

ЛЕКЦИЯ 1

Определение 1. Пусть G – некоторое множество. n -арной операцией на множестве G называется отображение

$$G \times \dots \times G \rightarrow G$$

из n -ой декартовой степени множества G в множество G .

Рассмотрим бинарную операцию $*$ на множестве G :

$$G \times G \rightarrow G, \quad (g_1, g_2) \rightarrow g_1 * g_2.$$

Определение 2. Непустое множество G с фиксированной бинарной операцией $*$ называется *группоидом*.

Рассмотрим следующие условия (аксиомы) на операцию $*$.

A1. Ассоциативность. Для любых элементов $a, b, c \in G$ выполнено $(a*b)*c = a*(b*c)$.

A2. Существование нейтрального элемента. Существует такой элемент $e \in G$, что для любого $g \in G$ выполняется $eg = ge = g$.

A3. Существование обратного элемента. Для каждого элемента $g \in G$ существует элемент $g^{-1} \in G$ такой, что $g * g^{-1} = g^{-1} * g = e$.

A4. Коммутативность. Для любых элементов $a, b \in G$ выполнено $a * b = b * a$.

Накладывая на операцию $*$ различные множества условий, мы будем получать различные алгебраические структуры.

Определение 3. Если $*$ удовлетворяет условию A1, то G называется *полугруппой*.

Если $*$ удовлетворяет условиям A1 и A2, то G называется *моноидом*.

Если $*$ удовлетворяет условиям A1 и A2 и A3, то G называется *группой*.

Условие A4 добавляет к названию структуры слово абелев (или, что то же самое, коммутативный). Так условия A1 и A4 задают *абелеву (коммутативную) полугруппу*, условия A1, A2 и A4 задают *абелеву (коммутативный) моноид*, условия A1, A2, A3 и A4 задают *абелеву (коммутативную) группу*.

Обозначение 1. Если не очевидно, какая операция на множестве G имеется в виду, то будем использовать обозначение $(G, *)$ для множества G с операцией $*$.

Зачастую вместо слова "операция" используют слово "умножение". Суть от этого не меняется и имеется в виду некоторая операция в группе. При этом на письме так же как и в случае обычного умножения чисел знак умножения можно опускать. Нейтральный элемент группы в этом случае зачастую называют "единицей группы". Такие обозначения называются *мультипликативными*.

Если заранее известно, что группа абелева, то часто используют *аддитивные* обозначения. Операция называется сложением и обозначается знаком "+", нейтральный элемент называется нулем, а обратный элемент называется "противоположным элементом".

Соберем эти обозначения в таблице.

общие обозначения	мультипликативные обозначения	аддитивные обозначения
произвольная группа	произвольная группа	абелева группа
операция $*$	умножение $\cdot$	сложение $+$
нейтральный элемент e	единица e	ноль 0
обратный элемент g^{-1}	обратный элемент g^{-1}	противоположный элемент $-g$

Определение 4. Порядок группы G – это количество элементов в этой группе. (То есть мощность множества G .) Порядок группы G обозначается $|G|$.

Определение 5. Подмножество H группы $(G, *)$ называется *подгруппой*, если $(H, *)$ является группой.

Подмножество S группы $(G, *)$ называется *замкнутым относительно операции $*$* , если для любых $a, b \in S$ выполнено $a * b \in S$. Подмножество S группы $(G, *)$ называется *замкнутым относительно взятия обратного*, если для любого $s \in S$ элемент s^{-1} также принадлежит S .

Предложение 1. *Непустое подмножество H группы $(G, *)$ является подгруппой тогда и только тогда, когда оно замкнуто относительно операции и замкнуто относительно взятия обратного.*

Доказательство. Если $(H, *)$ – группа, то операция $*$ корректно определена на H . Значит, H замкнуто относительно операции $*$. Пусть e – нейтральный элемент группы G , а s – нейтральный элемент группы H . Получаем $s * s = s$. В группе G есть обратный к s элемент s^{-1} . Умножая на него слева предыдущее равенство, получаем $s = e$. То есть единицы у групп G и H совпадают. Для каждого $g \in H$ есть обратный элемент g^{-1} в группе G и есть обратный элемент $g^\vee$ в группе H . Тогда $g * g^{-1} = e = g * g^\vee$. Умножив слева на g^{-1} , получаем $g^{-1} = g^\vee$. Поскольку для группы $(H, *)$ выполнена аксиома A3, то H замкнуто относительно взятия обратного.

