

Алгебра. Глава 6. Теория групп

Д. В. Карпов

2024-2025

Определение

Пусть G — множество, и определена $\cdot : G \times G \rightarrow G$, удовлетворяющая следующим условиям.

- 1) **Ассоциативность** $\forall a, b, c \in G \quad (ab)c = a(bc)$.
- 2) **Нейтральный элемент**. $\exists e \in G$ такой, что $\forall a \in G \quad ae = ea = a$.
- 3) **Обратный элемент**. $\forall a \in G \exists a^{-1} \in G$ такой, что $a \cdot a^{-1} = a^{-1} \cdot a = e$.
- 4) **Коммутативность** $\forall a, b \in G \quad ab = ba$.

- Если выполнены условия 1 и 2, то G — **полугруппа**.
- Если выполнены условия 1, 2 и 3, то G — **группа**.
- Если выполнены условия 1, 2, 3 и 4, то G — **абелева группа** (или, что то же самое, **коммутативная группа**).
- Операцию в группе можно обозначать как угодно, как правило, используется символ $\cdot$, но это не обязательно.

Определение

Если G и H — группы с одинаковой операцией $\cdot$ и $H \subset G$, то H — **подгруппа** G . Обозначение: $H < G$.

Свойство 1

Нейтральный элемент единственен

Доказательство. Пусть их два: e_1 и e_2 . Тогда

$$e_1 = e_1 e_2 = e_2.$$



Свойство 2

Для любого $a \in G$, обратный элемент a^{-1} единственен.

Доказательство. Пусть a_1 и a_2 — два обратных элемента к $a \in G$. Тогда $a_1 a = a a_2 = e$, откуда

$$a_1 = a_1 (a a_2) = (a_1 a) a_2 = a_2.$$



Свойство 3

Для любого $a \in G$, $(a^{-1})^{-1} = a$.

Доказательство. Так как $a a^{-1} = a^{-1} a = e$, значит, a является обратным к a^{-1} . По Свойству 2, обратный элемент единственен.



Свойство 4

Для любых $a, b \in G$ выполнено $(ab)^{-1} = b^{-1} a^{-1}$.

Доказательство. $b^{-1} a^{-1} a b = a b b^{-1} a^{-1} = e$.



Лемма 1

Пусть G — группа, $H \subset G$, причем H замкнуто по умножению и взятию обратного элемента (то есть, $\forall a, b \in H$ выполнено $ab \in H$ и $a^{-1} \in H$). Тогда $H < G$.

Доказательство. • При выполнении этих условий, $\cdot : H \times H \rightarrow H$ — ассоциативная операция и для любого элемента существует обратный.

- Пусть $a \in H$. Тогда $a^{-1} \in H \Rightarrow e = aa^{-1} \in H$.
- Значит, H — группа с операцией $\cdot$, то есть, $H < G$. □

Лемма 2

Пусть $\{H_i\}_{i \in I}$ — множество подгрупп группы G . Тогда $H = \bigcap_{i \in I} H_i$ — тоже подгруппа группы G .

Доказательство. • Достаточно проверить замкнутость по умножению и взятию обратного элемента.

- Пусть $a, b \in H$. Тогда для всех $i \in I$ мы имеем $a, b \in H_i$.
- Следовательно, для всех $i \in I$ мы имеем $ab \in H_i$, откуда следует, что $ab \in H$.
- Кроме того, для всех $i \in I$ мы имеем $a^{-1} \in H_i$, откуда следует, что $a^{-1} \in H$.

Определение

Пусть G — группа, $M \subset G$. Тогда

$$\langle M \rangle := \{t_1 \dots t_n : \forall i \in \{1, \dots, n\} \ t_i \in M \text{ или } t_i^{-1} \in M.\}$$

(n не фиксировано, может быть любым натуральным числом)

— *подгруппа, порожденная M* .

Лемма 3

Пусть G — группа, $M \subset G$. Тогда $\langle M \rangle < G$.

Доказательство. • Поскольку группа G замкнута по умножению и взятию обратных элементов, $\langle M \rangle \subset G$. (Из $t_i^{-1} \in M \subset G$ следует $t_i = (t_i^{-1})^{-1} \in G$. Из $t_1, \dots, t_n \in G$ следует $t = t_1 \dots t_n \in G$.)

• Пусть $t, s \in \langle M \rangle$. Тогда $t = t_1 \dots t_n$ (где $t_i \in M$ или $t_i^{-1} \in M$ для всех i) и $s = s_1 \dots s_m$ (где $s_i \in M$ или $s_i^{-1} \in M$ для всех i).

• Тогда $ts = t_1 \dots t_n s_1 \dots s_m \in \langle M \rangle$.

• $t^{-1} = t_n^{-1} \dots t_1^{-1} \in \langle M \rangle$, так как для любого i либо $t_i^{-1} \in M$, либо $(t_i^{-1})^{-1} = t_i \in M$.

• По Лемме 1, $\langle M \rangle < G$.

Определение

Пусть G — группа.

- 1) Если $M \subset G$ таково, что $\langle M \rangle = G$, то M — **система образующих** группы G .
- 2) Если $a \in G$ таково, что $\{a\}$ — система образующих G (то есть, $\langle a \rangle = G$), то G — **циклическая группа**.

Определение

- 1) Пусть G — группа, $a \in G$. **Порядок элемента** a (обозначение: $\text{ord}(a)$) — это наименьшее такое $k \in \mathbb{N}$, что $a^k = e$. Если такого k нет, то $\text{ord}(a) = \infty$.
- 2) **Порядок группы** G — это количество ее элементов (то есть, $|G|$).

- Если $\text{ord}(a) = 1$, то очевидно, что $a = e$.
- Положим $a^0 = e$. Пусть $k \in \mathbb{N}$, $a \in G$. Тогда положим $a^{-k} := (a^{-1})^k$.

Свойство 1

Для любых $k, n \in \mathbb{Z}$ выполнено $a^{k+n} = a^k a^n$.

Доказательство. • При $k, n \in \mathbb{N}$ утверждение очевидно.
как и при $0 \in \{k, n\}$.

- Если $k, n < 0$, то $a^{k+n} = (a^{-1})^{|k|+|n|} = (a^{-1})^{|k|} (a^{-1})^{|n|} = a^k a^n$.
- Пусть $k < 0$, $n > 0$. Тогда $a^k a^n = \underbrace{a^{-1} \dots a^{-1}}_{|k|} \cdot \underbrace{a \dots a}_n$.
- При $|k| > n$ после сокращения получится $(a^{-1})^{|k|-n} = a^{k+n}$. При $|k| \leq n$ после сокращения получится $a^{n-|k|} = a^{k+n}$.
- Случай $k > 0$, $n < 0$ аналогичен. □

Свойство 2

Для любых $k, n \in \mathbb{Z}$ выполнено $(a^k)^n = a^{kn}$.

Доказательство. • При $k = 0$ или $n = 0$ утверждение понятно. При $n \in \mathbb{N}$ утверждение немедленно следует из определения степени.

- При $k > 0$ $(a^k)^{-1} = (\underbrace{a \dots a}_k)^{-1} = \underbrace{a^{-1} \dots a^{-1}}_k = (a^{-1})^k$.

- Следовательно, при $k > 0$ и $n < 0$ имеем $(a^k)^n = (a^k)^{-|n|} = ((a^k)^{-1})^{|n|} = (a^{-1})^{k|n|} = a^{kn}$.

- Так как $a^{-k} = (a^{-1})^k$ по определению степени, при $k < 0$ аналогично.



Лемма 4

Пусть $G = \langle a \rangle$ — циклическая группа.

1) Если $\text{ord}(a) = k \in \mathbb{N}$, то $G = \{a^0 = e, a, \dots, a^{k-1}\}$ и все эти элементы различны.

2) Если $\text{ord}(a) = \infty$, то $G = \{a^s : s \in \mathbb{Z}\}$ и все эти элементы различны.

