Алгебраическая геометрия.

Лектор — Иван Александрович Панин
Создатель конспекта — Глеб Минаев *

TODOs

Содержание

Литература:

- Хартсхорн, “Алгебраическая геометрия”.
- Атья, Макдональд, “Введение в коммутативную алгебру”.

Замечание 1. Все кольца ассоциативны, коммутативны и с единицей.

1 Коммутативноалгебраическое введение

Определение 1. Пусть I — частично упорядоченное по порядку $\leqslant$ множество, т.е.

$$a \leqslant b \leqslant c \implies a \leqslant c.$$

ОВУ: всякая последовательности элементов $i_1 \leqslant i_2 \leqslant \dots$ стабилизируется с некоторого момента (т.е. последовательность имеет константный хвост).

Наличие минимального элемента. Для всякого $J \subseteq I$ существует $j_{max} \in J$, что для всякого $j \in J$ имеет место следствие $j_{max} \leqslant j \Rightarrow j = j_{max}$.

Лемма 1. *I удовлетворяет ОВУ тогда и только тогда, когда I удовлетворяет наличию минимального элемента.*

*Оригинал конспекта расположен на GitHub. Также на GitHub доступен репозиторий с другими конспектами.

Доказательство.

$\Rightarrow$) Предположим, что максимального элемента, т.е. для всякого элемента есть строго больший. Тогда мы можем построить строго возрастающую последовательность, что противоречит ОВУ.

$\Leftarrow$) Пусть дана нестрого возрастающая последовательность $(i_m)_{m=1}^{\infty}$. Тогда применяя свойство наличия максимального элемента для $J := \{i_m\}_{m=1}^{\infty}$, получаем, что есть $j_M \in J$ (для некоторого M), для которого нет строго большего в J. Значит после j_M все элементы с ним совпадают.

$\square$

Определение 2. Пусть A — кольцо, а M — A-модуль. Тогда $\mathrm{mod}(A)$ — множество всех подмодулей в M, упорядоченных по включению ($(0), M \in \mathrm{mod}(M)$).

M *нётеров*, если $\mathrm{mod}(A)$ удовлетворяет ОВУ (или наличию максимального элемента).

Лемма 2.

1. *Если M нётеров, то любой подмодуль $N \subseteq M$ конечнопорождён (как A-модуль).*
2. *Если любой подмодуль M конечнопорождён, то M нётеров.*

Доказательство.

$1 \Rightarrow 2$) Пусть M нётеров, $N \subseteq M$ — подмодуль. Пусть I — все конечнопорождённые модули в N.

I непуст, так как $(0) \in I$. Следовательно, в I есть максимальный элемент, пусть N_{max}. Если $N_{max} = N$, то N конечнопорождён. Если $N_{max} \neq N$, то существует $x \in N \setminus N_{max}$, что $N_{max} \nsubseteq N_{max} + x \cdot A \subseteq N$ — противоречие.

$2 \Rightarrow 1$) Пусть имеется последовательность $M_1 \subseteq M_2 \subseteq \ldots$ подмодулей M. Определим

$$M_\infty := \bigcup_{m=1}^{\infty} M_m.$$

M_∞ тоже подмодуль M. Значит M_∞ конечнопорождён. $x_1, \ldots, x_n \in M_\infty$, значит есть n_0, что $x_1, \ldots, x_n \in M_{n_0}$. Следовательно,

$$M_{n_0} = M_{n_0+1} = M_{n_0+2} = \ldots$$

$\square$

Лемма 3. *M' — подмодуль M и есть сюръективный гомоморфизм $\pi : M \to M/M' = M''$. Тогда M нётеров тогда и только тогда, когда M' и M'' нётеровы.*

Доказательство. Пусть M — нётерово. Покажем, что M' нётерово. Пусть есть цепочка $M'_1 \subseteq M'_2 \subseteq \ldots$ подмодулей M. M нётерово, значит цепочка стабилизируется, значит M' нётерова.

Покажем, что M'' нётерово. Пусть есть цепочка подмодулей $M''_1 \subseteq M''_2 \subseteq \ldots$. Следовательно $[\pi(\pi^{-1}(M''_1) \subseteq \pi^{-1}(M''_2) \subseteq \ldots)] \subseteq M$. Значит цепочка стабилизируется. Значит стабилизируется изначальная цепочка, значит M'' нётерово.

Теперь предположим, что M' и M'' нётеровы.

Дописать.

$\square$

Определение 3. Кольцо A *нётерово*, если как модуль над собой нётерово.

Замечание 2. 1 — образующая A как A-модуля. Всякий идеал I является подмодулем A, но может не иметь одного образующего.

Определение 4. *Идеал* I кольца A — непустое подмножество A, что для всяких $a, b \in I$ $a + b \in I$ и для всяких $a \in I$, $k \in A$ $ak \in I$.

