/I$.

Лемма. Пусть $f : K \rightarrow L$ — гомоморфизм колец, $I \subset K, J \subset L$ — идеалы. Тогда а) $f(I)$ — идеал в $f(K)$, б) $f^{-1}(J)$ — идеал в K .

► а) Пусть $x \in f(I), y \in f(K)$. Тогда найдутся такие x' и y' , где $x' \in I, x = f(x'), y' \in K, y = f(y')$. Имеем: $xy = f(x')f(y') = f(x'y') \in f(I)$, так как $x'y' \in I$.

б) Пусть теперь $x \in f^{-1}(J), y \in K$. Тогда $f(xy) = f(x)f(y) \in J$, следовательно, $xy \in f^{-1}(J)$. ◀

Из Леммы следует, что в K/I существует нетривиальный идеал \Leftrightarrow , когда существует идеал в K , содержащий I . ◀

№ 22(4.7) Пусть K — область целостности. Нетривиальный идеал I является простым тогда и только тогда, когда K/I область целостности.

- • \Rightarrow : Пусть I — простой, но K/I — не область целостности. Тогда $\exists a, b \in K : (a + I)(b + I) = ab + I = 0 + I = 0_{K/I}$. Но тогда должно быть $ab \in I$, т. е. идеал не простой. Противоречие.
- \Leftarrow : Пусть I непростой. Тогда $\exists a, b : a, b \in I$, но $ab \notin I$. Рассмотрим $0 \neq (a + I)(b + I) = ab + \underbrace{I}_{ab \in I} = 0_{K/I}$. ◀

№ 23(5.1, 5.2) Пусть K — область целостности. Рассмотрим множество пар $\tilde{K} = \{a, b\}$ элементов кольца K , где $b \neq 0$. На этом множестве введем отношение следующим образом: $\{a, b\} \sim \{c, d\}$, если $ad = bc$.

а) Докажите, что $\{a, b\} \sim \{ac, bc\}$. б) Докажите, что это отношение эквивалентности.

Элемент множества классов эквивалентности $F = \text{Quot}(K)$ будем записывать как $\frac{a}{b}$ или ab^{-1} . Введем операции сложения и умножения на $F = \text{Quot}(K)$:

$$\frac{a}{b} + \frac{c}{d} = \frac{ad + bc}{bd},$$

$$\frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d} = \frac{ac}{bd}.$$

Докажите, что

с) сложение и умножение корректно определено; д) F является коммутативным кольцом; е) F является полем; ф) существует инъекция $K \rightarrow F$.

► а) $a \cdot bc = b \cdot ac$ — из коммутативности.

б) • $\{a, b\} \sim \{a, b\}$, т. к. $ab = ab$

• $\{a, b\} \sim \{c, d\} \Leftrightarrow ad = bc \Leftrightarrow cb = da \Leftrightarrow \{c, d\} \sim \{a, b\}$

• $\{a, b\} \sim \{c, d\} \sim \{e, f\} \Rightarrow \begin{cases} ad = bc \\ cf = de \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} adf = bcf \\ bcf = bde \end{cases} \Rightarrow adf = bde \Rightarrow af = be \Rightarrow \{a, b\} \sim \{e, f\}$

с) Корректность определения означает, что операция замкнута, и что результат её всегда определён.

• Сложение:

— $\frac{ad+bc}{bd} \in \text{Quot}(K)$, т. к. $ad + bc \in K$ и $bd \in K$ по свойствам кольца K .

— $\nexists \frac{ad+bc}{bd} bd \neq 0$, т. к. $b \neq 0$ и $d \neq 0$.

• Умножение:

— $\frac{ac}{bd} \in \text{Quot}(K)$, т. к. $a \in K$ и $bd \in K$ по свойствам кольца K .

— $\nexists \frac{ac}{bd} bd \neq 0$, т. к. $b \neq 0$ и $d \neq 0$.