Доказательство. • В любом случае, по определению $G = \{a^s : s \in \mathbb{Z}\}$.

1) • Докажем, что $\forall n \in \mathbb{N}$ мы имеем $a^n \in \{e = a^0, a, a^2, \dots, a^{k-1}\}$.

• Поделим n на k с остатком: $n = qk + r$, где $0 \leq r \leq k - 1$. Тогда $a^n = (a^k)^q \cdot a^r = a^r$, что нам и нужно.

• Пусть $i, j \in \{0, \dots, k - 1\}$. Если $a^i = a^j$ и, скажем, $i > j$, то $e = a^i (a^j)^{-1} = a^{i-j}$. Но $i - j < k$, противоречие.

2) Если $i, j \in \mathbb{Z}$, $i > j$ и $a^i = a^j$, то аналогично $a^{i-j} = e$, а значит, $\text{ord}(a) \neq \infty$, противоречие. □

Следствие 1

Для любого $a \in G$ выполнено $\text{ord}(a) = |\langle a \rangle|$.

• Утверждение напрямую следует из Леммы 4.

Лемма 5

Любая подгруппа циклической группы — циклическая.

Доказательство. • Пусть $G = \langle a \rangle$, $H < G$. Если $H = \{e\}$, утверждение очевидно. Далее $H \neq \{e\}$.

- Если $a^m \in H$, то и $a^{-m} = (a^m)^{-1} \in H$. Значит, множество $I = \{m \in \mathbb{N} : a^m \in H\}$ непусто.
- Рассмотрим минимальное такое $d \in I$ и докажем, что $H = \langle a^d \rangle$.
- Предположим противное, пусть $a^n \in H$ и $n \not\equiv d$.
- Поделим n на d с остатком: $n = dq + r$, $0 < r < d$. Тогда $a^n = a^{dq+r} = a^{dq} \cdot a^r \in H$.
- Из $a^d \in H$ следует, что $a^{-dq} \in H$, а значит, и $a^r = a^n \cdot a^{-dq} \in H$. Но $0 < r < d$ противоречит выбору d . $\square$

Определение

Циклическая группа из n элементов обозначается C_n .

Определение

Пусть G — группа, $H < G$, $a \in G$.

Левый смежный класс — это $aH := \{ah : h \in H\}$.

Правый смежный класс — это $Ha := \{ha : h \in H\}$.

Свойство 1

$$|H| = |aH| = |Ha|.$$

Доказательство. Существует биекция $\varphi : H \rightarrow aH$, заданная формулой $\varphi(h) := ah$. Значит, $|H| = |aH|$. Аналогично, $|H| = |Ha|$. □

Свойство 2

$$b \in aH \Rightarrow a^{-1}b \in H.$$

Доказательство. $b \in aH \Rightarrow b = ah$, где $h \in H$. Тогда $a^{-1}b = h \in H$. □

Свойство 3

$$aH = bH \iff a^{-1}b \in H.$$

Доказательство. $\Leftarrow$. • Из $a^{-1}b \in H$ следует, что $\forall h \in H \ a^{-1}b \cdot h \in H \Rightarrow bh = a(a^{-1}bh) \in aH$. Таким образом, $bH \subset aH$.

• Так как $a^{-1}b \in H \Rightarrow b^{-1}a = (a^{-1}b)^{-1} \in H$, аналогично получаем $aH \subset bH$.

$\Rightarrow$. $aH = bH \Rightarrow b \in aH \Rightarrow a^{-1}b \in H$ по Свойству 2. $\square$

Свойство 4

Если $aH \cap bH \neq \emptyset$, то $aH = bH$.

Доказательство. • Пусть $z \in aH \cap bH$. Тогда $z = ah_1 = bh_2$, где $h_1, h_2 \in H$.

• Следовательно,
 $b = ah_1(h_2)^{-1} \Rightarrow a^{-1}b = a^{-1}ah_1(h_2)^{-1} = h_1(h_2)^{-1} \in H$.

• По Свойствам 2 и 3 имеем $aH = bH$. $\square$

Теорема Лагранжа

Определение

Пусть G — группа, $H < G$. Тогда **индекс** G по H (обозначение: $(G : H)$) — это количество различных смежных классов aH .

- Если множество смежных классов бесконечно, то $(G : H) = \infty$.

Теорема 1

Пусть G — группа, $H < G$. Тогда:

- 1) $|G| = |H| \cdot (G : H)$;
- 2) если G конечна и $a \in G$, то $|G| \vdots \text{ord}(a)$.

Доказательство. 1) • Очевидно, $x \in G \Rightarrow x \in xH$.

- По свойству 4 группа G является объединением различных непересекающихся смежных классов по подгруппе H

- Если $|H| = \infty$ или $(G : H) = \infty$, то очевидно, и $|G| = \infty$.

- Пусть $|H| \in \mathbb{N}$, $k := (G : H) \in \mathbb{N}$ и $G = \bigcup_{i=1}^k a_i H$, где $a_i \in G$, причем $a_i H \cap a_j H = \emptyset$ при $i \neq j$.
- По Свойству 1 мы имеем $|a_i H| = |H|$ для всех $i \in \{1, \dots, k\}$, следовательно, $|G| = k|H| = (G : H)|H|$.
- 2) • Если $a \in G$, то G имеет циклическую подгруппу $\langle a \rangle$.
- По пункту 1, $|G| : |\langle a \rangle| = \text{ord}(a)$ (последнее равенство — по Следствию 1). □

Симметрическая группа

Определение

Пусть $n \in \mathbb{N}$, $I_n = \{1, \dots, n\}$.

1) **Подстановка** — это биекция $\sigma : I_n \rightarrow I_n$. Как правило, мы будем записывать σ как строчку из n чисел: $\sigma(1), \sigma(2), \dots, \sigma(n)$ (на k позиции записывается то число, в которое σ переводит k).

2) **Симметрическая группа** S_n состоит из всех подстановок (в I_n), групповая операция — композиция.

- Как нам известно, композиция ассоциативна.
- Единичным элементом в S_n будет **тождественная подстановка** id (такая, что $\text{id}(i) = i$ для всех $i \in I_n$).
- Так как $\sigma \in S_n$ — биекция, существует обратная биекция $\sigma^{-1} : I_n \rightarrow I_n$.
- Таким образом, S_n — группа.
- Из курса ДМ нам известно, что $|S_n| = n!$.
- Если $k, n \in \mathbb{N}$, $k < n$, мы будем считать, что $S_k < S_n$ (каждую подстановку из S_k отождествим с подстановкой из S_n , так же переставляющей $1, \dots, k$ и оставляющей на месте $k+1, \dots, n$).

Разложение подстановки на независимые циклы

- Пусть $\sigma \in S_n$. По теореме Лагранжа, $n! = |S_n| \div \text{ord}(\sigma)$.
- Значит, существует такое $k \in \mathbb{N}$, что $\sigma^k = \text{id} \iff \forall i \in I_n \sigma^k(i) = i$.
- Тогда для каждого $i \in I_n$ существует такое минимальное $k_i \in \mathbb{N}$, что $\sigma^{k_i}(i) = i$.
- Таким образом, σ разбивается на независимые циклы вида $i, \sigma(i), \dots, \sigma^{k_i-1}(i)$. (каждый элемент под воздействием σ переходит в следующий, последний переходит в первый).
- В записи каждого цикла главное — циклический порядок, начало не имеет значения.
- **Пример.** $n = 9$, $\sigma = 643297185$ — стандартная запись.
- Разложение на независимые циклы:
 $\sigma = (167)(24)(3)(59)(8)$.
- Часто циклы длины 1 в этой записи опускают. Можно записать просто $\sigma = (167)(24)(59)$.

