
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

У. У.

Обрезанная версия 11pt

Дата компиляции:

8 октября 2025 года

Оглавление

Оглавление	3
Нулевая глава	7
Предисловие	7
Буквы в математических формулах	8
Глобальные обозначения, соглашения и определения	9
I Не сгруппированные тексты	17
1 Почти не подкорректированные старые тексты	19
1.1 Китайская теорема об остатках	19
1.2 Системы корней классических алгебр Ли	21
1.3 Определитель и след	22
1.4 Векторы Витта и p -адические числа	23
1.5 Теорема, разложение и кольцо Витта	28
1.6 Жорданова нормальная форма	32
1.7 Изображение конфигурации Дезарга	33
1.8 Элемент Казимира	34
1.9 Целые в квадратичных полях	35
1.10 Обратный Мура – Пенроуза	35
1.11 Теорема Эйленберга – Уоттса	36
2 Подкорректированные старые тексты	37
2.1 Теорема Гамильтона – Кэли	37
2.2 Тензорное произведение	39
2.3 Коммутативная локализация	43

2.4	Избегание простых (prime avoidance)	47
3	Относительно новые тексты	49
3.1	Теорема Островского	49
3.2	Разложения Брюа и Гаусса	50
3.3	Задача Кеплера	52
3.4	Алгоритм RSA	54
3.5	Некоторые практичные аппроксимации	55
II	Сгруппированные тексты	57
4	Теория множеств	59
4.1	Диагональный аргумент Кантора	59
4.2	Теорема Кантора – Бернштейна – Шрёдера	60
4.3	Лемма Цорна	60
5	Вещественные числа	63
5.1	Сечения Дедекинда	63
5.2	Компактность и связность отрезка	67
6	Базовые свойства метрических пространств	69
6.1	Лемма Лебега о покрытии	69
6.2	Полные метрические пространства	70
6.3	Теорема Банаха о фиксированной точке	71
7	Дифференциальное исчисление	73
7.1	Теорема о среднем значении	73
7.2	Теорема об обратной функции	74
7.3	Равенство смешанных производных	75
7.4	Лемма Адамара	76
7.5	Лемма Морса	79
8	Общая топология и теория меры	81
8.1	Собственные отображения в топологии	81
8.2	Дуальность Стоуна для булевых колец	88
8.3	Измеримость по Каратеодори	94

9	Группы перестановок	97
9.1	Группы и их действия	97
9.2	Простота больших знакопеременных групп	101
9.3	Автоморфизмы симметрических групп	102
10	Модули над некоммутативными кольцами	107
10.1	Разложения и идемпотенты	107
10.2	Модули над кольцом матриц	108
10.3	Нётеровы и артиновы модули	111
10.4	Полупростые модули	115
10.5	Радикал Джекобсона	123
10.6	Теорема Крулля – Шмидта для модулей	126
10.7	Теорема Эрдёша – Капланского	128
11	Некоторые некоммутативные тождества	129
11.1	Тождества с мультипликативными коммутаторами	129
11.2	Тождества в алгебрах Ли и Йордана	130
11.3	Формула Бейкера – Кэмпбелла – Хаусдорфа – Дынкина	133
12	Леммы из гомологической алгебры	137
12.1	Лемма о четырёх гомоморфизмах	137
12.2	Квадрат суммы-пересечения	138
12.3	Критерий Бэра инъективности модуля	138
13	Теория полей	141
13.1	Теория Галуа	141
13.2	Некоторые утверждения из теории полей	146
13.3	Базисы трансцендентности	149
14	Коммутативная алгебра	151
14.1	Базовые свойства локализации	151
14.2	Целое замыкание	154
14.3	Лемма Нётер о нормализации	161
14.4	Теорема Гильберта о нулях	162
14.5	Лемма Накаямы для коммутативных колец	165
14.6	Артиновы коммутативные кольца	166
14.7	Коммутативные положительные конусы	167

14.8	Факториальные кольца	169
14.9	Дедекиндовы кольца	170
14.10	Конечные модули над областями главных идеалов . . .	174
14.11	Ассоциированные простые идеалы	176
15	Теория категорий	181
15.1	Категории как полугруппы	181
15.2	Категорные треугольные тождества	183
15.3	Финальные и инициальные функторы	184
15.4	Фильтрованные категории	186
III	Совсем сырые или мелкие тексты	191
16	Сырые и мелкие тексты	193
16.1	Категория Лямбда	193
16.2	Топология Гротендика	195
16.3	Универсумы Гротендика	197
16.4	Спектральная последовательность фильтрации	197
16.5	Категорный цилиндр	198
16.6	Абелевы категории	200
16.7	Локально нильпотентные операторы	201
17	Совсем мелкие тексты	203
17.1	Раздел А	203
17.2	Раздел Б	207
	Список иллюстраций	209
	Список литературы	211

Нулевая глава

Предисловие

Общее описание

Этот текст представляет собой набор математических и околomатематических заметок, предназначенный в основном для меня, но, быть может, интересный и для других. Он в крайней степени сырой и постоянно переписывается и дописывается. Содержание, как правило, не выходит за рамки базовых университетских и школьных учебников.

Форматирование

Для вёрстки использовался \LaTeX . Дизайн приспособлен для отображения на экране, а не печати на бумаге. В частности, несколько гротескный титульный лист нужен для того, чтобы превью на экранах электронных устройств были читаемыми и идентифицируемыми.

Номера страниц в оглавлении кликабельны. Номера страниц в верхних колонтитулах кликабельны и ссылаются на оглавление. Ссылки на библиографию кликабельны, и библиография снабжена кликабельными обратными ссылками.

В каждом разделе нумерация теорем, лемм и тому подобного начинается заново. Это сделано для того, чтобы разделы можно было с минимумом изменений копировать и вставлять в разные места текста.

Копирайт

Формально данное произведение лицензировано с помощью лицензии Creative Commons «CC0 1.0 Universal», текст которой доступен по

следующей ссылке: <https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/legalcode.en> (дата обр. 07.01.2025). Вот соответствующие значки: ©. Иначе говоря, оно объявляется общественным достоянием.

Обратная связь

Связаться с автором можно по электронной почте yumath@yandex.ru.

Буквы в математических формулах

Греческие буквы

Для справки приведём таблицу из греческих букв, используемых в математическом режиме $T_{\text{E}}X$ -а. Вместо некоторых прописных греческих букв используются соответствующие латинские.

$A\alpha$	$B\beta$	$\Gamma\gamma$	$\Delta\delta$	$E\epsilon\varepsilon$	$Z\zeta$	$H\eta$	$\Theta\theta\vartheta$
$I\iota$	$K\kappa\chi$	$\Lambda\lambda$	$M\mu$	$N\nu$	$\Xi\xi$	$O\omicron$	$\Pi\pi\varpi$
$P\rho\rho$	$\Sigma\sigma\varsigma$	$T\tau$	$\Upsilon\upsilon$	$\Phi\phi\varphi$	$X\chi$	$\Psi\psi$	$\Omega\omega$

Заметим, что строчная **дзета** (ζ) чем-то похожа на латинскую «z», что позволяет отличать её от **кси** (ξ), а строчная **мю** (μ) — на кириллическую «м», что позволяет отличать её от **эта** (η). Есть ещё символ **дигамма** (\digamma).

Готические буквы

Для справки приведём таблицу из английских букв, набранных математической фактурой.

\mathfrak{a}	\mathfrak{b}	\mathfrak{c}	\mathfrak{d}	\mathfrak{e}	\mathfrak{f}	\mathfrak{g}	\mathfrak{h}	\mathfrak{i}	\mathfrak{j}	\mathfrak{k}	\mathfrak{l}	\mathfrak{m}
\mathfrak{n}	\mathfrak{o}	\mathfrak{p}	\mathfrak{q}	\mathfrak{r}	\mathfrak{s}	\mathfrak{t}	\mathfrak{u}	\mathfrak{v}	\mathfrak{w}	\mathfrak{x}	\mathfrak{y}	\mathfrak{z}

Обратите внимание на то, что в таблице много пар похожих глифов, например, \mathfrak{I} и \mathfrak{J} , \mathfrak{B} и \mathfrak{P} , \mathfrak{r} и \mathfrak{x} .

Глобальные обозначения, соглашения и определения

Теория множеств

Обозначение 1 (НАТУРАЛЬНЫЕ ЧИСЛА). Вопрос о том, стоит ли начинать натуральные числа с нуля или с единицы, решается радикально: вводятся обозначения $\mathbb{N}_0 := \mathbb{N} \cup \{0\} = \mathbb{Z}_{\geq 0}$ и $\mathbb{N}_1 := \mathbb{N} \setminus \{0\} = \mathbb{Z}_{>0}$, а обозначение \mathbb{N} , как правило, не используется. Однако в случае, когда оно используется, \mathbb{N} обозначает \mathbb{N}_0 , то есть $\{0, 1, 2, 3, 4, \dots\}$, как у Бурбаки.

Замечание 1. Символ \mathbb{Z} происходит от первой буквы немецкого слова «zahlen», означающего «числа».

Обозначение 2 (ВКЛЮЧЕНИЕ ПОДМНОЖЕСТВА). Обозначение $X \subset Y$ означает, что X является подмножеством Y , не обязательно собственным.

Обозначение 3 (МНОЖЕСТВО КОНЕЧНЫХ ПОДМНОЖЕСТВ). Множество конечных подмножеств множества I иногда будет обозначаться символом $\Lambda(I)$.

Соглашение 1 (ОТОБРАЖЕНИЕ). Отображение — это тройка, состоящая из области, кообласти и графика. Графика недостаточно, чтобы задать отображение, необходимо ещё указать кообласть.

Обозначение 4 (СЕМЕЙСТВО). Символы $(a_i)_{i \in I}$ и $(a_i \mid i \in I)$ обозначают *семейство*, индексированное множеством I , которое теоретико-множественно представляет из себя множество упорядоченных пар (i, a_i) , по одной для каждого $i \in I$, то есть график отображения из I , такого что $i \mapsto a_i$ для всех $i \in I$. Если $(X_i)_{i \in I}$ — семейство множеств, то элементы $\prod_{i \in I} X_i$ — это семейства $(a_i)_{i \in I}$, где $a_i \in X_i$ для всех $i \in I$.

Замечание 2. Символ « \in » происходит от повернутой на 180° кириллической буквы «э», первой буквы слова «это»: « $x \in \mathbb{R}$ » — « x — это вещественное число». Шутка. На самом деле это стилизованная греческая буква ϵ , первая буква слова «ἐστί» — «есть»/«есть»/«есть».

Обозначение 5 (ОБРАЗ В ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОМ ОБОЗНАЧЕНИИ). Образ подмножества $X \subset Y$ под действием отображения $y \mapsto y^\lambda : Y \rightarrow Z$

или $y \mapsto {}^\lambda y : Y \rightarrow Z$ будем обозначать через $X^\lambda := \{x^\lambda \in Z \mid x \in X\}$ или ${}^\lambda X := \{{}^\lambda x \in Z \mid x \in X\}$ соответственно.

Пример 1. Множество квадратов обратимых элементов ассоциативно-го унитарного кольца R обозначается символом $(R^\times)^{:2}$. Если $H \subset G$ — подгруппа группы G , а $g \in G$, то ${}^g H = gHg^{-1}$, где мы используем экспоненциальное обозначение для сопряжения.

Обозначение 6 (КЛАСС ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ). Класс эквивалентности элемента x иногда будет обозначаться через $[x]$.

Аксиоматическая алгебра

Соглашение 2 (КОЛЬЦО). Будем называть *кольцом* аддитивно записываемую абелеву группу, снабжённую биаддитивной, то есть двусторонне дистрибутивной, внутренней бинарной операцией умножения.

Соглашение 3 (УНИТАЛЬНОЕ КОЛЬЦО). Кольцо с единицей называется *унитарным* кольцом. Если противное не указано явно, то гомоморфизмы между унитарными кольцами подразумеваются унитарными, то есть переводящими единицу в единицу, и подкольца унитарных колец подразумеваются унитарными с унитарными вложениями.

Обозначение 7 (ЕДИНИЦЫ МУЛЬТИПЛИКАТИВНОГО МОНОИДА). Символ M^\times обозначает группу *единиц*, то есть двусторонне мультипликативно обратимых элементов, мультипликативного моноида M .

Соглашение 4 (ЛЕВОЕ И ПРАВОЕ). По умолчанию все действия, в частности, модули, считаются «левыми». Морфизмы в категориях компонуются справа налево.

Обозначение 8 (ДВОЙСТВЕННЫЙ МОДУЛЬ). Если M — модуль над ассоциативным унитарным кольцом R , то символ M^\vee , как правило, будет обозначать абелеву группу $\text{Hom}_{R\text{-mod}}(M, R)$.

Обозначение 9 (СИММЕТРИЧЕСКАЯ И ВНЕШНЯЯ СТЕПЕНИ). Если M — модуль над ассоциативным коммутативным унитарным кольцом A , а I — конечное множество, то I -индексированные внешняя и симметрическая степени M как A -модуля будут обозначаться через $\Lambda_A^I(M)$ и $S_A^I(M)$ соответственно, или просто через $\Lambda^I(M)$ и $S^I(M)$.

Обозначение 10 (МАТРИЦЫ). Пусть I , J и X — три множества. Тогда множество матриц, индексированных $I \times J$, с элементами/записями (англ. entries) из X будет обозначаться через $M_{I,J}(X)$. Вместо $M_{I,I}(X)$ может писаться $M_I(X)$.

Замечание 3. Пара цитат о происхождении термина «матрица»:

The term “matrix” (Latin for “womb”, “dam” (non-human female animal kept for breeding), “source”, “origin”, “list”, and “register”, are derived from *mater*—mother) was coined by James Joseph Sylvester in 1850, who understood a matrix as an object giving rise to several determinants today called minors, that is to say, determinants of smaller matrices that derive from the original one by removing columns and rows [24].

I have in previous papers defined a “Matrix” as a rectangular array of terms, out of which different systems of determinants may be engendered from the womb of a common parent; these cognate determinants being by no means isolated in their relations to one another, but subject to certain simple laws of mutual dependence and simultaneous deperition [1, с. 247].

Соглашение 5 (ВЕКТОРЫ-СТОЛБЦЫ). Пусть I и X — множества. Тогда произвольное семейство $(x_i)_{i \in I} \in X^{\times I}$ отождествляется с соответствующей матрицей $(x_i)_{i \in I, j \in \text{pt}} \in M_{I, \text{pt}}(X)$.

Обозначение 11 (ТРАНСПОНИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ). Пусть I , J и X — три множества. Тогда определено отображение транспонирования (1).

$$(x_{i,j})_{i \in I, j \in J} \mapsto (x_{i,j})_{i \in I, j \in J}^t := (x_{i,j})_{j \in J, i \in I} : M_{I,J}(X) \rightarrow M_{J,I}(X) \quad (1)$$

Определение 1 (КОЛЬЦО ДИАГОНАЛЬНЫХ МАТРИЦ). Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, I — конечное множество, а $(e_{i,j})_{i,j \in I}$ — стандартный базис $M_I(R)$ как R -модуля. Тогда определим *кольцо диагональных матриц* следующим образом: $D_I(R) := \bigoplus_{i \in I} Re_{i,i} \subset M_I(R)$.

Определение 2 (ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ПОДГРУППА). Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, I — конечное множество, а $(e_{i,j})_{i,j \in I}$ — стандартный базис $M_I(R)$ как R -модуля. Тогда определим *элементарную*

подгруппу $E_I(R) \subset GL_I(R)$ как подгруппу, порождённую элементарными трансвекциями, то есть элементами вида $t_{j,k}(\lambda) := e + \lambda e_{j,k}$, где $e = \sum_{i \in I} e_{i,i}$, $\lambda \in R$, $j, k \in I$ и $j \neq k$.

Определение 3 (АЛГЕБРА). Пусть A — коммутативное ассоциативное унитарное кольцо. Тогда алгеброй над A или A -алгеброй называется кольцо R , снабжённое структурой A -модуля, такой что действия элементов A на аддитивной абелевой группе R коммутируют с эндоморфизмами левого и правого умножения на элементы R .

Наблюдение 1. Пусть A и R — ассоциативные унитарные кольца, причём A коммутативно. Тогда задание на R структуры алгебры над A — это задание гомоморфизма колец $A \rightarrow \text{End}_{R \otimes_{\mathbb{Z}} R^{\text{op}}\text{-mod}}(R) \cong Z(R)$.

Наблюдение 2. Пусть R — модуль над ассоциативным коммутативным унитарным кольцом A . Тогда задание на R структуры алгебры над A — это задание гомоморфизма A -модулей $R \otimes_A R \rightarrow R$.

Соглашение 6 (УНИТАЛЬНАЯ АЛГЕБРА). Соглашение 3 применимо и к алгебрам.

Соглашение 7 (УНИТАЛЬНЫЙ МНОГОЧЛЕН). Многочлены со старшим коэффициентом один мы будем называть *унитарными* многочленами. Иногда их ещё называют *приведёнными* многочленами, но эта практика, на мой вкус, плохо согласована с использованием фразы «неприводимый многочлен» в её обычном значении.¹

Обозначение 12 (ПОЛЕ ЧАСТНЫХ). Поле частных ассоциативного коммутативного унитарного целостного кольца A обозначается $\text{Frac}(A)$.

Теория категорий

Обозначение 13 (ПРОТИВОПОЛОЖНАЯ КАТЕГОРИЯ). Если \mathcal{C} — категория, то противоположная категория обозначается символом \mathcal{C}^{op} , где верхний индекс op — это не цифра 0 и не знак композиции \circ , а первая буква английского слова «opposite». Такое же обозначение применяется для колец, групп и тому подобного.

¹Троица *приведённый, неприводимый и приводимый* возникает и в теории схем.

Соглашение 8 (КАТЕГОРИЯ РЕФЛЕКСИВНОГО ТРАНЗИТИВНОГО ОТНОШЕНИЯ). Множество X с рефлексивным транзитивным отношением $R \subset X \times X$ канонически реализуется как категория с множеством объектов X и множеством морфизмов R . Произвольное множество часто по умолчанию будет считаться реализованным как категория тождественного отношения на нём.

Обозначение 14 (КАТЕГОРИЯ ДЕЛЬТА). Категория непустых конечных ординалов фон Неймана как упорядоченных множеств будет обозначаться символом Δ и называться *категорией Дельта*. Объект в Δ , соответствующий $\{0, 1, \dots, n\}$, где $n \in \mathbb{N}_0$, обозначается через $[n]$.

Соглашение 9 (КОММА-КАТЕГОРИЯ). Построенная по паре функторов $\pi : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{B} \leftarrow \mathcal{E} : \rho$ «комма-категория» $(\mathcal{C}^{\{0\}} \times \mathcal{E}^{\{1\}}) \times_{\mathcal{B}^{\{0\}} \times \mathcal{B}^{\{1\}}} \mathcal{B}^{[1]}$ будет обозначаться через $\mathcal{C} \overset{\pi}{\rceil}_{\mathcal{B}}^{\rho} \mathcal{E}$ и иногда называться *категорией стрелок*, причём часть индексов у символа *полусvastiки* \rceil может быть опущена.

Замечание 4. Символ \rfloor получен склеиванием символа \rfloor (`\rffloor`) и символа \lceil (`\lceil`).

Замечание 5. Название «комма-категория», очевидно, происходит от английского «comma category». Вот что по поводу этого названия пишет Уильям Ловер:

The $(\ , \)$ operation then turned out to be fundamental in computing Kan extensions (i.e. adjoints of induced functors). Unfortunately, I did not suggest a name for the operation, so due to the need for reading it somehow or other, it rather distressingly came to be known by the subjective name “comma category”, even when it came to be also denoted by a vertical arrow in place of the comma. Originally, it had been common to write (A, B) for the set of maps in a given category \mathcal{C} from an object A to an object B ; since objects are just functors from the category 1 to \mathcal{C} , the notation was extended to the case where A and B are arbitrary functors whose domain categories are not necessarily 1 and may also be different [8, с. 13].

Тем не менее, название стандартное, и будет использоваться в данном тексте.

Соглашение 10 (КАТЕГОРИЯ ОБЪЕКТОВ НАД/ПОД ДАННЫМ). Если \mathcal{C} — категория, а $C \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ — её объект, то категории $\mathcal{C} \int_C \{C\}$ и $\{C\} \int_C \mathcal{C}$ часто будут обозначаться через $\mathcal{C} \int C$ и $C \int \mathcal{C}$ и называться *категорией объектов над C* и *категорией объектов под C* соответственно.

Соглашение 11 (КАТЕГОРИЯ КОЛЕЦ НАД/ПОД ДАННЫМ КОЛЬЦОМ). Исключениями из соглашения 10 являются подкатегории категории колец: для них смысл фраз «категория объектов над данным» и «категория объектов под данным» переставлен. Это сделано для согласованности с переходом к категории аффинных схем для категории коммутативных ассоциативных унитарных колец и согласованности с практикой применения фразы «алгебра над кольцом».

Обозначение 15 (ИЗОМОРФНОСТЬ). Выражение типа $A \simeq B$, как правило, означает, что A и B изоморфны, а выражение типа $A \cong B$, как правило, означает, что между A и B есть единственный или однозначно определённый контекстом изоморфизм.

Обозначение 16 (ПРОИЗВЕДЕНИЕ И КОПРОИЗВЕДЕНИЕ МОРФИЗМОВ). Морфизм $Y \rightarrow X_1 \times X_2$, индуцированный морфизмами $f_1 : Y \rightarrow X_1$ и $f_2 : Y \rightarrow X_2$, обозначается через $f_1 \bar{\times} f_2$, а $g_1 \times g_2 : Y_1 \times Y_2 \rightarrow X_1 \times X_2$ обозначает морфизм $(g_1 \circ \pi_1) \bar{\times} (g_2 \circ \pi_2)$, где $g_1 : Y_1 \rightarrow X_1$ и $g_2 : Y_2 \rightarrow X_2$ — произвольные морфизмы, а π_1 и π_2 — структурные проекции $Y_1 \times Y_2$. С другой стороны, $f_1 \bar{\times} f_2 = (f_1 \times f_2) \circ \Delta$, где $\Delta := \text{Id}_Y \bar{\times} \text{Id}_Y$. Операции $\bar{\sqcup}$ и $\bar{\sqcap}$ очевидным образом определяются как двойственные к $\bar{\times}$ и \times .

Пример 2. Вот, например, забавный способ изображать квадратную диаграмму: $A \xrightarrow{h \bar{\times} v} B \times C \rightrightarrows B \sqcup C \xrightarrow{v' \sqcup h'} D$.

Обозначение 17 ((КО)ЯДРО И (КО)ОБРАЗ). Ядро морфизма $\varphi : X \rightarrow Y$ обозначается $\ker(\varphi) : \text{Ker}(\varphi) \rightarrow X$, коядро — $\text{coker}(\varphi) : Y \rightarrow \text{Coker}(\varphi)$, образ — $\text{im}(\varphi) : \text{Im}(\varphi) \rightarrow Y$, кообраз — $\text{coim}(\varphi) : X \rightarrow \text{Coim}(\varphi)$.

Обозначение 18 (НОМ-Ы И ОБЪЕКТЫ). Пусть \mathcal{C} — категория. Тогда если $X, Y \in \text{Ob}(\mathcal{C})$, то совокупность морфизмов из X в Y в категории \mathcal{C} в общем случае будет обозначаться через $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, Y)$ или $\mathcal{C}(X, Y)$. Вместо записи $X \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ может использоваться запись $X \in \mathcal{C}$.

Обозначение 19 (СТАНДАРТНЫЕ КАТЕГОРИИ). Категория множеств обозначается \mathbf{Sets} , абелевых групп — \mathbf{Ab} , модулей над ассоциативным унитарным кольцом R — $R\text{-mod}$, унитарных колец — \mathbf{Ring} , просто колец — \mathbf{Rng} , кольцоидов — \mathbf{Rngd} , алгебр над коммутативным ассоциативным унитарным кольцом A — $A\text{-alg}$. Если $R \in \mathbf{Ob}(\mathbf{Rng})$, то $R\text{-rng} := R \int_{\mathbf{Rng}} \mathbf{Rng}$, а если $R \in \mathbf{Ob}(\mathbf{Ring})$, то $R\text{-ring} := R \int_{\mathbf{Ring}} \mathbf{Ring}$.

Наблюдение 3. Функтор $(\rho : R \rightarrow \mathbb{Z}) \mapsto \text{Ker}(\rho) : \mathbf{Ring} \int_{\mathbf{Ring}} \mathbb{Z} \rightarrow \mathbf{Rng}$ является эквивалентностью категорий, так как любой такой ρ является левым обратным к каноническому гомоморфизму $\mathbb{Z} \rightarrow R$, а потому задаёт изоморфизм $R \cong \mathbb{Z} \oplus \text{Ker}(\rho)$ между R и унитализацией $\text{Ker}(\rho)$.

Обозначение 20 (ГРУППОИД ИЗОМОРФИЗМОВ). Пусть \mathcal{C} — категория. Тогда через \mathcal{C}^\times обозначается подкатегория \mathcal{C} , морфизмами которой являются в точности все изоморфизмы в \mathcal{C} .

Замечание 6. Обозначение 20 согласовано с обозначением 7.

Метрическая геометрия и топология

Соглашение 12 (КОМПАКТНОСТЬ И ХАУСДОРФОВОСТЬ). Мы не включаем требование хаусдорфовости в определение компактного топологического пространства.

Обозначение 21 (ФУНКЦИЯ РАССТОЯНИЯ). Расстояние между точками x' и x'' в метрическом пространстве X часто будет обозначаться через $d_X(x', x'')$ или просто через $d(x', x'')$.

Замечание 7. Буква «d» — это первая буква английского слова «distance».

Часть I

Не сгруппированные тексты

Глава 1

Почти не подкорректированные старые тексты

1.1. Китайская теорема об остатках

Лемма 1. Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, $\mathfrak{I}, \mathfrak{J} \subset R$ — двусторонние идеалы. Канонический гомоморфизм $R \rightarrow R/\mathfrak{I} \times R/\mathfrak{J}$ сюръективен тогда и только тогда, когда $\mathfrak{I} + \mathfrak{J} = R$.

Доказательство. Следующий короткий комплекс абелевых групп

$$R/(\mathfrak{I} \cap \mathfrak{J}) \xrightarrow{x+\mathfrak{I} \cap \mathfrak{J} \mapsto (x+\mathfrak{I}, x+\mathfrak{J})} R/\mathfrak{I} \oplus R/\mathfrak{J} \xrightarrow{(x+\mathfrak{I}, y+\mathfrak{J}) \mapsto x-y+(\mathfrak{I}+\mathfrak{J})} R/(\mathfrak{I} + \mathfrak{J})$$

точен согласно теореме о факторквадрате суммы-пересечения (теорема 12.2.1). Это можно проверить и непосредственно. \square

Замечание 1. Идеалы $\mathfrak{I}, \mathfrak{J} \subset R$, такие что $\mathfrak{I} + \mathfrak{J} = R$, называются *взаимно простыми*, или *копростыми*, или *комаксимальными*.

Теорема 1. Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, $(\mathfrak{I}_i)_{i \in I}$ — семейство двусторонних идеалов R , $\text{card}(I) < \infty$. Тогда следующие условия эквивалентны: (i) Если $i, j \in I$, $i \neq j$, то канонический гомоморфизм $R \rightarrow R/\mathfrak{I}_i \times R/\mathfrak{I}_j$ сюръективен; (ii) Канонический гомоморфизм $R \rightarrow \prod_{i \in I} R/\mathfrak{I}_i$ сюръективен.

Доказательство. Очевидно, что (ii) \implies (i). Докажем обратное. Рассмотрим $N := \text{Im}(R \rightarrow \prod_{i \in I} R/\mathfrak{I}_i)$. Для любых $i, j \in I$, $i \neq j$ мы можем найти $a_{ij} \in N$, такой что i -ая координата a_{ij} равна 1, а j -ая — 0. Тогда $a_i := \prod_{j \in I \setminus \{i\}} a_{ij} \in N$ (произведение в произвольном порядке) имеет i -ую координату 1 и остальные координаты 0. Такие a_i порождают $\prod_{i \in I} R/\mathfrak{I}_i$ как R -модуль, поэтому $N = \prod_{i \in I} R/\mathfrak{I}_i$. \square

Следствие 1. В предположениях теоремы 1 следующие условия эквивалентны: (i) Если $i, j \in I$, $i \neq j$, то $\mathfrak{I}_i + \mathfrak{I}_j = R$; (ii) R -кольца $R/\bigcap_{i \in I} \mathfrak{I}_i$ и $\prod_{i \in I} R/\mathfrak{I}_i$ изоморфны.

Доказательство. Условие (ii) эквивалентно сюръективности канонического гомоморфизма $R \rightarrow \prod_{i \in I} R/\mathfrak{I}_i$, что, по теореме 1, эквивалентно сюръективности гомоморфизма $R \rightarrow R/\mathfrak{I}_i \times R/\mathfrak{I}_j$ для любых $i, j \in I$, $i \neq j$, что, по лемме 1, эквивалентно условию (i). \square

Определение 1. Пусть $(\mathfrak{I}_i)_{i \in I}$ — это семейство подмножеств ассоциативного кольца, где $\text{card}(I) = n < \infty$. Симметрическое произведение $\prod_{i \in I}^{\text{sym}} \mathfrak{I}_i$ — это сумма произведений $\mathfrak{I}_{\sigma(1)} \mathfrak{I}_{\sigma(2)} \dots \mathfrak{I}_{\sigma(n)}$ по всем биекциям $\sigma : \{1, 2, \dots, n\} \xrightarrow{\sim} I$, то есть $\prod_{i \in I}^{\text{sym}} \mathfrak{I}_i := \sum_{\sigma: \{1, \dots, n\} \xrightarrow{\sim} S} \mathfrak{I}_{\sigma(1)} \dots \mathfrak{I}_{\sigma(n)}$.

Теорема 2. Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, $(\mathfrak{I}_i)_{i \in I}$ — семейство двусторонних идеалов R , $\text{card}(I) < \infty$, причём $\mathfrak{I}_i + \mathfrak{I}_j = R$ при $i, j \in I$, $i \neq j$. Тогда $\prod_{i \in I}^{\text{sym}} \mathfrak{I}_i = \bigcap_{i \in I} \mathfrak{I}_i$.

Доказательство. Равенство $\prod_{(i,j) \in (I \times I) \setminus \Delta} (\mathfrak{I}_i + \mathfrak{I}_j) = R$ (произведение в произвольном порядке) получается перемножением равенств $\mathfrak{I}_i + \mathfrak{I}_j = R$. Если раскрыть скобки в этом произведении, то в каждый моном не войдёт максимум один из \mathfrak{I}_i (два идеала \mathfrak{I}_i и \mathfrak{I}_j не могут не войти, так как нам нужно забрать что-то из скобки $(\mathfrak{I}_i + \mathfrak{I}_j)$). Отсюда получаем: $\bigcap_{i \in I} \mathfrak{I}_i = (\bigcap_{i \in I} \mathfrak{I}_i) \prod_{(i,j) \in (I \times I) \setminus \Delta} (\mathfrak{I}_i + \mathfrak{I}_j) \subset \prod_{i \in I}^{\text{sym}} \mathfrak{I}_i \subset \bigcap_{i \in I} \mathfrak{I}_i$. \square

Пример 1. Пусть M — ненулевой модуль над ассоциативным унитарным кольцом R . Тогда собственный подмодуль $\{(a, b, c) \in M \oplus M \oplus M \mid a + b + c = 0\} \subsetneq M \oplus M \oplus M$ сюръективно проецируется на каждый из трёх подмодулей $M \oplus M \oplus \{0\}$, $M \oplus \{0\} \oplus M$, $\{0\} \oplus M \oplus M \subset M \oplus M \oplus M$ — китайская теорема об остатках для семейств не работает для модулей.

1.2. Системы корней классических алгебр Ли

Матричное описание классических алгебр Ли

Пусть V — n -мерное векторное пространство над полем K . Пусть s_{ort} — квадратная перъединичная матрица, задающая невырожденную симметрическую билинейную форму на V . Если n чётно, то определена квадратная матрица $s_{\text{sp}} := s_{\text{ort}} s_{\pm}$, где $s_{\pm} := \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ — блочная матрица, состоящая из квадратных блоков одинакового размера. Матрица s_{sp} задаёт невырожденную симплектическую билинейную форму на V .

Решения уравнения $s_{\text{ort}}x + x^t s_{\text{ort}} = 0$, то есть $(s_{\text{ort}} x s_{\text{ort}}^{-1})^t = -x$, легко описать, заметив, что сопряжение матрицей s_{ort} заменяет матрицу на «центрально симметричную», что в композиции с транспонированием даёт отражение матрицы относительно побочной диагонали. Отсюда, в частности, становится ясно, что размерность ортогональной алгебры Ли при $\text{char}(K) \neq 2$ равна $(1/2)(n^2 - n)$.

Решения уравнения $(s_{\text{sp}} x s_{\text{sp}}^{-1})^t = -x$ легко описать, заметив, что $\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} a & -b \\ -c & d \end{pmatrix}$, а $(s_{\text{sp}} x s_{\text{sp}}^{-1})^t = (s_{\text{ort}}(s_{\pm} x s_{\pm}^{-1}) s_{\text{ort}}^{-1})^t$. Отсюда, в частности, становится ясно, что размерность симплектической алгебры Ли при $\text{char}(K) \neq 2$ равна $(1/2)(n^2 + n)$.

Описание систем корней классических алгебр Ли

Пусть K — поле характеристики 0, I — конечное множество мощности $n \geq 2$, $V = K^I$ — векторное пространство над K , $(e_{i,j})_{i,j \in I}$ — стандартный базис в $\text{End}_{K\text{-mod}}(V)$ относительно стандартного базиса в K^I . Пусть $\langle -, - \rangle_{\text{Kil}}$ обозначает форму Киллинга на $\mathfrak{gl}(V)$ или её ограничение на $\mathfrak{sl}(V)$, совпадающее с формой Киллинга на $\mathfrak{sl}(V)$.

Преобразование $[e_{i,i}, -]$ умножает все матричные единицы $e_{i,j}$, где $j \in I \setminus \{i\}$, на 1, матричные единицы $e_{j,i}$, где $j \in I \setminus \{i\}$, — на -1 , а остальные матричные единицы — на 0. Отсюда ясно, что $\langle e_{i,i}, e_{j,j} \rangle_{\text{Kil}} = 2n\delta_{i,j} - 2$ для всех $i, j \in I$.

Введём новое скалярное произведение на пространстве диагональных матриц: $\langle e_{i,i}, e_{j,j} \rangle_{\text{Еuc}} := 2n\delta_{i,j}$, где $i, j \in I$. Тогда для любых $i, j \in I$, таких что $i \neq j$, линейная функция $\langle e_{i,i} - e_{j,j}, - \rangle_{\text{Kil}}$ на пространстве диагональных матриц совпадает с линейной функцией $\langle e_{i,i} - e_{j,j}, - \rangle_{\text{Еuc}}$, которая совпадает с корнем, соответствующим собственному вектору $e_{i,j}$,

умноженным на $2n$. В частности, получаем, что $\langle e_{i,i} - e_{j,j}, e_{k,k} - e_{l,l} \rangle_{\text{Kil}} = \langle e_{i,i} - e_{j,j}, e_{k,k} - e_{l,l} \rangle_{\text{Euc}}$ для любых $i, j, k, l \in I$.



Рис. 1.1. Системы корней A_2 , B_2 , C_2 и D_2 , соответствующие классическим алгебрам Ли $\mathfrak{sl}(3)$, $\mathfrak{o}(5)$, $\mathfrak{sp}(4)$ и $\mathfrak{o}(4)$ соответственно

Аналогичным образом проверяется, что в ортогональной и симплектической алгебрах Ли очевидный базис в пространстве диагональных матриц является ортогональным базисом относительно формы Киллинга, откуда становятся ясными картинки соответствующих систем корней (см. рис. 1.1).

1.3. Определитель и след

Наблюдение 1. Внешние степени задаются соотношениями полилинейности и вырождения. Иллюстрация для второй внешней степени:

$$a \wedge (b + c) = a \wedge b + a \wedge c, \quad (a + b) \wedge c = a \wedge c + b \wedge c, \quad a \wedge a = 0.$$

Это соответствует объёму, так как объём полилинеен и вырождается.

Наблюдение 2. Определитель линейного преобразования g задаётся мультипликативным действием g на старшей внешней степени. Иллюстрация для случая, когда старшая внешняя степень третья:

$$g(a \wedge b \wedge c) = g(a) \wedge g(b) \wedge g(c) = \det(g)(a \wedge b \wedge c).$$

Это соответствует изменению объёма под действием линейного преобразования.

Наблюдение 3. След линейного преобразования d задаётся аддитивным действием d на старшей внешней степени. Иллюстрация для случая, когда старшая внешняя степень третья:

$$d(a \wedge b \wedge c) = d(a) \wedge b \wedge c + a \wedge d(b) \wedge c + a \wedge b \wedge d(c) = \text{tr}(d)(a \wedge b \wedge c).$$

Это соответствует скорости изменения объёма под действием соответствующего линейному преобразованию линейного векторного поля.

Наблюдение 4. Экспонента задаёт связь между определителем и следом:

$$\det(e^x) = e^{\text{tr}(x)}.$$

Это соответствует получению линейного преобразования экспоненцированием линейного векторного поля.

1.4. Векторы Витта и p -адические числа

Соглашения и обозначения

Соглашение 1. В этом разделе $p \in \mathbb{N}_1$ — фиксированное простое число, кольца и алгебры считаются коммутативными, ассоциативными и унитарными.

Обозначение 1. В этом разделе $[n]_0 := \{i \in \mathbb{N}_0 \mid 0 \leq i < n\}$, где $n \in \mathbb{N}_0$.

Представители Тейхмюллера

Существование и единственность представителей Тейхмюллера

Определение 1 (ПРЕДСТАВИТЕЛЬ ТЕЙХМЮЛЛЕРА). Пусть отображение $\pi : R \rightarrow \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$, где $R = \mathbb{Z}_p$ или $R = \mathbb{Z}/p^n\mathbb{Z}$, $n \geq 1$, — это очевидная редукция, пусть $a \in R$. Если $a^p = a$, то a называется *представителем Тейхмюллера* для $\pi(a) \in \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$.

Лемма 1 (ЛЕММА ГЕНЗЕЛЯ). Пусть $s \in \mathbb{Z}$ и $f(s) \equiv 0 \pmod{p^n}$, где $f \in \mathbb{Z}[X]$ и $n \geq 1$, причём $f'(s) \not\equiv 0 \pmod{p}$. Тогда существует единственное по модулю p^{n+1} число $\tilde{s} \in \mathbb{Z}$, такое что $\tilde{s} \equiv s \pmod{p^n}$ и $f(\tilde{s}) \equiv 0 \pmod{p^{n+1}}$.

Доказательство. Пусть $\tilde{s} = s + bp^n$, а $f(s) = ap^n$. Тогда

$$\begin{aligned} f(s + bp^n) &\equiv 0 \pmod{p^{n+1}} \\ f(s) + f'(s)bp^n &\equiv 0 \pmod{p^{n+1}} \\ ap^n + f'(s)bp^n &\equiv 0 \pmod{p^{n+1}} \\ (a + f'(s)b)p^n &\equiv 0 \pmod{p^{n+1}} \\ a + f'(s)b &\equiv 0 \pmod{p}. \end{aligned}$$

Если $f'(s) \not\equiv 0 \pmod{p}$, то последнее уравнение однозначным по модулю p образом определяет b , так как $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ — поле. \square

Следствие 1. Для любого $\alpha \in \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ существуют единственные представители Тейхмюллера $\alpha^\tau \in \mathbb{Z}_p$ и $\alpha^{\tau_n} \in \mathbb{Z}/p^n\mathbb{Z}$, где $n \geq 1$.

Доказательство. Возьмём $f(X) = X^p - X$. \square

Замечание 1. Существование и единственность представителей Тейхмюллера можно доказать и другим способом.

Для любого $n \geq 1$ имеем индуцированный очевидным гомоморфизмом $\rho : \mathbb{Z}/p^n\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ гомоморфизм $\rho^\times : (\mathbb{Z}/p^n\mathbb{Z})^\times \rightarrow (\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^\times$, причём $|\text{Ker}(\rho^\times)| = p^{n-1}$, так как $|(\mathbb{Z}/p^n\mathbb{Z})^\times| = p^n - p^{n-1}$ (класс $l \in \mathbb{Z}$ обратим в $\mathbb{Z}/k\mathbb{Z}$ тогда и только тогда, когда l и k взаимно просты).

Пусть $\alpha \in (\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^\times$, пусть $a_1, a_2 \in \mathbb{Z}/p^n\mathbb{Z}$ и $\rho(a_1) = \rho(a_2) = \alpha$. Тогда $a_1, a_2 \in (\mathbb{Z}/p^n\mathbb{Z})^\times$ и $a_1^{p^{n-1}} = a_2^{p^{n-1}}$, так как $a_1/a_2 \in \text{Ker}(\rho^\times)$. Взяв $a = a_1^{p^{n-1}}$ и $a_2 = a_1^p$, получаем, что $a^p = a$.

Если $a \in \mathbb{Z}/p^n\mathbb{Z}$ и $\rho(a) = 0$, то $a \in p\mathbb{Z}/p^n\mathbb{Z}$, откуда $a^n \in p^n\mathbb{Z}/p^n\mathbb{Z} = 0$.

Разложение в ряды по представителям Тейхмюллера

Наблюдение 1. Очевидно, что для любого $a \in \mathbb{Z}_p$ существует единственное семейство $(\alpha_i)_{i \in \mathbb{N}_0} \in (\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^{\mathbb{N}_0}$, такое что $a = \sum_{i=0}^{\infty} \alpha_i^\tau p^i$. Аналогичное разложение $a = \sum_{i=0}^n \alpha_i^{\tau_{n+1}} p^i$ есть для $a \in \mathbb{Z}/p^{n+1}\mathbb{Z}$.

Наблюдение 2. Для любого кольца A и любого $a \in A$ выполняются следующие вложения: $p(a + p^n A) \subset pa + p^{n+1}A$, где $n \geq 0$, и $(a + p^n A)^p \subset a^p + p^{n+1}A$, где $n \geq 1$. Другими словами, если $\tilde{f}(x) = px$ или $\tilde{f}(x) = x^p$,

то существует единственное f , такое что следующая диаграмма коммутативна:

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\tilde{f}} & A \\ \Downarrow & & \Downarrow \\ A/p^n A & \xrightarrow{f} & A/p^{n+1} A. \end{array} \quad (1)$$

Злоупотребляя обозначениями, будем писать $f(x) = px$ и $f(x) = x^p$.

Замечание 2. В верхней строчке диаграммы (1) кольцо A , очевидно, можно заменить на $A/p^m A$, где $m \geq n + 1$.

Наблюдение 3. Разложение в ряды по представителям Тейхмюллера можно описать следующей биекцией:

$$(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^{[n+1]_0} \xrightarrow{\sim} \mathbb{Z}/p^{n+1}\mathbb{Z}, \quad (x_i)_{i \in [n+1]_0} \mapsto \sum_{i=0}^n p^i x_i^{p^{n-i}} = \sum_{i=0}^n p^i x_i^{\tau_{n+1}}. \quad (2)$$

Это можно увидеть, например, подняв $x_i \in \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ до $x_i^{\tau_{n+1}} \in \mathbb{Z}/p^{n+1}\mathbb{Z}$ и вычислив: $\sum_{i=0}^n p^i (x_i^{\tau_{n+1}})^{p^{n-i}} = \sum_{i=0}^n p^i x_i^{\tau_{n+1}}$.

Что мы хотим построить

Пусть для каждого кольца R на множестве $R^{\mathbb{N}_0}$ определена согласованная со структурой функтора от R структура кольца $W(R)$, такая что проекции $R^{\mathbb{N}_0} \rightarrow R^{[n]_0}$ индуцируют структуры колец $W_n(R)$ на $R^{[n]_0}$ и отображения $W_{n+1}(R) \rightarrow R$, $(x_i)_{i \in [n+1]_0} \mapsto \sum_{i=0}^n p^i x_i^{p^{n-i}}$ являются гомоморфизмами колец.

$$\begin{array}{ccc} W_{n+1}(\mathbb{Z}) & \xrightarrow{(x_i)_{i \in [n+1]_0} \mapsto \sum_{i=0}^n p^i x_i^{p^{n-i}}} & \mathbb{Z} \\ \Downarrow & & \Downarrow \\ W_{n+1}(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}) & \xrightarrow{(x_i)_{i \in [n+1]_0} \mapsto \sum_{i=0}^n p^i x_i^{\tau_{n+1}}} & \mathbb{Z}/p^{n+1}\mathbb{Z} \end{array} \quad (3)$$

Тогда биекция (2): $W_{n+1}(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}) \xrightarrow{\sim} \mathbb{Z}/p^{n+1}\mathbb{Z}$ является гомоморфизмом колец, в чём можно убедиться, посмотрев на коммутативную диаграмму (3), где вертикальные стрелки — стандартные редукции, откуда получаем изоморфизм $W(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}) \cong \lim_n W_n(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}) \xrightarrow{\sim} \mathbb{Z}_p \cong \lim_n \mathbb{Z}/p^n\mathbb{Z}$.

Векторы Витта

Формулировка утверждения

Утверждение 1. Для каждого кольца R на множестве $\mathbb{W}(R) := R^{\mathbb{N}_1}$, называемом множеством векторов Витта, существует единственная согласованная со структурой функтора от R структура кольца, такая что для каждого $m \geq 1$ отображение $\mathbb{W}(R) \rightarrow R$, $(x_n)_{n \in \mathbb{N}_1} \mapsto x^{(m)} := \sum_{e|m} ex_e^{m/e}$, называемое m -ой призрачной/фантомной компонентой, является гомоморфизмом колец.

Доказательство единственности

Универсальный случай. Чтобы доказать утверждение 1 вычислим сумму и произведение векторов $(X_i)_{i \in \mathbb{N}_1}, (Y_i)_{i \in \mathbb{N}_1} \in \mathbb{W}(\mathbb{Z}[X_i, Y_i | i \in \mathbb{N}_1])$. Это задаст сумму и произведение любых $(x_i)_{i \in \mathbb{N}_1}, (y_i)_{i \in \mathbb{N}_1} \in \mathbb{W}(R)$ для любого кольца R применением гомоморфизма $\mathbb{Z}[X_i, Y_i | i \in \mathbb{N}_1] \rightarrow R$, $X_i \mapsto x_i, Y_i \mapsto y_i$ для всех $i \in \mathbb{N}_1$. Для вычисления также будет использоваться вложение $\iota : \mathbb{Z}[X_i, Y_i | i \in \mathbb{N}_1] \hookrightarrow \mathbb{Q}[X_i, Y_i | i \in \mathbb{N}_1]$.

Единственность и свойства. Применив ι и заметив, что в \mathbb{Q} -алгебрах x_n восстанавливается по индукции из $x^{(n)} = \sum_{e|n} ex_e^{n/e}$, сразу получаем единственность сложения и умножения и свойства кольца: для проверки ассоциативности и дистрибутивности используем векторы $(X_i)_{i \in \mathbb{N}_1}, (Y_i)_{i \in \mathbb{N}_1}, (Z_i)_{i \in \mathbb{N}_1} \in \mathbb{W}(\mathbb{Z}[X_i, Y_i, Z_i | i \in \mathbb{N}_1])$.

Доказательство существования

Формальные ряды. Для произвольного кольца R построим биекцию

$$\mathbb{W}(R) \xrightarrow{\sim} 1 + tR[[t]] \subset R[[t]], \quad (x_n)_{n \in \mathbb{N}_1} \mapsto \prod_{n \geq 1} (1 - x_n t^n).$$

Коэффициенты ряда $\prod_{n \geq 1} (1 - x_n t^n)$ и x_n , где $n \geq 1$, восстанавливаются друг из друга по индукции как многочлены с коэффициентами в \mathbb{Z} .

Логарифмическое дифференцирование. Выполняется равенство

$$-t \frac{d}{dt} \log \prod_{n \geq 1} (1 - X_n t^n) = \sum_{m \geq 1} X^{(m)} t^m.$$

Это легко увидеть, зная, что логарифмическая производная геометрической прогрессии равна ей самой:

$$\frac{d}{df} \log \sum_{i=0}^{\infty} f^i = \sum_{i=0}^{\infty} f^i \quad \text{или} \quad f \frac{d}{df} \log \sum_{i=0}^{\infty} f^i = \sum_{i=1}^{\infty} f^i, \quad (4)$$

взяв $f := X_n t^n$ и заметив, что тогда выполняется равенство $f \frac{d}{df} = \frac{1}{n} t \frac{d}{dt}$.

Замечание 3. Формула (4) является легко запоминаемой формой «ряда Меркатора», то есть ряда для логарифма:

$$\frac{d}{df} \log \frac{1}{1-f} = 1 + f + f^2 + \dots, \quad -\log(1-f) = f + \frac{f^2}{2} + \frac{f^3}{3} + \dots$$

Сложение и умножение. Теперь очевидно, что сложению векторов Витта соответствует умножение соответствующих рядов. Описать умножение векторов Витта тоже не очень трудно:

$$\begin{aligned} \sum_{\substack{m \geq 1 \\ e, r | m}} e X_e^{m/e} r Y_r^{m/r} t^m &= \sum_{n, e, r \geq 1} e r \left(X_e^{\text{lcm}(e, r)/e} Y_r^{\text{lcm}(e, r)/r} t^{\text{lcm}(e, r)} \right)^n = \\ &= -t \frac{d}{dt} \log \prod_{e, r \geq 1} \left(1 - X_e^{\text{lcm}(e, r)/e} Y_r^{\text{lcm}(e, r)/r} t^{\text{lcm}(e, r)} \right)^{e r / \text{lcm}(e, r)}. \end{aligned}$$

Первое равенство — тавтология. Чтобы получить второе равенство, возьмём $f := X_e^{\text{lcm}(e, r)/e} Y_r^{\text{lcm}(e, r)/r} t^{\text{lcm}(e, r)}$, заметим, что тогда выполняется равенство $f \frac{d}{df} = \frac{1}{\text{lcm}(e, r)} t \frac{d}{dt}$ и применим формулу (4).

p -Типические векторы Витта

Определение 2 (p -ТИПИЧЕСКИЕ ВЕКТОРЫ ВИТТА). Пусть R — кольцо. Из формулы $x^{(n)} = \sum_{e|n} e x_e^{n/e}$ нетрудно убедиться, что если применить проекцию забывания всех координат, кроме степеней фиксированного простого: $R^{\{1, 2, 3, \dots\}} \rightarrow R^{\{p^0, p^1, p^2, \dots\}}$, то кольцевая структура $\mathbb{W}(R)$ на $R^{\mathbb{N}_1}$ индуцирует кольцевую структуру $W(R)$ на $R^{\{p^0, p^1, p^2, \dots\}} \leftrightarrow R^{\mathbb{N}_0}$. Кольцо $W(R)$ называется кольцом p -типических векторов Витта.

Замечание 4. Операции на $W(R)$ задаются функториальностью по R и условием аддитивности и мультипликативности для любого $k \geq 0$ следующих отображений: $W(R) \rightarrow R$, $(x_n)_{n \in \mathbb{N}_0} \mapsto x^{(k)p} := \sum_{l=0}^k p^l x_l^{p^{k-l}}$.

Замечание 5. Имеем изоморфизм $W(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}) \xrightarrow{\sim} \mathbb{Z}_p$, $(x_i)_{i \in \mathbb{N}_0} \mapsto \sum_{i=0}^{\infty} p^i x_i^{\tau}$.

1.5. Теорема, разложение и кольцо Витта

Теорема Витта

Определение 1 (Ортогональное пространство). Определим *ортогональное пространство* как линейное пространство, снабжённое симметрической билинейной формой.

Определение 2 (Изотропное пространство). Ортогональное пространство, структурная билинейная форма которого нулевая, называется *изотропным пространством*.

Определение 3 (Совершенное спаривание). Назовём спаривание $v \otimes w \mapsto \langle v, w \rangle : P \otimes_K Q \rightarrow K$, где P и Q — это векторные пространства над полем K , *совершенным*, если индуцированные отображения $\lambda : P \rightarrow Q^{\vee}$, $v \mapsto \langle v, - \rangle$ и $\rho : Q \rightarrow P^{\vee}$, $w \mapsto \langle -, w \rangle$ биективны.

Наблюдение 1. Отображения λ и ρ из определения 3 выражаются друг через друга с помощью канонических гомоморфизмов $\epsilon_P : P \rightarrow (P^{\vee})^{\vee}$ и $\epsilon_Q : Q \rightarrow (Q^{\vee})^{\vee}$ следующим образом: $\lambda = \rho^{\vee} \circ \epsilon_P$ и $\rho = \lambda^{\vee} \circ \epsilon_Q$.

Определение 4 (Гиперболическое дополнение). Два изотропных подпространства ортогонального пространства называются *гиперболическими дополнениями* друг друга, если ограничение билинейной формы определяет совершенное спаривание между ними.

Наблюдение 2. Пусть V — векторное пространство над полем K , снабжённое сюръективным гомоморфизмом $V \rightarrow V^{\vee}$, а P и Q — его подпространства. Так как отображение ограничения $V^{\vee} \rightarrow P^{\vee}$ сюръективно, то сквозное отображение $Q \rightarrow V \rightarrow V^{\vee} \rightarrow P^{\vee}$ биективно тогда и только тогда, когда Q является дополнением к $P^{\perp} := \text{Ker}(V \rightarrow P^{\vee})$ в V .

Теорема 1. Пусть V — невырожденное конечномерное ортогональное пространство над полем K , где $\text{char}(K) \neq 2$, а $P \subset V$ — его изотропное подпространство. Тогда у P есть гиперболическое дополнение.

Доказательство. Пусть $Q \subset V$ — произвольное дополнение к P^\perp в V , то есть $V = P^\perp \oplus Q = P \oplus Q^\perp$. Пусть $T : Q \rightarrow Q^\perp$, $v \mapsto v^T$ — проекция вдоль P . Определим подпространство $M := \{(1/2)(v + v^T) \in V \mid v \in Q\}$. Тогда M , как и Q , является дополнением к P^\perp в V , потому что для любого $v \in Q$ соответствующий вектор $(1/2)(v + v^T) \in M$ отличается от вектора v на вектор из $P \subset P^\perp$. С другой стороны, пространство M изотропно: для любых векторов $v, w \in Q$ выполняются равенства $\langle v + v^T, w + w^T \rangle = \langle v - v^T, w - w^T \rangle = 0$, так как $\langle v, w^T \rangle = \langle v^T, w \rangle = 0$, а векторы $v - v^T$ и $w - w^T$ лежат в изотропном пространстве P . \square

Наблюдение 3. В ортогональном пространстве V дополнения к V^\perp , то есть к ядру формы, — это в точности максимальные элементы множества подпространств в V с тривиальным ядром индуцированной формы. Проектирования вдоль V^\perp задают изометрии между ними.

Лемма 1. Пусть $U' \subset V'$ и $U'' \subset V''$ — две пары вложенных конечномерных ортогональных пространств над полем K , где $\text{char}(K) \neq 2$, причём V' — это минимальное невырожденное подпространство в V' , содержащее U' , и аналогично для пары $U'' \subset V''$. Тогда любая изометрия $\varphi : U' \xrightarrow{\sim} U''$ продолжается до изометрии $V' \xrightarrow{\sim} V''$.

Доказательство. Пусть $P' \subset U'$ — это ядро формы на U' , и аналогично $P'' = \varphi(P') \subset U''$. Пусть $L' \subset U'$ — это дополнение к P' в U' , и аналогично $L'' := \varphi(L') \subset U''$. Пусть $Q' \subset V'$ — это гиперболическое дополнение к P' в ортогональном дополнении к L' в V' , и аналогично для $Q'' \subset V''$. Тогда мы имеем разложения $V' = P' \oplus Q' \oplus L'$ и $V'' = P'' \oplus Q'' \oplus L''$, и утверждение леммы становится очевидным. \square

Обозначение 1 (Ортогонал). Если V — ортогональное пространство, а $U \subset V$ — его подпространство, то ортогонал к U в V обозначим через $\perp_V(U) := \{v \in V \mid \langle v, u \rangle = 0 \text{ для всех } u \in U\}$.

Теорема 2 (ТЕОРЕМА ВИТТА). Пусть $U' \subset V'$ и $U'' \subset V''$ — две пары вложенных конечномерных ортогональных пространств над полем K , где $\text{char}(K) \neq 2$, причём V' изометрично V'' . Тогда любая изометрия $\varphi : U' \xrightarrow{\sim} U''$ продолжается до изометрии $V' \xrightarrow{\sim} V''$.

Доказательство (из трёх частей).

Часть 1. Сначала рассмотрим случай одномерных невырожденных U' и U'' . Без ограничения общности можно предположить, что $V := V' = V''$. Изометрия φ может быть продолжена до автоизометрии пространства $U' + U'' \subset V$, которая может быть продолжена до автоизометрии произвольного минимального невырожденного подпространства $U \subset V$, содержащего $U' + U''$, которая может быть продолжена до автоизометрии V , фиксирующей ортогональное дополнение к U .

Часть 2. Теперь рассмотрим случай произвольных невырожденных U' и U'' . Нам нужно доказать, что $\perp_{V'}(U')$ и $\perp_{V''}(U'')$ изометричны. Предположим, что $\dim(U') = \dim(U'') > 1$. Пусть $S' \subset U'$ и $S'' \subset U''$ — изометричные собственные нетривиальные невырожденные подпространства. Тогда, по индукции, $\perp_{U'}(S')$ изометрично $\perp_{U''}(S'')$ и $\perp_{V'}(S')$ изометрично $\perp_{V''}(S'')$, а потому, по индукции, $\perp_{\perp_{V'}(S')}(\perp_{U'}(S')) = \perp_{V'}(U')$ изометрично $\perp_{\perp_{V''}(S'')}(\perp_{U''}(S'')) = \perp_{V''}(U'')$.

Часть 3. Случай произвольных U' и U'' сводится к случаю невырожденных U' и U'' рассмотрением минимального невырожденного подпространства в V' , содержащего U' , и минимального невырожденного подпространства в V'' , содержащего U'' . \square

Разложение Витта

Определение 5 (Гиперболичность и анизотропность). Ортогональное пространство называется *гиперболическим*, если оно является суммой двух изотропных подпространств, являющихся гиперболическими дополнениями друг друга, и *анизотропным*, если в нём нет нетривиальных изотропных подпространств.

Лемма 2. Пусть V — невырожденное конечномерное ортогональное пространство над полем K , где $\text{char}(K) \neq 2$. Тогда все максимальные изотропные подпространства пространства V изоморфны.

Доказательство. Следствие теоремы 2 (теоремы Витта). \square

Лемма 3. Пусть V — невырожденное конечномерное ортогональное пространство над полем K , где $\text{char}(K) \neq 2$, а $P, Q, L \subset V$ — его под-

пространства, причём P и Q — изотропные гиперболические дополнения друг друга, а L — ортогональное дополнение к $P \oplus Q$ в V . Тогда P является максимальным изотропным подпространством пространства V тогда и только тогда, когда пространство L анизотропно.

Доказательство. Так как $P \oplus L \subset P^\perp$ и $P^\perp \cap Q = 0$, то $P^\perp = P \oplus L$. Все изотропные подпространства пространства V , содержащие P , содержатся в $P^\perp = P \oplus L$. Подпространства пространства $P \oplus L$, содержащие P , очевидным образом взаимно однозначно соответствуют подпространствам пространства L , причём это соответствие сопоставляет изотропным подпространствам изотропные подпространства. \square

Теорема 3 (РАЗЛОЖЕНИЕ ВИТТА). Пусть V — конечномерное ортогональное пространство над полем K , где $\text{char}(K) \neq 2$. Тогда существует тройка $(V_{\text{iso}}, V_{\text{hyp}}, V_{\text{ani}})$ подпространств V , таких что V_{iso} изотропно, V_{hyp} гиперболично, V_{ani} анизотропно, а V является их попарно ортогональной прямой суммой. Группа автоизометрий V транзитивно действует на таких упорядоченных тройках.

Доказательство. Из наблюдения 3 сразу видно, что V_{iso} определяется однозначно как ядро билинейной формы на V , а $V_{\text{hyp}} \oplus V_{\text{ani}}$ — это одно из его изометричных невырожденных дополнений. Остальное следует из теоремы 1, леммы 2, леммы 3 и теоремы 2 (теоремы Витта). \square

Кольцо Витта

Обозначение 2 (ОРТОГОНАЛЬНАЯ ПРЯМАЯ СУММА). Ортогональную прямую сумму ортогональных пространств V' и V'' над полем K будем обозначать символом $V' \oplus_\perp V''$.

Теорема 4 (ТЕОРЕМА ВИТТА О СОКРАЩЕНИИ). Пусть K — поле, такое что $\text{char}(K) \neq 2$, а V , V' и V'' — три невырожденных конечномерных ортогональных пространства над K . Тогда если $V \oplus_\perp V'$ изометрично $V \oplus_\perp V''$, то V' изометрично V'' .

Доказательство. Следствие теоремы 2 (теоремы Витта). \square

Определение 6 (ПРОИЗВЕДЕНИЕ КРОНЕКЕРА ОРТОГОНАЛЬНЫХ ПРОСТРАНСТВ). Если V' и V'' — два ортогональных пространства над полем K , то определено ортогональное пространство $V' \otimes_K V''$ с формой

$V' \otimes_K V'' \rightarrow V'^{\vee} \otimes_K V''^{\vee} \rightarrow (V' \otimes_K V'')^{\vee}$, индуцированной формами $V' \rightarrow V'^{\vee}$ и $V'' \rightarrow V''^{\vee}$ пространств V' и V'' соответственно, называемое *произведением Кронекера* ортогональных пространств V' и V'' .

Определение 7 (Кольцо/группа Витта–Гротендика). Пусть K — поле, такое что $\text{char}(K) \neq 2$. Тогда кольцо формальных разностей полукольца классов изометричности невырожденных конечномерных ортогональных пространств над K с операциями ортогональной прямой суммы и произведения Кронекера называется *кольцом Витта–Гротендика* поля K и обозначается $\widehat{W}(K)$.

Определение 8 (Кольцо/группа Витта). Пусть K — поле, такое что $\text{char}(K) \neq 2$. Тогда фактор $\widehat{W}(K)$ по идеалу, состоящему из целочисленных кратных класса гиперболической плоскости, называется *кольцом Витта* поля K и обозначается $W(K)$.

Наблюдение 4. Пусть K — поле, такое что $\text{char}(K) \neq 2$. Тогда для любого невырожденного конечномерного ортогонального пространства над K аддитивное обращение его билинейной формы отвечает аддитивному обращению соответствующего элемента $W(K)$.

Наблюдение 5. Пусть K — поле, такое что $\text{char}(K) \neq 2$. Тогда элементы $W(K)$ биективно соответствуют классам изометричности конечномерных анизотропных ортогональных пространств над K .

Пример 1. Кольцо Витта поля \mathbb{R} изоморфно кольцу \mathbb{Z} .

1.6. Жорданова нормальная форма

Наблюдение 1 (ЖОРДАНОВО РАЗЛОЖЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА). Пусть K — поле, Φ — конечное подмножество K , а $(n_\alpha)_{\alpha \in \Phi} \in (\mathbb{N}_1)^{\times \Phi}$. Тогда K -модуль, снабжённый эндоморфизмом, зануляемым многочленом $\prod_{\alpha \in \Phi} (X - \alpha)^{n_\alpha} \in K[X]$, — это то же самое, что модуль над кольцом $K[X]/\prod_{\alpha \in \Phi} (X - \alpha)^{n_\alpha} \cong \prod_{\alpha \in \Phi} (K[X]/(X - \alpha)^{n_\alpha})$, а это то же самое, что индексированная $\alpha \in \Phi$ прямая сумма $K[X]/(X - \alpha)^{n_\alpha}$ -модулей.