д) • Это кольцо:

— $\frac{a}{b} + (\frac{c}{d} + \frac{e}{f}) = \frac{a}{b} + (\frac{cf+de}{df}) = \frac{adf+bcf+bde}{bdf} = \frac{ad+bc}{bd} + \frac{e}{f} = (\frac{a}{b} + \frac{c}{d}) + \frac{e}{f}$

— Ноль — элемент класса эквивалентности $\{\frac{0}{a} \mid a \neq 0\}$. Возьмём $0_F := \frac{0}{1}$. Тогда $\frac{a}{b} + \frac{0}{1} = \frac{0}{1} + \frac{a}{b} = \frac{0}{1}$

— Для $\frac{a}{b}$ обратный по сложению $\frac{-a}{b} : \frac{a}{b} + \frac{-a}{b} = \frac{a-a}{b} = \frac{0}{b}$

— $\frac{a}{b}(\frac{c}{d} + \frac{e}{f}) = \frac{a}{b} \cdot \frac{cf+de}{df} = \frac{acf+ade}{bdf} = \frac{acf+ade}{bdf} = \frac{ac}{bd} + \frac{ae}{bf} = \frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d} + \frac{a}{b} \cdot \frac{e}{f}$

• Оно ассоциативно по умножению: $\frac{a}{b}(\frac{c}{d} \cdot \frac{e}{f}) = \frac{a}{b}(\frac{ce}{df}) = \frac{ace}{bdf} = (\frac{ac}{bd})\frac{e}{f} = (\frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d}) \cdot \frac{e}{f}$

• Единица — элемент класса эквивалентности $\{\frac{a}{a} \mid a \neq 0\}$. Возьмём $1_F = \frac{1}{1}$. Тогда $\frac{a}{b} \frac{1}{1} = \frac{1}{1} \frac{a}{b} = \frac{a}{b}$

• Оно коммутативно: $\frac{a}{b} \frac{c}{d} = \frac{ac}{bd} = \frac{ca}{db} = \frac{c}{d} \frac{a}{b}$

- е) • Каждый ненулевой элемент имеет обратный по умножению $(\frac{a}{b})^{-1} = \frac{b}{a} : \frac{a}{b} \frac{b}{a} = \frac{ab}{ba} = \frac{ab}{ab} = \frac{1}{1}$.
 • Элементов ≥ 2 , т. к. $0 \neq 1$.
- ф) Возьмём $\varphi : K \rightarrow F, \varphi(a) = \frac{a}{1}$.
 Это гомоморфизм: $\frac{ab}{1} = \varphi(ab) = \varphi(a)\varphi(b) = \frac{a}{1} \frac{b}{1} = \frac{a \cdot 1 + 1 \cdot b}{1 \cdot 1} = \frac{ab}{1}$.
 Это инъекция: $\forall a \neq b \in K \hookrightarrow \varphi(a) = \frac{a}{1} \neq \frac{b}{1} = \varphi(b)$, ибо $\frac{a}{1} - \frac{b}{1} = \frac{a-b}{1} \neq 0_F$.

№ 24(6.1) Признак неприводимости Эйзенштейна

Пусть $f(x)$ — многочлен с целыми коэффициентами и существует такое простое число p , что:

1. старший коэффициент $f(x)$ не делится на p ; 2. все остальные коэффициенты $f(x)$ делятся на p ; 3. свободный член $f(x)$ не делится на p^2 .

Тогда многочлен $f(x)$ неприводим над полем рациональных чисел.

- Пусть, напротив f не неприводим над \mathbb{Q} . Тогда существуют два таких многочлена $g, h \in \mathbb{Q}[x]$, что $f = \tilde{g}\tilde{h}$ и $\deg \tilde{g}, \deg \tilde{h} > 0$. Положим $d_1 = (\text{НОД знаменателей коэффициентов } \tilde{g})$ и $d_2 = (\text{НОД знаменателей коэффициентов } \tilde{h})$. Тогда есть разложение $d_1 d_2 f = gh$, где $g, h \in \mathbb{Z}[x]$ — многочлены, полученные домножением \tilde{g}, \tilde{h} на d_1, d_2 соответственно. Так как g и h примитивны, то их произведение примитивно, а значит, $d_1 d_2 = 1$ и верно просто $f = gh$.