- Разложение подстановки на независимые циклы позволяет легко возводить ее в степень.
- Так, подстановка σ^ℓ прокручивает каждый цикл σ ровно ℓ раз (нужно передвинуться на ℓ ходов по циклу). При этом, цикл может распадаться на несколько меньших.
- Подстановка σ^{-1} прокручивает каждый цикл σ в обратном порядке.
- **Пример.** Пусть $\sigma = (1678)(243)(59)$. Тогда $\sigma^2 = (17)(68)(234)(5)(9)$, $\sigma^3 = (1876)(2)(3)(4)(59)$, а $\sigma^{-1} = (1876)(234)(59)$.

Лемма 6

Пусть $\sigma \in S_n$ раскладывается на независимые циклы длин $m_1, \dots, m_k$. Тогда $\text{ord}(\sigma) = [m_1, \dots, m_k]$.

Доказательство. • $\sigma^\ell = \text{id}$, если и только если каждый элемент I_n остается на своем месте.

- Это означает, что каждый цикл длины m_i должен прокрутиться кратное m_i число раз, то есть, $\forall j \in \{1, \dots, k\} \ell \vdots m_j$.

• $\text{ord}(\sigma)$ по определению — наименьшее такое число ℓ , а это, очевидно, $[m_1, \dots, m_k]$.

Определение

1) Подстановка $\sigma \in S_n$ называется **циклом длины k** , если в ее разложении на независимые циклы есть один цикл длины k , а все не входящие в него элементы остаются на месте.

2) **Транспозиция** — это цикл длины 2.

- Транспозиция меняет местами два элемента I_n , а все остальные оставляет на месте.

Теорема 2

При $n \geq 2$, транспозиции — система образующих S_n .

Доказательство. • Индукцией по $2 \leq k \leq n$ докажем, что транспозиции порождают подгруппу $S'_k < S_n$ (все подстановки, оставляющие на местах числа $k+1, \dots, n$). База $k=2$ очевидна.

Переход $k \rightarrow k+1$. • Пусть доказано, что каждая подстановка из S'_k — произведение нескольких транспозиций.

- Рассмотрим $\sigma \in S'_{k+1}$. Если $\sigma(k+1) = k+1$, то $\sigma \in S'_k$ и утверждение для σ доказано.

- Пусть $\sigma(i) = k + 1$, где $1 \leq i \leq k$.
- Рассмотрим транспозицию $\tau = (k + 1, i)$ и $\sigma' = \sigma\tau$.
- Тогда $\sigma'(k + 1) = \sigma(\tau(k + 1)) = \sigma(i) = k + 1$.
- Так как и τ , и σ оставляют на местах $\{k + 2, \dots, n\}$, σ' тоже эти числа оставляет на местах.
- Значит, $\sigma' \in S'_k$ и по индукционному предположению $\sigma' = \tau_1 \dots \tau_\ell$, где $\tau_1, \dots, \tau_\ell$ — транспозиции.
- Тогда $\sigma = \sigma\tau^2 = \sigma'\tau = \tau_1 \dots \tau_\ell\tau$. □

Лемма 7

Пусть $\sigma_m \in S_n$ — цикл длины $m \geq 2$: $\sigma_m = (a_1 a_2 \dots a_m)$. Тогда $\sigma_m = (a_1 a_2)(a_2 a_3) \dots (a_{m-1} a_m)$.

Доказательство. • Индукция по m . База $m = 2$ очевидна.

Переход $k \rightarrow k + 1$. • По индукционному предположению,

$$(a_1 a_2)(a_2 a_3) \dots (a_{k-1} a_k)(a_k a_{k+1}) = (a_1 a_2 \dots a_k)(a_k a_{k+1}).$$

• Цикл $\sigma_k = (a_1 a_2 \dots a_k)$ действует так: $\sigma_k(a_i) = a_{i+1}$ при $1 \leq i \leq k - 1$, $\sigma_k(a_k) = a_1$.

• При домножении на транспозицию $(a_k a_{k+1})$ мы меняем местами эти два числа, значит, если $\sigma' = \sigma_k \cdot (a_k a_{k+1})$, то $\sigma'(a_i) = a_{i+1}$ при $1 \leq i \leq k$ и $\sigma'(a_{k+1}) = a_1$.

• Значит, $\sigma' = \sigma_{k+1}$.

Определение

Пусть $\sigma \in S_n$.

- **Инверсия** — это такая пара чисел (i, j) , что $1 \leq i < j \leq n$ и $\sigma(i) > \sigma(j)$.
- Через $I(\sigma)$ обозначается количество инверсий в подстановке σ .
- Подстановка σ называется **чётной**, если $I(\sigma) \vdots 2$ и **нечётной**, если $I(\sigma) \nmid 2$

Лемма 8

Пусть $\sigma, \tau \in S_n$, причем τ — транспозиция, а $\sigma' = \sigma\tau$. Тогда $I(\sigma) \not\equiv I(\sigma') \pmod{2}$.

Доказательство. • Пусть τ меняет местами $\sigma(i)$ и $\sigma(j)$, где $i < j$.

- Подсчитаем четность числа пар индексов, образующих инверсию ровно в одной из подстановок σ и σ' . Очевидно, в такой паре должно быть хотя бы одно из чисел i и j .
- Пусть $\ell \notin \{i, j\}$.
- Если $\ell < i$, то пара (ℓ, i) — инверсия в $\sigma \iff (\ell, j)$ — инверсия в σ' .
- Если $\ell > j$, то пара (ℓ, j) — инверсия в $\sigma \iff (\ell, i)$ — инверсия в σ' .
- Пусть $i < \ell < j$. Тогда в каждой из пар (ℓ, i) и (ℓ, j) есть инверсия ровно в одной из подстановок σ и σ' .
- Количества посчитанных выше инверсий в σ и σ' имеет одинаковую четность. Осталась только пара (i, j) , которая образует инверсию ровно в одной из подстановок σ и σ' и делает общее число инверсий в них разной четности.



Свойство 1

Пусть $\sigma = \tau_1 \dots \tau_k$ — разложение $\sigma \in S_n$ в произведение транспозиций. Тогда $I(\sigma) \equiv k \pmod{2}$.

Доказательство. • Отметим, что id — четная подстановка.

• Так как σ получена домножением id на транспозицию k раз, четность подстановки меняется в точности k раз по Лемме 8. □

Свойство 2

Произведение подстановок одной четности четно, а произведение подстановок разных четностей нечетно.

Доказательство. • Пусть $\sigma, \sigma' \in S_n$, причем σ представляется как произведение k транспозиций, а σ' — как произведение m транспозиций.

• Тогда $I(\sigma) \equiv k \pmod{2}$, $I(\sigma') \equiv m \pmod{2}$ и $I(\sigma\sigma') \equiv k + m \pmod{2}$, откуда следует доказываемое утверждение. □

Свойство 3

Цикл длины k — четная подстановка, если и только если k нечетно.

Доказательство. По Лемме 7, цикл длины k представляется в виде произведения $k - 1$ транспозиций. Далее применяем Свойство 1. □

Свойство 4

Пусть в разложении на независимые циклы подстановки $\sigma \in S_n$ — k циклов, имеющих длины $m_1, \dots, m_k$ (не обязательно различные). Тогда σ — четная, если и только если среди чисел $m_1, \dots, m_k$ — четное количество четных.

Доказательство. Следует из Свойств 2 и 3 □

Свойство 5

$I(\sigma) \equiv I(\sigma^{-1}) \pmod{2}$ для любой $\sigma \in S_n$.

Доказательство. • Рассмотрим разложение на транспозиции $\sigma = \tau_1 \tau_2 \dots \tau_k$.

• Так как $\tau_i^{-1} = \tau_i$, мы имеем $\sigma^{-1} = \tau_k \dots \tau_2 \tau_1$.

• По Свойству 1, $I(\sigma) \equiv k \equiv I(\sigma^{-1}) \pmod{2}$. □

- A_n — множество всех четных подстановок.

Теорема 3

При $n \geq 2$ выполняется:

- 1) $A_n < S_n$;
- 2) $|A_n| = \frac{n!}{2}$.