Замечание 1. В наблюдении 1 говорится об эквивалентности категорий

$$\frac{K[X]}{\prod_{\alpha \in \Phi} (X - \alpha)^{n_\alpha}}\text{-mod}, \left(\prod_{\alpha \in \Phi} \frac{K[X]}{(X - \alpha)^{n_\alpha}} \right)\text{-mod}, \text{ и } \prod_{\alpha \in \Phi} \left(\frac{K[X]}{(X - \alpha)^{n_\alpha}}\text{-mod} \right).$$

Замечание 2. В условиях наблюдения 1 для каждого $\alpha \in \Phi$ имеем изоморфизм колец $K[X]/(X - \alpha)^{n_\alpha} \xrightarrow{\sim} K[Y]/Y^{n_\alpha}$, $X \mapsto Y + \alpha$.

Теорема 1 (ЖОРДАНОВА ФОРМА НИЛЬПОТЕНТА). Пусть D — тело, а V — $D[X]/X^n$ -модуль, где $n \in \mathbb{N}_1$. Тогда V изоморфен прямой сумме $D[X]/X^n$ -модулей вида $D[X]/X^m$, где $m \in \mathbb{N}_1$ и $m \leq n$.

Доказательство (из двух частей).

Часть 1. Пусть φ обозначает D -эндоморфизм $v \mapsto Xv : V \rightarrow V$. Сначала докажем, что $D[X]/X^n$ -модуль V изоморфен $\bigoplus_{i=1}^n \varphi^{-i}(0)/\varphi^{-i+1}(0)$.

Пусть V_n — это дополнение к $\varphi^{-n+1}(0)$ в $\varphi^{-n}(0)$, V_{n-1} — дополнение к $\varphi^{-n+2}(0)$ в $\varphi^{-n+1}(0)$, содержащее $\varphi(V_n)$, V_{n-2} — дополнение к $\varphi^{-n+3}(0)$ в $\varphi^{-n+2}(0)$, содержащее $\varphi(V_{n-1})$, и так далее. Тогда получаем изоморфизм $V = \bigoplus_{i=1}^n V_i \xrightarrow{\sim} \bigoplus_{i=1}^n \varphi^{-i}(0)/\varphi^{-i+1}(0)$, $(v_i)_{i=1}^n \mapsto (v_i + \varphi^{-i+1}(0))_{i=1}^n$.

Часть 2. Пусть Δ_n — это D -базис V_n , Δ_{n-1} — это D -базис дополнения к $\varphi(V_n)$ в V_{n-1} , Δ_{n-2} — это D -базис дополнения к $\varphi(V_{n-1})$ в V_{n-2} и так далее. Тогда $V = \bigoplus_{k=1}^n \bigoplus_{v \in \Delta_k} \bigoplus_{i=0}^{k-1} D \cdot \varphi^i(v)$ — нужное разложение. \square

Наблюдение 2 (ЖОРДАНОВО РАЗЛОЖЕНИЕ И АРТИНОВЫ КОЛЬЦА). В условиях наблюдения 1 кольцо $A := K[X]/\prod_{\alpha \in \Phi} (X - \alpha)^{n_\alpha}$ артиново и для любого A -модуля V и $\alpha \in \Phi$ имеем канонический изоморфизм $V \cong V_f \times V_{(f)}$, где $f := X - \alpha$, индуцированный изоморфизмом $A \cong A_f \times A_{(f)}$.

1.7. Изображение конфигурации Дезарга

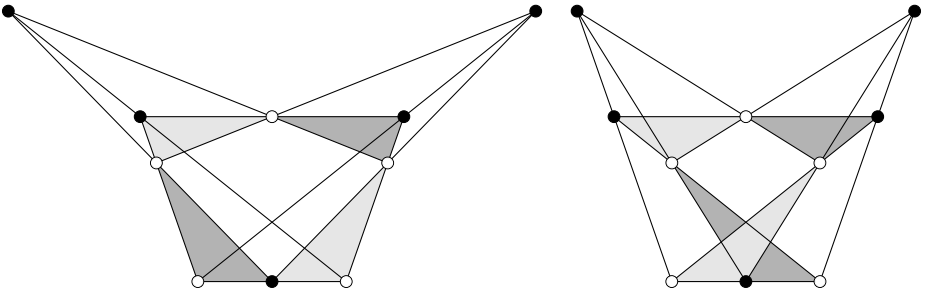


Рис. 1.2. Конфигурация Дезарга — пятиугольники



Рис. 1.3. Конфигурация Дезарга — чертежи

На рисунке 1.2 изображена конфигурация Дезарга, на которой выделены два взаимно вписанных пятиугольника. Посмотрим, как такую картинку можно нарисовать. Применив растяжения вдоль осей x и y (рис. 1.3), можно считать, что точки A , B и D фиксированы. Тогда выбор точки C задаёт рисунок: проводятся линии CD , $C'D$, CA (до E'), $C'A$ (до E), CB (до F'), $C'B'$ (до F). Точки B , E и F всегда лежат на одной линии, что можно проверить, например, координатным методом.

1.8. Элемент Казимира

Определение 1 (ЭЛЕМЕНТ КАЗИМИРА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ). Пусть K — поле, L — конечномерная алгебра Ли над K , а $\rho : L \rightarrow \text{End}_{K\text{-mod}}(V)$, где V — конечномерный K -модуль, — представление L , такое что билинейная форма $b : L \otimes_K L \rightarrow K$, $x \otimes y \mapsto \text{tr}(\rho(x)\rho(y))$ невырождена. Тогда определена следующая диаграмма:

$$\text{End}_{K\text{-mod}}(L) \xleftarrow[\sim]{\alpha} L \otimes_K L^\vee \xleftarrow[\sim]{\beta} L \otimes_K L \xrightarrow{\gamma} \text{End}_{K\text{-mod}}(V), \quad (1)$$

где α — стандартное отождествление, изоморфизм β индуцирован изоморфизмом $x \mapsto b(x, -) : L \xrightarrow{\sim} L^\vee$, а отображение γ переводит $x \otimes y$ в $\rho(x)\rho(y)$ для любых $x, y \in L$. Элемент $\Omega_\rho := \gamma(\beta^{-1}(\alpha^{-1}(\text{Id}_L)))$ называется *элементом Казимира* представления ρ .

Наблюдение 1 (ИНВАРИАНТНОСТЬ ЭЛЕМЕНТА КАЗИМИРА). В обозначениях определения 1 отображения α , β и γ являются гомоморфизмами

L -модулей, а потому, так как элемент $\text{Id}_L \in \text{End}_{K\text{-mod}}(L)$ является L -инвариантным, то элемент Казимира Ω_ρ тоже является L -инвариантным.

Наблюдение 2 (След ЭЛЕМЕНТА КАЗИМИРА). В обозначениях определения 1 след любого элемента $\text{End}_{K\text{-mod}}(L)$ совпадает со следом его образа в $\text{End}_{K\text{-mod}}(V)$. Это абстрактная тавтология — надо воспользоваться тем, что след элемента $\text{End}_{K\text{-mod}}(L)$ задаётся спариванием в $L \otimes_K L^\vee$. В частности, $\text{tr}(\Omega_\rho) = \dim_K(L)$.

1.9. Целые в квадратичных полях

Теорема 1. Пусть $d \in \mathbb{Z}$ — бесквадратное целое число, а $\mathcal{O}_{\mathbb{Q}[\sqrt{d}]} := \{a + b\sqrt{d} \in \mathbb{Q}[\sqrt{d}] \mid a, b \in \mathbb{Q}, 2a \in \mathbb{Z}, a^2 - b^2d \in \mathbb{Z}\}$. Тогда если $d \equiv 2, 3 \pmod{4}$, то $\mathcal{O}_{\mathbb{Q}[\sqrt{d}]} = \mathbb{Z}[\sqrt{d}]$, а если $d \equiv 1 \pmod{4}$, то $\mathcal{O}_{\mathbb{Q}[\sqrt{d}]} = \mathbb{Z}[\frac{1+\sqrt{d}}{2}]$.

Доказательство. Пусть $a, b \in \mathbb{Q}$ — числа, такие что $2a, a^2 - b^2d \in \mathbb{Z}$. Так как $a^2 - b^2d \in \mathbb{Z}$, то $4a^2 - 4b^2d \in \mathbb{Z}$, откуда, так как $2a \in \mathbb{Z}$, следует, что $4b^2d \in \mathbb{Z}$, откуда следует, что $2b \in \mathbb{Z}$, так как d бесквадратное. Осталось рассмотреть условие $4(a^2 - b^2d) = (2a)^2 - (2b)^2d \equiv 0 \pmod{4}$. \square

1.10. Обратный Мура–Пенроуза

Пусть V и U — абелевы группы, а $x : V \rightrightarrows U : y$ — гомоморфизмы, такие что $xux = x$ и $xyx = y$. Тогда $xyx = yx$ и $xux = xy$, то есть xy и yx — идемпотенты. При этом, так как $xux = x$, то $\text{Ker}(yx) \subset \text{Ker}(x)$, а потому $\text{Ker}(yx) = \text{Ker}(x)$. Аналогично, $\text{Im}(yx) = \text{Im}(y)$, и всё то же с одновременной заменой x на y и y на x . Отсюда получаем разложения $V = \text{Ker}(x) \oplus \text{Im}(y)$ и $U = \text{Ker}(y) \oplus \text{Im}(x)$, вместе с парой взаимно обратных изоморфизмов $v \mapsto x(v) : \text{Im}(y) \rightrightarrows \text{Im}(x) : y(u) \leftarrow u$.

Если V и U — это векторные пространства над \mathbb{R} или \mathbb{C} с невырожденными скалярными произведениями, то x однозначно определяет y , для которого описанные разложения ортогональны. Такой y называется «обратным Мура–Пенроуза» к линейному преобразованию x .

1.11. Теорема Эйленберга – Уоттса

Наблюдение 1 ((КО)ЯДРО КАК (КО)ПРЕДЕЛ). Пусть $f : U \rightarrow V$ — морфизм в аддитивной категории. Тогда $\text{Coker}(f)$ по определению отождествляется с $0 \sqcup_U^f V$, а $\text{Ker}(f)$ — с $0 \times_V^f U$, где 0 — нулевой объект.

Теорема 1 (ТЕОРЕМА ЭЙЛЕНБЕРГА – УОТТСА). Пусть R и S — ассоциативные унитарные кольца, $\mathcal{M}(S, R) := (S \otimes_{\mathbb{Z}} R^o)\text{-mod}$, а $\mathcal{F}(S, R) := \text{Fun}_{\text{Rngd}}(R\text{-mod}, S\text{-mod})$. Тогда определена сопряжённая пара

$$\begin{aligned} {}_S M_R &\mapsto {}_S M_R \otimes_R (-) : \mathcal{M}(S, R) \rightleftarrows \mathcal{F}(S, R) : {}_S F({}_R R_R) \leftarrow F, \\ \eta(M) : {}_S M_R &\xrightarrow{\sim} {}_S M_R \otimes_R {}_R R_R, \quad (\varepsilon(F))(V) : {}_S F({}_R R_R) \otimes_{R_R} V \rightarrow {}_S F({}_R V), \end{aligned}$$

где правое действие R на $F(R)$ по функториальности индуцировано правым действием R на себе, единица η — это изоморфизм унитарности, а коединица ε по \otimes -Ном сопряжению индуцирована композицией изоморфизма унитарности и действия F на Ном-ах:

$${}_R V \xrightarrow{\sim} {}_R \text{Hom}_R({}_R R_R, V) \xrightarrow{f \mapsto F(f)} {}_R \text{Hom}_S({}_S F({}_R R_R), {}_S F({}_R V)).$$

Если функтор F сохраняет малые прямые суммы и сохраняет коядра, то есть сохраняет малые копределы, то $\varepsilon(F)$ — это изоморфизм.

Доказательство (из трёх частей).

Часть 1. Заметим, что гомоморфизм $(\varepsilon(F))(R) : F(R) \otimes_R R \rightarrow F(R)$ — это просто изоморфизм унитарности.

Часть 2. Если функтор F сохраняет малые прямые суммы, то из части 1 этого доказательства следует, что $\varepsilon(F)$ является изоморфизмом и для малых прямых сумм копий R , то есть для свободных модулей.

Часть 3. Если функтор F сохраняет ещё и коядра, то из части 2 этого доказательства следует, что $\varepsilon(F)$ является изоморфизмом и для коядер гомоморфизмов свободных модулей, то есть для всех модулей. \square

Глава 2

Подкорректированные старые тексты

2.1. Теорема Гамильтона – Кэли

Формулировка и доказательство

Теорема 1 (ТЕОРЕМА ГАМИЛЬТОНА – КЭЛИ). *Если x — эндоморфизм свободного конечно порождённого модуля V над ассоциативным коммутативным унитарным кольцом A , то x является корнем своего характеристического многочлена.*

Доказательство. Эндоморфизм $\varphi \mapsto \varphi x : \text{End}_{A\text{-mod}}(V) \rightarrow \text{End}_{A\text{-mod}}(V)$ превращает $\text{End}_{A\text{-mod}}(V)$ -модуль $\text{End}_{A\text{-mod}}(V)$ в модуль над кольцом $\text{End}_{A\text{-mod}}(V)[X] \cong \text{End}_{A\text{-mod}}(V) \otimes_A A[X] \cong \text{End}_{A[X]\text{-mod}}(V \otimes_A A[X])$, при этом Id_V зануляется элементом $c := x - X$, а потому и элементом $\text{adj}(c)c = \det(c) \in A[X] \subset \text{End}_{A[X]\text{-mod}}(V \otimes_A A[X])$. \square

Замечание 1. Приведённое доказательство теоремы Гамильтона – Кэли изложено в статье Алексея Муранова [21].

Наблюдение 1. Пусть A — ассоциативное коммутативное унитарное кольцо, V — конечно порождённый A -модуль, а $\varphi \in \text{End}_{A\text{-mod}}(V)$. По определению V существует сюръективный гомоморфизм $\pi : A^I \rightarrow V$, где I — какое-то конечное множество. По проективности A^I существует эндоморфизм $\tilde{\varphi} \in \text{End}_{A\text{-mod}}(A^I)$, такой что $\varphi \circ \pi = \pi \circ \tilde{\varphi}$, называемый

поднятием φ . Для любого такого $\tilde{\varphi}$ любой многочлен из $A[X]$, зануляющий $\tilde{\varphi}$, например, характеристический многочлен $\tilde{\varphi}$, зануляет и φ .

Дополнение

Теорема 2. Пусть $\varphi \in \text{End}_{A\text{-mod}}(A^n)$, где $n \in \mathbb{N}_0$, а A — ассоциативное коммутативное унитарное кольцо. Тогда характеристический многочлен φ равен $\sum_{i=0}^n (-1)^i \text{tr}(\wedge^i \varphi) X^{n-i} \in A[X]$.

Идея доказательства. Двойной счёт по множеству пар, состоящих из перестановки n -элементного множества и подмножества в множестве её фиксированных точек. \square

Наблюдение 2. Пусть $B := A[X]/(P(X))$, где A — ассоциативное коммутативное унитарное кольцо, а $P(X) \in A[X]$ — унитарный многочлен. Пусть $x \in B$ — это образ $X \in A[X]$. Очевидно, что множество $\{x^i \in B \mid 0 \leq i < \deg(P(X))\}$ является A -базисом B . Идеал многочленов в $A[X]$, зануляющих оператор $x : B \rightarrow B, f \mapsto xf$, равен $(P(X))$, как сразу видно прямо из определения B . В частности, характеристический многочлен x равен $P(X)$.

Наблюдение 3. Присоединённую матрицу к матрице $(x_{i,j})_{i,j \in I}$ можно определить формулой $(\sum_{\sigma \in \text{Aut}(I) \mid \sigma(j)=i} \text{sgn}(\sigma) \prod_{k \in I \setminus \{j\}} x_{k, \sigma(k)})_{i,j \in I}$.

Некоторые следствия

Теорема 3. Пусть M — конечно порождённый модуль над коммутативным ассоциативным унитарным кольцом A , а ι — ненулевой инъективный эндоморфизм M . Тогда $\text{Ann}_A(\text{Coker}(\iota)) \neq 0$.

Доказательство. Из теоремы Гамильтона–Кэли следует, что существует унитарный многочлен $P(X) = \sum_{i=0}^n a_i X^i \in A[X]$ минимальной степени $n \in \mathbb{N}_1$, такой что $P(\iota) = 0$. Так как на ι можно сокращать слева, то $a_0 \neq 0$. Тогда $a_0 v = -\sum_{i=1}^n a_i \iota^i(v) \in \iota(M)$ для любого $v \in M$, то есть $a_0 \in \text{Ann}_A(\text{Coker}(\iota))$. \square

Следствие 1. Пусть A — ненулевое коммутативное ассоциативное унитарное кольцо, а $n, m \in \mathbb{N}_1$ — числа, такие что $n > m$. Тогда не существует инъективного гомоморфизма A -модулей $\iota : A^n \rightarrow A^m$.

Доказательство. Пусть $\iota' : A^m \rightarrow A^n$ — какое-то координатное вложение. Тогда $\iota' \circ \iota$ — ненулевой инъективный эндоморфизм A^n , такой что $\text{Ann}_A(\text{Coker}(\iota' \circ \iota)) = 0$, что противоречит теореме 3. \square

2.2. Тензорное произведение

Тензорное произведение абелевых групп

Обозначение 1. В этом разделе Hom без индексов обозначает Hom как абелевых групп. То же верно насчёт \otimes и End .

Определение 1 (ТЕНЗОРНОЕ ПРОИЗВЕДЕНИЕ). Определим *тензорное произведение* конечного семейства абелевых групп $(V_i)_{i \in I}$ как абелеву группу $\bigotimes_{i \in I} V_i$, заданную образующими — формальными произведениями $\bigotimes_{i \in I} v_i$, биективными семействам $(v_i)_{i \in I} \in \prod_{i \in I} V_i$, — и соотношениями — $(v' + v'')_{\otimes e} \otimes (\bigotimes_{i \in I \setminus \{e\}} v_i) = v'_{\otimes e} \otimes (\bigotimes_{i \in I \setminus \{e\}} v_i) + v''_{\otimes e} \otimes (\bigotimes_{i \in I \setminus \{e\}} v_i)$, где $e \in I$, $v', v'' \in V_e$, $v_i \in V_i$ для любого $i \in I \setminus \{e\}$.

Замечание 1. Индекс $\otimes e$ в выражении $v'_{\otimes e}$, называемый *позиционным индексом*, указывает на место v' в формальном произведении. Группировка тензорных мономов считается ясной из контекста.

Наблюдение 1. Пусть $(V_i)_{i \in I}$ — пустое семейство абелевых групп, то есть $I = \emptyset$. Тогда $\bigotimes_{i \in I} V_i \cong \mathbb{Z}$.

Наблюдение 2. Пусть $(V_i)_{i \in I}$ — конечное семейство абелевых групп, а $\bigotimes_{i \in I} v_i \in \bigotimes_{i \in I} V_i$. Тогда если $v_e = 0$ для какого-то $e \in I$, то $\bigotimes_{i \in I} v_i = 0$.

Определение 2 (ФУНКТОРИАЛЬНОСТЬ \otimes). Пусть $(\varphi_i : V_i \rightarrow U_i)_{i \in I}$ — конечное семейство гомоморфизмов абелевых групп. Тогда гомоморфизм $\bigotimes_{i \in I} \varphi_i : \bigotimes_{i \in I} V_i \rightarrow \bigotimes_{i \in I} U_i$, $\bigotimes_{i \in I} v_i \mapsto \bigotimes_{i \in I} \varphi_i(v_i)$ называется *тензорным произведением* семейства $(\varphi_i)_{i \in I}$.

Утверждение 1 (СОПРЯЖЁННОСТЬ \otimes и Hom). Пусть V , U и M — абелевы группы. Тогда имеем следующий естественный изоморфизм:

$$\text{Hom}(M \otimes V, U) \xleftrightarrow{((\psi(v))(m) \leftarrow m \otimes v) \leftarrow \psi}^{\varphi \mapsto (v \mapsto (m \mapsto \varphi(m \otimes v)))} \text{Hom}(V, \text{Hom}(M, U)). \quad (1)$$

Утверждение 2 (УНИТАЛЬНОСТЬ \otimes). Пусть V — абелева группа. Тогда имеем естественный изоморфизм $a \otimes v \mapsto av : \mathbb{Z} \otimes V \xrightarrow{\sim} V : 1 \otimes v \mapsto v$.

Утверждение 3 (ДИСТРИБУТИВНОСТЬ \otimes). Пусть $\pi : I \rightarrow J$ — отображение множеств, J конечно, $(V_i)_{i \in I}$ — семейство абелевых групп. Пусть $\text{Sec}(\pi) := \{\sigma : J \rightarrow I \mid \pi \circ \sigma = \text{Id}_J\}$. Тогда проекции на слагаемые и вложения слагаемых прямых сумм индуцируют пару взаимно обратных гомоморфизмов: $\bigotimes_{j \in J} \bigoplus_{i \in \pi^{-1}(j)} V_i \xrightarrow{\sim} \bigoplus_{\sigma \in \text{Sec}(\pi)} \bigotimes_{j \in J} V_{\sigma(j)}$.

Утверждение 4 (ТОЧНОСТЬ СПРАВА \otimes). Пусть I — конечное множество, $(V_i)_{i \in I}$ и $(U_i)_{i \in I}$ — семейства абелевых групп, причём U_i является подгруппой V_i для любого $i \in I$. Тогда следующая последовательность с очевидным образом определёнными гомоморфизмами точна:

$$\bigoplus_{e \in I} ((U_e)_{\otimes e} \otimes (\bigotimes_{i \in I \setminus \{e\}} V_i)) \rightarrow \bigotimes_{i \in I} V_i \rightarrow \bigotimes_{i \in I} (V_i/U_i) \rightarrow 0.$$

Доказательство. Пусть $\mathcal{U} \subset \bigotimes_{i \in I} V_i$ — это образ первого гомоморфизма. Тогда обратный к гомоморфизму $(\bigotimes_{i \in I} V_i)/\mathcal{U} \rightarrow \bigotimes_{i \in I} (V_i/U_i)$ определяется на образующих так: $\bigotimes_{i \in I} (v_i + U_i) \mapsto (\bigotimes_{i \in I} v_i) + \mathcal{U}$. Определение корректно — образ $\bigotimes_{i \in I} (v_i + U_i)$ зависит только от классов $v_i + U_i \in V_i/U_i$, где $i \in I$. \square

Пример 1. Пусть R — кольцо, а $\mathfrak{J} \subset R$ — аддитивная подгруппа, такая что $R\mathfrak{J} + \mathfrak{J}R \subset \mathfrak{J}$, то есть двусторонний идеал. Тогда отображение умножения $R \otimes R \rightarrow R$ индуцирует отображение $(R/\mathfrak{J}) \otimes (R/\mathfrak{J}) \cong (R \otimes R)/(R \otimes \mathfrak{J} + \mathfrak{J} \otimes R) \rightarrow R/\mathfrak{J}$.

Утверждение 5 (АССОЦИАТИВНОСТЬ \otimes). Пусть $\pi : I \rightarrow J$ — отображение конечных множеств, $(V_i)_{i \in I}$ — семейство абелевых групп. Тогда имеем следующий изоморфизм:

$$\bigotimes_{i \in I} V_i \leftrightarrow \bigotimes_{j \in J} \bigotimes_{i \in \pi^{-1}(j)} V_i, \quad \bigotimes_{i \in I} v_i \leftrightarrow \bigotimes_{j \in J} \bigotimes_{i \in \pi^{-1}(j)} v_i. \quad (2)$$

Набросок доказательства. Согласно определению 1 представим каждый из $\bigotimes_{i \in \pi^{-1}(j)} V_i$ как фактор свободной абелевой группы, порождённой формальными тензорными мономами, после чего воспользуемся точностью справа $\bigotimes_{j \in J} (-)$ в смысле утверждения 4, ну и дистрибутивностью \bigotimes относительно \bigoplus , то есть утверждением 3. \square

Определение 3 (ТЕНЗОРНОЕ ПРОИЗВЕДЕНИЕ КОЛЕЦ). Пусть $(R_i)_{i \in I}$ — конечное семейство колец. Определим на абелевой группе $\bigotimes_{i \in I} R_i$ умножение следующим образом:

$$\begin{aligned} (\bigotimes_{i \in I} R_i) \otimes (\bigotimes_{i \in I} R_i) &\xrightarrow{\sim} \bigotimes_{i \in I} (R_i \otimes R_i) \rightarrow \bigotimes_{i \in I} R_i, \\ (\bigotimes_{i \in I} r'_i) \otimes (\bigotimes_{i \in I} r''_i) &\mapsto \bigotimes_{i \in I} (r'_i \otimes r''_i) \mapsto \bigotimes_{i \in I} (r'_i r''_i). \end{aligned}$$

Первое отображение — это изоморфизм ассоциативности, а второе — это тензорное произведение отображений умножения в индивидуальных кольцах.

Утверждение 6 (УНИВЕРСАЛЬНОЕ СВОЙСТВО ТЕНЗОРНОГО ПРОИЗВЕДЕНИЯ КОЛЕЦ). Пусть $(R_i)_{i \in I}$ — конечное семейство ассоциативных унитарных колец. Тогда кольцо $\bigotimes_{i \in I} R_i$ снабжено семейством гомоморфизмов $\iota_e : R_e \rightarrow \bigotimes_{i \in I} R_i$, $r \mapsto r \otimes e \otimes \bigotimes_{i \in I \setminus \{e\}} 1_{\otimes i}$, где $e \in I$, причём образы ι_e и $\iota_{e'}$ при $e \neq e'$ поэлементно коммутируют. Пусть S — ассоциативное унитарное кольцо, а $(\epsilon_e : R_e \rightarrow S)_{e \in I}$ — семейство гомоморфизмов, такое что образы ϵ_e и $\epsilon_{e'}$ при $e \neq e'$ поэлементно коммутируют. Тогда существует единственный гомоморфизм $\varphi : \bigotimes_{i \in I} R_i \rightarrow S$, такой что $\varphi \circ \iota_e = \epsilon_e$ для любого $e \in I$.

Тензорное произведение с коэффициентами

Бинарное тензорное произведение с коэффициентами

Определение 4 ((КО)ИНВАРИАНТЫ ХОХШИЛЬДА). Пусть M — бимодуль над ассоциативным унитарным кольцом R . Определим его *инварианты* и *коинварианты Хохшильда* следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathrm{HH}^0(R, M) &:= M^{\mathfrak{h}(R)} = \{m \in M \mid rm = mr \text{ для всех } r \in R\}, \\ \mathrm{HH}_0(R, M) &:= M_{\mathfrak{h}(R)} = M / (rm = mr \mid r \in R, m \in M), \end{aligned}$$

где факторизация в определении $\mathrm{HH}_0(R, M)$ — это факторизация абелевой группы по соотношениям, а $\mathfrak{h}(R)$ — это кольцо Ли ассоциативного кольца R , действующее на абелевой группе M через композицию гомоморфизма $r \mapsto r \otimes 1 - 1 \otimes r : \mathfrak{h}(R) \rightarrow R \otimes R^o$ со структурным гомоморфизмом $R \otimes R^o \rightarrow \mathrm{End}(M)$.

Пример 2. Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, $V = {}_R V$ и $U = {}_R U$ — левые R -модули. Тогда $\text{Hom}_R({}_R V, {}_R U) \cong (\text{Hom}(V, U))^{\mathfrak{h}(R)}$.

Определение 5 (БИНАРНОЕ ТЕНЗОРНОЕ ПРОИЗВЕДЕНИЕ С КОЭФФИЦИЕНТАМИ). Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, $V = V_R$ — правый R -модуль, $U = {}_R U$ — левый R -модуль. Определим *тензорное произведение* V и U над R следующим образом: $V_R \otimes_{R,R} U := (V \otimes U)_{\mathfrak{h}(R)}$.

Наблюдение 3. Пусть S, R и T — ассоциативные унитарные кольца, $M = {}_S M_R$ — S - R -бимодуль, $V = {}_R V$ — левый R -модуль, $U = {}_S U$ — левый S -модуль. Тогда изоморфизм (1) индуцирует изоморфизм

$$\begin{aligned} \text{Hom}_S({}_S M_R \otimes_{R,R} V, {}_S U) &\cong (\text{Hom}((M \otimes V)_{\mathfrak{h}(R)}, U))^{\mathfrak{h}(S)} \cong \\ &\cong ((\text{Hom}(M \otimes V, U))^{\mathfrak{h}(R)})^{\mathfrak{h}(S)} \cong ((\text{Hom}(V, \text{Hom}(M, U)))^{\mathfrak{h}(S)})^{\mathfrak{h}(R)} \cong \\ &\cong (\text{Hom}(V, (\text{Hom}(M, U))^{\mathfrak{h}(S)}))^{\mathfrak{h}(R)} \cong \text{Hom}_R({}_R V, \text{Hom}_S({}_S M_R, {}_S U)). \end{aligned}$$

Наблюдение 4 (ФУНКТОРЫ ЗАМЕНЫ КОЛЬЦА). Пусть $S \rightarrow R$ — гомоморфизм ассоциативных унитарных колец. Такой гомоморфизм индуцирует функтор *ограничения скаляров*: $\text{res}_S^R : R\text{-Mod} \rightarrow S\text{-Mod}$, наделяющий R -модуль ${}_R V$ структурой S -модуля с помощью сквозного гомоморфизма $S \rightarrow R \rightarrow \text{End}(V)$, а также индуцирует на $R = {}_R R_S = {}_S R_R$ структуры R - S -бимодуля и S - R -бимодуля. Естественные изоморфизмы унитарности $\text{Hom}_R({}_R R_S, {}_R V) \leftrightarrow \text{res}_S^R({}_R V) \leftrightarrow {}_S R_R \otimes_{R,R} V$ переводят изоморфизмы сопряжённости между \otimes и Hom в изоморфизмы следующих сопряжённостей: ${}_R R_S \otimes_S (-) \dashv \text{res}_S^R(-) \dashv \text{Hom}_S({}_S R_R, -)$. Функтор ${}_R R_S \otimes_S (-)$ называется *расширением скаляров*, $\text{Hom}_S({}_S R_R, -)$ — *корасширением скаляров*, а все три вместе — *функторами замены кольца*.

Тензорное произведение с коэффициентами для семейств

Определение 6 (СИСТЕМА КОЭФФИЦИЕНТОВ). Пусть I — конечное множество. Тогда будем называть *системой коэффициентов* семейство ассоциативных унитарных колец $(R_{i,i'})_{(i,i') \in I \times 2 \setminus \Delta}$, такое что $R_{i,i'} = R_{i',i}^o$ для всех $(i, i') \in I \times 2 \setminus \Delta$.

Определение 7 (ДЕЙСТВИЕ СИСТЕМЫ КОЭФФИЦИЕНТОВ). Будем говорить, что на конечном семействе абелевых групп $(V_i)_{i \in I}$ действует система коэффициентов $(R_{i,i'})_{(i,i') \in I \times 2 \setminus \Delta}$, если для каждого $i' \in I$ абелева группа $V_{i'}$ снабжена структурой модуля над $\bigotimes_{i \in I \setminus \{i'\}} R_{i,i'}$.

Определение 8 (ТЕНЗОРНОЕ ПРОИЗВЕДЕНИЕ С КОЭФФИЦИЕНТАМИ). Пусть система коэффициентов $(R_{i,i'})_{(i,i') \in I \times 2 \setminus \Delta}$ действует на конечном семействе абелевых групп $(V_i)_{i \in I}$. Тогда *тензорное произведение* семейства $(V_i)_{i \in I}$ над $(R_{i,i'})_{(i,i') \in I \times 2 \setminus \Delta}$, обозначаемое $\bigotimes_{i \in I}^{R_{i,i'}} V_i$, — это фактор абелевой группы $\bigotimes_{i \in I} V_i$ по соотношениям типа

$$(v_i r_{i,i'})_{\otimes i} \otimes (\bigotimes_{k \in I \setminus \{i\}} v_k) = (r_{i,i'} v_{i'})_{\otimes i'} \otimes (\bigotimes_{k \in I \setminus \{i'\}} v_k),$$

где $(i, i') \in I \times 2 \setminus \Delta$, $r_{i,i'} \in R_{i,i'}$, $(v_k)_{k \in I} \in \prod_{k \in I} V_k$.

Утверждение 7 (АССОЦИАТИВНОСТЬ). Пусть $\pi : I \rightarrow J$ — отображение конечных множеств. Пусть на семействе абелевых групп $(V_i)_{i \in I}$ действует система коэффициентов $(R_{i,i'})_{(i,i') \in I \times 2 \setminus \Delta}$. Тогда изоморфизм ассоциативности (2) индуцирует изоморфизм фактор-групп

$$\bigotimes_{i \in I}^{R_{i,i'}} V_i \leftrightarrow \bigotimes_{j \in J}^{\mathcal{R}_{j,j'}} \bigotimes_{i \in \pi^{-1}(j)}^{R_{i,i'}} V_i, \text{ где } \mathcal{R}_{j,j'} := \bigotimes_{(i,i') \in \pi^{-1}(j) \times \pi^{-1}(j')} R_{i,i'}.$$

Набросок доказательства. Утверждение 7 можно получить из утверждения 5 с помощью утверждения 4. \square

Замечание 2. Определения 6, 7, 8 и утверждение 7 добавлены с иллюстративными целями, чтобы показать, что определение тензорного произведения не зависит от порядка на множестве индексов.

2.3. Коммутативная локализация

Определение и задание локализации

Соглашение 1. В этом разделе категория моноидов под заданным моноидом называется категорией моноидов над заданным моноидом.

Определение 1 (ЛОКАЛИЗАЦИЯ МОНОИДА ИЛИ КОЛЬЦА). Пусть дано отображение множества S в мультипликативный моноид или ассоциативное унитарное кольцо R . Определим *локализацию* R по S , обозначаемую $S^{-1}R$, как начальный объект в категории моноидов над R или ассоциативных унитарных колец над R соответственно, в которых образы элементов S мультипликативно обратимы.

Наблюдение 1 (ЗАДАНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ). Пусть дано отображение множества S в мультипликативный моноид или ассоциативное унитарное кольцо R . Тогда соответствующая локализация $S^{-1}R$ может быть задана добавлением к R семейства переменных $(X_s)_{s \in S}$ и факторизацией по семейству соотношений $(X_s s = s X_s = 1)_{s \in S}$.

Определение 2 (МУЛЬТИПЛИКАТИВНОЕ МНОЖЕСТВО). Подмоноид в мультипликативном моноиде иногда называется *мультипликативным множеством*.

Наблюдение 2. Очевидно, что локализация мультипликативного моноида или ассоциативного унитарного кольца R по множеству S совпадает с локализацией R по свободному моноиду, порождённому S , и совпадает с локализацией R по образу S в R .

Определение 3 (R -ОБЪЕКТ). Пусть \mathcal{C} — категория или кольцоид, а R — моноид или ассоциативное унитарное кольцо соответственно. Тогда объект $X \in \text{Ob}(\mathcal{C})$, снабжённый действием R , то есть гомоморфизмом $R \rightarrow \text{End}_{\mathcal{C}}(X)$, называется *R -объектом*. Категория R -объектов в \mathcal{C} обозначается \mathcal{C}^R , где R — это R как однообъектная категория/кольцоид.

Определение 4 (ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОБЪЕКТА С ДЕЙСТВИЕМ). Пусть \mathcal{C} — категория или кольцоид, R — моноид или ассоциативное унитарное кольцо соответственно, X — R -объект в \mathcal{C} , а S — множество, снабжённое отображением $S \rightarrow R$. Определим *локализацию* X по S как расширение скаляров вдоль канонического гомоморфизма $R \rightarrow S^{-1}R$ для X .

Обозначение 1. Локализация объекта X по S обычно обозначается через $S^{-1}X$, X_S или $X[S^{-1}]$. Если $S = A \setminus \mathfrak{p}$ — теоретико-множественное дополнение простого идеала \mathfrak{p} в ассоциативном коммутативном унитарном кольце A , а M — A -модуль, то вместо M_S часто пишут $M_{\mathfrak{p}}$.

Наблюдение 3 (СОГЛАСОВАННОСТЬ). Пусть R — моноид или ассоциативное унитарное кольцо, а $S \subset R$ — мультипликативное множество. Тогда локализация R по S как R -множества или R -модуля соответственно канонически отождествляется с локализацией R по S как моноида или ассоциативного унитарного кольца соответственно.

Коммутативная локализация как фильтрованный копредел

Наблюдение 4 (ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПО ЦЕНТРАЛЬНОМУ ПОДМНОЖЕСТВУ).

Пусть \mathcal{C} и \mathcal{R} — две категории или два кольцоида, такие что \mathcal{R} однообъектна, X — R -объект в \mathcal{C} , где $R := \text{Ar}(\mathcal{R})$, а $S \subset Z(R)$ — центральное мультипликативное множество. Тогда локализация X по S как S -объекта в \mathcal{C}^R является локализацией X по S как R -объекта в \mathcal{C} .

Определение 5 (КАТЕГОРИЯ КЭЛИ МОНОИДА). Пусть S — моноид, а \mathcal{S} — это S как однообъектная категория. Тогда определён функтор $S \rightarrow \text{Sets}$, переводящий $s \in \text{Ar}(\mathcal{S}) = S$ в $x \mapsto sx : S \rightarrow S$. Категория элементов этого функтора называется *категорией Кэли* моноида S и обозначается $\text{Cay}(S)$. Она снабжена каноническим функтором $\text{Cay}(S) \rightarrow S$.

Наблюдение 5. Для любого коммутативного моноида его категория Кэли является фильтрованной категорией.

Наблюдение 6 (ЛОКАЛИЗАЦИЯ КАК КОПРЕДЕЛ). Пусть S — коммутативный моноид, \mathcal{S} — это S как однообъектная категория, \mathcal{C} — категория, $P : \text{Cay}(S) \rightarrow \mathcal{S}$ — канонический функтор, а $F : \mathcal{S} \rightarrow \mathcal{C}$ — функтор действия на S -объект X . Тогда если $(\gamma_s : X \rightarrow \text{colim}(F \circ P))_{s \in S \cong \text{Ob}(\text{Cay}(S))}$ — копредельный коконус $F \circ P$, то S действует на $\text{colim}(F \circ P)$ через действие на F , и морфизм γ_1 — это локализация X по S .

Замечание 1. В обозначениях наблюдения 6 для любого $r \in S$ морфизм $r^{-1} : \text{colim}(F \circ P) \rightarrow \text{colim}(F \circ P)$ индуцирован коконусом $(\gamma_{rs})_{s \in S}$.

Вопрос 1. Существуют ли категория \mathcal{C} , коммутативный моноид S и S -объект X в \mathcal{C} , такие что локализация X по S существует, но фильтрованный копредел $\text{colim}(F \circ P)$ из наблюдения 6 не существует?

Обозначение 2 (ДРОБИ). В обозначениях наблюдения 6, если $\mathcal{C} = \text{Sets}$, то элементами $\text{colim}(F \circ P)$ являются классы пар $(x, s) \in X \times S$, рассматриваемых по модулю отношения эквивалентности, порождённого соотношениями $(x, s) \sim (rx, rs)$, где $r, s \in S$ и $x \in X$, которые мы будем обозначать через x/s или $\frac{x}{s}$ и называть *дробями*. При этом $a \frac{x}{s} = \frac{ax}{s}$ для всех $a \in R$, $s \in S$ и $x \in X$, а $\gamma_1 : X \rightarrow \text{colim}(F \circ P)$, $x \mapsto \frac{x}{1}$.

Наблюдение 7. Пусть R — моноид, $S \subset Z(R)$ — центральный подмоноид, X — R -множество, а x и y — элементы X . Тогда равенство образов x и y в $S^{-1}X$ эквивалентно существованию $s \in S$, такого что $sx = sy$.

Определение 6 (САТУРАЦИЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО ПОДМОНОИДА). Пусть R — моноид, а $S \subset Z(R)$ — центральный подмоноид. Определим *насыщение* или *сатурацию* S в R как $S^{\text{sat}} := \{a \in R \mid Ra \cap S \cap aR \neq \emptyset\}$. Множество S^{sat} мультипликативно. Если $S = S^{\text{sat}}$, то S называется *насыщенным* или *сатурированным* мультипликативным множеством.

Наблюдение 8. Пусть R — моноид, а $S \subset Z(R)$ — центральный подмоноид. Тогда $S^{\text{sat}} = \{a \in R \mid a/1 \in (S^{-1}R)^{\times}\}$.

Аддитивная локализация полукольца

Обозначение 3 (ФОРМАЛЬНЫЕ РАЗНОСТИ). Если R — аддитивно записываемый коммутативный моноид, а $S \subset R$ — его подмоноид, то элементы локализации R по S , обозначаемой $R - S$, называются *формальными разностями* и записываются в виде $a - s$, где $a \in R$, $s \in S$.

Определение 7 (АДДИТИВНАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПОЛУКОЛЬЦА). Пусть дано отображение множества S в полукольцо с нулём R . Определим *аддитивную локализацию* R по S , обозначаемую $R - S$, как начальный объект в категории полуколец с нулём под R , в которых образы элементов S аддитивно обратимы.

Определение 8 (ДВУСТОРОННИЙ ПОЛУИДЕАЛ). Пусть R — полукольцо с нулём. Тогда подмножество $S \subset R$ называется *двусторонним полуидеалом*, если S является аддитивным подмоноидом R и $RS + SR \subset R$.

Наблюдение 9. Ясно, что аддитивная локализация полукольца с нулём R по подмножеству $S \subset R$ совпадает с аддитивной локализацией R по двустороннему полуидеалу в R , порождённому S .

Теорема 1. Пусть R — полукольцо с нулём, $S \subset R$ — двусторонний полуидеал, а $R - S$ — соответствующая локализация аддитивных моноидов. Тогда на $R - S$ существует единственное дистрибутивное умножение, относительно которого канонический аддитивный сохраняющий ноль гомоморфизм $R \rightarrow R - S$ мультипликативен.

Набросок доказательства. Произведение двух формальных разностей определяется формулой $(a_1 - s_1)(a_2 - s_2) = (a_1a_2 + s_1s_2) - (a_1s_2 + s_1a_2)$. Сразу видно, что это определение корректно. \square

Наблюдение 10. В обозначениях теоремы 1 полукольцо с нулём $R - S$ является аддитивной локализацией полукольца с нулём R по S .

2.4. Избегание простых (prime avoidance)

Соглашение 1. В этом разделе кольца не подразумеваются унитарными, а простым идеалом называется собственный двусторонний идеал, дополнение которого замкнуто относительно умножения.

Теорема 1. Пусть G — группа, а $H, K \subsetneq G$ — её собственные подгруппы. Тогда $H \cup K \subsetneq G$.

Доказательство. Мы можем предположить, что $H \not\subset K$ и $K \not\subset H$, то есть существуют $h \in H \setminus K$ и $k \in K \setminus H$. Тогда $hk \notin H \cup K$. \square

Следствие 1. Пусть G — группа, а $G', H, K \subset G$ — её подгруппы. Если $G' \subset H \cup K$, то $G' \subset H$ или $G' \subset K$.

Доказательство. Применим теорему 1 к покрытию G' группами $H' := G' \cap H$ и $K' := G' \cap K$. \square

Теорема 2. Пусть $(\mathfrak{J}_i)_{i \in I}$ — конечное семейство двусторонних идеалов ассоциативного кольца R , такое что $R = \bigcup_{i \in I} \mathfrak{J}_i \neq \bigcup_{j \in J} \mathfrak{J}_j$ для любого $J \subsetneq I$. Тогда для любого $i \in I$ идеал \mathfrak{J}_i не простой.

Доказательство. Для каждого $i \in I$ выберем $a_i \in \mathfrak{J}_i \setminus \bigcup_{j \in I \setminus \{i\}} \mathfrak{J}_j$. Пусть идеал \mathfrak{J}_e , где $e \in I$, простой. Выберем биекцию $\rho : \{1, 2, \dots, n\} \xrightarrow{\sim} I \setminus \{e\}$, где $n \in \mathbb{N}_1$. Тогда $a_e + \prod_{k=1}^n a_{\rho(k)} \notin \bigcup_{i \in I} \mathfrak{J}_i = R$ — противоречие. \square

Замечание 1. Теорема 2 утверждает, что если ассоциативное кольцо представлено в виде объединения конечного семейства двусторонних идеалов, то из этого семейства можно выкинуть все простые идеалы.

Следствие 2 (ИЗБЕГАНИЕ ПРОСТЫХ). Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, $S \subset R$ — его подкольцо, а $(\mathfrak{I}_i)_{i \in I}$ — конечное семейство двусторонних идеалов в R , такое что $S \subset \bigcup_{i \in I} \mathfrak{I}_i$. Пусть $I' := \{i \in I \mid \text{идеал } \mathfrak{I}_i \text{ простой и } S \not\subset \mathfrak{I}_i\}$. Тогда $S \subset \bigcup_{i \in I \setminus I'} \mathfrak{I}_i$.

Доказательство. Примерим теорему 2 к семейству $(S \cap \mathfrak{I}_i)_{i \in I}$ двусторонних идеалов кольца S . □

Глава 3

Относительно новые тексты

3.1. Теорема Островского

Теорема 1 (ТЕОРЕМА ОСТРОВСКОГО). *Любая нетривиальная мультипликативная норма $\|-\|$ на \mathbb{Q} эквивалентна либо обычному абсолютному значению, либо какой-то из p -адических норм.*

Доказательство (из трёх пунктов).

Общее неравенство. Пусть $m, n \in \mathbb{Z}$, причём $m, n \geq 2$. Тогда мы можем записать n -ичное разложение m :

$$m = a_0 + a_1 n + \cdots + a_{\lfloor \frac{\ln(m)}{\ln(n)} \rfloor} n^{\lfloor \frac{\ln(m)}{\ln(n)} \rfloor}.$$

Заметив, что для любого $a \in \mathbb{N}_0$ выполняется неравенство $\|a\| \leq a$, получаем:

$$\begin{aligned} \|m\| &\leq \|a_0\| + \|a_1\| \|n\| + \cdots + \|a_{\lfloor \frac{\ln(m)}{\ln(n)} \rfloor}\| \|n\|^{\lfloor \frac{\ln(m)}{\ln(n)} \rfloor} \leq \\ &\leq n \cdot (1 + \|n\| + \cdots + \|n\|^{\lfloor \frac{\ln(m)}{\ln(n)} \rfloor}). \end{aligned}$$

Подставив вместо m элемент m^t , где $t \in \mathbb{N}_1$, возведя в степень $1/t$ и

устремив t к $+\infty$, получаем:

$$\begin{aligned} \|m\| &\leq \lim_{t \rightarrow +\infty} (1 + \|n\| + \dots + \|n\|^{[t \cdot \frac{\ln(m)}{\ln(n)}]})^{\frac{1}{t}} =_{\text{при } \|n\| \neq 1} \\ &= \lim_{t \rightarrow +\infty} \left(\frac{\|n\|^{[t \cdot \frac{\ln(m)}{\ln(n)}] + 1} - 1}{\|n\| - 1} \right)^{\frac{1}{t}} = \lim_{t \rightarrow +\infty} \left(\frac{\|n\|^{t \cdot \frac{\ln(m)}{\ln(n)} + 1 \pm 1} - 1}{\|n\| - 1} \right)^{\frac{1}{t}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Неархимедов случай. Пусть существует число $n \in \mathbb{Z}$, такое что $n \geq 2$ и $\|n\| \leq 1$. Тогда, согласно неравенству (1), для любого $m \in \mathbb{Z}$ выполняется неравенство $\|m\| \leq 1$. Пусть $p, l \in \mathbb{N}_1$ — два различных простых числа, таких что $\|p\|, \|l\| \neq 1$. Выберем числа $N, M \in \mathbb{N}_1$, такие что $\|p\|^N, \|l\|^M < 1/2$. Тогда норма любого элемента множества $\mathbb{Z}p^N + \mathbb{Z}l^M = \mathbb{Z}$ строго меньше 1, но $\|1\| = 1$ — противоречие.

Архимедов случай. Пусть для всех $n \in \mathbb{Z}$, таких что $n \geq 2$, выполняется неравенство $\|n\| > 1$. Тогда из неравенства (1) получаем, что $\|m\| \leq \|n\|^{\frac{\ln(m)}{\ln(n)}}$ для всех $m, n \in \mathbb{Z}$, таких что $m, n \geq 2$. По симметрии существует число $c \in \mathbb{R}_{>1}$, такое что $c = \|m\|^{1/\ln(m)} = \|n\|^{1/\ln(n)}$ для всех $m, n \in \mathbb{Z}$, таких что $m, n \geq 2$. Отсюда получаем, что $\|n\| = c^{\ln(n)} = e^{\ln(c) \ln(n)} = n^{\ln(c)}$ для всех $n \in \mathbb{Z}$, таких что $n \geq 2$. \square

3.2. Разложения Брюа и Гаусса

Стандартные подгруппы в общей линейной группе

Определение 1 (ГРУППА ДИАГОНАЛЬНЫХ МАТРИЦ). Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, а I — конечное множество. Тогда *группой диагональных матриц* порядка I с коэффициентами в R называется группа $T_I(R) := D_I(R)^\times = D_I(R) \cap M_I(R)^\times \subset GL_I(R)$.

Определение 2 (ГРУППА МАТРИЦ ПЕРЕСТАНОВОК). Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, а I — конечное множество. Тогда *группой матриц перестановок* порядка I с коэффициентами в R называется группа $W_I(R) := \text{Im}(\sigma \mapsto \sum_{i \in I} e_{\sigma(i), i} : \text{Sym}(I) \rightarrow M_I(R)) \subset GL_I(R)$.

Определение 3 (ГРУППА МОНОМИАЛЬНЫХ МАТРИЦ). Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, а I — конечное множество. Тогда *группой*

мономиальных матриц порядка I с коэффициентами в R называется группа $N_I(R) := W_I(R) \ltimes T_I(R) \subset GL_I(R)$.

Определение 4 (КОЛЬЦО ВЕРХНИХ/НИЖНИХ ТРЕУГОЛЬНЫХ МАТРИЦ). Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, а I — конечное линейно упорядоченное множество. Тогда *кольцом верхних треугольных матриц* подрядка I над R называется кольцо $\widehat{B}_I(R) := \{(x_{i,j})_{i,j \in I} \in M_I(R) \mid x_{i,j} = 0 \text{ при } i > j\} \subset M_I(R)$, а *кольцом нижних треугольных матриц* подрядка I над R — кольцо $\widehat{B}_I^-(R) := \widehat{B}_{I^o}(R) \subset M_I(R)$.

Определение 5 (ГРУППА ВЕРХНИХ/НИЖНИХ ТРЕУГОЛЬНЫХ МАТРИЦ). Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, а I — конечное линейно упорядоченное множество. Тогда *группой верхних треугольных матриц* порядка I над R называется группа $B_I(R) := \widehat{B}_I(R)^\times$, то есть группа обратимых элементов кольца $\widehat{B}_I(R)$, а *группой нижних треугольных матриц* порядка I над R — группа $B_I^-(R) := \widehat{B}_I^-(R)^\times$.

Наблюдение 1. Пусть A — ассоциативное коммутативное унитарное кольцо, I — конечное линейно упорядоченное множество, а $x = (x_{i,j})_{i,j \in I} \in \widehat{B}_I(A) \cap M_I(A)^\times$ — обратимая верхнетреугольная матрица. Тогда $\det(x) = \prod_{i \in I} x_{i,i} \in A^\times$, а потому $x_{i,i} \in A^\times$ для любого $i \in I$, откуда выводится, что $x^{-1} \in \widehat{B}_I(A)$. Иначе говоря, $\widehat{B}_I(A) \cap M_I(A)^\times = B_I(A)$.

Пример 1. Пусть I — бесконечное множество. Очевидно, что существует перестановка множества $I \sqcup I$, такая что соответствующая матрица $x \in GL_2(\text{End}_{\mathbb{Z}\text{-mod}}(\mathbb{Z}^{\oplus I}))$ верхнетреугольна и не диагональна. Тогда матрица x^{-1} нижнетреугольна и не диагональна.

Замечание 1. Я узнал о примере 1 из статьи [6].

Определение 6 (ГРУППА ВЕРХНИХ/НИЖНИХ УНИТРЕУГОЛЬНЫХ МАТРИЦ). Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, а I — конечное линейно упорядоченное множество. Тогда *группой верхних унитарных матриц* порядка I над R называется группа $U_I(R) := \{((x_{i,j})_{i,j \in I} \in B_I(R) \mid x_{i,i} = 1 \text{ для всех } i \in I)\}$, а *группой нижних унитарных матриц* порядка I над R — группа $U_I^-(R) := U_{I^o}(R) \subset B_I^-(R)$.

Наблюдение 2 (РАЗЛОЖЕНИЕ ЛЕВИ). Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, а I — конечное линейно упорядоченное множество. Тогда $B_I(R) = T_I(R) \ltimes U_I(R)$.

Разложение Брюа

Теорема 1 (РАЗЛОЖЕНИЕ БРЮА). Пусть K — поле, $n \in \mathbb{N}_1$ — натуральное число, $G := \mathrm{GL}_n(K)$, $U := \mathrm{U}_n(K)$, $N := \mathrm{N}_n(K)$. Тогда выполняется равенство $G = UNU$.

Набросок доказательства. Пусть $x = (x_{i,j})_{i,j=1}^n \in \mathrm{GL}_n(K)$ — невырожденная матрица. Пусть h — это наибольший индекс, такой что $x_{h,1} \neq 0$. Тогда, очевидно, существуют матрицы $u_1, u_2 \in U$, такие что у матрицы $x' = u_1 x u_2$ только один ненулевой элемент в h -ой строке и первом столбце. Осталось по индукции применить разложение Брюа к матрице, полученной из x' вычёркиванием h -ой строки и первого столбца. \square

Разложение Гаусса

Теорема 2 (РАЗЛОЖЕНИЕ ГАУССА). Пусть K — поле, $n \in \mathbb{N}_1$ — натуральное число, $G := \mathrm{GL}_n(K)$, $U := \mathrm{U}_n(K)$, $U^- := \mathrm{U}_n^-(K)$, $N := \mathrm{N}_n(K)$. Тогда выполняется равенство $G = NU^-U$.

Набросок доказательства. Пусть $x \in \mathrm{GL}_n(K)$ — невырожденная матрица. Пусть y — матрица, полученная вычёркиванием из x последнего столбца. Тогда какая-то из строчек матрицы y , скажем, i -ая, содержится в линейной оболочке остальных строчек. Вычеркнув i -ую строчку из y мы получим невырожденную квадратную матрицу x' , к которой можно применить то же рассуждение, что и к x . Если задуматься, то мы доказали, что существуют матрицы $w \in W := \mathrm{W}_n(K)$ и $u^- \in U^-$, такие что $u^- w x \in B := \mathrm{B}_n(K)$. Иначе говоря, $G = WU^-B$. Осталось, воспользовавшись наблюдением 2, перенести диагональную компоненту B налево: $WU^-B = WU^-TU = WTU^-U = NU^-U$, где $T := \mathrm{T}_n(K)$. \square

3.3. Задача Кеплера

Соглашение 1 (ТРАЕКТОРИИ И ОРБИТЫ). В этом разделе когда идёт речь о движении точки, то имеется в виду точка единичной массы, если противное не указано явно. Траектории параметризованные, но рассматриваются с точностью до перепараметризации диффеоморфизмом \mathbb{R} . Орбита — это множество значений траектории.

Теорема 1. Для любого $\lambda \in \mathbb{C}$ отображение $z \mapsto z^2 : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ переводит эллипсы и ветви гипербол с фокусами $\pm\lambda$ в эллипсы и ветви гипербол соответственно с фокусами 0 и λ^2 .

Доказательство (из трёх частей).

Часть 1. Заметим, что отображение $z \mapsto z + z^{-1} : \mathbb{C} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{C}$, называемое *отображением Жуковского*, переводит окружности с центром в 0 в эллипсы с фокусами ± 2 , а лучи, выходящие из 0, в ветви гипербол с фокусами ± 2 , в чём легко убедиться, воспользовавшись тригонометрической формой записи комплексных чисел: если $z = r \cos(\omega) + r \sin(\omega)i$, где $\omega \in \mathbb{R}$, $r \in \mathbb{R}_{>0}$, то $z + z^{-1} = (r + r^{-1}) \cos(\omega) + (r - r^{-1}) \sin(\omega)i$.

Часть 2. Отображение $z \mapsto z^2 : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ переводит эллипсы и ветви гипербол с фокусами ± 2 в эллипсы и ветви гипербол соответственно с фокусами 0 и 4, в чём легко убедиться с помощью первой части доказательства и формулы квадрата суммы: $(z + z^{-1})^2 = (z^2 + z^{-2}) + 2$.

Часть 3. Чтобы завершить доказательство осталось воспользоваться тем, что если $C \subset \mathbb{C}$ и $\alpha \in \mathbb{C}$, то $(\alpha \cdot C)^2 = \alpha^2 \cdot C^2$. \square

Замечание 1. В контексте теоремы 1 стоит отметить, что для любого непустого $C \subset \mathbb{C}$ выполняется соотношение $\inf_{w \in C^2} |w| = (\inf_{z \in C} |z|)^2$.

Наблюдение 1. Пусть $C \subset \mathbb{C}$ — орбита точки единичной массы в центральном поле с потенциалом $U(r) = \pm r^2/2$, энергией E и кинетическим моментом M . Тогда полуоси коники $C^2 \subset \mathbb{C}$ равны $|E|$ и $|M|$.

Наблюдение 2 (СКОРОСТЬ В ЦЕНТРАЛЬНОМ ПОЛЕ). При движении точки в центральном поле с потенциалом $U(r)$ её скорость, согласно закону сохранения энергии, равна $\sqrt{2(E - U(r))}$, где E — константа, а тангенциальная компонента скорости, согласно закону сохранения кинетического момента, равна M/r , где M — константа.

Наблюдение 3. Для любого $\alpha \in \mathbb{R}^\times$ траектория точки в центральном поле с потенциалом $U(r)$, энергией E и кинетическим моментом M является также траекторией точки в центральном поле с потенциалом $\alpha^2 U(r)$, энергией $\alpha^2 E$ и кинетическим моментом αM .

Теорема 2. Для любого $s \in \mathbb{R}^\times$ многозначная функция $w(z) = z^s$ на $\mathbb{C} \setminus \{0\}$ в понятном смысле переводит траектории точек в центральном поле с потенциалом $U(r) = kr^{2s-2}$, энергией E и кинетическим моментом M в траектории точек в центральном поле с потенциалом $U(r) = -Er^{2/s-2}$, энергией $-k$ и кинетическим моментом M .

Доказательство. Заметим, что многозначная функция $w(z)$ на $\mathbb{C} \setminus \{0\}$ переводит в себя множество лучей, исходящих из нуля, и конформна, то есть сохраняет углы, а синус угла наклона вектора скорости к радиус-вектору при движении в центральном поле, согласно наблюдению 2, задаётся формулой $(M/r)/\sqrt{2(E - U(r))}$. Осталось проверить равенство $(M/r)/\sqrt{2(E - kr^{2s-2})} = (M/r^s)/\sqrt{2(-k + E(r^s)^{2/s-2})}$. \square

Замечание 2. Если $s = 2$, то $2s - 2 = 2$ и $2/s - 2 = -1$.

Наблюдение 4. Для эллиптической или гиперболической орбиты точки единичной массы в центральном поле с потенциалом $U(r) = \pm r^{-1}$ согласно теореме 2 и наблюдениям 1 и 3 выполняются следующие соотношения: $2a = |E|^{-1}$ и $p = M^2$, где E — энергия, M — кинетический момент, a — большая полуось, а p — фокальный параметр.

Теорема 3. Пусть точка единичной массы движется в центральном поле с потенциалом $U(r) = -r^{-1}$ по эллиптической орбите с большой полуосью a . Тогда период её обращения равен $2\pi a^{3/2}$.

Доказательство. Пусть b — малая полуось эллиптической орбиты, M — кинетический момент точки, а T — период обращения. Тогда, согласно второму закону Кеплера, то есть закону сохранения кинетического момента, $T = \pi ab/(|M|/2)$. С другой стороны, $|M| = a^{-1/2}b$ согласно наблюдению 4. Поэтому $T = \pi ab/(a^{-1/2}b/2) = 2\pi a^{3/2}$. \square

Замечание 3. Почти весь материал этого раздела взят из книг В. И. Арнольда [5, с. 42], [10, с. 29] и [4, с. 75].

3.4. Алгоритм RSA

Теорема 1. Пусть $n \in \mathbb{N}_1$ — бесквадратное число, $\lambda(n)$ — экспонента группы $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times$, а $s \in \mathbb{N}_0$ — число, такое что $s \equiv 1 \pmod{\lambda(n)}$. Тогда $x^s = x$ для любого $x \in \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$.

Доказательство. Практически очевидно из канонического изоморфизма $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \cong \prod_{p \in \mathcal{P}} \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$, где \mathcal{P} — множество простых делителей n . \square

Замечание 1. Если, в обозначениях теоремы 1, выбрать числа $e, d \in \mathbb{N}_0$, взаимно обратные по модулю $\lambda(n)$, то соответствующие отображения $x \mapsto x^e : \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \xrightarrow{\sim} \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} : x^d \mapsto x$ будут взаимно обратными биекциями, причём по n и e в общем случае довольно трудно вычислить класс $[d] \in \mathbb{Z}/\lambda(n)\mathbb{Z}$. Это обстоятельство лежит в основе *алгоритма RSA*: первое отображение зашифровывает сообщения, а второе их расшифровывает.

3.5. Некоторые практичные аппроксимации

Наблюдение 1 (МЕТР). Один метр — это примерно одна десятиmillionная расстояния между полюсом и экватором по поверхности сферического приближения к Земле. Десять — это количество пальцев на обеих руках человека, а семь нулей нужны для того, чтобы метр был максимально близок к росту человека.

Замечание 1. По идеальной твёрдой сферической Земле идеальный пешеход, 12 часов каждые сутки движущийся со скоростью 5 км/ч, мог бы за год перейти из любой точки в любую точку.

Наблюдение 2 (ЧЕЛОВЕК, КЛЕТКА, АТОМ И ПРОТОН). Размер человека — примерно 1 метр. Размер атома — примерно 1 ангстрем, то есть 10^{-10} метра. Размер клетки составляет примерно 1 «сотку», то есть одну сотую миллиметра, то есть 10^{-5} метра — ровно посередине между метром и ангстремом.¹ Сотка приблизительно совпадает с толщиной стандартной бытовой алюминиевой фольги. Размер протона составляет примерно 10^{-15} метра и тоже укладывается в эту схему.

Наблюдение 3 (КОЛИЧЕСТВО СЕКУНД В СУТКАХ). В сутках $60 \cdot 60 \cdot 24 = 360 \cdot 240 = 300 \cdot (1 + \frac{2}{10}) \cdot 300 \cdot (1 - \frac{2}{10}) = 300^2 \cdot (1 - \frac{4}{100}) = 10^5 \cdot (1 - \frac{1}{10}) \cdot (1 - \frac{4}{100})$, то есть примерно 100000, секунд.

¹Разумеется, у разных клеток разный размер. Например, человеческая яйцеклетка имеет диаметр примерно в одну десятую миллиметра и видна невооружённым глазом как маленькая песчинка.

Наблюдение 4 (Аппроксимация $99/70 \approx \sqrt{2}$). Так как $7^2 = 49 \approx 50$, то имеем очевидную пару приближений $7/5 < \sqrt{2} < 10/7$ к $\sqrt{2}$, такую что $(7/5)(10/7) = 2$. По формуле $(a - b)(a + b) = a^2 - b^2$ квадрат среднего арифметического двух чисел больше квадрата их среднего геометрического на квадрат полуразности, в частности, квадрат числа $(7/5 + 10/7)/2 = 99/70$ больше 2 на $((10/7 - 7/5)/2)^2 = 1/70^2 = 1/4900$.

