

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

а) $a0 = 0a = 0$

б) $a(-b) = (-a)b = -ab$

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

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

$0a = 0$ — аналогично.

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

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

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

№ 2(1.2)

а) В кольце не может быть двух различных единиц.

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

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

► $\forall e \neq a \in K \quad a \underbrace{\quad}_{\text{св-во единицы}} a \cdot e \underbrace{\quad}_{\text{св-во нуля}} e$

в) 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 . $\forall a \neq 0$ элементы $a \cdot a_1, \dots, a \cdot a_n$ должны быть все разные (иначе $\exists i \neq j : a \cdot a_i = a \cdot a_j \Rightarrow \underbrace{a}_{\neq 0} \underbrace{(a_i - a_j)}_{\neq 0, \text{ т. к. } i \neq j} = 0$, 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.

Имеем ≥ 2 элементов по условию.

№ 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. $\exists 1 \in K^*$ (единица из K будет единицей из K^* : она лежит в K^* , т. к. $\exists 1^{-1} = 1$, ибо $1 \cdot 1 = 1$, и выполняется свойство единицы $a1 = 1a = a$).
3. $(b^{-1}a^{-1})(ab) = (ab)(b^{-1}a^{-1}) = 1 \Rightarrow (ab)^{-1} = b^{-1}a^{-1} \in K^*$ — замкнутость относительно взятия обратного.
4. $\forall a, b \in K^* \Leftrightarrow ab \in K^*$, т. к. $\exists (ab)^{-1} = b^{-1}a^{-1}$.

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:

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

Извлекать корни можно с помощью аналога формулы Муавра: $\sqrt[n]{z} = \sqrt[n]{r}(\cos \frac{\varphi+2\pi k}{n} + i \sin \frac{\varphi+2\pi k}{n})$. Выводится из обычной формулы Муавра, расписав возведение $z^{\frac{1}{n}}$ в степень n . ◀

№ 10(2.2)

а) Докажите, что для элементов x, y области целостности K следующие условия равносильны:

- (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 $x \mid y, x \mid a$, т. е. a — делитель x . Тогда $\begin{cases} \exists c : y = xc \\ \exists b : x = ab \end{cases}$ (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 $k \in \mathbb{Z}$, то $z = a + bu \in D$ делится на k тогда и только тогда, когда a и b делятся на k . ◀

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

• \Rightarrow : Пусть $z = a + bu = k(x_1 + x_2u + x_3u^2 + \dots)$ (по №5-6.1 у нас для требуемых $u \in \mathbb{Z}[u]$ конечномерно, и существует базис x_1, \dots, x_n из конечного числа элементов).

В силу того, что есть базис: $\begin{cases} a = kx_1 \\ bu = k(x_2u + x_3u^2 + \dots) \end{cases} \Rightarrow b = k(x_2 + x_3u + \dots)$

Отсюда a и b делятся на k .

№ 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 $z \in \mathbb{Z}[u]$ с $N(z) = p$. Сформулируйте гипотезу о том, какие простые целые числа являются простыми в $\mathbb{Z}[u]$.

► 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 .

Зам. Можно брать только натуральные, т. к. для $\mathbb{Z}[i]$ норма не поменяется вообще, а для $\mathbb{Z}[\omega]$ $N = a^2 + ab + b^2 = a^2 - a(a+b) + (a+b)^2$, т. е. норма элемента $a - b\omega$ равна норме элемента $a + (a+b)\omega$, а такие мы уже перебрали, поскольку $a + b$ — натуральное. Для $a < 0$ симметрично.

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 №3.16 (№9 exam_5-6): Пусть p — простое целое, $\forall z \in \mathbb{Z}[u] : N(z) \neq p \Rightarrow p$ неразложим в $\mathbb{Z}[u]$.

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:

- $y \mathbb{Z}[i] = 4k + 3$
- $y \mathbb{Z}[\omega] = 3k + 2$

№ 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: $\forall a \in K \hookrightarrow 0a = 0 \in \{0\}$

• K :

1. Тривиальная группа по сложению:

- Ассоциативность наследуется
- 0 — нейтральный элемент, т. к. $0 + a = a + 0 = a \forall a \in K$
- $a^{-1} = -a \in K$

2. Замкнутость относительно умножения: $\forall a \in K, b \in I = K \hookrightarrow ab \in I = K$ — 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: $\forall b \in K, ax \in (a) \hookrightarrow b \cdot ax = bx \cdot a \in (a)$

в) $(a_1, \dots, a_n) = \{a_1x_1 + \dots + a_nx_n \mid x_1, \dots, x_n \in K\}$ — **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: $\forall y \in K \ y \cdot (a_1x_1 + \dots + a_nx_n) = a_1(x_1y) + \dots + a_n(x_ny) \in I$

№ 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) • $\Leftarrow: b \mid a \Rightarrow \exists c : a = cb \Rightarrow ka = (kc)b \Rightarrow (a) \subset (b)$

• $\Rightarrow: (a) \subset (b) \Rightarrow a \in (b) \Rightarrow a = cb \Rightarrow b \mid a$

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. • $x, y \in I \cap J \Rightarrow \begin{cases} x, y \in I \\ x, y \in J \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x + y \in I \\ x + y \in J \end{cases} \Rightarrow x + y \in I \cap J$
- Ассоциативность следует.
 - 0 — нейтральный
 - $x \in I \cap J \Rightarrow \begin{cases} x \in I \\ x \in J \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x^{-1} \in I \\ x^{-1} \in J \end{cases} \Rightarrow x^{-1} \in I \cap J$ — обратный
2. $\forall a \in K \forall x \in I \cap J \Leftrightarrow \begin{cases} x \in I \\ x \in J \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} ax \in I \\ ax \in J \end{cases} \Rightarrow ax \in I \cap J$

№ 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 идеала $I \subset K$ является идеалом в L ; б) образ $I \subset K$ является идеалом в $\varphi(K)$; в) прообраз идеала $J \subset L$ является идеалом в K ?