Доказательство. 1) • По Свойству 5, если $\sigma \in A_n$, то и $\sigma^{-1} \in A_n$.

- Пусть $\sigma, \sigma' \in A_n$. По Свойству 2, $\sigma\sigma' \in A_n$.
- По Лемме 1, $A_n < S_n$.

2) • Докажем, что четных и нечетных подстановок в S_n поровну.

- Определим отображение $f : S_n \rightarrow S_n$ формулой $f(\sigma) := \sigma \cdot (12)$.
- Отметим, что $f(f(\sigma)) = \sigma \cdot (12)^2 = \sigma$.
- По Лемме 8, подстановки σ и $f(\sigma)$ всегда разной четности.
- Пусть $A_n = \{\sigma_1, \dots, \sigma_k\}$ и $f(\sigma) = \sigma'$. Тогда все подстановки $\sigma'_1, \dots, \sigma'_k$ — различны и нечетны.
- Если $\sigma' \in S_n$ — нечетная подстановка, то $f(\sigma')$ — четная и $f(f(\sigma')) = \sigma'$.
- Следовательно, $S_n \setminus A_n = \{\sigma'_1, \dots, \sigma'_k\}$.
- Таким образом, $|A_n| = |S_n \setminus A_n|$, откуда следует, что $|A_n| = \frac{n!}{2}$. □

Определение

• Пусть G, H — группы. Отображение $f : G \rightarrow H$ называется **гомоморфизмом**, если $\forall a, b \in G \quad f(ab) = f(a)f(b)$.

Ядро гомоморфизма f — это $\text{Ker}(f) = \{x \in G : f(x) = e_H\}$.

Образ гомоморфизма f — это $\text{Im}(f) = \{y \in H : \exists x \in G : f(x) = y\}$.

Свойство 1

Если $f : G \rightarrow H$ гомоморфизм, то $f(e_G) = e_H$.

Доказательство. $f(e_G) = f(e_G \cdot e_G) = f(e_G) \cdot f(e_G)$. Умножая левую и правую части $(f(e_G))^{-1}$, получаем $f(e_G) = e_H$. $\square$

Свойство 2

Если $f : G \rightarrow H$ гомоморфизм, то $f(a^{-1}) = (f(a))^{-1}$.

Доказательство. • $e_H = f(e_G) = f(a \cdot a^{-1}) = f(a) \cdot f(a^{-1})$.
• Аналогично, $f(a^{-1}) \cdot f(a) = e_H$. Значит, $f(a^{-1}) = (f(a))^{-1}$. $\square$

Лемма 9

Пусть G, H — группы, $f : G \rightarrow H$ — гомоморфизм групп.

Тогда:

- 1) $\text{Ker}(f) < G$.
- 2) $\text{Im}(f) < H$.

Доказательство. Достаточно проверить условия из Леммы 1.

1) • Пусть $a, b \in \text{Ker}(f)$. Тогда

$f(ab) = f(a)f(b) = e_H \cdot e_H = e_H$, следовательно, $ab \in \text{Ker}(f)$.

• $f(a^{-1}) = (f(a))^{-1} = e_H^{-1} = e_H$, следовательно, $a^{-1} \in \text{Ker}(f)$.

2) • Пусть $y, y' \in \text{Im}(f)$, а $x, x' \in G$ таковы, что $f(x) = y$ и $f(x') = y'$.

• Тогда $yy' = f(x)f(x') = f(xx') \in \text{Im}(f)$.

• $y^{-1} = (f(x))^{-1} = f(x^{-1}) \in \text{Im}(f)$. □

Следствие 2

Если $f : G \rightarrow H$ гомоморфизм, а $N < G$, то

$f(N) = \{f(x) : x \in N\} < H$.

Доказательство. • Очевидно, f индуцирует гомоморфизм $f|_N : N \rightarrow H$.

• По Лемме 9 мы имеем $f(N) = \text{Im}(f|_N) < H$. □

Типы гомоморфизмов

- G, H — группы, $f : G \rightarrow H$ — гомоморфизм групп.
- Если f — инъекция, то f — **мономорфизм**.
- Если f — сюръекция (то есть, $\text{Im}(f) = H$), то f — **эпиморфизм**.
- Если f — биекция, то f — **изоморфизм**.
- Изоморфизм = мономорфизм + эпиморфизм.

Лемма 10

Пусть $f : G \rightarrow H$ — гомоморфизм групп. Тогда f — мономорфизм, если и только если $\text{Ker}(f) = \{e_G\}$.

Доказательство. $\Rightarrow$ • Если f — мономорфизм, то f — инъекция.

• Пусть $a \in \text{Ker}(f)$. Из $f(a) = e_H = f(e_G)$ следует, что $a = e_G$ (так как f — инъекция).

$\Leftarrow$ • Пусть $f(a) = f(b)$. Тогда $f(a \cdot b^{-1}) = f(a) \cdot f(b^{-1}) = f(a) \cdot (f(b))^{-1} = f(b) \cdot (f(b))^{-1} = e_H$.

• Значит, $a \cdot b^{-1} \in \text{Ker}(f) = \{e_G\}$, откуда $a \cdot b^{-1} = e_G$ и $a = b$.
Таким образом, f — инъекция, а значит, мономорфизм. $\square$

Лемма 11

Пусть $f : G \rightarrow H$ — изоморфизм групп. Тогда и $f^{-1} : H \rightarrow G$ — изоморфизм групп.

Доказательство. • Достаточно доказать, что f^{-1} — гомоморфизм (так как отображение, обратное к биекции — биекция).

• Рассмотрим любые $a, b \in H$.

• Так как f — гомоморфизм,

$$f(f^{-1}(ab)) = ab = f(f^{-1}(a)) \cdot f(f^{-1}(b)) = f(f^{-1}(a) \cdot f^{-1}(b)).$$

• Из того, что f — биекция, следует, что $f^{-1}(ab) = f^{-1}(a) \cdot f^{-1}(b)$. А это и значит, что f^{-1} — гомоморфизм групп. □

Определение

Если существует изоморфизм групп $f : G \rightarrow H$, то говорят, что эти группы **изоморфны**. Обозначение: $G \simeq H$.

Теорема 4

$\simeq$ — отношение эквивалентности на множестве всех групп.

Доказательство. • Рефлексивность очевидна: тождественное отображение $\text{id} : G \rightarrow G$ (заданное формулой $\text{id}(x) = x$ для всех $x \in G$), очевидно, является изоморфизмом.

- Симметричность доказана в Лемме 11.
- Докажем транзитивность. Пусть F, G, H — группы, $F \simeq G$ и $G \simeq H$.
- Тогда существуют изоморфизмы $\varphi : F \rightarrow G$ и $\psi : G \rightarrow H$. Докажем, что их композиция $\psi\varphi : F \rightarrow H$ (заданная правилом $(\psi\varphi)(a) := \psi(\varphi(a))$) также является изоморфизмом.
- Композиция биекций ψ и φ , очевидно, является биекцией.
- Проверим, что $\psi\varphi$ — гомоморфизм групп:

$$\psi\varphi(ab) = \psi(\varphi(ab)) = \psi(\varphi(a) \cdot \varphi(b)) = \psi(\varphi(a)) \cdot \psi(\varphi(b)) = (\psi\varphi)(a) \cdot (\psi\varphi)(b).$$



Определение

Пусть G группа.

- **Аutomорфизм** группы G — это изоморфизм $\varphi : G \rightarrow G$.
- Множество всех автоморфизмов группы G обозначим через $\text{Aut}(G)$.

Лемма 12

$\text{Aut}(G)$ — группа относительно композиции.

Доказательство. • Ассоциативность композиции нам известна.

- Очевидно, тождественное отображение id подходит в качестве нейтрального элемента.
- Для каждого $\varphi \in \text{Aut}(G)$ по Лемме 11 мы имеем $\varphi^{-1} \in \text{Aut}(G)$. □

Определение

Пусть G группа, $a \in G$.