Лемма 4. *Пусть дано кольцо A. TFAE*

1. *A нётерово.*
2. *Любая цепочка идеалов $I_1 \subseteq I_2 \subseteq \dots$ стабилизируется.*
3. *Всякий идеал I конечнопорождён.*

Доказательство.

$1 \Leftrightarrow 2)$ По определению.

$1 \Leftrightarrow 3)$ По лемме 2.

$\square$

Лемма 5. *Пусть дано нётерово кольцо A. Тогда для всякого $n \geqslant 0$ A^n — нётеров модуль.*

Доказательство. (0) — нётеров. $A^1 = A$ — нётеров. Далее легко провести по индукции, что A^{n-1} нётерово и $A^n/A^{n-1} = A$ нётерово, а тогда A^n нётерово. $\square$

Следствие 5.1. *Если A — нётерово кольцо, то всякий конечнопорождённый A-модуль M нётеров.*

Доказательство. Пусть $m_1, \dots, m_r \in M$ — система порождающих модуля M. Тогда имеем сюръективный гомоморфизм $A^r \to M$, порождённый $e_i \mapsto m_i$. Следовательно, по лемме 3 из нётеровости A^r следует нётеровость M. $\square$

Следствие 5.2. *Если M — конечнопорождённый модуль и N — подмодуль M, то N конечнопорождён. В частности всякий подмодуль $N \subseteq A^r$ конечнопорождён.*

Доказательство.

Дописать.

$\square$

Теорема 6 (Гильберта)**.** *Если кольцо A нётерово, то $A[t]$ нётерово.*

Доказательство. Пусть фиксирован некоторый идеал I в $A[t]$. Как только мы покажем, что I конечнопорождён, то применяя лемму 4, получим нётеровость $A[t]$.

Пусть $\mathcal{A} \subseteq A$ — множество старших членов многочленов из I.

Лемма 6.1. *$\mathcal{A}$ — идеал. И, следовательно, конечнопорождено.*

Доказательство. Действительно, для всяких $a, b \in \mathcal{A}$ есть многочлены $f_a, f_b \in I$ со старшими коэффициентами a и b соответственно. Следовательно $f_a t^{\deg(f_b)} + f_b t^{\deg(f_a))}$ лежит в I и имеет старший коэффициент $a+b$ (если только $a+b \neq 0$; иначе очевидно). Также если $a \in \mathcal{A}$, а $k \in A$, то есть многочлен $f_a \in I$ с данным старшим коэффициентом. Но тогда kf_a (если $ak \neq 0$; иначе очевидно) лежит в I и имеет старший член ak. $\square$

Рассмотрим $a_1, \dots, a_r$ — система порождающих $\mathcal{A}$, а $f_1, \dots, f_r$ — многочлены из I с данными старшими коэффициентами.

Тогда всякий $f \in I$ порождается тогда и только тогда, когда порождается соответствующий ему $g \in I$ степени меньше $n := \max_k \deg(f_k)$, так как иначе с помощью старших членов f_i можно породить старший член f, вычесть его из f и тем самым понизить степень. Значит вопрос свёлся к порождаемости многочленов из I степени не выше n.

Заметим, что описанные многочлены образуют модуль $I \cap (A \oplus At \oplus \dots \oplus At^{n-1})$ — подмодуль A^n. Значит $I \cap (A \oplus At \oplus \dots \oplus At^{n-1})$ конечнопорождён, а отсюда I конечнопорождён. $\square$

Лемма 7. *Если B — нётерово кольцо, C — кольцо, а $\varphi : B \to C$ — гомоморфизм колец, то $\varphi(B)$ — нётерово.*

Доказательство. Пусть дана последовательность идеалов $I_1 \subseteq I_2 \subseteq \dots$ в $\varphi(B)$. Тогда $\varphi^{-1}(I_i)$ — идеалы и

$$\varphi^{-1}(I_1) \subseteq \varphi^{-1}(I_2) \subseteq \dots.$$

Значит с какого-то момента эта цепочка стабилизируется, а значит стабилизируется образ этой цепочки по φ, т.е. изначальная цепочка. $\square$

Лемма 8. *Если $\psi : A \to C$ — гомоморфизм колец, такой что C — конечная A-алгебра, порождённая элементами $x_1, \dots, x_n$. Тогда C нётеров.*

Доказательство. Мы можем рассмотреть нативное вложение A в $A[t_1, \dots, t_n]$ и гомоморфизм A-алгебр $\varphi : A[t_1, \dots, t_n] \to C$, порождённый ψ и соотношениями $\varphi(t_i) = x_i$.

$$\begin{tikzcd} A \arrow[rr, "\psi"] \arrow[dr, hook] & & C \\ & A[t_1, \dots, t_n] \arrow[ur, two heads, "\varphi"'] & \end{tikzcd}$$

φ сюръективен, а $A[t_1, \dots, t_n]$ нётерово. Таким образом $\varphi(B) = C$ нётерово. $\square$

Замечание 3. Всякое поле нётерово.