Пусть теперь подмножество H замкнуто относительно операции и взятия обратного. Так как H замкнуто относительно операции, $(H, *)$ – группоид. Поскольку ассоциативность выполнена в G , то она выполнена и в H . Подмножество не пусто. Возьмем элемент $h \in H$. Так как H замкнуто относительно взятия обратного, $h^{-1} \in H$. Пользуясь замкнутостью H относительно операции, получаем $h * h^{-1} = e \in H$. Таким образом, в H выполнена аксиома A2. Поскольку H замкнуто относительно взятия обратного, в H выполнена и аксиома A3. $\square$

Примеры групп.

1а) Числовые аддитивные группы:

$$(\mathbb{Z}, +), (\mathbb{Q}, +), (\mathbb{R}, +), (\mathbb{C}, +).$$

Нейтральный элемент 0, обратный к элементу x – это $-x$. Выполнение аксиом следуют из свойств сложения чисел. Все данные группы бесконечны и коммутативны.

1б) Числовые мультипликативные группы:

$$\mathbb{Q}^\times = (\mathbb{Q} \setminus \{0\}, \cdot), \mathbb{R}^\times = (\mathbb{R} \setminus \{0\}, \cdot), \mathbb{C}^\times = (\mathbb{C} \setminus \{0\}, \cdot).$$

Нейтральный элемент 1, обратный к элементу x – это $\frac{1}{x}$. Выполнение аксиом следуют из свойств умножения чисел. Данные группы бесконечны и коммутативны.

Обобщение примера 1б) Пусть R – кольцо с единицей. Обозначим множество обратимых элементов через $R^\times$. Рассмотрим группу обратимых элементов $(R^\times, \cdot)$. Нейтральный элемент – единица кольца. Обратные элементы существуют так как $R^\times$ состоит из обратимых элементов. Если R – коммутативное кольцо, то $R^\times$ – коммутативная группа.

Задача 1. Приведите пример некоммутативного кольца R такого, что $R^\times$ – коммутативная группа порядка больше 1.

2) Группы перестановок.

а) Множество S_n всех перестановок n элементов с операцией композиции $\circ$ является группой. Докажем это. Нейтральный элемент этой группы – это тождественная перестановка, обратный элемент – обратная перестановка. Ассоциативность следует из следующей важной леммы.

Лемма 1. Пусть есть четыре множества: X, Y, Z и W . И пусть фиксированы отображения между этими множествами $\varphi: X \rightarrow Y, \psi: Y \rightarrow Z$ и $\zeta: Z \rightarrow W$. Тогда $(\zeta \circ \psi) \circ \varphi = \zeta \circ (\psi \circ \varphi)$.

Доказательство. Возьмем элемент $x \in X$. Тогда

$$(\zeta \circ \psi) \circ \varphi(x) = (\zeta \circ \psi)(\varphi(x)) = (\zeta(\psi(\varphi(x)))).$$

С другой стороны

$$\zeta \circ (\psi \circ \varphi)(x) = \zeta(\psi \circ \varphi)(x) = (\zeta(\psi(\varphi(x)))).$$

□

Применяя данную лемму к случаю $X = Y = Z = W = \{1, 2, \dots, n\}$ получаем ассоциативность S_n . Порядок группы S_n равен $n!$. При $n > 3$ группа S_n не коммутативна.

б) Множество A_n четных перестановок из S_n с операцией композиции образует *группу четных перестановок*. Докажем, что A_n – подгруппа S_n . Это следует из того, что произведение четных перестановок – четная перестановка и обратная к четной перестановке четная. Группа A_n не коммутативна при $n \geq 4$.