- **Сопряжение** элементом a — это отображение $I_a : G \rightarrow G$, заданное формулой $I_a(x) := a^{-1}xa$.
- Обозначим через $\text{Inn}(G)$ множество всех сопряжений группы G .
- Очевидно, $I_e = \text{id}$.
- Если группа G абелева, то $\forall a \in G \quad I_a = \text{id}$.

Лемма 13

Для любой группы G $\text{Inn}(G) < \text{Aut}(G)$.

Доказательство. • Сначала докажем, что $\text{Inn}(G) \subset \text{Aut}(G)$. Пусть $a \in G$.

- Очевидно, $a^{-1}xa = a^{-1}ya \iff x = y$, поэтому, I_a — биекция.
- Так как $I_a(x)I_a(y) = a^{-1}xaa^{-1}ya = I_a(xy)$, I_a — гомоморфизм, а значит, $I_a \in \text{Aut}(G)$.
- По Лемме 1, достаточно проверить замкнутость $\text{Inn}(G)$ по умножению и взятию обратного элемента.
- Пусть $a, b \in G$. Тогда $(I_a \cdot I_b)(x) = a^{-1}(b^{-1}xb)a = (ba)^{-1}x(ba) = I_{ba}(x)$. Таким образом, $I_a \cdot I_b = I_{ba}$.
- Теперь для $a \in G$ несложно проверить, что $I_a \cdot I_{a^{-1}} = I_{a^{-1}a} = I_e = \text{id}$ и, аналогично, $I_{a^{-1}} \cdot I_a = \text{id}$. □

Определение

Пусть G — группа, $H < G$. Тогда H — **нормальная подгруппа** G , если $I_a(H) = \{I_a(h) : h \in H\} = H$ для любого $a \in G$. Обозначение: $H \triangleleft G$.

Лемма 14

Пусть G — группа, $H < G$. Тогда $H \triangleleft G$, если и только если $aH = Ha$ для любого $a \in G$.

Доказательство. • Пусть $a \in G$. Тогда

$$I_a(H) = H \iff \{a^{-1}ha : h \in H\} = \{h : h \in H\} \iff \\ \{ha : h \in H\} = \{ah : h \in H\} \iff Ha = aH$$

(второе равенство множеств получается из первого умножением на a слева, а это — биекция).

• Поэтому,

$$H \triangleleft G \iff \forall a \in G \ I_a(H) = H \iff \forall a \in G \ aH = Ha. \quad \square$$

Лемма 15

Пусть G — группа, $H < G$. Тогда $H \triangleleft G$, если и только если для любых $a \in G$ и $h \in H$ выполнено $I_a(h) \in H$ (или, что то же самое, $I_a(H) \subset H$).

Доказательство. • По определению,
 $H \triangleleft G \iff \forall a \in G \ I_a(H) = H$.

• Поэтому, $\Rightarrow$ очевидна.

$\Leftarrow$. • Для любого $a \in G$ мы знаем, что $I_a(H) \subset H$.

• Так как $a^{-1} \in G$, мы знаем и $I_{a^{-1}}(H) \subset H$. Подействуем на это включение обратной биекцией I_a :

$$H = (I_a \cdot I_{a^{-1}})(H) = I_a(I_{a^{-1}}(H)) \subset I_a(H).$$

• Таким образом, для любого $a \in G$ мы знаем, что $I_a(H) \subset H$ и $H \subset I_a(H)$, то есть, $I_a(H) = H$. □

Лемма 16

Пусть G — группа, а $\{H_i\}_{i \in I}$ — нормальные подгруппы G .
Тогда $H = \bigcap_{i \in I} H_i \triangleleft G$.

Доказательство. • Проверим условие из Леммы 15.

- Пусть $a \in G$, $h \in H$. Тогда для любого $i \in I$ мы имеем $h \in H_i$. Так как $H_i \triangleleft G$, мы имеем $I_a(h) \in H_i$.
- Таким образом, $\forall a \in G, \forall h \in H I_a(h) \in H$, откуда $H \triangleleft G$. □

Лемма 17

Пусть G, H — группы, а $f : G \rightarrow H$ — гомоморфизм.
Тогда $\ker(f) \triangleleft G$.

Доказательство. • Проверим условие из Леммы 15.

- Пусть $x \in G$, $a \in \ker(f)$. Тогда
$$f(x^{-1}ax) = f(x^{-1})f(a)f(x) = f(x^{-1}) \cdot e_H \cdot f(x) = f(x^{-1})f(x) = f(x^{-1}x) = f(e_G) = e_H,$$
следовательно, $x^{-1}ax \in \ker(f)$. □

Факторгруппа

- Пусть G — группа, $H \triangleleft G$. Будем использовать обозначение $\bar{a} := aH$.

- **Факторгруппа** $G/H = \{\bar{a} : a \in G\}$. Умножение определим так:

$$\bar{a} \cdot \bar{b} := \overline{ab}.$$

- Напомним, что для множеств $A, B \subset G$ мы используем обозначение $A \cdot B := \{ab : a \in A, b \in B\}$.

- Если G — группа, а $H < G$, то нетрудно понять, что $H \cdot H = H$ (так как умножение не выводит за пределы H и $H \cdot H \supset eH = H$).

Лемма 18

Пусть G — группа, $H \triangleleft G$. Тогда умножение в G/H определено корректно.

Доказательство. • Так как $H \triangleleft G$, для любого $b \in G$ мы имеем $bH = Hb$.

- Поэтому, $\bar{a} \cdot \bar{b} = aH \cdot bH = a \cdot (Hb) \cdot H = a \cdot (bH) \cdot H = ab \cdot (H \cdot H) = abH = \overline{ab}$.

Лемма 19

Пусть G — группа, $H \triangleleft G$. Тогда G/H — группа.

Доказательство. Ассоциативность умножения: $\forall \bar{a}, \bar{b}, \bar{c} \in G/H$
 $\bar{a} \cdot (\bar{b} \cdot \bar{c}) = \overline{a \cdot (b \cdot c)} = \overline{a \cdot bc} = \overline{abc} = \overline{ab \cdot c} = (\bar{a} \cdot \bar{b}) \cdot \bar{c}.$

Нейтральный элемент — это $\bar{e}$.

Проверка: $\bar{e} \cdot \bar{a} = \overline{ea} = \bar{a} = \overline{ae} = \bar{a} \cdot \bar{e}.$

Обратный элемент: $(\bar{a})^{-1} := \overline{a^{-1}}.$

Проверка: $\bar{a} \cdot \overline{a^{-1}} = \overline{a \cdot a^{-1}} = \bar{e}$ и $\overline{a^{-1}} \cdot \bar{a} = \overline{a^{-1} \cdot a} = \bar{e}.$ □

Лемма 20

Пусть G — группа, $F \triangleleft G$, $H' < G/F$. Пусть
 $H = \{x \in G : \bar{x} \in H'\}$. Тогда $H < G$, причем $|H| = |H'| |F|.$

Доказательство. • Пусть $x, y \in H$. Тогда $\bar{x}, \bar{y} \in H'$, а значит,
 $\overline{xy} = \bar{x} \cdot \bar{y} \in H'$ (так как H' — группа). Следовательно, $xy \in H$.

• Пусть $x \in H$. Тогда $\bar{x} \in H'$, а значит, $\overline{x^{-1}} = (\bar{x})^{-1} \in H'$ (так как H' — группа). Следовательно, $x^{-1} \in H$.

• По Лемме 1, $H < G$.

• Каждый $\bar{x} \in H'$ — это смежный класс xF , содержащий ровно $|F|$ элементов, и все они при факторизации переходят в $\bar{x}$.

Поэтому, $|H| = |H'| |F|.$

Теорема 5

Пусть $f : G \rightarrow H$ — гомоморфизм групп. Тогда $G/\text{Ker}(f) \simeq \text{Im}(f)$.