Наблюдение 5 (ПАРАМЕТРЫ ЛИСТА А4). Стороны листа бумаги А4 имеют длину 297 мм и 210 мм, а $297/210 = 99/70$. Умноженная на 2^4 площадь листа А4 в квадратных миллиметрах равна $2^4 \cdot 300 \cdot (1 - \frac{1}{100}) \cdot 200 \cdot (1 + \frac{5}{100}) = 96 \cdot 10^4 \cdot (1 - \frac{1}{100}) \cdot (1 + \frac{5}{100}) = 10^6 \cdot (1 - \frac{4}{100}) \cdot (1 - \frac{1}{100}) \cdot (1 + \frac{5}{100})$.

Наблюдение 6 (ЗВЁЗДНАЯ ВЕЛИЧИНА). Существует очень полезная аппроксимация $2^{10} = 10^3 \cdot (1 + \frac{24}{1000})$. В частности, увеличение звёздной величины на единицу соответствует увеличению освещённости в $100^{1/5} = 10 \cdot 2^{-2} \cdot (1 + \frac{24}{1000})^{1/5}$ раз. То есть $2.5^{2.5} = 10 \cdot (1 + \frac{24}{1000})^{-1/2}$.

Часть II

Сгруппированные тексты

Глава 4

Теория множеств

В ЭТОЙ ГЛАВЕ изложены 3 стандартнейших результата теории множеств. В разделе 4.1 парадокс Рассела рассматривается как прямое следствие теоремы Кантора о несуществовании сюръекции из множества в множество его подмножеств.

4.1. Диагональный аргумент Кантора

Обозначение 1 (Множество подмножеств). Множество подмножеств множества X , иногда называемое *булеаном* X , будем обозначать символом 2^X — так же, как множество отображений из X в $2 = \{0, 1\}$.

Теорема 1 (ТЕОРЕМА КАНТОРА). Если X — множество, а $\varphi : X \rightarrow 2^X$ — отображение, то φ не сюръективно.

Доказательство. Пусть $C := \{x \in X \mid x \notin \varphi(x)\}$. Тогда если $c \in X$ и $\varphi(c) = C$, то утверждение « $c \in C$ » эквивалентно утверждению « $c \notin C$ » — противоречие. □

Замечание 1. В обозначениях формулировки и доказательства теоремы 1 характеристическая функция $X \rightarrow \{0, 1\}$ подмножества $X \setminus C \subset X$ разлагается в композицию диагонального отображения $X \rightarrow X \times X$ и отображения $X \times X \rightarrow \{0, 1\}$, соответствующего $\varphi : X \rightarrow 2^X$, поэтому рассуждение из приведённого доказательства теоремы 1 часто называют *диагональным аргументом Кантора*.

Наблюдение 1 (ПАРАДОКС РАССЕЛА). Предположим, что существует множество всех множеств, которое мы обозначим буквой X . Тогда отображение $x \mapsto x \cap X : X \rightarrow 2^X$ сюръективно, так как обратно слева вложению $x \mapsto x : 2^X \rightarrow X$, что противоречит теореме Кантора.

Наблюдение 2 (НЕСЧЁТНОСТЬ МНОЖЕСТВА ВЕЩЕСТВЕННЫХ ЧИСЕЛ). По теореме Кантора множество вещественных чисел из интервала $[0, 1]$, у которых существует троичное разложение, в котором не участвует цифра 1, биективное $2^{\mathbb{N}_1}$ и называемое *множеством Кантора*, несчётно. Как следствие, множество вещественных чисел несчётно.

4.2. Теорема Кантора – Бернштейна – Шрёдера

Теорема 1 (ТЕОРЕМА КАНТОРА – БЕРНШТЕЙНА – ШРЁДЕРА). Пусть $\iota : X \rightarrow X$ – вложение множества X в себя, а $Y \subset X$ – подмножество X , такое что $\iota(X) \subset Y$. Тогда существует биекция $\rho : X \xrightarrow{\sim} Y$.

Доказательство. Для любого $i \in \mathbb{N}_1$ множества $X \setminus Y$ и $\iota^i(X \setminus Y) \subset Y$ дизъюнкты, а потому, по инъективности ι , для любых $i, j \in \mathbb{N}_0$, таких что $i < j$, множества $\iota^i(X \setminus Y)$ и $\iota^j(X \setminus Y)$ тоже дизъюнкты. Пусть $Z := \bigsqcup_{i=0}^{\infty} \iota^i(X \setminus Y) \subset X$. Ясно, что $X = Z \sqcup (X \setminus Z)$ и $Y = \iota(Z) \sqcup (X \setminus Z)$. Определим биекцию $(\rho : X \xrightarrow{\sim} Y) := (x \mapsto \iota(x) : Z \xrightarrow{\sim} \iota(Z)) \sqcup (\text{Id}_{X \setminus Z})$. \square

Замечание 1. Теорему 1 можно переформулировать следующим образом: «Если два множества вкладываются друг в друга, то они равноможны».

4.3. Лемма Цорна

Определение 1 (ЗАМКНУТОЕ ВЛЕВО ПОДМНОЖЕСТВО). Подмножество Y частично упорядоченного множества X называется *замкнутым влево*, если $\bigcup_{y \in Y} X_{\leq y} \subset Y$. Множество замкнутых влево подмножеств частично упорядоченного множества X будет обозначаться через $[1]^{X^o}$.

Определение 2 (ПОСЛЕДУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ). Пусть X – частично упорядоченное множество, а $x \in X$ – его элемент. Тогда минимальные элементы $X_{>x}$ будут называться *последующими к x элементами*.

Определение 3 (Фундированность). Частично упорядоченное множество X называется *фундированным*, если в множестве $[1]^{X^\circ}$ у любого не максимального элемента есть последующий.

Определение 4 (Ординал). Фундированное линейно упорядоченное множество называется *ординалом*.

Определение 5 (Подординал). Ординал B называется *подординалом* ординала A , что записывается $B \preccurlyeq A$, если B является замкнутым влево подмножеством A с индуцированным порядком.

Определение 6 (ОТОБРАЖЕНИЕ ПОСЛЕДОВАНИЯ). Пусть A — ординал. Тогда *отображение последования* $r_A : [1]^{A^\circ} \setminus \{A\} \rightarrow [1]^{A^\circ}$ переводит любой не максимальный элемент $[1]^{A^\circ}$ в последующий элемент $[1]^{A^\circ}$.

Лемма 1 (ЛЕММА О СРАВНЕНИИ). Пусть A и B — два ординала, такие что отображения последования r_A и r_B принимают одинаковые значения на пересечении их областей определения. Тогда какой-то из ординалов A и B является подординалом другого.

Доказательство. Пусть C — это объединение общих подординалов A и B , которое является наибольшим общим подординалом A и B . Если $C \neq A$ и $C \neq B$, то определён ординал $r_A(C) = r_B(C)$, который строго больше C и является подординалом A и B — противоречие. \square

Теорема 1 (ЛЕММА КУРАТОВСКОГО–ЦОРНА). Пусть U — частично упорядоченное множество, а M — множество цепей в U , являющихся ординалами, упорядоченное отношением «быть подординалом». Тогда, в предположении аксиомы выбора, в M есть максимальный элемент.

Доказательство. Предположим, что это не так. Тогда для каждого $A \in M$, существует $A' \in M$, такой что A — максимальный собственный подординал в A' . Воспользовавшись аксиомой выбора, выберем отображение $r_U : M \rightarrow M$, сопоставляющее каждому $A \in M$ такой A' . Пусть $L := \{A \in M \mid r_A(B) = r_U(B) \text{ для всех } B \prec A\}$. Тогда, воспользовавшись леммой о сравнении, легко увидеть, что $\bigcup_{A \in L} A \in L$. Но $\bigcup_{A \in L} A \prec r_U(\bigcup_{A \in L} A) \in L$ — противоречие. \square

Наблюдение 1 (Принцип максимума Хаусдорфа). Теорема 1 допускает следующую эквивалентную переформулировку, которую называют *принципом максимума Хаусдорфа*: «В любом частично упорядоченном множестве существует максимальная по включению цепь».

Замечание 1. Ещё одна стандартная переформулировка теоремы 1 звучит так: «Частично упорядоченное множество, в котором любая цепь имеет верхнюю грань, содержит максимальный элемент».

Пример 1. Частично упорядоченное множество счётных подмножеств несчётного множества удовлетворяет условию наличия верхних граней у счётных цепей, но не содержит максимальных элементов.

Глава 5

Вещественные числа

В ЭТОЙ ГЛАВЕ изложена конструкция действительных чисел с помощью сечений Дедекинда. Основной посыл главы состоит в том, что использование кольца формальных разностей позволяет избавиться от занудных разборов случаев, часто присутствующих в изложениях этой конструкции, и делает её не менее привлекательной, чем конструкцию через последовательности Коши. Помимо этого в разделе 5.2 изложена ключевая теорема о компактности и связности отрезка $[0, 1] \subset \mathbb{R}$.

5.1. Сечения Дедекинда

Пара слов о целых и рациональных числах

Кольцо целых чисел, обозначаемое \mathbb{Z} , — это кольцо формальных разностей, то есть кольцо Гротендика, полукольца \mathbb{N}_0 . Поле рациональных чисел, обозначаемое \mathbb{Q} , — это поле частных кольца \mathbb{Z} . Структура поля на \mathbb{Q} единственным образом продолжается до структуры линейно упорядоченного поля.

Дедекиндовы пары и леммы об обратимости

Обозначение 1. Пусть X — частично упорядоченное множество, а $y \in X$ — его элемент. Тогда $X_{\leq y} := \{x \in X \mid x \leq y\}$, $X_{\geq y} := \{x \in X \mid x \geq y\}$, $X_{< y} := \{x \in X \mid x < y\}$, $X_{> y} := \{x \in X \mid x > y\}$.

Определение 1 (ЛЕВЫЕ И ПРАВЫЕ СЕЧЕНИЯ ДЕДЕКИНДА). Назовём подмножество Y линейно упорядоченного множества X *левым/правым сечением Дедекинда*, если $Y \neq \emptyset$, X и для любого $y \in Y$ выполняется строгое включение $X_{\leq y} \subsetneq Y$ или, соответственно, $X_{\geq y} \subsetneq Y$.

Определение 2 (ДЕДЕКИНДОВЫ ДОПОЛНЕНИЯ И ПАРЫ). Пусть X — это \mathbb{Q} или $\mathbb{Q}_{>0}$. Левое сечение Дедекинда $L \subset X$ и правое сечение Дедекинда $R \subset X$ называются *дедекиндовыми дополнениями* друг друга, а пара (L, R) — *дедекиндовой парой*, если $L \cap R = \emptyset$, и для любого рационального $\varepsilon > 0$ существуют $l \in L$ и $r \in R$, такие что $r - l \leq \varepsilon$.

Наблюдение 1 (ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ДЕДЕКИНДОВЫХ ПАР). Пусть X — это \mathbb{Q} или $\mathbb{Q}_{>0}$, а $L, R \subset X$ — дизъюнктные левое и правое соответственно сечения Дедекинда. Тогда следующие условия эквивалентны:

- а) Пара (L, R) является дедекиндовой парой;
- б) Для любого $\varepsilon \in \mathbb{Q}_{>0}$ открытая ε -окрестность L имеет непустое пересечение с R , то есть $\{x \in X \mid \exists l \in L : |x - l| < \varepsilon\} \cap R \neq \emptyset$;
- в) Для любого $\varepsilon \in \mathbb{Q}_{>0}$ открытая ε -окрестность R имеет непустое пересечение с L , то есть $L \cap \{x \in X \mid \exists r \in R : |x - r| < \varepsilon\} \neq \emptyset$;
- г) Множество L — это максимальное по включению левое сечение Дедекинда, дизъюнктное с R ;
- д) Множество R — это максимальное по включению правое сечение Дедекинда, дизъюнктное с L .

Из условий (г) и (д) следует, что у любого левого/правого сечения Дедекинда в X существует единственное дедекиндово дополнение.

Определение 3 («ПОЭЛЕМЕНТНОЕ» СЛОЖЕНИЕ, УМНОЖЕНИЕ И ОБРАЩЕНИЕ ПОДМНОЖЕСТВ). Для подмножеств $M, M', M'' \subset \mathbb{Q}$, в частности, левых или правых сечений Дедекинда, определим множества $-M := \{-x \in \mathbb{Q} \mid x \in M\}$, $M' + M'' := \{x' + x'' \in \mathbb{Q} \mid x' \in M', x'' \in M''\}$ и $M' \cdot M'' := \{x' \cdot x'' \in \mathbb{Q} \mid x' \in M', x'' \in M''\}$. Если $M \subset \mathbb{Q}^\times$, то определим множество $M^{(-1)} := \{x^{-1} \in \mathbb{Q} \mid x \in M\}$.

Определение 4 (СЛОЖЕНИЕ ДЕДЕКИНДОВЫХ ПАР В \mathbb{Q}). Пусть (L', R') и (L'', R'') — дедекиндовы пары в \mathbb{Q} . Определим их сумму как дедекиндову пару $(L' + L'', R' + R'')$.

Наблюдение 2. Дедекиндовы пары в \mathbb{Q} образуют абелеву группу относительно сложения. Нулём в этой группе является пара $(\mathbb{Q}_{<0}, \mathbb{Q}_{>0})$, а аддитивно обратной к паре (L, R) является пара $(-R, -L)$.

Лемма 1. Пусть (L, R) — дедекиндова пара в $\mathbb{Q}_{>0}$. Тогда $(R^{(-1)}, L^{(-1)})$ — это дедекиндова пара в $\mathbb{Q}_{>0}$.

Набросок доказательства. Заметим, что существует $C \in \mathbb{Q}_{>0}$, такое что если $l \in L$ и $r \in R$ достаточно близки, то $C \leq l \leq r$, после чего воспользуемся тождеством $1/l - 1/r = (r - l)/(lr)$. \square

Лемма 2. Пусть (L', R') и (L'', R'') — дедекиндовы пары в $\mathbb{Q}_{>0}$. Тогда $(L' \cdot L'', R' \cdot R'')$ — это дедекиндова пара в $\mathbb{Q}_{>0}$.

Набросок доказательства. Заметим, что существует $C' \in \mathbb{Q}_{>0}$, такое что если $l' \in L'$ и $r' \in R'$ достаточно близки, то $l' \leq r' \leq C'$, и аналогично для пары (L'', R'') , после чего воспользуемся тождеством $r'r'' - l'l'' = r'(r'' - l'') + (r' - l')l''$. \square

Определение 5 (УМНОЖЕНИЕ ДЕДЕКИНДОВЫХ ПАР В $\mathbb{Q}_{>0}$). Пусть (L', R') и (L'', R'') — дедекиндовы пары в $\mathbb{Q}_{>0}$. Определим их произведение как дедекиндову пару $(L' \cdot L'', R' \cdot R'')$.

Наблюдение 3. Дедекиндовы пары в $\mathbb{Q}_{>0}$ образуют коммутативную группу относительно умножения. Единицей в этой группе является пара $(\{x \in \mathbb{Q}_{>0} \mid x < 1\}, \{x \in \mathbb{Q}_{>0} \mid 1 < x\})$, а мультипликативно обратной к паре (L, R) является пара $(R^{(-1)}, L^{(-1)})$.

Конструкция поля дедекиндовых сечений

Определение 6 (СЕЧЕНИЕ ДЕДЕКИНДА). Правые сечения Дедекинда в \mathbb{Q} будем называть просто *сечениями Дедекинда*.

Определение 7 (ОТНОШЕНИЕ ПОРЯДКА НА СЕЧЕНИЯХ ДЕДЕКИНДА). Стандартным порядком на множестве сечений Дедекинда будем считать порядок, противоположный порядку, заданному вложенностью сечений друг в друга как множеств.

Наблюдение 4. Порядок на множестве сечений Дедекинда линейный и ограниченно полный: инфимумам соответствуют объединения.

Определение 8 (СЛОЖЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ДЕДЕКИНДА). Суммой сечений Дедекинда R' и R'' назовём сечение Дедекинда $R' + R''$.

Наблюдение 5. Сечения Дедекинда образуют упорядоченную аддитивную абелеву группу. Аддитивная обратимость любого сечения Дедекинда следует из наблюдения 2.

Определение 9 (УМНОЖЕНИЕ НЕОТРИЦАТЕЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ ДЕДЕКИНДА). Пусть R' и R'' — неотрицательные, то есть такие, что $R' \geq 0$ и $R'' \geq 0$, сечения Дедекинда. Определим их произведение как неотрицательное сечение Дедекинда $R' \cdot R''$.

Наблюдение 6. Множество неотрицательных сечений Дедекинда образует полукольцо с нулём. Если мы отождествим множество всех сечений Дедекинда с кольцом Гротендика, то есть кольцом формальных разностей, этого полукольца, то увидим, что операция умножения неотрицательных сечений Дедекинда однозначно двусторонне дистрибутивно продолжается на множество всех сечений Дедекинда, превращая его в упорядоченное кольцо.

Наблюдение 7. По наблюдению 3 строго положительные, то есть строго большие нуля, сечения Дедекинда мультипликативно обратимы, откуда следует, что кольцо сечений Дедекинда является полем. Часто оно отождествляется с полем *вещественных чисел*, также называемых *действительными числами*, и обозначается символом \mathbb{R} .

Единственность полного по Дедекинду линейно упорядоченного поля

Наблюдение 8. Любое линейно упорядоченное поле имеет характеристику ноль.

Определение 10 (АРХИМЕДОВО ПОЛЕ). Линейно упорядоченное поле \mathcal{R} называется *архимедовым*, если множество $\mathbb{Z} \subset \mathcal{R}$ не ограничено в \mathcal{R} .

Наблюдение 9. Пусть \mathcal{R} — архимедово линейно упорядоченное поле. Тогда для любого $a \in \mathcal{R}^\times$ множество $a\mathbb{Z} \subset \mathcal{R}$ не ограничено.

Теорема 1. Пусть \mathcal{R} — архимедово линейно упорядоченное поле. Тогда для любых $a, b \in \mathcal{R}$, таких что $a < b$, существует рациональное число $r \in \mathbb{Q}$, такое что $a < r < b$.

Доказательство. По наблюдению 9 существует число $m \in \mathbb{N}_1$, такое что $m(b - a) > 1$. Пусть $n \in \mathbb{Z}$ — минимальный элемент \mathbb{Z} , такой что $ma < n < mb$ и $a < n/m < b$. \square

Определение 11 (Полнота по ДЕДЕКИНДУ). Линейно упорядоченное поле называется *полным по Дедекунду*, если оно является ограничено полным как частично упорядоченное множество, то есть содержит супремумы ограниченных сверху подмножеств или, эквивалентно, содержит инфимумы ограниченных снизу подмножеств.

Теорема 2. Пусть \mathcal{R} — полное по Дедекунду линейно упорядоченное поле. Тогда \mathcal{R} архимедово.

Доказательство. Пусть $s \in \mathcal{R}$ — супремум $\mathbb{Z} \subset \mathcal{R}$. Так как $s - 1 < s$, то существует число $n \in \mathbb{Z}$, такое что $s - 1 < n$, откуда следует, что $s < n + 1$ — противоречие. \square

Теорема 3. Пусть \mathcal{R} — произвольное полное по Дедекунду линейно упорядоченное поле, а \mathcal{D} — поле сечений Дедекунда. Тогда существует единственный изоморфизм $\mathcal{R} \xrightarrow{\sim} \mathcal{D}$ линейно упорядоченных полей.

Набросок доказательства. Во-первых, воспользовавшись теоремами 1 и 2, легко убедиться, что $\mathbb{Q} \cap \mathcal{R}_{>a} \in \mathcal{D}$ для любого $a \in \mathcal{R}$, а отображение $a \mapsto \mathbb{Q} \cap \mathcal{R}_{>a} : \mathcal{R} \rightarrow \mathcal{D}$ биективно и является сохраняющим порядок кольцевым гомоморфизмом. Во-вторых, у поля \mathcal{R} нет сохраняющих порядок нетривиальных автоморфизмов, так как их нет у \mathbb{Q} . \square

Замечание 1. Отметим, что любой автоморфизм поля \mathbb{R} сохраняет порядок, так как переводит квадраты в квадраты.

5.2. Компактность и связность отрезка

Определение 1 (ИНТЕРВАЛ). Назовём подмножество $I \subset X$ частично упорядоченного множества X *интервалом*, если для любых $x, y \in I$ и $z \in X$, таких что $x \leq z \leq y$, выполняется включение $z \in I$.

Теорема 1 (КОМПАКТНОСТЬ И СВЯЗНОСТЬ ОТРЕЗКА). Пусть $\mathcal{U} \subset \text{Open}([0, 1])$ — множество открытых подмножеств отрезка $[0, 1] \subset \mathbb{R}$, такое что $\bigcup_{U \in \mathcal{U}} U$ замкнуто в $[0, 1]$ и не пусто. Тогда $[0, 1]$ является конечным объединением элементов \mathcal{U} .

Доказательство. Для произвольного подмножества $X \subset [0, 1]$ обозначим через \mathcal{I}_X множество открытых в $[0, 1]$ интервалов, содержащихся в конечных объединениях элементов \mathcal{U} и содержащих X .

По условию существует непустой $I \in \mathcal{I}_\emptyset$. Пусть I_{\max} — это объединение элементов \mathcal{I}_I , $C_{\inf} := \inf(I_{\max})$, $C_{\sup} := \sup(I_{\max})$. Тогда $C_{\inf}, C_{\sup} \in \text{Cl}(I_{\max}) \subset \text{Cl}(\bigcup_{U \in \mathcal{U}} U) = \bigcup_{U \in \mathcal{U}} U$, поэтому существуют $I_{\inf} \in \mathcal{I}_{\{C_{\inf}\}}$ и $I_{\sup} \in \mathcal{I}_{\{C_{\sup}\}}$. Так как $I_{\inf} \cap I_{\max} \neq \emptyset$ и $I_{\sup} \cap I_{\max} \neq \emptyset$, то существуют $I_{\text{left}}, I_{\text{right}} \in \mathcal{I}_I$, такие что $I_{\inf} \cap I_{\text{left}} \neq \emptyset$ и $I_{\sup} \cap I_{\text{right}} \neq \emptyset$. Тогда $I_{\text{big}} := I_{\inf} \cup I_{\text{left}} \cup I_{\text{right}} \cup I_{\sup} \in \mathcal{I}_I$. Если $C_{\inf} \neq 0$ или $C_{\sup} \neq 1$, то $I_{\text{big}} \not\subset I_{\max}$, что противоречит определению I_{\max} . Поэтому $I_{\text{big}} = I_{\max} = [0, 1]$. \square

Замечание 1. Теорема 1 допускает следующую эквивалентную переформулировку: единичный вещественный отрезок компактен и связан.

Глава 6

Базовые свойства метрических пространств

6.1. Лемма Лебега о покрытии

Теорема 1 (ЛЕММА ЛЕБЕГА О ПОКРЫТИИ). *Если M — компактное метрическое пространство, а $\mathcal{U} \subset \text{Open}(M)$ — его открытое покрытие, то существует число $R \in \mathbb{R}_{>0}$ такое что любой открытый шар в M радиуса меньше R содержится в каком-то элементе \mathcal{U} .*

Доказательство. Рассмотрим функцию $f : M \rightarrow \mathbb{R}$, сопоставляющую точке $x \in M$ супремум радиусов открытых шаров с центром в x , содержащихся в каком-то элементе \mathcal{U} . Так как функция f непрерывна, а пространство M компактно, то в какой-то точке M функция f принимает своё наименьшее значение, которое не может быть нулевым. \square

Теорема 2 (ТЕОРЕМА КАНТОРА – ГЕЙНЕ). *Пусть $\varphi : M \rightarrow M'$ — непрерывное отображение из компактного метрического пространства M в метрическое пространство M' . Тогда φ равномерно непрерывно.*

Первое доказательство. Рассмотрим покрытие пространства M образами всех открытых шаров в M' и применим к нему лемму Лебега о покрытии (теорему 1). \square

Второе доказательство. Для любого числа $\varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}$ множество $X := \{(x, y) \in M \times M \mid d_{M'}(\varphi(x), \varphi(y)) \geq \varepsilon\} = (d_{M'} \circ (\varphi \times \varphi))^{-1}([\varepsilon, \infty))$ ком-

пактно как замкнутое подмножество компактного пространства $M \times M$, а потому непрерывная функция $d_M|_X$ принимает на X своё наименьшее значение, которое не может быть нулевым. \square

6.2. Полные метрические пространства

Наблюдение 1. Пусть X — метрическое пространство, $(a_i)_{i \in I}$ и $(b_j)_{j \in J}$ — две сходящиеся последовательности в X . Тогда выполняется равенство $d(\lim(a_i \mid i \in I), \lim(b_j \mid j \in J)) = \lim(d(a_i, b_j) \mid (i, j) \in I \times J)$.

Теорема 1 (ХАРАКТЕРИЗАЦИИ МЕТРИЧЕСКОЙ ПОЛНОТЫ). *Пусть X — метрическое пространство. Тогда следующие условия эквивалентны:*

- а) *Любая последовательность Коши в X сходится;*
- б) *Для любой пары (Y, Y') из метрического пространства Y и его плотного подмножества $Y' \subset Y$ любое равномерно непрерывное отображение $f' : Y' \rightarrow X$ продолжается до непрерывного отображения $f : Y \rightarrow X$.*

Доказательство (из двух частей).

Часть (а) \Rightarrow (б). Пусть $y \in Y$. Выберем сходящуюся к y в Y последовательность $s : I \rightarrow Y'$. Заметим, что s является последовательностью Коши, а потому $f' \circ s$ — тоже. Определим $f(y)$ как предел $f' \circ s$. Пусть $r : J \rightarrow Y'$ — другая сходящаяся к y в Y последовательность. Тогда $s \sqcup r : I \sqcup J \rightarrow Y'$ — последовательность Коши, а потому $f' \circ (s \sqcup r)$ — тоже, а потому пределы $f' \circ s$ и $f' \circ r$ равны и отображение f определено корректно. Непрерывность f следует из наблюдения 1.

Часть (б) \Rightarrow (а). Обозначим образ вложения $n \mapsto 2^{-n} : \mathbb{N}_0 \rightarrow [0, 1]$ через N' , а замыкание N' в $[0, 1]$ — через N . Тогда последовательности $\mathbb{N}_0 \rightarrow X$ естественно биективны отображениям $N' \rightarrow X$, а пределы последовательностей задаются непрерывными продолжениями этих отображений на N . Осталось заметить, что последовательность $\mathbb{N}_0 \rightarrow X$ является последовательностью Коши тогда и только тогда, когда соответствующее отображение $N' \rightarrow X$ равномерно непрерывно. \square

Определение 1 (ПОЛНОЕ МЕТРИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО). Метрическое пространство X называется *метрически полным* или просто *полным*, если оно удовлетворяет эквивалентным условиям теоремы 1.

Определение 2 (ПОПОЛНЕНИЕ МЕТРИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА). *Пополнением* метрического пространства X называется полное метрическое пространство Y , снабжённое изометрическим вложением $X \rightarrow Y$ с плотным образом.

Замечание 1. Из теоремы 1 следует, что между любыми двумя пополнениями метрического пространства X существует единственная изометрия, тождественная на X .

Определение 3 (ВЛОЖЕНИЕ КУРАТОВСКОГО). Пусть X — метрическое пространство, а F — пространство непрерывных функций из X в \mathbb{R} с \sup -расстоянием. Тогда *вложением Куратовского* называется изометрическое вложение

$$x \mapsto d_X(x, -) : X \rightarrow \{f \in F \mid d_F(f, d_X(y, -)) < \infty \text{ для всех } y \in X\}.$$

Наблюдение 2. Замыкание образа вложения Куратовского метрического пространства является его метрическим пополнением.

6.3. Теорема Банаха о фиксированной точке

Определение 1 (РАСТЯЖЕНИЕ И ЛИПШИЦЕВОСТЬ). Пусть X и Y — метрические пространства, а $\varphi : X \rightarrow Y$ — отображение. Инфимум $\lambda \in \mathbb{R}$, таких что $d_Y(\varphi(x'), \varphi(x'')) \leq \lambda \cdot d_X(x', x'')$ для всех $x', x'' \in X$, называется *растяжением* или *липшицевой нормой* φ . Если липшицева норма φ не равна $+\infty$, то φ называется *липшицевым*.

Определение 2 (РАВНОМЕРНО СЖИМАЮЩЕЕ ОТОБРАЖЕНИЕ). Отображение между метрическими пространствами называется *равномерно сжимающим*, если его растяжение строго меньше единицы.

Теорема 1 (ТЕОРЕМА БАНАХА О ФИКСИРОВАННОЙ ТОЧКЕ). Пусть X — непустое полное метрическое пространство, а $\varphi : X \rightarrow X$ — равномерно сжимающее отображение. Тогда у φ существует единственная фиксированная точка.

Доказательство. Единственность очевидна — остальные точки обязаны приближаться к фиксированной. Теперь докажем существование. Обозначим растяжение φ через λ и выберем произвольную точку $x \in X$. Из неравенств $d(\varphi^{\circ(n+1)}(x), \varphi^{\circ(n+2)}(x)) \leq \lambda \cdot d(\varphi^{\circ n}(x), \varphi^{\circ(n+1)}(x))$, где $n \in \mathbb{N}_0$, следует, что расстояния между членами последовательности $(\varphi^{\circ n}(x))_{n=0}^\infty$ не больше расстояний между соответствующими членами последовательности $(c \cdot s_n)_{n=0}^\infty$, где $c := d(x, \varphi(x))$, $s_n := \sum_{i=1}^n \lambda^{i-1}$. Так как последовательность $(s_n)_{n=0}^\infty$ сходится, то она является последовательностью Коши, откуда следует, что последовательность $(\varphi^{\circ n}(x))_{n=0}^\infty$ является последовательностью Коши, и, как следствие, сходится. Предел и будет фиксированной точкой, так как из непрерывности φ следует, что $\varphi(\lim_{n \rightarrow \infty} \varphi^{\circ n}(x)) = \lim_{n \rightarrow \infty} \varphi(\varphi^{\circ n}(x)) = \lim_{n \rightarrow \infty} \varphi^{\circ n}(x)$. \square

Глава 7

Дифференциальное исчисление

В ЭТОЙ ГЛАВЕ изложены базовые теоремы дифференциального исчисления, при этом сделана попытка изложить лемму Адамара без использования понятия интеграла, а лемму Морса — без использования теоремы об обратной функции, что, возможно, удлинит и несколько «утяжелило» соответствующие разделы 7.4 и 7.5.

7.1. Теорема о среднем значении

Теорема 1 (ТЕОРЕМА РОЛЛЯ О СРЕДНЕМ). Пусть $f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ — непрерывная функция, дифференцируемая на интервале $(0, 1)$. Тогда если $f(0) = f(1)$, то существует точка $x \in (0, 1)$, такая что $f'(x) = 0$.

Набросок доказательства. Случай постоянной f тривиален, рассмотрим случай не постоянной f . Так как отрезок $[0, 1]$ компактен, то на нём существует точка, в которой f принимает наибольшее значение, и точка, в которой f принимает наименьшее значение. Так как f не постоянна, то по крайней мере одна из этих точек лежит в интервале $(0, 1)$. Нетрудно убедиться, что её можно взять в качестве x . \square

Теорема 2 (ТЕОРЕМА КОШИ О СРЕДНЕМ). Пусть $\gamma : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^2$ — непрерывное отображение, дифференцируемое на интервале $(0, 1)$, та-

кое что $\gamma'(t) \neq 0$ для любого $t \in (0, 1)$. Тогда существует точка $x \in (0, 1)$, такая что вектор $\gamma(1) - \gamma(0)$ является кратным $\gamma'(x)$.

Доказательство. Применим теорему Ролля о среднем (теорема 1) к композиции отображения γ с ортогональной проекцией \mathbb{R}^2 на прямую, ортогональную вектору $\gamma(1) - \gamma(0)$. \square

Теорема 3 (ТЕОРЕМА ЛАГРАНЖА О СРЕДНЕМ). Пусть $f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ — непрерывная функция, дифференцируемая на интервале $(0, 1)$. Тогда существует точка $x \in (0, 1)$, такая что $f'(x) = f(1) - f(0)$.

Доказательство. Применим теорему Коши о среднем (теорема 2) к отображению $t \mapsto (t, f(t)) : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^2$. \square

Теорема 4 (МНОГОМЕРНАЯ ТЕОРЕМА ЛАГРАНЖА). Пусть E — евклидово пространство, а $\gamma : [0, 1] \rightarrow E$ — непрерывное отображение, дифференцируемое на интервале $(0, 1)$, такое что $u := \gamma(1) - \gamma(0) \neq 0$. Тогда существует точка $x \in (0, 1)$, такая что $|u| = \gamma'(x) \cdot \frac{u}{|u|} \leq |\gamma'(x)| \cdot |u|$.

Доказательство. Применим классическую теорему Лагранжа о среднем (теорема 3) к функции $t \mapsto (\gamma(t) - \gamma(0)) \cdot \frac{u}{|u|} : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$. \square

7.2. Теорема об обратной функции

Теорема 1. Пусть E — евклидово линейное пространство, а $\varphi : E \rightarrow E$ — дифференцируемое отображение, такое что $\varphi(0) = 0$, отображение $D(\varphi)_0$ биективно, а отображение $x \mapsto D(\varphi)_x : E \rightarrow \text{Hom}_{\mathbb{R}\text{-mod}}(E, E)$ непрерывно в нуле. Тогда существует открытая окрестность нуля $U \subset E$, такая что $\varphi(U)$ открыто, а $x \mapsto \varphi(x) : U \rightarrow \varphi(U)$ биективно.

Доказательство (из шести частей).

1. Во-первых, заметим, что для любого $y \in E$ множество $\varphi^{-1}(y)$ совпадает с множеством фиксированных точек отображения $T_{-y} \circ \hat{\varphi} : E \rightarrow E$, где $T_{-y} : E \rightarrow E$, $x \mapsto x - y$, а $\hat{\varphi} := \varphi + \text{Id}_E$.

2. Во-вторых, заметим, что без потери общности можно предположить, что $D(\varphi)_0 = -\text{Id}$, то есть $D(\hat{\varphi})_0 = 0$, заменив φ на композицию φ и линейного автоморфизма E .

3. Теперь зафиксируем два числа $\varepsilon, \rho \in \mathbb{R}_{>0}$, таких что $\varepsilon + \rho = 1$. Так как отображение $x \mapsto D(\hat{\varphi})_x \mapsto \|D(\hat{\varphi})_x\| : E \rightarrow \text{Hom}_{\mathbb{R}\text{-mod}}(E, E) \rightarrow \mathbb{R}$ непрерывно в нуле и $\|D(\hat{\varphi})_0\| = \|0\| = 0$, то существует $R \in \mathbb{R}_{>0}$, такое что $\|D(\hat{\varphi})_x\| \leq \varepsilon$ для любого $x \in \overline{B}_R(0)$.

4. Согласно многомерной теореме Лагранжа (теорема 7.1.4) растяжение отображения $\hat{\varphi}|_{\overline{B}_R(0)}$ не превосходит ε . В частности, $\hat{\varphi}(\overline{B}_R(0)) \subset \overline{B}_{\varepsilon R}(0)$ и $T_{-y}(\hat{\varphi}(\overline{B}_R(0))) \subset B_R(0)$ для всех $y \in B_{\rho R}(x)$.

5. Зафиксируем произвольный $y \in B_{\rho R}(x)$ и применим теорему Банаха о фиксированной точке к отображению $x \mapsto T_{-y}(\hat{\varphi}(x)) : \overline{B}_R(0) \rightarrow \overline{B}_R(0)$. Мы получим, что существует единственная точка $x \in \overline{B}_R(0)$ такая что $\varphi(x) = y$, причём $x = T_{-y}(\hat{\varphi}(x)) \in B_R(0)$.

6. Множество $U := B_R(0) \cap \varphi^{-1}(B_{\rho R}(0))$, для которого $\varphi(U) = B_{\rho R}(0)$, удовлетворяет условию теоремы. \square

Наблюдение 1. Пусть $\varphi : U \rightarrow U'$ — дифференцируемая в нуле биекция между открытыми окрестностями нуля в \mathbb{R}^n , где $n \in \mathbb{N}_1$, такая что $\varphi(0) = 0$ и $D(\varphi)_0 \in \text{GL}_n(\mathbb{R})$. Тогда $D(\varphi^{-1})_0$ существует и равен $D(\varphi)_0^{-1}$.

Следствие 1. Пусть $\varphi : U \rightarrow U'$ — биекция класса C^r , где $r \in \mathbb{N}_1$, между открытыми подмножествами \mathbb{R}^n , где $n \in \mathbb{N}_1$, с невырожденными дифференциалами. Тогда φ^{-1} — тоже биекция класса C^r .

Доказательство. Утверждение по индукции следует из наблюдения 1. Во-первых, φ^{-1} имеет класс C^0 . Во-вторых, если φ^{-1} имеет класс C^s , где $s < r$, то отображение $D(\varphi^{-1})_{(-)} : U' \rightarrow \text{GL}_n(\mathbb{R})$ представляется в виде композиции отображения φ^{-1} класса C^s , отображения $D(\varphi)_{(-)} : U \rightarrow \text{GL}_n(\mathbb{R})$ класса C^{r-1} и отображения $(-)^{-1} : \text{GL}_n(\mathbb{R}) \rightarrow \text{GL}_n(\mathbb{R})$ класса C^∞ , а потому имеет класс C^s , то есть φ^{-1} имеет класс C^{s+1} . \square

7.3. Равенство смешанных производных

Теорема 1 (РАВЕНСТВО СМЕШАННЫХ ПРОИЗВОДНЫХ). Пусть $U = U' \times U'' \subset \mathbb{R}^2$ — открытая окрестность нуля, а $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ — функция, такая что $f(0) = 0$, смешанная производная $\partial_2 \partial_1 f$ существует во всех точках U и непрерывна в нуле. Пусть $g : U \rightarrow \mathbb{R}$, $(x_1, x_2) \mapsto f(x_1, x_2) - (f(x_1, 0) + f(0, x_2))$. Тогда $\partial_2 \partial_1 f(0) = \lim_{x_1, x_2 \rightarrow 0} (g(x_1, x_2) / (x_1 x_2))$.

Доказательство. Зафиксируем точку $(x_1, x_2) \in U$. Применив теорему Лагранжа о среднем к функции $\alpha \mapsto g(\alpha x_1, x_2) : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$, получаем, что $g(x_1, x_2) = x_1 \partial_1 g(\alpha_1 x_1, x_2)$ для какого-то $\alpha_1 \in (0, 1)$. Применив теорему Лагранжа о среднем к функции $\alpha \mapsto x_1 \partial_1 g(\alpha_1 x_1, \alpha x_2) : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$, получаем, что $g(x_1, x_2) = x_1 x_2 \partial_2 \partial_1 g(\alpha_1 x_1, \alpha_2 x_2)$ для какого-то $\alpha_2 \in (0, 1)$. Заметив, что $\partial_2 \partial_1 g = \partial_2 \partial_1 f$ как функции на U , и устремив x_1 и x_2 к нулю, получаем, что $\partial_2 \partial_1 f(0) = \lim_{x_1, x_2 \rightarrow 0} (g(x_1, x_2) / (x_1 x_2))$. \square

7.4. Лемма Адамара

Обозначение 1 (БИНОМИНАЛЬНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ). Пусть $r \geq i \geq 0$ — целые числа. Тогда введём обозначение $C_r^i := \frac{r!}{i!(r-i)!} = \frac{r \cdot (r-1) \cdot \dots \cdot (r-(i-1))}{i \cdot (i-1) \cdot \dots \cdot 1}$.

Наблюдение 1. Пусть $r \in \mathbb{N}_1$. Тогда, согласно формуле бинома Ньютона, выполняется равенство $C_r^0 - C_r^1 + C_r^2 - \dots + (-1)^r C_r^r = (1-1)^r = 0$.

Лемма 1. Пусть $r \in \mathbb{N}_1$, а $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ — функция класса C^r , такая что $f(0) = 0$. Определим функцию $g : \mathbb{R} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$, $x \mapsto f(x)/x$ и зафиксируем число $t \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$. Тогда существует семейство вещественных чисел $(\alpha_i)_{i=1}^r \in (0, 1)^{\times r}$, такое что выполняется равенство (1). Помимо этого, если f класса C^{r+1} , то существует семейство вещественных чисел $(\beta_i)_{i=1}^r \in (0, 1)^{\times r}$, такое что выполняется равенство (2).

$$g^{(r-1)}(t) = \frac{1}{r} (C_r^1 f^{(r)}(\alpha_1 t) - C_r^2 f^{(r)}(\alpha_2 t) + \dots + (-1)^{r-1} C_r^r f^{(r)}(\alpha_r t)) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} g^{(r-1)}(t) - \frac{1}{r} f^{(r)}(0) &= \frac{t}{r(r+1)} (C_{r+1}^2 f^{(r+1)}(\beta_1 t) - C_{r+1}^3 f^{(r+1)}(\beta_2 t) + \dots \\ &\quad \dots + (-1)^{r-1} C_{r+1}^{r+1} f^{(r+1)}(\beta_r t)) \end{aligned} \quad (2)$$

Доказательство (из трёх частей).

Часть 1. Дифференцируя функцию g по правилу Лейбница, получаем следующее равенство:

$$\begin{aligned} g^{(r-1)}(t) &= C_{r-1}^0 \cdot 0! \cdot \frac{f^{(r-1)}(t)}{t^1} - C_{r-1}^1 \cdot 1! \cdot \frac{f^{(r-2)}(t)}{t^2} + \dots \\ &\quad \dots + (-1)^{r-1} \cdot C_{r-1}^{r-1} \cdot (r-1)! \cdot \frac{f^{(0)}(t)}{t^r}. \end{aligned} \quad (3)$$

Часть 2. Сначала докажем формулу (1). Заметим, что если заменить функцию f на функцию

$$\tilde{f} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, \quad x \mapsto f(x) - \left(\frac{f'(0)}{1!}x + \frac{f''(0)}{2!}x^2 + \dots + \frac{f^{(r-1)}(0)}{(r-1)!}x^{r-1} \right),$$

а g , соответственно, на $\tilde{g} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, $x \mapsto \tilde{f}(x)/x$, то левая и правая части формулы (1) не изменятся. Поэтому без ограничения общности можно предположить, что $f'(0) = f''(0) = \dots = f^{(r-1)}(0) = 0$.

Осталось заметить, что, согласно теореме Тейлора с остаточным членом в форме Лагранжа, существует семейство вещественных чисел $(\alpha_i)_{i=1}^r \in (0, 1)^{\times r}$, такое что выполняются следующие равенства:

$$f^{(r-1)}(t) = \frac{1}{1!}f^{(r)}(\alpha_1 t)t^1, \quad \dots, \quad f^{(0)}(t) = \frac{1}{r!}f^{(r)}(\alpha_r t)t^r, \quad (4)$$

а потом подставить выражения (4) в формулу (3).

Часть 3. Теперь докажем формулу (2). Точно так же как в части 2 этого доказательства без ограничения общности можно предположить, что $f'(0) = f''(0) = \dots = f^{(r)}(0) = 0$.

Снова воспользовавшись теоремой Тейлора с остаточным членом в форме Лагранжа найдём семейство вещественных чисел $(\beta_i)_{i=1}^r \in (0, 1)^{\times r}$, такое что выполняются следующие равенства:

$$f^{(r-1)}(t) = \frac{1}{2!}f^{(r+1)}(\beta_1 t)t^2, \quad \dots, \quad f^{(0)}(t) = \frac{1}{(r+1)!}f^{(r+1)}(\beta_r t)t^{r+1}, \quad (5)$$

после чего подставим выражения (5) в формулу (3). □

Замечание 1. По формуле (1) сразу вычисляется предел

$$\lim_{t \rightarrow 0} g^{(r-1)}(t) = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r (-1)^{i-1} C_r^i f^{(r)}(0) = \frac{1}{r} f^{(r)}(0),$$

а по формуле (2) сразу вычисляется предел

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow 0} \frac{g^{(r-1)}(t) - \frac{1}{r}f^{(r)}(0)}{t} &= \frac{1}{r(r+1)} \sum_{i=1}^r (-1)^{i-1} C_{r+1}^{i+1} f^{(r+1)}(0) = \\ &= \frac{1}{r(r+1)} (C_{r+1}^1 - C_{r+1}^0) f^{(r+1)}(0) = \frac{1}{r+1} f^{(r+1)}(0). \end{aligned}$$

Теорема 1 (ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ЛЕММА АДАМАРА). Пусть $n, r \in \mathbb{N}_1$ — натуральные числа, $l : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $(x_i)_{i=1}^n \mapsto x_1$ — проекция, а $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ — функция класса C^r , такая что $l^{-1}(0) \subset f^{-1}(0)$. Тогда существует единственная функция $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ класса C^{r-1} , такая что $f = g \cdot l$.

Доказательство (из трёх частей).

Часть 1. Сначала рассмотрим случай $r = 1$. Пусть $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$, причём $x_1 \neq 0$. Тогда $f(x_1, x_2, \dots, x_n)/x_1 = \partial_1 f(\alpha x_1, x_2, \dots, x_n)$ для какого-то $\alpha \in (0, 1)$. Это показывает, что функция

$$(x \mapsto f(x)/l(x) : \mathbb{R}^n \setminus l^{-1}(0) \rightarrow \mathbb{R}) \sqcup (x \mapsto \partial_1 f(x) : l^{-1}(0) \rightarrow \mathbb{R})$$

подходит в качестве g . Единственность g очевидна, так как замыкание $\mathbb{R}^n \setminus l^{-1}(0)$ в \mathbb{R}^n совпадает с \mathbb{R}^n .

Часть 2. Теперь рассмотрим случай $r \geq 2$. Пусть $(k_i)_{i=1}^n$ — семейство элементов \mathbb{N}_0 , такое что $\sum_{i=1}^n k_i \leq r-1$. Нам нужно доказать, что функция $\partial_1^{k_1} \dots \partial_n^{k_n} g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ существует и непрерывна. Непосредственная проверка показывает, что функция $\hat{g} := \partial_2^{k_2} \dots \partial_n^{k_n} g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ существует и является в точности единственной непрерывной функцией на \mathbb{R}^n , удовлетворяющей равенству $\hat{f} = \hat{g} \cdot l$, где $\hat{f} := \partial_2^{k_2} \dots \partial_n^{k_n} f$.

Часть 3. Доказательство существования и непрерывности $\partial_1^{k_1} \hat{g}$ получается последовательным применением двух формул леммы 1 к ограничениям \hat{f} на слои проекции $(x_i)_{i=1}^n \mapsto (x_i)_{i=2}^n : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n-1}$. \square

Следствие 1 (МНОГОМЕРНАЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ЛЕММА АДАМАРА). Пусть I и $J \subset I$ — конечные множества, $l_j : \mathbb{R}^I \rightarrow \mathbb{R}^{\{j\}} \cong \mathbb{R}$, где $j \in J$, — координатные проекции, а $f : \mathbb{R}^I \rightarrow \mathbb{R}$ — функция класса C^r , где $r \in \mathbb{N}_1 \cup \{\infty\}$, такая что $\bigcap_{j \in J} l_j^{-1}(0) \subset f^{-1}(0)$. Тогда существуют функции $g_j : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, где $j \in J$, класса C^{r-1} , такие что $f = \sum_{j \in J} g_j \cdot l_j$.

Доказательство. Докажем следствие 1 индукцией по $\text{card}(J)$. Зафиксируем $e \in J$ и введём обозначение $H := l_e^{-1}(0)$. По предположению индукции $f|_H = \sum_{j \in J \setminus \{e\}} \hat{g}_j \cdot (l_j|_H)$, где \hat{g}_j имеют класс C^{r-1} . Для каждого $j \in J \setminus \{e\}$ возьмём $g_j := \hat{g}_j \circ \pi$, где $\pi : \mathbb{R}^I \rightarrow H \cong \mathbb{R}^{I \setminus \{e\}}$ — координатная проекция. По теореме 1 функция $f - (f|_H \circ \pi) = f - \sum_{j \in J \setminus \{e\}} g_j \cdot l_j$ представляется в виде $g_e \cdot l_e$, где g_e имеет класс C^{r-1} . \square

7.5. Лемма Морса

Теорема 1. Пусть (A, \mathfrak{m}, k) — ассоциативное коммутативное унитарное локальное кольцо, такое что $2 \in A^\times$, а M — конечно порождённый A -модуль, снабжённый формой $b : S_A^2(M) \rightarrow A$ такой что индуцированная форма $\bar{b} : S_k^2(\bar{M}) \rightarrow k$, где $\bar{M} := M/\mathfrak{m}M$, невырождена. Тогда модуль M свободен, а форма b невырождена и диагонализуема.

Доказательство. Докажем теорему индукцией по $m := \dim_k(\bar{M})$. Если $m = 0$, то $M = 0$ по лемме Накаямы. Теперь рассмотрим случай $m \geq 1$. Пусть $\bar{v} \in \bar{M}$ — вектор, такой что $\bar{b}(\bar{v}, \bar{v}) \in k^\times$, а $v \in M$ — его поднятие. Тогда $b(v, v) \in A^\times$, откуда, в частности, следует, что A -гомоморфизм $\alpha \mapsto \alpha v : A \rightarrow Av$ биективен, так как его ядро лежит в ядре индуцированной на A формы, которое тривиально. Так как индуцированные формы на Av и $k\bar{v}$ невырождены, то $M = Av \oplus (Av)^\perp$ и $\bar{M} = k\bar{v} \oplus (k\bar{v})^\perp$, причём отображение редукции $M \rightarrow \bar{M}$ переводит $(Av)^\perp$ в $(k\bar{v})^\perp$ сюръективно, что позволяет завершить доказательство по индукции. \square

Следствие 1. Если в условиях теоремы 1 кольцо A — это кольцо ростков в точке 0 функций класса C^r , где $r \in \mathbb{N}_0 \cup \{\infty\}$, из \mathbb{R}^n в \mathbb{R} , то форма b приводится к диагональному виду с ± 1 на диагонали.

Доказательство. Это следствие того, что группа $A^\times / (A^\times)^2$ состоит из двух элементов — классов $\pm 1 \in A^\times$. \square

Замечание 1. Очевидно, что при условиях следствия 1 «сигнатура» b в понятном смысле определена однозначно и совпадает с сигнатурой \bar{b} .

Теорема 2 (ЛЕММА МОРСА). Пусть f — росток в точке 0 функции класса C^{r+2} , где $r \in \mathbb{N}_1 \cup \{\infty\}$, из \mathbb{R}^n в \mathbb{R} , такой что $f(0) = 0$, $(\partial_i f(0))_{i=1}^n = 0$, а матрица $(\partial_i \partial_j f(0))_{i,j=1}^n$ невырождена. Пусть вещественная квадратичная форма, заданная матрицей $(\partial_i \partial_j f(0))_{i,j=1}^n$, эквивалентна квадратичной форме $\sum_{i=1}^n a_i X_i^2$, где $a_i \in \{\pm 1\}$ для всех $1 \leq i \leq n$. Тогда существует семейство $(u_i)_{i=1}^n$ ростков в точке 0 функций класса C^r из \mathbb{R}^n в \mathbb{R} , таких что $u_i(0) = 0$ для всех $1 \leq i \leq n$, матрица $(\partial_i u_j(0))_{i,j=1}^n$ невырождена, а $f = \sum_{i=1}^n a_i u_i^2$.

Доказательство (из двух частей).

Часть 1. Применив лемму Адамара к f , получаем разложение $f = \sum_{i=1}^n g_i l_i$, где l_i обозначает росток i -ой координатной функции, а g_i для $1 \leq i \leq n$ — это ростки функций класса C^{r+1} . Прямое вычисление по правилу Лейбница показывает, что для любого $1 \leq i \leq n$ выполняется равенство $\partial_i f(0) = g_i(0)$. Применив лемму Адамара к функциям g_i , где $1 \leq i \leq n$, получаем разложение $f = \sum_{i,j=1}^n h_{i,j} l_i l_j$, где $h_{i,j}$ для $1 \leq i, j \leq n$ — это ростки функций класса C^r . Заменив $h_{i,j}$ на $(h_{i,j} + h_{j,i})/2$ для каждой пары $1 \leq i, j \leq n$, можно предположить, что $h_{i,j} = h_{j,i}$ для любых $1 \leq i, j \leq n$. Прямое вычисление по правилу Лейбница показывает, что для любых $1 \leq i, j \leq n$ выполняется равенство $\partial_i \partial_j f(0) = 2 \cdot h_{i,j}(0)$, в частности, матрица $(h_{i,j}(0))_{i,j=1}^n$ невырождена.

Часть 2. Пусть A — это кольцо ростков в точке 0 функций класса C^r из \mathbb{R}^n в \mathbb{R} . Тогда по следствию 1 существует матрица $(s_{i,j})_{i,j=1}^n \in \text{GL}_n(A)$ такая что $\sum_{i=1}^n a_i (\sum_{j=1}^n s_{i,j} X_j)^2 = \sum_{i,j=1}^n h_{i,j} X_i X_j$. Для каждого индекса $1 \leq i \leq n$ возьмём $u_i := \sum_{j=1}^n s_{i,j} l_j$. Прямое вычисление по правилу Лейбница показывает, что $\partial_i u_j(0) = s_{j,i}(0)$ для любых $1 \leq i, j \leq n$, в частности, матрица $(\partial_i u_j(0))_{i,j=1}^n$ невырождена. \square

Глава 8

Общая топология и теория меры

8.1. Собственные отображения в топологии

Лемма о трубке

Определение 1 (ЗАМКНУТОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ). Пусть X и Y — топологические пространства. Тогда отображение $f : X \rightarrow Y$ называется *замкнутым*, если для любого замкнутого подмножества $C \subset X$ множество $f(C) \subset Y$ замкнуто.

Наблюдение 1 (ПРООБРАЗ И ОБРАЗЫ). Пусть $f : X \rightarrow Y$ — отображение множеств. Оно индуцирует тройку отображений между решётками подмножеств: $f_{\exists}, f_{\forall} : 2^X \xrightarrow[\leftarrow]{\rightarrow} 2^Y : f^{-1}$, таких что $f_{\exists} \dashv f^{-1} \dashv f_{\forall}$. Для $S \subset X$ множество $f_{\forall}(S)$ будем называть *строгим образом* S .

Замечание 1. Пусть $f : X \rightarrow Y$ — отображение множеств, а $S \subset X$. Тогда $f_{\exists}(S) = f(S)$, а $f_{\forall}(S) = \bigcup_{E \in 2^Y \mid f^{-1}(E) \subset S} E = \{y \in Y \mid f^{-1}(y) \subset S\}$.

Наблюдение 2. Отображение замкнуто тогда и только тогда, когда строгие образы открытых множеств открыты.

Наблюдение 3 (ЗАМЫКАНИЕ ПРОИЗВЕДЕНИЯ). Пусть I — конечное множество, $(X_i)_{i \in I}$ — семейство топологических пространств, а $(Y_i)_{i \in I} \in \prod_{i \in I} 2^{X_i}$. Тогда $\text{Cl}_{\prod_{i \in I} X_i}(\prod_{i \in I} Y_i) = \prod_{i \in I} \text{Cl}_{X_i}(Y_i)$.

Замечание 2. В наблюдении 3 без ограничения общности можно заменить $(X_i)_{i \in I}$ на постоянное семейство $(X)_{i \in I}$, где $X := \prod_{i \in I} X_i$.

Замечание 3. Пусть I — множество, X — пространство П. Александрова, $(Y_i)_{i \in I} \in (2^X)^{\times I}$ — семейство подмножеств X , а $X^{\times I}$ — декартова степень X в категории пространств П. Александрова. Тогда выполняется следующее соотношение: $\text{Cl}_{X^{\times I}}(\prod_{i \in I} Y_i) = \prod_{i \in I} \text{Cl}_X(Y_i)$.

Теорема 1 (ОБОВЩЁННАЯ ЛЕММА О ТРУБКЕ). *Пусть X и X' — топологические пространства, а $K \subset X$ и $K' \subset X'$ — подмножества, такие что $K \times K'$ компактно. Тогда любая открытая окрестность $K \times K'$ в $X \times X'$ содержит базовую открытую окрестность $K \times K'$.*

Доказательство. Пусть O — открытая окрестность $K \times K'$ в $X \times X'$. Представим O как объединение семейства базовых открытых подмножеств $X \times X'$, выберем из этого семейства конечное подпокрытие $\mathcal{B} \subset \text{Open}(X \times X')$ множества $K \times K'$, рассмотрим на X топологию, порождённую семейством $(X \setminus \pi(B))_{B \in \mathcal{B}}$, а на X' — порождённую семейством $(X' \setminus \pi'(B))_{B \in \mathcal{B}}$, где $\pi : X \times X' \rightarrow X$ и $\pi' : X \times X' \rightarrow X'$ — стандартные проекции, после чего применим к $K \times K' \subset X \times X'$ наблюдение 3. \square

Лемма 1. *Пусть K и X — топологические пространства, причём K компактно. Тогда каноническая проекция $\pi : K \times X \rightarrow X$ является замкнутым отображением.*

Доказательство. Пусть $O \subset K \times X$ — открытое множество, а $x \in \pi_{\forall}(O)$. Применив теорему 1 к $\pi^{-1}(x) \subset O$, получаем базовую открытую окрестность $\pi^{-1}(x) \subset K \times U \subset O$. Тогда U — открытая окрестность точки x , содержащаяся в $\pi_{\forall}(O)$. Мы доказали, что $\pi_{\forall}(O)$ открыто. \square

Лемма 2. *Пусть X и Y — топологические пространства, причём Y компактно. Пусть $f : X \rightarrow Y$ — сюръективное замкнутое отображение с компактными слоями. Тогда X компактно.*

Доказательство. Пусть $\mathcal{U} \subset \text{Open}(X)$ — открытое покрытие X . Для каждого $y \in Y$ выберем конечное подпокрытие $\mathcal{U}_y \subset \mathcal{U}$ слоя $f^{-1}(y)$, после чего выберем из открытого покрытия $(f_{\forall}(\bigcup_{U \in \mathcal{U}_y} U))_{y \in Y}$ множества Y конечное подпокрытие $(f_{\forall}(\bigcup_{U \in \mathcal{U}_y} U))_{y \in F}$, где $F \subset Y$. Тогда $\bigcup_{y \in F} \mathcal{U}_y$ — конечное подпокрытие покрытия \mathcal{U} . \square

Лемма 3. Пусть K и K' — два компактных топологических пространства. Тогда топологическое пространство $K \times K'$ компактно.

Доказательство. Согласно лемме 1 проекция $K \times K' \rightarrow K'$ является замкнутым отображением с компактными слоями и компактным образом, а потому, согласно лемме 2, пространство $K \times K'$ компактно. \square

Лемма 4. Пусть X — компактное топологическое пространство, а $Y \subset X$ — замкнутое подмножество. Тогда Y компактно.

Доказательство. Пусть $\mathcal{U} \subset \text{Орен}(X)$ — открытое покрытие Y , а $U := X \setminus Y$. Тогда $\mathcal{U} \cup \{U\}$ — открытое покрытие X , и мы можем выбрать конечное подпокрытие $\mathcal{U}' \subset \mathcal{U} \cup \{U\}$. Тогда $\mathcal{U}' \setminus \{U\}$ — конечное подмножество \mathcal{U} , являющееся покрытием Y . \square

Наблюдение 4. Пусть X и Y — топологические пространства, $S \subset Y$ — подмножество, а $f : X \rightarrow Y$ — замкнутое отображение. Тогда отображение $x \mapsto f(x) : f^{-1}(S) \rightarrow S$, где топологии на множествах $f^{-1}(S)$ и S индуцированы вложениями $f^{-1}(S) \subset X$ и $S \subset Y$, замкнуто.

Теорема 2. Пусть X , Y и Z — топологические пространства, а $f : X \rightarrow Y$ и $g : Y \rightarrow Z$ — два замкнутых отображения с компактными слоями. Тогда $g \circ f : X \rightarrow Z$ является замкнутым отображением с компактными слоями.

Доказательство. Композиция замкнутых отображений, очевидно, замкнута. Нам нужно доказать, что слои $g \circ f$ компактны. Отображение f разлагается в композицию сюръективного замкнутого отображения и вложения замкнутого подмножества, поэтому достаточно доказать теорему для случая, когда f сюръективно, и для случая, когда f — вложение замкнутого подмножества. В первом случае, с учётом наблюдения 4, теорема следует из леммы 2, а во втором — из леммы 4. \square

Теорема 3. Пусть X , X' , Y , Y' — топологические пространства, а $f : X \rightarrow Y$ и $f' : X' \rightarrow Y'$ — два замкнутых отображения с компактными слоями. Тогда $f \times f' : X \times X' \rightarrow Y \times Y'$ является замкнутым отображением с компактными слоями.

Доказательство (из двух частей).

Часть 1. Разложение отображений f и f' в композиции сюръективных отображений и вложений замкнутых подмножеств индуцирует аналогичное разложение их произведения: $X \times X' \rightarrow f(X) \times f'(X') \rightarrow Y \times Y'$, так что мы можем предположить, что f и f' сюръективны.

Часть 2. Пусть $O \subset X \times X'$ — открытое подмножество, а $(x, x') \in (f \times f')_{\forall}(O)$. Применив теорему 1 к $(f \times f')^{-1}(x, x') = f^{-1}(x) \times f'^{-1}(x') \subset O$, получаем базовую открытую окрестность $U \times U' \subset O$ множества $f^{-1}(x) \times f'^{-1}(x')$. Тогда $f_{\forall}(U) \times f'_{\forall}(U') = (f \times f')_{\forall}(U \times U') \subset (f \times f')_{\forall}(O)$ — открытая окрестность точки (x, x') , содержащаяся в $(f \times f')_{\forall}(O)$. Мы доказали, что множество $(f \times f')_{\forall}(O)$ открыто. \square

Теорема 4. *Если K и K' — дизъюнктные компактные подмножества хаусдорфова топологического пространства X , то у них есть дизъюнктные открытые окрестности.*

Доказательство. Пространство X хаусдорфово тогда и только тогда, когда диагональ $\Delta \subset X \times X$ замкнута. Применим теорему 1 к компактному множеству $K \times K'$ с открытой окрестностью $(X \times X) \setminus \Delta$. \square

Замечание 4. Теорема 4 не понадобится в этом разделе.

Собственные отображения

Определение 2 (СОБСТВЕННОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ). Пусть X и Y — топологические пространства. Отображение $f : X \rightarrow Y$ называется *собственным*, если для любого топологического пространства Z отображение $\text{Id}_Z \times f : Z \times X \rightarrow Z \times Y$ замкнуто.

Наблюдение 5. Композиция собственных отображений является собственным отображением.

Наблюдение 6. Пусть X, X', Y, Y' — топологические пространства. Пусть $f : X \rightarrow Y$ и $f' : X' \rightarrow Y'$ — два собственных отображения. Тогда отображение $f \times f' : X \times X' \rightarrow Y \times Y'$ собственное, так как для любого топологического пространства Z отображение $\text{Id}_Z \times f \times f'$ является композицией замкнутых отображений $\text{Id}_Z \times \text{Id}_X \times f'$ и $\text{Id}_Z \times f \times \text{Id}_{Y'}$.

Наблюдение 7. Пусть X и Y — топологические пространства, $S \subset Y$ — подмножество, а $f : X \rightarrow Y$ — собственное отображение. Тогда отображение $x \mapsto f(x) : f^{-1}(S) \rightarrow S$, где топологии на множествах $f^{-1}(S)$ и S индуцированы вложениями $f^{-1}(S) \subset X$ и $S \subset Y$, существенно.

Определение 3 (ФИЛЬТР НА МНОЖЕСТВЕ). Пусть X — множество. Непустое собственное подмножество множества всех подмножеств в X , замкнутое относительно конечных пересечений и перехода к надмножествам, называется *фильтром* на множестве X .

Определение 4 (ПРОСТРАНСТВО ФИЛЬТРОВ). Пусть X — множество. Множество всех фильтров на X , которое в этом разделе будет обозначаться $\mathcal{F}(X)$, снабжено топологией, заданной базой открытых множеств $\{F \in \mathcal{F}(X) \mid S \in F\} \mid S \in 2^X$.