Следствие 8.1. *Любая конечнопорождённая F-алгебра, где F — поле, нётерова.*

Замечание 4.
- $\mathbb{Z}$ — нётерово кольцо.
- Всякое кольцо является $\mathbb{Z}$-кольцом.
- Если кольцо R — конечнопорождённая $\mathbb{Z}$-алгебра, то оно нётерово.

Лемма 9. *Пусть A — нётерово кольцо, а M'' — A-модуль. Тогда M конечнопорождён тогда и только тогда, когда нётеров.*

Доказательство. Если M'' нётеров, то уже доказано, что M'' конечнопорождён, так как является собственным подмодулем (см. лемму).

Если M'' конечнопорождено, то есть система порождающих $m_1, \dots, m_s$. Тогда есть сюръективный гомоморфизм

$$\varphi : A^s \to M'', e_i \mapsto m_i.$$

При этом A^s нётеров, значит M'' нётеров. $\square$

Лемма 10. *Пусть даны кольца $A \subseteq B \subseteq C$, что A — нётерово, C — конечнопорождённый B-модуль и конечнопорождённая A-алгебра. Тогда B — конечнопорождённая A-алгебра.*

Доказательство. Пусть $y_1, \ldots, y_n$ — система порождающих C как A-алгебру, а $x_1, \ldots, x_m$ — система порождающих C как B-модуль. Тогда есть $b_{i,j} \in B$, что

$$y_i = \sum b_{i,j} x_j,$$

и $b_{i,j,k} \in B$, что

$$x_i x_j = \sum b_{i,j,k} x_k.$$

Пусть B_0 — это A-подалгебра в B, порождённая всеми $b_{i,j}$ и $b_{i,j,k}$. Заметим, что количество перечисленных порождающих конечно, т.е. B_0 — конечнопорождённая алгебра. Следовательно, B_0 нётерова.

Поймём, что C порождается уже над B_0 элементами $x_1, \ldots, x_n$. Действительно, для всякого $c \in C$ есть $F \in A[t_1, \ldots, t_n]$, что $c = F(y_1, \ldots, y_n)$. При этом $y_i = \sum b_{i,j} x_j$. Значит

$$c = G(x_1, \ldots, x_m) \in B_0 x_1 + \cdots + B_0 x_m,$$

так как при раскрытии скобок каждый квадратный $x_i x_j$ член заменяется на линейную сумму $\sum b_{i,j,k} x_k$, т.е. можно запустить банальный алгоритм понижения степени и получить линейное по x_i выражение.

Таким образом C как B_0-модуль конечнопорождён (а B_0 нётеров), значит всякий B_0-подмодуль в C конечнопорождён, значит B — конечнопорождённый B_0-модуль. Поскольку $B_0 \subseteq B$, то B — конечнопорождённая B_0-алгебра. Следовательно, B — конечнопорождённая B_0-алгебра, а B_0 — конечнопорождённая A-алгебра, и тогда B — конечнопорождённая A-алгебра. □

1.1 Алгебраические и чисто трансцендентные расширения полей

Определение 5. Пусть есть поле F, содержащееся в поле E. Элемент $x \in E$ называется *алгебраическим над F*, если есть $g \in F[t]$, что $g(x) = 0 \in E$. Иначе x называется *трансцендентным над F*.

Лемма 11. *Если x алгебраический над F, то рассмотрим F-подалгебру $F[x]$ в E, порождённую x, т.е. есть гомоморфизм алгебр $\varphi : F[t] \to E$, порождённый соотношением $\varphi(t) = x$, определяет алгебру $\varphi(F[t])$. Тогда существует неприводимый многочлен $f \in F[t]$, что $f(x) = 0$ и $F[x] = \varphi(F[t]) = F[t]/(f)$.*

Доказательство. φ — гомоморфизм алгебр, а значит гомоморфизм колец, значит $\operatorname{Ker}(\varphi) \subseteq F[t]$ непуст (из-за алгебраичности x) и является идеалом. Но всякий идеал в $F[t]$ является главным, следовательно $\operatorname{Ker}(\varphi) = (f(t))$ для некоторого $f \in F[t]$. При этом, так как E поле, $\operatorname{Ker}(\varphi)$ — простой идеал, т.е. $f(t)$ неприводим. Отсюда получаем искомое. □

Следствие 11.1. *Уже $F[x]$ является подполем в E.*

Следствие 11.2. $\dim_F F[x] = \deg f(t) < \infty$.