Доказательство. • Зададим отображение $\bar{f} : G/\text{Ker}(f) \rightarrow \text{Im}(f)$ формулой $\bar{f}(\bar{a}) := f(a)$.

- **Корректность** определения $\bar{f}$.
- Пусть $a, b \in G$ таковы, что $\bar{a} = \bar{b}$. По Свойству 3 смежных классов, тогда $a^{-1}b \in \text{Ker}(f)$.
- Следовательно, $\bar{f}(\bar{b}) = f(b) = f(a \cdot a^{-1}b) = f(a)f(a^{-1}b) = f(a) \cdot e_H = f(a) = \bar{f}(\bar{a})$.
- $\bar{f}$ — **гомоморфизм групп**:
 $\bar{f}(\bar{a} \cdot \bar{b}) = \bar{f}(\overline{ab}) = f(ab) = f(a)f(b) = \bar{f}(\bar{a}) \cdot \bar{f}(\bar{b})$.
- $\text{Im}(\bar{f}) = \text{Im}(f)$: для любого $y \in \text{Im}(f)$ существует такой $x \in G$, что $\bar{f}(\bar{x}) = f(x) = y$.
- $\bar{f}$ — **монофморфизм**. Проверка: пусть $\bar{a} \in \text{Ker}(\bar{f})$. Тогда $f(a) = \bar{f}(\bar{a}) = e_H$, следовательно, $a \in \text{Ker}(f)$, а значит, $\bar{a} = \bar{e}$. Таким образом, $\text{Ker}(\bar{f}) = \{\bar{e}\}$.
- Таким образом, $\bar{f}$ — **изофморфизм**, а значит, $G/\text{Ker}(f) \simeq \text{Im}(f)$.

Теорема 6

Пусть G — группа, $H, F \triangleleft G$, причем $F < H$. Тогда выполнены следующие утверждения.

- 1) $F \triangleleft H$.
- 2) $H/F \triangleleft G/F$.
- 3) $G/H \simeq (G/F)/(H/F)$.

Доказательство. 1) $F \triangleleft G \Rightarrow \forall a \in G \quad I_a(F) = F \Rightarrow$
 $\Rightarrow \forall a \in H \quad I_a(F) = F \Rightarrow F \triangleleft H$.

2) • Из $H \triangleleft G$ следует, что для любых $a \in G$ и $h \in H$ выполнено $a^{-1}ha \in H$.

• Пусть $\bar{a} := aF$. Тогда для любых $\bar{a} \in G/F$ и $\bar{h} \in H/F$ выполнено $(\bar{a})^{-1} \cdot \bar{h} \cdot \bar{a} = \overline{a^{-1}ha} \in H/F$.

• Следовательно, $H/F \triangleleft G/F$.

3) • Для $a \in G$ положим $\tilde{a} := aH$. По Свойству 3 смежных классов, $\bar{a} = \bar{b} \Rightarrow a^{-1}b \in F \Rightarrow a^{-1}b \in H \Rightarrow \tilde{a} = \tilde{b}$.

- Определим отображение $f : G/F \rightarrow G/H$ формулой $f(\bar{a}) := \tilde{a}$.

- Так как из $\bar{a} = \bar{b}$ следует, что $\tilde{a} = \tilde{b}$, определение f корректно.

- f — гомоморфизм групп:

$$f(\bar{a} \cdot \bar{b}) = f(\overline{ab}) = \widetilde{ab} = \tilde{a} \cdot \tilde{b} = f(\bar{a})f(\bar{b}).$$

- $\text{Ker}(f) = H/F$. Доказательство:

-

$$\bar{a} \in \text{Ker}(f) \iff \tilde{e} = f(\bar{a}) = \tilde{a} \iff a \in H \iff \bar{a} \in H/F.$$

- $\text{Im}(f) = G/H$. Действительно, для любого $\tilde{a} \in G/H$, очевидно, $\bar{a} \in G/F$ и $f(\bar{a}) = \tilde{a}$.

- По Теореме 5,

$$G/H = \text{Im}(f) \simeq (G/F)/\text{Ker}(f) = (G/F)/(H/F).$$



Определение

Пусть G — группа. Коммутатор элементов $a, b \in G$ — это $[a, b] = a^{-1}b^{-1}ab$.

Свойство 1

$[a, b] = e \iff ab = ba$ (в этом случае говорят, что элементы a и b коммутируют).

Доказательство. $e = a^{-1}b^{-1}ab \iff ba = ab$. □

Свойство 2

$[b, a] = [a, b]^{-1}$.

Доказательство. $[b, a] \cdot [a, b] = b^{-1}a^{-1}ba \cdot a^{-1}b^{-1}ab = e$.

Аналогично, $[a, b] \cdot [b, a] = e$. □

• Для $a, x \in G$ будем применять обозначение $a^x := I_x(a) = x^{-1}ax$.

• Нетрудно проверить, что $(a^x)^{-1} = (a^{-1})^x$.

Свойство 3

$[a, b]^x = [a^x, b^x]$.

Доказательство. $[a, b]^x = x^{-1}(a^{-1}b^{-1}ab)x =$
 $(x^{-1}a^{-1}x)(x^{-1}b^{-1}x)(x^{-1}ax)(x^{-1}bx) = (a^{-1})^x(b^{-1})^xa^xb^x =$
 $(a^x)^{-1}(b^x)^{-1}a^xb^x = [a^x, b^x]$.

Определение

Пусть G — группа. **Коммутант** $[G, G]$ — это подгруппа G , порожденная множеством коммутаторов.

Свойство 4

$[G, G]$ состоит из всех произведений коммутаторов элементов G .

Доказательство. • По определению $[G, G]$ состоит из всех произведений вида $t_1 \dots t_n$, где каждый t_i — коммутатор двух элементов G , или обратный к такому коммутатору.

• По Свойству 2, обратный элемент к коммутатору также является коммутатором. □

Свойство 5

$[G, G] \triangleleft G$.

Доказательство. • Пусть $x \in G$, $y \in [G, G]$. Тогда $y = [a_1, b_1] \dots [a_n, b_n]$, где $a_1, b_1, \dots, a_n, b_n \in G$.

• Тогда $y^x = ([a_1, b_1] \dots [a_n, b_n])^x = [a_1, b_1]^x \dots [a_n, b_n]^x = [a_1^x, b_1^x] \dots [a_n^x, b_n^x] \in [G, G]$.

• По Лемме 15, $[G, G] \triangleleft G$. □

Теорема 7

Пусть G — группа, $H \triangleleft G$. Тогда G/H абелева, если и только если $[G, G] \subset H$.

Доказательство. • Пусть $\bar{a} := aH$.

• Группа G/H абелева, если и только если для любых $a, b \in G$ выполнено $\bar{a} \cdot \bar{b} = \bar{b} \cdot \bar{a}$. Преобразуем это условие:

$$\bar{a} \cdot \bar{b} = \bar{b} \cdot \bar{a} \iff \bar{e} = [\bar{a}, \bar{b}] = \overline{[a, b]} \iff [a, b] \in H.$$

• Таким образом, группа G/H абелева, если и только если

$$\forall a, b \in G [a, b] \in H \iff [G, G] \subset H \iff [G, G] < H. \quad \square$$

Определение

Пусть G — группа, M — множество. Отображение $\cdot : G \times M \rightarrow M$ называется **действием** группы G на множестве M , если выполнены следующие условия:

- 1) $\forall a, b \in G, \forall x \in M \quad (ab)x = a(bx);$
- 2) $\forall x \in M \quad ex = x.$

Примеры действий.

- 1) S_n действует на $\{1, 2, \dots, n\}.$
- 2) Если G группа, то $\text{Aut}(G)$ действует на G (здесь G выступает в качестве множества).
- 3) Если G группа, то G (как группа) действует на G (как множестве) **левыми умножениями**:

$\forall a \in G \forall x \in G \quad ax := ax$ (первое умножение — действие, а второе — умножение в группе).