Наблюдение 8. Пусть X — множество. Тогда каноническое вложение $\iota : X \rightarrow \mathcal{F}(X)$, $x \mapsto \{S \in 2^X \mid x \in S\}$ обладает плотным образом.

Определение 5 (ПРЕДЕЛЬНЫЕ ТОЧКИ ФИЛЬТРА). Пусть X — топологическое пространство, а $F \in \mathcal{F}(X)$. Тогда элементы пересечения замыканий всех элементов F называются *предельными точками* F .

Наблюдение 9. Топологическое пространство X компактно тогда и только тогда, когда у любого фильтра на X есть предельные точки.

Обозначение 1. Символом \mathbf{pt} обозначается одноточечное топологическое пространство.

Теорема 5. Пусть X — топологическое пространство. Если отображение $X \rightarrow \mathbf{pt}$ существенно, то есть для любого топологического пространства Z проекция $\pi : Z \times X \rightarrow Z$ замкнута, то X компактно.

Доказательство. Пусть $Z := \mathcal{F}(X)$, а $\Gamma \subset Z \times X$ — график канонического вложения $\iota : X \rightarrow Z$. С одной стороны, $\bar{\Gamma} := \text{Cl}_{Z \times X}(\Gamma)$ состоит из пар $(F, x) \in Z \times X$, таких что x — предельная точка F . С другой стороны, $\pi(\bar{\Gamma}) \supset \pi(\Gamma) = \iota(X)$, а потому, по условию, $\pi(\bar{\Gamma}) = Z$. \square

Определение 6 (СЛАБО СОБСТВЕННОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ). Пусть X и Y — топологические пространства. Тогда отображение $f : X \rightarrow Y$ называется *слабо собственным*, если для любого компактного $K \subset Y$ множество $f^{-1}(K) \subset X$ компактно.

Теорема 6 (ХАРАКТЕРИЗАЦИИ СОБСТВЕННОСТИ). Пусть X и Y — топологические пространства, $f : X \rightarrow Y$ — отображение. Тогда следующие три условия на f эквивалентны: (а) f собствен; (б) f замкнуто и слабо собствен; (в) f замкнуто с компактными слоями.

Доказательство. Докажем импликацию (а) \implies (б). Пусть $K \subset Y$ — компактное подмножество. Композиция соответствующего ограничения $f^{-1}(K) \rightarrow K$ и $K \rightarrow \text{pt}$ собственна как композиция двух собственных отображений, поэтому $f^{-1}(K)$ компактно. Импликация (б) \implies (в) очевидна, а импликация (в) \implies (а) следует из теоремы 3. \square

Определение 7 (УНИВЕРСАЛЬНО ЗАМКНУТОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ). Пусть X и Y — топологические пространства. Отображение $f : X \rightarrow Y$ называется *универсально замкнутым*, если оно непрерывно, и если для любого непрерывного отображения $Y' \rightarrow Y$ индуцированное отображение $X' := Y' \times_Y X \rightarrow Y'$ замкнуто.

Теорема 7 (СОБСТВЕННОСТЬ И УНИВЕРСАЛЬНАЯ ЗАМКНУТОСТЬ). Непрерывное отображение $f : X \rightarrow Y$ между топологическими пространствами универсально замкнуто тогда и только тогда, когда оно собствен, то есть для любого топологического пространства Z отображение $\text{Id}_Z \times f : Z \times X \rightarrow Z \times Y$ замкнуто.

Доказательство. Часть «только тогда» следует из того, что отображение $\text{Id}_Z \times f$ является пулбэком f вдоль проекции $Z \times Y \rightarrow Y$. Часть «тогда» следует из того, что любое непрерывное отображение $Z \rightarrow Y$ разлагается в композицию гомеоморфизма со своим графиком, вложенным в произведение, и проекции произведения: $Z \rightarrow Z \times Y \rightarrow Y$. \square

Теорема Тихонова

Наблюдение 10. Пусть X и Y — топологические пространства, а $f : X \rightarrow Y$ — отображение. Отображение f непрерывно тогда и только тогда, когда $f(\text{Cl}(S)) \subset \text{Cl}(f(S))$ для любого $S \subset X$, и замкнуто тогда и только тогда, когда $f(\text{Cl}(S)) \supset \text{Cl}(f(S))$ для любого $S \subset X$.

Наблюдение 11. Если $(X_i \mid i \in I)$ — семейство топологических пространств, $S \subset \prod_{i \in I} X_i$ — подмножество, а $a \in \prod_{i \in I} X_i$ — элемент, то

$a \in \text{Cl}(S)$ тогда и только тогда, когда $\pi_F^I(a) \in \text{Cl}(\pi_F^I(S))$ для любого конечного $F \subset I$, где $\pi_F^I : \prod_{i \in I} X_i \rightarrow \prod_{i \in F} X_i$ — стандартная проекция.

Теорема 8 (ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ТЕОРЕМА ТИХОНОВА). *Пусть I — множество, $(X_i)_{i \in I}$ и $(Y_i)_{i \in I}$ — семейства топологических пространств, $(f_i : X_i \rightarrow Y_i)_{i \in I}$ — семейство собственных отображений. Тогда отображение $\prod_{i \in I} f_i : \prod_{i \in I} X_i \rightarrow \prod_{i \in I} Y_i$ существенно.*

Доказательство (из четырёх частей).

Часть 1. Зафиксируем обозначения. Пусть Z — топологическое пространство. Пусть $X_J := Z \times (\prod_{i \in J} X_i) \times (\prod_{i \in I \setminus J} Y_i)$, где $J \subset I$. Пусть $f_K^J := \text{Id}_Z \times (\prod_{i \in K} \text{Id}_{X_i}) \times (\prod_{i \in J \setminus K} f_i) \times (\prod_{i \in I \setminus J} \text{Id}_{Y_i}) : X_J \rightarrow X_K$, где $K \subset J \subset I$. Пусть $S = S_I \subset X_I$ — подмножество, а $S_J := f_J^I(S_I)$, где $J \subset I$. Согласно наблюдению 10 нам нужно доказать, что любой элемент множества $\text{Cl}(S_\emptyset)$ можно поднять до элемента множества $\text{Cl}(S_I)$.

Часть 2. Построим частично упорядоченное множество \mathcal{O} . Элементами \mathcal{O} являются пары (J, a) , где $J \subset I$, а $a \in \text{Cl}(S_J)$, причём $(K, b) \preccurlyeq (J, a)$ тогда и только тогда, когда $K \subset J$ и $f_K^J(a) = b$.

Часть 3. Пусть $((K, a_K))_{K \in \mathcal{K}}$, где $\mathcal{K} \subset 2^I$, — цепь в \mathcal{O} . Докажем, что она имеет верхнюю грань. Пусть $J := \bigcup_{K \in \mathcal{K}} K$. Существует единственный $a_J \in X_J$, такой что $f_K^J(a_J) = a_K$ для любого $K \in \mathcal{K}$. Докажем, что $a_J \in \text{Cl}(S_J)$. По наблюдению 11 нам нужно проверить, что $\pi(a_J) \in \text{Cl}(\pi(S_J))$ для любой проекции на конечное подпроизведение $\pi : X_J \rightarrow T$. Такая проекция разлагается в композицию $X_J \rightarrow X_K \rightarrow T$ для какого-то $K \in \mathcal{K}$, где $X_J \rightarrow X_K$ — это f_K^J , а $X_K \rightarrow T$ — это проекция на конечное подпроизведение. Поэтому из того, что $a_K \in \text{Cl}(S_K)$ для любого $K \in \mathcal{K}$ следует, что $a_J \in \text{Cl}(S_J)$.

Часть 4. Теперь мы можем применить к \mathcal{O} лемму Цорна. Для любого $(\emptyset, a) \in \mathcal{O}$ существует максимальный элемент $(J, b) \in \mathcal{O}$, больший (\emptyset, a) . Предположим, что $J \neq I$. Для любого индекса $e \in I \setminus J$ отображение $f_J^{J \cup \{e\}}$ замкнуто, так как отображение f_e существенно, а потому элемент $b \in \text{Cl}(S_J)$ можно поднять до элемента множества $\text{Cl}(S_{J \cup \{e\}})$ — противоречие. \square

8.2. Дуальность Стоуна для булевых колец

Теорема Стоуна

Целью этого подраздела является построение контравариантной эквивалентности (то есть дуальности) между категорией пространств Стоуна и категорией булевых колец.

Базовые определения и конструкция функторов

Соглашение 1. В этом разделе все кольца считаются коммутативными, ассоциативными и унитарными.

Определение 1 (ТОТАЛЬНО СЕПАРИРОВАННОЕ ПРОСТРАНСТВО). Топологическое пространство T называется *тотально сепарированным* (англ. *totally separated*), если для любых двух различных точек $x, y \in T$ существует непрерывное отображение $f : T \rightarrow D$ в дискретное двухточечное топологическое пространство D , такое что $f(x) \neq f(y)$.

Определение 2 (ПРОСТРАНСТВО СТОУНА). Топологическое пространство называется *пространством Стоуна*, если оно компактно и тотально сепарированно. Обозначим через Stone категорию пространств Стоуна и непрерывных отображений между ними.

Определение 3 (БУЛЕВО КОЛЬЦО). Кольцо называется *булевым кольцом*, если в нём любой элемент является идемпотентом, то есть удовлетворяет уравнению $x^2 = x$. Обозначим через Boole категорию булевых колец и гомоморфизмов между ними.

Определение 4 (СПЕКТР КОЛЬЦА). Для кольца R его *спектр*, обозначаемый $\text{Spec}(R)$, — это множество простых идеалов в R , снабжённое *топологией Зарисского*, заданной базой открытых множеств вида $A_f := \{\mathfrak{p} \in \text{Spec}(R) \mid f \notin \mathfrak{p}\}$, где $f \in R$.

Замечание 1. В обозначениях определения 4 множества A_f , где $f \in R$, образуют базу топологии, так как $A_f \cap A_g = A_{fg}$ для любых $f, g \in R$.

Определение 5 (КОЛЬЦО ОТКРЫТО-ЗАМКНУТЫХ ПОДМНОЖЕСТВ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА). Для топологического пространства T определим $\text{Clop}(T) \in \text{Boole}$ — булево кольцо *открыто-замкнутых*

(*clopen*) подмножеств T — как кольцо непрерывных функций $T \rightarrow \mathbb{F}_2$, где \mathbb{F}_2 взято с дискретной топологией.

Теорема 1 (КОМПАКТНОСТЬ СПЕКТРА). *Для любого кольца R топологическое пространство $\text{Spec}(R)$ компактно.*

Доказательство. Очевидно, что замкнутые подмножества спектра R — это множества $V(\mathfrak{J}) := \{\mathfrak{p} \in \text{Spec}(R) \mid \mathfrak{J} \subset \mathfrak{p}\}$, соответствующие идеалам $\mathfrak{J} \subset R$. При этом $\bigcap_{i \in I} V(\mathfrak{J}_i) = V(\sum_{i \in I} \mathfrak{J}_i)$, где $(\mathfrak{J}_i)_{i \in I}$ — произвольное семейство идеалов в R , а условие $V(\mathfrak{J}) = \emptyset$ эквивалентно условию $\mathfrak{J} = R$, где \mathfrak{J} — идеал в R . Компактность $\text{Spec}(R)$ эквивалентна следующему утверждению: если $(\mathfrak{J}_i)_{i \in I}$ — произвольное семейство идеалов в R , такое что $\bigcap_{i \in I} V(\mathfrak{J}_i) = \emptyset$ то существует конечное подмножество $F \subset I$, такое что $\bigcap_{i \in F} V(\mathfrak{J}_i) = \emptyset$. Так как условие $\bigcap_{i \in I} V(\mathfrak{J}_i) = \emptyset$ эквивалентно условию $1 \in \sum_{i \in I} \mathfrak{J}_i$, то утверждение очевидно. \square

Замечание 2. Для $R \in \text{Boole}$ и $\mathfrak{p} \in \text{Spec}(R)$ кольцо R/\mathfrak{p} изоморфно \mathbb{F}_2 , так как это целостное булево кольцо. В частности, идеал \mathfrak{p} максимален.

Лемма 1 (СПЕКТР БУЛЕВА КОЛЬЦА). *Если R — булево кольцо, то $\text{Spec}(R)$ — пространство Стоуна.*

Доказательство. Если $\mathfrak{p}, \mathfrak{q} \in \text{Spec}(R)$, $\mathfrak{p} \neq \mathfrak{q}$, то существует $f \in \mathfrak{p}$, такое что $f \notin \mathfrak{q}$ (или наоборот). Тогда $\text{Spec}(R) = A_f \sqcup A_g$, где $f + g = 1$, — нужное разложение. \square

Определение 6 (ФУНКТОР СПЕКТРА). Гомоморфизм колец $\psi : R_1 \rightarrow R_2$ индуцирует непрерывное отображение: $\text{Spec}(R_2) \rightarrow \text{Spec}(R_1)$, $\mathfrak{p} \mapsto \psi^{-1}(\mathfrak{p})$. Отсюда получаем функтор $\text{Spec} : \text{Boole} \rightarrow \text{Stone}^o$.

Определение 7 (ФУНКТОР ОТКРЫТО-ЗАМКНУТЫХ ПОДМНОЖЕСТВ). Непрерывное отображение $\varphi : T_1 \rightarrow T_2$ индуцирует гомоморфизм колец: $\text{Clor}(T_2) \rightarrow \text{Clor}(T_1)$, $f \mapsto f \circ \varphi$. Отсюда получаем функтор $\text{Clor} : \text{Stone}^o \rightarrow \text{Boole}$.

Замечание 3. Для $R \in \text{Boole}$ и $\mathfrak{p} \in \text{Spec}(R)$ уникальный изоморфизм $R/\mathfrak{p} \cong \mathbb{F}_2$ определяет изоморфизм функторов из Boole в категорию множеств: $\mathfrak{p} \mapsto (R \rightarrow R/\mathfrak{p} \cong \mathbb{F}_2) : \text{Spec}(R) \leftrightarrow \text{Hom}(R, \mathbb{F}_2) : \text{Ker}(f) \leftarrow f$.

Замечание 4. Аналогично, функтор $T \mapsto \text{Clop}(T)$ изоморфен функтору, переводящему топологическое пространство T в множество его открыто-замкнутых подмножеств с операциями симметрической разности (сложение) и пересечения (умножение): изоморфизм переводит $f \in \text{Clop}(T)$ в $f^{-1}(1) \subset T$, а открыто-замкнутое $O \subset T$ в его характеристическую функцию $\chi(O) \in \text{Clop}(T)$.

Конструкция естественных изоморфизмов

Определение 8 (ЭЛЕМЕНТ КОЛЬЦА КАК ФУНКЦИЯ НА СПЕКТРЕ). Для каждого $R \in \text{Boole}$ определим гомоморфизм $\rho_R : R \rightarrow \text{Clop}(\text{Spec}(R))$, где $\rho_R(f) : \text{Spec}(R) \rightarrow \mathbb{F}_2$, $\mathfrak{p} \mapsto f \pmod{\mathfrak{p}}$ (непрерывность $\rho_R(f)$ следует из разложения $\text{Spec}(R) = A_f \sqcup A_g$, где $f + g = 1$).

Определение 9 (ТОЧКА ПРОСТРАНСТВА КАК ИДЕАЛ КОЛЬЦА ФУНКЦИЙ). Для каждого $T \in \text{Stone}$ определим непрерывное отображение $\theta_T : T \rightarrow \text{Spec}(\text{Clop}(T))$, $x \mapsto \text{Ker}(\text{ev}_x)$, где $\text{ev}_x : \text{Clop}(T) \rightarrow \mathbb{F}_2$, $f \mapsto f(x)$.

Замечание 5. Изоморфизм $\text{Spec}(R) \cong \text{Hom}(R, \mathbb{F}_2)$, где $R \in \text{Boole}$, переводит отображения ρ_R и θ_T в стандартные отображения в дважды двойственное пространство: $X \rightarrow \text{Hom}(\text{Hom}(X, \mathbb{F}_2), \mathbb{F}_2)$, $x \mapsto \text{ev}_x$.

Теорема 2 (ТЕОРЕМА СТОУНА). Семейства $(\rho_R)_{R \in \text{Boole}}$ и $(\theta_T)_{T \in \text{Stone}}$, определённые ранее, задают пару естественных изоморфизмов:

$$\rho : \text{Id}_{\text{Boole}} \xrightarrow{\sim} \text{Clop} \circ \text{Spec}, \quad \theta : \text{Spec} \circ \text{Clop} \xrightarrow{\sim} \text{Id}_{\text{Stone}^\circ}.$$

Доказательство (из шести частей).

Общий план. Естественность ρ и θ доказывается прямо. Докажем, что все ρ_R и θ_T — изоморфизмы, доказав биективность всех ρ_R и θ_T и замкнутость всех θ_T .

Инъективность ρ_R . Имеем: $\rho_R(f) = 0 \iff \rho_R(g) = 1$, где $f + g = 1$, то есть g не содержится ни в одном максимальном идеале кольца R , то есть g обратимо, а обратимый идемпотент равен 1. Другое доказательство: R не содержит ненулевых нильпотентов.

Сюръективность ρ_R . Открыто-замкнутое множество $O \subset \text{Spec}(R)$ является объединением открытых множеств вида A_f , так как O открыто,

причём конечным объединением, так как O компактно как замкнутое подмножество компактного пространства $\text{Spec}(R)$. Воспользовавшись формулой включений-исключений, получаем желаемое.

Инъективность θ_T . Эквивалентна тотальной сепарированности T .

Сюръективность θ_T . Достаточно доказать, что произвольный идеал $\mathfrak{p} \in \text{Spec}(\text{Clor}(T))$ имеет общий ноль $x \in T$, так как если $\mathfrak{p} \subset \text{Ker}(\text{ev}_x)$, то $\mathfrak{p} = \text{Ker}(\text{ev}_x)$ из-за максимальной. Докажем от противного. Отсутствие общего нуля у \mathfrak{p} означает, что $f \in \mathfrak{p}$ задают покрытие T открыто-замкнутыми множествами. Так как T компактно, то из него можно выбрать конечное подпокрытие, и, воспользовавшись формулой включений-исключений, получить, что $1 \in \mathfrak{p}$ — противоречие.

Замкнутость θ_T . Следует из того, что θ_T — непрерывное отображение из компактного пространства в хаусдорфово. \square

Замечание 6. Естественные преобразования ρ и θ удовлетворяют треугольным тождествам (упражнение). То есть мы построили не просто эквивалентность, а *adjoint equivalence*.

Лемма Шуры-Буры

В этом подразделе доказывается лемма Шуры-Буры и, как следствие, эквивалентность двух определений пространств Стоуна: как компактных тотально сепарированных топологических пространств и как компактных хаусдорфовых вполне несвязных топологических пространств.

Компоненты связности и квазикомпоненты

Соглашение 2 (ДВОЕТОЧИЕ). В этом подразделе \mathbb{F}_2 будет рассматриваться как двухточечное дискретное топологическое пространство.

Определение 10 (СВЯЗНОСТЬ). Топологическое пространство X называется *связным*, если образ любого непрерывного отображения из X в \mathbb{F}_2 одноточечный.

Наблюдение 1. Топологическое пространство X связно тогда и только тогда, когда оно непустое и не представляется в виде копроизведения двух непустых топологических пространств.

Определение 11 (СВЯЗНЫЕ КОМПОНЕНТЫ). Пусть X — топологическое пространство. Тогда максимальные по включению связные подмножества пространства X называются связными компонентами X .

Наблюдение 2. Пусть X — топологическое пространство, а $x \in X$ — его элемент. Тогда объединение связных подмножеств X , содержащих x , связно, и связные компоненты X образуют разбиение X .

Определение 12 (КВАЗИКОМПОНЕНТЫ). Пусть X — топологическое пространство. Тогда *квазикомпонентами* X называются слои отображения $x \mapsto (f(x))_{f \in X^\vee} : X \rightarrow \mathbb{F}_2^{\times X^\vee}$, где $X^\vee := \text{Hom}_{\text{Top}}(X, \mathbb{F}_2)$.

Наблюдение 3. Пусть X — топологическое пространство. Тогда любая компонента X содержится в какой-то квазикомпоненте X .

Наблюдение 4. Пусть X — топологическое пространство, а V — квазикомпонента X . Тогда V совпадает с пересечением всех открыто-замкнутых подмножеств X , содержащих V . В частности, V замкнуто.

Определение 13 (ВПОЛНЕ НЕСВЯЗНОСТЬ). Топологическое пространство называется *вполне несвязным* (англ. *totally disconnected*), если все его компоненты связности одноточечные.

Определение 14 (ТОТАЛЬНАЯ СЕПАРИРОВАННОСТЬ). Топологическое пространство называется *тотально сепарированным* (англ. *totally separated*), если все его квазикомпоненты одноточечные.

Наблюдение 5. Тотальная сепарированность влечёт хаусдорфовость.

Квазикомпоненты компактного хаусдорфова пространства

Теорема 3 (ЛЕММА ШУРЫ-БУРЫ). Если X — компактное хаусдорфово топологическое пространство, то квазикомпоненты X связны.

Доказательство. Докажем от противного. Пусть C — квазикомпонента. Пусть она не связна. Так как C — замкнутое множество, то это означает, что C представляется в виде дизъюнктного объединения двух непустых замкнутых в X множеств C' и C'' . Так как компактное хаусдорфово пространство нормально, то C' и C'' отделяются дизъюнктными открытыми множествами $U' \supset C'$ и $U'' \supset C''$. Множество C , как

квазикомпонента, является пересечением некоего семейства открыто-замкнутых множеств $(O_\alpha)_{\alpha \in \Omega}$: $C = \bigcap_{\alpha \in \Omega} O_\alpha \subset U$, где $U := U' \cup U''$. Переходя к дополнениям, получаем покрытие $\bigcup_{\alpha \in \Omega} O_\alpha^c \supset U^c$. Так как U^c — замкнутое подмножество компактного пространства, то оно компактно, и мы можем выбрать конечное подпокрытие и снова перейти к дополнениям: $C \subset \bigcap_{i \in I} O_i \subset U$, где $I \subset \Omega$ — конечное подмножество. Тогда $O := \bigcap_{i \in I} O_i$ открыто-замкнуто, а $U' \cap O$ и $U'' \cap O$ — два дизъюнктивных открыто-замкнутых множества, содержащих C' и C'' соответственно, что невозможно, так как C — квазикомпонента. \square

Следствие 1. *Для компактных хаусдорфовых топологических пространств компоненты совпадают с квазикомпонентами.*

Следствие 2. *Компактное топологическое пространство тотально сепарировано тогда и только тогда, когда оно вполне несвязно.*

Булевы кольца и булевы алгебры

В этом подразделе мы опишем изоморфизм между категорией булевых колец и категорией булевых алгебр.

Определение 15 (БУЛЕВА АЛГЕБРА). Ограниченная дистрибутивная решётка с дополнениями называется *булевой алгеброй*.

Определение 16 (СИММЕТРИЧЕСКАЯ РАЗНОСТЬ). Пусть \mathcal{B} — булева алгебра с митом $(-) \wedge (-)$, джойном $(-) \vee (-)$ и дополнением $(-)^c$. Тогда определим на \mathcal{B} операцию *симметрической разности* следующей формулой: $(a, b) \mapsto a \triangle b := (a^c \wedge b) \vee (a \wedge b^c) : \mathcal{B} \times \mathcal{B} \rightarrow \mathcal{B}$.

Наблюдение 6 (СВОБОДНОЕ БУЛЕВО КОЛЬЦО). Пусть I — множество. Тогда $\mathbb{F}_2[X_i \mid i \in I] / (X_i^2 - X_i)_{i \in I}$ — это свободное булево кольцо на I .

Наблюдение 7 (СВОБОДНАЯ БУЛЕВА АЛГЕБРА). Пусть I — множество. Тогда булева подалгебра в $\text{Hom}_{\text{Sets}}(\mathbb{F}_2^{\times I}, \mathbb{F}_2)$, то есть в множестве подмножеств $\mathbb{F}_2^{\times I}$, порождённая образом канонического отображения $I \rightarrow \text{Hom}_{\text{Sets}}(\mathbb{F}_2^{\times I}, \mathbb{F}_2)$, является свободной булевой алгеброй на I . Она будет обозначаться $\text{Hom}_{\text{Top}}(\mathbb{F}_2^{\times I}, \mathbb{F}_2)$, так как это и есть $\text{Hom}_{\text{Top}}(\mathbb{F}_2^{\times I}, \mathbb{F}_2)$.

Теорема 4 (БУЛЕВО КОЛЬЦО БУЛЕВОЙ АЛГЕБРЫ). Пусть \mathcal{B} — булева алгебра. Тогда \mathcal{B} с операциями сложения $(a, b) \mapsto a \triangle b : \mathcal{B} \times \mathcal{B} \rightarrow \mathcal{B}$ и умножения $(a, b) \mapsto a \wedge b : \mathcal{B} \times \mathcal{B} \rightarrow \mathcal{B}$ является булевым кольцом.

Доказательство. Так как в записях стандартных аксиом булева кольца участвуют не более 3 элементов, то достаточно проверить их для \mathcal{B} вида $\text{Hom}_{\text{Top}}(\mathbb{F}_2^{\times n}, \mathbb{F}_2)$, где $n \leq 3$, а для такого \mathcal{B} они очевидны. \square

Теорема 5 (БУЛЕВО КОЛЬЦО СВОБОДНОЙ БУЛЕВОЙ АЛГЕБРЫ). Пусть I — множество, R_I — свободное булево кольцо на I , а \mathcal{B}_I — свободная булева алгебра на I . Тогда канонический гомоморфизм булевых колец $\varphi_I : (R_I, +, \cdot) \rightarrow (\mathcal{B}_I, \triangle, \cap)$ под множеством I биективен.

Доказательство. Так как $R_I = \text{colim}_{J \in \Lambda(I)} R_J$ и $\mathcal{B}_I = \text{colim}_{J \in \Lambda(I)} \mathcal{B}_J$, где $\Lambda(I) = \{J \in 2^I \mid \text{card}(J) < \infty\}$, то достаточно доказать теорему для конечного I . Если I конечно, то $\text{card}(R_I) = \text{card}(\mathcal{B}_I) < \infty$, а потому биективность φ_I следует из сюръективности φ_I , которая очевидна. \square

Теорема 6 (БУЛЕВА АЛГЕБРА БУЛЕВА КОЛЬЦА). Пусть R — булево кольцо. Тогда R с операциями мита $(a, b) \mapsto ab : R \times R \rightarrow R$, джойна $(a, b) \mapsto a + ab + b : R \times R \rightarrow R$, дополнения $a \mapsto 1 - a : R \rightarrow R$, нулём 0 и единицей 1 является булевой алгеброй.

Доказательство. Так как в записях стандартных аксиом булевой алгебры участвуют не более 3 элементов, то достаточно проверить их для R вида $\mathbb{F}_2[X_1, \dots, X_n]/(X_1^2 - X_1, \dots, X_n^2 - X_n)$, где $n \leq 3$, а для такого R всё следует из теоремы 5. \square

Наблюдение 8 (БУЛЕВЫ КОЛЬЦА И БУЛЕВЫ АЛГЕБРЫ). Конструкции из теорем 4 и 6 задают взаимно обратные изоморфизмы между категорией булевых колец и категорией булевых алгебр, что можно проверить с помощью канонической биекции из теоремы 5.

8.3. Измеримость по Каратеодори

Общие определения

Определение 1 (ПОРОЖДЕНИЕ ВНЕШНЕЙ МЕРЫ). Пусть X — множество, а $f : \mathcal{S} \rightarrow [0, +\infty]$, где $\mathcal{S} \subset 2^X$, — функция. Тогда внешняя мера

$E \mapsto \inf_{C \in 2^S} (E \subset \bigcup_{C \in \mathcal{C}} C) \wedge (\text{card}(C) \leq \aleph_0) \sum_{C \in \mathcal{C}} f(C) : 2^X \rightarrow [0, +\infty]$ называется внешней мерой, порождённой функцией f .

Наблюдение 1. Пусть X — множество, $f : S \rightarrow [0, +\infty]$, где $S \subset 2^X$, — функция, а $\mu^* : 2^X \rightarrow [0, +\infty]$ — внешняя мера, порождённая f . Тогда функция $\mu^*|_S$ тоже порождает внешнюю меру μ^* .

Определение 2 (ОГРАНИЧЕНИЕ ВНЕШНЕЙ МЕРЫ). Пусть X — множество, $\mu^* : 2^X \rightarrow [0, +\infty]$ — внешняя мера на X , а $S \subset X$ — подмножество X . Тогда функция $\mu^*|_{2^S} : 2^S \rightarrow [0, +\infty]$ является внешней мерой на S , которая называется *ограничением внешней меры μ^* на S* .

Определение 3 (ОГРАНИЧЕНИЕ σ -АЛГЕБРЫ). Пусть X — множество, $\mathcal{A} \subset 2^X$ — σ -алгебра на X , а $S \subset X$ — подмножество X . Тогда множество $\mathcal{A}|_S := \text{Im}(A \mapsto A \cap S : \mathcal{A} \rightarrow 2^S)$ является σ -алгеброй на S , которая называется *ограничением σ -алгебры \mathcal{A} на S* .

Наблюдение 2. Пусть (X, μ^*) — множество с внешней мерой, а \mathcal{A} — σ -алгебра на X . Тогда если функция μ^* аддитивна на \mathcal{A} , то функция μ^* счётно-аддитивна на \mathcal{A} .

Конструкция Каратеодори

Определение 4 (ИЗМЕРИМОСТЬ ПО КАРАТЕОДОРИ). Пусть (X, μ^*) — множество с внешней мерой. Тогда множество подмножеств X , *измеримых по Каратеодори* относительно μ^* , определяется следующим образом: $\mathfrak{K}(\mu^*) := \{A \in 2^X \mid \mu^*(S) = \mu^*(S \cap A) + \mu^*(S \setminus A) \text{ для всех } S \in 2^X\}$.

Наблюдение 3 (ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ИЗМЕРИМОСТИ ПО КАРАТЕОДОРИ). Пусть (X, μ^*) — множество с внешней мерой, а $\mathcal{A} := \mathfrak{K}(\mu^*)$. Тогда \mathcal{A} является σ -алгеброй на X , такой что $\mu^*|_{2^S}$ аддитивна на $\mathcal{A}|_S$ для любого $S \subset X$, и \mathcal{A} содержит любую σ -алгебру на X с таким свойством.

Замечание 1. Замкнутость σ -алгебры относительно дополнений существенна для наблюдения 3.

Наблюдение 4. Пусть (X, μ^*) — множество с внешней мерой, а $S \subset 2^X$ — множество подмножеств X , такое что функция $\mu^*|_S$ порождает μ^* . Тогда $\mathfrak{K}(\mu^*) = \{A \in 2^X \mid \mu^*(S) = \mu^*(S \cap A) + \mu^*(S \setminus A) \text{ для всех } S \in \mathcal{S}\}$.

Глава 9

Группы перестановок

9.1. Группы и их действия

Теорема об орбитах и стабилизаторах

Определение 1 (ТРАНЗИТИВНОСТЬ). Действие группы на множестве называется *транзитивным действием* или *орбитой*, если фактор множества по этому действию одноточечный.

Наблюдение 1 (РАЗЛОЖЕНИЕ НА ОРБИТЫ). Множество, снабжённое действием группы, однозначно представляется в виде дизъюнктного объединения орбит этой группы.

Теорема 1 (ТЕОРЕМА ОБ ОРБИТАХ И СТАБИЛИЗАТОРАХ). Пусть G — группа, \mathcal{S} — частично упорядоченное множество подгрупп группы G , а \mathcal{O} — категория пунктированных орбит группы G . Тогда стандартные функторы $G/(-) : \mathcal{S} \rightrightarrows \mathcal{O} : \text{Stab}$ — функторы множества правых смежных классов и стабилизатора отмеченной точки — являются квазиобратными эквивалентностями категорий.

Доказательство. Единственная относительно нетривиальная часть доказательства — это построение естественного изоморфизма $(G/(-)) \circ \text{Stab} \xrightarrow{\sim} \text{Id}$, с необходимостью единственного. Пусть X — G -орбита с отмеченной точкой $x \in X$, а $H := \text{Stab}_G(x)$. Для любого $g \in G$ отображим смежный класс $gH \in G/H$ в точку $gHx = gx \in X$. Корректность определения этого отображения и его G -эквивариантность очевидны. \square

Следствие 1. Пусть G — группа, а $H \subset G$ — её подгруппа. Тогда действие G на G/H левым умножением примитивно тогда и только тогда, когда H — максимальная собственная подгруппа в G .

Замечание 1. В обозначениях теоремы 1 группа G действует на \mathcal{O} эндифункторами замены точки и действует на \mathcal{S} сопряжением. Функтор Stab является G -эквивариантным относительно этих действий.

Замечание 2. Группа автоморфизмов плоскости, скажем, аффинных или метрических, — это прекрасный пример для иллюстрации базовых понятий теории групп.

Приложения теоремы об орбитах и стабилизаторах

Наблюдение 2 (РАЗЛОЖЕНИЕ ГРУППЫ НА ДВОЙНЫЕ СМЕЖНЫЕ КЛАССЫ). Пусть G — группа, а $K, H \subset G$ — её подгруппы. Рассмотрев действие группы $K \times H^\circ$ на множестве G двусторонним умножением, получаем разложение G на двойные смежные классы KgH , где $g \in G$.

Наблюдение 3 (ФОРМУЛА ФРОБЕНИУСА ДЛЯ ИНДЕКСА). В условиях наблюдения 2 каждый KgH является дизъюнктным объединением $|K : K \cap gHg^{-1}|$ элементов G/H , поскольку KgH — это объединение элементов орбиты точки $gH \in G/H$ под действием K на G/H левым умножением, при этом $\text{Stab}_K(gH) = K \cap \text{Stab}_G(gH) = K \cap gHg^{-1}$.

Следствие 2 (ФОРМУЛА ПРОИЗВЕДЕНИЯ). В условиях наблюдения 2, если K и H конечны, то $|KH| = |H||K : K \cap H| = |H||K|/|K \cap H|$.

Теорема 2. Пусть G — группа, а $H, K \subset G$ — её подгруппы. Тогда выполняется неравенство $|G : H \cap K| \leqslant |G : H||G : K|$.

Доказательство. Стабилизатор точки $(H, K) \in (G/H) \times (G/K)$ относительно очевидного действия G на $(G/H) \times (G/K)$ левым умножением равен $H \cap K$, при этом $|(G/H) \times (G/K)| = |G : H||G : K|$. \square

Теорема 3. Пусть G — конечная группа, а $H \subset G$ — её подгруппа, такая что простые делители порядка H не меньше индекса H . Тогда H нормальна.

Доказательство. Подгруппа H нормальна тогда и только тогда, когда все орбиты действия H левым умножением на правых смежных классах G по H одноточечные. Теперь воспользуемся тем, что сумма порядков орбит, одна из которых одноточечная, равна индексу H , а порядок каждой орбиты делит порядок H . \square

Теорема 4 (ТЕОРЕМЫ СИЛОВА).

- а) В конечной группе порядка $p^n t$, где t не делится на простое p , существует подгруппа порядка p^n , называемая силовской p -подгруппой.
- б) Все подгруппы порядка p^k для какого-то k , называемые p -подгруппами, лежат в силовских p -подгруппах, которые все сопряжены.
- в) Если n_p — количество силовских p -подгрупп, то $n_p \equiv 1 \pmod{p}$.

Доказательство.

- а) В нашей группе количество подмножеств мощности p^n не делится на p : $(1+x)^{p^n t} \equiv (1+x^{p^n})^t \equiv 1 + tx^{p^n} + \dots \pmod{p}$. Группа действует умножением на множестве таких подмножеств, причём порядок по крайней мере одной орбиты не делится на p . Стабилизатор точки из этой орбиты имеет порядок p^n .
- б) Если мы посмотрим на действие произвольной p -подгруппы на этой орбите, то порядок какой-то из её орбит не будет делиться на p , то есть она будет одноточечной.
- в) Рассмотрим действие силовской p -подгруппы P сопряжением на множестве силовских p -подгрупп. У неё только одна одноточечная орбита: сама P , так как если P фиксирует другую силовскую p -подгруппу H , то PH — p -подгруппа, строго большая P , что невозможно. \square

Замечание 3. Формулировка и доказательство теорем Силова в практически неизменном виде скопированы из старых версий этих записок.

Лемма 1. Пусть I — конечное множество, а $\lambda \in \mathbb{Q}$. Тогда у уравнения $\sum_{i \in I} 1/X_i = \lambda$ конечное число нулей в \mathbb{N}_1^I .

Доказательство. Случаи $I = \emptyset$ или $\lambda \leq 0$ очевидны. Пусть $I \neq \emptyset$, $\lambda > 0$, а $(x_i)_{i \in I} \in \mathbb{N}_1^I$ — ноль уравнения. Минимальный из x_i не может быть строго больше $|I|/|\lambda|$. Подстановка целых чисел из интервала $(0, |I|/|\lambda|]$ в уравнение $\sum_{i \in I} 1/X_i = \lambda$ вместо одной из переменных даёт конечное число уравнений того же типа на остальные переменные, и лемма доказывается индукцией по $|I|$. \square

Теорема 5 (ТЕОРЕМА Э. ЛАНДАУ). *Порядок конечной группы с фиксированным числом классов сопряжённости элементов ограничен.*

Доказательство. Порядок группы равен сумме порядков классов сопряжённости, при этом класс сопряжённости единицы одноточечный. Поделив соответствующее уравнение на порядок группы, мы выразим число один в виде суммы обратных к натуральным числам, одно из которых равно порядку группы. Теперь воспользуемся леммой 1. \square

Теорема 6 («ЛЕММА БЕРНСАЙДА»). *Пусть G — конечная группа, транзитивно действующая на множестве X . Тогда среднее число фиксированных точек элементов G равно единице: $\frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} |X^g| = 1$.*

Доказательство. Множество $\{(g, x) \in G \times X \mid gx = x\}$, очевидно, биективно и $\bigsqcup_{g \in G} \{x \in X \mid gx = x\}$, и $\bigsqcup_{x \in X} \{g \in G \mid gx = x\}$, а второе из этих множеств равномошно G . \square

Следствие 3 (ТЕОРЕМА ЖОРДАНА). *Пусть G — группа, транзитивно и нетривиально действующая на конечном множестве X . Тогда существует $g \in G$, который не фиксирует ни одной точки X .*

Доказательство. Пусть G' — это образ G в конечной группе $\text{Sym}(X)$. Так как $1 \in G'$ фиксирует $|X| \geq 2$ точек X , то, согласно «лемме Бернсайда», существует $g' \in G'$, который не фиксирует ни одной точки X . Возьмём в качестве $g \in G$ любой прообраз g' . \square

Замечание 4. Теорему Жордана можно количественно усилить, см. теорему 5 в статье [7].

Замечание 5. Теорему Жордана можно переформулировать так: вложение собственной подгруппы конечного индекса не может быть сюръективным на классах сопряжённости.

Замечание 6. Не биективное вложение бесконечных множеств $J \rightarrow I$ индуцирует не биективное вложение групп финитарных перестановок $\text{FSym}(J) \rightarrow \text{FSym}(I)$, которое биективно на классах сопряжённости.

9.2. Простота больших знакопеременных групп

Наблюдение 1. Если умножить перестановку на транспозицию, соединяющую элементы разных циклов, то эти циклы сольются, а если на соединяющую элементы одного цикла, то этот цикл разложится на два. Это рассуждение сразу даёт разложение перестановки в произведение транспозиций, определение знака и его корректность.

Наблюдение 2. Ограничим действие конечной нетривиальной симметрической группы на себе сопряжением до действия знакопеременной группы. Тогда орбиты перестановок, у которых в цикленном разложении присутствует цикл чётной длины или два цикла одинаковой нечётной длины, не изменятся, так как их стабилизаторы содержат нечётные перестановки, а орбиты перестановок, состоящих из циклов попарно различной нечётной длины, распадутся на две равномошные.

Лемма 1. *Группа $\text{Alt}(5)$ проста.*

Доказательство. В $\text{Alt}(5)$ содержатся перестановки цикленных типов (5) , $(3, 1, 1)$, $(2, 2, 1)$, $(1, 1, 1, 1, 1)$. Соответствующие классы сопряжённости имеют порядки 12, 12, 20, 15, 1. Никакая нетривиальная сумма записей этого списка, включающая 1, не делит $|\text{Alt}(5)| = 60$. \square

Наблюдение 3 (ГРУППА ВРАЩЕНИЙ ДОДЕКАЭДРА). Пусть G — это группа вращений додекаэдра. Визуально очевидно, что порядки классов сопряжённости в G равны 12, 12, 20, 15, 1. Отсюда следует, что группа G простая, откуда, в свою очередь, следует, что гомоморфизм $G \rightarrow \text{Sym}(5)$ действия G на своих силовских 2-подгруппах инъективен. Его образ имеет индекс 2, а потому совпадает с $\text{Alt}(5) \subset \text{Sym}(5)$.

Теорема 1. *Группа $G := \text{Alt}(\Omega)$, где $5 \leq |\Omega| < \infty$, проста.*

Доказательство. Докажем теорему индукцией по $|\Omega|$. Случай $|\Omega| = 5$ — это лемма 1. Пусть $|\Omega| \geq 6$, а $\sigma \in G \setminus \{1\}$. Нам нужно доказать,

что сопряжённые к σ в G порождают G . Так как центр G тривиален и G порождена 3-циклами, то существует 3-цикл $\tau \in G$, такой что $\gamma := [\sigma, \tau] = \sigma(\tau\sigma^{-1}\tau^{-1}) \neq 1$. Заметим, что γ является произведением 3-циклов $\tau' := \sigma\tau\sigma^{-1}$ и τ^{-1} . Если τ' и τ^{-1} не независимы, то γ лежит в стабилизаторе точки из Ω , и мы победили. Если τ' и τ^{-1} независимы, то, согласно наблюдению 2, перестановка $\gamma' := \tau'\tau$ сопряжена γ в G . Тогда $\gamma\gamma' = \tau'\tau^{-1}\tau'\tau = (\tau')^2$ — 3-цикл, и мы снова победили. \square

9.3. Автоморфизмы симметрических групп

Аutomорфизмы группы $\text{Sym}(\Omega)$ при $|\Omega| \neq 6$

Определение 1 (СИММЕТРИЧЕСКАЯ ГРУППА). Пусть Ω — множество. Тогда группа автоморфизмов Ω как множества называется *симметрической группой* и обозначается через $\text{Sym}(\Omega)$.

Определение 2 (ГРУППА ФИНИТАРНЫХ ПЕРЕСТАНОВОК). Пусть Ω — множество. Тогда подгруппа в группе $\text{Sym}(\Omega)$, которая состоит из всех перестановок $\sigma \in \text{Sym}(\Omega)$, таких что множество фиксированных точек σ имеет конечное дополнение, обозначается через $\text{FSym}(\Omega)$ и называется группой *финитарных перестановок*.

Обозначение 1. Если $n \in \mathbb{N}_0$, то $\text{Sym}(n) := \text{Sym}(\{1, 2, \dots, n\})$.

Соглашение 1 (ИНВОЛЮЦИЯ). В этом разделе *инволюцией* называется нетривиальная перестановка, которая обратна сама себе.

Соглашение 2 (ЗВЕЗДА). В этом подразделе *звездой* называется произвольное множество попарно не коммутирующих транспозиций в какой-то фиксированной симметрической группе.

Наблюдение 1. Если $k \geq 2$ и $k \neq 3$, то у элементов k -элементной звезды всегда есть ровно одна общая подвижная точка (см. рис. 9.2а).

Наблюдение 2. Максимальные звёзды в $\text{Sym}(4)$ делятся на две орбиты относительно действия $\text{Sym}(4)$, индуцированного сопряжением. Звёзды из одной орбиты порождают $\text{Sym}(4)$, а из другой — нет.

Теорема 1. Если автоморфизм $\Phi' \in \text{Aut}(\text{FSym}(\Omega))$, где Ω — произвольное множество, переводит транспозиции в транспозиции, то Φ' индуцирован каким-то элементом $\varphi \in \text{Sym}(\Omega)$.

Доказательство. Пусть $|\Omega| \geq 3$. Тогда Φ' задаёт перестановку $\varphi \in \text{Sym}(\Omega)$ через действие Φ' на порождающих звёздах, эквивариантно биективных элементам Ω . При этом, так как транспозиции — это в точности пересечения пар различных порождающих звёзд, то Φ' и φ одинаково действуют на транспозиции, а потому и на все элементы $\text{FSym}(\Omega)$. Случаи $|\Omega| = 0, 1, 2$ разбираются отдельно. \square

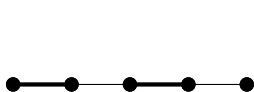
Наблюдение 3. Пусть Ω — множество, такое что $|\Omega| \neq 2$. Тогда централизатор $\text{FSym}(\Omega)$ в $\text{Sym}(\Omega)$ тривиален.

Лемма 1. Если Ω — множество, а $\Psi \in \text{Aut}(\text{Sym}(\Omega))$ — автоморфизм, продолжающий автоморфизм $\Psi' := \text{Id} \in \text{Aut}(\text{FSym}(\Omega))$, то $\Psi = \text{Id}$.

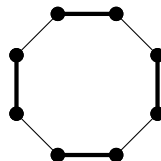
Доказательство. Можно предположить, что $|\Omega| \neq 2$. Тогда, согласно наблюдению 3, имеем вложение $\iota : \text{Sym}(\Omega) \rightarrow \text{Aut}(\text{FSym}(\Omega))$, $\sigma \mapsto {}^\sigma(-)$, такое что $\iota(\Psi(\sigma)) = \Psi' \circ \iota(\sigma) \circ \Psi'^{-1} = \iota(\sigma)$ для любого $\sigma \in \text{Sym}(\Omega)$. \square

Теорема 2. Если автоморфизм $\Phi \in \text{Aut}(\text{Sym}(\Omega))$, где Ω — произвольное множество, переводит транспозиции в транспозиции, то Φ индуцирован каким-то элементом $\varphi \in \text{Sym}(\Omega)$.

Доказательство. Следует из теоремы 1 и леммы 1, так как, очевидно, $\Phi(\text{FSym}(\Omega)) = \text{FSym}(\Omega)$. \square



а. С фиксированными точками



б. Без фиксированных точек

Рис. 9.1. Примеры пар сопряжённых инволюций

Теорема 3. Пусть Ω — множество, такое что $|\Omega| \neq 6$. Тогда любой автоморфизм группы $\text{Sym}(\Omega)$ является внутренним автоморфизмом.

Доказательство. Согласно теореме 2 достаточно доказать, что любой автоморфизм группы $\text{Sym}(\Omega)$ переводит транспозиции в транспозиции. Если Ω конечно, то в классе сопряжённости инволюций, элементы которого имеют фиксированные точки, есть пара элементов, расположенных как на рис. 9.1a, а в классе, элементы которого не имеют фиксированных точек, — как на рис. 9.1b. Отсюда ясно, что если $|\Omega| \neq 4, 6$, то в любом классе инволюций, кроме класса транспозиций, есть пара элементов, порядок произведения которых строго больше 3. А в $\text{Sym}(4)$ все инволюции без фиксированных точек попарно коммутируют, в отличие от транспозиций. \square

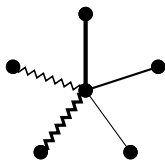
Аutomорфизмы группы $\text{Sym}(6)$

Соглашение 3 (Длинная инволюция). В этом подразделе *длинной инволюцией* называется инволюция без фиксированных точек.

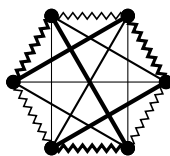
Соглашение 4 (Пятёрка). В этом подразделе пятёрки попарно не коммутирующих длинных инволюций в $\text{Sym}(6)$ называются просто *пятёрками*.

Наблюдение 4. Длинные инволюции в $\text{Sym}(6)$ коммутируют тогда и только тогда, когда у них есть общий цикл.

Наблюдение 5. Группа $\text{Sym}(6)$ транзитивно действует на множестве упорядоченных пар не коммутирующих длинных инволюций в $\text{Sym}(6)$.



а. Цикленного типа $(2, 1^4)$



б. Цикленного типа (2^3)

Рис. 9.2. Пятёрки попарно не коммутирующих инволюций в $\text{Sym}(6)$

Наблюдение 6. Любая пара не коммутирующих длинных инволюций в $\text{Sym}(6)$ однозначно достраивается до пятёрки (см. рис. 9.2b).

Лемма 2. *Группа элементов $\text{Sym}(6)$, переводящих фиксированную пятёрку в себя, имеет порядок 120 и реализует в точности все перестановки элементов пятёрки.*

Доказательство. Согласно наблюдению 5 любую упорядоченную пару различных элементов пятёрки можно перевести в любую другую упорядоченную пару различных элементов пятёрки действием элемента $\text{Sym}(6)$, при этом, согласно наблюдению 6, пятёрка автоматически перейдёт в себя. Стабилизатор в $\text{Sym}(6)$ упорядоченной пары элементов пятёрки имеет порядок 6 и реализует в точности все перестановки оставшихся трёх элементов пятёрки (см. рис. 9.2b). \square

Наблюдение 7. Согласно наблюдениям 5 и 6 группа $\text{Sym}(6)$ транзитивно действует на пятёрках. С учётом леммы 2 количество пятёрок равно 6.

Наблюдение 8. Канонический гомоморфизм из $\text{Sym}(6)$ в группу перестановок шести пятёрок инъективен, так как в $\text{Sym}(6)$ нет нетривиальной нормальной подгруппы индекса, кратного шести.

Замечание 1. Проверить, что в $\text{Sym}(6)$ нет нетривиальной нормальной подгруппы индекса, кратного шести, можно посмотрев на список 1, 15, 15, 40, 40, 45, 90, 90, 120, 120, 144 порядков классов сопряжённости в $\text{Sym}(6)$ и заметив, что включающая 1 нетривиальная сумма записей списка не может принадлежать списку 120, 60, 40, 30, ... делителей числа $|\text{Sym}(6)|/6$.

Наблюдение 9. Действие транспозиции из $\text{Sym}(6)$ на пятёрку никогда не переводит её в себя (см. рис. 9.2b), а потому транспозиции переходят в перестановки шести пятёрок, не имеющие фиксированной точки.

Теорема 4. *Группа внешних автоморфизмов группы $\text{Sym}(6)$ имеет порядок 2.*

Доказательство. Мы уже построили нетривиальный элемент в группе внешних автоморфизмов $\text{Sym}(6)$. Осталось заметить, что любой внешний автоморфизм $\text{Sym}(6)$ обязан переводить инволюции цикленного типа $(2, 1^4)$ в инволюции цикленного типа (2^3) , и наоборот, откуда, согласно теореме 2, следует, что произведение любых двух внешних автоморфизмов $\text{Sym}(6)$ является внутренним автоморфизмом $\text{Sym}(6)$. \square

Наблюдение 10. Пятёрки попарно не коммутирующих инволюций без фиксированных точек на множестве пятёрок попарно не коммутирующих инволюций без фиксированных точек на шестиэлементном множестве эквивариантно биективны элементам исходного множества.

Глава 10

Модули над некоммутативными кольцами

10.1. Разложения и идемпотенты

Наблюдение 1. Пусть $R \cong \bigoplus_{i \in I} R_i$, где $|I| < \infty$, — ассоциативное унитарное кольцо, разложенное в конечное произведение колец, а M — R -модуль. Тогда $M \cong R \otimes_R M \cong (\bigoplus_{i \in I} R_i) \otimes_R M \cong \bigoplus_{i \in I} (R_i \otimes_R M)$. Так как для любого $i \in I$ образ $R_i \otimes_R M$ в M равен $R_i M$, то $M \cong \bigoplus_{i \in I} R_i M$. Иначе говоря, модуль над конечным произведением колец является прямой суммой образов действий координатных единиц.

Наблюдение 2. Унитарное кольцо $\mathbb{Z}^{\times I}$, где I — конечное множество, можно задать образующими e_i , где $i \in I$, соответствующими координатным единицам, и соотношениями $e_i^2 = e_i$ для любого $i \in I$, $e_i e_j = 0$ для любых $i, j \in I$, таких что $i \neq j$, и $\sum_{i \in I} e_i = 1$. При этом один из e_i и последнее соотношение можно убрать. В частности, существует очевидный изоморфизм $\mathbb{Z}[X]/(X^2 - X) \xrightarrow{\sim} \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$, $X \mapsto (1, 0)$.

Пример 1. Пусть M — модуль над ассоциативным унитарным кольцом R , а $x : M \rightarrow M$ — его идемпотентный эндоморфизм. Тогда, согласно наблюдению 2, x индуцирует на M структуру модуля над кольцом

$(\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}) \otimes_{\mathbb{Z}} R \cong R \times R$, а потому, согласно наблюдению 1, и разложение M в прямую сумму двух R -подмодулей.

Пример 2. Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, рассматриваемое как бимодуль над собой, а $x \in \text{End}_{R \otimes_{\mathbb{Z}} R^{\circ}\text{-mod}}(R) \cong \mathbb{Z}(R)$ — его идемпотентный эндоморфизм. Тогда, согласно примеру 1, x индуцирует разложение R в прямую сумму двух двусторонних идеалов.

Наблюдение 3. Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, M — R -модуль, I и J — конечные множества, а $E := \text{End}_{R\text{-mod}}(M)$. Тогда пара гомоморфизмов колец $\mathbb{Z}^I \rightarrow E$ и $\mathbb{Z}^J \rightarrow E$, образы которых поэлементно коммутируют, соответствующих разложениям $M = \bigoplus_{i \in I} V_i$ и $M = \bigoplus_{j \in J} U_j$, индуцирует гомоморфизм колец $\mathbb{Z}^I \otimes_{\mathbb{Z}} \mathbb{Z}^J \cong \mathbb{Z}^{I \times J} \rightarrow E$, соответствующий разложению $M = \bigoplus_{i \in I, j \in J} (V_i \cap U_j)$.

Следствие 1. Если M — модуль над ассоциативным унитарным кольцом R , такой что кольцо $\text{End}_{R\text{-mod}}(M)$ коммутативно, то разложение M в конечную внутреннюю прямую сумму неразложимых подмодулей определено однозначно, если существует.

Следствие 2. Разложение ассоциативного унитарного кольца в конечную внутреннюю прямую сумму неразложимых двусторонних идеалов определено однозначно, если существует.

10.2. Модули над кольцом матриц

Эквивалентность категорий

Теорема 1. Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, а I, J и K — три конечных непустых множества. Тогда гомоморфизм $\rho_{I,J,K} : M_{I,J}(R) \otimes_{M_{J,K}(R)} M_{J,K}(R) \rightarrow M_{I,K}(R)$, $x \otimes y \mapsto xy$ биективен.

Доказательство. Стандартные разложения $M_{I,J}(R) \cong \bigoplus_{i \in I} M_{\{i\},J}(R)$, $M_{J,K}(R) \cong \bigoplus_{k \in K} M_{J,\{k\}}(R)$ и $M_{I,K}(R) \cong \bigoplus_{i \in I, k \in K} M_{\{i\},\{k\}}(R)$ индуцируют разложение $\rho_{I,J,K} = \bigoplus_{i \in I, k \in K} \rho_{\{i\},J,\{k\}}$. Гомоморфизм $\rho_{J,J,J}$ биективен, а потому $\rho_{\text{pt},J,\text{pt}}$ — тоже, а потому $\rho_{I,J,K}$ — тоже. \square

Наблюдение 1. Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, а I — конечное непустое множество. Тогда из теоремы 1 ясно, что функторы

$V \mapsto M_{I, \text{pt}}(R) \otimes_R V : R\text{-mod} \xrightarrow{\sim} M_I(R)\text{-mod} : M_{\text{pt}, I}(R) \otimes_{M_I(R)} U \mapsto U$ задают эквивалентность категорий $R\text{-mod}$ и $M_I(R)\text{-mod}$.

Наблюдение 2. Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, I — конечное непустое множество, U — $M_I(R)$ -модуль, а $(e_{i,j})_{i,j \in I}$ — стандартный базис $M_I(R)$ как R -модуля. Тогда подкольцо $\bigoplus_{i \in I} Re_{i,i} \subset M_I(R)$ задаёт разложение $U = \bigoplus_{i \in I} e_{i,i}U$, причём для любых $i, j \in I$ действие $e_{i,j}$ изоморфно переводит $e_{j,j}U$ в $e_{i,i}U$. Это ещё один способ увидеть эквивалентность категорий $R\text{-mod}$ и $M_I(R)\text{-mod}$.

Некоторые централизаторы в кольце матриц

Следствие 1. Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, а I — конечное непустое множество. Тогда очевидное вложение кольца R^o в $\text{End}_S(R^I)$, где $S := \text{End}_{R\text{-mod}}(R^I)$, биективно.

Доказательство. Заметим, что $\text{End}_R(R) \cong R^o$, и применим эквивалентность из наблюдений 1 и 2. \square

Следствие 2. Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, а I — конечное непустое множество. Тогда очевидное вложение кольца R в $Z_{M_I(R)}(M_I(\mathbb{Z}))$ биективно.

Доказательство. Пусть $S := R^o$. Согласно следствию 1 централизатор $M_I(S)$ в $E := \text{End}_{\mathbb{Z}\text{-mod}}(S^I)$ равен R . С другой стороны, он равен централизатору $M_I(\mathbb{Z})$ в $Z_E(S) \cong M_I(R)$. Иначе говоря, следствие 2 — это переформулировка следствия 1. \square

Следствие 3. Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, а I — конечное непустое множество. Тогда $Z(M_I(R)) \cong Z(R)$, $Z_{M_I(R)}(E_I(\mathbb{Z})) \cong R$. Если $\text{card}(I) > 1$, то $Z(\text{GL}_I(R)) \cong Z(R)^\times$, а $Z(\text{GL}_1(R)) \cong Z(R)^\times$.

Доказательство. Равенство $Z(M_I(R)) = Z(R)$ очевидным образом следует из следствия 2. Централизатор $E_I(\mathbb{Z})$ в $M_I(R)$ совпадает с централизатором \mathbb{Z} -подалгебры в $M_I(R)$, порождённой образом $E_I(\mathbb{Z})$, которая равна образу $M_I(\mathbb{Z})$. Равенство $Z(\text{GL}_1(R)) = Z(R)^\times$ — тавтология, а если $\text{card}(I) > 1$, то $Z(\text{GL}_I(R)) = Z_{M_I(R)}(\mathbb{Z}\langle x \mid x \in \text{GL}_I(R) \rangle)^\times = Z_{M_I(R)}(\mathbb{Z}\langle x \mid x \in E_I(R) \rangle)^\times = Z_{M_I(R)}(M_I(R))^\times = Z(R)^\times$. \square

Замечание 1. Для любого ассоциативного унитарного кольца R выполняется вложение $Z(R)^\times = R^\times \cap Z(R) \subset Z(R^\times)$.

Пример 1. Пусть $R := \mathbb{C}[\rtimes X]$ — это фактор копроизведения ассоциативных унитарных колец \mathbb{C} и $\mathbb{Z}[X]$ по соотношениям $Xa = \bar{a}X$, где $a \in \mathbb{C}$. Тогда $Z(R)^\times = \mathbb{R}^\times \subsetneq Z(R^\times) = \mathbb{C}^\times$.

Замечание 2. Я узнал о примере 1 из ответа [11] на «Mathematics Stack Exchange».

Наблюдение 3. Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, I — конечное множество, а $S := R^{\times I}$. Тогда $\text{End}_{S^{\circ}\text{-mod}}(S) \cong S$, а потому $Z_{M_I(R)}(D_I(\mathbb{Z})) = D_I(R)$.

Идеалы в кольце матриц

Следствие 4. Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, а I — конечное непустое множество. Тогда любой левый идеал в $M_I(R) \cong R^I \otimes_R R^I$ имеет вид $R^I \otimes_R U$, где $U \subset R^I$ — R -подмодуль.

Доказательство. Заметим, что эквивалентность категорий переводит подобъекты в подобъекты, и воспользуемся наблюдением 1 или 2. \square

Следствие 5. Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, а I — конечное непустое множество. Тогда любой двусторонний идеал в $M_I(R)$ имеет вид $M_I(\mathfrak{I})$, где $\mathfrak{I} \subset R$ — двусторонний идеал в R .

Доказательство. Пусть $S := R \otimes_{\mathbb{Z}} R^{\circ}$ и $T := M_I(R) \otimes_{\mathbb{Z}} M_I(R)^{\circ} \cong M_{I \times I}(S)$. Заметим, что эквивалентность из наблюдений 1 и 2 переводит S -модуль R в T -модуль $S^{I \times I} \otimes_S R \cong R^{I \times I} \cong M_I(R)$. \square

Замечание 3. Следствия 4 и 5 можно получить и напрямую, элементарными методами.

Следствие 6. Пусть R — простое ассоциативное унитарное кольцо, а I — конечное непустое множество. Тогда кольцо $M_I(R)$ простое.

10.3. Нётеровы и артиновы модули

Основные определения и теорема Гильберта о базисе

Соглашение 1 (О ГРАДУИРОВКАХ И ФИЛЬТРАЦИЯХ). В этом разделе градуировки и фильтрации абелевых групп — это \mathbb{N}_0 -градуировки и исчерпывающие \mathbb{N}_0 -фильтрации соответственно.

Наблюдение 1. Для любого частично упорядоченного множества Θ следующие два условия эквивалентны: а) Все возрастающие последовательности элементов Θ стабилизируются; б) В любом непустом подмножестве Θ существует максимальный элемент.

Определение 1 (НЁТЕРОВ/АРТИНОВ МОДУЛЬ). Модуль M над ассоциативным унитарным кольцом R называется *нётеровым/артиновым*, если множество подмодулей M удовлетворяет условию стабилизации возрастающих/убывающих соответственно цепочек.

Наблюдение 2. Модуль M над ассоциативным унитарным кольцом R нётеров тогда и только тогда, когда любой подмодуль M конечно порождён.

Наблюдение 3. Пусть M — абелева группа с фильтрацией $(M_i)_{i=0}^\infty$, а $N \subsetneq M$ — её собственная подгруппа с индуцированной фильтрацией $(N_i)_{i=0}^\infty := (N \cap M_i)_{i=0}^\infty$. Тогда индуцированное вложение $\text{gr}(N) = \bigoplus_{i=0}^\infty N_i/N_{i-1} \rightarrow \text{gr}(M) = \bigoplus_{i=0}^\infty M_i/M_{i-1}$ не биективно.

Определение 2. Будем называть градуированный модуль M над градуированным ассоциативным унитарным кольцом R *градуированно-нётеровым/градуированно-артиновым*, если частично упорядоченное множество градуированных подмодулей M удовлетворяет условию стабилизации возрастающих/убывающих соответственно цепочек.

Теорема 1. Пусть R — градуированное ассоциативное унитарное кольцо, а M — фильтрованный R -модуль, такой что присоединённый градуированный R -модуль $\text{gr}(M)$ градуированно-нётеров/градуированно-артинов. Тогда R -модуль M нётеров/артинов соответственно.

Доказательство. Если $N \subset N' \subset N'' \subset N''' \subset \dots$ — строго возрастающая цепочка подмодулей M с индуцированными фильтрациями, то,

согласно наблюдению 3, индуцированная цепочка $\text{gr}(N) \rightarrow \text{gr}(N') \rightarrow \text{gr}(N'') \rightarrow \text{gr}(N''') \rightarrow \dots$ градуированных подмодулей $\text{gr}(M)$ тоже строго возрастающая, и аналогично для убывающих цепочек. \square

Теорема 2. Пусть M — градуированный модуль над градуированным ассоциативным унитарным кольцом R . Тогда R -модуль M нётеров/артинов тогда и только тогда, когда R -модуль M градуированно-нётеров/градуированно-артинов соответственно.

Доказательство. Часть «только тогда» очевидна, докажем часть «тогда». Градуировка на M индуцирует фильтрацию на M , такую что присоединённый градуированный R -модуль $\text{gr}(M)$ градуированно изоморфен M . Осталось применить теорему 1. \square

Наблюдение 4. Пусть Θ — частично упорядоченное множество, удовлетворяющее условию стабилизации возрастающих цепочек. Тогда частично упорядоченное множество монотонных отображений $\mathbb{N}_0 \rightarrow \Theta$ тоже удовлетворяет условию стабилизации возрастающих цепочек.