Следствие 11.3. *$F[x]$ порождается как векторное пространство над F элементами (базисом) $1, x, \ldots, x^d$ для некоторого $d \in \mathbb{N}$.*

Определение 6. Пусть $K \subseteq L$ — поля. Если $y_1, ..., y_m \in L$ алгебраичны над K и

$$K \subseteq K[y_1] \subseteq K[y_1][y_2] \subseteq \cdots \subseteq K[y_1] \ldots [y_m] = L,$$

то L называется *конечнопорождённым алгебраически порождённым алгебраическим расширением поля K*.

Лемма 12. *Если даны поля $K \subseteq L$, что L — конечнопорождённое алгебраическое расширение K, то $\dim_K L < \infty$.*

Доказательство. Если $m = 1$, то утверждение превращается в следствие 11.2.

По следствию 11.3 $1, \ldots, y_2^{d_2}$ порождают $K[y_1][y_2]$ как векторное пространство над $K[y_1]$. При этом $K[y_1]$ порождается $1, \ldots, y_1^{d_1}$ как векторное пространство над K. Следовательно, все элементы вида $y_1^{\alpha_1} y_2^{\alpha_2}$, $\alpha_1 \in \{0; \ldots; d_1\}$, $\alpha_2 \in \{0; \ldots; d_2\}$, порождают $K[y_1][y_2]$ как векторное пространство над K. Следовательно

$$\dim_K K[y_1][y_2] = \dim_K K[y_1] \cdot \dim_{K[y_1]} K[y_1][y_2] < \infty.$$

□

Упражнение 1. Верно и обратное: если $\dim_K L < \infty$, то L — конечнопорождённое алгебраическое расширение поля K.

Определение 7. Пусть даны поля $F \subseteq E$ и $x \in E$, трансцендентный в F. Тогда

$$F(x) := \{\frac{f(x)}{g(x)} \mid f, g \in F[t], g(t) \neq 0\}.$$

Лемма 13. *1. $F(x)$ корректно определено.*

2. $F(x)$ — поле.

Доказательство.

1. Если $g(x) = 0$, то x алгебраично. Значит $f(x)/g(x)$ определено.

2. Операции наследуются от поля. Несложно видеть, что $F(x)$ относительно них замкнуто.

□

Лемма 14. *$F(x) \cong F(t)$ как поля, где $F(t)$ — поле рациональных функций.*

Доказательство. Построим понятный гомоморфизм полей

$$\varphi : F(t) \to F(x), f/g \mapsto f(x)/g(x).$$

По построению φ сюръективен. $\mathrm{Ker}(\varphi)$ — идеал в поле, т.е. либо (0), либо всё $F(t)$. Но φ сохраняет F, значит $\mathrm{Ker}(\varphi) = 0$, т.е. φ инъективен. Итого φ — изоморфизм. □

Лемма 15. *Пусть x трансцендентно. Тогда 1, x, x^2, ... линейно независимы.*

Доказательство. В противном случае это означает, что есть некоторое $n \in \mathbb{N}$ и $a_0, \ldots, a_n \in F$, что

$$\sum_{k=0}^{n} a_k x^k = 0.$$

Тогда $f(x) = 0$, где

$$f(t) := \sum_{k=0}^{n} a_k t^k.$$

Это противоречит с трансцендентностью x. □

Лемма 16. *Пусть даны поле L и независимая переменная t. Тогда*

$$L(t) := \{\frac{f(t)}{g(t)} \mid f(t), g(t) \in L[t], g(t) \neq 0\}$$

не является конечнопорождённой L-алгеброй.

Доказательство. Предположим противное. Пусть $L(t) = L[y_1, \dots, y_s]$ — конечнопорождённая L-алгебра, где $y_i = \frac{f_i(t)}{g_i(t)}$. Тогда есть гомоморфизм

$$\varphi : L[T_1, \dots, T_s] \to L(t), T_i \mapsto y_i.$$

Понятно, что

$$L[y_1, \dots, y_s] = \varphi(L[T_1, \dots, T_s]).$$

Тогда рассмотрим $h(t)$ — неприводимый делитель значения

$$1 - \prod_{i=1}^{s} q_i(t).$$

Поскольку $L = L[y_1, \dots, y_s]$, то $1/h(t) \in L[y_1, \dots, y_s]$, то есть $G(T_1, \dots, T_s) \in L[T_1, \dots, T_s]$, что $G(y_1, \dots, y_s) = \frac{1}{h(t)}$. Понятно, что есть некоторое $N \in \mathbb{N}$, что

$$G(y_1, \dots, y_s) = \frac{F(t)}{(\prod q_i(t))^N}.$$

Тогда

$$\left(\prod q_i(t)\right)^N = h(t)F(t).$$

Вспомним, что

$$\prod g_i(t) - 1 = h(t) \cdot h_1(t) \implies \prod g_i(t) \equiv 1 \pmod{h(t)} \implies \left(\prod g_i(t)\right)^N \equiv 1 \pmod{h(t)},$$
$$\left(\prod g_i(t)\right)^N = h(t)F(t) \implies \left(\prod g_i(t)\right)^N \equiv 0 \pmod{h(t)},$$