в) Группа Клейна V_4 . Рассмотрим множество перестановок (в виде произведения независимых циклов) $\{\text{id}, (1, 2)(3, 4), (1, 3)(2, 4), (1, 4)(2, 3)\}$. Несложно проверить, что это множество замкнуто относительно композиции и что каждая перестановка из этого множества обратна самой себе. Получаем, что данные перестановки образуют подгруппу в S_4 , которая обозначается V_4 . Эта группа коммутативна.

г) (Обобщение примера б) Пусть X – некоторое множество (возможно бесконечное). Рассмотрим множество $S(X)$ биекций $X \rightarrow X$ с операцией композиции. Если $|X| < \infty$, то получаем группу перестановок. В общем случае получаем *группу симметрий множества X* . Нейтральный элемент – тождественное преобразование. Обратный – обратное преобразование. Ассоциативность следует из леммы 1.

3) Матричные группы. Пусть $\mathbb{K}$ – поле.

а) $GL_n(\mathbb{K})$ – множество невырожденных матриц $n \times n$ с элементами из $\mathbb{K}$. Легко видеть, что это множество замкнуто относительно умножения матриц. Умножение матриц ассоциативно, единичная матрица – нейтральный элемент и все невырожденные матрицы обратимы (обратная также невырождена). Следовательно, $(GL(\mathbb{K}), \cdot)$ – группа.

б) $SL_n(\mathbb{K})$ – множество $n \times n$ матриц с определителем 1 с элементами из $\mathbb{K}$. Это подмножество в $GL(\mathbb{K})$ замкнуто относительно умножения и взятия обратного. Следовательно, это подгруппа.

в) $O_n(\mathbb{K})$ – множество ортогональных матриц $n \times n$ с элементами из $\mathbb{K}$. Это подмножество в $GL(\mathbb{K})$ замкнуто относительно умножения и взятия обратного. Следовательно, это подгруппа.

Эти группы конечны тогда и только тогда, когда поле $\mathbb{K}$ конечно.

4) Группы преобразований векторного пространства. (Подгруппы в группе $S(V)$, где V – векторное пространство.)

а) Группа обратимых линейных преобразований V .

б) Группа ортогональных линейных преобразований V .

в) Группа обратимых аффинных преобразований V .

г) Группа движений V .

Во всех этих группах нейтральный элемент – тождественное преобразование, а обратный элемент – обратное преобразование. Эти группы конечны тогда и только тогда, когда поле, над которым V – векторное пространство конечно и размерность V конечна.

д) Группа диэдра D_n . Рассмотрим правильный n -угольник. Группа диэдра D_n – это группа всех движений плоскости, сохраняющих этот n -угольник.

Упражнение 1. а) Докажите, что в группе D_n ровно $2n$ элементов. Среди них n поворотов и n осевых симметрий. Все оси симметрий проходят через центр n -угольника. Если n четно, то половина симметрий проходит через 2 вершины, а половина – через две середины противоположных сторон. Если же n нечетно, то все симметрии проходят через одну вершину и середину противоположной стороны.

б) Найдите, как устроена операция в группе D_n , то есть чему равна композиция двух поворотов, двух симметрий и поворота с симметрией.

5) Группа вычетов (остатков) по модулю n : $(\mathbb{Z}_n, +)$. Сложение происходит по модулю n . Нейтральный элемент 0, обратный к элементу x – это $n - x$. Выполнение аксиом следуют из свойств остатков. Данная группа коммутативна и имеет порядок n .

6) Группа комплексных корней из единицы n -ой степени. Пусть μ_n – множество всех комплексных корней степени n из 1. Тогда $(\mu_n, \cdot)$ – абелева группа порядка n . Докажем это. Для того, чтобы доказать, что μ_n – группа мы воспользуемся, тем, что это подмножество в известной нам группе $\mathbb{C}^\times$. Нам надо лишь проверить, что μ_n замкнуто относительно умножения и взятия обратного. Пусть $a, b \in \mu_n$, то есть $a^n = b^n = 1$. Тогда $(ab)^n = a^n b^n = 1$, значит, $ab \in \mu_n$. Мы доказали, что μ_n замкнуто относительно умножения. С другой стороны $(a^{-1})^n = (a^n)^{-1} = 1^{-1} = 1$, следовательно, μ_n замкнуто относительно взятия обратного. То, что группа μ_n абелева следует из того, что она является подгруппой в абелевой группе $\mathbb{C}^\times$.