Определение

Пусть группа G действует на множестве M .

1) **Орбита** элемента $x \in M$ — это

$$\langle x \rangle = \{ax : a \in G\}.$$

2) Для $a \in G$ и $N \subset M$ положим $aN := \{ax : x \in N\}$.

3) **Стабилизатор** подмножества $N \subset M$ — это

$$\text{St}(N) := \{a \in G : aN = N\}.$$

Свойство 1

Для любого $N \subset M$ $\text{St}(N) < G$.

Доказательство. • Достаточно проверить условия из Леммы 1.

• Пусть $a, b \in \text{St}(N)$. Тогда $(ab)N = a(bN) = aN = N$, то есть, $ab \in \text{St}(N)$.

• Пусть $a \in \text{St}(N)$. Тогда $a^{-1}N = a^{-1}(aN) = (a^{-1}a)N = eN = N$, то есть, $a^{-1} \in \text{St}(N)$.

Свойство 2

Пусть $a \in G$, $N \subset M$. Тогда $\text{St}(aN) = I_{a^{-1}}(\text{St}(N))$.

Доказательство.

$$\begin{aligned}x \in \text{St}(aN) &\iff (xa)N = x(aN) = aN \iff \\&a^{-1}((xa)N) = a^{-1}(aN) \iff \\I_a(x)N &= (a^{-1}xa)N = (a^{-1}a)N = eN = N \iff \\&I_a(x) \in \text{St}(N).\end{aligned}$$

• Таким образом, $\text{St}(aN) = \{x : I_a(x) \in \text{St}(N)\} = \{I_{a^{-1}}(y) : y \in \text{St}(N)\} = I_{a^{-1}}(\text{St}(N))$.

□

Свойство 3

Для любого $x \in M$ выполнено $x \in \langle x \rangle$.

Доказательство. $ex = x \Rightarrow x \in \langle x \rangle$. □

Свойство 4

Пусть $x, y \in M$, $\langle x \rangle \cap \langle y \rangle \neq \emptyset$. Тогда $\langle x \rangle = \langle y \rangle$.

Доказательство. • Пусть $a, b \in G$ таковы, что $ax = by$.

• Тогда $y = (b^{-1}b)y = (b^{-1}a)x$, то есть, $y \in \langle x \rangle$.

• Пусть $z \in \langle y \rangle$, тогда $z = sy$, где $s \in G$ и
 $z = (sb^{-1}a)x \in \langle x \rangle$

• Таким образом, $\langle y \rangle \subset \langle x \rangle$. Аналогично, $\langle x \rangle \subset \langle y \rangle$. □

Теорема 8

Пусть группа G действует на множестве M , а $x \in M$.
Тогда $|\langle x \rangle| \cdot |\text{St}(x)| = |G|$.

Доказательство. • Для $a, b \in G$

$$\begin{aligned} ax = bx &\iff (b^{-1}a)x = b^{-1}(ax) = b^{-1}(bx) = x \iff \\ b^{-1}a &\in \text{St}(x) \iff b \cdot \text{St}(x) = a \cdot \text{St}(x). \end{aligned}$$

(в последнем равенстве мы воспользовались Свойством 3 смежных классов).

- Таким образом, элементы G , одинаково действующие на x , образуют смежный класс по подгруппе $\text{St}(x)$.
- Следовательно, $|\langle x \rangle| = (G : \text{St}(x))$ (количеству смежных классов по подгруппе $\text{St}(x)$).
- Теперь Теорема 8 следует из Теоремы 1 (теоремы Лагранжа). □

Определение

Для любого множества M через S_M обозначим группу всех перестановок множества M (то есть, биекций из M в M) относительно композиции.

- S_M — группа для любого множества M (доказательство аналогично случаю S_n).
- Если M — конечное множество, то $S_M \simeq S_{|M|}$.

Теорема 9

(A. Cayley.) Любая группа G изоморфна подгруппе группы S_G .

Доказательство. • Для $g \in G$ определим отображение $f_g : G \rightarrow G$ формулой $f_g(x) := gx$.

- Проверим, что f_g — биекция:

$$gx = f_g(x) = f_g(y) = gy \iff x = y \text{ (можно умножить } gx = gy \text{ слева на } g^{-1}).$$

- Таким образом, $f_g \in S_G$.

- Определим отображение $f : G \rightarrow S_G$ формулой $f(a) := f_a$.
- Проверим, что f — гомоморфизм групп: пусть $a, b \in G$. Тогда
 $\forall x \in G$ имеем
$$f_{ab}(x) = abx = a(bx) = f_a(f_b(x)) = (f_a f_b)(x).$$
- Следовательно, $\forall a, b \in G \ f(ab) = f(a)f(b)$ и f — гомоморфизм.
- Пусть $a \in \ker(f)$. Тогда $f_a = f(a) = \text{id}$, то есть,
 $\forall x \in G \ ax = f_a(x) = x$, откуда очевидно следует, что $a = e$.
- Таким образом, $\ker(f) = \{e\}$.
- По теореме о гомоморфизме групп (Теореме 5) мы имеем
$$G \simeq G/\{e\} = G/\ker(f) \simeq \text{Im}(f) < S_G.$$



Определение

Центр группы G — это множество всех элементов группы, которые коммутируют со всеми элементами G :

$$Z(G) := \{a \in G : \forall x \in G \ ax = xa\}.$$

- Если G абелева, то $Z(G) = G$.

Свойство 1

$$a \in Z(G) \iff l_a = \text{id}.$$

Доказательство. $a \in Z(G) \iff \forall x \in G \ ax = xa \iff$
 $\forall x \in G \ x = a^{-1}xa = l_a(x) \iff l_a = \text{id}.$ □

Свойство 2

$$a \in Z(G) \iff \forall x \in G \ l_x(a) = a.$$

Доказательство. $a \in Z(G) \iff \forall x \in G \ ax = xa \iff$
 $\forall x \in G \ l_x(a) = x^{-1}ax = a.$ □

Лемма 21

- 1) $Z(G) < G$.
- 2) Если $H < Z(G)$, то $H \triangleleft G$.

Доказательство. 1) • Пусть $a, b \in Z(G)$, $x \in G$. Тогда $(ab)x = axb = x(ab)$, а значит, $ab \in Z(G)$.

• Пусть $a \in Z(G)$, $x \in G$. Тогда $a^{-1}x = xa^{-1} \iff a(a^{-1}x)a = a(xa^{-1})a \iff xa = ax$.
Значит, $a^{-1} \in Z(G)$.

• По Лемме 1, $Z(G) < G$.

2) • Пусть $a \in H$, $x \in G$. По Свойству 2 тогда $x^{-1}ax = a \in H$.

• По Лемме 15, $H \triangleleft G$.



Теорема 10

Для любой группы G выполнено $G/Z(G) \simeq \text{Inn}(G)$.

Доказательство. • Определим $f : G \rightarrow \text{Inn}(G)$ формулой $f(a) := I_{a^{-1}}$.

• Так как для любого $x \in G$

$$I_{a^{-1}}(I_{b^{-1}}(x)) = a(bxb^{-1})a^{-1} = (ab)x(ab)^{-1} = I_{(ab)^{-1}}(x),$$

мы имеем $f(a)f(b) = f(ab)$, то есть, f — гомоморфизм групп.

• По Свойству 1 центра и так как $Z(G) < G$,

$$a \in \text{Ker}(f) \iff I_{a^{-1}} = \text{id} \iff a^{-1} \in Z(G)$$

$$\iff a \in Z(G).$$

• Таким образом, $\text{Ker}(f) = Z(G)$.

• Очевидно, $\text{Im}(f) = \text{Inn}(G)$.

• По теореме о гомоморфизме (Теореме 5)

$$G/Z(G) = G/\text{ker}(f) \simeq \text{Im}(f) = \text{Inn}(G).$$



Определение

Пусть $p \in \mathbb{P}$. Конечная группа G с $|G| = p^n$, где $n \in \mathbb{N}$ называется **p -группой**.