► 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, $\underbrace{\frac{1}{2}}_{\in \mathbb{Q}} \cdot \underbrace{1}_{\in \mathbb{Z}} = \frac{1}{2} \notin \mathbb{Z}$.

б) 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 $x'y' \in I$.

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

$$\forall a, b \in \varphi^{-1}(J) : \begin{cases} a + b \in \varphi^{-1}(J), \text{ т. к. } \varphi(a + b) = \varphi(a) + \varphi(b) \in J \\ \exists 0 \in \varphi^{-1}(J), \text{ т. к. } \varphi(0) = 0 \text{ по свойству гомоморфизма} \\ \exists -a \in \varphi^{-1}(J), \text{ т. к. } \varphi(-a) = -\varphi(a) \in J \end{cases}$$

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

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 : $(I)(a + I) = (a + I)(I) = aI + I^2 = I$.
 - 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/I : $(1 + I)(a + I) = (a + I)(1 + I) = a + I + aI + I^2 = a + I$.
 - 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 — простой \Leftrightarrow если $ab : x$, то $\begin{cases} a : x \\ b : x \end{cases}$

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

№ 21(4.6 (Lecture_all.pdf теор. 3.2)) 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.

Рассмотрим канонический гомоморфизм $f : K \rightarrow K/I$. Заметим: $f(I) = \{0\}$, $f(K) = K/I$.

Используем №3-4.18.

- \Leftarrow : Пусть K/I — поле, но идеал I не максимальный. Тогда \exists нетривиальный идеал $J \subset K : I \subset J$. По пункту b №3-4.18 $f(J)$ — идеал в $f(K) = K/I$. При этом $I \subset J \Rightarrow \{0\} = f(I) \subset f(J)$. $f(J)$ нетривиален, ибо он не $\{0\}$ (иначе $J = I$) и не K/I (иначе $J = K$). То есть, получили в поле нетривиальный идеал. Противоречие с тем, что это поле.
- \Rightarrow : Пусть идеал I максимален, но K/I — не поле. Тогда должен быть нетривиальный идеал $L \subset K/I$. Его прообраз $f^{-1}(L)$ по пункту с №3-4.18 — идеал в K . При этом $L \supset \{0\} \Rightarrow f^{-1}(L) \supset f^{-1}(\{0\}) = I$. Он нетривиален, ибо его прообраз не I (иначе $J = \{0\}$) и не K (иначе $J = K/I$). Т. е., получили нетривиальный идеал в K , содержащий I — противоречие с максимальностью 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 $\exists a, b \in K \setminus I : (a+I)(b+I) = ab+I = 0+I = 0_{K/I}$. Но тогда должно быть $ab \in I$, т. е. идеал не простой (вспомним, что брали $a, b \in K \setminus I$). Противоречие.
- \Leftarrow : Пусть I непростой, но K/I — область целостности. Тогда $\exists a, b : ab \in I$, но $a, b \notin I$. Рассмотрим $(a+I)(b+I) = ab+I = \underbrace{ab}_{ab \in I} + I = 0_{K/I}$, т. е. K/I — не область целостности.

№ 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 $ad = bc$.

a) Докажите, что $\{a, b\} \sim \{ac, bc\}$. b) 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; d) F является коммутативным кольцом; e) F является полем; f) существует инъекция $K \rightarrow F$.

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

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

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

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

в) Корректность определения означает, что множество замкнуто относительно операции, 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 $d \neq 0$.

г) • 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 $-\frac{a}{b} : \frac{a}{b} + -\frac{a}{b} = \frac{a-a}{b} = \frac{0}{b}$
- $\frac{a}{b}(\frac{c}{d} + \frac{e}{f}) = \frac{a}{b} \cdot \frac{cf+de}{df} = \frac{acf+ade}{bdf} = \frac{ac}{bd} + \frac{ae}{bf} = \frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d} + \frac{a}{b} \cdot \frac{e}{f}$
- 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: $\frac{a}{b} \frac{c}{d} = \frac{ac}{bd} = \frac{ca}{db} = \frac{c}{d} \frac{a}{b}$

- д) • 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. $0 \neq 1$.

е) Возьмём $\varphi : K \rightarrow F, \varphi(a) = \frac{a}{1}$.

Это гомоморфизм: $\begin{cases} \frac{ab}{1} = \varphi(ab) = \varphi(a)\varphi(b) = \frac{a}{1} \frac{b}{1} = \frac{a \cdot b}{1 \cdot 1} = \frac{ab}{1} \\ \frac{a+b}{1} = \varphi(a+b) = \varphi(a) + \varphi(b) = \frac{a}{1} + \frac{b}{1} = \frac{a \cdot 1 + 1 \cdot b}{1 \cdot 1} = \frac{a+b}{1} \end{cases}$

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 не так, и он приводим в \mathbb{Q} . По №5-6.24а, это эквивалентно приводимости в $\mathbb{Z}[x]$. Тогда, у него есть разложение $f = gh$, где $g, h \in \mathbb{Z}[x]$. Распишем: $f_n x^n + \dots + f_1 x + f_0 = f(x) = g(x)h(x) = (g_k x^k + \dots + g_1 x + g_0)(h_m x^m + \dots + h_1 x + h_0)$, $0 < \deg g, \deg h < n$. Возьмём всё по модулю p (если мы утверждаем, что у нас равенство выполняется в \mathbb{Z} , то оно должно выполняться и для любого натурального модуля).