Теорема 3 (ТЕОРЕМА ГИЛЬБЕРТА О БАЗИСЕ). Пусть R — ассоциативное унитарное нётерово слева кольцо. Тогда кольцо $R[X]$ тоже нётерово слева.

Доказательство. На кольце $R[X]$ имеется стандартная градуировка, такая что градуированные левые идеалы в $R[X]$ имеют вид $\bigoplus_{i=0}^{\infty} \mathfrak{I}_i X^i$, где $\mathfrak{I}_0 \subset \mathfrak{I}_1 \subset \mathfrak{I}_2 \subset \dots$ — цепочка левых идеалов в R . Осталось воспользоваться теоремой 2 и наблюдением 4. \square

Теорема 4. Пусть M — модуль над ассоциативным унитарным кольцом R , а N — подмодуль в M . Тогда если модули N и M/N артиновы/нётеровы, то модуль M артинов/нётеров соответственно.

Доказательство. Рассмотрим R как градуированное кольцо, полностью сидящее в градуировке ноль, а M — как модуль с фильтрацией $N \subset M$, после чего применим теорему 1. \square

Прямые суммы и условия конечности

Теорема 5. Пусть M — модуль над ассоциативным унитарным кольцом R , а $\varphi \in \text{End}_{R\text{-mod}}(M)$. Тогда если M артинов/нётеров, а φ инъективен/сюръективен соответственно, то φ биективен.

Доказательство. Если φ инъективен, но не биективен, то $\text{Im}(\varphi) \not\supseteq \text{Im}(\varphi^2) \not\supseteq \text{Im}(\varphi^3) \not\supseteq \dots$ — бесконечная строго убывающая последовательность подмодулей в M , а если φ сюръективен, но не биективен, то $\text{Ker}(\varphi) \subsetneq \text{Ker}(\varphi^2) \subsetneq \text{Ker}(\varphi^3) \subsetneq \dots$ — бесконечная строго возрастающая последовательность подмодулей в M . \square

Замечание 1. Теорема 5 утверждает, что артинов модуль не может быть изоморфен своему собственному подмодулю, а нётеров — своему фактормодулю по нетривиальной подгруппе.

Следствие 1. Пусть M — ненулевой артинов или нётеров модуль над ассоциативным унитарным кольцом R , а I и J — множества, хотя бы одно из которых конечно. Тогда если R -модули $M^{\oplus I}$ и $M^{\oplus J}$ изоморфны, то множества I и J равномощны.

Пример 1. Пусть I — бесконечное множество, R — ассоциативное унитарное кольцо, $V := R^{\oplus I}$, а $E := \text{End}_{R^{\circ}\text{-mod}}(V)$. Тогда левый E -модуль E изоморфен $V^{\times I}$, а потому левые E -модули E и $E^{\oplus 2}$ изоморфны.

Наблюдение 5. Пусть $(M_i)_{i \in I}$ — семейство ненулевых конечно порождённых модулей над ассоциативным унитарным кольцом R . Пусть κ — наименьшая мощность множества образующих R -модуля $\bigoplus_{i \in I} M_i$. Тогда если I бесконечно, то $\kappa = \text{card}(I)$, а если I конечно, то κ — тоже.

Следствие 2. Пусть $(M_i)_{i \in I}$ и $(N_j)_{j \in J}$ — два семейства ненулевых конечно порождённых модулей над ассоциативным унитарным кольцом R , причём множества I и J не равномощны и хотя бы одно из них бесконечно. Тогда R -модули $\bigoplus_{i \in I} M_i$ и $\bigoplus_{j \in J} N_j$ не изоморфны.

Вопрос 1. Пусть M — ненулевой артинов модуль над ассоциативным унитарным кольцом R , а I и J — два не равномощных бесконечных множества. Верно ли, что R -модули $M^{\oplus I}$ и $M^{\oplus J}$ не изоморфны?

Длина модуля и теорема Жордана–Гёльдера

Определение 3 (Композиционный ряд модуля). Пусть M — модуль над ассоциативным унитарным кольцом R . Тогда конечная последовательность $0 = M_0 \subset M_1 \subset \dots \subset M_{n-1} \subset M_n = M$ подмодулей M , такая что для любого $i = 1, \dots, n$ присоединённый R -модуль M_i/M_{i-1}

прост, называется *композиционным рядом* модуля M , а число $n \in \mathbb{N}_0$ называется *длиной* этого композиционного ряда.

Определение 4 (Композиционная длина модуля). Пусть M — модуль над ассоциативным унитарным кольцом R . Тогда *композиционная длина* или просто *длина* M , обозначаемая $l(M)$, определяется как минимальная длина композиционного ряда M , если у M существует композиционный ряд, и ∞ в противном случае.

Теорема 6. *Модуль M над ассоциативным унитарным кольцом R является модулем конечной длины тогда и только тогда, когда он одновременно нётеров и артинов.*

Доказательство. Часть «только тогда» очевидна, докажем часть «тогда». Если $M \neq 0$, то, по нётеровости M , в M существует максимальный собственный подмодуль $M' \subsetneq M$. Если $M' \neq 0$, то, по нётеровости M' , в M' существует максимальный собственный подмодуль $M'' \subsetneq M'$. Так как M артинов, то продолжая таким образом, мы за конечное число шагов дойдём до нулевого модуля и получим композиционный ряд. \square

Теорема 7. *Пусть M — модуль над ассоциативным унитарным кольцом R . Тогда длина M совпадает с супремумом длин конечных строго возрастающих цепочек подмодулей в M .*

Доказательство (из двух частей).

Часть 1. Заметим, что достаточно доказать, что если $l(M) < \infty$, а $N \subsetneq M$ — собственный подмодуль, то $l(N) < l(M)$, потому что из этого утверждения выводится, что длины конечных строго возрастающих цепочек подмодулей не превосходят длины модуля.

Часть 2. Пусть $0 = M_0 \subsetneq M_1 \subsetneq \dots \subsetneq M_n = M$, где $n \in \mathbb{N}_0$, — композиционный ряд. Тогда на N индуцирована фильтрация $(N_i)_{i=0}^n := (N \cap M_i)_{i=0}^n$, причём индуцированное вложение $\text{gr}(N) \rightarrow \text{gr}(M)$ не биективно по наблюдению 3, но биективно на ненулевых градуированных компонентах по лемме Шура. Это значит, что если выкинуть из фильтрации $(N_i)_{i=0}^n$ повторяющиеся элементы, которые там обязательно есть, то получится композиционный ряд для N . \square

Теорема 8 (ТЕОРЕМА ЖОРДАНА – ГЁЛЬДЕРА). Пусть M — модуль над ассоциативным унитарным кольцом R , а $(A_i)_{i=0}^n$ и $(B_i)_{i=0}^n$, где $n \in \mathbb{N}_0$, — два композиционных ряда для M . Тогда набор классов изоморфизма присоединённых факторов фильтрации $(A_i)_{i=0}^n$ совпадает с соответствующим набором для $(B_i)_{i=0}^n$.

$$\begin{array}{ccccccc}
 & A_1 & \hookrightarrow \cdots \hookrightarrow & A_{n-2} & \hookrightarrow & A := A_{n-1} & \\
 & \nearrow & & & \nearrow & & \\
 0 & \hookrightarrow C_1 & \hookrightarrow \cdots \hookrightarrow & C := A \cap B & & & \\
 & \searrow & & & \searrow & & \\
 & B_1 & \hookrightarrow \cdots \hookrightarrow & B_{n-2} & \hookrightarrow & B := B_{n-1} & \\
 & & & & & & \nearrow \\
 & & & & & & M
 \end{array} \quad (1)$$

Доказательство. Докажем теорему индукцией по $l(M)$. Введём обозначения $A := A_{n-1}$, $B := B_{n-1}$ и $C := A \cap B$. Если $A = B$, то достаточно применить индукционное предположение к $A = B$. Пусть $A \neq B$. Тогда $A \neq C \neq B$ и канонические вложения $A/C \rightarrow M/B$ и $B/C \rightarrow M/A$ биективны по лемме Шура. Осталось выбрать произвольный композиционный ряд $(C_i)_{i=0}^{n-2}$ для C , посмотреть на диаграмму (1) и применить индукционное предположение к A и B . \square

10.4. Полупростые модули

Простые модули и лемма Шура

Определение 1 (ПРОСТОЙ МОДУЛЬ). Модуль над ассоциативным унитарным кольцом называется *простым*, если у него ровно один собственный подмодуль — нулевой.

Лемма 1 (ЛЕММА ШУРА). Ненулевой гомоморфизм из простого модуля инъективен, ненулевой гомоморфизм в простой модуль сюръективен. Как следствие, ненулевой гомоморфизм из простого модуля в простой модуль является изоморфизмом.

Доказательство. Следует из рассмотрения ядра и образа гомоморфизма соответственно. \square

Следствие 1. В кольце эндоморфизмов простого модуля ненулевые элементы двусторонне обратимы, то есть оно является телом.

Определение и основные свойства полупростоты

Определение 2 (ПОЛУПРОСТОЙ МОДУЛЬ). Пусть M — модуль над ассоциативным унитарным кольцом R . Тогда M называется *полупростым*, если у любого подмодуля в M есть дополнение в M .

Теорема 1 (ПОЛУПРОСТОТА ПОДФАКТОРОВ). Пусть M — полупростой модуль над ассоциативным унитарным кольцом R . Тогда подмодули и фактормодули M являются полупростыми модулями.

Доказательство (из двух частей).

Полупростота подмодулей. Пусть $\iota_N^M : N \rightarrow M$ и $\iota_L^N : L \rightarrow N$ — инъективные гомоморфизмы. Так как модуль M полупрост, то у $\iota_N^M \circ \iota_L^N$ есть левый обратный, а потому у ι_L^N — тоже.

Полупростота фактормодулей. Пусть $\pi_M^U : M \rightarrow U$ и $\pi_U^V : U \rightarrow V$ — сюръективные гомоморфизмы. Так как модуль M полупрост, то у $\pi_U^V \circ \pi_M^U$ есть правый обратный, а потому у π_U^V — тоже. \square

Лемма 2. Пусть M — ненулевой полупростой модуль над ассоциативным унитарным кольцом R . Тогда в M есть простой подмодуль.

Доказательство. Так как $M \neq 0$, то M содержит ненулевой циклический подмодуль $C \subset M$, который полупрост по теореме 1. В ненулевых циклических модулях есть максимальные собственные подмодули по теореме о существовании максимальных идеалов. Дополнение в C к максимальному собственному подмодулю в C и будет минимальным ненулевым, то есть простым, подмодулем в $C \subset M$. \square

Теорема 2 (КРИТЕРИЙ ПОЛУПРОСТОТЫ). Модуль M над ассоциативным унитарным кольцом R полупрост тогда и только тогда, когда является прямой суммой семейства простых модулей.

Доказательство (из двух частей).

Часть «тогда». Пусть $M = \bigoplus_{i \in I} M_i$ — прямая сумма простых модулей, а $N \subset M$ — подмодуль в M . Воспользовавшись леммой Цорна, рассмотрим максимальное подмножество $J \subset I$, такое что $N \cap \bigoplus_{j \in J} M_j = 0$. Пусть $e \in I$. Если $M_e \not\subset N \oplus (\bigoplus_{j \in J} M_j)$, то $M_e \cap (N \oplus (\bigoplus_{j \in J} M_j)) = 0$, так как это подмодуль в M_e , откуда $e \in J$ — противоречие.

Часть «только тогда». Пусть модуль M полупрост, а $(M_i)_{i \in I}$ — семейство всех простых подмодулей в M . Воспользовавшись леммой Цорна, рассмотрим максимальное подмножество $J \subset I$, для которого сумма $\sum_{j \in J} M_j$ прямая. Если дополнение к $\sum_{j \in J} M_j$ в M ненулевое, то в нём, согласно лемме 2, есть простой подмодуль — противоречие. \square

Наблюдение 1. Пусть M — модуль над ассоциативным унитарным кольцом R , а $(M_i)_{i \in I}$ — семейство простых подмодулей в M , такое что $M = \sum_{i \in I} M_i$. Тогда, согласно теореме 1, модуль M полупрост как гомоморфный образ полупростого, согласно теореме 2, модуля $\bigoplus_{i \in I} M_i$.

Разложение на изотипические компоненты

Определение 3 (ИЗОТИПИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ). Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, M — полупростой R -модуль, а N — простой R -модуль. Тогда сумма всех подмодулей в M , изоморфных N , называется *N -изотипической компонентой* модуля M .

Определение 4 (ИЗОТИПИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ). Полупростой модуль M над ассоциативным унитарным кольцом R , совпадающий с какой-то из своих изотипических компонент, называется *изотипическим*.

Теорема 3 (РАЗЛОЖЕНИЕ НА ИЗОТИПИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ). Если M — полупростой модуль над ассоциативным унитарным кольцом R , то M является прямой суммой своих изотипических компонент.

Доказательство. Пусть $M = \bigoplus_{i \in I} M_i$ — разложение M в прямую сумму простых подмодулей, а $N \subset M$ — произвольный простой подмодуль в M . Тогда, согласно лемме Шура, ограничение стандартной проекции $\pi_e : \bigoplus_{i \in I} M_i \rightarrow M_e$, где $e \in I$, на N равно нулю, если $N \not\subset M_e$. Иначе говоря, $N \subset \bigoplus_{i \in I | M_i \simeq N} M_i \subset \bigoplus_{i \in I} M_i$. \square

Наблюдение 2. Пусть N — простой модуль над ассоциативным унитарным кольцом R . Тогда гомоморфизмы полупростых R -модулей переводят N -изотипические компоненты в N -изотипические компоненты.

Полупростота и условия конечности

Наблюдение 3. Для полупростых модулей свойства артиновости, нётеровости и конечной порождённости совпадают. В частности, ассоциативное унитарное кольцо, полупростое как левый модуль над собой, артиново и нётерово как левый модуль над собой.

Теорема 4. Пусть N — простой модуль над ассоциативным унитарным кольцом R , а I и J — два не равномощных множества. Тогда модули $N^{\oplus I}$ и $N^{\oplus J}$ не изоморфны.

Доказательство. Если I или J бесконечно, то утверждение теоремы следует из рассмотрения минимальных мощностей порождающих множеств (следствие 10.3.2), а если I и J конечны — то из нётеровости или артиновости N (следствие 10.3.1), либо, в качестве альтернативы, можно воспользоваться теоремой Крулля — Шмидта (теорема 10.6.1). \square

Простые кольца и полупростота

Определение 5 (Цоколь модуля). Пусть M — модуль над ассоциативным унитарным кольцом R . Тогда сумма всех простых подмодулей в M называется *цоколем* M .

Теорема 5. Пусть M — модуль над ассоциативным унитарным кольцом R , такой что у M нетривиальный цоколь и M прост как модуль над $R \otimes_{\mathbb{Z}} E$, где $E := \text{End}_{R\text{-mod}}(M)$. Тогда M — изотипический полупростой R -модуль.

Доказательство. Цоколь и его изотипические компоненты являются $(R \otimes_{\mathbb{Z}} E)$ -подмодулями в M . \square

Замечание 1. Обратное к теореме 5 тоже верно: ненулевой изотипический полупростой модуль M над ассоциативным унитарным кольцом R является простым модулем над $R \otimes_{\mathbb{Z}} E$, где $E := \text{End}_{R\text{-mod}}(M)$.

Следствие 2. Пусть R — простое ассоциативное унитарное кольцо, в котором существует минимальный ненулевой левый идеал. Тогда кольцо R полупросто как левый модуль над собой.

Доказательство. Кольцо R просто тогда и только тогда, когда оно просто как модуль над $R \otimes_{\mathbb{Z}} R^o$, а $R^o \cong \text{End}_{R\text{-mod}}(R)$. Осталось воспользоваться теоремой 5. \square

Пример 1. Пусть $R := \mathbb{Q}\langle X, \partial_X \rangle \subset \text{End}_{\mathbb{Q}\text{-mod}}(\mathbb{Q}[X])$ — алгебра Вейля. Тогда $[\partial_X, X] = 1$ и $R = \bigoplus_{n,m \in \mathbb{N}_0} \mathbb{Q} \cdot X^n \partial_X^m$ — разложение на собственные подпространства с различными собственными значениями для операторов $(X*) \circ [\partial_X, -]$ и $(*\partial_X) \circ [-, X]$. Кольцо R простое, так как из любого ненулевого элемента R несколько раз применив операторы $[X, -]$ и $[\partial_X, -]$ можно получить ненулевой элемент \mathbb{Q} . Так как $R \not\supseteq R\partial_X \not\supseteq R\partial_X^2 \not\supseteq \dots$ и $R \not\supseteq XR \not\supseteq X^2R \not\supseteq \dots$ — бесконечные строго убывающие последовательности левых/правых соответственно идеалов в R , то кольцо R не артиново слева/справа.

Теорема Джекобсона о плотности

Наблюдение 4 (ТЕОРЕМА ДЖЕКОБСОНА О ПЛОТНОСТИ). Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, N — простой R -модуль, а I — множество. Тогда для любого собственного подмодуля $L \subset N^{\oplus I}$ существует ненулевой R -гомоморфизм $\varphi : N^{\oplus I} \rightarrow N$, такой что $\varphi(L) = 0$.

Замечание 2. Классическая теорема Джекобсона о плотности — это наблюдение 4, применённое к случаю циклического L и конечного I .

Центральные простые алгебры

Тензорное произведение простых алгебр

Теорема 6. Пусть N — простой модуль над ассоциативным унитарным кольцом R , а $D := \text{End}_{R\text{-mod}}(N)^o$. Тогда функтор $N \otimes_D (-) : D\text{-mod} \rightarrow R\text{-mod}$ строгий и полный, а его существенный образ замкнут относительно перехода к подмодулям и фактормодулям.

Доказательство. То, что функтор строгий и полный, следует из того, что все модули над D свободные, а R -модуль N конечно порождён — морфизмы в $D\text{-mod}$ и его существенном образе, то есть категории N -изотипических полупростых R -модулей, задаются столбцово-финитарными матрицами с элементами в D^o . \square

Следствие 3. Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, N — простой R -модуль, а V — модуль над $D := \text{End}_{R\text{-mod}}(N)^\circ$. Тогда любой R -подмодуль в $N \otimes_D V$ имеет вид $N \otimes_D U$, где U — D -подмодуль в V .

Теорема 7. Пусть k — поле, R — центральная простая ассоциативная унитарная алгебра над k , а R' — простая ассоциативная унитарная алгебра над k . Тогда кольцо $R \otimes_k R'$ простое.

Доказательство. Введём обозначения $S := R \otimes_{\mathbb{Z}} R^\circ$ и $S' := R' \otimes_{\mathbb{Z}} (R')^\circ$. Тогда R является простым S -модулем и $\text{End}_{S\text{-mod}}(R) \cong Z(R) \cong k$. Согласно следствию 3 произвольный S -подмодуль $M \subset R \otimes_k R'$ имеет вид $R \otimes_k U$ для какого-то k -подмодуля $U \subset R'$. Если M является ещё и S' -подмодулем, то $U \subset R'$ — тоже S' -подмодуль. Так как R' — простой S' -модуль, то M либо тривиальный, либо несобственный. \square

Пример 2. Пусть K — поле, $k \subsetneq K$ — его собственное подполе, а R и R' — две простые ассоциативные унитарные алгебры над K . Тогда очевидный сюръективный гомоморфизм $R \otimes_k R' \rightarrow R \otimes_K R'$ имеет нетривиальное ядро. Это показывает, что тензорное произведение двух простых алгебр над полем не обязано быть простой алгеброй.

Теорема 8. Пусть R и R' — ассоциативные унитарные алгебры над ассоциативным коммутативным унитарным кольцом A , причём R' свободен как A -модуль. Тогда если кольцо $R \otimes_A R'$ простое, то кольцо R тоже простое.

Доказательство. Пусть $\mathfrak{I} \subset R$ — нетривиальный собственный двусторонний идеал. Тогда $\mathfrak{I} \otimes_A R' \subset R \otimes_A R'$ — тоже нетривиальный собственный двусторонний идеал. \square

Централизаторы в тензорном произведении алгебр

Теорема 9. Пусть R и R' — ассоциативные унитарные алгебры над ассоциативным коммутативным унитарным кольцом A , а $S \subset R$ — A -подалгебра, причём R' свободна как A -модуль. Тогда $Z_{R \otimes_A R'}(S)$ совпадает с $Z_R(S) \otimes_A R'$.

Доказательство. Заметим, что $Z_R(S)$ совпадает с инвариантами действия S как алгебры Ли на R коммутированием, $Z_{R \otimes_A R'}(S)$ совпадает с

инвариантами индуцированного действия S как алгебры Ли на $R \otimes_A R'$, а функтор $(-) \otimes_A A^{\oplus I} \cong (-)^{\oplus I}$, где I — множество, сохраняет инварианты действий. \square

Следствие 4. Пусть R и R' — ассоциативные унитарные алгебры над полем k , а $S \subset R$ и $S' \subset R'$ — их k -подалгебры. Тогда $Z_{R \otimes_k R'}(S \otimes_k S')$ совпадает с $Z_R(S) \otimes_k Z_{R'}(S')$.

Пример 3. Пусть $R := \mathbb{Z}\langle X, Y \rangle / ([X, Y] - 1)$ — алгебра Вейля. Тогда очевидный гомоморфизм $Z(R) \otimes_{\mathbb{Z}} (\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}) \rightarrow Z(R \otimes_{\mathbb{Z}} (\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}))$, где p — простое число, не сюръективен.

Группа Брауэра поля

Обозначение 1 (ЦПА). Сокращение «ЦПА» означает «центральная простая ассоциативная унитарная алгебра».

Теорема 10. Пусть R — конечномерная ЦПА над полем k . Тогда стандартный гомоморфизм $R \otimes_k R^o \rightarrow \text{End}_{k\text{-mod}}(R)$ биективен.

Доказательство. Гомоморфизм инъективен, так как кольцо $R \otimes_k R^o$ простое, и сюръективен по соображениям размерности. \square

Определение 6 (ГРУППА БРАУЭРА ПОЛЯ). Пусть k — поле. Тогда моноид, заданный образующими — классами изоморфизма конечномерных ЦПА над k — и соотношениями — $[R \otimes_k R'] = [R][R']$ для любых конечномерных ЦПА R и R' над k и $[M_n(k)] = 1$ для любого $n \in \mathbb{N}_1$ — называется *группой Брауэра* поля k и обозначается $\text{Br}(k)$.

Замечание 3. Группа Брауэра названа так в честь Ричарда/Рихарда Дагоберта Брауэра (Richard Dagobert Brauer) (10.02.1901–17.04.1977).

Теорема Артина–Веддербёрна

Теорема 11. Унитарное ассоциативное кольцо, полупростое как левый модуль над собой, изоморфно конечному произведению колец типа $M_n(D)$, где D — тело, а $n \in \mathbb{N}_1$. И наоборот, кольца $M_n(D)$ полупросты как левые модули над собой.

Доказательство. Пусть унитарное ассоциативное кольцо A полупросто как левый A -модуль: $A \cong \bigoplus_{i \in I} M_i^{\oplus S_i}$, где I конечно, все S_i конечные непустые, модули M_i простые, $M_i \not\cong M_j$ при $i \neq j$. В прямой сумме конечное число слагаемых, так как A -модуль A конечно порождён единицей, а нетривиальная бесконечная прямая сумма — нет. Тогда $A \cong \text{End}_{A\text{-mod}}(A)^o \cong (\prod_{i \in I} M_{S_i}(D_i))^o \cong \prod_{i \in I} M_{S_i}(D_i^o)$, где $D_i := \text{End}_{A\text{-mod}}(M_i)$, по лемме Шура. Обратно, если S — конечное множество, а D — тело, то $M_S(D) \cong \bigoplus_{s \in S} M_{S, \{s\}}(D)$ — разложение в прямую сумму изоморфных простых $M_S(D)$ -подмодулей. \square

Наблюдение 5. Пусть D — тело, а $n \in \mathbb{N}_1$. Тогда композиционная длина $M_n(D)$ как левого модуля над собой равна n , а кольцо эндоморфизмов любого простого $M_n(D)$ -модуля изоморфно D^o .

Наблюдение 6. Согласно следствию 10.1.2 и наблюдению 5, с учётом простоты кольца матриц над телом, разложение теоремы 11 определено однозначно в понятном смысле.

Теорема Нётер – Сколема

Теорема 12 (ТЕОРЕМА НЁТЕР – СКОЛЕМА). Пусть R и S — две конечномерные простые ассоциативные унитарные алгебры над полем k , причём k -алгебра R центральна. Тогда для любых двух гомоморфизмов k -алгебр $f, g : S \rightarrow R$ существует внутренний автоморфизм $h : R \xrightarrow{\sim} R$, такой что $h \circ f = g$.

Доказательство. Пусть ${}_f R$ — это R , рассмотренная как модуль над $S \otimes_k R^o$ путём ограничения скаляров вдоль $f \otimes \text{Id} : S \otimes_k R^o \rightarrow R \otimes_k R^o$, а ${}_g R$ — вдоль $g \otimes \text{Id} : S \otimes_k R^o \rightarrow R \otimes_k R^o$.

Тогда $\text{Hom}_{S \otimes_k R^o\text{-mod}}({}_f R, {}_g R)$, вложенное в $\text{Hom}_{R^o\text{-mod}}({}_f R, {}_g R) \cong R$, отождествляется с $\{a \in R \mid af(s) = g(s)a \text{ для всех } s \in S\}$. В частности, $\text{Hom}_{S \otimes_k R^o\text{-mod} \times}({}_f R, {}_g R) \cong \{a \in R^\times \mid af(s)a^{-1} = g(s) \text{ для всех } s \in S\}$.

Осталось заметить, что так как конечномерная k -алгебра $S \otimes_k R^o$ простая по теореме 7, то все $S \otimes_k R^o$ -модули одинаковой k -размерности изоморфны, а $\dim_k({}_f R) = \dim_k(R) = \dim_k({}_g R)$. \square

10.5. Радикал Джекобсона

Определение и эквивалентные характеристики

Определение 1 (АННУЛЯТОР МОДУЛЯ). Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, а M — R -модуль. Ядро структурного гомоморфизма $R \rightarrow \text{End}_{\mathbb{Z}\text{-mod}}(M)$ называется *аннулятором* M в R и обозначается $\text{Ann}_R(M)$.

Определение 2 (РАДИКАЛ ДЖЕКОБСОНА КОЛЬЦА). Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо. Пересечение аннуляторов простых R -модулей называется *радикалом Джекобсона* кольца R .

Определение 3 (АННУЛЯТОР ЭЛЕМЕНТА). Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, M — R -модуль, а $x \in M$ — элемент M . Ядро гомоморфизма $a \mapsto ax : R \rightarrow Rx \subset M$ модулей над R называется *аннулятором* x в R и обозначается $\text{Ann}_R(x)$.

Теорема 1 (ХАРАКТЕРИЗАЦИИ РАДИКАЛА ДЖЕКОБСОНА). Пусть \mathfrak{J} — радикал Джекобсона ассоциативного унитарного кольца R . Тогда \mathfrak{J} можно охарактеризовать следующими эквивалентными способами:

- а) \mathfrak{J} совпадает с пересечением всех максимальных левых идеалов R ;
- б) \mathfrak{J} совпадает с множеством всех $x \in R$, таких что для любого $a \in R$ элемент $1 - ax \in R$ обратим слева;
- в) \mathfrak{J} совпадает с множеством всех $x \in R$, таких что для любого $a \in R$ элемент $1 - ax \in R$ двусторонне обратим;
- г) \mathfrak{J} совпадает с множеством всех $x \in R$, таких что для любых $a, b \in R$ элемент $1 - axb \in R$ двусторонне обратим;
- д) \mathfrak{J} как множество совпадает с радикалом Джекобсона кольца R^o .

Доказательство.

- а) Пересечение аннуляторов простых R -модулей совпадает с пересечением аннуляторов ненулевых элементов простых R -модулей, а это в точности максимальные левые идеалы R .

- б) Пусть $x \in R$. Тогда условие « $x \notin \mathfrak{J}$ » эквивалентно условию «существует максимальный левый идеал $\mathfrak{m} \subset R$, такой что $x \notin \mathfrak{m}$ », которое эквивалентно условию «существует максимальный левый идеал $\mathfrak{m} \subset R$, такой что образ x в R/\mathfrak{m} не равен нулю», которое эквивалентно условию «существует максимальный левый идеал $\mathfrak{m} \subset R$, такой что существует $a \in R$, такой что $ax \equiv 1 \pmod{\mathfrak{m}}$ », которое эквивалентно отрицанию условия из пункта (б).
- в) Условие из пункта (в), очевидно, сильнее условия из пункта (б). Докажем обратное. Пусть $x \in \mathfrak{J}$. Левые обратные к элементам множества $1 + Rx \subset R$ фиксируют класс $1 + Rx \in R/(Rx)$, а потому и сами ему принадлежат, а потому обратимы слева. Отсюда следует, что элементы множества $1 + Rx$ двусторонне обратимы.
- г) С одной стороны, условие из пункта (г), очевидно, сильнее условия из пункта (в), так как можно взять $b = 1$. С другой стороны, \mathfrak{J} является двусторонним идеалом, поэтому если $x \in \mathfrak{J}$, то $xb \in \mathfrak{J}$ для любого $b \in R$, откуда следует условие из пункта (г).
- д) Пункт (д) является прямым следствием характеристики (г). \square

Лемма Накаямы

Теорема 2 (Лемма Накаямы). Пусть M — ненулевой конечно порождённый модуль над ассоциативным унитарным кольцом R , а \mathfrak{J} — радикал Джекобсона кольца R . Тогда $\mathfrak{J}M \neq M$.

Доказательство. У M есть ненулевой циклический фактор-модуль, например, фактор M по подмодулю, порождённому максимальным собственным подмножеством минимального порождающего M множества, а у ненулевого циклического фактор-модуля есть простой фактор-модуль, который зануляется радикалом Джекобсона. \square

Радикал Джекобсона и полупростота

Наблюдение 1. В артиновом модуле пересечение любого семейства подмодулей совпадает с пересечением какого-то конечного подсемейства этого семейства.

Наблюдение 2. Для полупростого модуля над ассоциативным унитарным кольцом артиновость эквивалентна нётеровости, которая эквивалентна конечной порождённости.

Определение 4 (РАДИКАЛ ДЖЕКОБСОНА модуля). Пусть M — модуль над ассоциативным унитарным кольцом R . Пересечение максимальных собственных подмодулей в M называется *радикалом Джекобсона* или просто *радикалом* модуля M .

Наблюдение 3. Пусть M — полупростой модуль над ассоциативным унитарным кольцом R , а \mathfrak{J}_M — радикал Джекобсона M . Тогда, так как M является прямой суммой простых модулей, то $\mathfrak{J}_M = 0$.

Теорема 3. Пусть M — артинов модуль над ассоциативным унитарным кольцом R , такой что $\mathfrak{J}_M = 0$, где \mathfrak{J}_M — это радикал Джекобсона M . Тогда M полупрост.

Доказательство. Согласно наблюдению 1 существует конечное семейство $(M_i)_{i \in I}$ максимальных собственных подмодулей M , такое что $\mathfrak{J}_M = \bigcap_{i \in I} M_i$. Тогда канонический гомоморфизм $M \rightarrow \prod_{i \in I} (M/M_i)$ в полупростой модуль $\prod_{i \in I} (M/M_i) \cong \bigoplus_{i \in I} (M/M_i)$ инъективен и M полупрост, так как подмодуль полупростого модуля полупрост. \square

Следствие 1 (КРИТЕРИЙ ПОЛУПРОСТОТЫ КОЛЬЦА). Ассоциативное унитарное кольцо полупросто тогда и только тогда, когда оно артиново слева и его радикал Джекобсона равен нулю.

Доказательство. Заметим, что полупростое кольцо автоматически артиново слева по наблюдению 2, так как оно является циклическим модулем над собой, после чего воспользуемся наблюдением 3 и теоремой 3. \square

Теорема Акидзуки — Хопкинса — Левицкого

Определение 5 (АННУЛЯТОР ИДЕАЛА). Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, \mathfrak{a} — правый идеал в R , а M — R -модуль. Тогда *аннулятором* \mathfrak{a} в M , обозначаемым $\text{Ann}_M(\mathfrak{a})$, называется R -подмодуль $\{t \in M \mid at = 0 \text{ для всех } a \in \mathfrak{a}\}$ модуля M .

Лемма 1. Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, \mathfrak{a} — правый идеал в R , \mathfrak{J} — радикал Джекобсона R , а M — артинов R -модуль. Тогда если $\text{Ann}_M(\mathfrak{a}) \subsetneq M$, то $\text{Ann}_M(\mathfrak{a}) \subsetneq \text{Ann}_M(\mathfrak{a}\mathfrak{J})$.

Доказательство. Пусть $N \subset M$ — минимальный подмодуль M , строго содержащий $\text{Ann}_M(\mathfrak{a})$. Тогда $\mathfrak{J}N \subset \text{Ann}_M(\mathfrak{a})$, то есть $\mathfrak{a}\mathfrak{J}N = 0$, так как $N/\text{Ann}_M(\mathfrak{a})$ — простой R -модуль. \square

Лемма 2. Пусть R — ассоциативное унитарное артиново слева кольцо, а \mathfrak{J} — радикал Джекобсона R . Тогда \mathfrak{J} нильпотентен, то есть $\mathfrak{J}^n = 0$ для какого-то $n \in \mathbb{N}_1$.

Доказательство. Так как R артиново слева, то ряд $\mathfrak{J} \supset \mathfrak{J}^2 \supset \mathfrak{J}^3 \supset \dots$ стабилизируется на некотором \mathfrak{J}^n , где $n \in \mathbb{N}_1$. По лемме 1 идеал \mathfrak{J}^n зануляет все артиновы R -модули, в частности, само R , откуда следует, что $\mathfrak{J}^n = 0$. \square

Теорема 4 (ТЕОРЕМА АКИДЗУКИ–ХОПКИНСА–ЛЕВИЦКОГО). Пусть R — ассоциативное унитарное артиново слева кольцо, а M — R -модуль. Тогда M нётеров тогда и только тогда, когда M артинов.

Доказательство. Пусть $\mathfrak{J} \subset R$ — радикал Джекобсона R . По лемме 2 существует $n \in \mathbb{N}_1$, такое что $\mathfrak{J}^n = 0$. Тогда нётеровость/артиновость M эквивалентна нётеровости/артиновости каждого из присоединённых факторов фильтрации $M = \mathfrak{J}^0 M \supset \mathfrak{J}^1 M \supset \mathfrak{J}^2 M \supset \dots \supset \mathfrak{J}^n M = 0$, а эти факторы являются модулями над полупростым кольцом R/\mathfrak{J} , для которого нётеровость и артиновость модулей эквивалентна. \square

Следствие 2. Пусть R — ассоциативное унитарное артиново слева кольцо. Тогда R нётерово слева.

10.6. Теорема Крулля–Шмидта для модулей

Наблюдение 1. Пусть ψ — эндоморфизм абелевой группы V . Тогда утверждение $\text{Ker}(\psi) \cap \text{Im}(\psi) = 0$ эквивалентно утверждению $\text{Ker}(\psi) = \text{Ker}(\psi^{\circ 2})$, а утверждение $\text{Ker}(\psi) + \text{Im}(\psi) = V$ эквивалентно утверждению $\text{Im}(\psi) = \text{Im}(\psi^{\circ 2})$.

Лемма 1 (ЛЕММА ФИТТИНГА). Пусть M — нётеров и артинов модуль над ассоциативным унитарным кольцом R , а $\varphi \in \text{End}_{R\text{-mod}}(M)$. Тогда существует $n \in \mathbb{N}_1$, такое что $M = \text{Ker}(\varphi^{on}) \oplus \text{Im}(\varphi^{on})$. В частности, если модуль M неразложим, то эндоморфизм φ либо является изоморфизмом, либо нильпотентен.

Доказательство. Заметим, что так как модуль M нётеров и артинов, то ряды $\text{Ker}(\varphi) \subset \text{Ker}(\varphi^2) \subset \dots$ и $\text{Im}(\varphi) \supset \text{Im}(\varphi^2) \supset \dots$ стабилизируются, после чего применим наблюдение 1. \square

Замечание 1. Если M — модуль над ассоциативным унитарным кольцом R , такой что все его эндоморфизмы либо нильпотентны, либо являются изоморфизмами, то M неразложим, так как у него не может быть нетривиального идемпотентного эндоморфизма.

Лемма 2. Если все элементы ассоциативного унитарного кольца R , которые не являются двусторонне обратимыми, являются нильпотентными, то они все лежат в радикале Джекобсона R . В частности, в этом случае суммы нильпотентов из R нильпотентны.

Доказательство. Пусть $x \in R$ — нильпотент, а $a \in R$ — произвольный элемент. Так как x не обратим слева, то ax — тоже, откуда следует, что ax — нильпотент, откуда следует, что $1 - ax$ двусторонне обратим. \square

Теорема 1 (ТЕОРЕМА КРУЛЛЯ – ШМИДТА). Пусть M — нётеров и артинов модуль над ассоциативным унитарным кольцом R , а $(V_i)_{i \in I}$ и $(U_j)_{j \in J}$ — два конечных семейства неразложимых подмодулей модуля M , такие что $M = \bigoplus_{i \in I} V_i = \bigoplus_{j \in J} U_j$. Тогда для любого $e \in I$ существует $r \in J$, такой что $M = V_e \oplus (\bigoplus_{j \in J \setminus \{r\}} U_j) = U_r \oplus (\bigoplus_{i \in I \setminus \{e\}} V_i)$.

Доказательство. Для любых $e \in I$ и $r \in J$ через $\rho_{r,e} : V_e \rightarrow U_r$ обозначим отображение, проецирующее V_e в U_r вдоль $\bigoplus_{j \in J \setminus \{r\}} U_j$, а через $\pi_{e,r} : U_r \rightarrow V_e$ — отображение, проецирующее U_r в V_e вдоль $\bigoplus_{i \in I \setminus \{e\}} V_i$. Для произвольного $e \in I$ выполняется равенство $\text{Id}_{V_e} = \sum_{j \in J} \pi_{e,j} \circ \rho_{j,e}$, из которого, согласно леммам 1 и 2, следует, что для какого-то $r \in J$ эндоморфизм $\pi_{e,r} \circ \rho_{r,e}$ является изоморфизмом, откуда, с учётом неразложимости U_r , следует, что отображения $\rho_{r,e}$ и $\pi_{e,r}$ являются изоморфизмами, а это утверждение эквивалентно утверждению, которое требуется доказать. \square

Замечание 2. Помимо Вольфганга Крулля (1899–1971) и Отто Шмидта (1891–1956) в формулировке и доказательстве теоремы Крулля – Шмидта и её вариантов участвовали много математиков, в частности, Джозеф Веддербёрн (1882–1948) и Роберт Ремак (1888–1942).

Замечание 3. Между прочим, заметим, что доказательство теоремы 1 становится особенно простым, если предположить, что модуль M полупрост — отпадает необходимость в леммах 1 и 2.

10.7. Теорема Эрдёша – Капланского

Теорема 1 (ТЕОРЕМА ЭРДЁША – КАПЛАНСКОГО). Пусть D — тело, а I — бесконечное множество. Тогда $\dim_D(D^{\times I}) = \text{card}(D^{\times I})$.

Доказательство (из трёх частей).

Часть 1. Во-первых, заметим, что $\dim_D(D^{\times I}) \geq \dim_D(D^{\oplus I}) = \text{card}(I)$. Во-вторых, заметим, что $\text{card}(D^{\times I}) = \text{card}(D) \cdot \dim_D(D^{\times I})$, а потому достаточно доказать, что $\dim_D(D^{\times I}) \geq \text{card}(D)$. В-третьих, заметим, что можно предположить, что D бесконечно, а I счётно.

Часть 2. Предположим, что $B \subset D^{\times I}$ — это D -базис $D^{\times I}$, такой что $\text{card}(B) < \text{card}(D)$, и придём к противоречию. Пусть $T \subset D$ — это наименьшее подтело в D , такое что $B \subset T^{\times I}$. Тогда $\text{card}(T) < \text{card}(D)$. Отсюда следует, что существует семейство $(x_i)_{i \in I} \in D^{\times I}$, линейно независимое относительно действия T^o на D правым умножением.

Часть 3. Пусть $((t_{s,i})_{i \in I})_{s \in S} \in (T^{\times I})^{\times S}$ — конечное семейство элементов $T^{\times I}$. Тогда существует ненулевое семейство $(r_i)_{i \in I} \in T^{\oplus I}$, такое что $(t_{s,i})_{s \in S, i \in I} \circ (r_i)_{i \in I} = (\sum_{i \in I} t_{s,i} r_i)_{s \in S} = 0$. Поэтому для любого семейства $(a_s)_{s \in S} \in D^{\times S}$ линейная комбинация $(b_i)_{i \in I}^t := (a_s)_{s \in S}^t \circ (t_{s,i})_{s \in S, i \in I} = (\sum_{s \in S} a_s t_{s,i})_{i \in I}^t$ не может совпадать с $(x_i)_{i \in I}^t$, так как удовлетворяет соотношению $(b_i)_{i \in I}^t \circ (r_i)_{i \in I} = \sum_{i \in I} b_i r_i = 0$. \square

Замечание 1. Я узнал о приведённом доказательстве теоремы 1 из ответа [15] на «MathOverflow».

Глава 11

Некоторые некоммутативные тождества

11.1. Тождества с мультипликативными коммутаторами

Данный раздел представляет собой небольшую «шпаргалку», содержащую стандартные тождества с сопряжением и мультипликативными коммутаторами и их выводы. Мы используем правонормированные коммутаторы. В тождествах с левонормированными коммутаторами надо использовать сопряжение слева, а не справа, а также группировать кратные коммутаторы влево: $[[-, -], -]$, а не вправо: $[-, [-, -]]$.

$$a^b := b^{-1}ab, \quad [a, b] := a^{-1}b^{-1}ab, \quad ab = ba^b, \quad a[a, b] = a^b, \quad ba[a, b] = ab, \\ a^{bc} = (a^b)^c, \quad (ab)^c = a^cb^c, \quad [a, b]^{-1} = [b, a], \quad [a, b]^g = [a^g, b^g].$$

$$a[a, bc] = a^{bc} = (a^b)^c = (a[a, b])^c = a^c[a, b]^c = a[a, c][a, b]^c \implies \\ \implies [a, bc] = [a, c][a, b]^c.$$

Обращением получаем: $[bc, a] = [b, a]^c[c, a]$.

Подставив $b = c^{-1}$, получаем: $[c, a] = [a, c^{-1}]^c$.

$$\begin{aligned} a(bc)[bc, a] &= (bc)a \text{ (цикл } (a, b, c)) \implies \\ \implies abc[bc, a][ca, b][ab, c] &= abc \implies [bc, a][ca, b][ab, c] = 1. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a^b[a^b, [b, c]] &= (a^b)^{[b, c]} = a^{b[b, c]} = a^{b^c}, \\ X &:= [a^b, [b, c]] = [a^b, [c, b^{-1}]^b] = [a, [c, b^{-1}]]^b, \\ bca^bX &= bca^{b^c} = cb^ca^{b^c} = cab^c \text{ (цикл } (a, b, c)) \\ &\Downarrow \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [a^b, [b, c]][b^c, [c, a]][c^a, [a, b]] &= 1 \text{ (тождество Холла),} \\ [a, [c, b^{-1}]]^b[b, [a, c^{-1}]]^c[c, [b, a^{-1}]]^a &= 1 \text{ (тождество Холла–Витта).} \end{aligned}$$

11.2. Тождества в алгебрах Ли и Йордана

Обозначение 1. Пусть R — кольцо. Введём обозначения $a* : R \rightarrow R$, $x \mapsto ax$ и $*a : R \rightarrow R$, $x \mapsto xa$, где $a \in R$.

Наблюдение 1. Пусть R — кольцо. Заметим, что $d \in \text{End}_{\mathbb{Z}\text{-mod}}(R)$ является дифференцированием R тогда и только тогда, когда диаграмма (1), где mult — это отображение умножения в R , коммутативна.

$$\begin{array}{ccc} R \otimes_{\mathbb{Z}} R & \xrightarrow{\text{mult}} & R \\ d \otimes 1 + 1 \otimes d \downarrow & & \downarrow d \\ R \otimes_{\mathbb{Z}} R & \xrightarrow{\text{mult}} & R \end{array} \quad (1)$$

Введём обозначения $\lambda(a) := a \otimes 1$ и $\rho(a) := 1 \otimes a$, где $a \in \text{End}_{\mathbb{Z}\text{-mod}}(R)$. Тогда (2) — это, по сути, проверка того, что коммутатор дифференцирований является дифференцированием.

$$[\lambda(a) + \rho(a), \lambda(b) + \rho(b)] = [\lambda(a), \lambda(b)] + [\rho(a), \rho(b)] = \lambda([a, b]) + \rho([a, b]) \quad (2)$$

Наблюдение 2. Пусть R — ассоциативное кольцо. Введём обозначения $\lambda(a) := a*$ и $\rho(a) := *(-a)$, где $a \in R$. Тогда (2) — это проверка того, что коммутатор в R удовлетворяет тождеству Якоби – Лейбница.

Наблюдение 3. Пусть R — ассоциативное кольцо. Тогда антикоммутатор в R , то есть йорданово умножение $(a, b) \mapsto a \circ b := ab + ba : R \times R \rightarrow R$,

удовлетворяет йорданову тождеству, потому что если $a \in R$ и $b \in R$ коммутируют, то $a * + * a$ и $b * + * b$ тоже коммутируют.

Наблюдение 4. Пусть R — кольцо. То, что $d \in \text{End}_{\mathbb{Z}\text{-mod}}(R)$ является дифференцированием R , эквивалентно тому, что $[d, a*] = (da)*$ для любого $a \in R$.

Замечание 1. Например, в алгебре Вейля, то есть алгебре дифференциальных операторов с полиномиальными коэффициентами, выполняется соотношение $[\partial/\partial x, x] = 1$, невозможное для конечных матриц в характеристике 0, в чём можно убедиться, взяв след.

Наблюдение 5. Обычно $e^{a \otimes 1 + 1 \otimes a} = e^a \otimes e^a$ и $e^{a* - *a} = e^a * \circ * e^{-a}$, когда эти выражения имеют смысл.

Наблюдение 6. Форма Киллинга — это след произведения. Взяв след от тождества $[a, bc] = [a, b]c + b[a, c]$, получаем её инвариантность.

Наблюдение 7. Если (3, слева) — коммутативная диаграмма модулей над ассоциативным коммутативным унитарным кольцом A , то (3, справа) — тоже.

$$\begin{array}{ccc} V & \xrightarrow{d'} & V \\ g \downarrow & & \downarrow g \\ V & \xrightarrow{d} & V \end{array} \qquad \begin{array}{ccc} V \otimes_A V & \xrightarrow{d' \otimes 1 + 1 \otimes d'} & V \otimes_A V \\ g \otimes g \downarrow & & \downarrow g \otimes g \\ V \otimes_A V & \xrightarrow{d \otimes 1 + 1 \otimes d} & V \otimes_A V \end{array} \quad (3)$$

Наблюдение 8. Пусть R — алгебра над ассоциативным коммутативным унитарным кольцом A , отображение $d : R \rightarrow R$ — дифференцирование R над A , а a и b — элементы A . Тогда мы имеем коммутативную диаграмму (4), где mult — это отображение умножения в R , которая делает очевидной формулу (5), где $x, y \in R$, а $n \in \mathbb{N}_0$.

$$\begin{array}{ccc} R \otimes_A R & \xrightarrow{(d-a) \otimes 1 + 1 \otimes (d-b)} & R \otimes_A R \\ \text{mult} \downarrow & & \downarrow \text{mult} \\ R & \xrightarrow{d-(a+b)} & R \end{array} \quad (4)$$

$$(d - (a + b))^n(xy) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} ((d - a)^{n-i}(x))((d - b)^i(y)) \quad (5)$$

Наблюдение 9. Пусть $A := K[X]/(X^p - 1)$, где K — поле характеристики $p \neq 0$, а $x \in A$ — образ $X \in K[X]$. Тогда у нас есть два K -линейных отображения: $x : A \rightarrow A$, $f \mapsto xf$ и $\partial/\partial x : A \rightarrow A$, $f \mapsto \partial f/\partial x$. Так как $[\partial/\partial x, x] = 1$, то $[x\partial/\partial x, x] = [x, x]\partial/\partial x + x[\partial/\partial x, x] = x$, поэтому x и $x\partial/\partial x$ порождают двумерную разрешимую подалгебру Ли в $\text{End}_{K\text{-mod}}(A)$. Множество $\{x^n \mid 0 \leq n < p\} \subset A$ — является собственным базисом для $x\partial/\partial x$ с попарно различными собственными значениями, но в нём нет собственных векторов для $x : A \rightarrow A$. Следовательно, у эндоморфизмов x и $x\partial/\partial x$ нет общего собственного вектора.

Наблюдение 10. Пусть $R := \mathbb{Q}\langle X, Y \rangle / (P \in \mathbb{Q}\langle X, Y \rangle \mid \deg(P) \geq 3)$ — алгебра усечённых многочленов от двух не коммутирующих переменных, а $x, y \in R$ — образы $X, Y \in \mathbb{Q}\langle X, Y \rangle$. Тогда, в понятном смысле, выполняются равенства $e^x e^y = e^{x+y+(1/2)(xy-yx)}$ и $e^x e^y e^{-x} e^{-y} = e^{xy-yx}$.

Замечание 2. Первая формула наблюдения 10 — это усечённая форма формулы Бейкера–Кэмпбелла–Хаусдорфа–Дынкина, полная версия которой формулируется и доказывается в разделе 11.3.

Следствие 1. Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, а $x, y \in R$ — его элементы, такие что $x^2 = y^2 = xux = yxu = 0$. Тогда, в понятном смысле, выполняется равенство $e^x e^y e^{-x} e^{-y} = e^{xy-yx}$.

Пример 1. Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, $a_1, a_2 \in R$, а $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \in R[E_1, E_2]/(E_1^2, E_2^2)$ — образы E_1 и E_2 соответственно. Тогда $e^{x_1} e^{x_2} e^{-x_1} e^{-x_2} = e^{x_1 x_2 - x_2 x_1}$, где $x_1 := a_1 \varepsilon_1$, $x_2 := a_2 \varepsilon_2$.

Пример 2. Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, I — конечное множество, $u_1, u_2 \in M_{\text{pt}, I}(R)$ — две строки, а $v_1, v_2 \in M_{I, \text{pt}}(R)$ — два столбца, причём $u_1 v_1 = u_2 v_2 = u_1 v_2 = 0$. Тогда $e^{x_1} e^{x_2} e^{-x_1} e^{-x_2} = e^{x_1 x_2 - x_2 x_1}$, где $x_1 := v_1 u_1$, $x_2 := v_2 u_2$.

Замечание 3. Формула из примера 2 называется коммутационной формулой для трансвекций.

Наблюдение 11. Пусть V — конечномерное векторное пространство над полем K . Пусть $s : V \xrightarrow{\sim} V^\vee$ — невырожденная билинейная форма, $x : V \rightarrow V$ — линейное отображение, $x^\vee : V^\vee \rightarrow V^\vee$ — двойственное отображение. Форма s ли-инвариантна относительно x тогда и только

тогда, когда $sx + x^\vee s = 0$, то есть $sxs^{-1} = -x^\vee$. Взяв след, получаем равенство $\mathrm{tr}(x) = \mathrm{tr}(sxs^{-1}) = \mathrm{tr}(-x^\vee) = -\mathrm{tr}(x)$, то есть $2\mathrm{tr}(x) = 0$.

Наблюдение 12. Пусть $p \in \mathbb{N}_1$ — простое число, а $X, Y \in \mathbb{F}_p[X, Y]$ — коммутирующие переменные. Тогда $(X - Y)(X - Y)^{p-1} = (X - Y)^p = X^p - Y^p = (X - Y)(X^{p-1} + X^{p-2}Y + \dots + XY^{p-2} + Y^{p-1})$, откуда следует, что $(X - Y)^{p-1} = X^{p-1} + X^{p-2}Y + \dots + XY^{p-2} + Y^{p-1}$.

Наблюдение 13. Пусть $p \in \mathbb{N}_1$ — простое число, R — ассоциативная унитарная \mathbb{F}_p -алгебра, x — элемент R , а $D : R \rightarrow R$ — дифференцирование кольца R . Тогда, применив наблюдение 12, получаем формулу $\mathrm{ad}(x)^{p-1}(D(x)) = (x * - * x)^{p-1}(D(x)) = D(x^p)$, где $\mathrm{ad}(x) = [x, -]$.

Наблюдение 14. Пусть $p \in \mathbb{N}_1$ — простое число, а $X, Y, T \in \mathbb{F}_p\langle X, Y \rangle[T]$ — переменные. Тогда, продифференцировав тождество (6) по T , согласно наблюдению 13, получаем тождество (7).

$$(XT + Y)^p = X^p T^p + s_{p-1}(X, Y) T^{p-1} + \dots + s_1(X, Y) T + Y^p \quad (6)$$

$$\underbrace{[XT + Y, [XT + Y, [XT + Y, \dots, [XT + Y, X]]] \dots]}_{p-1} = \\ = (p-1)s_{p-1}(X, Y) T^{p-2} + \dots + 2s_2(X, Y) T + s_1(X, Y) \quad (7)$$

11.3. Формула Бейкера – Кэмпбелла – Хаусдорфа – Дынкина

Предисловие

Практически весь материал этого раздела позаимствован из раздела 6 текста [17], который содержит несколько доказательств теоремы Бейкера – Кэмпбелла – Хаусдорфа и её уточнений. Я узнал об этом тексте из учебника по алгебрам Ли и группам Ли П. Этингофа [25, Remark 14.8].

Критерии Фридрихса и Дынкина – Шпехта – Уивера

Определение 1. Пусть K — поле, а \mathcal{X} — множество. Определим K -линейные отображения $D, R : K\langle \mathcal{X} \rangle \rightrightarrows K\langle \mathcal{X} \rangle$ на мономах следующим

образом: $D(X_1 \cdots X_n) = nX_1 \cdots X_n$ для любых $X_1, \dots, X_n \in \mathcal{X}$, где $n \geq 0$, $R(1) = 0$, $R(X) = X$ для любого $X \in \mathcal{X}$, $R(X_1 \cdots X_n) = [X_1, [X_2, \dots, [X_{n-1}, X_n]] \dots]$ для любых $X_1, \dots, X_n \in \mathcal{X}$, где $n \geq 2$.

Лемма 1. Пусть K — поле, \mathcal{X} — множество, а $(K\langle\mathcal{X}\rangle, \mu, \eta, \delta, \varepsilon, S)$ — это $K\langle\mathcal{X}\rangle$ со стандартной структурой алгебры Хопфа. Тогда

$$\mu \circ (D \otimes S) \circ \delta = R. \quad (1)$$

Доказательство. Достаточно проверить формулу (1) на мономах. Равенство $(\mu \circ (D \otimes S) \circ \delta)(1) = R(1)$ проверяется непосредственно. Пусть $X_1, \dots, X_n \in \mathcal{X}$, где $n \geq 1$. Тогда

$$\begin{aligned} & (\mu \circ (D \otimes S) \circ \delta)(X_1 \cdots X_n) = \\ &= \sum_{(c_1, \dots, c_n) \in \{0,1\}^n} (-1)^{\sum_{i=1}^n (1-c_i)} \left(\sum_{i=1}^n c_i \right) X_1^{c_1} \cdots X_n^{c_n} X_n^{1-c_n} \cdots X_1^{1-c_1} = \\ &= \sum_{(c_1, \dots, c_n) \in \{0,1\}^n} (-1)^{\sum_{i=1}^n (1-c_i)} \left(\sum_{i=1}^n c_i \right) X_1^{c_1} \cdots X_{n-1}^{c_{n-1}} X_n X_n^{1-c_{n-1}} \cdots X_1^{1-c_1} = \\ &= \sum_{(c_1, \dots, c_{n-1}) \in \{0,1\}^{n-1}} (-1)^{\sum_{i=1}^{n-1} (1-c_i)} X_1^{c_1} \cdots X_{n-1}^{c_{n-1}} X_n X_n^{1-c_{n-1}} \cdots X_1^{1-c_1} = \\ &= R(X_1 \cdots X_n). \quad \square \end{aligned}$$

Теорема 1 (КРИТЕРИИ ФРИДРИХСА И ДЫНКИНА – ШПЕХТА – УИВЕРА). Пусть K — поле, характеристика которого равна нулю, \mathcal{X} — множество, $(K\langle\mathcal{X}\rangle, \mu, \eta, \delta, \varepsilon, S)$ — это $K\langle\mathcal{X}\rangle$ со стандартной структурой алгебры Хопфа, а f — элемент $K\langle\mathcal{X}\rangle$. Тогда следующие условия эквивалентны:

- а) Многочлен f является K -линейной комбинацией кратных коммутаторов элементов \mathcal{X} ;
- б) Выполняется равенство $\delta(f) = f \otimes 1 + 1 \otimes f$ (критерий Фридрихса);
- в) Выполняются равенства $\varepsilon(f) = 0$ и $R(f) = D(f)$ (критерий Дынкина – Шпехта – Уивера).

Доказательство. Импликация (в) \implies (а) очевидна, а импликация (а) \implies (б) следует из классической формулы $[g \otimes 1 + 1 \otimes g, h \otimes 1 + 1 \otimes h] = [g, h] \otimes 1 + 1 \otimes [g, h]$, где $g, h \in K\langle \mathcal{X} \rangle$, — множество $\{d \in K\langle \mathcal{X} \rangle \mid \delta(d) = d \otimes 1 + 1 \otimes d\}$ является подалгеброй Ли в $K\langle \mathcal{X} \rangle$. Осталось доказать импликацию (б) \implies (в). Пусть f удовлетворяет условию (б). Применяя отображение $\varepsilon \otimes \text{Id}$ к обеим сторонам равенства $\delta(f) = f \otimes 1 + 1 \otimes f$ получаем равенство $f = \varepsilon(f)1 + \varepsilon(1)f = \varepsilon(f) + f$, откуда следует, что $\varepsilon(f) = 0$. Подставив выражение $\delta(f) = f \otimes 1 + 1 \otimes f$ в формулу (1), получаем, что $D(f) = D(f)S(1) + D(1)S(F) = R(f)$. \square

Теорема Бейкера – Кэмпбелла – Хаусдорфа

Определение 2 (Ряд Бейкера – Кэмпбелла – Хаусдорфа). Следующий формальный ряд называется *рядом Бейкера – Кэмпбелла – Хаусдорфа*:

$$\begin{aligned} \log(e^X e^Y) &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1}}{k} \left(\sum_{m,n=0}^{\infty} \frac{X^m Y^n}{m!n!} - 1 \right)^k = \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m_1+n_1>0} \cdots \sum_{m_k+n_k>0} \frac{(-1)^{k-1}}{k} \frac{X^{m_1} Y^{n_1} \cdots X^{m_k} Y^{n_k}}{m_1!n_1! \cdots m_k!n_k!} \in \mathbb{Q}\langle\langle X, Y \rangle\rangle. \end{aligned} \quad (2)$$

Теорема 2 (ТЕОРЕМА БЕЙКЕРА – КЭМПБЕЛЛА – ХАУСДОРФА). *Все однородные компоненты ряда Бейкера – Кэмпбелла – Хаусдорфа, то есть ряда $\log(e^X e^Y) \in \mathbb{Q}\langle\langle X, Y \rangle\rangle$, представляются в виде \mathbb{Q} -линейных комбинаций кратных коммутаторов переменных X и Y .*

Набросок доказательства. Гомоморфизм $\delta : \mathbb{Q}\langle X, Y \rangle \rightarrow \mathbb{Q}\langle X, Y \rangle^{\otimes 2} \cong \mathbb{Q}\langle X_1, Y_1 \rangle \langle X_2, Y_2 \rangle$, переводящий X в $X \otimes 1 + 1 \otimes X$, а Y в $Y \otimes 1 + 1 \otimes Y$, имеет единственное продолжение до непрерывного в стандартной топологии на формальных рядах отображения $\delta : \mathbb{Q}\langle\langle X, Y \rangle\rangle \rightarrow \mathbb{Q}\langle\langle X_1, Y_1 \rangle\rangle \langle\langle X_2, Y_2 \rangle\rangle \cong \prod_{m,n=0}^{\infty} (\mathbb{Q}\langle X, Y \rangle_m \otimes_{\mathbb{Q}} \mathbb{Q}\langle X, Y \rangle_n) \supset \mathbb{Q}\langle\langle X, Y \rangle\rangle^{\otimes 2}$. Осталось заметить, что экспонента задаёт биекцию между элементами $f \in \mathbb{Q}\langle\langle X, Y \rangle\rangle$ с постоянным членом 0, удовлетворяющими условию $\delta(f) = f \otimes 1 + 1 \otimes f$, и элементами $g \in \mathbb{Q}\langle\langle X, Y \rangle\rangle$ с постоянным членом 1, удовлетворяющими условию $\delta(g) = g \otimes g$, а потом использовать теорему 1, а точнее, критерий Фридрихса. \square

Формула Дынкина для ряда БКХ

Определение 3 (ИДЕМПОТЕНТ ДЫНКИНА). Пусть K — поле характеристики ноль, а \mathcal{X} — конечное множество. Тогда *идемпотентом Дынкина* называется K -линейное и непрерывное в стандартной топологии на $K\langle\langle\mathcal{X}\rangle\rangle$ отображение $P : K\langle\langle\mathcal{X}\rangle\rangle \rightarrow K\langle\langle\mathcal{X}\rangle\rangle$, такое что $P(X_1 \cdots X_n) = \frac{1}{n}R(X_1 \cdots X_n)$ для любых $X_1, \dots, X_n \in \mathcal{X}$, где $n \geq 1$, а $P(1) = 0$.

Наблюдение 1. Пусть K — поле характеристики ноль, а \mathcal{X} — конечное множество. Тогда идемпотент Дынкина $P : K\langle\langle\mathcal{X}\rangle\rangle \rightarrow K\langle\langle\mathcal{X}\rangle\rangle$ идемпотентен, то есть $P \circ P = P$, а образ P совпадает с рядами, все однородные компоненты которых представляются в виде K -линейных комбинаций кратных коммутаторов элементов \mathcal{X} .

Теорема 3 (ФОРМУЛА ДЫНКИНА). В кольце $\mathbb{Q}\langle\langle X, Y \rangle\rangle$ выполняется следующее соотношение, которое называется формулой Дынкина для ряда Бейкера–Кэмпбелла–Хаусдорфа, или же формулой Бейкера–Кэмпбелла–Хаусдорфа–Дынкина:

$$\begin{aligned} \log(e^X e^Y) = & \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m_1+n_1>0} \cdots \sum_{m_k+n_k>0} \frac{(-1)^{k-1}}{k \sum_{i=1}^k (m_i + n_i) \prod_{j=1}^k m_j! n_j!} \times \\ & \times [\underbrace{X, [X, \dots, [X, [Y, [Y, \dots, [Y, \dots, [X, [X, \dots, [X, [Y, [Y, \dots, Y]] \dots]]]}_{m_1} \underbrace{]}_{n_1} \underbrace{]}_{m_k} \underbrace{]}_{n_k}]. \end{aligned} \quad (3)$$

Доказательство. Применим идемпотент Дынкина к формуле (2). \square

Глава 12

Леммы из гомологической алгебры

12.1. Лемма о четырёх гомоморфизмах

Теорема 1 (4-ЛЕММА). Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, (1) — коммутативный квадрат R -модулей, а $\rho : \text{Ker}(\alpha) \rightarrow \text{Ker}(\alpha')$ и $\rho' : \text{Coker}(\alpha) \rightarrow \text{Coker}(\alpha')$ — индуцированные гомоморфизмы. Тогда одновременная сюръективность ρ и инъективность ρ' эквивалентна точности тотального комплекса (2) квадрата (1) в среднем члене.