т.е. $0 \equiv 1 \pmod{h(t)}$. □

Лемма 17. *Пусть $F \subseteq E$ — поля, и $E = F[x_1, \dots, x_n]$ конечнопорождёно как F-алгебра. Тогда $[x_1, \dots, x_n]$ алгебраичны над F и $\dim_F E < \infty$.*

Доказательство. Среди $x_1, \dots, x_n$ может оказаться элемент трансцендентный над F, WLOG x_1. Получим

$$F \subseteq F(x_1) \subseteq E.$$

Среди оставшихся может оказаться элемент, трансцендентный над $F(x_1)$, WLOG x_2. Получим

$$F \subseteq F(x_1) \subseteq F(x_1)(x_2) \subseteq E.$$

Будем повторять данную операцию до конца. Таким образом выделим $x_1, \dots, x_r$, получим

$$F \subseteq F(x_1) \subseteq F(x_1)(x_2) \subseteq \dots \subseteq \underbrace{F(x_1)\dots(x_r)}_{K} \subseteq E,$$

что все $x_{r+1}, \dots, x_n$ алгебраичны над K. Тогда E как векторное пространство над K конечномерно (лемма 12).

Тогда имеем, что
$$F \subseteq K \subseteq E,$$
где E — конечнопорождённый K-модуль и конечнопорождённая F-алгебра. Следовательно, по лемме 10 K — конечнопорождённая F-алгебра.

Пусть $r \neq 0$. Пусть $L = F(x_1)\dots(x_{r-1})$. Тогда $L(x_r) = K$, где $x_r \in K$ трансцендентен над L. Следовательно, $L(x_r) \cong L(t)$, т.е. $K = L(x_r)$ — не конечнопорожденная L-алгебра, и тем более не конечнопорождённая F-алгебра. Противоречие. □

Следствие 17.1. *Пусть $F \to A$ — конечнопорождённая F-алгебра, а $\mathcal{M}$ — максимальный идеал A. Тогда $F \hookrightarrow A/\mathcal{M}$ — конечное алгебраическое расширение поля.*

Доказательство.

Дописать?

□

Следствие 17.2. *Пусть F — алгебраически замкнутое поле, а $F \to A$ — конечнопорождённая F-алгебра. Тогда $F \to A/\mathcal{M}$ — изоморфизм.*

Доказательство. $A/\mathcal{M}$ — конечное алгебраическое расширение поля F, т.е. совпадает с F. □

Упражнение 2. Пусть R — кольцо, $I \subseteq J \subseteq R$ — два иделала в R. Тогда TFAE.

1. $I = J$.

2. $\overline{\varphi} : R/I \to R/J, r \bmod I \mapsto r \bmod J$ — изоморфизм колец.

Доказательство. Если $I = J$, то очевидно что $r \bmod I = r \bmod J$, а $R/I = R/J$, а тогда $\overline{\varphi}$, являясь тождественным отображением, является изоморфизмом колец.

Пусть $\overline{\varphi}$ — изоморфизм колец. Рассмотрим вложения $\pi_I : R \to R/I, r \mapsto r \bmod I$ и $\pi_J : R \to R/J, r \mapsto r \bmod J$. Следовательно, имеем коммутативность диаграммы

$$\begin{tikzcd} & R \arrow[dl, "p_I"'] \arrow[dr, "p_J"] & \\ R/I \arrow[rr, "\sim", "\overline{\varphi}"'] & & R/J \end{tikzcd}$$

Следовательно,
$$r \in I \quad \Leftrightarrow \quad r \in \mathrm{Ker}(p_I) \quad \Leftrightarrow \quad p_I(r) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad p_J(r) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad r \in \mathrm{Ker}(p_J) \quad \Leftrightarrow \quad r \in J,$$
т.е. $I = J$. □

Упражнение 3. Пусть $\mathcal{M} \subseteq R$ — идеал. Тогда TFAE.

1. $\mathcal{M}$ максимален.

2. $R/\mathcal{M}$ — поле.

Теорема 18 (Гильберта о нулях, Nullstellensatz (слабая))**.** *Пусть K — алгебраически замкнутое поле (например, $\mathbb{C}$), $\mathcal{M} \subseteq K[t_1, \dots, t_n]$ — максимальный идеал. Тогда $\mathcal{M} = (t_1 - x_1, \dots, t_n - x_n)$, где $x_i \in F$.*