Единица этой группы – это 1, обратный к элементу x – это $\frac{1}{x}$.

7) Группа кватернионов Q_8 . Рассмотрим множество из 8 элементов:

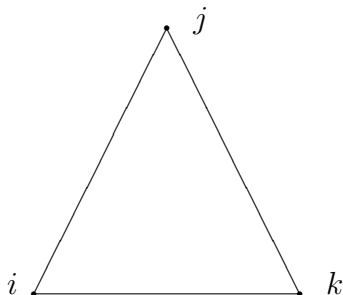
$$\{1, -1, i, -i, j, -j, k, -k\}.$$

Умножение устроено следующим образом: знаки умножаются отдельно,

$$i^2 = j^2 = k^2 = -1,$$

$$ij = k, ji = -k, ik = -j, ki = j, jk = i, kj = -i.$$

Для того, чтобы запомнить правило умножения элементов i, j и k удобно изобразить их в вершинах треугольника.



Теперь, если мы хотим умножить два элемента, то, если направление движение от первого ко второму по часовой стрелке, получаем третий элемент, а если против часовой стрелки, то минус третий.

Легко видеть, что 1 – нейтральный элемент, и каждый элемент обратим. В самом деле, элементы 1 и -1 являются обратными к самим себе. А для любого другого элемента x выполнено $x^{-1} = -x$. Для того, чтобы утверждать, что Q_8 – группа, необходимо проверить ассоциативность. Сделаем это на следующей лекции.

ЛЕКЦИЯ 2

Конечную группу можно задавать с помощью таблицы Кэли (таблицы умножения). Таблица умножения – это квадратная таблица, строки и столбцы которой соответствуют элементам группы. А на пересечении строки и столбца стоит произведение элемента, соответствующего строке, и элемента, соответствующего столбцу.

Пример 1. Построим таблицу сложения для группы $(\mathbb{Z}_3, +) = \{0, 1\}$

$+$	0	1	2
0	0	1	2
1	1	2	0
2	2	0	1

Ясно, что таблица Кэли симметрична (относительно главной диагонали) тогда и только тогда, когда группа коммутативна.

Определение 6. Пусть $(G, *)$ и $(H, \circ)$ – две группы. Отображение $\varphi: G \rightarrow H$ называется *гомоморфизмом*, если $\varphi(g_1 * g_2) = \varphi(g_1) \circ \varphi(g_2)$.

На самом деле, чтобы определить гомоморфизм нам не нужно, чтобы G и H были группами. Достаточно, чтобы на них были заданы некие операции (т.е., чтобы они были группоидами).

Докажем следующие элементарные свойства гомоморфизма.

Лемма 2. Пусть $\varphi: (G, *) \rightarrow (H, \circ)$ – гомоморфизм. Обозначим через e_G и e_H единицы группы G и H соответственно. Тогда

- 1) $\varphi(e_G) = e_H$,
- 2) $\varphi(g^{-1}) = \varphi(g)^{-1}$. (В левой части обратный берется в группе G , а в правой – в H .)

Доказательство. 1) Поскольку e_G – единица группы G . Тогда $e_G * e_G = e_G$, а значит,

$$\varphi(e_G) \circ \varphi(e_G) = \varphi(e_G * e_G) = \varphi(e_G).$$

В группе H есть обратный к $\varphi(e_G)$ элемент. Умножим на него обе части. Получим

$$\varphi(e_G) = e_H.$$

- 2) $e_H = \varphi(e_G) = \varphi(g * g^{-1}) = \varphi(g) \circ \varphi(g^{-1})$. Следовательно, $\varphi(g^{-1}) = \varphi(g)^{-1}$. $\square$

Задача 2. Пусть $(G, *)$ и $(H, \circ)$ – моноиды с единицами e_G и e_H соответственно. И пусть $\psi: G \rightarrow H$ – отображение такое, что $\psi(g_1 * g_2) = \psi(g_1) \circ \psi(g_2)$. Может ли так быть, что $\psi(e_G) \neq \psi(e_H)$?