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{\alpha} & B \\ \beta \downarrow & & \downarrow \beta' \\ C & \xrightarrow{\alpha'} & D \end{array} \quad (1) \quad 0 \rightarrow A \xrightarrow{\alpha \bar{\times} \beta} B \oplus C \xrightarrow{(-\beta') \sqcup \alpha'} D \rightarrow 0 \quad (2)$$

Доказательство. Пусть $\iota : C \rightarrow B \oplus C$ и $\pi : B \oplus C \rightarrow B$ — стандартные вложение и проекция, а $\mathfrak{B} \subset \mathfrak{Z} \subset B \oplus C$ — границы и циклы комплекса (2) в среднем члене. Тогда условие сюръективности ρ эквивалентно условию $\iota^{-1}(\mathfrak{B}) = \iota^{-1}(\mathfrak{Z})$, а инъективности ρ' — условию $\pi(\mathfrak{B}) = \pi(\mathfrak{Z})$. Эти два условия вместе эквивалентны условию $\mathfrak{B} = \mathfrak{Z}$. \square

Наблюдение 1. В обозначениях теоремы 1 инъективность ρ эквивалентна точности (2) в A , а сюръективность ρ' — точности (2) в D .

Наблюдение 2. В обозначениях теоремы 1 декартовость/кодекартовость квадрата (1) эквивалентны точности слева/справа соответственно его тотального комплекса (2).

12.2. Квадрат суммы-пересечения

Теорема 1 (КВАДРАТ СУММЫ-ПЕРЕСЕЧЕНИЯ). Пусть $M, N \subset U$ — модули над ассоциативным унитарным кольцом R . Тогда имеем два следующих бидекартовых коммутативных квадрата, называемых «квадрат суммы-пересечения» и «факторквадрат суммы-пересечения»:

$$\begin{array}{ccc} M \cap N & \hookrightarrow & M \\ \downarrow & & \downarrow \\ N & \hookrightarrow & M + N, \end{array} \quad \begin{array}{ccc} U/(M \cap N) & \twoheadrightarrow & U/M \\ \downarrow & & \downarrow \\ U/N & \twoheadrightarrow & U/(M + N). \end{array}$$

Доказательство. Бидекартовость первого квадрата очевидна, например, пара элементов $m \in M$ и $n \in N$, имеющих одинаковый образ в $M + N$, является образом элемента из $M \cap N$, что доказывает точность тотального комплекса $0 \rightarrow M \cap N \rightarrow M \oplus N \rightarrow M + N \rightarrow 0$ в среднем члене. Второй квадрат является фактором U , то есть бидекартового квадрата, составленного из четырёх копий U и тождественных морфизмов, по первому квадрату. Осталось перейти к соответствующим тотальным комплексам и заметить, что фактор точного комплекса по точному подкомплексу точен. \square

Следствие 1 (ИЗОМОРФИЗМ СУММЫ-ПЕРЕСЕЧЕНИЯ). В обозначениях теоремы 1 квадрат суммы-пересечения индуцирует следующий изоморфизм между коядрами: $M/(M \cap N) \xrightarrow{\sim} (M + N)/N$.

12.3. Критерий Бэра инъективности модуля

Теорема 1 (КРИТЕРИЙ БЭРА). Модуль Q над ассоциативным унитарным кольцом R является инъективным тогда и только тогда, когда для любого левого идеала $\mathfrak{I} \subset R$ любой гомоморфизм R -модулей $\mathfrak{I} \rightarrow Q$ продолжается до гомоморфизма R -модулей $R \rightarrow Q$.

Доказательство. Часть «только тогда» напрямую следует из определения инъективности. Докажем часть «тогда». Пусть M — R -модуль. Пусть \mathcal{S} — это множество гомоморфизмов из подмодулей модуля M в Q , упорядоченных так, что быть меньше значит быть ограничением. К \mathcal{S} можно применить лемму Цорна, и получить, что каждый элемент \mathcal{S} мажорируется максимальным. Пусть $f : N \rightarrow Q$, где $N \subset M$, — максимальный элемент \mathcal{S} . Пусть $N \neq M$. Пусть C — циклический подмодуль в M , порождённый некоторым $a \in M \setminus N$. По теореме о квадрате суммы-пересечения (теорема 12.2.1) сумма двух подмодулей является их абстрактной амальгамированной суммой над их пересечением, поэтому чтобы продолжить $f : N \rightarrow Q$ до гомоморфизма $N + C \rightarrow Q$, и, тем самым, прийти к противоречию, нам нужно найти гомоморфизм $C \rightarrow Q$, совпадающий с f на $N \cap C$. То есть нам достаточно доказать, что гомоморфизмы в Q продолжаются с подмодулей циклических модулей на сами циклические модули. Так как циклические модули изоморфны фактормодулям R , то нам достаточно доказать, что гомоморфизмы в Q продолжаются с подмодулей R на само R . \square

Глава 13

Теория полей

13.1. Теория Галуа

Большинство материала этого раздела основано на курсе по теории Галуа М. Вербицкого [12]. Помимо этого использовался учебник Джеймса Милна [20].

Диагонализуемые алгебры и расширения Галуа

Определение 1 (ДИАГОНАЛИЗУЕМАЯ АЛГЕБРА). Конечномерная ассоциативная коммутативная унитарная алгебра A над полем k называется *диагонализуемой* над полем K/k , если K -алгебра $K \otimes_k A$ изоморфна K -алгебре $K^{\times I}$ для какого-то конечного множества I .

Замечание 1. В ситуации определения 1 изоморфизм $K \otimes_k A \xrightarrow{\sim} K^{\times I}$ называется *диагонализацией*.

Определение 2 (РАСШИРЕНИЕ ГАЛУА). Конечное расширение полей K/k называется *расширением Галуа*, если k -алгебра K диагонализуема над k .

Определение 3 (ГРУППА ГАЛУА). Пусть K/k — конечное расширение Галуа. Тогда его *группой Галуа* называется группа $\text{Aut}_{k\text{-ring}}(K)$.

Скрученное групповое кольцо

Определение 4 (СКРУЧЕННОЕ ГРУППОВОЕ КОЛЬЦО). Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, G — группа, а $\rho : G \rightarrow \text{Aut}_{\text{Ring}}(R)$, $g \mapsto (\lambda \mapsto {}^g\lambda)$ — действие G на R . Определим *скрученное групповое кольцо* $R[\rtimes_{\rho} G]$ как фактор копроизведения ассоциативных унитарных колец R и $\mathbb{Z}[G]$ по соотношениям $g\lambda = {}^g\lambda g$, где $g \in G$, $\lambda \in R$.

Замечание 2. Из определения 4 сразу следует, что модуль над скрученным групповым кольцом $R[\rtimes_{\rho} G]$ — это R -модуль с ρ -полулинейным действием G . Примером является само R с действием G .

Наблюдение 1. Если в условиях определения 4 кольцо R коммутативно, то антиавтоморфизмы $g \mapsto g^{-1} : G \xrightarrow{\sim} G^o$ и $\lambda \mapsto \lambda : R \xrightarrow{\sim} R^o$ порядка два индуцируют антиавтоморфизм $R[\rtimes G] \xrightarrow{\sim} R[\rtimes G]^o$ порядка два, который переводит $R[\rtimes G]^o$ -модули в $R[\rtimes G]$ -модули, и наоборот.

Наблюдение 2. В обозначениях определения 4 гомоморфизм R -модулей $(\alpha_g)_{g \in G} \mapsto \alpha_g g : R^{\oplus G} \rightarrow R[\rtimes_{\rho} G]$ биективен.

Изоморфизм диагонализации

Наблюдение 3. Пусть K — поле, а I — конечное множество. Тогда гомоморфизмы K -алгебр $K^{\times I} \rightarrow K$ — это в точности проекции на сомножители.

Теорема 1. Пусть A — конечномерная ассоциативная коммутативная унитарная алгебра над полем k , а $\theta : K \otimes_k A \xrightarrow{\sim} K^{\times I}$ — её диагонализация над расширением полей K/k . Тогда существует единственная перенумерация $I \xrightarrow{\sim} S := \text{Hom}_{k\text{-ring}}(A, K)$, которая переводит в θ гомоморфизм K -алгебр $\alpha \otimes a \mapsto (\alpha\varphi(a))_{\varphi \in S} : K \otimes_k A \xrightarrow{\sim} K^{\times S}$.

Доказательство. Нужной перенумерацией является сквозная биекция $I \xrightarrow{\sim} \text{Hom}_{K\text{-ring}}(K^{\times I}, K) \xrightarrow{\sim} \text{Hom}_{K\text{-ring}}(K \otimes_k A, K) \xrightarrow{\sim} \text{Hom}_{k\text{-ring}}(A, K)$. Первая из этих трёх биекций взята из наблюдения 3, а последняя следует из универсального свойства тензорного произведения. \square

Наблюдение 4. В обозначениях теоремы 1 группа $G := \text{Aut}_{k\text{-ring}}(K)$ действует на $K \otimes_k A$ через левый сомножитель. Помимо этого, действия G на S и K индуцируют действие G на $K^{\times S} = \text{Map}(S, K)$ сопря-

жением. Изоморфизм диагонализации $K \otimes_k A \xrightarrow{\sim} K^{\times S}$ эквивариантен относительно этих действий.

Теорема 2. Пусть K/k — конечное расширение Галуа, G — его группа Галуа, а $K[\rtimes G]$ — скрученное групповое кольцо. Тогда гомоморфизм $K[\rtimes G]$ -бимодулей $\alpha \otimes \beta \mapsto \alpha(\sum_{g \in G} g)\beta : K \otimes_k K \rightarrow K[\rtimes G]$ биективен.

Доказательство. Отображение из формулировки теоремы 2 получается композицией отображения из формулировки теоремы 1 для $A = K$ и биективного отображения $(\alpha_g)_{g \in G} \mapsto \sum_{g \in G} \alpha_g g : K^{\times G} \rightarrow K[\rtimes G]$. \square

Замечание 3. Изоморфизм теоремы 2 тоже иногда будет называться изоморфизмом диагонализации.

Основная теорема теории Галуа

Обозначение 1 (ИНВАРИАНТЫ ДЕЙСТВИЯ). Если G — группа, действующая на множестве X , то $X^G := \{x \in X \mid g(x) = x \text{ для любого } g \in G\}$.

Лемма 1. Пусть K/k — конечное расширение Галуа, G — его группа Галуа, а $H \subset G$ — её подгруппа. Тогда $K^H = k$ тогда и только тогда, когда $H = G$.

Доказательство. Практически очевидно из следующей цепочки изоморфизмов: $K \otimes_k (K^H) \cong (K \otimes_k K)^{\{1\} \times H} \cong (K^{\times G})^{\{1\} \times H} \cong K^{\times (G/H)}$. \square

Соглашение 1. Пусть K/k — расширение полей. Условимся, что структура K -алгебры на кольце $K \otimes_k K$ по умолчанию будет задаваться гомоморфизмом $\alpha \mapsto \alpha \otimes 1 : K \rightarrow K \otimes_k K$.

Теорема 3. Пусть $k \subset E \subset K$ — последовательность вложенных полей, причём K/k — конечное расширение Галуа. Тогда K/E — конечное расширение Галуа.

Доказательство. Очевидная сюръекция $K^{\times I} \cong K \otimes_k K \rightarrow K \otimes_E K$ алгебр над K индуцирует изоморфизм $K^{\times J} \cong K \otimes_E K$ алгебр над K для какого-то подмножества $J \subset I$. \square

Теорема 4 (ОСНОВНАЯ ТЕОРЕМА ТЕОРИИ ГАЛУА). Пусть K/k — конечное расширение Галуа, G — его группа Галуа, \mathcal{G} — множество подгрупп группы G , а \mathcal{K} — множество подполей поля K , содержащих поле k . Тогда отображения $H \mapsto K^H : \mathcal{G} \rightleftarrows \mathcal{K} : \text{Aut}_{E\text{-ring}}(K) \leftarrow E$ являются взаимно обратными биекциями.

Набросок доказательства. Утверждение тривиальным образом следует из теоремы 3 и леммы 1. \square

Эквивалентность категорий

Теорема 5. Пусть K/k — конечное расширение Галуа, G — его группа Галуа, \mathcal{S} — категория конечных G -множеств, \mathcal{A} — категория конечномерных ассоциативных коммутативных унитарных k -алгебр, диагонализуемых над K . Тогда функторы $\mathfrak{S} : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{S}^o$, $A \mapsto \text{Hom}_{k\text{-ring}}(A, K)$ и $\mathfrak{A} : \mathcal{S}^o \rightarrow \mathcal{A}$, $S \mapsto \text{Hom}_{G\text{-sets}}(S, K)$ корректно определены и вместе с очевидными естественными преобразованиями $\eta : \text{Id}_{\mathcal{A}} \rightarrow \mathfrak{A} \circ \mathfrak{S}$ и $\varepsilon : \mathfrak{S} \circ \mathfrak{A} \rightarrow \text{Id}_{\mathcal{S}^o}$ задают эквивалентность категорий.

Доказательство. Во-первых, так как кольцо K целостно, то функтор $\text{Hom}_{k\text{-ring}}(-, K) : k\text{-ring} \rightarrow G\text{-sets}^o$ сохраняет конечные произведения, а $\text{Hom}_{G\text{-sets}}(-, K) : G\text{-sets}^o \rightarrow k\text{-ring}$ сохраняет их тавтологически.

Во-вторых, для любого G -множества вида G/H , где $H \subset G$ — подгруппа, выполняются изоморфизмы $\varphi \mapsto \varphi([1]) : \text{Hom}_{G\text{-sets}}(G/H, K) \xrightarrow{\sim} K^H$ и $K \otimes_k (K^H) \cong (K \otimes_k K)^{\{1\} \times H} \cong (K^{\times G})^{\{1\} \times H} \cong K^{\times (G/H)}$.

В-третьих, для любого $A \in \text{Ob}(\mathcal{A})$ выполняются изоморфизмы $A \cong (K \otimes_k A)^{G \times \{1\}} \cong (K^{\times \text{Hom}_{k\text{-ring}}(A, K)})^{G \times \{1\}} \cong \text{Map}(\text{Hom}_{k\text{-ring}}(A, K), K)^G \cong \text{Hom}_{G\text{-sets}}(\text{Hom}_{k\text{-ring}}(A, K), K)$. \square

Расширения Галуа как максимально симметричные расширения

Теорема 6. Пусть K/k и E/k — два конечных расширения полей. Тогда если $|\text{Hom}_{k\text{-ring}}(E, K)| = [E : k]$, то k -алгебра E диагоналізуема над K .

Доказательство (из пяти частей).

Часть 1. Сначала предположим, что расширение E/k примитивно и зафиксируем изоморфизм $E \xrightarrow{\sim} k[X]/P(X)$. Так как $|\text{Hom}_{k\text{-ring}}(E, K)| =$

$[E : k]$, то $(P(X)) = (\prod_{\alpha \in S} (X - \alpha))$ в $K[X]$, где $S \subset K$. Получаем цепочку изоморфизмов $K \otimes_k E \xrightarrow{\sim} K \otimes_k (k[X]/P(X)) \xrightarrow{\sim} K[X]/P(X) \xrightarrow{\sim} K[X]/\prod_{\alpha \in S} (X - \alpha) \xrightarrow{\sim} \prod_{\alpha \in S} (K[X]/(X - \alpha)) \xrightarrow{\sim} \prod_{\alpha \in S} K$.

Часть 2. Теперь рассмотрим общий случай. Выберем башню полей $k = E_0 \subset E_1 \subset \dots \subset E_n = E$, такую что для любого $i = 1, \dots, n$ расширение E_i/E_{i-1} примитивно.

Часть 3. Из условия следует, что $|\text{Hom}_{E_0\text{-ring}}(E_1, K)| = [E_1 : E_0]$, поэтому, согласно части 1, имеем следующий изоморфизм алгебр над K : $K \otimes_{E_0} E_1 \xrightarrow{\sim} \bigoplus_{\varphi \in \text{Hom}_{E_0\text{-ring}}(E_1, K)} K_\varphi$, где K_φ — это копия K , рассмотренная как E_1 -алгебра с помощью $\varphi : E_1 \rightarrow K$.

Часть 4. Естественно, из условия также следует, что для произвольно $\varphi \in \text{Hom}_{E_0\text{-ring}}(E_1, K)$ выполняется равенство $|\text{Hom}_{E_1\text{-ring}}(E_2, K_\varphi)| = [E_2 : E_1]$, поэтому, согласно части 1, имеем следующий изоморфизм алгебр над K : $K_\varphi \otimes_{E_1} E_2 \xrightarrow{\sim} \bigoplus_{\psi \in \text{Hom}_{E_1\text{-ring}}(E_2, K_\varphi)} K_\psi$, где K_ψ — это копия K , рассмотренная как E_2 -алгебра с помощью $\psi : E_2 \rightarrow K$.

Часть 5. Продолжая таким образом, мы с помощью полученных изоморфизмов и изоморфизмов дистрибутивности тензорного произведения диагонализуем K -алгебру $K \otimes_k E \cong K \otimes_{E_0} E_1 \otimes_{E_1} \dots \otimes_{E_{n-1}} E_n$. \square

Следствие 1. Пусть K/k — конечное расширение полей, такое что $|\text{Aut}_{k\text{-ring}}(K)| = [K : k]$. Тогда K/k — расширение Галуа.

Расширения Галуа и сепарабельные многочлены

Теорема 7. Пусть k — поле, $P(X) \in k[X]$ — многочлен, E/k — поле над k , порождённое как k -алгебра корнями $P(X)$ в E , а K/k — поле над k , такое что $P(X)$ разлагается на линейные множители в $K[X]$. Тогда $N := |\text{Hom}_{k\text{-ring}}(E, K)| \geq 1$ и $N = [E : k]$, если $P(X)$ сепарабелен.

Доказательство (из двух частей).

Часть 1. Выберем башню полей $k = E_0 \subset E_1 \subset \dots \subset E_n = E$, такую что $E_i := E_{i-1}[x_i] \xleftarrow{\sim} E_{i-1}[X_i]/P_i(X_i) : x_i \mapsto X_i$ и $P(x_i) = 0$ для любого индекса $i = 1, \dots, n$.

Часть 2. Теперь заметим, что для любого $i = 1, \dots, n$ и любого k -гомоморфизма $\varphi : E_{i-1} \rightarrow K$ многочлен ${}^\varphi P_i(X)$ делит $P(X) = {}^\varphi P(X)$ в ${}^\varphi E_{i-1}[X] \subset K[X]$, а потому ${}^\varphi P_i(X)$ разлагается на линейные множители в $K[X]$ и сепарабелен, если $P(X)$ сепарабелен, откуда следует, что φ имеет продолжение до $E_i \rightarrow K$ и имеет $[E_i : E_{i-1}] = \deg(P_i(X))$ продолжений до $E_i \rightarrow K$, если $P(X)$ сепарабелен. \square

Теорема 8. Пусть G — конечная группа, действующая на поле K , а $\alpha \in K$ — элемент K . Тогда многочлен $P(X) := \prod_{\beta \in O} (X - \beta) \in K[X]$, где O — это орбита α под действием G , является минимальным многочленом α над $k := K^G$.

Доказательство. С одной стороны, очевидно, что все коэффициенты $P(X)$ инвариантны относительно действия G , а потому лежат в k . С другой стороны, очевидно, что любой многочлен из $k[X]$ с корнем α имеет в качестве корней все $\beta \in O$, а потому делится на $P(X)$. \square

Теорема 9. Пусть E/k — конечное расширение полей, порождённое сепарабельными элементами. Тогда существует конечное расширение полей K/k , такое что k -алгебра E диагонализуема над K , вкладывающееся в любое расширение полей K'/k , обладающее тем же свойством. Более того, такое K/k — расширение Галуа.

Набросок доказательства. Пусть $B \subset E$ — конечное множество сепарабельных элементов расширения E/k , такое что $E = k[\beta \mid \beta \in B]$, а $\mathcal{P} \subset k[X]$ — это множество унитарных минимальных многочленов над k элементов B . Тогда в качестве K/k можно взять поле разложения над k сепарабельного многочлена $\prod_{P(X) \in \mathcal{P}} P(X) \in k[X]$. \square

Следствие 2. Конечное расширение полей, порождённое сепарабельными элементами, является сепарабельным расширением. Иначе говоря, сепарабельные элементы расширения полей образуют его подполе.

13.2. Некоторые утверждения из теории полей

Существование алгебраического замыкания

Теорема 1. Пусть k — поле. Тогда существует алгебраическое расширение полей k^{alg}/k , такое что k^{alg} алгебраически замкнуто.

Доказательство. Заметим, что мощность любого алгебраического расширения k ограничена сверху мощностью $k[X]$. Пусть Ω — множество, такое что $k \subset \Omega$ и мощность Ω строго больше мощности любого алгебраического расширения k . Пусть \mathcal{S} — это множество алгебраических расширений k , являющихся подмножествами Ω , упорядоченное так, что быть меньше значит быть подрасширением. Тогда к \mathcal{S} можно применить лемму Цорна и получить, что в \mathcal{S} существует максимальный элемент. Этот максимальный элемент можно взять в качестве k^{alg} . \square

Теорема о примитивном элементе

Теорема 2 (ТЕОРЕМА О ПРИМИТИВНОМ ЭЛЕМЕНТЕ). *Пусть E/k — конечное сепарабельное расширение полей. Тогда существует $\alpha \in E$, такой что $E = k[\alpha]$.*

Доказательство. Если k конечно, а α — образующая группы E^\times , то $E = k[\alpha]$. Предположим, что k бесконечно. Так как поле E сепарабельно, то существует расширение полей K/k , такое что $|\text{Hom}_{k\text{-ring}}(E, K)| = [E : k]$, например, минимальное расширение Галуа поля k , содержащее E , или алгебраическое замыкание k . Выберем конечное подмножество $B \subset E$, такое что $E = k[\beta \mid \beta \in B]$, и с помощью леммы 14.3.1 найдём элемент $\alpha \in \sum_{\beta \in B} k\beta$, такой что отображение ограничения $\varphi \mapsto \varphi|_{k[\alpha]} : \text{Hom}_{k\text{-ring}}(E, K) \rightarrow \text{Hom}_{k\text{-ring}}(k[\alpha], K)$ инъективно. Тогда $[k[\alpha] : k] \geq |\text{Hom}_{k\text{-ring}}(k[\alpha], K)| \geq |\text{Hom}_{k\text{-ring}}(E, K)| = [E : k] \geq [k[\alpha] : k]$, откуда следует, что $[k[\alpha] : k] = [E : k]$ и $k[\alpha] = E$. \square

Теорема о нормальном базисе

Наблюдение 1. Пусть M и N — артиновы и нётеровы модули над ассоциативным унитарным кольцом R . Тогда если $M^{\otimes n} \simeq N^{\otimes n}$ для какого-то $n \in \mathbb{N}_1$, то $M \simeq N$ по теореме Крулля — Шмидта.

Теорема 3 (ТЕОРЕМА О НОРМАЛЬНОМ БАЗИСЕ). *Пусть K/k — конечное расширение Галуа с группой Галуа G . Тогда K изоморфно $k[G]$ как $k[G]$ -модуль.*

Доказательство. Кольцо $k[G]$ действует на $K \otimes_k K$ через действие на левый сомножитель и действует на $K[\rtimes G]$ левым умножением, при-

чём эти действия согласованы с изоморфизмом диагонализации теоремы 13.1.2. Осталось заметить, что $K \otimes_k K \simeq K^{\oplus [K:k]}$ и $K[\rtimes G] \simeq k[G]^{\oplus [K:k]}$ как определённые выше $k[G]$ -модули, а потому $K \simeq k[G]$ как $k[G]$ -модуль по наблюдению 1. \square

Замечание 1. Приведённое доказательство теоремы 3 следует доказательству из учебника [20, с. 70].

Теорема Дедекинда о независимости характеров

Теорема 4 (ТЕОРЕМА ДЕДЕКИНДА О НЕЗАВИСИМОСТИ ХАРАКТЕРОВ). Пусть S — мультипликативная полугруппа, а K — поле. Тогда множество характеров $S \rightarrow K$, то есть мультипликативных гомоморфизмов из S в K , линейно независимо над K .

Доказательство. Полугруппа S действует на множестве S слева левыми умножениями. Это действие индуцирует правое действие S на K -модуле $V := K^{\times S}$. Любой характер $\chi : S \rightarrow K$ как элемент V является общим собственным вектором для S относительно собственного значения χ . Осталось применить теорему о том, что сумма собственных подпространств для различных собственных значений прямая. \square

Замечание 2. Я узнал об этом подходе к доказательству теоремы 4 из видеозаписи [22, лекция 5, 1:06:40].

Теорема Артина

Лемма 1. Пусть K — поле, а G — группа, действующая на K автоморфизмами. Пусть Ω — класс $K[\rtimes G]$ -модулей, у которых все ненулевые подмодули содержат ненулевые G -инвариантные элементы. Тогда $K^{\oplus I} \in \Omega$ для любого конечного множества I .

Доказательство. Очевидно, что $K \in \Omega$ и Ω замкнуто относительно расширений: подмодуль расширения V с помощью W либо имеет нетривиальное пересечение с W , либо изоморфен подмодулю V . \square

Теорема 5 (ТЕОРЕМА АРТИНА). Пусть K — поле, а G — конечная группа, действующая на K автоморфизмами. Тогда $[K : K^G] \leq |G|$.

Доказательство. Нам нужно доказать, что любое семейство $(\alpha_i)_{i \in I} \in K^{\oplus I}$, где I — конечное множество, такое что $|I| > |G|$, линейно зависимо над K^G . Иначе говоря, уравнение $\sum_{i \in I} \alpha_i X_i = 0$ имеет нетривиальный G -инвариантный ноль в $K^{\oplus I}$. Заметим, что такой ноль должен являться нулём системы уравнений $(\sum_{i \in I} {}^g \alpha_i X_i = 0)_{g \in G}$. Множество нулей этой системы G -инвариантно, то есть является $K[\rtimes G]$ -подмодулем $K^{\oplus I}$, причём ненулевым, так как число уравнений строго меньше числа переменных. Применение леммы 1 завершает доказательство. \square

13.3. Базисы трансцендентности

Теорема 1. Пусть K — поле, $k \subset K$ — его подполе, а $(x_i)_{i \in I}$ и $(y_j)_{j \in J}$ — два конечных семейства элементов K , такие что K алгебраично над $k(x_i \mid i \in I)$ и $(y_j)_{j \in J}$ алгебраически независимо над k . Тогда $|J| \leq |I|$.

Доказательство. Докажем теорему индукцией по $|J|$. Случай $|J| = 0$ тривиален. Пусть $|J| > 0$. Выберем произвольный $e \in J$. Введём обозначение $k' := k(y_e)$. Так как y_e алгебраичен над $k(x_i \mid i \in I)$, то между y_e и $(x_i)_{i \in I}$ существует соотношение $P \in k[Y_e, X_i \mid i \in I]$, такое что $\deg_{Y_e}(P) > 0$. Так как y_e не алгебраичен над k , то существует индекс $r \in I$, такой что $\deg_{X_r}(P) > 0$, откуда следует, что x_r алгебраичен над $k'(x_i \mid i \in I \setminus \{r\})$, а потому всё поле K алгебраично над $k'(x_i \mid i \in I \setminus \{r\})$, и мы можем по индукции применить теорему к семействам $(x_i)_{i \in I \setminus \{r\}}$ и $(y_j)_{j \in J \setminus \{e\}}$ элементов расширения полей K/k' . \square

Определение 1 (БАЗИС ТРАНСЦЕНДЕНТНОСТИ). Если K — поле, а $k \subset K$ — его подполе, то максимальное алгебраически независимое над k подмножество K называется *базисом трансцендентности* K над k .

Наблюдение 1. Пусть K — поле, а $k \subset K$ — его подполе. Тогда базисы трансцендентности K над k — это в точности минимальные подмножества $S \subset K$, такие что K алгебраично над $k(s \mid s \in S)$.

Теорема 2. Пусть K — поле, а $k \subset K$ — его подполе. Тогда все конечные базисы трансцендентности K над k равномощны.

Доказательство. Теорема 2 следует из теоремы 1, точнее, даже эквивалентна ей. \square

Пример 1. Пусть k — поле, $A := k[X, Y, Z]/(XY, XZ)$, а x , y и z — это образы X , Y и Z соответственно в A . Тогда $\{x\}$ и $\{y, z\}$ — два максимальных алгебраически независимых над k подмножества A .

Замечание 1. Я узнал о примере 1 из ответа [13] на «Mathematics Stack Exchange».

Глава 14

Коммутативная алгебра

14.1. Базовые свойства локализации

Локализация и идеалы кольца

Обозначение 1. Пусть дано отображение множества S в ассоциативное унитарное кольцо R . Двусторонний идеал в $S^{-1}R$, порождённый образом двустороннего идеала $\mathfrak{J} \subset R$, будем обозначать через $S^{-1}\mathfrak{J}$.

Обозначение 2. Если $f : R \rightarrow E$ — гомоморфизм ассоциативных унитарных колец, а $\mathfrak{J} \subset E$ — двусторонний идеал, то идеал $f^{-1}(\mathfrak{J})$ иногда будем обозначать через $R \cap \mathfrak{J}$.

Наблюдение 1 (ЛОКАЛИЗАЦИЯ КОММУТИРУЕТ С ФАКТОРИЗАЦИЕЙ). Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо, $S \subset R$ — множество, а $\mathfrak{J} \subset R$ — двусторонний идеал. Тогда, по универсальным свойствам факторизации и локализации, существует единственный изоморфизм $(S^{-1}R)/(S^{-1}\mathfrak{J}) \cong S^{-1}(R/\mathfrak{J})$ колец над R .

Наблюдение 2. Пусть A — ассоциативное коммутативное унитарное кольцо, $S \subset A$ — мультипликативное множество, а $\mathfrak{a} \subset A$ и $\mathfrak{b} \subset S^{-1}A$ — идеалы. Тогда $S^{-1}\mathfrak{a} = \{a/s \in S^{-1}A \mid a \in \mathfrak{a}, s \in S\}$, и выполняются следующие равенства:

$$S^{-1}(A \cap \mathfrak{b}) = \mathfrak{b}, \text{ так как } \frac{a}{s} = \frac{a}{1} \cdot \frac{1}{s} \in \mathfrak{b} \Leftrightarrow \frac{a}{1} = \frac{a}{s} \cdot \frac{s}{1} \in \mathfrak{b} \Leftrightarrow a \in A \cap \mathfrak{b};$$

$$\begin{aligned}
A \cap (S^{-1}\mathfrak{a}) &= \text{Ker}(A \rightarrow S^{-1}A \rightarrow (S^{-1}A)/(S^{-1}\mathfrak{a})) = \\
&= \text{Ker}(A \rightarrow A/\mathfrak{a} \rightarrow S^{-1}(A/\mathfrak{a})) = \{a \in A \mid \exists s \in S : sa \in \mathfrak{a}\}.
\end{aligned}$$

Локализация и спектр кольца

Наблюдение 3. Пусть A — ассоциативное коммутативное унитарное кольцо, а $S \subset A$ — мультипликативное множество. Тогда условия $\text{Ker}(A \rightarrow S^{-1}A) \neq 0$ и $\text{Ker}(A \rightarrow S^{-1}A) = A$ эквивалентны наличию в S делителя нуля из A и нуля из A соответственно. Все делители нуля в A нильпотентны тогда и только тогда, когда для любого мультипликативного множества $S \subset A$ идеал $\text{Ker}(A \rightarrow S^{-1}A)$ равен 0 или A .

Теорема 1. Пусть A — ассоциативное коммутативное унитарное кольцо, а $S \subset A$ — мультипликативное множество. Тогда если в A все делители нуля нильпотентны, то то же верно и для $S^{-1}A$.

Доказательство. Любая локализация $S^{-1}A$ имеет вид $T^{-1}A$, где $T \subset A$ — мультипликативное множество, такое что $S \subset T$. Пусть T — такое множество, а $\mathfrak{b} := \text{Ker}(S^{-1}A \rightarrow T^{-1}A)$. Если $\mathfrak{b} = S^{-1}(A \cap \mathfrak{b}) \neq (0), (1)$, то $\text{Ker}(A \rightarrow T^{-1}A) = A \cap \mathfrak{b} \neq (0), (1)$, что противоречит условию. \square

Теорема 2. Пусть A — ассоциативное коммутативное унитарное кольцо, а $S \subset A$ — мультипликативное множество. Тогда если в A все делители нуля равны нулю, то то же верно и для $S^{-1}A$.

Доказательство. Предположим, что $S^{-1}A \neq 0$, то есть $0 \notin S$. Пусть $T = A \setminus \{0\}$ — мультипликативное множество не делителей нуля в A , а $\mathfrak{b} := \text{Ker}(S^{-1}A \rightarrow T^{-1}A)$. Тогда $\text{Ker}(A \rightarrow T^{-1}A) = A \cap \mathfrak{b} = 0$, а потому $\mathfrak{b} = S^{-1}(A \cap \mathfrak{b}) = 0$ и $S^{-1}A$ целостно как подкольцо поля $T^{-1}A$. \square

Следствие 1. Пусть A — ассоциативное коммутативное унитарное кольцо, а $S \subset A$ — мультипликативное множество. Тогда соответствие Галуа между идеалами кольца A и идеалами кольца $S^{-1}A$, индуцированное каноническим гомоморфизмом $A \rightarrow S^{-1}A$, индуцирует биекцию между простыми/примарными идеалами A , дизъюнктными с S , и простыми/примарными соответственно идеалами $S^{-1}A$.

Наблюдение 4. Насыщенные мультипликативные множества в ассоциативном коммутативном унитарном кольце — это в точности дополнения объединений семейств простых идеалов.

Покрывтия спектра локализациями

Теорема 3. Пусть A — ассоциативное коммутативное унитарное кольцо, а $(S_i)_{i \in I}$ — семейство мультипликативных подмножеств A . Тогда следующие условия эквивалентны:

- а) Естественное отображение $\bigsqcup_{i \in I} \text{Спец}(A_{S_i}) \rightarrow \text{Спец}(A)$ сюръективно, то есть семейство $(\text{Спец}(A_{S_i}))_{i \in I}$ покрывает $\text{Спец}(A)$;
- б) Для любого A -модуля M канонический гомоморфизм $m \mapsto (\frac{m}{1})_{i \in I} : M \rightarrow \prod_{i \in I} M_{S_i}$ инъективен;
- в) Для любого A -модуля M если $M_{S_i} = 0$ для любого $i \in I$, то есть выполняется равенство $\prod_{i \in I} M_{S_i} = 0$, то $M = 0$;
- г) Для любого коцепного комплекса A -модулей M^\bullet если выполняется равенство $\prod_{i \in I} (H^0(M^\bullet))_{S_i} \cong \prod_{i \in I} H^0(M^\bullet_{S_i}) = 0$, то $H^0(M^\bullet) = 0$.

Доказательство (из трёх частей).

Импликация (а) \implies (б). Пусть $m \in M$ переходит в 0 во всех M_{S_i} . Тогда аннулятор m в A не дизъюнктен ни с каким из S_i , а потому не содержится ни в каком простом идеале кольца A , а потому равен A .

Импликация (в) \implies (а). Пусть \mathfrak{p} — простой идеал кольца A , такой что $\mathfrak{p} \cap S_i \neq \emptyset$ для любого $i \in I$. Тогда $\prod_{i \in I} (A/\mathfrak{p})_{S_i} = 0$, но $A/\mathfrak{p} \neq 0$.

Импликации (б) \implies (в) \iff (г). Эти импликации очевидны. □

Следствие 2. Пусть A — область целостности, $\mathfrak{a} \subset A$ — идеал, а $(S_i)_{i \in I}$ — семейство мультипликативных подмножеств $A \setminus \{0\}$, такое что $\text{Спец}(A) = \bigcup_{i \in I} \text{Спец}(A_{S_i})$. Тогда $\mathfrak{a} = \bigcap_{i \in I} \mathfrak{a}_{S_i} \subset \text{Frac}(A)$.

Доказательство. Пусть $\mathfrak{b} := \bigcap_{i \in I} \mathfrak{a}_{S_i}$. Тогда для любого $e \in S$ вложение $\mathfrak{a}_{S_e} \rightarrow \mathfrak{b}_{S_e} \cong \mathfrak{a}_{S_e}$, индуцированное вложением $\mathfrak{a} \rightarrow \mathfrak{b}$, биективно, а потому, согласно теореме 3, вложение $\mathfrak{a} \rightarrow \mathfrak{b}$ тоже биективно. □

Наблюдение 5. Пусть A — ассоциативное коммутативное унитарное кольцо, $S_1, S_2 \subset A$ — мультипликативные множества, M — A -модуль, а $(m_1, s_1) \in M \times S_1$ и $(m_2, s_2) \in M \times S_2$ — две пары, такие что $\frac{m_1}{s_1} = \frac{m_2}{s_2}$ в $M_{S_1 S_2}$. Тогда существуют $r_1 \in S_1$ и $r_2 \in S_2$, такие что для пар

$(m'_1, s'_1) := r_1 \cdot (m_1, s_1) = (r_1 m_1, r_1 s_1) \in M \times S_1$ и $(m'_2, s'_2) := r_2 \cdot (m_2, s_2) = (r_2 m_2, r_2 s_2) \in M \times S_2$ выполняется равенство $s'_2 m'_1 = s'_1 m'_2$.

Теорема 4. Пусть M — модуль над ассоциативным коммутативным унитарным кольцом A , а $(S_i)_{i \in I}$ — конечное семейство мультипликативных подмножеств A , такое что семейство $(\text{Спец}(A_{S_i}))_{i \in I}$ покрывает $\text{Спец}(A)$. Тогда последовательность (1) точна.

$$0 \rightarrow M \xrightarrow[\iota]{m \mapsto (\frac{m}{1})_{i \in I}} \bigoplus_{i \in I} M_{S_i} \xrightarrow[\alpha]{(\frac{m_i}{s_i})_{i \in I} \mapsto (\frac{m_i}{s_i} - \frac{m_j}{s_j})_{(i,j) \in I \times I}} \bigoplus_{(i,j) \in I \times I} M_{S_i S_j}. \quad (1)$$

Первое доказательство. Для любого $e \in I$ после применения функтора локализации по S_e последовательность (1) станет точной по тривиальным причинам. Осталось применить теорему 3. \square

Второе доказательство. Инъективность ι следует из теоремы 3. Докажем, что $\text{Im}(\iota) = \text{Ker}(\alpha)$. Пусть $(\frac{m_i}{s_i})_{i \in I} \in \text{Ker}(\alpha)$. Тогда, согласно наблюдению 5, можно предположить, что $s_i m_j = s_j m_i$ для любых $i, j \in I$. Выберем семейство $(a_i)_{i \in I}$ элементов A , такое что $\sum_{i \in I} s_i a_i = 1$. Возьмём $m := \sum_{i \in I} a_i m_i \in M$. Тогда $s_i m = \sum_{j \in I} s_i a_j m_j = \sum_{j \in I} s_j a_j m_i = m_i$ для любого $i \in I$, откуда следует, что $\iota(m) = (\frac{m_i}{s_i})_{i \in I}$. \square

Замечание 1. Первое доказательство теоремы 4 основано на доказательстве леммы 7.13 из [9, лекция 7].

14.2. Целое замыкание

Определение и базовые свойства целых элементов

Соглашение 1 (КОЛЬЦА И АЛГЕБРЫ). В этом разделе все кольца и алгебры считаются ассоциативными, коммутативными и унитарными.

Обозначение 1 (РАЗМЕРНОСТЬ КРУЛЛЯ). Пусть A — кольцо. Тогда в этом разделе через $\dim(A)$ будет обозначаться размерность Крулля A .

Определение 1 (КОНЕЧНАЯ АЛГЕБРА). Алгебра над кольцом A называется *конечной* над A , если она конечно порождена как A -модуль.

Теорема 1 (ДЖОЙН ДВУХ КОНЕЧНЫХ ПОДАЛГЕБР КОНЕЧЕН). Пусть B — алгебра над кольцом A , а C и D — две её конечные подалгебры. Тогда джойн C и D в решётке подалгебр алгебры B конечен над A .

Доказательство. Джойн C и D является образом индуцированного гомоморфизма $C \otimes_A D \rightarrow B$, а тензорное произведение конечно порождённых модулей является конечно порождённым модулем. \square

Определение 2 (ЦЕЛОЕ ЗАМЫКАНИЕ). Пусть B — алгебра над кольцом A . Тогда объединение всех конечных A -подалгебр алгебры B называется *целым замыканием* A в B и обозначается $\text{Int}_B(A)$.

Замечание 1. Пусть B — алгебра над кольцом A . Тогда из теоремы 1 следует, что $\text{Int}_B(A)$ является A -подалгеброй в B .

Определение 3 (ЦЕЛЫЙ ЭЛЕМЕНТ). Пусть B — алгебра над кольцом A . Элемент $b \in B$ называется *целым* над A , если порождённая им подалгебра $A[b] \subset B$ конечна над A , или, эквивалентно, b является корнем унитарного многочлена с коэффициентами в A , то есть $b^n = \sum_{i=0}^{n-1} a_i b^i$ для какого-то $n \in \mathbb{N}_1$ и каких-то $a_i \in A$, где $0 \leq i \leq n-1$.

Теорема 2 (ВСЕ ЭЛЕМЕНТЫ КОНЕЧНОЙ АЛГЕБРЫ ЦЕЛЫЕ). Пусть B — конечная алгебра над кольцом A . Тогда любой элемент $b \in B$ является *целым* над A .

Первое доказательство. Применим теорему Гамильтона–Кэли к эндоморфизму $x \mapsto bx : B \rightarrow B$ конечно порождённого A -модуля B . \square

Второе доказательство (из двух частей).

Часть 1. Если кольцо A нётерово, например, является полем или кольцом \mathbb{Z} , то теорема верна автоматически. Сведём общий случай к этому.

Часть 2. Пусть $(b_i)_{i \in I}$ — конечное семейство образующих A -модуля B , содержащее b , а $(c_{i,j,k})_{i,j,k \in I}$ — семейство элементов A , такое что $b_i b_j = \sum_{k \in I} c_{i,j,k} b_k$ для всех $i, j \in I$. Тогда кольцо $A' := \mathbb{Z}[c_{i,j,k} \mid i, j, k \in I] \subset A$ нётерово, и b лежит в конечной A' -алгебре $\sum_{i \in I} A' b_i \subset B$. По предыдущему рассуждению элемент b целый над A' , а потому и над A . \square

Следствие 1. Пусть B — алгебра над кольцом A . Тогда целое замыкание A в B состоит в точности из элементов B , *целых* над A .

Замечание 2. Теорему 2 можно переформулировать следующим образом: «Конечно порождённая подалгебра конечной алгебры конечна».

Целое замыкание и локализация

Определение 4 (ЦЕЛОЗАМКНУТАЯ ОБЛАСТЬ). Область целостности A называется *целозамкнутой*, если $\text{Int}_{\text{Frac}(A)}(A) = A$.

Теорема 3 (ЦЕЛОЕ ЗАМКЫКАНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ). Пусть B — алгебра над кольцом A , а $S \subset A$ — мультипликативное множество. Тогда выполняется равенство $\text{Int}_{S^{-1}B}(S^{-1}A) = S^{-1}\text{Int}_B(A)$.

Доказательство (из двух частей).

Часть 1. Пусть $b \in \text{Int}_B(A)$, а $s \in S$. Тогда

$$b^n + a_1 b^{n-1} + \dots + a_n = 0 \quad (1)$$

для какого-то семейства $(a_i)_{i=1}^n \in A^{\times n}$, где $n \in \mathbb{N}_1$. Разделив уравнение (1) на s^n , получаем уравнение

$$\left(\frac{b}{s}\right)^n + \frac{a_1}{s} \left(\frac{b}{s}\right)^{n-1} + \dots + \frac{a_n}{s^n} = 0,$$

откуда следует, что $\frac{b}{s} \in \text{Int}_{S^{-1}B}(S^{-1}A)$.

Часть 2. Пусть $\frac{b}{s} \in \text{Int}_{S^{-1}B}(S^{-1}A)$, где $b \in B$ и $s \in S$. Тогда

$$\left(\frac{b}{s}\right)^n + \frac{a_1}{s_1} \left(\frac{b}{s}\right)^{n-1} + \dots + \frac{a_n}{s_n} = 0 \quad (2)$$

для каких-то семейств $(a_i)_{i=1}^n \in A^{\times n}$ и $(s_i)_{i=1}^n \in S^{\times n}$, где $n \in \mathbb{N}_1$. Приведя дроби $\frac{b}{s}, \frac{a_1}{s_1}, \dots, \frac{a_n}{s_n}$ к общему знаменателю, можно считать, что $s = s_1 = \dots = s_n$. Домножив уравнение (2) на s^n , получаем уравнение

$$b^n + a_1 b^{n-1} + \dots + a_n s^{n-1} = 0,$$

откуда следует, что $b \in \text{Int}_B(A)$ и $\frac{b}{s} \in S^{-1}\text{Int}_B(A)$. □

Следствие 2 (ЦЕЛОЗАМКНУТОСТЬ НАСЛЕДУЕТСЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯМИ). Пусть A — целозамкнутая область целостности, а $S \subset A \setminus \{0\}$ — мультипликативное множество. Тогда кольцо $S^{-1}A$ целозамкнуто.

Наблюдение 1 (ЛОКАЛЬНОСТЬ ЦЕЛОЗАМКНУТОСТИ). Пусть A — область целостности, а $(S_i)_{i \in I}$ — семейство мультипликативных подмножеств $A \setminus \{0\}$, такое что $A = \bigcap_{i \in I} S_i^{-1}A$ и для любого $i \in I$ кольцо $S_i^{-1}A$ целозамкнуто. Тогда A тоже целозамкнуто.

Теорема 4 (ЦЕЛОЗАМКНУТОСТЬ ФАКТОРИАЛЬНЫХ КОЛЕЦ). Пусть A — факториальное кольцо. Тогда A целозамкнуто.

Доказательство. Пусть $x \in \text{Int}_{\text{Frac}(A)}(A)$. Тогда $x^n = \sum_{i=1}^n a_i x^{n-i}$, для какого-то семейства $(a_i)_{i=1}^n \in A^{\times n}$, где $n \in \mathbb{N}_1$. Помимо этого существуют $a, b \in A$, такие что $x = \frac{a}{b}$ и $Aa + Ab = A$. Предположим, что $x \notin A$. Тогда $b \notin A^\times$, а потому существует простой элемент $\pi \in A$, такой что $\pi \mid b$, но $\pi \nmid a$, что противоречит соотношению $a^n = \sum_{i=1}^n a_i a^{n-i} b^i$. \square

Теорема о несравнимости и теорема о подъёме

Теорема 5. Пусть A — целостное кольцо, такое что $\text{Frac}(A)$ цело над A . Тогда выполняется равенство $A = \text{Frac}(A)$.

Доказательство. Пусть $a \in A \setminus \{0\}$. Так как элемент $a^{-1} \in \text{Frac}(A)$ целый над A , то $a^{-n} \in \sum_{i=0}^{n-1} Aa^{-i}$ для какого-то $n \in \mathbb{N}_1$. Умножив это соотношение на a^{n-1} , получаем, что $a^{-1} \in A$. \square

Теорема 6. Пусть B — целостное кольцо, целое над своим подкольцом A . Тогда $A = \text{Frac}(A)$ тогда и только тогда, когда $B = \text{Frac}(B)$.

Доказательство. Если B — поле, то $\text{Frac}(A) \subset B$ цело над A , а потому совпадает с A . Если A — поле, то, $\text{Frac}(B)$ алгебраично над A , а потому цело над B , а потому совпадает с B . \square

Замечание 3. Теорема 6 — это частный случай того факта, что размерность Крулля не меняется при целых расширениях (теорема 10).

Следствие 3. Пусть B — целая алгебра над кольцом A . Тогда простой идеал \mathfrak{q} кольца B является максимальным тогда и только тогда, когда простой идеал $\mathfrak{p} := \mathfrak{q} \cap A$ кольца A является максимальным.

Доказательство. Применим теорему 6 к вложению $A/\mathfrak{p} \rightarrow B/\mathfrak{q}$. \square

Теорема 7 (ТЕОРЕМА О НЕСРАВНИМОСТИ). Пусть B — целая алгебра над своим подкольцом A , а $\mathfrak{q}, \mathfrak{Q} \subset B$ — простые идеалы B , такие что $\mathfrak{q} \subset \mathfrak{Q}$ и $\mathfrak{q} \cap A = \mathfrak{Q} \cap A$. Тогда $\mathfrak{q} = \mathfrak{Q}$.

Доказательство. Пусть $\mathfrak{p} := \mathfrak{q} \cap A = \mathfrak{Q} \cap A$, а $S := A \setminus \mathfrak{p}$. Тогда B_S является целой алгеброй над своим подкольцом A_S , а $\mathfrak{q}B_S$ и $\mathfrak{Q}B_S$ — это простые идеалы B_S , такие что $\mathfrak{q}B_S \cap A_S = \mathfrak{Q}B_S \cap A_S = \mathfrak{p}A_S$. Так как $\mathfrak{p}A_S \subset A_S$ — максимальный идеал, то $\mathfrak{q}B_S = \mathfrak{Q}B_S$ согласно следствию 3. Отсюда следует, что $\mathfrak{q} = \mathfrak{q}B_S \cap B = \mathfrak{Q}B_S \cap B = \mathfrak{Q}$. \square

Теорема 8 (ТЕОРЕМА О ПОДНЯТИИ ПРОСТЫХ). Пусть B — целая алгебра над своим подкольцом A , а $\mathfrak{p} \subset A$ — простой идеал A . Тогда существует простой идеал $\mathfrak{q} \subset B$, такой что $\mathfrak{p} = \mathfrak{q} \cap A$.

Доказательство. Пусть $S := A \setminus \mathfrak{p}$. Тогда B_S является целой алгеброй над своим подкольцом A_S . Пусть $\mathfrak{m} \subset B_S$ — какой-то максимальный идеал B_S . Тогда, согласно следствию 3, идеал $\mathfrak{m} \cap A_S \subset A_S$ является максимальным идеалом локального кольца $A_S \cong A_{\mathfrak{p}}$, а потому совпадает с $\mathfrak{p}A_S$. Осталось воспользоваться каноническими вложениями $\text{Spec}(B_S) \rightarrow \text{Spec}(B)$ и $\text{Spec}(A_S) \rightarrow \text{Spec}(A)$ и взять $\mathfrak{q} := \mathfrak{m} \cap B$. \square

Теорема 9 (ТЕОРЕМА О ПОДЪЁМЕ). Пусть B — целая алгебра над кольцом A , а $\mathfrak{p}, \mathfrak{P} \in \text{Spec}(A)$ и $\mathfrak{q} \subset \text{Spec}(B)$ — простые идеалы, такие что $\mathfrak{p} \subset \mathfrak{P}$ и $\mathfrak{p} = \mathfrak{q} \cap A$. Тогда существует простой идеал $\mathfrak{Q} \in \text{Spec}(B)$, такой что $\mathfrak{q} \subset \mathfrak{Q}$ и $\mathfrak{P} = \mathfrak{Q} \cap A$.

Доказательство. Заметим, что кольцо B/\mathfrak{q} является целой алгеброй над своим подкольцом A/\mathfrak{p} и применим теорему 8 к простому идеалу $\mathfrak{P}/\mathfrak{p}$ подкольца A/\mathfrak{p} кольца B/\mathfrak{q} . \square

Наблюдение 2. Пусть B — целая алгебра над своим подкольцом A , а $\mathfrak{P} \subset A$ — простой идеал A . Тогда

$$\{\mathfrak{q} \in \text{Spec}(B) \mid \mathfrak{q} \cap A \subset \mathfrak{P}\} = \{\mathfrak{q} \in \text{Spec}(B) \mid \mathfrak{q} \cap S = \emptyset\} \neq \emptyset,$$

где $S := A \setminus \mathfrak{P}$. Поэтому теорему 8 можно вывести из теоремы 9.

Теорема 10 (РАЗМЕРНОСТЬ КРУЛЛЯ И ЦЕЛЫЕ РАСШИРЕНИЯ). Пусть B — целая алгебра над своим подкольцом A . Тогда $\dim(A) = \dim(B)$.

Доказательство. Неравенство $\dim(A) \geq \dim(B)$ следует из теоремы 7, а неравенство $\dim(A) \leq \dim(B)$ следует из теорем 8 и 9. \square

Целое замыкание абстрактного идеала и теорема о спуске

Определение 5 (АБСТРАКТНЫЙ ИДЕАЛ). Аддитивная абелева группа \mathfrak{a} , снабжённая биаддитивным умножением $a \otimes b \mapsto ab : \mathfrak{a} \otimes_{\mathbb{Z}} \mathfrak{a} \rightarrow \mathfrak{a}$, называется *абстрактным идеалом*.

Определение 6 (ЦЕЛОЕ ЗАМЫКАНИЕ АБСТРАКТНОГО ИДЕАЛА). Пусть A — кольцо, а $\mathfrak{a} \subset A$ — абстрактный идеал. Тогда множество $\text{Int}_A(\mathfrak{a}) := \bigcup_{n=1}^{\infty} \{a \in A \mid a^n \in \sum_{i=0}^{n-1} \mathfrak{a} a^i\}$ называется *целым замыканием* \mathfrak{a} в A .

Наблюдение 3. Пусть A — кольцо, а $\mathfrak{a} \subset A$ — абстрактный идеал. Тогда выполняется включение $\mathfrak{a} \subset \text{Int}_A(\mathfrak{a})$.

Наблюдение 4. Пусть A — кольцо, а $\mathfrak{a} \subset A$ — абстрактный идеал. Тогда если $a \in A$ и $a^n \in \text{Int}_A(\mathfrak{a})$ для какого-то $n \in \mathbb{N}_1$, то $a \in \text{Int}_A(\mathfrak{a})$.

Наблюдение 5. Пусть B — кольцо, $\mathfrak{a} \subset B$ — абстрактный идеал, а $A \subset B$ — подкольцо, такое что $A\mathfrak{a} \subset \mathfrak{a}$. Тогда множество $A + \mathfrak{a}X + \mathfrak{a}X^2 + \dots \subset B[X]$ является подкольцом $B[X]$ и выполняются равенства (3) и (4).

$$\text{Int}_B(A) = \{b \in B \mid b \in \text{Int}_{B[X]}(A + \mathfrak{a}X + \mathfrak{a}X^2 + \dots)\} \quad (3)$$

$$\text{Int}_B(\mathfrak{a}) = \{b \in B \mid bX \in \text{Int}_{B[X]}(A + \mathfrak{a}X + \mathfrak{a}X^2 + \dots)\} \quad (4)$$

Теорема 11. Пусть B — кольцо, $\mathfrak{a} \subset B$ — абстрактный идеал, а $A \subset B$ — подкольцо, такое что $A\mathfrak{a} \subset \mathfrak{a}$. Тогда $\text{Int}_B(\mathfrak{a}) \subset B$ является абстрактным идеалом и $\text{Int}_B(A) \text{Int}_B(\mathfrak{a}) \subset \text{Int}_B(\mathfrak{a})$.

Доказательство. Из наблюдения 5 сразу следует, что $\text{Int}_B(\mathfrak{a})$ является $\text{Int}_B(A)$ -подмодулем B . Взяв в качестве A кольцо $\mathbb{Z} + \mathfrak{a} \subset B$, получаем, что $\text{Int}_B(\mathfrak{a})$ является абстрактным идеалом. \square

Теорема 12. Пусть B — кольцо, $\mathfrak{a} \subset B$ — абстрактный идеал, A — подкольцо B , содержащее \mathfrak{a} , такое что $A\mathfrak{a} \subset \mathfrak{a}$, а $\bar{A} := \text{Int}_B(A)$. Тогда выполняется равенство $\text{Int}_B(\mathfrak{a}) = \text{rad}_{\bar{A}}(\mathfrak{a}\bar{A})$.

Доказательство. Включение $\text{Int}_B(\mathfrak{a}) \subset \text{rad}_{\bar{A}}(\mathfrak{a}\bar{A})$ очевидно, а включение $\text{rad}_{\bar{A}}(\mathfrak{a}\bar{A}) \subset \text{Int}_B(\mathfrak{a})$ следует из теоремы 11 и наблюдений 3 и 4. \square

Теорема 13. Пусть E — поле, $\mathfrak{a} \subset E$ — абстрактный идеал, а K — подполе E , содержащее \mathfrak{a} . Тогда для любого $a \in \text{Int}_E(\mathfrak{a})$ все не старшие коэффициенты минимального многочлена a над K целые над \mathfrak{a} .

Доказательство. Пусть $P(X) \in K[X]$ — минимальный многочлен a над K , а E' — поле разложения $P(X)$ над E . Тогда если $b \in E'$ — корень $P(X)$, то минимальные многочлены a и b над K совпадают, а потому существует единственный изоморфизм $K[a] \xrightarrow{\sim} K[b]$ алгебр над K , переводящий a в b , а потому b тоже является целым над \mathfrak{a} . Не старшие коэффициенты $P(X)$ лежат в абстрактном идеале, порождённом корнями $P(X)$ в E' , а потому являются целыми над \mathfrak{a} . \square

Теорема 14. Пусть задан гомоморфизм колец $A \rightarrow B$ и простой идеал $\mathfrak{p} \subset A$. Тогда для существования простого идеала $\mathfrak{q} \subset B$, такого что $\mathfrak{p} = \mathfrak{q} \cap A$, необходимо и достаточно выполнения условия $\mathfrak{p} = \mathfrak{p}B \cap A$.

Доказательство. Условие $\mathfrak{p} = \mathfrak{p}B \cap A$ эквивалентно условию инъективности $A/\mathfrak{p} \rightarrow B/\mathfrak{p}B \cong A/\mathfrak{p} \otimes_A B$, которое эквивалентно условию инъективности $\kappa(\mathfrak{p}) \rightarrow \kappa(\mathfrak{p}) \otimes_A B$, где $\kappa(\mathfrak{p}) := \text{Frac}(A/\mathfrak{p})$, которое эквивалентно условию не пустоты множества $\text{Spec}(\kappa(\mathfrak{p}) \otimes_A B)$, естественно биективного слою отображения $\text{Spec}(B) \rightarrow \text{Spec}(A)$ над $\mathfrak{p} \in \text{Spec}(A)$. \square

Теорема 15 (ТЕОРЕМА О СПУСКЕ). Пусть B — область целостности, целая над целозамкнутой подкольцом $A \subset B$, а $\mathfrak{p}, \mathfrak{P} \in \text{Spec}(A)$ и $\mathfrak{Q} \in \text{Spec}(B)$ — простые идеалы, такие что $\mathfrak{p} \subset \mathfrak{P}$ и $\mathfrak{Q} \cap A = \mathfrak{P}$. Тогда существует $\mathfrak{q} \in \text{Spec}(B)$, такой что $\mathfrak{q} \subset \mathfrak{Q}$ и $\mathfrak{p} = \mathfrak{q} \cap A$.

Доказательство. Нужно доказать, что \mathfrak{p} является сужением элемента $\text{Spec}(B_{\mathfrak{Q}})$. Согласно теореме 14, это равносильно условию $\mathfrak{p} = \mathfrak{p}B_{\mathfrak{Q}} \cap A$. Пусть $a \in \mathfrak{p}B_{\mathfrak{Q}} \cap A$ и $a \neq 0$. Тогда $a = x/y$, где $x \in \mathfrak{p}B$, а $y \in B \setminus \mathfrak{Q}$. Так как y цел над A , то минимальное уравнение y над $K := \text{Frac}(A)$ имеет вид $y^n + a_1y^{n-1} + \dots + a_ny^0 = 0$, где $n \in \mathbb{N}_1$, а $a_1, \dots, a_n \in A$. С другой стороны, так как $a \in K^\times$, то минимальное уравнение $x = ay$ над K имеет вид $x^n + a_1a^1x^{n-1} + \dots + a_na^n x^0 = 0$, причём $a_1a^1, \dots, a_na^n \in \mathfrak{p}$, так как $x \in \mathfrak{p}B$ цел над \mathfrak{p} . Если $a \notin \mathfrak{p}$, то $a_1, \dots, a_n \in \mathfrak{p}$, а потому $y^n \in \mathfrak{p}B \subset \mathfrak{Q}$, что противоречит тому, что $y \in B \setminus \mathfrak{Q}$. \square

Замечание 4. Теорема 15 — это теорема о спуске для целостного целого расширения целозамкнутой области. Существует также теорема о спуске для плоского расширения колец.

Замечание 5. Изложение целых замыканий абстрактных идеалов в этом подразделе основано на тексте Д. Гринберга [16]. Доказательство тео-

ремы о спуске (теоремы 15) повторяет доказательства из книг Атьи – Макдональда [2, с. 81] и Милна [18, с. 33].

14.3. Лемма Нётер о нормализации

Лемма 1. Пусть $(P_j)_{j \in J}$ — конечное семейство ненулевых полиномов от конечного семейства переменных $(X_i)_{i \in I}$ с коэффициентами в бесконечном поле Q . Пусть $Z \subset Q$ — бесконечное подмножество Q . Тогда существует точка в Z^I , не являющаяся нулём ни одного из P_j .

Доказательство. Зафиксируем $e \in I$. Для произвольного $j \in J$ многочлен P_j , рассмотренный как многочлен от X_e с коэффициентами в поле рациональных дробей $Q((X_i)_{i \in I \setminus \{e\}})$, имеет конечное число корней. Поэтому существует число $c \in Z$, такое что после подстановки $X_e = c$ во все многочлены семейства $(P_j)_{j \in J}$ они все останутся ненулевыми, и лемма доказывается индукцией по мощности I . \square

Лемма 2. Пусть K — ассоциативное коммутативное унитарное кольцо, I — конечное множество, а $f \in K[(X_i)_{i \in I}]$ — многочлен. Тогда для любого $e \in I$, такого что $\deg_{X_e}(f) > 0$, существуют автоморфизм $\varphi \in \text{Aut}_{K\text{-ring}}(K[(X_i)_{i \in I}])$ и элементы $n \in \mathbb{N}_1$ и $c \in K \setminus \{0\}$, такие что выполняется равенство $\varphi(f) = cX_e^n +$ (члены меньшей степени по X_e).

