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.

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.*

Доказательство.

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

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

⇐) 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.

□

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 $M_1 \subseteq M_2 \subseteq \dots$ подмодулей M. Определим

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

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

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

□

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 $M'_1 \subseteq M'_2 \subseteq \dots$ подмодулей M. M нётерово, значит цепочка стабилизируется, значит M' нётерова.

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

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

Дописать.

□

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.

□

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. □

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. □

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.

□

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. □

Рассмотрим $a_1, \ldots, a_r$ — система порождающих $\mathcal{A}$, а $f_1, \ldots, f_r$ — 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 $I \cap (A \oplus At \oplus \cdots \oplus At^{n-1})$ — подмодуль A^n. Значит $I \cap (A \oplus At \oplus \cdots \oplus At^{n-1})$ 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 $I_1 \subseteq I_2 \subseteq \ldots$ в $\varphi(B)$. Тогда $\varphi^{-1}(I_i)$ — идеалы и

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

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 $x_1, \ldots, x_n$. Тогда C нётеров.*

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

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

φ сюръективен, а $A[t_1, \ldots, t_n]$ 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 $m_1, \ldots, m_s$. 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. □

0.1 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 $\mathrm{Ker}(\varphi) \subseteq F[t]$ непуст (из-за алгебраичности x) и является идеалом. Но всякий идеал в $F[t]$ является главным, следовательно $\mathrm{Ker}(\varphi) = (f(t))$ для некоторого $f \in F[t]$. При этом, так как E поле, $\mathrm{Ker}(\varphi)$ — 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, $\ldots$ 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

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

$$\left(\prod g_i(t)\right)^N = h(t)F(t) \quad \Longrightarrow \quad \left(\prod g_i(t)\right)^N \equiv 0 \pmod{h(t)},$$

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. $\square$

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?

$\square$

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. $\square$

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

Доказательство. Рассмотрим рассмотрим последовательность отображений

$\square$

Теорема 19 (Гильберта о нулях, анонс)**.** *Пусть K — алгебраически замкнутое поле (например, $\mathbb{C}$), тогда $\mathrm{Max}(K[t_1, \dots, t_n]) \leftrightarrow K^n$. Каждый идеал вида $(t_1 - x_1, \dots, t_n - x_n)$ максимален, других максимальных нет и все описанные идеалы попарно различны.*