Определение 7. Биективный гомоморфизм $\varphi: G \rightarrow H$ называется *изоморфизмом*, а группы G и H при наличии изоморфизма между ними называются *изоморфными*.

Изоморфные группы имеют одинаковую алгебраическую структуру. Более строго любой алгебраический факт (то есть формулирующийся только в терминах операции) верный в одной из них, верен и в другой. Поэтому в дальнейшем мы будем отождествлять изоморфные группы и будем изучать группы с точностью до изоморфизма.

Теорема 1. *Отношение изоморфности – это отношение эквивалентности.*

Доказательство. Нужно проверить, что отношение изоморфности удовлетворяет свойствам рефлексивности, симметричности и транзитивности. В самом деле. Тожественное преобразование задает изоморфизм любой группы с собой. Рефлексивность доказана. Если $\varphi: G \rightarrow H$ – изоморфизм, то в частности это биекция. Тогда существует обратное отображение φ^{-1} . Оно также является гомоморфизмом. В самом деле, пусть $a, b \in H$, в силу сюръективности φ , имеем $a = \varphi(u)$, $b = \varphi(v)$ для некоторых $u, v \in G$. Тогда $\varphi^{-1}(ab) = \varphi^{-1}(\varphi(u)\varphi(v)) = \varphi^{-1}(\varphi(uv)) = uv = \varphi^{-1}(a)\varphi^{-1}(b)$. Таким образом, φ^{-1} – изоморфизм. Симметричность доказана. Докажем, что композиция двух изоморфизмов – изоморфизм. Пусть $\varphi: G \rightarrow H$ и $\psi: H \rightarrow F$ – два гомоморфизма. Тогда

$$\psi \circ \varphi(g_1 g_2) = \psi(\varphi(g_1 g_2)) = \psi(\varphi(g_1)\varphi(g_2)) = \psi(\varphi(g_1))\psi(\varphi(g_2)) = \psi \circ \varphi(g_1)\psi \circ \varphi(g_2).$$

То есть $\psi \circ \varphi$ – гомоморфизм. С другой стороны, $\psi \circ \varphi$ – биекция. Значит, $\psi \circ \varphi$ – изоморфизм. Транзитивность доказана. $\square$

Из этого предложения следует, что все группы распадаются на непересекающиеся классы изоморфности.

Пример 2. Рассмотрим две группы: $(\mathbb{R}, +)$ и $(\mathbb{R}_{>0}, \cdot)$. Вторая группа состоит из всех положительных вещественных чисел с операцией умножения. Рассмотрим отображение $\varphi: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_{>0}$, $\varphi(x) = 2^x$. Легко видеть, что φ – изоморфизм.

Пример 3. Группа $\mathbb{Z}_n$ изоморфна группе μ_n . Один из возможных автоморфизмов переводит $k \in \mathbb{Z}_n$ в $\cos \frac{2\pi k}{n} + i \sin \frac{2\pi k}{n}$. То, что φ – гомоморфизм обеспечивается тем, что при умножении комплексных чисел их аргументы складываются.

Пример 4. Группа $GL_n(\mathbb{C})$ изоморфна группе невырожденных линейных преобразований векторного пространства $\mathbb{C}^n$ с операцией композиции. Чтобы получить изоморфизм между этими группами нужно выбрать некоторый базис в $\mathbb{C}^n$ и отобразить линейное преобразование в его матрицу в этом базисе.

На самом деле изоморфизм (биективное соответствие, переводящее умножение одной группы в умножение другой) можно задать в случае, когда про одну из структур не известно, группа это или нет. Тогда вторая структура будет автоматически группой.