Тогда $\bar{f}(x) = \bar{f}_n x^n$. $f(x)$ состоит из одного монома, а произведение двух многочленов — один моном \Leftrightarrow оба этих т. к. другие члены делятся на p

многочлена тоже мономы. Отсюда $\bar{f}(x) = \bar{g}(x)\bar{h}(x) = (g_k x^k)(h_m x^m)$. Рассмотрим свободный член. Если $k, m > 1$, то $a_0 = \underbrace{g_0}_{\vdots p} \underbrace{h_0}_{\vdots p} : p^2$ (свободные члены $g(x)$ и $h(x)$ делятся на p , т. к. они зануляются, когда мы берём по модулю

p) — 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: $1 \not\vdots p, -p \vdots p, -p \not\vdots p^2$, где p — простое.

№ 26(6.3) Характеристика поля — простое число.

- Если $\text{char } F = 1$, то $1 = 0$, поле из одного элемента, что не является полем по нашей договорённости.

Если $\text{char } F = mn, m, n \in \mathbb{N}, m, n > 1$, то $\underbrace{(1 + \dots + 1)}_m \underbrace{(1 + \dots + 1)}_n \overset{\text{по дистрибутивности}}{=} \underbrace{1 + \dots + 1}_{m \cdot n} = 0$. Но по определению характеристики, для $m, n < mn$ имеем $\underbrace{1 + \dots + 1}_m \neq 0$ и $\underbrace{1 + \dots + 1}_n \neq 0$. Получается, в поле есть делители

нуля. Противоречие.

◀

№ 27(6.4(Lecture all.pdf №6.2(3))) Если существует нетривиальный гомоморфизм полей $\varphi : F \rightarrow K$, то $\text{char}(F) = \text{char}(K)$.

- Гомоморфизм нетривиален \Rightarrow по №29 он является инъекцией, а у инъекции $\text{Ker } \varphi = \{0\}$ по лемме из №29. Так как $\varphi(1) = 1$, имеем $\varphi(\underbrace{1 + \dots + 1}_m) = \underbrace{1 + \dots + 1}_m$.

Если $\underbrace{1 + \dots + 1}_m = 0$ в F , то по свойству гомоморфизма и в K тоже. Получили $\text{char}(K) \leq \text{char}(F)$.

Т. к. $\text{Ker } \varphi = \{0\}$, то только 0 переходит в 0, т. е. получив сложением единичек 0 в K знаем, что в F тоже 0. Отсюда $\text{char}(F) \leq \text{char}(K)$.

№ 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.

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

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

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

- $\bullet \Leftarrow$: Пусть не так. $\text{Ker } \varphi \neq \{0\} \Rightarrow \exists 0 \neq a \in \text{Ker } \varphi$. Тогда $\forall b \in K \hookrightarrow \varphi(b + a) = \varphi(b) + \varphi(a) = \varphi(b)$ — нарушение инъективности.

Лемма. $\text{Ker } \varphi$ — идеал в F

- $\text{Ker } \varphi$ — подгруппа по сложению — простая проверка.

$\forall a, b \in \text{Ker } \varphi \hookrightarrow ab \in \text{Ker } \varphi$, т. к. $\varphi(ab) = \varphi(a)\varphi(b) = 0 \cdot 0 = 0$ — замкнутость относительно умножения.

$\forall a \in F, x \in \text{Ker } \varphi \hookrightarrow \varphi(ax) = \varphi(a)\varphi(x) = \varphi(a) \cdot 0 = 0 \Rightarrow ax \in \text{Ker } \varphi$

В поле F идеал $I = \begin{cases} \{0\} \\ F \end{cases}$, т. е. $\text{Ker } \varphi = \begin{cases} \{0\} \\ F \text{ — невозможно} \end{cases}$

(в последнем случае гомоморфизм тривиален, но у нас нетривиальный по условию).

№ 30(№6.8) Если $K \supset F$ — расширение полей, то K является линейным пространством над F .

- Проверка свойств. Свойства линейного пространства следуют из аксиом поля.

1. $\mathbf{x} + \mathbf{y} = \mathbf{y} + \mathbf{x}$, для любых $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in V$ ("коммутативность сложения");
2. $\mathbf{x} + (\mathbf{y} + \mathbf{z}) = (\mathbf{x} + \mathbf{y}) + \mathbf{z}$, для любых $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z} \in V$ ("ассоциативность сложения");
3. существует такой элемент $\mathbf{0} \in V$, что $\mathbf{x} + \mathbf{0} = \mathbf{x}$ для любого $\mathbf{x} \in V$ ("существование нейтрального элемента относительно сложения"), называемый *нулевым вектором* или просто *нулём* пространства V ;
4. для любого $\mathbf{x} \in V$ существует такой элемент $-\mathbf{x} \in V$, что $\mathbf{x} + (-\mathbf{x}) = \mathbf{0}$, называемый вектором, *противоположным* вектору \mathbf{x} ;
5. $\alpha(\beta\mathbf{x}) = (\alpha\beta)\mathbf{x}$ ("ассоциативность умножения на скаляр");
6. $1 \cdot \mathbf{x} = \mathbf{x}$ ("унитарность: умножение на нейтральный (по умножению) элемент поля F сохраняет вектор");
7. $(\alpha + \beta)\mathbf{x} = \alpha\mathbf{x} + \beta\mathbf{x}$ ("дистрибутивность умножения вектора на скаляр относительно сложения скаляров");
8. $\alpha(\mathbf{x} + \mathbf{y}) = \alpha\mathbf{x} + \alpha\mathbf{y}$ ("дистрибутивность умножения вектора на скаляр относительно сложения векторов").