Доказательство. Зафиксируем некоторые значения $x_1, \dots, x_n \in K$ и рассмотрим идеал $I := (t_1 - x_1, \dots, t_n - x_n)$. Также рассмотрим следующие гомоморфизмы:

$$in : K \to K[t_1, \dots, t_n], r \mapsto r,$$
$$\pi_{\mathcal{M}} : K[t_1, \dots, t_n] \to K[t_1, \dots, t_n]/\mathcal{M}, r \mapsto r \bmod \mathcal{M}, \qquad i_{\mathcal{M}} := \pi_{\mathcal{M}} \circ in,$$
$$\pi_I : K[t_1, \dots, t_n] \to K[t_1, \dots, t_n]/I, r \mapsto r \bmod I, \qquad i_I := \pi_I \circ in.$$

$$\begin{tikzcd}
 & & K[t_1, \dots, t_n]/\mathcal{M} \arrow[dd, dashed, "\varphi"] \\
K \arrow[r, "in"] \arrow[urr, bend left, "i_{\mathcal{M}}", "\sim"'] \arrow[drr, bend right, "\sim", "i_I"'] & K[t_1, \dots, t_n] \arrow[ur, "\pi_{\mathcal{M}}"'] \arrow[dr, "\pi_I"] & \\
 & & K[t_1, \dots, t_n]/I
\end{tikzcd}$$

Заметим, что $i_{\mathcal{M}}$ — изоморфизм колец, так как $\mathcal{M}$ максимален. При этом для всякого многочлена $F \in K[t_1, \dots, t_n]$ по теореме Безу $F(t_1, \dots, t_n) \equiv F(x_1, \dots, x_n) \pmod{I}$, а значит i_I инъективен, так как K поле, и сюръективен, так как $[F]_I = [F(x_1, \dots, x_n)]_I = i_I(F(x_1, \dots, x_n))$. Следовательно i_I тоже изоморфизм колец. Следовательно есть изоморфизм колец $\varphi = i_{\mathcal{M}}^{-1} \circ i_I$, т.е. для всякого $r \in K$

$$\varphi(r \bmod \mathcal{M}) = r \bmod I.$$

Осталось показать, что $\varphi \circ \pi_{\mathcal{M}} = \pi_I$, т.е. для всякого $F \in K[t_1, \dots, t_n]$ $\varphi : F \bmod \mathcal{M} \mapsto F \bmod I$.

На деле для случайных x_1, …, x_n это не верно. Поэтому возьмём $x_k := i_{\mathcal{M}}^{-1}(t_k \bmod \mathcal{M})$, т.е. чтобы $t_k - x_k \in \mathcal{M}$. Тогда получим, что

$$\varphi(t_k \bmod \mathcal{M}) = \varphi(x_k \bmod \mathcal{M}) = x_k \bmod I = t_k \bmod I.$$

Поскольку φ — гомоморфизм колец, а всякий многочлен представляется в виду суммы произведений элементов K и t_1, …, t_n, то теперь это верно для всех многочленов. Значит $\mathcal{M} = I$. $\square$

2 Аффинная геометрия

Замечание. Глава I. §1. Замкнутые подмножества A_k^n.

Обозначить это по-нормальному.

Определение 8. Пусть фиксировано поле k. *Аффинное пространство* над полем k размерности n — есть пространство

$$\mathbb{A}^n = \mathbb{A}_k^n := \{x = (x_1, \dots, x_n) \mid x_i \in k\} = k^n.$$

Пусть $A := k[T_1, \dots, T_n]$, $f \in A$. Тогда f — отображение $\mathbb{A}^n \to k$. Пусть фиксировано $S \subseteq A$. Тогда *множеством общих нулей многочленов из* S (также “общие нули многочленов из S” или “нули S”) — это множество

$$Z(S) := \{x \in \mathbb{A}^n \mid \forall f \in S\ f(x) = 0\}.$$

Все подмножества $Z(S)$ называются *замкнутыми подмножествами в* $\mathbb{A}^n$ или *аффинными подмножествами в* $\mathbb{A}^n$.

Пример 1.

1. $\varnothing = Z(\{a\}_{a\in k}) = Z(A)$.

2. $\mathbb{A}^n = Z(\varnothing) = Z(\{0\})$.

3. $\{(x_1, \dots, x_n)\} = Z(\{T_1 - x_1, \dots, T_n - x_n\})$.

4. Замкнутые подмножества в $\mathbb{A}^1$ — это $\mathbb{A}$, $\varnothing$ и любое конечное подмножество.

5. Если $n = 2$, то $Z(f)$ называется *плоской кривой*.

Лемма 19.

1. *Если $S \subseteq S'$, то $Z(S') \subseteq Z(S')$.*

2. *Пусть I — идеал, порождённый многочленами из S. Тогда $Z(I) = Z(S)$.*

3. *Для всякого S есть конечное S', что $Z(S) = Z(S')$.*

4. *Пусть есть семейство $\{S_i\}_{i\in I}$. Тогда*
$$Z\left(\bigcup_{i\in I} S_i\right) = \bigcap_{i\in I} Z(S_i).$$

5. *Пусть дано семейство идеалов $\{I_j\}_{j\in J}$. Тогда*
$$Z\left(\sum_{j\in J} I_j\right) = \bigcap_{j\in J} Z(I_j).$$

6. *Пусть дано семейство $\{S_i\}_{i=1}^n$. $S' := S_1 S_2 \dots S_n = \{f_1 \dots f_n \mid f_1 \in S_1 \wedge \dots \wedge f_n \in S_n\}$. Тогда*
$$Z(S') = \bigcup_{i=1}^n Z(S_i).$$

7. *Пусть дано семейство идеалов $\{I_j\}_{j=1}^n$. Тогда*
$$Z\left(\bigcap_{j=1}^n I_j\right) = \bigcup_{j=1}^n Z(I_j).$$

Доказательство.