Теорема 2. Пусть G – группа, а H – группоид. И пусть $\varphi: G \rightarrow H$ – биекция и гомоморфизм (то есть $\varphi(g_1 g_2) = \varphi(g_1)\varphi(g_2)$). (Можно сказать, что φ – изоморфизм группоидов.) Тогда H – также группа и φ – изоморфизм групп.

Доказательство. Докажем, что H – группа. Проверим ассоциативность. Пусть $h_1, h_2, h_3 \in H$. Обозначим $g_i = \varphi^{-1}(h_i)$, $i = 1, 2, 3$. Тогда

$$\begin{aligned} h_1(h_2 h_3) &= \varphi(g_1)(\varphi(g_2)\varphi(g_3)) = \varphi(g_1)\varphi(g_2 g_3) = \\ &= \varphi(g_1(g_2 g_3)) = \varphi((g_1 g_2)g_3) = \varphi(g_1 g_2)\varphi(g_3) = (\varphi(g_1)\varphi(g_2))\varphi(g_3) = (h_1 h_2)h_3. \end{aligned}$$

Проверим, что $l = \varphi(e)$ – нейтральный элемент. Действительно, пусть $h = \varphi(g)$. Тогда $hl = \varphi(g)\varphi(e) = \varphi(ge) = \varphi(g) = h$ и $lh = \varphi(e)\varphi(g) = \varphi(eg) = \varphi(g) = h$.

Теперь проверим наличие обратного к элементу $h = \varphi(g)$. Докажем, что это $f = \varphi(g^{-1})$. Действительно, $hf = \varphi(g)\varphi(g^{-1}) = \varphi(e) = l$ и $fh = \varphi(g^{-1})\varphi(g) = \varphi(e) = l$.

Итак, мы проверили, что H – группа. Таким образом φ – биективный гомоморфизм групп, то есть изоморфизм. $\square$

Теперь мы готовы доказать, что Q_8 – группа.

Предложение 2. Q_8 – группа

Доказательство. Рассмотрим следующее множество из 8 комплексных матриц, которое мы обозначим $\overline{Q}_8$.

$$\left\{ \pm \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \pm \begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix}, \pm \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, \pm \begin{pmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{pmatrix} \right\}.$$

Здесь i – это мнимая единица (комплексное число).

Рассмотрим биекцию φ между Q_8 и $\overline{Q}_8$.

$$\pm 1 \mapsto \pm \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, i \mapsto \pm \begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix}, j \mapsto \pm \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, k \mapsto \pm \begin{pmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{pmatrix}.$$

Легко убедиться, что φ переводит умножение в Q_8 в матричное умножение. Следовательно, $(\overline{Q}_8, \cdot)$ – это замкнутое относительно умножения и взятия обратной матрицы подмножество в $GL_2(\mathbb{C})$. Значит, $\overline{Q}_8$ – подгруппа. Тогда, по теореме 2, Q_8 – группа, изоморфная $\overline{Q}_8$. $\square$

Особый интерес представляют гомоморфизмы и изоморфизмы из группы в себя.

Определение 8. Гомоморфизм $\varphi: G \rightarrow G$ называется *эндоморфизмом*. Изоморфизм $\varphi: G \rightarrow G$ называется *автоморфизмом*.

Легко видеть, что композиция двух эндоморфизмов – это эндоморфизм, а композиция двух автоморфизмов – автоморфизм. Множество эндоморфизмов группы G с операцией композиции образует моноид $\text{End}(G)$ с нейтральным элементом id . Множество автоморфизмов группы G с операцией композиции образует группу $\text{Aut}(G)$.

Пусть g – элемент группы G . Рассмотрим отображение $\varphi_g: G \rightarrow G$, определенное по правилу $\varphi_g(h) = ghg^{-1}$.

Лемма 3. Отображение φ_g является автоморфизмом группы G .