Теорема 11

Пусть $p \in \mathbb{P}$, а G — p -группа. Тогда $|Z(G)| \vdots p$.

Доказательство. • Рассмотрим действие $\text{Inn}(G)$ на G .

• По Теореме 10 мы имеем $\text{Inn}(G) \simeq G/Z(G)$, откуда следует, что

$$|\text{Inn}(G)| = |G/Z(G)| = (G : Z(G)) = \frac{|G|}{|Z(G)|}.$$

• Значит, $|\text{Inn}(G)| = p^k$, где $k \leq n$.

• По Свойству 4 орбит G разбивается на орбиты под действием $\text{Inn}(G)$.

• По Теореме 8, $|\text{Inn}(G)| = p^k$ делится на размеры всех этих орбит. Следовательно, размер каждой орбиты либо равен 1, либо делится на p .

• По Свойству 2 центра одноэлементные орбиты под действием $\text{Inn}(G)$ образуют в точности элементы из $Z(G)$.

• Так как $|G| \vdots p$, количество одноэлементных орбит делится на p . Следовательно, $|Z(G)| \vdots p$.

Лемма 22

Пусть $p \in \mathbb{P}$, а H — абелева группа конечного порядка, $|H| \not\vdots p$. Тогда H имеет элемент порядка p .

Доказательство. • Индукция по $|H|$.

• **База** $|H| = p$: по теореме Лагранжа (Теореме 1) в группе H могут быть только элемент порядка 1 (это e) и p . Значит, элемент порядка p есть.

Переход. Пусть для групп меньших порядков лемма доказана.

• Пусть $a \in H$. Рассмотрим два случая.

Случай 1: $\text{ord}(a) \not\vdots p$.

• Пусть $\text{ord}(a) = np$. Тогда $\text{ord}(a^n) = p$.

Случай 2: $\text{ord}(a) \not\vdots p$.

• Пусть $F = \langle a \rangle$. Тогда $|F| = k$, $(k, p) = 1$.

• Очевидно, $F \triangleleft H$ (любая подгруппа абелевой группы нормальна).

- Рассмотрим группу H/F . Тогда $|H/F| = (H : F) = \frac{|H|}{|F|} \vdots p$.
- По индукционному предположению существует элемент $\bar{b} \in H/F$ с $\text{ord}(\bar{b}) = p$.
- Рассмотрим $b \in H$. Мы знаем, что $b^p \in F$ и $b^s \notin F$ при $s < p$.
- Пусть $\text{ord}(b) = m = qp + r$, где $0 \leq r < p$.
- Тогда $F \ni e = b^{qp+r} = (b^p)^q \cdot b^r$, откуда следует, что $b^r \in F$, а значит, $r = 0$ и $m \vdots p$.
- Итак, $\text{ord}(b) \vdots p$ и по Случаю 1 в H есть элемент порядка p . □

Первая теорема Силова

Определение

Пусть G — конечная группа, $H < G$, $p \in \mathbb{P}$, $p^k \parallel |G|$. Тогда H — **силовская p -подгруппа** G , если $|H| = p^k$.

Теорема 12

Пусть G — конечная группа, $p \in \mathbb{P}$, $p^k \parallel |G|$. Тогда G имеет подгруппу порядка p^k .

Доказательство. • Индукция по $|G|$. База для $|G| \nmid p$ очевидна.

Переход. Пусть для групп меньших порядков теорема доказана, а $|G| = np^k$, где $k \geq 1$ и $n \nmid p$.

• Рассмотрим два случая.

Случай 1: $|Z(G)| \nmid p$.

- По Лемме 22, существует $a \in Z(G)$ с $\text{ord}(a) = p$.
- Тогда $|\langle a \rangle| = p$ по Следствию 1.
- По Лемме 21, $\langle a \rangle \triangleleft G$. Рассмотрим $G' := G/\langle a \rangle$, тогда $|G'| = (G : \langle a \rangle) = np^{k-1}$ и по индукционному предположению существует подгруппа $H' < G'$ с $|H'| = p^{k-1}$.
- Пусть $H = \{x \in G : \bar{x} \in H'\}$. По Лемме 20, $H < G$ и $|H| = |H'| |\langle a \rangle| = p^k$, что нам и нужно. 

Случай 2: $|Z(G)| \nmid p$.

- Тогда рассмотрим действие G на G сопряжениями: для любых $g \in G$ и $x \in G$ положим $(g, x) \rightarrow gxg^{-1} = I_{g^{-1}}(x)$.
- Нетрудно проверить, что это действие. Множество G разбивается этим действием на орбиты.
- Очевидно, орбиты каждого элемент $x \in Z(G)$ одноэлементная. Объединение всех таких орбит равно $Z(G)$ и имеет некратное p число элементов.
- Так как $|G| \nmid p$, существует такой элемент $a \in G \setminus Z(G)$, что $|\langle a \rangle| \nmid p$ (здесь $\langle a \rangle$ — орбита элемента a).
- Вспомним, что $\text{St}(a) < G$ и по Теореме 8 мы знаем, что $|\text{St}(a)| \cdot |\langle a \rangle| = |G|$.
- Тогда $p^k \parallel |\text{St}(a)|$. Из $a \notin Z(G)$ следует, что $|\langle a \rangle| > 1$, а значит, $|\text{St}(a)| < |G|$.
- По индукционному предположению, существует такая $H < \text{St}(a)$, что $|H| = p^k$. Тогда $H < G$ и теорема доказана. $\square$

Следствие 3

(Теорема Коши.) Пусть G — конечная группа, $p \in \mathbb{P}$, $|G| \dot{\vdots} p$. Тогда существует такой $a \in G$, что $\text{ord}(a) = p$.

Доказательство. • Пусть $p^k \parallel |G|$. По Теореме 12, существует $H < G$, $|H| = p^k$. По Теореме 11 мы имеем $|Z(H)| \dot{\vdots} p$.

• Так как $Z(H)$ — абелева группа, по Лемме 22 существует $a \in Z(H)$, $\text{ord}(a) = p$. □

Теорема 13

Пусть G — конечная группа, $p \in \mathbb{P}$, $|G| \vdots p$. Тогда выполнены следующие утверждения.

- 1) Если $P < G$ — силовская p -подгруппа, то все силовские p -подгруппы G — это в точности все подгруппы вида $I_a(P)$, где $a \in G$.
- 2) Любая p -подгруппа группы G является подгруппой одной из силовских p -подгрупп.

Доказательство. • По Следствию 2, все множества вида $I_a(P)$ — подгруппы G .

• Так как I_a — биекция, все они имеют $|P|$ элементов, то есть, являются силовскими p -подгруппами.

• Пусть $H < G$ — p -подгруппа (не обязательно силовская). Достаточно доказать, что $\exists a \in G$, для которого $H < I_a(P)$ (если H — силовская, то мы получим как раз $H = I_a(P)$).

- H действует **левыми сдвигами** на множестве левых смежных классов $M = \{aP : a \in G\}$ (это не обязательно фактор-группа!):

для $x \in H$, $aP \in M$ положим $x \cdot aP := (xa)P$

(условия из определения действия проверяются очевидно).

- Множество M разбивается на орбиты, размеры которых по Теореме 8 делят $|H| = p^s$, а значит, длина каждой орбиты либо делится на p , либо равна 1.

- Так как $|M| = \frac{|G|}{|P|} \not\equiv p$, есть одноэлементная орбита $\{aP\}$.

- Таким образом, $\forall x \in H \quad xaP = aP \Rightarrow x \cdot aPa^{-1} = aPa^{-1}$.

- Так как $aPa^{-1} < G$, это означает, что $x \in aPa^{-1}$.

- Таким образом, $H \subset aPa^{-1} \Rightarrow H < aPa^{-1}$, что мы и доказывали.