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

- Лёша пункт d с. 29

$$\text{char } F = 0 \Rightarrow 1, 1 + 1, 1 + 1 + 1, \dots \in F \Rightarrow \mathbb{N} \subset F$$

По свойству кольца у каждого элемента a есть обратный по сложению $-a \Rightarrow \mathbb{Z} \subset F$.

По свойству поля у каждого ненулевого элемента b есть обратный по умножению $\frac{1}{b} \Rightarrow \forall a \in \mathbb{Z}, b \in \mathbb{N} \hookrightarrow a \frac{1}{b} = \frac{a}{b} \in F$. Отсюда $\mathbb{Q} \in F$.

Альтернативная концовка:

По №5-6.21a $\text{Quot } F = F$ для поля (подставим $\text{Quot } F$ вместо F).

Лемма. (используется для доказательства №5-6.21b) Если $K \subset L$, то $\text{Quot } K \subset \text{Quot } L$ для всех колец K и L .

- $K \subset L \Rightarrow \text{Quot } K$ вложено в $\text{Quot } L$ как множество. Инъективное отображение строится как $\varphi : \text{Quot } K \rightarrow \text{Quot } L, \frac{a}{b} \mapsto \frac{a}{b}$. Очевидно, это инъекция. ◀

У нас $\mathbb{Z} \subset F \Rightarrow \mathbb{Q} = \text{Quot } \mathbb{Z} \subset \text{Quot } F = F$. ◀

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

- **Лёма, с. 30, №13b** Рассмотрим $y = x + (f(x)) \in K$. Тогда $f(y) = f(x + (f(x)))$. Пусть $f(x) = a_n x^n + \dots + a_1 x + a_0$. Тогда $f(y) = a_n (x + (f(x)))^n + \dots + a_1 (x + (f(x))) + a_0 = \underbrace{a_n x^n + \dots + a_1 x + a_0}_{\in (f(x))} + (f(x)) = (f(x)) = 0_K$. Это и

значит, что $y \in K$ — корень многочлена f . ◀

№ 33 (Lecture_all.pdf утв. 6.5(1)) Пусть $f(x)$ — неприводимый многочлен степени n , и $K = F[x]/(f(x))$. Чему равна степень $[K : F]$ этого расширения?

- Обозначим смежный класс многочлена $g(x) \in F$ по идеалу $(f(x))$ как $\bar{g}(x) \in K$ (т. е. $\bar{g}(x)$ — остаток от деления $g(x)$ на $f(x)$, $\deg \bar{g} < \deg f = n$).

Рассмотрим $\bar{1}, \bar{x}, \dots, \bar{x}^{n-1}$. Пусть они ЛЗ, т. е. $\exists \lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{n-1} \in F : \lambda_0 \cdot \bar{1} + \lambda_1 \cdot \bar{x} + \dots + \lambda_{n-1} \cdot \bar{x}^{n-1} = 0$. Но это означает, что многочлен $\lambda_0 + \lambda_1 x + \dots + \lambda_{n-1} x^{n-1}$ степени $< n$ делится на $f(x)$ степени n — невозможно. Поэтому $\bar{1}, \bar{x}, \dots, \bar{x}^{n-1}$ ЛНЗ.

В K находятся всевозможные остатки при делении на $f(x)$, $\deg f = n$, то есть всевозможные многочлены степеней $\leq n - 1$. Очевидно, все они порождаются какой-либо линейной комбинацией $\bar{1}, \bar{x}, \dots, \bar{x}^{n-1}$.

Поэтому $\bar{1}, \bar{x}, \dots, \bar{x}^{n-1}$ образуют базис K как линейного пространства над F , т. е. $[K : F] = n$. ◀

№ 34 (7.9, 7.10) Умение находить степень расширения и минимальный многочлен для алгебраического над полем элемента.

- Как находить минимальный многочлен m_α ? Придумать многочлен, у которого α является корнем, и доказать (например, по критерию Эйзенштейна из №24), что он неприводим. Тогда по СЭУ из опр. 29 минимального многочлена, это действительно минимальный многочлен.

По №7.1г(№30г exam_5-6), степень расширения равна степени минимального многочлена.

- $\mathbb{Q}(\sqrt{2}) \supset \mathbb{Q} : m = x^2 - 2 \Rightarrow \deg = 2$
- $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{5}) \supset \mathbb{Q} : m = x^3 - 5 \Rightarrow \deg = 3$
- $\mathbb{R}(2 - 3i) \supset \mathbb{R} : \deg = 2$

$m = 9x^2 + 4 = (2 - 3i)(2 + 3i)$ — сложно доказывать неприводимость, критерий Эйзенштейна не помогает.

Попробуем воспользоваться теоремой Виета: $\begin{cases} c = (2 - 3i)(2 + 3i) = 4 + 9 = 13 \\ b = (2 - 3i) + (2 + 3i) = 4 \end{cases} \quad . \quad m = x^2 - 4x + 13$. Тоже

неудача, критерий Эйзенштейна не помогает.

Замена $x \mapsto x + 1$: $m = (x + 1)^2 - 4(x + 1) + 13 = x^2 - 2x + 10$. Применяем критерий Эйзенштейна для $p = 2$ и получаем, что m неприводим.