Доказательство. Проверим, что φ_g – гомоморфизм:

$$\varphi_g(hf) = ghfg^{-1} = ghg^{-1}gfg^{-1} = \varphi_g(h)\varphi_g(f).$$

То, что φ_g – биекция следует из того, что существует обратное отображение. А именно, обратное к φ_g отображение – это $\varphi_{g^{-1}}$. $\square$

Автоморфизмы называются *внутренними*, если он имеет вид φ_g для некоторого $g \in G$.

Предложение 3. Множество внутренних автоморфизмов с операцией композиции образует подгруппу $\text{Inn}(G)$ в $\text{Aut}(G)$.

Доказательство. Докажем равенство $\varphi_g \circ \varphi_h = \varphi_{gh}$. Для этого применим этот гомоморфизм к элементу $s \in G$:

$$\varphi_g \circ \varphi_h(s) = \varphi_g(\varphi_h(s)) = \varphi_g(hsh^{-1}) = ghsh^{-1}g^{-1} = (gh)s(gh)^{-1} = \varphi_{gh}(s).$$

Из доказанного равенства следует замкнутость $\text{Inn}(G)$ относительно композиции. Кроме того $\text{id} = \varphi_e \in \text{Inn}(G)$. Осталось проверить, что $\text{Inn}(G)$ замкнуто относительно взятия обратного. Для этого заметим, что $\varphi_g \circ \varphi_{g^{-1}} = \varphi_e = \text{id}$. $\square$

ЛЕКЦИЯ 3

Предложение 4. Простые следствия из аксиом.

1) (Обобщенная ассоциативность) Пусть $(G, *)$ – полугруппа. И пусть $g_1, \dots, g_k \in G$. Тогда как бы ни были расставлены скобки в выражении $g_1 * g_2 * \dots * g_k$ результат будет одинаковым.

2) В моноиде есть единственная единица.

3) В группе для каждого элемента есть единственный обратный.

4) Пусть $(G, *)$ – группа. Пусть $a, b \in G$. Тогда если $a * b = e$, то $b = a^{-1}$. Аналогично если $b * a = e$, то $b = a^{-1}$.

5) Пусть $(G, *)$ – группа, $a, b \in G$. Тогда $(a * b)^{-1} = b^{-1} * a^{-1}$.

6) Пусть $(G, *)$ – группа, $g \in G$. Тогда $(g^{-1})^{-1} = g$.

Доказательство. 1) Докажем это утверждение индукцией по k .

База индукции $k = 3$. В этом случае обобщенная ассоциативность совпадает с ассоциативностью, то есть с аксиомой A1.

Шаг индукции. Предположим, что для $k < n$ данное утверждение уже доказано. Докажем его для $k = n$. Среди всех расстановок скобок есть стандартная (при ней действия выполняются слева-направо):

$$(\dots (g_1 * g_2) * g_3) * \dots * g_{n-1}) * g_n = g.$$

Достаточно доказать, что результат, который получается при произвольной расстановке скобок, совпадает с g . Фиксируем некоторую расстановку скобок. Для этой расстановки скобок есть последнее действие, которое дает операцию от двух скобок. Длинной скобки назовем количество g_i , входящих в нее. Обозначим длину правой скобки через s .

Случай 1 $s = 1$. Наша расстановка скобок имеет вид $(\dots) * g_n$. По предположению индукции в левой скобке можно расставить скобки произвольным образом. В том числе стандартным образом. Но тогда в целом мы получим стандартную расстановку скобок. Значит, результат при нашей расстановке скобок совпадает с результатом при стандартной расстановке скобок.

Случай 2 $s > 2$. Последнее действие при нашей фиксированной расстановке скобок имеет вид $(a) * (b)$. Длина скобки b меньше n . По предположению индукции можно считать, что в скобке b расстановка скобок стандартная. Таким образом, стандартная расстановка скобок в скобке b дает $b = d * g_n$. То есть $g = a * (d * g_n) = (a * d) * g_n$. По случаю 1 мы получаем, что в g можно расставить скобки стандартным образом.

2) Предположим, что в моноиде $(G, *)$ есть две единицы: e и s . Рассмотрим $e * s$. Поскольку e – единица, получаем $e * s = s$. С другой стороны так как s – единица, то $e * s = e$. Таким образом, $e = s$.