Заметим, что $f_0 = g_0 h_0$. Так как f_0 не делится на p^2 , то одно из чисел g_0, h_0 не делится на p . Пусть для определенности h_0 не делится на p , тогда g_0 делится на p . Пусть число $k > 0$ таково, что g_0, \dots, g_{k-1} делятся на p , а g_k не делится на p . По формуле коэффициентов для произведения многочленов $f_k = g_k h_0 + g_k h_1 + \dots$. Если $k < \deg f$, то по модулю p имеем $0 = g_k h_0$, где g_k, h_0 не делятся на p . Значит, $k = \deg f > \deg g$. Это означает, что все коэффициенты g делятся на p , то есть g не примитивен. Противоречие.

№ 25(указано 6.2, но на самом деле в нём точно такого пункта нет) Многочлен $x^n - p$ (p — простое число) неприводим над \mathbb{Q} .

- По критерию Эйзенштейна: $1 \not\equiv p, -p \not\equiv p, -p \not\equiv p^2$, где p — простое.

№ 26(6.3) Характеристика поля — простое число.

- Если k непростое, $k = m \cdot n$, то $m \cdot n = 0$, т. е. есть делители нуля — противоречие с тем, что у нас поле.

№ 27(6.4(Lecture_all.pdf №6.2(3))) Пусть $F \subset G$ — поля. Верно ли, что $\text{char}(F) = \text{char}(G)$?

- Так как $\varphi(1) = 1$, имеем $\varphi(\underbrace{1 + \dots + 1}_m) = \underbrace{1 + \dots + 1}_m$. Т. к. $\text{Ker } \varphi = \{0\}$, то $\underbrace{1 + \dots + 1}_m = 0$ в K и F одновременно.

Следовательно, $\text{char } F = \text{char } K$.

№ 28(6.5) Любое конечное поле имеет положительную характеристику.

- Пусть F конечно, а $\text{char } F = 0$. Тогда $\underbrace{1 + \dots + 1}_k$ для любого k будет давать элемент поля, не совпадающий с предыдущими (иначе char была бы конечна).

Получается, что F бесконечно. Противоречие.

№ 29(№6.7) Нетривиальный гомоморфизм полей $\varphi : F \rightarrow L$ является инъекцией.

- $\varphi : F \rightarrow L$ — инъекция $\Leftrightarrow \text{Ker } \varphi = \{0\}$.
 ► • \Rightarrow : φ — инъекция $\Rightarrow \forall a, b \in F, a \neq b, \varphi(a) \neq \varphi(b)$.

$$\text{Ker } \varphi = \{a \in F : \varphi(a) = 0_L\}.$$

Имеем $\varphi(0) = 0$ по свойству гомоморфизма, тогда по инъективности $\forall a \neq 0 \varphi(a) \neq \varphi(0) = 0$, т. е. $\text{Ker } \varphi = \{0\}$.

- \Leftarrow : $\text{Ker } \varphi = \{0\} \Rightarrow$

$\text{Ker } \varphi$ — идеал в F

- $\forall a \in F \forall x \in \text{Ker } \varphi \varphi(ax) = \varphi(a)\varphi(x) = \varphi(a) \cdot 0 = 0$ Тогда $ax \in \text{Ker } \varphi$

В поле F идеал $I = \begin{cases} \{0\} \\ F \end{cases}$, т. е. $\text{Ker } \varphi = \begin{cases} \{0\} \\ F \end{cases}$ — но в этом случае гомоморфизм тривиален, но у нас нетривиальный

№ 30(№6.8) K образует линейное пространство над F .

- Проверка свойств. Свойства линейного пространства следуют из аксиом поля. TODO: скопировать из вики свойства. ◀

№ 31 (Lecture_all.pdf утв. 6.2(2)) Любое поле F нулевой характеристики содержит \mathbb{Q} в качестве подполя.

$$\tilde{m} := \underbrace{1 + \dots + 1}_m \text{ штук}$$

$$\tilde{n} := \underbrace{1 + \dots + 1}_n \text{ штук}$$

Для $m \neq n$ имеем $\tilde{m} \neq \tilde{n}$ (иначе $\tilde{m} - \tilde{n} = 0$, и $\text{char } F \neq 0$).

Противоположный к элементу \tilde{m} обозначим $-\tilde{m}$.

Получили $\mathbb{Z} \subset F$. $\mathbb{Q} = \text{Quot } \mathbb{Z} \subset F$, так как если $A \subset B$, то $\text{Quot } A \subset \text{Quot } B$ для всех колец и $\text{Quot } F = F$ для поля. У нас $\mathbb{Z} \subset F \Rightarrow \mathbb{Q} = \text{Quot } \mathbb{Z} \subset \text{Quot } F = F$ (используется №21 из exam_5-6).