1. Действительно, для всякой точки $x \in Z(S')$ верно, что для всякого $f \in S'$ $f(x) = 0$, а значит то же верно для всякого $f \in S$ (так как $S \subseteq S'$), т.е. $x \in Z(S)$.

2. Поскольку $S \subseteq I$, то $Z(I) \subseteq Z(S)$. При этом для всякого $x \in Z(S)$ верно, что для всякого $f \in S$ $f(x) = 0$, а значит то же верно для всех $f \in I$ (так как I — идеал, порождённый S), т.е. $x \in Z(I)$. Т.е. $Z(S) \subseteq Z(I)$. Следовательно, $Z(S) = Z(I)$.

3. Если известно, что S и S' порождают одинаковые идеалы, то $Z(S) = Z(S')$. Но всякий идеал в $k[T_1, \dots, T_n]$ конечнопорождён, а значит у идеала, порождённого S, есть конечное порождающее множество S' — искомое S'.

4. Заметим, что $x \in Z(\bigcup_{i\in I} S_i)$ тогда и только тогда, когда на x зануляются все многочлены из $\bigcup_{i\in I} S_i$, что равносильно тому, что на x зануляются все многочлены из каждого S_i, что равносильно тому, что x лежит в каждом $Z(S_i)$, что равносильно тому, что $x \in \bigcap_{i\in I} Z(S_i)$. Отсюда следует требуемое.

5. По прошлому пункту.
$$Z\left(\bigcup_{j\in J} I_j\right) = \bigcap_{j\in J} Z(I_j).$$
Но также несложно видеть, что идеал, порождённый $\bigcup_{j\in J} I_j$, есть $\sum_{j\in J} I_j$. Отсюда сиюминутно следует искомое (по ранее доказанному пункту).

6. Покажем утверждение для $n = 2$. Заметим, что если $x \in Z(S_1)$, то на x зануляются все многочлены из S_1, а значит и из $S_1 \cdot S_2$, т.е. $x \in Z(S_1S_2)$. Следовательно $Z(S_1) \subseteq Z(S_1S_2)$. Из аналогичного утверждения получаем, что $Z(S_1) \cup Z(S_2) \subseteq Z(S_1S_2)$. При этом если $x \in Z(S_1S_2) \setminus Z(S_1)$, то есть многочлен $f \in S_1$, что $f(x) \neq 0$. Но для всякого $g \in S_2$ верно $fg \in S_1S_2$, а значит $f(x)g(x) = 0$, а тогда $g(x) = 0$, т.е. $x \in Z(S_2)$. Итого $Z(S_1S_2) = Z(S_1) \cup Z(S_2)$. Утверждение для всякого n получается по индукции с помощью данного.

7. Покажем для $n = 2$; общий случай получается по индукции. Пусть даны идеалы I и J. Имеем по прошлому пункту
$$Z(I \cdot J) = Z(I) \cup Z(J).$$
При этом $I \cdot J \subseteq I \cap J$, а $I \cap J \subseteq I$, $I \cap J \subseteq J$. Следовательно $Z(I \cdot J) \supseteq Z(I \cap J)$, $Z(I \cap J) \supseteq Z(I)$, $Z(I \cap J) \supseteq Z(J)$. Итого
$$Z(I \cdot J) \supseteq Z(I \cap J) \supseteq Z(I) \cup Z(J),$$
откуда
$$Z(I \cdot J) = Z(I \cap J) = Z(I) \cup Z(J).$$

□

Следствие 19.1. *Мораль такова.*

1. *Замкнутые идеалы образуют топологию, где они являются замкнутыми. Т.е. их дополнения образуют топологию (являясь открытыми).*

2. *Каждое замкнутое подмножество имеет вид $Z(I)$, где I — идеал.*

3. *Сумма идеалов соответствует пересечению замкнутых множеств (и наоборот). Т.е. для всякого семейства идеалов $\{I_j\}_{j\in J}$ верно, что*
$$\bigcap_{j\in J} Z(I_j) = Z\left(\sum_{j\in J} I_j\right).$$

4. *Конечные пересечения идеалов соответствуют конечным объединениям замкнутых множеств. Т.е. для всякого семейства идеалов $\{I_j\}_{j=1}^n$ верно, что*
$$\bigcup_{j=1}^n Z(I_j) = Z\left(\bigcap_{j=1}^n I_j\right).$$

Определение 9. Пусть имеется множество точек $X \subseteq A_k^n$. Определим множество

$$I(X) := \{f \in A \mid \forall x \in X\ f(x) = 0\}.$$

Лемма 20.