- $\mathbb{C}(2 - 3i) \supset \mathbb{C} : \deg = 1$
 $m = x - (2 - 3i)$

$N(2 - 3i) = 4 + 9 = 13$ — простое число, значит, $2 - 3i$ — простой элемент (по №3.1a(№5-6.9) знаем, что если норма — простое число, то элемент неразложим, а по №2.8(№5-6.5) в факториальном кольце простота эквивалентна неразложимости (по №7-8.7 евклидово кольцо факториально)).

Применяем критерий Эйзенштейна для $p = 2 - 3i$ и получаем, что m неприводим.

- $\mathbb{Q}(\sqrt{2} + \sqrt{3}) \supset \mathbb{Q} : \deg = 4$
 $\alpha := \sqrt{2} + \sqrt{3} \Rightarrow \alpha^2 = 5 + 2\sqrt{6} \Rightarrow \alpha^2 - 5 = 2\sqrt{6} \Rightarrow (\alpha^2 - 5)^2 = 24$
 $m = \alpha^4 - 10\alpha^2 + 1$

Критерий Эйзенштейна не работает. Замену подобрать не получается.

Воспользуемся эквивалентным определением минимального многочлена m_α : это многочлен минимальной степени, обнуляющийся на α . Разложим m на линейные множители над \mathbb{Q} . $m = (x^2 + 2\sqrt{6} - 5)(x^2 - 2\sqrt{6} -$

5) = $(x - \sqrt{5 - 2\sqrt{6}})(x + \sqrt{5 - 2\sqrt{6}})(x - \sqrt{2\sqrt{6} + 5})(x + \sqrt{2\sqrt{6} + 5})$. Минимальный многочлен должен быть произведением каких-то из этих множителей и иметь коэффициенты из \mathbb{Q} . Произведением одной или трёх множителей он быть не может (иначе коэффициент из \mathbb{C}), двух — тоже (коэффициент из \mathbb{R}). Итого, надо брать все четыре множителя, т. е. наш найденный m и есть минимальный многочлен.

- $\mathbb{Q}(1 + \sqrt{2}) \supset \mathbb{Q}(\sqrt{2} + \sqrt{3})$: $\deg = 1$

Лемма. $\mathbb{Q}[\sqrt{2} + \sqrt{3}] \cong \mathbb{Q}[\sqrt{2}, \sqrt{3}]$

► \subseteq очевидно.

\supseteq : Рассмотрим $\frac{1}{\sqrt{2} + \sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3} - \sqrt{2}}{3 - 2} = \sqrt{3} - \sqrt{2}$ — обратный к $\sqrt{2} + \sqrt{3}$ (он есть, т. к. $\mathbb{Q}[\sqrt{2} + \sqrt{3}] \cong \mathbb{Q}(\sqrt{2} + \sqrt{3})$ — поле).

$(\sqrt{2} + \sqrt{3}) + (\sqrt{3} - \sqrt{2}) = 2\sqrt{3}$, т. е. $\sqrt{3}$ лежит в кольце. Тогда $\sqrt{2} = (\sqrt{2} + \sqrt{3}) - \sqrt{3}$ тоже лежит в кольце. ◀

Тогда $\mathbb{Q}(\sqrt{2} + \sqrt{3}) \cong \mathbb{Q}(\sqrt{2})(\sqrt{3})$

$m = x - (1 + \sqrt{2})$ — степени 1, неразложимый. $1 + \sqrt{2} \in \mathbb{Q}(\sqrt{2})(\sqrt{3})$.

- $\mathbb{Q}(\omega) \supset \mathbb{Q}$: $\deg = 2$

$m = x^2 + x + 1$: $m(\omega) = 0$ (можно понять по картинке), неприводим по критерию Эйзенштейна после замены $x \mapsto x + 1$ для $p = 3$, $\deg m = 2$.

- $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}, \omega) \supset \mathbb{Q}$: $\deg = 6$

$\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}, \omega) \cong \mathbb{Q}[\sqrt[3]{2}][\omega]$ по №7.4а, имея в виду, что $F[\alpha_1, \dots, \alpha_n] \cong F[\alpha_1] \dots [\alpha_n]$ — очевидно, и что $\sqrt[3]{2}$ и ω алгебраичны над \mathbb{Q} .

$[\mathbb{Q}[\sqrt[3]{2}] : \mathbb{Q}] = 3$, т. к. $m = x^3 - 2$ — неприводим по критерию Эйзенштейна.

$\omega \notin \mathbb{Q}[\sqrt[3]{2}]$, т. к. в $\mathbb{Q}[\sqrt[3]{2}]$ нет комплексных чисел. Значит, $m = x^2 + x + 1$ неприводим над $\mathbb{Q}[\sqrt[3]{2}]$ по критерию Эйзенштейна.

Итого, пользуясь №7.3(№32 exam_5-6), $3 \cdot 2 = 6$

- $\mathbb{Q}(\sqrt[4]{2}, i) \supset \mathbb{Q}$: $\deg = 8$

Аналогично, $4 \cdot 2 = 8$.

- $\mathbb{Q}(\sqrt[5]{2}, i) \supset \mathbb{Q}$: $\deg = 10$

Аналогично, $5 \cdot 2 = 10$.

TODO: проставить ссылки на утверждения ◀

№ 35(6.10, 8.9а, 10.5) Умение описывать расширения степени 2: минимальный многочлен, поле разложения, нормальность, группа Галуа.