№ 32 (Lecture_all.pdf утв. 6.5(2)) Пусть $f(x)$ — неприводимый многочлен степени n , и $K = F[x]/(f(x))$. Тогда многочлен $\bar{f}(x)$ имеет корень в K .

- Обозначим смежный класс многочлена $g(x) \in F$ как $\bar{g}(x) \in K$. Тогда имеем: $\bar{x} \in K$ — корень многочлена $f(x)$, т. к. $f(\bar{x}) = \bar{f}(x) = 0$. ◀

№ 33 Пусть $f(x)$ — неприводимый многочлен степени n , и $K = F[x]/(f(x))$. Чему равна степень $[K : F]$ этого расширения?

- Обозначим смежный класс многочлена $g(x) \in F$ как $\bar{g}(x) \in K$. Рассмотрим $\bar{1}, \bar{x}, \dots, \bar{x}^{n-1}$. Пусть они ЛЗ, т. е. $\exists \lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{n-1} \in F : \lambda_0 \cdot \bar{1} + \lambda_1 \cdot \bar{x} + \dots + \lambda_{n-1} \cdot \bar{x}^{n-1} = 0$. Тогда $g(x) = \lambda_0 + \lambda_1 x + \dots + \lambda_{n-1} x^{n-1} \in (f(x))$, а по неприводимости $f(x)$ имеем $g(x) = 0$, т. е. $\lambda_0 = \lambda_1 = \dots = \lambda_{n-1} = 0$, и данная ЛК тривиальна. Поэтому $\bar{1}, \bar{x}, \dots, \bar{x}^{n-1}$ ЛНЗ.

\forall многочлена $h(x) \in F[x]$ $\bar{h}(x)$ — образ при факторизации по идеалу $(f(x))$ — совпадает с $\bar{r}(x)$, где $r(x)$ — остаток от деления $h(x)$ на $f(x)$. Поэтому $\bar{1}, \bar{x}, \dots, \bar{x}^{n-1}$ образуют базис K как линейного пространства над F , т. е. $[K : F] = n$. ◀

№ 34(7.7) Пусть α — алгебраический над F элемент, $L \supset F$ — расширение. Тогда α — алгебраический над L и $m_{\alpha, F}$ делится на $m_{\alpha, L}$ в кольце $L[x]$.

- TODO ◀

№ 35(7.8, 10.6) Расширения, полученные добавлениями двух разных квадратных корней: степень, примитивный элемент, минимальный многочлен, нормальность, описание группы автоморфизмов.

- На примере $\mathbb{Q}(\sqrt{2}) \supset \mathbb{Q}$. Степень 2. Мин. многочлен $x^2 - 2$ — степени 2. $\mathbb{Q}(\sqrt{2})$ — поле разложения многочлена $x^2 - 2$, т. к. все его корни $\sqrt{2}, -\sqrt{2} \in \mathbb{Q}(\sqrt{2})$. Не существует промежуточных, потому что тогда они имеют степень 1 или 2, т. е. совпадают с $\mathbb{Q}(\sqrt{2})$ или с \mathbb{Q} .

Рассмотрим автоморфизмы $\mathbb{Q}(\sqrt{2}) \rightarrow \mathbb{Q}(\sqrt{2})$. Их всего 2:

$$a + \sqrt{2}b \mapsto a + \sqrt{2}b$$

$$a + \sqrt{2}b \mapsto a - \sqrt{2}b$$

Других нет, т. к. достаточно рассматривать только перестановки корней минимального многочлена:

$$\sqrt{2} \mapsto \pm \sqrt{2}$$

$$-\sqrt{2} \mapsto \mp \sqrt{2}$$

Другие не рассматриваются, поскольку 1 и ЛНЗ корни многочлена образуют базис в $\mathbb{Q}(\sqrt{2})$ как линейном пространстве над \mathbb{Q} ; 1 при этом должен перейти в 1, т. к. \mathbb{Q} сохраняется.