1. *$I(X)$ — идеал.*
2. *Если $X \subseteq Y$, то $I(X) \supseteq I(Y)$.*
3. *Если $X \subseteq Y$, то $ZI(X) \subseteq ZI(Y)$.*
4. *$ZI(X) \supseteq X$.*
5. *$IZ(S) \supseteq S$.*

Доказательство.

1. Если $f, g \in I(X)$, то для всякой точки $x \in X$ верно $f(x) = g(x) = 0$, а тогда $(f+g)(x) = 0$, т.е. $f + g \in I(X)$. Если же $f \in I(X)$, $g \in A$, то для всякой точки $x \in X$ верно $f(x) = 0$, а значит $(fg)(x) = 0$, т.е. $fg \in I(X)$.
2. Если $f \in I(Y)$, то $f(Y) = 0$, значит $f(X) = 0$, тогда $f \in I(X)$.
3. $X \subseteq Y \Rightarrow I(X) \supseteq I(Y) \Rightarrow ZI(X) \subseteq ZI(Y)$.
4. Поскольку $I(X)$ — множество всех многочленов, зануляющихся на X, то всё $I(X)$ зануляется на X, т.е. $ZI(X) \supseteq X$.
5. Поскольку $Z(S)$ — множество всех точек, на которых зануляется S, то S на нём зануляется, а тогда $IZ(S) \supseteq S$.

$\square$

Определение 10. Пусть I — некоторый идеал. *Радикал из иделала I* — $\sqrt{I} := \{h \in A \mid \exists N\colon\ h^N \in I\}$.

Идеал I называется *радикальным* тогда и только тогда, когда для всякого $g \in A$, что есть $m \geqslant 1$, что $g^m \in I$ верно, что $g \in I$.

Лемма 21.

1. *$\sqrt{I}$ — идеал.*
2. *$Z(\sqrt{I}) = Z(I)$.*
3. *Идеал I радикален тогда и только тогда, когда $\sqrt{I} \subseteq I$.*
4. *$\sqrt{I}$ радикален.*
5. *$I(X)$ радикален.*

Доказательство.

1. Пусть $h \in \sqrt{I}$. Тогда есть N, что $h^N \in I$. Значит для всякого $f \in A$
$$(hf)^N = h^n f^n \in IA \subseteq I.$$
Т.е. $hf \in \sqrt{I}$. Значит $hA \subseteq \sqrt{I}$.
Пусть $h_1, h_2 \in \sqrt{I}$. Тогда есть N_1 и N_2, что $h_1^{N_1}, h_2^{N_2} \in I$. Тогда
$$(h_1 + h_2)^{N_1+N_2} = \sum_{k=0}^{N_1+N_2} h_1^k h_2^{N_1+N_2-k} \binom{N_1+N_2}{N_1}.$$
При этом при $k \leqslant N_1$
$$h_2^{N_2} \in I, \qquad h_1^k h_2^{N_1-k} \binom{N_1+N_2}{N_1} \in A, \qquad \Longrightarrow \qquad h_1^k h_2^{N_1+N_2-k} \binom{N_1+N_2}{N_1} \in I;$$
аналогично для $k \geqslant N_1$.

2. Поскольку $I \subseteq \sqrt{I}$, то $Z(\sqrt{I}) \subseteq Z(I)$. При этом для всякого $x \in Z(I)$ верно, что для всякого $f \in S$ $f(x) = 0$, а значит для всякого $f \in \sqrt{I}$ есть N, что $f^N(x) = 0$, а тогда $f(x) = 0$, т.е. $x \in Z(\sqrt{I})$. Т.е. $Z(I) \subseteq Z(\sqrt{I})$. Следовательно, $Z(\sqrt{I}) = Z(I)$.

3. Определение по-другому написанное.

4. Несложно видеть, что $\sqrt{\sqrt{I}} = \sqrt{I}$ по определению радикала. Значит $\sqrt{\sqrt{I}} \subseteq \sqrt{I}$, т.е. $\sqrt{I}$ радикален.

5. $I(X)$ — максимальный идеал, что $X \subseteq Z(I(X))$. При этом $Z(\sqrt{I(X)}) = Z(I(X))$, значит $\sqrt{I} \subseteq I$. Таким образом I максимален.

$\square$

Теорема 22 (Гильберта о нулях, Nullstellensatz)**.** $IZ(S) = \sqrt{I_S}$.

Теорема 23. $ZI(X) = \overline{X}$ *(где* $\overline{X}$ *— замыкание в смысле рассмотренной топологии).*