Доказательство. Для любого семейства $(m_i)_{i \in I \setminus \{e\}} \in (\mathbb{N}_1)^{I \setminus \{e\}}$ определён автоморфизм $\varphi : K[(X_i)_{i \in I}] \rightarrow K[(X_i)_{i \in I}]$, такой что $\varphi(X_e) = X_e$ и $\varphi(X_i) = X_i + X_e^{m_i}$ для любого $i \in I \setminus \{e\}$. Тогда для любого семейства $(n_i)_{i \in I} \in (\mathbb{N}_0)^I$ выполняется равенство

$$\varphi(\prod_{i \in I} X_i^{n_i}) = X_e^{n_e + \sum_{i \in I \setminus \{e\}} n_i m_i} + (\text{члены меньшей степени по } X_e).$$

По лемме 1, взяв $Q = \mathbb{Q}$ и $Z = \mathbb{N}_1$, мы можем выбрать $(m_i)_{i \in I \setminus \{e\}}$ таким образом, чтобы степени по X_e образов различных мономов, входящих в f , были попарно различными, так как для любых двух различных семейств $(n'_i)_{i \in I}, (n''_i)_{i \in I} \in (\mathbb{N}_0)^I$ соответствующий многочлен

$$(n'_e + \sum_{i \in I \setminus \{e\}} n'_i M_i) - (n''_e + \sum_{i \in I \setminus \{e\}} n''_i M_i) \in \mathbb{Q}[(M_i)_{i \in I \setminus \{e\}}]$$

не равен нулю. \square

Доказательство для бесконечного поля. Предположим, что K — бесконечное поле. Для любого семейства $(\lambda_i)_{i \in I \setminus \{e\}} \in K^{I \setminus \{e\}}$ определён автоморфизм $\varphi : K[(X_i)_{i \in I}] \rightarrow K[(X_i)_{i \in I}]$, такой что $\varphi(X_e) = X_e$ и $\varphi(X_i) = X_i + \lambda_i X_e$ для любого $i \in I \setminus \{e\}$. Тогда для любого семейства $(n_i)_{i \in I} \in (\mathbb{N}_0)^I$ выполняется равенство

$$\varphi(\prod_{i \in I} X_i^{n_i}) = (\prod_{i \in I \setminus \{e\}} \lambda_i^{n_i}) X_e^{\sum_{i \in I} n_i} + (\text{члены меньшей степени по } X_e).$$

Отсюда видно, что старший по X_e коэффициент $\varphi(f)$ является ненулевым полиномом от $(\lambda_i)_{i \in I \setminus \{e\}}$. По лемме 1, взяв $Q = K$ и $Z = K$, мы можем выбрать $(\lambda_i)_{i \in I \setminus \{e\}}$ таким образом, чтобы этот коэффициент был ненулевым. \square

Теорема 1 (ЛЕММА НЁТЕР О НОРМАЛИЗАЦИИ). *Пусть A — ненулевая ассоциативная коммутативная унитарная конечно порождённая алгебра над полем K . Тогда существует K -подалгебра алгебры A , изоморфная алгебре многочленов от конечного числа переменных с коэффициентами в K , над которой A конечна.*

Доказательство. Пусть $(x_i)_{i \in I}$ — это конечное семейство образующих A как K -алгебры, то есть гомоморфизм $\pi : K[(X_i)_{i \in I}] \rightarrow A$, такой что $\pi(X_i) = x_i$ для любого $i \in I$, сюръективен. Пусть $0 \neq f \in \text{Ker}(\pi)$. Применив лемму 2, получаем цепочку гомоморфизмов

$$K[(X_i)_{i \in I \setminus \{e\}}] \xrightarrow{\bar{\iota}} K[(X_i)_{i \in I}]/(\varphi(f)) \xrightarrow{\varphi^{-1}} K[(X_i)_{i \in I}]/(f) \xrightarrow{\bar{\pi}} A,$$

где гомоморфизм $\bar{\pi}$ индуцирован π , а гомоморфизм $\bar{\iota}$ индуцирован очевидным вложением $\iota : K[(X_i)_{i \in I \setminus \{e\}}] \rightarrow K[(X_i)_{i \in I}]$. Так как кольцо $K[(X_i)_{i \in I}]/(\varphi(f))$ конечно над $K[(X_i)_{i \in I \setminus \{e\}}]$, то A — тоже. Мы получили, что K -алгебра A конечна над K -алгеброй с меньшим числом образующих. Доказательство завершается по индукции. \square

14.4. Теорема Гильберта о нулях

Обобщённая лемма Зарисского

Определение 1 (КОЛЬЦО ДЖЕКОВСОНА). Ассоциативное коммутативное унитарное кольцо A называется *кольцом Гильберта* или *кольцом*

Джекобсона, если любой простой идеал в A является пересечением всех содержащих его максимальных идеалов.

Наблюдение 1 (ОБ ОБЛАСТЯХ ГОЛДМАНА). Пусть A — ассоциативное коммутативное унитарное целостное кольцо. Тогда A -алгебра $\text{Frac}(A)$ не является конечно порождённой тогда и только тогда, когда для любого $f \in A \setminus \{0\}$ кольцо $A[f^{-1}]$ не является полем, то есть для любого $f \in A \setminus \{0\}$ существует ненулевой простой идеал $\mathfrak{p} \subset A$, такой что $f \notin \mathfrak{p}$.

Замечание 1. Для полноты отметим, что ассоциативное коммутативное унитарное целостное кольцо A , такое что A -алгебра $\text{Frac}(A)$ конечно порождена, называется *областью Голдмана* или *G-областью*.

Теорема 1 (ЛЕММА ЗАРИССКОГО ДЛЯ ПРОСТЫХ РАСШИРЕНИЙ ПОЛЕЙ). Пусть K — поле. Тогда K -алгебра $\text{Frac}(K[X]) = K(X)$ не является конечно порождённой.

Доказательство. Достаточно доказать, что $K[X][f^{-1}] \neq K(X)$ для любого $f \in K[X] \setminus K$. Из элементов $K[X]$ обратимыми в $K[X][f^{-1}]$ становятся в точности делители степеней f , а, например, $(f - 1) \nmid f^n$ для любого $n \in \mathbb{N}_0$, так как $f^n \equiv 1 \not\equiv 0 \pmod{(f - 1)}$. \square

Пример 1. Между прочим, $K[[X]][X^{-1}] = K((X))$ для любого поля K .

Теорема 2 (ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ КОЛЕЦ ГИЛЬБЕРТА). Ассоциативное коммутативное унитарное кольцо A является кольцом Джекобсона тогда и только тогда, когда для любого не максимального простого идеала $\mathfrak{p} \subset A$ соответствующая A -алгебра $\text{Frac}(A/\mathfrak{p})$ не является конечно порождённой, то есть A/\mathfrak{p} не является областью Голдмана.

Доказательство. Часть «только тогда» выводится из наблюдения 1. Докажем часть «тогда». Пусть $\mathfrak{p} \subset A$ — простой идеал, $A' := A/\mathfrak{p}$, $f \in A' \setminus \{0\}$, а $\mathfrak{m} \subset A'[f^{-1}]$ — максимальный идеал. Так как $A'[f^{-1}]/\mathfrak{m} \cong (A'/(A' \cap \mathfrak{m}))[f^{-1}]$ — поле, то, по условию, $A'/(A' \cap \mathfrak{m})$ — поле, а потому $A' \cap \mathfrak{m}$ — максимальный идеал в A' , не содержащий f . \square

Теорема 3 (ОБОВЩЁННАЯ ЛЕММА ЗАРИССКОГО). Ассоциативное коммутативное унитарное кольцо A является кольцом Джекобсона тогда и только тогда, когда любая конечно порождённая A -алгебра K , которая является полем, конечна над A .

Доказательство (из двух частей).

Часть «тогда». Пусть $\mathfrak{p} \subset A$ — простой идеал. Тогда если A -алгебра $\text{Frac}(A/\mathfrak{p})$ является конечно порождённой, то, согласно условию, она конечна над A . По теореме 14.2.6 из этого следует, что \mathfrak{p} — максимальный идеал. Согласно теореме 2 мы доказали, что A — кольцо Джекобсона.

Часть «только тогда». Сначала заметим, что можно заменить кольцо A на его образ в K , и считать, что $A \subset K$. Пусть $(x_i)_{i \in I}$ — конечное семейство элементов алгебры K , такое что $K = A[x_i \mid i \in I]$, а $(x_j)_{j \in J}$, где $J \subset I$, — максимальное алгебраически независимое над A подсемейство семейства $(x_i)_{i \in I}$. Для каждого индекса $i \in I \setminus J$ пусть $P_i \in A[x_j \mid j \in J][X_i]$ — какое-то нетривиальное алгебраическое соотношение между x_i и $(x_j)_{j \in J}$, а $f_i \in A[x_j \mid j \in J]$ — старший по X_i коэффициент P_i . Тогда поле K цело над кольцом $A' := A[x_j \mid j \in J][f_i^{-1} \mid i \in I \setminus J]$, откуда, по теореме 14.2.6, следует, что $A' = \text{Frac}(A)(x_j \mid j \in J)$. Так как A' конечно порождено как A -алгебра, то $A' = \text{Frac}(A)$ согласно теореме 1 и $\text{Frac}(A) = A$ согласно теореме 2. Мы доказали, что K — конечно порождённая целая, то есть конечная, алгебра над A . \square

Классическая теорема о нулях

Теорема 4 (NULLSTELLENSATZ). Пусть k — поле, k^{alg} — его алгебраическое замыкание, A — конечно порождённая ассоциативная коммутативная унитарная алгебра над k . Тогда максимальные идеалы $\mathfrak{m} \subset A$ — это в точности ядра гомоморфизмов $A \rightarrow k^{\text{alg}}$ над k .

Доказательство (из двух частей).

Часть 1. Пусть $\mathfrak{m} \subset A$ — максимальный идеал. Тогда поле A/\mathfrak{m} является конечным расширением поля k по лемме Зарисского, следовательно, вкладывается в k^{alg} над k . Идеал \mathfrak{m} является ядром сквозного гомоморфизма $A \rightarrow A/\mathfrak{m} \rightarrow k^{\text{alg}}$.

Часть 2. Пусть $\varphi : A \rightarrow k^{\text{alg}}$ — гомоморфизм над k . Так как k -алгебра k^{alg} целостная и целая над k , то её подалгебра $\varphi(A)$ — тоже, поэтому $\varphi(A)$ является полем по теореме 14.2.6. \square

Следствие 1 («Сильная теорема о нулях»). Пусть k — поле, k^{alg} — его алгебраическое замыкание, A — конечно порождённая ассоциативная коммутативная унитарная алгебра над k , а $f \in A$ — элемент A . Если для любого гомоморфизма $\varphi : A \rightarrow k^{\text{alg}}$ над k выполняется равенство $\varphi(f) = 0$, то f — нильпотент.

Доказательство. Пусть A_f — локализация A по f . Алгебра A_f является конечно порождённой алгеброй над k : в качестве её образующих можно взять f^{-1} и образующие A , но k -гомоморфизмов $A_f \rightarrow k^{\text{alg}}$ не существует. Следовательно, $A_f = 0$, то есть $f \in A$ — нильпотент. \square

Замечание 2. Приведённое доказательство следствия 1 иногда называют «трюком Рабиновича».

Замечание 3. Частным случаем следствия 1 в его же обозначениях является факт, что если k -гомоморфизмов $A \rightarrow k^{\text{alg}}$ не существует, то все элементы A нильпотентны, то есть $A = 0$. Это объясняет название «сильная теорема о нулях».

14.5. Лемма Накаямы для коммутативных колец

Соглашение 1 (Кольцо). В этом разделе все кольца считаются ассоциативными, коммутативными и унитарными.

Теорема 1 (КОММУТАТИВНАЯ ЛЕММА НАКАЯМЫ I). Пусть M — ненулевой конечно порождённый модуль над кольцом A , а \mathfrak{J} — радикал Джекобсона A . Тогда $\mathfrak{J}M \neq M$.

Первое доказательство. Частный случай теоремы 10.5.2. \square

Второе доказательство. Если в условиях теоремы 2 взять в качестве \mathfrak{a} радикал Джекобсона кольца A , то элемент x будет обратимым, и из равенства $xM = 0$ будет следовать равенство $M = 0$. \square

Теорема 2 (КОММУТАТИВНАЯ ЛЕММА НАКАЯМЫ II). Пусть M — конечно порождённый модуль над кольцом A , а \mathfrak{a} — идеал в A , такой что $\mathfrak{a}M = M$. Тогда существует $x \in 1 + \mathfrak{a}$, такой что $xM = 0$.

Первое доказательство. Выбрав произвольное конечное семейство образующих M , эндоморфизм Id_M можно записать матрицей с элементами в \mathfrak{a} . Осталось применить к нему теорему Гамильтона–Кэли. \square

Второе доказательство. Пусть $S := 1 + \mathfrak{a} \subset A$. Тогда идеал $\mathfrak{a}_S = \mathfrak{a}A_S$ кольца A_S содержится в его радикале Джекобсона, и выполняется равенство $\mathfrak{a}_S M_S = M_S$, а потому $M_S = 0$ согласно теореме 1, что в предположении конечной порождённости M эквивалентно существованию $x \in S$, такого что $xM = 0$. \square

Замечание 1. Теорему 2 можно воспринимать как эквивалентную переформулировку теоремы 1.

Следствие 1 (ТЕОРЕМА ВАСКОНСЕЛОСА). *Пусть M — конечно порождённый модуль над кольцом A . Тогда любой сюръективный A -эндоморфизм $\varphi : M \rightarrow M$ является изоморфизмом.*

Доказательство. Эндоморфизм φ задаёт на M структуру $A[X]$ -модуля, такого что $XM = M$. Тогда, по теореме 2, существует $P(X) \in A[X]$, такой что $(1 - P(X)X)M = 0$, то есть $\text{Id}_M = P(\varphi) \circ \varphi = \varphi \circ P(\varphi)$. \square

Следствие 2. *Пусть A — ненулевое кольцо, $n, m \in \mathbb{N}_0$, а $\varphi : A^n \rightarrow A^m$ — сюръективный гомоморфизм A -модулей. Тогда $n \geq m$.*

Доказательство. Пусть $n < m$. Тогда композиция φ и координатной проекции $(a_i)_{i=1}^m \mapsto (a_i)_{i=1}^n : A^m \rightarrow A^n$ является не биективным, но сюръективным эндоморфизмом A^n , что противоречит следствию 1. \square

14.6. Артиновы коммутативные кольца

Соглашение 1 (КОЛЬЦО). В этом разделе все кольца считаются ассоциативными, коммутативными и унитарными.

Теорема 1 (ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ КОММУТАТИВНЫХ АРТИНОВЫХ КОЛЕЦ). *Кольцо A артиново тогда и только тогда, когда A нётерово и размерность Крулля A равна нулю.*

Доказательство (из двух частей).

Часть «только тогда». Пусть \mathfrak{J} — радикал Джекобсона A . Согласно наблюдению 10.5.1 существует конечное множество \mathcal{M} максимальных идеалов A , такое что $\mathfrak{J} = \bigcap_{\mathfrak{m} \in \mathcal{M}} \mathfrak{m}$. Из леммы 10.5.2 и китайской теоремы об остатках следует, что $\mathfrak{J}^n = \prod_{\mathfrak{m} \in \mathcal{M}} \mathfrak{m}^n = 0$ для некоего $n \in \mathbb{N}_1$, и канонический гомоморфизм $A \rightarrow \prod_{\mathfrak{m} \in \mathcal{M}} A/\mathfrak{m}^n$ биективен. Для любого $\mathfrak{m} \in \mathcal{M}$ в кольце A/\mathfrak{m}^n один простой идеал — образ \mathfrak{m} . Факторы конечной фильтрации A -модуля A/\mathfrak{m}^n образами степеней \mathfrak{m} — это векторные пространства над полем A/\mathfrak{m} , для которых артиновость совпадает с нётеровостью. Учитывая, что артиновость и нётеровость стабильны относительно перехода к расширениям, подмодулям и фактормодулям, получаем, что A нётерово и нульмерно по Круллю.

Часть «тогда». В нётеровом кольце нильрадикал нильпотентен и является конечным пересечением простых идеалов в соответствии с разложением на неприводимые компоненты или наблюдением 14.11.6, что в нульмерном случае позволяет применить рассуждение, аналогичное рассуждению из первой части доказательства. \square

Наблюдение 1. Пусть A — артиново кольцо. Тогда топологическое пространство $\mathrm{Spec}(A)$ дискретно, а потому $A \cong \prod_{\mathfrak{p} \in \mathrm{Spec}(A)} A_{\mathfrak{p}}$.

Наблюдение 2. Локальные кольца, очевидно, не разлагаются в нетривиальное произведение колец. Поэтому разложение артинова кольца A в конечное произведение локальных колец является разложением на неразложимые, и, согласно следствию 10.1.2, его слагаемые однозначно определены как идеалы в A .

14.7. Коммутативные положительные конусы

Соглашение 1. В этом разделе для моноидов по умолчанию используется мультипликативная запись.

Определение 1 (КОММУТАТИВНЫЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ КОНУС). Коммутативный моноид M называется *коммутативным положительным конусом*, если M является моноидом с сокращением и $M^{\times} = 1$.

Наблюдение 1. Пусть G — коммутативная группа. Тогда для любого коммутативного положительного конуса $M \subset G$ существует единственный согласованный с умножением частичный порядок на G , такой что $G_{\geq 1} = M$. И наоборот, если G — частично упорядоченная коммутативная группа, то $G_{\geq 1}$ — коммутативный положительный конус.

Определение 2 (Порядок на положительном конусе). Пусть M — коммутативный положительный конус. Определим на M стандартное отношение частичного порядка следующим образом: для любой пары $a, b \in M$ условие $a \geq b$ эквивалентно условию $b \mid a$, то есть $a \in bM$.

Наблюдение 2. Пусть G — частично упорядоченная коммутативная группа. Тогда индуцированный с G частичный порядок на коммутативном положительном конусе $G_{\geq 1}$ совпадает со стандартным.

Определение 3 (Простые положительного конуса). Пусть M — коммутативный положительный конус. Тогда элемент $p \in M$ называется *простым*, если множество $M \setminus pM$ является подмоноидом M .

Наблюдение 3. Пусть M — коммутативный положительный конус. Тогда множество простых элементов M является подмножеством множества минимальных нетривиальных элементов M .

Теорема 1. Пусть M — коммутативный положительный конус. Тогда простые элементы M являются свободными образующими подмоноида M , который они порождают.

Доказательство. Пусть $(p_i)_{i \in I}$ и $(l_j)_{j \in J}$ — конечные семейства простых элементов M , такие что $\prod_{i \in I} p_i = \prod_{j \in J} l_j$. Тогда, так как каждый элемент $\mathcal{P} := \{p_i \mid i \in I\}$ делит какой-то элемент $\mathcal{L} := \{l_j \mid j \in J\}$, и наоборот, то $\mathcal{P} = \mathcal{L}$, а потому можно сократить равенство $\prod_{i \in I} p_i = \prod_{j \in J} l_j$ на $\prod_{p \in \mathcal{P}} p = \prod_{l \in \mathcal{L}} l$ и доказать теорему по индукции. \square

Наблюдение 4. Пусть M — коммутативный положительный конус, в котором нет бесконечных строго убывающих цепочек. Тогда M порождается своими минимальными нетривиальными элементами.

Наблюдение 5 (ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ СВОБОДНЫХ КОММУТАТИВНЫХ МОНОИДОВ). Коммутативный моноид является свободным тогда и только тогда, когда он является коммутативным положительным конусом, в

котором нет бесконечных строго убывающих цепочек и в котором все нетривиальные минимальные элементы являются простыми.

Определение 4 (ДОПОЛНЕНИЕ ПОДМОНОИДА). Пусть M — коммутативный моноид, а N и L — подмоноиды M . Тогда L называется *дополнением* к N в M , если $M = N \times L$.

Наблюдение 6. Пусть M — коммутативный положительный конус, а F — свободный коммутативный подмоноид M . Тогда у F есть дополнение в M тогда и только тогда, когда у любого элемента M существует наибольший делитель в F и все простые элементы F являются простыми и в M . Если N — дополнение к F в M , то $N = M \setminus \bigcup_{f \in F \setminus \{1\}} fM$.

14.8. Факториальные кольца

Соглашение 1 (КОЛЬЦО). В этом разделе все кольца считаются ассоциативными, коммутативными и унитарными.

Определение 1 (ФАКТОРИАЛЬНОЕ КОЛЬЦО). Пусть A — кольцо. Тогда A называется *факториальным кольцом* (англ. factorial ring) или *областью однозначного разложения на простые* (англ. unique factorization domain, UFD), если A целостно и коммутативный мультипликативный моноид ненулевых главных идеалов A свободен.

Наблюдение 1 (ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ФАКТОРИАЛЬНЫХ КОЛЕЦ). Пусть A — область целостности, а \mathcal{I} — мультипликативный моноид ненулевых главных идеалов A . Тогда из наблюдения 14.7.5 следует, что A является областью однозначного разложения на простые тогда и только тогда, когда все максимальные элементы $\mathcal{I} \setminus \{A\}$ являются простыми идеалами и в \mathcal{I} нет бесконечных строго возрастающих цепочек.

Следствие 1 (ФАКТОРИАЛЬНОСТЬ ОГИ). *Области главных идеалов являются областями однозначного разложения на простые.*

Теорема 1 (ЛЕММА ГАУССА). Пусть A — факториальная область целостности, $K := \text{Frac}(A)$, а \mathcal{I}_A , $\mathcal{I}_{A[X]}$ и $\mathcal{I}_{K[X]}$ — мультипликативные моноиды ненулевых главных идеалов колец A , $A[X]$ и $K[X] \cong A[X]_{A \setminus \{0\}}$ соответственно. Тогда у образа \mathcal{I}_A в $\mathcal{I}_{A[X]}$ существует единственное дополнение и канонический гомоморфизм $\mathcal{I}_{A[X]}/\mathcal{I}_A \rightarrow \mathcal{I}_{K[X]}$ биективен.

Доказательство (из двух частей).

Часть 1. Чтобы доказать существование и единственность дополнения у образа \mathcal{I}_A в $\mathcal{I}_{A[X]}$ заметим, что у любого элемента $\mathcal{I}_{A[X]}$ существует наибольший делитель в \mathcal{I}_A и для любого простого $\mathfrak{p} \in \mathcal{I}_A$ идеал $\mathfrak{p}A[X] \in \mathcal{I}_{A[X]}$ кольца $A[X]$ является простым, так как кольцо $A[X]/(\mathfrak{p}A[X]) \cong (A/\mathfrak{p})[X]$ целостно, после чего воспользуемся наблюдением 14.7.6.

Часть 2. Докажем биективность $\mathcal{I}_{A[X]}/\mathcal{I}_A \rightarrow \mathcal{I}_{K[X]}$. Пусть \mathcal{C} — каноническое дополнение к \mathcal{I}_A в $\mathcal{I}_{A[X]}$, изоморфное $\mathcal{I}_{A[X]}/\mathcal{I}_A$, а $\mathfrak{c}', \mathfrak{c}'' \in \mathcal{C}$ — его элементы, образы которых в $\mathcal{I}_{K[X]}$ совпадают. Легко проверить, что это означает, что $\mathfrak{c}' \mid \mathfrak{a}''\mathfrak{c}''$ и $\mathfrak{c}'' \mid \mathfrak{a}'\mathfrak{c}'$ для каких-то $\mathfrak{a}', \mathfrak{a}'' \in \mathcal{I}_A$. Так как $\mathcal{I}_{A[X]} = \mathcal{I}_A \times \mathcal{C}$, то отсюда следует, что $\mathfrak{c}' = \mathfrak{c}''$. \square

Следствие 2 (ФАКТОРИАЛЬНОСТЬ МНОГОЧЛЕНОВ). Пусть A — факториальное кольцо. Тогда кольцо $A[X]$ тоже факториально.

Определение 2 (ПРИМИТИВНАЯ ЧАСТЬ И СОДЕРЖАНИЕ). В обозначениях теоремы 1 для любого $\mathfrak{c} \in \mathcal{I}_{A[X]} \cong \mathcal{I}_A \times \mathcal{I}_{K[X]}$ соответствующая компонента в \mathcal{I}_A называется *содержанием* \mathfrak{c} , а соответствующая компонента в $\mathcal{I}_{K[X]}$ называется *примитивной частью* \mathfrak{c} .

14.9. Дедекиндовы кольца

Дробные идеалы

Соглашение 1 (КОЛЬЦО). В этом разделе все кольца считаются ассоциативными, коммутативными и унитарными.

Обозначение 1. Пусть A — область целостности, а \mathfrak{a} — A -подмодуль $\text{Frac}(A)$. Тогда введём обозначение $(A : \mathfrak{a}) := \{x \in \text{Frac}(A) \mid x\mathfrak{a} \subset A\}$.

Определение 1 (ДРОБНЫЙ ИДЕАЛ). Пусть A — область целостности. Тогда *дробным идеалом* A называется A -подмодуль $\mathfrak{a} \subset \text{Frac}(A)$, такой что $(A : \mathfrak{a}) \neq 0$, то есть существует $t \in A \setminus \{0\}$, такой что $t\mathfrak{a} \subset A$.

Наблюдение 1. Пусть A — область целостности, а $\mathfrak{a}, \mathfrak{b} \subset \text{Frac}(A)$ — дробные идеалы A . Тогда их произведение $\mathfrak{a}\mathfrak{b} = \sum_{a \in \mathfrak{a}, b \in \mathfrak{b}} Aab \subset \text{Frac}(A)$ как A -подмодулей $\text{Frac}(A)$ тоже является дробным идеалом A .

Наблюдение 2. Пусть A — область целостности, а $\mathfrak{a} \subset \text{Frac}(A)$ — ненулевой дробный идеал A . Тогда $(A : \mathfrak{a})$ — тоже дробный идеал A . Если существует A -подмодуль $\mathfrak{b} \subset \text{Frac}(A)$, такой что $\mathfrak{a}\mathfrak{b} = A$, то $\mathfrak{b} = (A : \mathfrak{a})$.

Теорема 1. Пусть A — локальная область целостности. Тогда все обратимые дробные идеалы A главные.

Доказательство. Пусть $\mathfrak{a}, \mathfrak{b} \subset \text{Frac}(A)$ — дробные идеалы A , такие что $\mathfrak{a}\mathfrak{b} = \sum_{a \in \mathfrak{a}, b \in \mathfrak{b}} Aab = A$. Тогда, так как в локальном кольце сумма собственных идеалов является собственным идеалом, то существуют $a \in A$ и $b \in B$, такие что $Aab = A$. Отсюда следует, что $Aa \cdot \mathfrak{b} = A$ и $\mathfrak{a} \cdot Ab = A$, а потому $\mathfrak{a} = Aa$ и $\mathfrak{b} = Ab$ по единственности обратного. \square

Теорема 2. Пусть A — область целостности. Тогда все обратимые дробные идеалы A конечно порождены.

Доказательство. Пусть $\mathfrak{a}, \mathfrak{b} \subset \text{Frac}(A)$ — дробные идеалы A , такие что $\mathfrak{a}\mathfrak{b} = \sum_{a \in \mathfrak{a}, b \in \mathfrak{b}} Aab = A$. Тогда существует конечное множество $\Phi \subset \mathfrak{a} \times \mathfrak{b}$, такое что $\sum_{(a,b) \in \Phi} Aab = A$. Пусть $\Phi_{\mathfrak{a}} := \{a \in \mathfrak{a} \mid (\{a\} \times \mathfrak{b}) \cap \Phi \neq \emptyset\}$ и $\Phi_{\mathfrak{b}} := \{b \in \mathfrak{b} \mid (\mathfrak{a} \times \{b\}) \cap \Phi \neq \emptyset\}$. Тогда $(\sum_{a \in \Phi_{\mathfrak{a}}} Aa)(\sum_{b \in \Phi_{\mathfrak{b}}} Ab) = A = (\sum_{a \in \Phi_{\mathfrak{a}}} Aa)\mathfrak{b} = \mathfrak{a}(\sum_{b \in \Phi_{\mathfrak{b}}} Ab)$, а потому $\mathfrak{a} = \sum_{a \in \Phi_{\mathfrak{a}}} Aa$ и $\mathfrak{b} = \sum_{b \in \Phi_{\mathfrak{b}}} Ab$ по единственности обратного. \square

Теорема 3. Пусть A — область целостности, $S \subset A \setminus \{0\}$ — мультипликативное множество, а $\mathfrak{a} \subset \text{Frac}(A)$ — конечно порождённый дробный идеал A . Тогда $(A : \mathfrak{a})_S = (A_S : \mathfrak{a}_S)$.

Доказательство. Пусть $(a_i)_{i \in I}$ — конечное семейство ненулевых элементов \mathfrak{a} , такое что $\mathfrak{a} = \sum_{i \in I} Aa_i$. Тогда $(A : \mathfrak{a})_S = (A : \sum_{i \in I} Aa_i)_S = (\bigcap_{i \in I} (A : Aa_i))_S = (\bigcap_{i \in I} Aa_i^{-1})_S = \bigcap_{i \in I} A_S a_i^{-1} = \bigcap_{i \in I} (A_S : A_S a_i) = (A_S : \sum_{i \in I} A_S a_i) = (A_S : \mathfrak{a}_S)$, так как локализация коммутирует с суммами и конечными пересечениями. \square

Кольца дискретного нормирования

Определение 2 (КОЛЬЦО ДИСКРЕТНОГО НОРМИРОВАНИЯ). Локальная область главных идеалов, которая не является полем, называется *кольцом дискретного нормирования* (англ. discrete valuation ring, DVR).

Теорема 4. Пусть A — одномерная по Круллю локальная целозамкнутая область с конечно порождённым максимальным идеалом $\mathfrak{m} \subset A$. Тогда A является кольцом дискретного нормирования.

Доказательство (из трёх частей).

Часть 1. Сначала заметим, что если $\mathfrak{a} \subset \text{Frac}(A)$ — дробный идеал, такой что $\mathfrak{a}\mathfrak{m} \subsetneq A$, то выполняется включение $\mathfrak{a} \subset A$, потому что тогда для любого $a \in \mathfrak{a}$ выполняется включение $a\mathfrak{m} \subset \mathfrak{m}$, из которого, согласно теореме Гамильтона–Кэли, следует, что a является целым над A .

Часть 2. Пусть $t \in \mathfrak{m} \setminus \{0\}$. Тогда \mathfrak{m} является радикалом tA и, так как \mathfrak{m} конечно порождён, то существует $n \in \mathbb{N}_1$, такой что $\mathfrak{m}^n \subset tA$, или, эквивалентно, $\frac{1}{t}\mathfrak{m}^n \subset A$. Последовательно применяя утверждение из части 1 данного доказательства и используя, что $\frac{1}{t}A \not\subset A$, получаем, что $\frac{1}{t}\mathfrak{m}^r = A$ для какого-то $1 \leq r \leq n$. Иначе говоря, идеал \mathfrak{m}^r является обратным к дробному идеалу $\frac{1}{t}A$, а потому совпадает с tA .

Часть 3. Мы доказали, что любой ненулевой элемент A порождает какую-то степень \mathfrak{m} . Отсюда следует, что множество ненулевых главных идеалов A , упорядоченное обратным включению, образует ординал, откуда следует, что A — кольцо дискретного нормирования. \square

Теорема 5. Пусть A — локальная область целостности, которая не является полем. Тогда следующие условия эквивалентны:

- а) Кольцо A является кольцом дискретного нормирования;
- б) Кольцо A нётерово, целозамкнуто и одномерно по Круллю;
- в) Все ненулевые дробные идеалы области A обратимы.

Доказательство. Импликация (б) \implies (а) следует из теоремы 4, импликация (в) \implies (а) следует из теоремы 1, а импликации (а) \implies (б) и (а) \implies (в) тривиальны. \square

Дедекиндовы кольца

Определение 3 (ДЕДЕКИНДОВО КОЛЬЦО). Область целостности A , такая что любой ненулевой дробный идеал A обратим, называется *дедекиндовым кольцом*.

Наблюдение 3. Согласно теореме 2 все дедекиндовы кольца нётеровы.

Теорема 6. Пусть A — дедекиндово кольцо. Тогда коммутативный мультипликативный моноид ненулевых идеалов A свободно порождается максимальными идеалами A .

Доказательство. С учётом наблюдения 3, то есть нётеровости A , следует из наблюдения 14.7.5. \square

Теорема 7 (ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДЕДЕКИНДОВА КОЛЬЦА ДЕДЕКИНДОВА). Пусть A — дедекиндово кольцо, а $S \subset A \setminus \{0\}$ — мультипликативное множество. Тогда кольцо A_S тоже дедекиндово.

Доказательство. Заметим, что любой ненулевой дробный идеал области A_S имеет вид \mathfrak{a}_S , где \mathfrak{a} — ненулевой дробный идеал области A . Осталось воспользоваться теоремами 2 и 3 и записать цепочку равенств $A_S = (\mathfrak{a} \cdot (A : \mathfrak{a}))_S = \mathfrak{a}_S \cdot (A : \mathfrak{a})_S = \mathfrak{a}_S \cdot (A_S : \mathfrak{a}_S)$. \square

Теорема 8 (ЛОКАЛЬНОСТЬ ДЕДЕКИНДОВОСТИ). Пусть A — нётерова область целостности, а $(S_i)_{i \in I}$ — семейство мультипликативных подмножеств $A \setminus \{0\}$, такое что $\text{Spec}(A) = \bigcup_{i \in I} \text{Spec}(A_{S_i})$ и для любого $i \in I$ кольцо A_{S_i} дедекиндово. Тогда кольцо A тоже дедекиндово.

Доказательство. Пусть \mathfrak{a} — ненулевой дробный идеал A . Тогда \mathfrak{a} конечно порождён и, согласно теореме 3, для любого $i \in I$ выполняется равенство $(\mathfrak{a} \cdot (A : \mathfrak{a}))_{S_i} = \mathfrak{a}_{S_i} \cdot (A : \mathfrak{a})_{S_i} = \mathfrak{a}_{S_i} \cdot (A_{S_i} : \mathfrak{a}_{S_i}) = A_{S_i}$. Осталось, воспользовавшись следствием 14.1.2, записать цепочку равенств $\mathfrak{a} \cdot (A : \mathfrak{a}) = \bigcap_{i \in I} (\mathfrak{a} \cdot (A : \mathfrak{a}))_{S_i} = \bigcap_{i \in I} A_{S_i} = A$. \square

Наблюдение 4. Целостное кольцо A целозамкнуто и одномерно по Круллю тогда и только тогда, когда для любого максимального идеала $\mathfrak{m} \subset A$ кольцо $A_{\mathfrak{m}}$ целозамкнуто и одномерно по Круллю.

Теорема 9. Пусть A — область целостности, которая не является полем. Тогда A является дедекиндовым кольцом тогда и только тогда, когда A нётерово, целозамкнуто и одномерно по Круллю.

Доказательство. Пусть \mathcal{M} — это множество всех максимальных идеалов A . Рассмотрим семейство $(A \setminus \mathfrak{m})_{\mathfrak{m} \in \mathcal{M}}$ мультипликативных подмножеств $A \setminus \{0\}$, обладающее свойством $\text{Spec}(A) = \bigcup_{\mathfrak{m} \in \mathcal{M}} \text{Spec}(A_{A \setminus \mathfrak{m}})$, после чего применим теоремы 7, 8, 5 и наблюдение 4. \square

Дополнительная характеристика дедекиндовых колец

Наблюдение 5. В любой области целостности ненулевые главные идеалы обратимы и обратимость произведения идеалов эквивалентна обратимости всех его сомножителей.

Наблюдение 6. Согласно теореме 14.7.1 в любой области целостности разложение обратимого идеала в произведение простых идеалов определено однозначно, если существует.

Теорема 10. Пусть A — область целостности, в которой любой идеал представляется в виде произведения простых идеалов. Тогда A — дедекиндово кольцо.

Доказательство (из двух частей).

Часть 1. Заметим, что любой ненулевой простой идеал $\mathfrak{p} \subset A$ содержит обратимый простой идеал — какой-то из членов простого разложения ненулевого главного идеала, который содержится в \mathfrak{p} . Поэтому если мы докажем, что любой обратимый простой идеал A является максимальным идеалом, то мы докажем, что все ненулевые простые идеалы A обратимы, а потому все ненулевые идеалы A обратимы.

Часть 2. Пусть $\mathfrak{p} \subset A$ — обратимый простой идеал, а $\mathfrak{c} \subset A$ — главный идеал, такой что $\mathfrak{c} \not\subset \mathfrak{p}$. Нам нужно доказать, что $\mathfrak{p} + \mathfrak{c} = A$. Пусть $a \mapsto \bar{a} : A \rightarrow A/\mathfrak{p}$ — канонический гомоморфизм, $(\mathfrak{r}_1, \dots, \mathfrak{r}_n)$ — конечное семейство простых идеалов, такое что $\mathfrak{p} + \mathfrak{c} = \mathfrak{r}_1 \cdots \mathfrak{r}_n$, а $(\mathfrak{s}_1, \dots, \mathfrak{s}_m)$ — конечное семейство простых идеалов, такое что $\mathfrak{p} + \mathfrak{c}^2 = \mathfrak{s}_1 \cdots \mathfrak{s}_m$. Тогда $(\bar{\mathfrak{r}}_1 \cdots \bar{\mathfrak{r}}_n)^2 = \bar{\mathfrak{c}}^2 = \bar{\mathfrak{s}}_1 \cdots \bar{\mathfrak{s}}_m$, и из однозначности разложения ненулевого главного идеала в произведение простых следует, что $(\mathfrak{p} + \mathfrak{c})^2 = (\mathfrak{r}_1 \cdots \mathfrak{r}_n)^2 = \mathfrak{s}_1 \cdots \mathfrak{s}_m = \mathfrak{p} + \mathfrak{c}^2$. Отсюда получаем, что $\mathfrak{p} = (\mathfrak{p} + \mathfrak{c})^2 \cap \mathfrak{p} = (\mathfrak{p}^2 + \mathfrak{c}) \cap \mathfrak{p} = \mathfrak{p}^2 + (\mathfrak{c} \cap \mathfrak{p}) = \mathfrak{p}^2 + \mathfrak{c}\mathfrak{p} = (\mathfrak{p} + \mathfrak{c})\mathfrak{p}$. Умножив это равенство на дробный идеал $(A : \mathfrak{p})$, получаем, что $\mathfrak{p} + \mathfrak{c} = A$. \square

14.10. Конечные модули над областями главных идеалов

Этот раздел представляет собой краткий конспект стандартного доказательства и добавлен для полноты.

Соглашение 1. В этом разделе все кольца считаются коммутативными, ассоциативными и унитарными.

Наблюдение 1. Пусть A — кольцо главных идеалов. Тогда A нётерово, а потому любой конечно порождённый A -модуль является конечно представимым, то есть является коядром какого-то гомоморфизма $v \mapsto xv : A^J \rightarrow A^I$, где $x \in M_{I,J}(A)$, а I и J — конечные множества, причём заменам базисов $v \mapsto gv : A^J \xrightarrow{\sim} A^J$ и $v \mapsto hv : A^I \xrightarrow{\sim} A^I$, где $g \in \mathrm{GL}_J(A)$ и $h \in \mathrm{GL}_I(A)$, соответствует замена x на $h x g^{-1}$.

Лемма 1. Пусть A — область целостности, $a, b, c \in A$ и $Aa + Ab = Ac \neq 0$, то есть существуют $c_a, a_c, b_c \in A$, такие что $c_a a + c_b b = c \neq 0$, $a_c c = a$, $b_c c = b$. Тогда $\begin{pmatrix} c_a & c_b \\ -b_c & a_c \end{pmatrix} \in \mathrm{GL}_2(A)$ и $\begin{pmatrix} c \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_a & c_b \\ -b_c & a_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$.

Доказательство. Подставив $a = a_c c$ и $b = b_c c$ в $c = c_a a + c_b b$ и сократив на c , получаем, что $\det \begin{pmatrix} c_a & c_b \\ -b_c & a_c \end{pmatrix} = c_a a_c + c_b b_c = 1$. \square

Теорема 1. Пусть A — область главных идеалов, $x \in M_{I,J}(A)$, где I и J — конечные множества. Тогда множество $X := \mathrm{GL}_I(A) x \mathrm{GL}_J(A)$ содержит матрицу, у которой в каждой строке и в каждом столбце максимум один ненулевой элемент.

Набросок доказательства. Можно предположить, что $I, J \neq \emptyset$. По нётеровости A существуют $y = (y_{i,j})_{i \in I, j \in J} \in X$ и $(i_1, j_1) \in I \times J$, такие что идеал Ay_{i_1, j_1} максимален среди идеалов вида $Az_{i', j'}$ для $(z_{i,j})_{i \in I, j \in J} \in X$ и $(i', j') \in I \times J$. Тогда $y_{i_1, j}, y_{i, j_1} \in Ay_{i_1, j_1}$ для всех $i \in I$ и $j \in J$, так как иначе мы могли бы применить лемму 1 и получить противоречие с определением y_{i_1, j_1} . Отсюда следует, что множество $E_I(A)yE_J(A)$ содержит матрицу вида $(y_{i,j})_{i \in \{i_1\}, j \in \{j_1\}} \oplus y'$, где $y' \in M_{I \setminus \{i_1\}, J \setminus \{j_1\}}(A)$, и теорема доказывается по индукции, заменой x на y' . \square

Замечание 1. Между прочим, если кольцо A обладает свойством диагонализуемости матриц из формулировки теоремы 1, то A является кольцом главных идеалов, что можно увидеть, рассмотрев случай $|J| = 1$.

Теорема 2 (ПРИМАРНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ). Пусть A — область главных идеалов, а M — конечно порождённый A -модуль. Тогда существует единственное с точностью до переиндексирования конечное семейство примарных идеалов $(\mathfrak{q}_i)_{i \in I}$ кольца A , такое что $M \simeq \bigoplus_{i \in I} A/\mathfrak{q}_i$.

Доказательство (из двух частей).

Существование разложения. Из наблюдения 1 и теоремы 1 мы получаем разложение M в конечную прямую сумму циклических слагаемых, которые, по китайской теореме об остатках и разложению на простые в областях главных идеалов, разлагаются в конечную прямую сумму примарных циклических слагаемых.

Единственность разложения. Пусть $M \simeq (\bigoplus_{\mathfrak{p} \in \mathcal{P}} \bigoplus_{i=1}^{N_{\mathfrak{p}}} A/\mathfrak{p}^{n_{\mathfrak{p},i}}) \oplus A^m$, где \mathcal{P} — конечное множество ненулевых простых идеалов, $N_{\mathfrak{p}} \geq 1$ и $n_{\mathfrak{p},1} \geq n_{\mathfrak{p},2} \geq \dots \geq n_{\mathfrak{p},N_{\mathfrak{p}}} \geq 1$ для всех $\mathfrak{p} \in \mathcal{P}$. Для любого $\mathfrak{p} \in \text{Spec}(A) \setminus \{0\}$ пусть $M_{\mathfrak{p}}^{\text{tor}} := \bigcup_{n=0}^{\infty} \{x \in M \mid \mathfrak{p}^n x = 0\}$, а $M^{\text{fr}} := M / (\sum_{\mathfrak{p} \in \text{Spec}(A) \setminus \{0\}} M_{\mathfrak{p}}^{\text{tor}})$. Тогда $M_{\mathfrak{p}}^{\text{tor}} \simeq \bigoplus_{i=1}^{N_{\mathfrak{p}}} A/\mathfrak{p}^{n_{\mathfrak{p},i}}$ если $\mathfrak{p} \in \mathcal{P}$ и $M_{\mathfrak{p}}^{\text{tor}} = 0$ если $\mathfrak{p} \notin \mathcal{P} \cup \{0\}$, а $M^{\text{fr}} \simeq A^m$. При этом $\dim_K(K \otimes_A M^{\text{fr}}) = m$, где $K := \text{Frac}(A)$, а $\dim_{A/\mathfrak{p}}(\mathfrak{p}^{n-1} M_{\mathfrak{p}}^{\text{tor}} / \mathfrak{p}^n M_{\mathfrak{p}}^{\text{tor}}) = \max\{k \in \{1, \dots, N_{\mathfrak{p}}\} \mid n_{\mathfrak{p},k} \geq n\}$ для любых $\mathfrak{p} \in \mathcal{P}$ и $1 \leq n \leq n_{\mathfrak{p},1}$. Это доказывает единственность. \square

Следствие 1 (РАЗЛОЖЕНИЕ ПО ИНВАРИАНТНЫМ ФАКТОРАМ). Пусть A — область главных идеалов, а M — конечно порождённый A -модуль. Тогда существует единственная последовательность собственных идеалов $\mathfrak{d}_1 \supset \mathfrak{d}_2 \supset \dots \supset \mathfrak{d}_n$ кольца A , такая что $M \simeq \bigoplus_{i=1}^n A/\mathfrak{d}_i$.

Доказательство. По разложению $M \simeq (\bigoplus_{\mathfrak{p} \in \mathcal{P}} \bigoplus_{i=1}^{N_{\mathfrak{p}}} A/\mathfrak{p}^{n_{\mathfrak{p},i}}) \oplus A^m$, где \mathcal{P} — конечное множество ненулевых простых идеалов, $N_{\mathfrak{p}} \geq 1$ и $n_{\mathfrak{p},1} \geq n_{\mathfrak{p},2} \geq \dots \geq n_{\mathfrak{p},N_{\mathfrak{p}}} \geq 1$ для всех $\mathfrak{p} \in \mathcal{P}$, однозначно строятся/восстанавливаются $\mathfrak{d}_1, \dots, \mathfrak{d}_n$: если $N := \max_{\mathfrak{p} \in \mathcal{P}}(N_{\mathfrak{p}})$, то $n := N + m$, $\mathfrak{d}_i := \mathfrak{b}_{N-i+1}$ для $1 \leq i \leq N$, где $\mathfrak{b}_i := \prod_{\mathfrak{p} \in \mathcal{P} \mid N_{\mathfrak{p}} \geq i} \mathfrak{p}^{n_{\mathfrak{p},i}}$, и $\mathfrak{d}_i := 0$ для $N + 1 \leq i \leq N + m$. \square

14.11. Ассоциированные простые идеалы

Определение и базовые свойства носителя модуля

Соглашение 1 (КОЛЬЦО). В этом разделе все кольца считаются ассоциативными, коммутативными и унитарными.

Определение 1 (НОСИТЕЛЬ МОДУЛЯ). Пусть A — кольцо, а M — A -модуль. Тогда множество $\text{Supp}_A(M) := \{\mathfrak{p} \in \text{Spec}(A) \mid M_{\mathfrak{p}} \neq 0\}$ называется носителем M в $\text{Spec}(A)$.

Теорема 1. Пусть A — кольцо, $S \subset A$ — мультипликативное множество, а M — A -модуль. Тогда если M конечно порождён, то выполняется равенство $S^{-1} \operatorname{Ann}_A(M) = \operatorname{Ann}_{S^{-1}A}(S^{-1}M)$.

Доказательство (из трёх частей).

Часть 1. Пусть M — циклический A -модуль. Тогда

$$\begin{aligned} \operatorname{Ann}_{S^{-1}A}(S^{-1}M) &= \operatorname{Ann}_{S^{-1}A}(S^{-1}(A / \operatorname{Ann}_A(M))) = \\ &= \operatorname{Ann}_{S^{-1}A}((S^{-1}A) / (S^{-1} \operatorname{Ann}_A(M))) = S^{-1} \operatorname{Ann}_A(M). \end{aligned}$$

Часть 2. Пусть $(M_i)_{i \in I}$ — конечное семейство подмодулей M , такое что $M = \sum_{i \in I} M_i$ и для любого индекса $i \in I$ выполняется равенство $S^{-1} \operatorname{Ann}_A(M_i) = \operatorname{Ann}_{S^{-1}A}(S^{-1}M_i)$. Тогда, так как локализация коммутует с суммами и конечными пересечениями, то

$$\begin{aligned} S^{-1} \operatorname{Ann}_A(M) &= S^{-1} \operatorname{Ann}_A(\sum_{i \in I} M_i) = S^{-1} \bigcap_{i \in I} \operatorname{Ann}_A(M_i) = \\ &= \bigcap_{i \in I} S^{-1} \operatorname{Ann}_A(M_i) = \bigcap_{i \in I} \operatorname{Ann}_{S^{-1}A}(S^{-1}M_i) = \\ &= \operatorname{Ann}_{S^{-1}A}(\sum_{i \in I} S^{-1}M_i) = \operatorname{Ann}_{S^{-1}A}(S^{-1} \sum_{i \in I} M_i) = \operatorname{Ann}_{S^{-1}A}(S^{-1}M). \end{aligned}$$

Часть 3. Осталось воспользоваться тем, что если M — конечно порождённый модуль, то M представляется в виде конечной суммы циклических подмодулей. □

Следствие 1. Пусть A — кольцо, а M — конечно порождённый A -модуль. Тогда $\operatorname{Supp}_A(M) = \{\mathfrak{p} \in \operatorname{Spec}(A) \mid \operatorname{Ann}_A(M) \subset \mathfrak{p}\}$.

Доказательство. Для любого $\mathfrak{p} \in \operatorname{Spec}(A)$ условие $M_{\mathfrak{p}} \neq 0$ эквивалентно условию $A_{\mathfrak{p}} / \operatorname{Ann}_{A_{\mathfrak{p}}}(M_{\mathfrak{p}}) \cong A_{\mathfrak{p}} / \operatorname{Ann}_A(M)_{\mathfrak{p}} \neq 0$, которое эквивалентно условию $\operatorname{Ann}_A(M) \subset \mathfrak{p}$. □

Наблюдение 1 (Аддитивность носителя). Пусть A — кольцо, а M — A -модуль. Тогда выполняются следующие свойства аддитивности:

- а) Условие $M = 0$ эквивалентно условию $\operatorname{Supp}_A(M) = \emptyset$;
- б) Если $0 \rightarrow M' \rightarrow M \rightarrow M'' \rightarrow 0$ — короткая точная последовательность A -модулей, то $\operatorname{Supp}_A(M) = \operatorname{Supp}_A(M') \cup \operatorname{Supp}_A(M'')$;
- в) Если $(M_i)_{i \in I}$ — семейство подмодулей M , такое что $M = \bigoplus_{i \in I} M_i$, то $\operatorname{Supp}_A(M) = \bigcup_{i \in I} \operatorname{Supp}_A(M_i)$.

Ассоциированные простые идеалы и носитель модуля

Определение 2 (АССОЦИИРОВАННЫЙ ПРОСТОЙ ИДЕАЛ). Пусть A — кольцо, а M — A -модуль. Тогда множество простых идеалов A , ассоциированных с M , определяется следующим образом:

$$\text{Ass}_A(M) := \{\mathfrak{p} \in \text{Spec}(A) \mid \mathfrak{p} = \text{Ann}_A(m) \text{ для какого-то } m \in M\} = \\ = \{\mathfrak{p} \in \text{Spec}(A) \mid A\text{-модуль } A/\mathfrak{p} \text{ вкладывается в } M\}.$$

Наблюдение 2. Пусть A — кольцо, а C — ненулевой циклический A -модуль. Тогда $\text{Ann}_A(C) \in \text{Spec}(A)$ тогда и только тогда, когда для любого $c \in C \setminus \{0\}$ выполняется равенство $\text{Ann}_A(c) = \text{Ann}_A(C)$.

Наблюдение 3. Пусть A — кольцо, а M — ненулевой A -модуль. Тогда если \mathfrak{p} — максимальный элемент множества $\{\text{Ann}_A(m) \mid m \in M \setminus \{0\}\}$, то $\mathfrak{p} \in \text{Ass}_A(M)$. В частности, если A нётерово, то $\text{Ass}_A(M) \neq \emptyset$.

Наблюдение 4. Пусть A — кольцо, $S \subset A$ — мультипликативное множество, M — A -модуль, а $m \in M$. Тогда $\text{Ann}_{A_S}(\frac{m}{1}) = \text{Ann}_A(m)_S$, потому что вложение $a + \text{Ann}_A(m) \mapsto am : A/\text{Ann}_A(m) \rightarrow M$ индуцирует вложение $\frac{a}{s} + \text{Ann}_A(m)_S \mapsto \frac{am}{s} : A_S/\text{Ann}_A(m)_S \cong (A/\text{Ann}_A(m))_S \rightarrow M_S$.

Наблюдение 5. В предположениях наблюдения 4 выполняются равенства $A \cap \text{Ann}_{A_S}(\frac{m}{1}) = A \cap \text{Ann}_A(m)_S = \bigcup_{s \in S} \{a \in A \mid sa \in \text{Ann}_A(m)\} = \bigcup_{s \in S} \text{Ann}_A(sm)$. Помимо этого, если кольцо A нётерово, то в направленном множестве $\{\text{Ann}_A(sm) \mid s \in S\}$ существует максимальный элемент $\text{Ann}_A(rm)$, где $r \in S$, и тогда $\bigcup_{s \in S} \text{Ann}_A(sm) = \text{Ann}_A(rm)$.

Теорема 2. Пусть A — кольцо, $S \subset A$ — мультипликативное множество, а M — A -модуль. Тогда если отождествить $\text{Spec}(A_S)$ с его образом в $\text{Spec}(A)$, то $\text{Ass}_A(M) \cap \text{Spec}(A_S) \subset \text{Ass}_A(M_S) = \text{Ass}_{A_S}(M_S)$, причём если A нётерово, то $\text{Ass}_A(M) \cap \text{Spec}(A_S) = \text{Ass}_A(M_S)$.

Доказательство. Получается применением наблюдений 4 и 5. □

Теорема 3. Пусть A — нётерово кольцо, а M — A -модуль. Тогда выполняется равенство $\text{Supp}_A(M) = \bigcup_{\mathfrak{p} \in \text{Ass}_A(M)} \text{Cl}_{\text{Spec}(A)}(\{\mathfrak{p}\})$.

Доказательство. Так как кольцо A нётерово, то, воспользовавшись теоремой 2, получаем, что $\text{Supp}_A(M) = \{\mathfrak{q} \in \text{Spec}(A) \mid \text{Ass}_A(M_{\mathfrak{q}}) \neq \emptyset\} = \{\mathfrak{q} \in \text{Spec}(A) \mid \text{Ass}_A(M) \cap \text{Spec}(A_{\mathfrak{q}}) \neq \emptyset\} = \bigcup_{\mathfrak{p} \in \text{Ass}_A(M)} \text{Cl}_{\text{Spec}(A)}(\{\mathfrak{p}\})$. □

Следствие 2. Пусть A — нётерово кольцо, а M — A -модуль, такой что множество $\text{Supp}_A(M)$ замкнуто в $\text{Spec}(A)$. Тогда выполняется равенство $\text{Supp}_A(M) = \text{Cl}_{\text{Spec}(A)}(\text{Ass}_A(M))$.

Замечание 1. Если M — конечно порождённый модуль над кольцом A , то, согласно следствию 1, множество $\text{Supp}_A(M)$ замкнуто в $\text{Spec}(A)$.

Теорема 4. Пусть A — кольцо, а $0 \rightarrow M' \rightarrow M \rightarrow M'' \rightarrow 0$ — короткая точная последовательность A -модулей. Тогда выполняется свойство субаддитивности $\text{Ass}_A(M) \subset \text{Ass}_A(M') \cup \text{Ass}_A(M'')$.

Доказательство. Пусть $\mathfrak{p} \in \text{Spec}(A)$ и M содержит A -подмодуль C , изоморфный A/\mathfrak{p} . Тогда если $C \cap M' \neq 0$, то $\mathfrak{p} \in \text{Ass}_A(M')$ согласно наблюдению 2, а если $C \cap M' = 0$, то отображение $M \rightarrow M''$ изоморфно вкладывает C в M'' , откуда следует, что $\mathfrak{p} \in \text{Ass}_A(M'')$. \square

Теорема 5. Пусть A — нётерово кольцо, а M — конечный A -модуль. Тогда существует последовательность $0 = M_0 \subset M_1 \subset \dots \subset M_n = M$ подмодулей M , где $n \in \mathbb{N}_0$, такая что $\text{Ann}_A(M_i/M_{i-1}) \in \text{Spec}(A)$ и $M_i/M_{i-1} \simeq A/\text{Ann}_A(M_i/M_{i-1})$ для любого $0 < i \leq n$.

Доказательство. Пусть M' — максимальный подмодуль M , для которого верно утверждение теоремы. Тогда если $M/M' \neq 0$, то существует $\mathfrak{p} \in \text{Ass}_A(M/M')$, а потому существует подмодуль $M'' \subset M$, такой что $M' \subset M''$ и $M''/M' \simeq A/\mathfrak{p}$, что противоречит максимальнойности M' . \square

Следствие 3. Пусть A — нётерово кольцо, а M — конечно порождённый A -модуль. Тогда множество $\text{Ass}_A(M)$ конечно.

Доказательство. С учётом наблюдения 2 следует из теорем 4 и 5. \square

Наблюдение 6. Пусть A — нётерово кольцо. Тогда из теоремы 3 и следствия 3 следует, что каждый элемент $\text{Spec}(A) = \text{Supp}_A(A)$ содержит какой-то элемент конечного множества $\text{Ass}_A(A) \subset \text{Spec}(A)$.

Глава 15

Теория категорий

15.1. Категории как полугруппы

Мультипликативные полугруппы с нулём

Определение 1 (Бинар). Множество X , снабжённое отображением $(x, y) \mapsto xy : X \times X \rightarrow X$ называется *бинаром* в мультипликативной записи или *мультипликативным бинаром*.

Определение 2 (Нулевой элемент). Пусть X — мультипликативный бинар. Тогда элемент $z \in X$ называется *поглощающим элементом* (англ. *absorbing element*), *нулевым элементом* или просто *нулём*, если $xz = z = zx$ для любого $x \in X$.

Теорема 1 (Единственность нуля). Пусть X — мультипликативный бинар, а $z, z' \in X$ — два нулевых элемента. Тогда $z = z'$.

Доказательство. Из определения 2 следует, что $z = zz' = z'$. □

Обозначение 1. Нулевой элемент в мультипликативном бинаре часто обозначается символом 0 .

Определение 3 (Полугруппа). Мультипликативный бинар X называется мультипликативной *полугруппой*, если для любых $x, y, z \in X$ выполняется равенство $x(yz) = (xy)z$.

Определение категории

Соглашение 1 (GROSS). «Groß-полугруппа» — это „полугруппа“, совокупность элементов которой не подразумевается малой, то есть не подразумевается множеством. Записи «groß-отображение», «groß-категория» и «groß-множество» имеют аналогичный смысл.

Замечание 1. Соглашение 1 основано на терминологии, используемой в лекциях Д. Терешкина по теории категорий в НМУ [26, 23:10 и 54:00].

Определение 4 (Ein). Пусть \mathcal{C} — мультипликативная groß-полугруппа с нулём. Тогда определим groß-множество

$$\text{Ein}(\mathcal{C}) := \{e \in \mathcal{C} \setminus \{0\} \mid ex, xe \in \{0, x\} \text{ для любого } x \in \mathcal{C}\}.$$

Замечание 2. Обозначение «Ein» в определении 4 происходит от немецкого слова «einheit». Оно не является общепринятым, но я не знаю общепринятого обозначения.

Определение 5 (GROSS-КАТЕГОРИЯ). Мультипликативная groß-полугруппа с нулём \mathcal{C} называется *groß-категорией*, если для всех $x, y, z \in \mathcal{C}$ из того, что $xy, yz \neq 0$ следует, что $xyz \neq 0$, и для любого $x \in \mathcal{C} \setminus \{0\}$ существуют $e', e'' \in \text{Ein}(\mathcal{C})$, такие что $e'x, xe'' \neq 0$.

Области и кообласти

Теорема 2 (ЕДИНСТВЕННОСТЬ (КО)ОБЛАСТИ). Пусть \mathcal{C} — мультипликативная groß-полугруппа с нулём, $x \in \mathcal{C} \setminus \{0\}$, $e, e' \in \text{Ein}(\mathcal{C})$ и $ex, e'x \neq 0$. Тогда $e = e'$.

Доказательство. Понятно, что раз $ex, e'x \neq 0$, то $ex = e'x = x$. Тогда $e'ex = e'x = x \neq 0$. Отсюда следует, что $e'e \neq 0$, а из этого, в свою очередь, следует, что $e = e'e = e'$. \square

Определение 6 (ОТОБРАЖЕНИЕ (КО)ОБЛАСТИ). Пусть \mathcal{C} — groß-категория. Определим groß-отображения $s, t : \mathcal{C} \setminus \{0\} \rightrightarrows \text{Ein}(\mathcal{C})$ следующими свойствами: $xs(x), t(x)x \neq 0$ для любого $x \in \mathcal{C} \setminus \{0\}$.

Замечание 3. Корректность определения 6 следует из теоремы 2, применённой к \mathcal{C} и \mathcal{C}^o , и определения 5.

Замечание 4. Буквы «s» и «t», которыми обозначаются groß-отображения области и кообласти в определении 6, — это первые буквы английских слов «source» и «target».

Теорема 3 ((КО)ОБЛАСТИ И КОМПОЗИЦИЯ). Пусть \mathcal{C} — groß-категория, а $x, y \in \mathcal{C} \setminus \{0\}$. Тогда условие $xy \neq 0$ эквивалентно условию $t(y) = s(x)$, причём если $xy \neq 0$, то $s(xy) = s(y)$ и $t(xy) = t(x)$.

Доказательство. Если $xy \neq 0$, то $xy = xs(x)y \neq 0$, поэтому $s(x)y \neq 0$, то есть $s(x) = t(y)$. Если $e = s(x) = t(y)$, то $x = xe \neq 0$ и $y = ey \neq 0$, откуда, по определению 5, следует, что $xey \neq 0$, а $xey = xy$. Равенства $s(xy) = s(y)$ и $t(xy) = t(x)$ при $xy \neq 0$ совсем очевидны. \square

Наблюдение 1. Пусть \mathcal{C} — groß-категория, а $e \in \text{Ein}(\mathcal{C})$. Тогда выполняются равенства $e = es(e) = s(e)$ и $e = t(e)e = t(e)$.

Общие замечания

Доказанного в этом разделе достаточно, чтобы заметить эквивалентность определения 5 и стандартного определения категории через совокупность объектов и совокупность морфизмов. Вне этого раздела, как правило, будет использоваться стандартное определение категории. Причём, несмотря на то, что определение 5 является, по сути, определением «метакатегории», которая не обязана быть локально малой, обычно в этом тексте будет подразумеваться, что совокупность морфизмов между любыми двумя объектами категории образует множество.

15.2. Категорные треугольные тождества

Пусть $F : \mathcal{C} \rightleftarrows \mathcal{E} : G$ — пара сопряжённых функторов, таких что F — левый сопряжённый, G — правый сопряжённый, а $\eta : \text{Id}_{\mathcal{C}} \rightarrow GF$ и $\varepsilon : FG \rightarrow \text{Id}_{\mathcal{E}}$ — единица и коединица сопряжения. Тогда биекции сопряжения в терминах единиц и коединиц описываются так:

$$(f : X \rightarrow G(Y)) \mapsto \varepsilon_Y \circ F(f), \quad (g : F(X) \rightarrow Y) \mapsto G(g) \circ \eta_X,$$

где $X \in \text{Ob}(\mathcal{C})$, $Y \in \text{Ob}(\mathcal{E})$, $f \in \text{Ar}(\mathcal{C})$, $g \in \text{Ar}(\mathcal{E})$. Естественность этих отображений эквивалентна естественности ε и η соответственно.

На $F(f)$ и $G(g)$ биекции сопряжения действуют так:

$$F(f) \mapsto G(F(f)) \circ \eta_X = \eta_{G(Y)} \circ f, \quad G(g) \mapsto \varepsilon_Y \circ F(G(g)) = g \circ \varepsilon_{F(X)},$$

где равенства являются следствиями естественности единицы и коединицы соответственно. Поэтому, записывая условие взаимной обратности полученных отображений, воспользовавшись естественностью биекций сопряжения, мы получаем два условия:

$$G(\varepsilon_Y) \circ \eta_{G(Y)} \circ f = f, \quad g \circ \varepsilon_{F(X)} \circ F(\eta_X) = g,$$

то есть $G\varepsilon \circ \eta G = \text{Id}_G$ и $\varepsilon F \circ F\eta = \text{Id}_F$. Эти условия типа «композиция единицы и коединицы тождественная» называются *треугольными тождествами*.

15.3. Финальные и инициальные функторы

Определение и характеристика

Обозначение 1 (КАТЕГОРИЯ (КО)КОНУСОВ ФУНКТОРА). Пусть \mathcal{C} и \mathcal{E} — категории, а $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{E}$ — функтор. Тогда категории конусов и коконусов функтора F обозначаются через $\text{Cone}(F)$ и $\text{Cocone}(F)$ соответственно.

Определение 1 (ФИНАЛЬНЫЕ И ИНИЦИАЛЬНЫЕ ФУНКТОРЫ). Функтор $F : J \rightarrow I$ называется *финальным*, если для любого $i \in I$ категория $i \int^F J$ связна, и называется *инициальным*, если для любого $i \in I$ категория $J \int^F i$ связна, то есть функтор $F^o : J^o \rightarrow I^o$ финален.

Пример 1. Если \mathcal{C} — произвольная категория, то финальные функторы $\text{pt} \rightarrow \mathcal{C}$ — это в точности конечные объекты в \mathcal{C} , а инициальные функторы $\text{pt} \rightarrow \mathcal{C}$ — это в точности начальные объекты в \mathcal{C} .

Замечание 1. Некоторые называют финальные функторы из определения 1 кофинальными, следуя старомодному соглашению для направленных множеств, по которому «кофинальное» означает что-то вроде «финальное в совокупности».