Таких автоморфизмов 2 \Rightarrow степень расширения 2 \Rightarrow это расширение Галуа. Группа из двух элементов — \mathbb{Z}_2 — то группа Галуа данного расширения (других (с точностью до изоморфизма) групп из 2-х элементов не бывает). ◀

№ 36(9.1) Для производной выполнены формулы $(f + g)' = f' + g'$ и $(fg)' = f'g + fg'$.

- Для $f(x) = a_n x^n + \dots + a_1 x + a_0$ и $b(x) = b_n x^n + \dots + b_1 x + b_0$:

$$(f + g)' = n(a_n + b_n)x^{n-1} + \dots + (a_2 + b_2)x + (a_1 + b_1) = (na_n x^{n-1} + a_2 x + a_1) + (nb_n x^{n-1} + \dots + b_2 x + b_1) = f' + g'$$

Рассмотрим $f(x) - f(y) = \sum_{k=1}^n na_k(x^k - y^k) = (x - y) \sum_{k=1}^n na_k(x^{k-1} + x^{k-2}y + \dots + y^{k-1}) = (x - y)\Phi(x, y)$, где

$$\Phi(x, y) = \sum_{k=1}^n na_k(x^{k-1} + x^{k-2}y + \dots + y^{k-1}). \text{ Заметим, что } \Phi(x, x) = f'(x).$$

Тогда имеем для $\varphi = fg$: $\varphi(x) - \varphi(y) = f(x)g(x) - f(y)g(y) = f(x)(g(x) - g(y)) + g(y)(f(x) - f(y)) = (x - y)[f(x)G(x, y) + g(y)\Phi(x, y)]$. Отсюда $\varphi' = f(x)G(x, x) + g(x)\Phi(x, x) = f(x)g'(x) + g(x)f'(x)$. ◀

№ 37 (9.2) Многочлен f не имеет кратных корней тогда и только тогда, когда $(f, f') = 1$.

► Пусть $f(x) = (x - a)^m f_1(x)$, $f_1(x) \not\equiv (x - a)$, $m \geq 2$. Тогда $f'(x) = m(x - a)^{m-1} f_1(x) + (x - a)^m f_1'(x)$.

- Если $m > 1$, то $f'(a) = 0$.
- Если $m = 1$, то $f'(x) = (x - a)f_1'(x) + f_1(x) \Rightarrow f'(a) = f_1(a) \neq 0 \Rightarrow f(x)$ имеет кратные корни \Leftrightarrow эти корни являются корнями $f'(x)$.

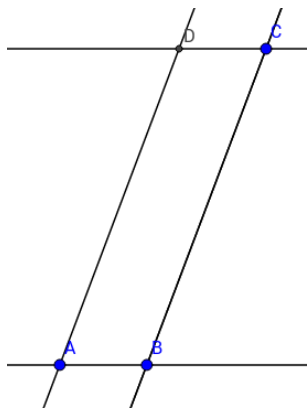
№ 38(9.6) Докажите, что можно построить

а) все точки с рациональными координатами; б) ξ_n , где $n = 3, 4, 6$; в) ξ_5 .

Если мы построили точки z, w , то можно ли построить точки д) $\bar{z}, -z$? е) $z + w, z - w$? ф) $z \cdot w, \frac{z}{w}$ (при $w \neq 0$)? г) \sqrt{z} ?

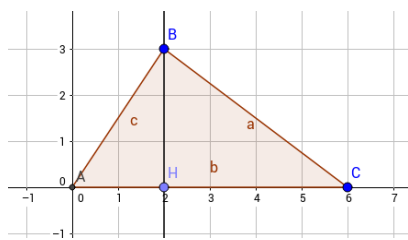
► При помощи гугла учимся строить: перпендикулярную прямую (через заданную точку), параллельную прямую (через заданную точку).

Как обосновать то, что мы можем брать раствор циркуля, равный расстоянию между какими-то двумя точками, и переносить его на другое место? Пусть есть отрезок AB , и мы хотим окружность с радиусом AB и центром в т. C .



Строим параллелограмм как на рисунке. $CD = AB$.