► На примере $\mathbb{Q}(\sqrt{2}) \supset \mathbb{Q}$. Степень расширения $[\mathbb{Q}(\sqrt{2}) : \mathbb{Q}] = 2$ (№5-6.30г), ибо мин. многочлен для элемента $\sqrt{2}$: $x^2 - 2$ — степени 2. Значит, $\mathbb{Q}(\sqrt{2}) = \mathbb{Q}/(x^2 - 2)$ (№5-6.30в).

$\mathbb{Q}(\sqrt{2})$ — 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}).

$\mathbb{Q} = \{a + \sqrt{2}b \mid a, b \in \mathbb{Q}\}$. 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 (следует из №7-8.16):

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

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

Автоморфизмов 2 \Rightarrow так как порядок группы автоморфизмов $\text{Aut}_{\mathbb{Q}} \mathbb{Q}(\sqrt{2})$ совпадает с размерностью расширения $[\mathbb{Q}(\sqrt{2}) : \mathbb{Q}]$, это расширение Галуа. Единственная (с точностью до изоморфизма) группа из двух элементов — \mathbb{Z}_2 , значит группа Галуа данного расширения есть \mathbb{Z}_2 .

Примитивный элемент $\gamma = \sqrt{2}$ — очевидно. ◀

№ 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 $g(x) = b_n x^n + \dots + b_1 x + b_0$:

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

$$\bullet \text{Лемма. } (\alpha f)' = \alpha f'.$$

$$\bullet (\alpha f)' = (\alpha a_n x^n + \dots + \alpha a_1 x + \alpha a_0)' = \alpha a_n n x^{n-1} + \dots + \alpha a_1 = \alpha(a_n n x^{n-1} + \dots + a_1) = \alpha f'$$

Если $(fg)' = f'g + fg'$ верно для $f = f_1$ и $f = f_2$, то для $f = \alpha f_1 + \beta f_2$:

$((\alpha f_1 + \beta f_2)g)' = \alpha(f_1g)' + \beta(f_2g)' = \alpha f_1'g + \beta f_2'g + \alpha f_1g' + \beta f_2g' = (\alpha f_1 + \beta f_2)'g + (\alpha f_1 + \beta f_2)g'$. Для g симметрично. Значит, достаточно проверить формулу для $f = x^m$ и $g = x^k$.

$$(fg)' = (x^{m+k})' = (m+k)x^{m+k-1}$$

$$f'g + fg' = mx^{m+k-1} + kx^{m+k-1} = (m+k)x^{m+k-1}$$

№ 37 (9.2) (для $\text{char } F = 0$) 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 $m > 1$ (кратный корень), то $f'(a) = 0$, и $(f, f') = (x-a)^{m-1} \neq 1$.
- Если $m = 1$ (корень кратности 1), то $f'(x) = (x-a)f_1'(x) + f_1(x) \Rightarrow f'(a) = f_1(a) \neq 0 \Rightarrow$ нельзя вынести никакой общий множитель $\Rightarrow (f, f') = 1$

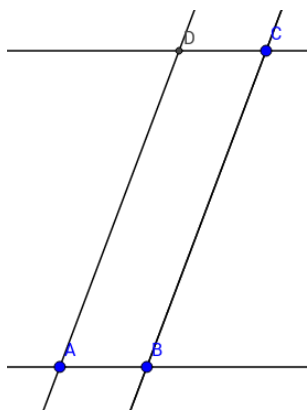
№ 38(9.6) Докажите, что можно построить

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

Если мы построили точки z, w , то можно ли построить точки с) $\bar{z}, -z$? д) $z + w, z - w$? е) $z \cdot w$?

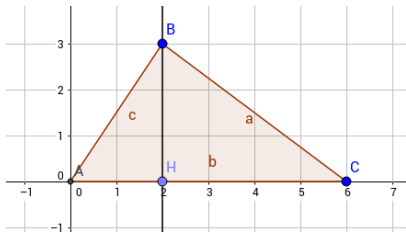
► При помощи гутля учимся строить: перпендикулярную прямую (через заданную точку), параллельную прямую (через заданную точку).

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 $A_{n-1}B_{n-1}, \dots, A_1B_1$. По теореме Фалеса $0B_1 = B_1B_2 = \dots = B_{n-1}1$. 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: $z\omega = r_1 e^{i\varphi_1} r_2 e^{i\varphi_2} = (r_1 r_2) e^{i(\varphi_1 + \varphi_2)}$. 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 всякими 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 $\sqrt[3]{2}$.

Минимальный многочлен для $\sqrt[3]{2}$ есть $x^3 - 2$, неприводимый по признаку Эйзенштейна в \mathbb{Q} и потому минимальный. Значит, размерность расширения $= 3 \Rightarrow$ не существует башни промежуточных расширений размерности $\leq 2 \Rightarrow$ по №19 exam_7-8 её нельзя построить.

№ 40 (10.2) Пусть $\varphi : F \rightarrow F$ — автоморфизм поля F (изоморфизм поля на себя). а) Пусть $\text{char} F = 0$. Верно ли, что φ сохраняет \mathbb{Q} ? (то есть при $q \in \mathbb{Q}$ выполнено равенство $\varphi(q) = q$). б) Пусть $\text{char} F = p$. Верно ли, что φ сохраняет \mathbb{Z}_p ?

► а) Автоморфизм переводит единицу в единицу: $\varphi(1) = 1$ по свойствам гомоморфизма. Тогда $\forall p \in \mathbb{Z} \hookrightarrow \varphi(p) = \varphi(\underbrace{1 + \dots + 1}_p) = \underbrace{\varphi(1) + \dots + \varphi(1)}_p = p$. Получили, что \mathbb{Z} сохраняется.