Теорема 1 (ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ФИНАЛЬНЫХ ФУНКТОРОВ). Пусть J и I — категории, а $F : J \rightarrow I$ — функтор. Тогда следующие три условия эквивалентны:

- а) Функтор F является финальным;
- б) Для любой категории \mathcal{C} и любого функтора $G : I \rightarrow \mathcal{C}$ функтор ограничения $\text{Cosone}(G) \rightarrow \text{Cosone}(GF)$ является изоморфизмом;
- в) Для любого представимого функтора $G : I \rightarrow \text{Sets}$ функтор ограничения $\text{Cosone}(G) \rightarrow \text{Cosone}(GF)$ является изоморфизмом.

Доказательство (из трёх частей).

Если (а), то (б). Пусть $(\alpha_j : GF(j) \rightarrow X)_{j \in J}$, где $X \in \text{Ob}(\mathcal{C})$, — коконус функтора GF . Тогда существует единственное продолжение $(\alpha_j)_{j \in J}$ до коконуса функтора G : так как категория $i \int^F J$ связна, то для любого $i \in I$ существует пара из объекта $j \in J$ и морфизма $\beta_i : i \rightarrow F(j)$, причём композиция $\alpha_j \circ G(\beta_i) : G(i) \rightarrow X$ не зависит от выбора j и β_i .

Если (б), то (в). Очевидно.

Если (в), то (а). По условию $\text{colim}(GF) \cong \text{colim}(G) \cong \text{pt}$. □

Функторы со строгой и полной прекомпозицией

Определение 2 (ФУНКТОР СО СТРОГОЙ/ПОЛНОЙ ПРЕКОМПОЗИЦИЕЙ). Пусть J и I — категории, а $F : J \rightarrow I$ — функтор. Тогда будем говорить,

что F — *функтор со строгой/полной прекомпозицией*, если для любой категории \mathcal{C} , любой пары функторов $G_1, G_2 : I \rightrightarrows \mathcal{C}$ и любого естественного преобразования $\alpha : G_1 F \rightarrow G_2 F$ существует максимум/минимум одно естественное преобразование $\tilde{\alpha} : G_1 \rightarrow G_2$, такое что $\tilde{\alpha} F = \alpha$.

Пример 2. Пусть \mathcal{C} — категория, а $L : \mathcal{C} \rightarrow W^{-1}\mathcal{C}$ — функтор локализации \mathcal{C} по какому-то классу морфизмов W . Тогда L — функтор со строгой и полной прекомпозицией.

Наблюдение 1. Пусть J и I — категории, а $F : J \rightarrow I$ — функтор со строгой и полной прекомпозицией. Тогда функтор F является одновременно и инициальным, и финальным.

Пример 3. Пусть \mathcal{C} — категория. Тогда если функтор $\mathcal{C} \rightarrow \text{pt}$ является инициальным или финальным, то категория \mathcal{C} связна, а если \mathcal{C} связна, то $\mathcal{C} \rightarrow \text{pt}$ — функтор со строгой и полной прекомпозицией.

Обозначение 2 (СВОБОДНАЯ КАТЕГОРИЯ). Пусть Q — колчан. Тогда в этом подразделе через $F(Q)$ обозначается свободная категория, порождённая Q , а через \overline{Q} — колчан Q , которому добавили по одной выделенной стрелке $\text{Id}_X : X \rightarrow X$ для каждого $X \in \text{Ob}(Q)$.

Замечание 2. Колчан, порождающий свободную категорию, восстанавливается по ней как колчан неразложимых морфизмов.

Определение 3 (КАТЕГОРНЫЙ ЦИЛИНДР). Определим *цилиндр* диаграммы категорий и функторов $\mathcal{C} \xleftarrow{\varpi} \mathcal{B} \xrightarrow{\mathcal{E}} \mathcal{E}$ с помощью следующей формулы: $\mathcal{C} \varpi \succ_{\mathcal{B}}^{\mathcal{E}} \mathcal{E} := ((\mathcal{C} \times \{0\}) \sqcup (\mathcal{E} \times \{1\})) \sqcup_{(\mathcal{B} \times \{0\}) \sqcup (\mathcal{B} \times \{1\})} (\mathcal{B} \times [1])$.

Замечание 3. Понятие категорного цилиндра в некотором смысле является двойственным понятию комма-категории.

Определение 4. Пусть Q — колчан, $A := \text{Ar}(\overline{Q})$ и $O := \text{Ob}(\overline{Q})$. Определим частично упорядоченную совокупность

$$Z(Q) := (A \text{Id} \succ_A^{\text{Dom}} O) \sqcup_{A \times \{0\}} (A \times [1]) \sqcup_{A \times \{1\}} (O \text{Cod} \succ_A^{\text{Id}} A).$$

Определим канонический морфизм $Z(Q) \rightarrow \overline{Q}$ как морфизм, переводящий стрелки из $A \times [1]$ в соответствующие стрелки из \overline{Q} , а остальные стрелки в тождественные.

Наблюдение 2. Пусть Q — колчан, такой что категория $F(Q)$ существует. Тогда сквозной канонический функтор $Z(Q) \rightarrow \overline{Q} \rightarrow F(Q)$ с точностью до эквивалентности является локализацией $Z(Q)$ по морфизмам, переходящим в изоморфизмы в $F(Q)$.

Замечание 4. В обозначениях определения 4 локализация $Z(Q)$ по морфизмам из $O \text{Cod} \succ A$ эквивалентна $V(Q) := (A \succ_A^{\text{Dom}} O) \sqcup_A (A \succ_A^{\text{Cod}} O)$. Помимо этого имеем канонический изоморфизм $Z(Q) \xrightarrow{\sim} Z(Q^o)^o$.

Замечание 5. Содержание этого подраздела основано на [23, раздел 1].

15.4. Фильтрованные категории

Определение и характеристика фильтрованных категорий

Определение 1 (κ -ОГРАНИЧЕННЫЙ КОЛЧАН). Пусть κ — бесконечный кардинал. Колчан Q называется κ -ограниченным, если он малый и мощ-

ность множества $\text{Ob}(Q) \sqcup \text{Ar}(Q)$ строго меньше κ . Категория называется κ -ограниченной, если она κ -ограничена как колчан.

Определение 2 (κ -(Ко)ФИЛЬТРОВАННАЯ КАТЕГОРИЯ). Пусть κ — бесконечный кардинал. Категория \mathcal{C} называется κ -фильтрованной/ κ -ко-фильтрованной если у любого функтора из κ -ограниченной категории в \mathcal{C} есть коконус/конус соответственно.

Определение 3 ((Ко)ФИЛЬТРОВАННАЯ КАТЕГОРИЯ). Категория называется (ко)фильтрованной если она является \aleph_0 -(ко)фильтрованной соответственно.

Теорема 1. Если κ — бесконечный кардинал, \mathcal{C} — κ -(ко)фильтрованная категория, Q — κ -ограниченный колчан, а $F : Q \rightarrow \mathcal{C}$ — морфизм, то у F° есть (ко)конус соответственно.

Доказательство. Согласно наблюдению 15.3.2 в его же обозначениях категория (ко)конусов над индуцированным F функтором $F(Q) \rightarrow \mathcal{C}$ изоморфна категории (ко)конусов соответственно над индуцированным сквозным функтором $Z(Q) \rightarrow F(Q) \rightarrow \mathcal{C}$, при этом, так как колчан Q является κ -ограниченным, то категория $Z(Q)$ тоже κ -ограничена. \square

Наблюдение 1. Пусть κ — бесконечный кардинал, \mathcal{C} — κ -фильтрованная категория, а $F : \mathcal{C} \rightarrow \text{Sets}$ — функтор. Тогда категория элементов F , то есть категория $\text{pt} \int^F \mathcal{C}$, является копроизведением κ -фильтрованных категорий. Иначе говоря, её связные компоненты κ -фильтрованы.

Теорема 2 (κ -ОГРАНИЧЕННЫЕ ПРЕДЕЛЫ КОММУТИРУЮТ С κ -ФИЛЬТРОВАННЫМИ КОПРЕДЕЛАМИ). Пусть κ — бесконечный кардинал, I — малая κ -фильтрованная категория, J° — κ -ограниченная категория, а $X : J^\circ \times I \rightarrow \text{Sets}$ — функтор. Тогда отображение перестановки копредела и предела $\Theta : \text{colim}_I \lim_{J^\circ} (X) \rightarrow \lim_{J^\circ} \text{colim}_I (X)$ биективно.

Доказательство (из трёх частей).

Часть 1: Обозначения. Для любых $\alpha_{i',i} \in \text{Hom}_I(i, i')$, $x_{i,j} \in X(j, i)$ и $\beta_{j,j'} \in \text{Hom}_J(j', j)$, где $i, i' \in I$, а $j, j' \in J$, введём обозначения $\alpha_{i',i} x_{i,j} := X(\text{Id}_j, \alpha_{i',i})(x_{i,j})$ и $x_{i,j} \beta_{j,j'} := X(\beta_{j,j'}, \text{Id}_i)(x_{i,j})$. Элементы кообласти Θ — это согласованные семейства $([x_{i(j),j}])_{j \in J}$ классов элементов X , где

$(i(j))_{j \in J} \in I^{\times J}$, а $x_{i(j),j} \in X(j, i(j))$ для всех $j \in J$, а элементы области Θ — это классы $[(x_{i,j})_{j \in J}]$ согласованных семейств элементов X , где $i \in I$, а $x_{i,j} \in X(j, i)$ для всех $j \in J$, причём $\Theta([(x_{i,j})_{j \in J}]) = ([x_{i,j}]_{j \in J})$.

Часть 2: Сюръективность Θ . Пусть $[(x_{i(j),j})_{j \in J}]$ — произвольный элемент $\lim_{J^o} \operatorname{colim}_I(X)$. Так как для любого $\beta = \beta_{j,j'} \in \operatorname{Hom}_J(j', j)$, где $j, j' \in J$, выполняется равенство $[x_{i(j),j} \beta_{j,j'}] = [x_{i(j'),j'}] \in \operatorname{colim}_{i \in I} X(j', i)$, то существуют $i(\beta) \in I$ и пара стрелок $\alpha_\beta : i(j) \rightarrow i(\beta) \leftarrow i(j') : \alpha'_\beta$, такие что $\alpha_\beta x_{i(j),j} \beta_{j,j'} = \alpha'_\beta x_{i(j'),j'}$. Пусть $(\gamma_i : i \rightarrow e)_{i \in \{i(\sigma) \mid \sigma \in \operatorname{Ob}(J) \sqcup \operatorname{Ar}(J)\}}$, где $e \in I$, — коконус над подкатегорией в I , порождённой стрелками α_β и α'_β для всех $\beta \in \operatorname{Ar}(J)$. Тогда $[(\gamma_{i(j)} x_{i(j),j})_{j \in J}] \in \Theta^{-1}([(x_{i(j),j}]_{j \in J})$.

Часть 3: Инъективность Θ . Пусть $[(x'_{i',j})_{j \in J}]$ и $[(x''_{i'',j})_{j \in J}]$ — элементы $\operatorname{colim}_I \lim_{J^o}(X)$, такие что $\Theta([(x'_{i',j})_{j \in J}]) = \Theta([(x''_{i'',j})_{j \in J}])$. Тогда семейство $[(x'_{i',j})_{j \in J} \sqcup (x''_{i'',j})_{j \in J}]$ можно интерпретировать как элемент $\lim_{J^o \times D^o} \operatorname{colim}_I(X \circ P : J^o \times D^o \times I \rightarrow J^o \times I \rightarrow \operatorname{Sets})$, где D^o — категория с множеством объектов $\{0, 1\}$, эквивалентная \mathbf{pt} , а P — стандартная проекция. Применив к этому элементу рассуждение из части 2 данного доказательства, получаем пару морфизмов $\gamma_{i'} : i' \rightarrow e \leftarrow i'' : \gamma_{i''}$, где $e \in I$, такую что $[(x'_{i',j})_{j \in J}] = [(\gamma_{i'} x'_{i',j})_{j \in J}] = [(\gamma_{i''} x''_{i'',j})_{j \in J}] = [(x''_{i'',j})_{j \in J}]$. \square

Замечание 1. Для визуализации приведённого доказательства теоремы 2 может быть полезным рассмотрение категории, полученной добавлением к $J \sqcup I$ морфизмов $\operatorname{Hom}(j, i) \cong X(j, i)$, где $i \in I$, а $j \in J$, и доопределением композиции морфизмов таким образом, чтобы она была согласована с обозначениями в доказательстве теоремы 2.

Пример 1 (Локализация модуля). Пусть A — коммутативное ассоциативное унитарное кольцо, $S \subset A$ — мультипликативное множество, а M — A -модуль. Тогда M_S функториально представляется как фильтрованный копредел диаграммы A -модулей с вершинами $M_s := M$ и стрелками $r \cdot (-) : M_s \rightarrow M_{rs}$, где $s, r \in S$. Поэтому функтор $M \mapsto M_S : A\text{-mod} \rightarrow A\text{-mod}$ сохраняет малые копределы и конечные пределы.

Теорема 3. Пусть κ — бесконечный кардинал, а I — малая категория, такая что для любой κ -ограниченной категории J^o и для любого функтора $X : J^o \times I \rightarrow \operatorname{Sets}$ отображение перестановки копредела и предела $\operatorname{colim}_I \lim_{J^o}(X) \rightarrow \lim_{J^o} \operatorname{colim}_I(X)$ биективно. Тогда I κ -фильтрована.

Доказательство. Пусть $F : J \rightarrow I$ — функтор из κ -ограниченной категории J в I . Тогда

$$\operatorname{colim}_{i \in I} \lim_{j \in J^o} \operatorname{Hom}_I(F(j), i) \cong \lim_{j \in J^o} \operatorname{colim}_{i \in I} \operatorname{Hom}_I(F(j), i) \cong \lim_{j \in J^o} \mathbf{pt} \cong \mathbf{pt}.$$

Но для любого $i \in I$ элементы $\lim_{j \in J^o} \operatorname{Hom}_I(F(j), i)$ в точности соответствуют коконусам функтора F с вершиной в i . \square

Общая теорема Фрейда о сопряжённом функторе

Определение 4 (Слабо начальная/конечная полная подкатегория). Полная подкатегория \mathcal{S} категории \mathcal{C} , или соответствующая ей совокупность объектов в \mathcal{C} , называется *слабо начальной*, если для любого $X \in \operatorname{Ob}(\mathcal{C})$ категория $\mathcal{S} \int_{\mathcal{C}} X$ не пустая, и называется *слабо конечной*, если для любого $X \in \operatorname{Ob}(\mathcal{C})$ категория $X \int_{\mathcal{C}} \mathcal{S}$ не пустая.

Теорема 4. Если \mathcal{S} — слабо начальная полная подкатегория кофильтрованной категории \mathcal{C} , то \mathcal{S} кофильтрованная и инициальная в \mathcal{C} .

Доказательство. Кофильтрованность \mathcal{S} легко проверяется. Докажем инициальность. Пусть $X \in \operatorname{Ob}(\mathcal{C})$. Так как категория \mathcal{C} кофильтрованная, то категория $\mathcal{C} \int_{\mathcal{C}} X$ тоже кофильтрованная. Так как \mathcal{S} — слабо начальная полная подкатегория в \mathcal{C} , то $\mathcal{S} \int_{\mathcal{C}} X$ — слабо начальная полная подкатегория в $\mathcal{C} \int_{\mathcal{C}} X$. Так как слабо начальная полная подкатегория кофильтрованной категории является кофильтрованной, то категория $\mathcal{S} \int_{\mathcal{C}} X$ является кофильтрованной, в частности, связной. \square

Наблюдение 2. Пусть \mathcal{C} — категория. Тогда предел функтора $\operatorname{Id}_{\mathcal{C}}$ — это то же самое, что начальный объект в \mathcal{C} .

Следствие 1. В категории \mathcal{C} существует начальный объект тогда и только тогда, когда \mathcal{C} кофильтрованная и в \mathcal{C} существует слабо начальная полная подкатегория \mathcal{S} , у которой есть предел в \mathcal{C} .

Доказательство. Часть «только тогда» очевидна, а часть «тогда» следует из теоремы 4: так как \mathcal{S} — инициальная подкатегория в \mathcal{C} , то её предел в \mathcal{C} является пределом $\operatorname{Id}_{\mathcal{C}}$, то есть начальным объектом в \mathcal{C} . \square

Теорема 5 (ОБЩАЯ ТЕОРЕМА ФРЕЙДА О СОПРЯЖЁННОМ ФУНКТОРЕ). Пусть G — сохраняющий малые пределы функтор из содержащей малые пределы категории \mathcal{E} в категорию \mathcal{C} , такой что для любого $X \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ существует множество $\mathcal{S} \subset \text{Ob}(X \int^G \mathcal{E})$, такое что в любой объект категории $X \int^G \mathcal{E}$ есть стрелка из какого-то элемента \mathcal{S} . Тогда у функтора G есть левый сопряжённый.

Набросок доказательства. Заметим, что для любого $X \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ категория $X \int^G \mathcal{E}$ содержит малые пределы, потому что категория \mathcal{E} содержит малые пределы, а функтор G их сохраняет, после чего применим к $X \int^G \mathcal{E}$ следствие 1. \square

Пример 2. Пусть \mathcal{C} — частично упорядоченная по включению совокупность всех множеств. Тогда в \mathcal{C} есть малые копределы и функтор $\mathcal{C} \rightarrow \mathbf{pt}$ их сохраняет, но не имеет правого сопряжённого.

Часть III

Совсем сырые или мелкие тексты

Глава 16

Сырые и мелкие тексты

16.1. Категория Лямбда

Категория элементов и колчан элементов

Определение 1 (КАТЕГОРИЯ ЭЛЕМЕНТОВ). Если $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathbf{Sets}$ — функтор, то его *категорией элементов* называется категория $F \int_{\mathbf{Fun}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets})^o} \mathcal{C}$, которую можно отождествить с $\mathbf{pt} \int^F \mathcal{C}$ и с $\mathcal{C}^{F \times_{\mathbf{Sets}} (\mathbf{pt} \int \mathbf{Sets})}$.

Замечание 1. Иногда категория $(F \int \mathcal{C})^o \cong \mathcal{C}^o \int F = \mathcal{C}^o \int_{\mathbf{Fun}(\mathcal{C}, \mathbf{Sets})} F$ тоже называется категорией элементов функтора $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathbf{Sets}$.

Определение 2 (КОЛЧАН ЭЛЕМЕНТОВ). Если $F : I \rightarrow \mathbf{Sets}$ — представление колчана I , то его *колчаном элементов* называется расслоенное произведение $I^{F \times_{\mathbf{Sets}} (\mathbf{pt} \int \mathbf{Sets})}$ в категории колчанов.

Определение 3 (КОМПОНЕНТЫ СВЯЗНОСТИ). Будем называть *компонентами связности* категории слои универсального функтора из данной категории в дискретную категорию. Компоненты связности топологического пространства определяются аналогично.

Пример 1. Элементы копредела функтора $F : I \rightarrow \mathbf{Sets}$, где I — малая категория, можно интерпретировать как компоненты связности категории $F \int I$, а элементы предела — как сечения проекции $F \int I \rightarrow I$.

Пример 2. Если мы рассмотрим вложение Кэли группы как представление однообъектного группоида отображениями множеств, ограничим

его на подколчан и рассмотрим колчан элементов, то получится соответствующий граф Кэли.

Пример 3. Для представлений колчана-стрелки и колчана-петли отображениями множеств изображение колчана элементов даёт традиционные картинки, связанные с морфизмами и эндоморфизмами множеств.

Пример 4. Действие группы на множестве является транзитивным действием или орбитой тогда и только тогда, когда у соответствующего группоида элементов ровно одна компонента связности.

Определение категории Лямбда

Определение 4 (ЦИКЛИНАР). Категория, свободно порождённая колчаном элементов стандартной циклической перестановки $x \mapsto x + 1$ множества $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$, где $n \in \mathbb{N}_1$, обозначается через $[n]_\Lambda$ и называется *циклинар* порядка n .

Замечание 2. Термин «циклинар» не стандартный и придуман по аналогии с термином «ординал». Я не знаю стандартного термина.

Наблюдение 1. Для категорий $[n]$ и $[n]_\Lambda$ число n — это количество стрелок в порождающем колчане. Порождающий колчан свободной категории однозначно восстанавливается по ней.

Обозначение 1 (ГРУППОИДОФИКАЦИЯ). В этом разделе локализацию малой категории \mathcal{C} по всем морфизмам будем обозначать через \mathcal{C}^{grp} .

Наблюдение 2. Группа автоморфизмов категории $[n]_\Lambda$ — это циклическая группа порядка n . Группа автоморфизмов соответствующего группоида $[n]_\Lambda^{\text{grp}}$ — это диэдральная группа порядка $2n$.

Замечание 3. Обратите внимание на группы $\text{Aut}([2]_\Lambda^{\text{grp}})$ и $\text{Aut}([1]_\Lambda^{\text{grp}})!$

Определение 5 (СТРОГОСТЬ/ПОЛНОТА НА ЭНДОМОРФИЗМАХ). Функтор $\varphi : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{E}$ называется *строгим/полным на эндоморфизмах*, если для любого $C \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ индуцированный гомоморфизм моноидов $\varphi_C : \text{End}_{\mathcal{C}}(C) \rightarrow \text{End}_{\mathcal{E}}(\varphi(C))$ инъективен/сюръективен соответственно.

Определение 6 (КАТЕГОРИЯ ЛЯМБДА). Категория, объектами которой являются циклинары $[n]_\Lambda$, где $n \in \mathbb{N}_1$, а морфизмами являются функторы, строгие и полные на эндоморфизмах, обозначается символом Λ и называется *категорией Лямбда*.

Лемма 1. Пусть $\varphi : [n]_\Lambda \rightarrow [m]_\Lambda$, где $n, m \in \mathbb{N}_1$, — функтор. Тогда индуцированные гомоморфизмы свободных циклических моноидов $\varphi_x : \text{End}_{[n]_\Lambda}(x) \rightarrow \text{End}_{[m]_\Lambda}(\varphi(x))$, где $x \in \text{Ob}([n]_\Lambda)$, изоморфны друг другу как объекты категории стрелок категории моноидов.

Доказательство. Для индуцированного морфизма группоидов $\varphi^{\text{grp}} : [n]_\Lambda^{\text{grp}} \rightarrow [m]_\Lambda^{\text{grp}}$ индуцированные гомоморфизмы свободных циклических групп $\varphi_x^{\text{grp}} : \text{End}_{[n]_\Lambda^{\text{grp}}}(x) \rightarrow \text{End}_{[m]_\Lambda^{\text{grp}}}(\varphi(x))$, где $x \in \text{Ob}([n]_\Lambda) = \text{Ob}([n]_\Lambda^{\text{grp}})$, изоморфны друг другу как объекты категории стрелок категории моноидов, так как все объекты категории $[n]_\Lambda^{\text{grp}}$ изоморфны друг другу. Теперь заметим, что не изоморфные гомоморфизмы свободных циклических моноидов индуцируют не изоморфные гомоморфизмы свободных циклических групп. \square

16.2. Топология Гротендика

Общее определение

Определение 1 (ЗАМКНУТАЯ СЛЕВА/СПРАВА ПОДКАТЕГОРИЯ). Подкатегория \mathcal{C} категории \mathcal{E} называется *замкнутой слева* или *влево*, если она содержит все морфизмы из \mathcal{E} , кообласти которых лежат в \mathcal{C} , и *замкнутой справа* или *вправо*, если \mathcal{C}^o замкнута слева в \mathcal{E}^o .

Наблюдение 1. Замкнутая слева или справа подкатегория всегда является полной подкатегорией.

Наблюдение 2. Пусть $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{E}$ — функтор, а \mathcal{E}' — замкнутая слева/справа подкатегория \mathcal{E} . Тогда $F^{-1}(\mathcal{E}')$ — замкнутая слева/справа соответственно подкатегория \mathcal{C} .

Определение 2 (СИТО/РЕШЕТО). *Ситом* или *решетом* на объекте данной категории называется замкнутая слева подкатегория категории объектов над ним.

Определение 3 (ГЛАВНОЕ СИТО). Сито всех объектов над данным объектом называется *главным ситом* на нём.

Определение 4 (ОГРАНИЧЕНИЕ СИТА). Любой морфизм определяет функтор из категории объектов над своей областью в категорию объектов над своей кообластью. Соответствующий функтор прообраза для сит называется *функтором ограничения* вдоль данного морфизма.

Определение 5 (ТОПОЛОГИЯ ГРОТЕНДИКА). *Топология Гротендика* на данной категории задаётся классом сит на её объектах, называемых *покрывающими ситами*, удовлетворяющим следующим свойствам:

- а) Главные сита являются покрывающими;
- б) Ограничения покрывающих сит являются покрывающими;
- в) Если ограничения сита вдоль всех объектов какого-то покрывающего сита являются покрывающими, то оно само является покрывающим.

Определение 6 (САЙТ). Категория, снабжённая топологией Гротендика, называется *сайтом*.

Определение 7 (КОАУГМЕНТАЦИЯ ФУНКТОРА). Назовём *коаугментацией* функтора ко-конус над функтором, то есть его естественное преобразование в какой-то постоянный функтор.

Определение 8 (ПУЧОК НА САЙТЕ). Каждое сито на объекте данной категории снабжено тавтологическим коаугментированным функтором в эту категорию. Предпучок на сайте называется *пучком*, если он переводит коаугментированные функторы, соответствующие покрывающим ситам, в диаграммы пределов.

Случай топологического пространства

Определение 9 (ПУЧОК НА ТОПОЛОГИИ). Пусть T — топологическое пространство, а \mathcal{C} — категория. Функтор $F : \text{Open}(T)^o \rightarrow \mathcal{C}$ называется *пучком*, если он сохраняет пределы замкнутых вправо подкатегорий.

Наблюдение 3. Пусть \mathcal{S} — подмножество множества $\text{Open}(T)$, где T — топологическое пространство. Тогда полная подкатегория в $\text{Open}(T)$, заданная множеством объектов $\{U \cap V \in \text{Open}(T) \mid U, V \in \mathcal{S}\}$, финальна в замкнутой влево подкатегории в $\text{Open}(T)$, порождённой \mathcal{S} .

16.3. Универсумы Гротендика

Соглашение 1. Пусть \mathcal{U} — произвольная совокупность. Тогда множества, которые являются элементами \mathcal{U} , иногда будут называться \mathcal{U} -множествами.

Определение 1 (УНИВЕРСУМ ГРОТЕНДИКА). Множество \mathcal{U} называется *универсумом Гротендика* или просто *универсумом*, если выполняются следующие три условия:

- а) Объединение всех \mathcal{U} -множеств совпадает с \mathcal{U} ;
- б) Для любого \mathcal{U} -множества множество всех его подмножеств является \mathcal{U} -множеством;
- в) Объединение любого индексированного \mathcal{U} -множеством семейства \mathcal{U} -множеств является \mathcal{U} -множеством.

16.4. Спектральная последовательность фильтрации

Соглашение 1 (КОЛЬЦО ДУАЛЬНЫХ ЧИСЕЛ). В этом разделе символ R будет обозначать фиксированное ассоциативное унитарное кольцо, $R[\partial]$ — кольцо $R[X]/(X^2)$, а ∂ — образ $X \in R[X]$ в $R[\partial]$.

Замечание 1. Модули над кольцом дуальных чисел иногда называются *дифференциальными модулями*. В такой терминологии комплексы соответствуют *дифференциальным градуированным модулям*, то есть \mathbb{Z} -градуированным модулям над \mathbb{N}_0 -градуированным кольцом $R[\partial]$, где \mathbb{N}_0 -градуировка на $R[\partial]$ унаследована от $R[X]$.

Наблюдение 1. Пусть $\cdots \subset C_i \subset C_{i+1} \subset \cdots$, где $i \in \mathbb{Z}$, — ряд $R[\partial]$ -модулей, $\tilde{Z}_i^r := C_i \cap \partial^{-1}(C_{i-r})$, $\tilde{B}_i^r := C_i \cap \partial(C_{i+r-1})$, $Z_i^r := \tilde{Z}_i^r / \tilde{Z}_{i-1}^{r-1}$,

$B_i^r := \tilde{B}_i^r / \tilde{B}_{i-1}^{r+1}$, где $i, r \in \mathbb{Z}$. Тогда оператор ∂ индуцирует гомоморфизмы $\tilde{d}_i^r : Z_i^r \rightarrow Z_{i-r}^r / B_{i-r}^r$ с ядром Z_i^{r+1} и образом $B_{i-r}^{r+1} / B_{i-r}^r$.

Замечание 2. Чтобы доказать утверждение наблюдения 1 достаточно заметить, что ∂ индуцирует изоморфизмы $\tilde{Z}_i^r / \tilde{Z}_i^{r+1} \xrightarrow{\sim} \tilde{B}_{i-r}^{r+1} / \tilde{B}_{i-r-1}^{r+2}$, переводящие классы элементов \tilde{Z}_{i-1}^{r-1} в классы элементов $\tilde{B}_{i-r}^r = \partial(\tilde{Z}_{i-1}^{r-1})$.

Определение 1 (СПЕКТРАЛЬНАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ФИЛЬТРАЦИИ). В обозначениях наблюдения 1 семейство $(E_i^r, d_i^r, \rho_i^r)_{i \in \mathbb{Z}, r \in \mathbb{N}_0}$, где $E_i^r := Z_i^r / B_i^r$, гомоморфизм $d_i^r : E_i^r \rightarrow E_{i-r}^r$ индуцирован \tilde{d}_i^r , а ρ_i^r — это очевидный изоморфизм $\text{Ker}(d_i^r) / \text{Im}(d_{i+r}^r) \xrightarrow{\sim} E_i^{r+1}$, называется *спектральной последовательностью фильтрации* $(C_i)_{i \in \mathbb{Z}}$.

16.5. Категорный цилиндр

Определение и основные свойства цилиндра

Определение 1 (КАТЕГОРНЫЙ ЦИЛИНДР). Определим *цилиндр* диаграммы категорий и функторов $\mathcal{C} \xleftarrow{\varpi} \mathcal{B} \xrightarrow{\varrho} \mathcal{E}$ с помощью следующей формулы: $\mathcal{C} \xrightarrow{\varpi} \mathcal{B} \xrightarrow{\varrho} \mathcal{E} := ((\mathcal{C} \times \{0\}) \sqcup (\mathcal{E} \times \{1\})) \sqcup_{(\mathcal{B} \times \{0\}) \sqcup (\mathcal{B} \times \{1\})} (\mathcal{B} \times [1])$.

Замечание 1. Понятие категорного цилиндра в некотором смысле является двойственным понятию комма-категории.

Наблюдение 1. Если $\mathcal{C} \xleftarrow{\varpi} \mathcal{B} \xrightarrow{\varrho} \mathcal{E}$ — диаграмма категорий, то её цилиндр автоматически снабжён функтором $\mathcal{C} \xrightarrow{\varpi} \mathcal{B} \xrightarrow{\varrho} \mathcal{E} \rightarrow [1]$, слои которого отождествляются с $\mathcal{C} \cong \mathcal{C} \times \{0\}$ и $\mathcal{E} \cong \mathcal{E} \times \{1\}$ соответственно.

Наблюдение 2. Пусть $\mathcal{S} \rightarrow [1]$ — функтор, а \mathcal{S}_0 и \mathcal{S}_1 — его слои над 0 и 1 соответственно. Тогда $\mathcal{S} \cong \mathcal{S}_0 \succ_{\mathcal{S}_0 \sqcup_{\mathcal{S}} \mathcal{S}_1} \mathcal{S}_1$.

Определение 2 (ОБРАЗУЮЩИЕ ЦИЛИНДРА). Пусть $\mathcal{C} \xleftarrow{\varpi} \mathcal{B} \xrightarrow{\varrho} \mathcal{E}$ — диаграмма категорий, а $\mathcal{X} := \mathcal{C} \xrightarrow{\varpi} \mathcal{B} \xrightarrow{\varrho} \mathcal{E}$ — её цилиндр. Тогда структурный функтор $\mathcal{B} \times [1] \rightarrow \mathcal{X}$ соответствует естественному преобразованию $(\varpi \vec{b}^e : \varpi(b) \rightarrow \varrho(b))_{b \in \text{Ob}(\mathcal{B})}$ из $\mathcal{B} \cong \mathcal{B} \times \{0\} \rightarrow \mathcal{X}$ в $\mathcal{B} \cong \mathcal{B} \times \{1\} \rightarrow \mathcal{X}$. Компоненты $(\varpi \vec{b}^e)_{b \in \text{Ob}(\mathcal{B})}$ называются *образующими* \mathcal{X} .

Наблюдение 3. Пусть $F : \mathcal{C} \rightarrow I$ — функтор. Тогда $\mathcal{C} \succ^F I$ существует и для любого $c \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ соответствующая образующая $\vec{c}^F : c \rightarrow F(c)$ является начальным объектом в $\mathcal{C} \succ_{\mathcal{C} \succ^F I} I$.

Наблюдение 4. Пусть функторы $\alpha : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{C}'$, $\beta : \mathcal{E} \rightarrow \mathcal{E}'$ и $\gamma : \mathcal{B} \rightarrow \mathcal{B}'$ — компоненты морфизма из диаграммы категорий $\mathcal{C} \xleftarrow{\varpi} \mathcal{B} \xrightarrow{\varrho} \mathcal{E}$ в диаграмму категорий $\mathcal{C}' \xleftarrow{\varpi'} \mathcal{B}' \xrightarrow{\varrho'} \mathcal{E}'$. Тогда α , β и γ индуцируют функтор между соответствующими цилиндрами: $\alpha \succ_{\gamma} \beta : \mathcal{C} \varpi \succ_{\mathcal{B}}^{\varrho} \mathcal{E} \rightarrow \mathcal{C}' \varpi' \succ_{\mathcal{B}'}^{\varrho'} \mathcal{E}'$.

Пример 1. Пусть $\rho : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{E}$ — функтор. В качестве иллюстрации к введённым обозначениям приведём следующий декартов квадрат:

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{C} \succ_{\mathcal{C}}^{\rho} \mathcal{E} & \xrightarrow{\text{Id} \succ_{\text{Id}} (\mathcal{E} \rightarrow \text{pt})} & \mathcal{C} \succ_{\mathcal{C}} \text{pt} \\ \rho \succ_{\rho} \text{Id} \downarrow & & \downarrow \rho \succ_{\rho} \text{Id} \\ \mathcal{E} \succ_{\mathcal{E}} \mathcal{E} & \xrightarrow{\text{Id} \succ_{\text{Id}} (\mathcal{E} \rightarrow \text{pt})} & \mathcal{E} \succ_{\mathcal{E}} \text{pt}. \end{array}$$

Определение расслоения Гротендика

Определение 3 (ЗАМКНУТОСТЬ ОТНОСИТЕЛЬНО ПУЛЛБЭКОВ). Если \mathcal{C} — категория, а B и P — два класса морфизмов в \mathcal{C} , то P называется замкнутым относительно пуллбэков вдоль морфизмов из B , если любая диаграмма вида $\beta : c' \rightarrow c \leftarrow c'' : \pi$, где $\pi \in P$, а $\beta \in B$, достраивается до декартового квадрата, в котором морфизм $c' \times_c c'' \rightarrow c'$ лежит в P .

Определение 4 (РАССЛОЕНИЕ ГРОТЕНДИКА). Функтор $F : \mathcal{C} \rightarrow I$ называется *расслоением Гротендика*, если класс образующих цилиндра $\mathcal{C} \succ^F I$ замкнут относительно пуллбэков вдоль морфизмов из I .

Определение 5 (СИЛЬНО ДЕКАРТОВ МОРФИЗМ). Пусть \mathcal{C} и I — категории, $F : \mathcal{C} \rightarrow I$ — функтор, а $\varphi : c' \rightarrow c$ — морфизм в \mathcal{C} . Тогда φ называется *сильно декартовым*, если коммутативный квадрат (1) в категории $\mathcal{C} \succ^F I$ декартов.

$$\begin{array}{ccc} c' & \xrightarrow{\varphi} & c \\ \vec{c}^F \downarrow & & \downarrow \vec{c}^F \\ F(c') & \xrightarrow{F(\varphi)} & F(c) \end{array} \quad (1)$$

Замечание 2. Функтор $F : \mathcal{C} \rightarrow I$ является расслоением Гротендика тогда и только тогда, когда для любого $c \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ у любого морфизма в I с кобластью $F(c)$ существует сильно декартово поднятие в \mathcal{C} .

Определение 6 (РАССЛОЕНИЕ СТРИТА). Пусть \mathcal{C} и I — категории, $F : \mathcal{C} \rightarrow I$ — функтор, а $\mathcal{E} := \mathcal{C} \succ^F I$. Если класс морфизмов $\varphi \in \text{Ob}(\mathcal{C} \int_{\mathcal{E}} I) \subset \text{Ar}(\mathcal{E})$, таких что φ — начальный объект в $\text{Dom}(\varphi) \int_{\mathcal{E}} I$, замкнут относительно пуллбэков вдоль морфизмов из I , то F называется *расслоением Стрита* или *расслоением Стрита – Гротендика*.

16.6. Абелевы категории

Определение 1 (ПОЛУАДДИТИВНАЯ КАТЕГОРИЯ). Категория, в которой конечные произведения и копроизведения существуют и коммутируют друг с другом, называется *полуаддитивной категорией*.

Замечание 1. В статье [19, раздел 1.3] полуаддитивные категории в смысле определения 1 называются *преаддитивными*.

Определение 2 (НУЛЕВОЙ ОБЪЕКТ). Объект в категории, который одновременно является и начальным, и конечным, называется *нулевым объектом*. Категория, в которой существует нулевой объект, называется *пунктированной категорией*, а морфизм, который пропускается через нулевой объект, называется *нулевым морфизмом*.

Наблюдение 1. Пусть \mathcal{C} — полуаддитивная категория с начальным объектом $0 \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ и конечным объектом $1 \in \text{Ob}(\mathcal{C})$. Тогда канонический морфизм $0 \xrightarrow{\sim} 1$ является изоморфизмом и канонические морфизмы (1) являются изоморфизмами для любых $A, B \in \text{Ob}(\mathcal{C})$.

$$\begin{array}{ccc} (A \times 0) \sqcup (0 \times B) & \xrightarrow{\sim} & (A \sqcup 0) \times (0 \sqcup B) \cong A \times B \\ \downarrow \wr & & \downarrow \wr \\ A \sqcup B \cong (A \times 1) \sqcup (1 \times B) & \xrightarrow{\sim} & (A \sqcup 1) \times (1 \sqcup B) \end{array} \quad (1)$$

Другими словами, $0 \cong 1$ и стандартный морфизм $(\text{Id} \bar{\times} 0) \sqcup (0 \bar{\times} \text{Id}) : A \sqcup B \xrightarrow{\sim} A \times B$ является изоморфизмом для любых $A, B \in \text{Ob}(\mathcal{C})$, где нулями обозначаются нулевые морфизмы.

Определение 3 (АБЕЛЕВА КАТЕГОРИЯ). Аддитивная категория называется *абелевой*, если она конечно полна и кополна, и для любого морфизма $X \rightarrow Y$ индуцированный морфизм $X \sqcup_{X \times_Y X} X \rightarrow Y \times_{Y \sqcup_X Y} Y$ из регулярного кообраза в регулярный образ является изоморфизмом.

16.7. Локально нильпотентные операторы

Определение 1 (РАСЩЕПИМОЕ СЕМЕЙСТВО ПОДМОДУЛЕЙ). Пусть V — модуль над ассоциативным унитарным кольцом R . Тогда семейство $(U_i)_{i \in I}$ подмодулей V называется *расщепимым*, если существует семейство $(V_j)_{j \in J}$ подмодулей V , такое что $V = \bigoplus_{j \in J} V_j$ и для любого $i \in I$ выполняется равенство $U_i = \bigoplus_{j \in J | V_j \subset U_i} V_j$.

Пример 1. Пусть D — тело. Тогда стандартная убывающая фильтрация $(X^k D[[X]])_{k=0}^\infty$ на $D[[X]]$ не расщепима, потому что иначе D -модули $\bigoplus_{k=0}^\infty X^k D[[X]] / X^{k+1} D[[X]] \cong D[X]$ и $D[[X]] / \bigcap_{k=0}^\infty X^k D[[X]] \cong D[[X]]$ были бы изоморфны, а согласно теореме 10.7.1 это не так.

Замечание 1. Я узнал о примере 1 из ответа [14] на «Mathematics Stack Exchange».

Теорема 1. Пусть D — тело. Тогда D -модуль V с оператором $\varphi : V \rightarrow V$ изоморфен прямой сумме D -модулей с операторами вида

$$D \otimes_{\mathbb{Z}} \left(P \mapsto \frac{\partial P}{\partial X} : \sum_{k=0}^n \mathbb{Z} \frac{X^k}{k!} \rightarrow \sum_{k=0}^n \mathbb{Z} \frac{X^k}{k!} \right), \text{ где } n = 1, 2, \dots, \infty, \quad (1)$$

тогда и только тогда, когда выполняются следующие условия: $V = \bigcup_{k=0}^\infty \varphi^{-k}(0)$, $\varphi(\bigcap_{k=0}^\infty \varphi^k(V)) = \bigcap_{k=0}^\infty \varphi^k(V)$ и $(\varphi^{-1}(0) \cap \varphi^k(V))_{k=0}^\infty$ является расщепимым семейством подмодулей D -модуля $\varphi^{-1}(0)$.

Набросок доказательства (из двух частей).

Часть «только тогда». Рассматриваемые три условия выполняются для модулей вида (1) и наследуются прямыми суммами.

Часть «тогда». По условию у D -модуля $\varphi^{-1}(0)$ существует базис E^1 и разбиение $E^1 = E_\infty^1 \sqcup (\bigcup_{n=0}^\infty E_n^1)$, такое что для каждого $r \in \mathbb{N}_0$ множество $E_\infty^1 \sqcup (\bigcup_{n=r}^\infty E_n^1)$ является базисом $\varphi^{-1}(0) \cap \varphi^r(V)$.

Для любых $n, k \in \mathbb{N}_1$, таких что $k \leq n$, по индукции возьмём в качестве E_n^{k+1} какое-то подмножество $\varphi^{n-k}(V)$, такое что $\varphi(E_n^{k+1}) = E_n^k$ и отображение $v \mapsto \varphi(v) : E_n^{k+1} \rightarrow E_n^k$ биективно.

Похожим образом для любого $k \in \mathbb{N}_1$ по индукции возьмём в качестве E_∞^{k+1} какое-то подмножество $\bigcap_{i=0}^\infty \varphi^i(V)$, такое что $\varphi(E_\infty^{k+1}) = E_\infty^k$ и отображение $v \mapsto \varphi(v) : E_\infty^{k+1} \rightarrow E_\infty^k$ биективно.

Тогда множество $\bigsqcup_{k=1}^\infty (E_\infty^k \sqcup (\bigsqcup_{n=k-1}^\infty E_n^k))$ является базисом D -модуля V , устанавливающим нужный изоморфизм. \square

Пример 2. Пусть $V_{\mathbb{Z}} := \sum_{n=1}^\infty \sum_{k=0}^n \mathbb{Z} \cdot X_n^k/k! \subset \mathbb{Q}[X_n \mid n \in \mathbb{N}_1]$ и $\varphi_{\mathbb{Z}} : V_{\mathbb{Z}} \rightarrow V_{\mathbb{Z}}$, $P \mapsto \sum_{n=1}^\infty \frac{\partial}{\partial X_n} P$. Тогда если R — ненулевое ассоциативное унитарное кольцо, $V := R \otimes_{\mathbb{Z}} V_{\mathbb{Z}}$ и $\varphi := \text{Id}_R \otimes_{\mathbb{Z}} \varphi_{\mathbb{Z}} : V \rightarrow V$, то $V = \bigcup_{k=0}^\infty \varphi^{-k}(0)$, но $\varphi(\bigcap_{k=0}^\infty \varphi^k(V)) \neq \bigcap_{k=0}^\infty \varphi^k(V)$.

Глава 17

Совсем мелкие тексты

17.1. Раздел А

Наблюдение 1 (Предупорядочения и упорядочения). Если рассматривать предупорядоченные множества как категории, то это в точности категории, эквивалентные частично упорядоченным множествам.

Наблюдение 2 (РЕШЁТКА РАЗБИЕНИЙ). Разбиения данного множества образуют полную решётку, так же, как и подмножества.

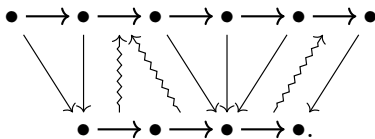
Соглашение 1 (КОЛЬЦОИДЫ). Категории, обогащённые структурой абелевой группы/моноида на Hom -ах, стоит называть *кольцоидами/полукольцоидами*, а не аддитивными/преаддитивными категориями.

Определение 1 (p -АДИЧЕСКАЯ НОРМА). Пусть $p \in \mathbb{Z}$ — простое число. Норма $x \mapsto \|x\|_p : \mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{R}$, такая что $\|p\|_p = p^{-1}$ и $\|l\|_p = 1$ для любого простого $l \in \mathbb{Z}$, отличного от p , называется *p -адической нормой*.

Наблюдение 3 (БАЗИС ЛЕЖИТ В ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ). Пусть $(e_i)_{i \in I}$ — произвольный базис в евклидовом пространстве E . Тогда существует вектор $v \in E$, такой что $\langle v, e_i \rangle = 1 > 0$ для любого $i \in I$, потому что структурная билинейная форма в E невырождена.

Наблюдение 4. Разложение конечномерной полупростой алгебры Ли над алгебраически замкнутым полем характеристики ноль в прямую сумму простых идеалов очень каноническое.

Наблюдение 5. Дуальность Жуюаяля можно иллюстрировать так:



Факт 1. Гаусс обнаружил следующую формулу для $16 \cos(2\pi/17)$:

$$\sqrt{17} - 1 + \sqrt{34 - 2\sqrt{17}} + 2\sqrt{17 + 3\sqrt{17} - \sqrt{34 - 2\sqrt{17}}} - 2\sqrt{34 + 2\sqrt{17}}.$$

Наблюдение 6. Выполняется следующая важная формула для элементарных трансвекций, где $ab = ba = -1$:

$$\begin{pmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ b & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ b & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ b & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & a \\ b & 0 \end{pmatrix}.$$

Наблюдение 7 (ТОЖДЕСТВА НЬЮТОНА – ЖИРАРА). Зная, что логарифмическая производная геометрической прогрессии равна ей самой, получаем:

$$\begin{aligned} -t \frac{d}{dt} \log \prod_{\lambda \in \Lambda} (1 - \lambda t) &= \frac{-t \frac{d}{dt} \prod_{\lambda \in \Lambda} (1 - \lambda t)}{\prod_{\lambda \in \Lambda} (1 - \lambda t)} = \sum_{\lambda \in \Lambda} \sum_{n \geq 1} \lambda^n t^n \implies \\ \implies -k \sigma_k &= \sum_{i=1}^k \gamma_i \sigma_{k-i}, \text{ где } \prod_{\lambda \in \Lambda} (1 - \lambda t) = \sum_{n \geq 0} \sigma_n t^n, \quad \gamma_n := \sum_{\lambda \in \Lambda} \lambda^n. \end{aligned}$$

Наблюдение 8. В обозначениях $N \rtimes H$ и $N \rtimes H$ активная группа тычет вилками в пассивную.

Наблюдение 9. Закон инерции Сильвестра абсолютно тривиален: у положительного и отрицательного подпространства тривиальное пересечение, поэтому сумма их размерностей меньше или равна размерности всего пространства.

Наблюдение 10. Евклидово самосопряжённый оператор расширения скаляров даёт положительно эрмитово самосопряжённый оператор, а у таких операторов все собственные числа вещественные. Для самосопряжённого оператора ортогонал к инвариантному подпространству инвариантен. Эти два утверждения дают ортогональную диагонализацию квадратичных форм на евклидовых пространствах.

Соглашение 2. Для квадратичных форм, возможно, стоит говорить «положительная», «отрицательная», «полуположительная», «полуотрицательная». Вместо «знакоопределённая» говорить «анизотропная».

Наблюдение 11 (ФРОБЕНИУС АБЕЛЕВОЙ ГРУППЫ). Пусть $p \in \mathbb{Z}$ — простое число, а V — абелева группа. Тогда мы имеем гомоморфизм абелевых групп $a \mapsto [a^{\otimes [p]_{\Lambda}}] : V \rightarrow \text{Coker}(\Sigma_{C_p} : (V^{\otimes [p]_{\Lambda}})_{C_p} \rightarrow (V^{\otimes [p]_{\Lambda}})^{C_p})$, где $C_p := \text{Aut}([p]_{\Lambda})$, а Σ_{C_p} — отображение суммирования по действию конечной группы C_p из её коинвариантов в инварианты.

Пример 1. Алгебра $k[X, Y]/(XY)$, где k — ассоциативное коммутативное унитарное кольцо, не является амальгамированной суммой в категории ассоциативных коммутативных унитарных колец своих подалгебр $k[X]$ и $k[Y]$ над их пересечением $k[X] \cap k[Y] = k$.

Замечание 1. Пример 1 был подсказан Дмитрием Калединым по интернету 20 июля 2023 года.

Теорема 1. Пусть $\alpha : S^{-1}R \rightrightarrows T^{-1}E : \beta$ — кольцевые гомоморфизмы между локализациями ассоциативных унитарных колец R и E по множествам S и T . Если $\beta \circ \alpha : S^{-1}R \rightarrow S^{-1}R$ является эндоморфизмом над R , а образ α содержит образ канонического гомоморфизма $E \rightarrow T^{-1}E$, то $\beta \circ \alpha = \text{Id}$ и $\alpha \circ \beta = \text{Id}$.

Доказательство. Так как все эндоморфизмы $S^{-1}R$ над R тождественные, то $\beta \circ \alpha = \text{Id}$. Так как $\beta \circ \alpha = \text{Id}$, то $\alpha \circ \beta$ переводит образ α в себя тождественно, в частности, является эндоморфизмом над E , откуда следует, что $\alpha \circ \beta = \text{Id}$. \square

Замечание 2. Теорема 1 является, по сути, переформулировкой теоремы 4.3 из книги Матсумуры [3, с. 23] в чуть более общем контексте.

Определение 2 (КОНСЕРВАТИВНЫЙ ФУНКТОР). Функтор называется консервативным, если он переводит морфизмы, не являющиеся изоморфизмами, в морфизмы, не являющиеся изоморфизмами.

Обозначение 1 (МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫЙ МОНОИД КОЛЬЦА). Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо. Моноид всех элементов R с операцией умножения обозначается через R^{mult} .

Определение 3 (ХАРАКТЕР ДИРИХЛЕ). Отображение $\chi : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{C}$ называется *характером Дирихле* модуля m , где $m \in \mathbb{N}_1$, если оно разлагается в композицию стандартной редукции $\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$ и консервативного гомоморфизма мультипликативных моноидов $(\mathbb{Z}/m\mathbb{Z})^{\text{mult}} \rightarrow \mathbb{C}^{\text{mult}}$.

Наблюдение 12 (ЛИСТ МЁБИУСА). Определим *раздутье* \mathbb{R}^n в точке $0 \in \mathbb{R}^n$, где $n \in \mathbb{N}_1$, как множество $\mathcal{M}^n := \{(x, l) \in \mathbb{R}^n \times \text{Gr}(1, \mathbb{R}^n) \mid x \in l\}$ с индуцированной топологией, где $\text{Gr}(1, \mathbb{R}^n)$ — это грассманиан прямых в \mathbb{R}^n , проходящих через $0 \in \mathbb{R}^n$. Отображение $\pi : \mathcal{M}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, $(x, l) \mapsto x$ задаёт гомеоморфизм между дополнением *особого слоя* $\pi^{-1}(0)$ в \mathcal{M}^n и $\mathbb{R}^n \setminus \{0\}$. Инверсия относительно единичной сферы на $\mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ однозначно продолжается до гомеоморфизма $\mathcal{M}^n \xrightarrow{\sim} \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$. Проколотое проективное пространство $\mathbb{R}P^n \setminus \{0\}$, в свою очередь, гомеоморфно пространству аффинных гиперплоскостей в \mathbb{R}^n по проективной двойственности. Топологическое пространство \mathcal{M}^2 называется *листом Мёбиуса*.

Определение 4 (ВНЕШНИЕ СТЕПЕНИ СПАРИВАНИЯ). Пусть I — конечное множество, A — коммутативное ассоциативное унитарное кольцо, $v \otimes w \mapsto v \cdot w : V \otimes_A W \rightarrow A$ — спаривание между двумя A -модулями. Спаривание $\Lambda^I(V) \otimes_A \Lambda^I(W) \rightarrow A$, индуцированное спариванием $(\bigotimes_{i \in I} v_i) \otimes (\bigotimes_{i \in I} w_i) \mapsto \det((v_i \cdot w_j)_{i,j \in I}) : V^{\otimes I} \otimes_A W^{\otimes I} \rightarrow A$, называется *I -ой внешней степенью спаривания* $v \otimes w \mapsto v \cdot w : V \otimes_A W \rightarrow A$.

Определение 5 (ДИСКРИМИНАНТ ВИЛИНЕЙНОЙ ФОРМЫ). В условиях определения 4 при дополнительном предположении $V = W \simeq A^I$ спаривание $(\bigwedge_{i \in I} v_i) \otimes (\bigwedge_{i \in I} w_i) \mapsto \det((v_i \cdot w_j)_{i,j \in I}) : \Lambda^I(V) \otimes_A \Lambda^I(V) \rightarrow A$ называется *дискриминантом* спаривания $v \otimes w \mapsto v \cdot w : V \otimes_A V \rightarrow A$.

Наблюдение 13 (ДВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКСПОНЕНТЫ). Доказательства сходимости ряда $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} x^n$ и равенства $\lim_{m \rightarrow \infty} (1 + \frac{x}{m})^m = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} x^n$ довольно простые.

Абсолютная сходимость ряда $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} x^n$ доказывается через банальное сравнение с геометрической прогрессией, так как $|\frac{x^n}{n!}| \leq |\frac{x^{n-1}}{(n-1)!}| |\frac{x}{n}|$, а при ограниченном x число $|\frac{x}{n}|$ стремится к 0 когда n стремится к ∞ .

По биному Ньютона $(1 + \frac{x}{m})^m = \sum_{n=0}^m \frac{m(m-1) \cdots (m-(n-1))}{m^n} \frac{1}{n!} x^n$. Коэффициенты этих рядов по модулю не больше соответствующих коэффициентов абсолютно сходящегося ряда $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} x^n$ и стремятся к ним

когда m стремится к ∞ , откуда и следует, что $\lim_{m \rightarrow \infty} (1 + \frac{x}{m})^m = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} x^n$.

17.2. Раздел Б

Наблюдение 1. Категория малых категорий содержит все малые пределы и копределы.

Наблюдение 2. Пусть R — ассоциативное унитарное кольцо. Тогда гомоморфизм (1) является изоморфизмом.

$$(\varphi_M)_{M \in R\text{-mod}} \mapsto \varphi_R : \text{End}(\text{Id}_{R\text{-mod}}) \rightarrow \text{End}_{R \otimes_{\mathbb{Z}} R^{\circ}\text{-mod}}(R) \cong Z(R) \quad (1)$$

Определение 1 (ГРУППОВОЙ ОБЪЕКТ). *Групповым объектом* в категории \mathcal{C} называется пара (G, μ) из объекта $G \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ и естественного преобразования $(\mu_X : \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, G) \times \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, G) \rightarrow \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, G))_{X \in \text{Ob}(\mathcal{C})}$, которое превращает каждое из множеств $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, G)$ в группу.

Список иллюстраций

1.1	Системы корней A_2 , B_2 , C_2 и D_2 , соответствующие классическим алгебрам Ли $\mathfrak{sl}(3)$, $\mathfrak{o}(5)$, $\mathfrak{sp}(4)$ и $\mathfrak{o}(4)$ соответственно .	22
1.2	Конфигурация Дезарга — пятиугольники	33
1.3	Конфигурация Дезарга — чертежи	34
9.1	Примеры пар сопряжённых инволюций	103
9.2	Пятёрки попарно не коммутирующих инволюций в $\text{Sym}(6)$.	104

Список литературы

- [1] J. J. Sylvester. “On the Relation between the Minor Determinants of Linearly Equivalent Quadratic Functions”. Англ. В: *The Collected Mathematical Papers of James Joseph Sylvester*. Т. I (1837–1853). 37. Cambridge, University press, 1904, с. 241—250. URL: <https://archive.org/details/collectedmathem01sylvrich/page/241/mode/1up> (дата обр. 23.08.2024) (цит. на с. 11). Переизд. “On the Relation between the Minor Determinants of Linearly Equivalent Quadratic Functions”. Англ. В: *Philosophical Magazine*. 4-я сер. I.XXXVII (1851), с. 295—305. URL: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=umn.31951000614090i&view=1up&seq=317> (дата обр. 23.08.2024).
- [2] М. Атья и И. Макдональд. *Введение в коммутативную алгебру*. Пер. Ю. И. Манин. Москва: Мир, 1972. 160 с. (цит. на с. 161).
- [3] Н. Matsumura. *Commutative Ring Theory*. Англ. Пер. М. Reid. First Edition. Cambridge Studies in Advanced Mathematics 8. Cambridge University Press, 30 июня 1989. 336 с. ISBN: 0521367646 (цит. на с. 205).
- [4] В. И. Арнольд. *Гюйгенс и Барроу, Ньютон и Гук. Первые шаги математического анализа и теории катастроф, от эвольвент до квазикристаллов*. Современная математика для студентов. Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 96 с. ISBN: 5-02-013935-1 (цит. на с. 54).
- [5] В. И. Арнольд. *Математические методы классической механики*. 3-е изд. испр. и доп. Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 472 с. ISBN: 5-02-014282-4 (цит. на с. 54).

- [6] Waldemar Hołubowski. “An inverse matrix of an upper triangular matrix can be lower triangular”. Англ. В: *Discussiones Mathematicae. General Algebra and Applications* 22.2 (2002), с. 161—166. DOI: <http://doi.org/10.7151/dmgaa.1055>. URL: <https://www.dmgaa.uz.zgora.pl/publish/article.php?doi=1055> (дата обр. 07.01.2025) (цит. на с. 51).
- [7] Jean-Pierre Serre. “On a theorem of Jordan”. Англ. В: *Bulletin of the American Mathematical Society* 40.4 (2003), с. 429—440. URL: <https://www.ams.org/journals/bull/2003-40-04/S0273-0979-03-00992-3/> (дата обр. 22.03.2024) (цит. на с. 100).
- [8] F. W. Lawvere. “Functorial Semantics of Algebraic Theories...” Англ. В: *Reprints in Theory and Applications of Categories* 5 (2004), с. 1—121. URL: <http://www.tac.mta.ca/tac/reprints/articles/5/tr5abs.html> (дата обр. 16.02.2024) (цит. на с. 13).
- [9] Д. Каледин. *Введение в алгебраическую геометрию*. Конспекты лекций в НОЦ МИАН. 2005—2006. URL: <https://homepage.mir-ras.ru/~kaledin/noc/> (дата обр. 20.11.2024) (цит. на с. 154).
- [10] В. И. Арнольд. *Математическое понимание природы. Очерки удивительных физических явлений и их понимания математиками (с рисунками автора)*. Издание третье, стереотипное. Москва: МЦНМО, 2011. 144 с. ISBN: 978-5-94057-744-7 (цит. на с. 54).
- [11] PseudoNeo (<https://math.stackexchange.com/users/7085/pseudoneo>). *Center of the unit group R^\times of a ring*. Англ. Mathematics Stack Exchange. 27 марта 2013. URL: <https://math.stackexchange.com/q/342817> (дата обр. 24.09.2024) (цит. на с. 110).
- [12] М. Вербицкий. *Теория Галуа*. 2013. URL: <http://verbit.ru/MATH/GALOIS-2013/> (дата обр. 02.03.2024) (цит. на с. 141).
- [13] user26857 (<https://math.stackexchange.com/users/121097/user26857>). *maximal algebraically independent sets in ring extensions*. Англ. Mathematics Stack Exchange. 23 сент. 2014. URL: <https://math.stackexchange.com/q/942910> (дата обр. 17.11.2024) (цит. на с. 150).

- [14] spin (<https://math.stackexchange.com/users/12623/spin>). *Basis on a vector space with a filtration*. Англ. Mathematics Stack Exchange. 12 июля 2018. URL: <https://math.stackexchange.com/q/2848276> (дата обр. 17.09.2025) (цит. на с. 201).
- [15] Pierre-Yves Gaillard (<https://mathoverflow.net/users/461/pierre-yves-gaillard>). *Dimension of infinite product of vector spaces*. Англ. MathOverflow. 1 окт. 2019. URL: <https://mathoverflow.net/q/168624> (дата обр. 17.09.2025) (цит. на с. 128).
- [16] Darij Grinberg. *Integrality over ideal semifiltrations*. Англ. 13 июля 2019. 49 с. arXiv: 1907.06125v1 [math.AC]. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.06125> (дата обр. 06.10.2025) (цит. на с. 160).
- [17] Michael Müger. “Notes on the theorem of Baker-Campbell-Hausdorff-Dynkin”. Англ. Work in progress! 22 апр. 2020. URL: <https://www.math.ru.nl/~mueger/PDF/BCHD.pdf> (дата обр. 19.01.2025) (цит. на с. 133).
- [18] James S. Milne. *A Primer of Commutative Algebra (v4.03)*. Англ. Available at www.jmilne.org/math/. 23 марта 2020. 113 с. URL: <http://www.jmilne.org/math/xnotes/ca.html> (дата обр. 06.10.2025) (цит. на с. 161).
- [19] D. B. Kaledin. “What do Abelian categories form?” Англ. В: *Russian Mathematical Surveys* 77.1 (февр. 2022), с. 1—45. ISSN: 1468-4829. DOI: 10.1070/rm10044. arXiv: 2112.02155v2 [math.CT]. URL: <http://dx.doi.org/10.1070/RM10044> (цит. на с. 200).
- [20] James S. Milne. *Fields and Galois Theory (v5.10)*. Англ. Available at www.jmilne.org/math/. 2022, с. 1—144. URL: <https://jmilne.org/math/CourseNotes/ft.html> (дата обр. 03.03.2024) (цит. на с. 141, 148).
- [21] Alexey Muranov. “Proof of Cayley-Hamilton theorem using polynomials over the algebra of module endomorphisms”. Англ. В: *Linear Algebra and its Applications* 645 (июль 2022), с. 165—169. ISSN: 0024-3795. DOI: 10.1016/j.laa.2022.03.012. arXiv: 2105.09285v2 [math.HO]. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.laa.2022.03.012> (цит. на с. 37).

- [22] С. О. Горчинский. *Теория Галуа, алгебраические группы и дифференциальные уравнения*. 2022. URL: <https://teach-in.ru/course/galois-theory-algebraic-groups-and-differential-equations> (дата обр. 30.04.2025) (цит. на с. 148).
- [23] D. Kaledin. “Taming large categories”. Англ. В: *São Paulo Journal of Mathematical Sciences* 18 (17 сент. 2024), с. 773—800. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40863-024-00459-y>. arXiv: 2409.18380v1 [math.CT] (цит. на с. 186).
- [24] *Matrix (mathematics). History*. Англ. Wikipedia (en). Авг. 2024. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Matrix_\(mathematics\)#History](https://en.wikipedia.org/wiki/Matrix_(mathematics)#History) (дата обр. 23.08.2024) (цит. на с. 11).
- [25] Pavel Etingof. *Lie Groups and Lie Algebras*. Англ. AMR Research Monographs 4. Association for Mathematical Research, 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.09397>. arXiv: 2201.09397v4 [math.RT]. URL: https://amathr.org/books/books_etingof_1/ (дата обр. 30.04.2025) (цит. на с. 133).
- [26] Д. Терешкин. *Алгебраическая теория категорий. Лекция 1*. 2024. URL: <https://www.youtube.com/live/oZ9hKNNP5Sk> (дата обр. 16.05.2025) (цит. на с. 182).