- Берём отрезок 01 и произвольную точку A , не лежащую на нём. Проводим $0A$. На луче $0A$ начиная от точки 0 откладываем n равных отрезков произвольной длины. Пусть их концы, лежащие на $0A$, есть A_1, \dots, A_n (считая от точки 0). Проводим $A_n 1$ и параллельно ей $A_{n-1} B_{n-1}, \dots, A_1 B_1$. По теореме Фалеса $0B_1 = B_1 B_2 = \dots = B_{n-1} 1$. Сделав так для любого n , получим все точки с рациональными координатами на 01 , разложить на ось OX тривиально, получить так же поделенную ось OY тривиально, а т. к. любая точка однозначно задаётся проекциями и мы умеем строить перпендикуляры, можем строить любую точку с рациональными координатами.
- Шестиугольник — откладывая на окружности хорды длиной с радиус, треугольник — по шестиугольнику, четырёхугольник — строя перпендикуляр из центра окружности, в которую он вписан.
- Отражение относительно осей.
- Тривиально.
- В экспоненциальной записи: $zw = r_1 e^{i\varphi_1} r_2 e^{i\varphi_2} = (r_1 r_2) e^{i(\varphi_1 + \varphi_2)}$. Итого, надо научиться строить сумму углов и отрезок с длиной, равной произведению двух других. Сумма углов: тривиально. Произведение: пользуемся теоремой из геометрии о соотношении высоты прямоугольного треугольника со всеми другими отрезками (та, которая выводится из подобия).



Взяв $BH = h^2$, $AH = a^2$, $CH = b^2$, получим $BH^2 = AH \cdot CH \Rightarrow BH = ab$. Как строить a^2 и b^2 ? Взяв $BH = a^2$, $AH = 1$, $CH = x$, получим $a^2 = 1 \cdot x \Rightarrow x = a^2$.

№ 39 (9.12a) Докажите невозможность удвоения куба, то есть построение куба объёма 2, имея куб объёма 1 с помощью циркуля и линейки.

- Задача сводится к построению циркулем и линейкой числа $\sqrt[3]{2}$. Но $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})$ — расширение степени 3 над \mathbb{Q} , поэтому не существует башни промежуточных расширений размерности 2.

TODO: Больше объяснений! ◀

№ 40 (10.2)

- TODO ◀

№ 41 (10.4 (Lectures_all.pdf задача 9.1, утв. 9.1)) Пусть $F \subset K$ — расширение полей. Множество автоморфизмов K , оставляющих F на месте, является группой и называется группой автоморфизмов и обозначается $\text{Aut}_F(K) = \text{Aut}([K : F])$. а) $\text{Aut}_F(K)$ — группа. б) Пусть $H \subset \text{Aut}_F(K)$ — подгруппа. Тогда $K^H = \{x \in K \mid \forall h \in H \hookrightarrow h(x) = x\}$ является полем, причём $K \supset K^H \supset F$.

- б) Действительно, если $a, b \in K^H, h \in H$ то $h(a + b) = h(a) + h(b) = a + b$, и поэтому $a + b \in K^H$. Аналогично, $ab \in K^H$. С другой стороны, $h \in H \subset G$, и поэтому $h(x) = x \ \forall x \in F$. Значит, $F \subset K^H$. ◀

№ 42 (10.5) Опишите группы автоморфизмов $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})$.

- TODO ◀

№ 43 (11.1 (Lectures_all.pdf теор. 11.1)) а) Конечное поле характеристики p состоит из p^n элементов. б) Поле F является полем разложения многочлена $x^{p^n} - x$. с) Существует единственное поле из p^n элементов.

- а) Так как K — конечное расширение поля \mathbb{Z}_p , то K является n -мерным линейным пространством над \mathbb{Z}_p , и поэтому состоит из p^n элементов. б) Пусть $\alpha \in K, \alpha \neq 0$. Тогда $\alpha^{p^n-1} = 1$. Следовательно, α является корнем многочлена f . Степень многочлена f равна p^n , все элементы K являются его корнями. Ясно, что K — минимальное поле, в котором f раскладывается на линейные множители. Следовательно, K — его поле разложения. с) Поле разложение многочлена f единственно с точностью до изоморфизма. ◀

№ 44 (11.2) Найдите все неприводимые многочлены (со стар. коэффициент 1) степени 2, 3 над полем а) F_2 , б) F_3 .

- TODO ◀

№ 45 (11.3) Постройте поле из а) 4; б) 8; с) 9 элементов.

- TODO ◀