Тогда $\varphi(2) = \varphi(1 + 1) = \varphi(1) + \varphi(1) = 1 + 1 = 2$. И так далее. Получили, что \mathbb{Z} сохраняется.

Если какой-нибудь элемент $\frac{a}{b} \in \mathbb{Q}$ перевёлся не в себя, то $\varphi(\underbrace{\frac{a}{b} + \dots + \frac{a}{b}}_b) = \underbrace{\varphi(\frac{a}{b}) + \dots + \varphi(\frac{a}{b})}_b \neq a$, т. е. в \mathbb{Z}

что-то перешло не в себя. Противоречие.

б) Да, т. к. если $m \in \mathbb{Z}_p$, то $\varphi(m) = \underbrace{\varphi(1) + \dots + \varphi(1)}_m = m$

№ 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 $K \supset K^H \supset F$.

► а) • Композиция автоморфизмов, сохраняющих F , — автоморфизм, сохраняющий $F \Rightarrow$ замкнутость.

- id — нейтральный элемент.
- Ассоциативность следует из свойств композиции.
- Обратный существует, т. к. автоморфизм — биекция. Обратный сохраняет F .

б) Пусть $a, b \in K^H, h \in H$.

- Ассоциативность по сложению наследуется.
- $\exists 0_{K^H} = 0_K$, ибо $\forall h \in H \hookrightarrow h(0) = 0$ по свойству гомоморфизма.
- $\forall a \in K^H \exists -a \in K^H$, ибо если $a \in K^H$, то $\forall h \in H \hookrightarrow h(a) = a \Rightarrow -h(a) = -a \Rightarrow h(-a) = -a$
- Дистрибутивность наследуется
- Ассоциативность по умножению наследуется.
- $\exists 1_{K^H} = 1_K$, ибо $\forall h \in H \hookrightarrow h(1) = 1$ по свойству гомоморфизма.
- $\forall a \in K^H \exists a^{-1} \in K^H$, ибо если $a \in K^H$, то $\forall h \in H \hookrightarrow h(a) = a \Rightarrow (h(a))^{-1} = a^{-1} \Rightarrow h(a^{-1}) = a^{-1}$

Замкнутость: $\begin{cases} h(a+b) = h(a) + h(b) = a + b \Rightarrow a + b \in K^H \\ h(ab) = h(a)h(b) = ab \Rightarrow ab \in K^H \\ h(a^{-1}) = h(a)^{-1} = a^{-1} \Rightarrow a^{-1} \in K^H \end{cases}$

Кроме того, $h \in H \subset G$, и поэтому h сохраняет F . Значит, $F \subset K^H$. $K^H \subset K$ по определению.

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

► По №40 знаем, что автоморфизм сохраняет \mathbb{Q} . Значит, нужно смотреть только за тем, куда переходит $\sqrt[3]{2}$.

Куда может перейти $\sqrt[3]{2}$? По №7-8.16 знаем, что он может перейти только в сопряжённые с ним: $\sqrt[3]{2}, \sqrt[3]{2\omega}, \sqrt[3]{2\omega^2}$.
 $\notin \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})$

Значит, он может перейти только в себя, т. к. все другие перестановки корней дают комплексные числа.

$\text{Aut}_{\mathbb{Q}} \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}) = \{\text{id}\}$.

№ 43 (11.1 (Lectures_all.pdf теор. 11.1)) а) Конечное поле F характеристики p состоит из p^n элементов.

б) Поле F является полем разложения многочлена $x^{p^n} - x$.

в) Существует единственное (с точностью до изоморфизма) поле из p^n элементов.

► а) Любое конечное поле K характеристики p является расширением поля \mathbb{Z}_p (по №7-8.21; можно объяснить на пальцах так: в K есть 0, 1, значит, есть $\underbrace{1 + \dots + 1}_m$ для всех $m < p$, и в эти элементы можно построить вложение

из \mathbb{Z}_p). Т. к. поле конечно, расширение конечно. Пусть оно имеет степень n . Тогда K является n -мерным линейным пространством над \mathbb{Z}_p , и поэтому состоит из p^n элементов.

б) Порядок мультипликативной группы поля K $|K^*| = p^n - 1$ (по пункту а p^n элементов всего, и не берём $\{0\}$). По теореме Лагранжа для групп $H < G$ выполняется $|G| = |H| \cdot [G : H]$. Также знаем, что порядок элемента равен порядку подгруппы, им порождённой. Отсюда $\forall a \in K \hookrightarrow \text{ord } a \mid |K^*| = p^n - 1 \Rightarrow$ имеем $\forall a \in K \hookrightarrow a^{p^n-1} = 1 \Rightarrow a^{p^n} = a$. Значит, любой элемент $a \in K$ является корнем многочлена $x^{p^n} - x = 0$. Общее число этих корней не превышает p^n . Но кратных корней нет (т. к. $(f, f') = (x^{p^n} - x, p^n x^{p^n-1} - 1) = 1$), значит их и не меньше. Значит, корни этого многочлена — в точности элементы K . Получается, над K многочлен раскладывается на линейные сомножители. Т. к. K конечно, во всех подполях K содержится меньшее число элементов \Rightarrow в них многочлен не раскладывается. Значит, по определению K — поле разложения требуемого многочлена.

в) Т. к. по пункту б поле F есть поле разложения, оно единственно с точностью до изоморфизма (знаем, что поле разложения единственно с точностью до изоморфизма, и пользуемся этим без доказательства).

№ 44 (11.2) Найдите все неприводимые многочлены (со стар. коэффициент 1) степени 2, 3 над полем а) \mathbb{F}_2 , б) \mathbb{F}_3 .

► Выписываем все возможные многочлены и вычёркиваем те, которые разложимы. Если мы вычеркнули все разложимые (а мы умеем это делать, см. пункт а), то остались только неразложимые.

Количество M_k неприводимых многочленов степени k над \mathbb{Z}_p можно посчитать по формуле $M_k = \frac{1}{k} \sum_{d \mid k} p^d \mu\left(\frac{k}{d}\right)$

(теор. 11.3 из Lecture_all), где функция Мёбиуса

$$\mu(n) = \begin{cases} 1, n \text{ свободно от квадратов и разложение } n \text{ на простые состоит из чётного числа сомножителей,} \\ -1, n \text{ свободно от квадратов и разложение } n \text{ на простые состоит из нечётного числа сомножителей,} \\ 0, n \text{ не свободно от квадратов,} \end{cases}$$

$$\mu(1) = 1.$$

Так можно проверить результат.

а) \mathbb{F}_2 : Неразложимые степени 1: x и $x + 1$. Разложимые степени 2 — какая-то комбинация многочленов степени 1. Оставшиеся — неразложимы. Теперь смотрим все возможные многочлены степени 3, которые можно получить, перемножая многочлены степени 1 и многочлены степени 2.

$$\deg = 2, M_2 = 1: x^2, \underbrace{x^2+1}_{(x+1)(x+1)}, x^2+x, x^2+x+1$$

$$\deg = 3, M_3 = 2: x^3, \underbrace{x^3+1}_{(x^2+1)(x^2+x+1)}, x^3+x, x^3+x+1, x^3+x^2, x^3+x^2+1, x^3+x^2+x, \underbrace{x^3+x^2+x+1}_{(x^2+1)(x+1)}$$

б) \mathbb{F}_3 : Рассуждения аналогичны.

$$\deg = 2, M_2 = 3: x^2, x^2+1, \underbrace{x^2+2}_{(2x+1)(2x+2)}, x^2+x, \underbrace{x^2+x+1}_{(x+2)^2}, x^2+x+2, x^2+2x, \underbrace{x^2+2x+1}_{(2x+2)^2}, x^2+2x+2$$

$\deg = 3, M_3 = 8:$

$$\begin{aligned} & \underline{x^3}, \quad \underbrace{x^3+1}_{(x^2+2x+1)(x+1)}, \quad \underbrace{x^3+2}_{(x^2+x+1)(x+2)}, \quad x^3+x, \quad \underbrace{x^3+x+1}_{(x^2+x+2)(x+2)}, \quad \underbrace{x^3+x+2}_{(x^2+2x+2)(x+1)}, \quad x^3+2x, x^3+2x+1, x^3+2x+2, x^3+x^2, \\ & \underbrace{x^3+x^2+1}_{(x^2+2x+2)(x+2)}, x^3+x^2+2, x^3+x^2+x, \underbrace{x^3+x^2+x+1}_{(x^2+1)(x+1)}, x^3+x^2+x+2, x^3+x^2+2x, x^3+x^2+2x+1, \\ & \underbrace{x^3+x^2+2x+2}_{(x^2+2)(x+1)}, x^3+2x^2, x^3+2x^2+1, \underbrace{x^3+2x^2+2}_{(x^2+x+2)(x+1)}, x^3+2x^2+x, x^3+2x^2+x+1, \\ & \underbrace{x^3+2x^2+x+2}_{(x^2+1)(x+2)}, x^3+2x^2+2x, \underbrace{x^3+2x^2+2x+1}_{(x^2+2)(x+2)}, x^3+2x^2+2x+2 \end{aligned}$$

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

- Для p^n : $F_{p^n} = F_p[x]/(f(x))$, где $f(x)$ — неприводимый многочлен степени n (пользуемся №33: $[F[x]/(f(x)) : F] = n$). Итого, надо просто найти неприводимый многочлен над F_p степени n . Как искать неприводимые многочлены рассказано в №44.

Чтобы выписать элементы кольца явно, берём все возможные многочлены нужной степени над нужным полем и делим с остатком на многочлен, по которому факторизуем (факторизация в данном случае и есть деление с остатком). То есть, нужно выписать все возможные остатки при делении на наш многочлен.

Далее пишем "таблицу сложения" и "таблицу умножения" по модулю многочлена. Она может быть большой, посему пишем частично, чтобы показать, что можем.

а) $4 = 2^2 \mathbb{F}_4 = F_2[x]/(x^2 + x + 1) = \{0; 1; x; 1 + x\}$

+	0	1	x	$x+1$
0	0	1	x	$x+1$
1	1	0	$x+1$	x
x	x	$x+1$	0	1
$x+1$	$x+1$	x	1	0

\times	0	1	x	$x+1$
0	0	0	0	0
1	0	1	x	$x+1$
x	0	x	$x^2 = x+1$	$x^2 + x = 1$
$x+1$	0	$x+1$	$x^2 + x = 1$	$x^2 + 1 = x$

- б) $8 = 2^3 \mathbb{F}_8 = F_2[x]/(x^3 + x^2 + 1) = \{0; 1; x; x+1; x^2; x^2+1; x^2+x; x^2+x+1\}$
в) $9 = 3^2 \mathbb{F}_9 = F_3[x]/(x^2 + 1) = \{0; 1; 2; x; x+1; x+2; 2x; 2x+1; 2x+2\}$