3) Пусть $(G, *)$ – группа. Предположим, что $g \in G$ – элемент, у которого есть хотя бы два обратных: f и h . Тогда $f = f * (g * h) = (f * g) * h = h$.

4) Пусть $a * b = e$. Рассмотрим операцию элемента a^{-1} и левой части и приравняем к операции элемента a^{-1} и правой части. (Домножим на a^{-1} слева.) Получим $a^{-1} * a * b = a^{-1} * e$. То есть $b = a^{-1}$.

Если $b * a = e$, то аналогично домножая слева на a^{-1} , получаем $b = a^{-1}$.

5) Обозначим $b^{-1} * a^{-1} = c$. Рассмотрим $(a * b) * c = (a * b) * (b^{-1} * a^{-1}) = a * (b * b^{-1}) * a^{-1} = a * e * a^{-1} = e$. Значит, $c = (a * b)^{-1}$.

6) $g^{-1} * g = e$, значит $g = (g^{-1})^{-1}$. $\square$

Теорема 3. 1) $\text{Aut}(\mathbb{Z}) \cong \mathbb{Z}_2$,

2) $\text{Aut}(\mathbb{Z}_n) \cong \mathbb{Z}_n^\times$.

Замечание 1. Напомним, что $\mathbb{Z}_n^\times$ – это группа обратимых по умножению элементов кольца вычетов $\mathbb{Z}_n$. Группа $\mathbb{Z}_n^\times$ состоит из вычетов взаимно простых с n . В частности, $|\mathbb{Z}_n^\times| = \varphi(n)$, где $\varphi(\cdot)$ – функция Эйлера.

Доказательство теоремы 3. 1) Пусть ψ – автоморфизм $\mathbb{Z}$. Тогда $\psi(0) = 0$. Пусть $\psi(1) = k$. Тогда

$$\psi(2) = \psi(1 + 1) = \psi(1) + \psi(1) = 2k,$$

$$\psi(3) = \psi(1 + 1 + 1) = \psi(1) + \psi(1) + \psi(1) = 3k,$$

и т.д. Аналогично $\psi(-1) = -k$, $\psi(-2) = \psi((-1) + (-1)) = -2k$. Получаем

$$\psi(m) = mk.$$

Однако при $k \neq \pm 1$ гомоморфизм ψ не будет сюръективен. При $k = 1$ и $k = -1$ получаем тождественное отображение и отображение $\{x \mapsto -x\}$. Легко видеть, что эти два автоморфизма с операцией композиции образуют группу, изоморфную $\mathbb{Z}_2$.

2) Аналогично случаю 1 любой гомоморфизм $\psi: \mathbb{Z}_n \rightarrow \mathbb{Z}_n$ имеет вид

$$\psi_k: m \mapsto km.$$

Если k не обратим, то в образе ψ_k не лежит 1, а значит, ψ_k не сюръективно. Если же k обратим, то для любого вычета l имеем $\psi_k(k^{-1}l) = l$. Следовательно, ψ_k сюръективно, а значит, так как множество $\mathbb{Z}_n$ конечно, гомоморфизм ψ_k – биекция.

Итак, $\text{Aut}(\mathbb{Z}_n)$ состоит из ψ_k для $k \in \mathbb{Z}_n^\times$. Докажем, что отображение

$$\zeta: \text{Aut}(\mathbb{Z}_n) \rightarrow \mathbb{Z}_n^\times, \quad \zeta(\psi_k) = k$$

является изоморфизмом. Это очевидно биекция, осталось проверить, что ζ – гомоморфизм. Это следует из равенства $\psi_k \circ \psi_m = \psi_{km}$, которое легко проверить. $\square$

Определение 9. Пусть $\varphi: G \rightarrow H$ – гомоморфизм групп. Ядром гомоморфизма φ называется множество

$$\text{Ker } \varphi = \{g \in G \mid \varphi(g) = e\} \subseteq G.$$

Образом гомоморфизма φ называется множество

$$\text{Im } \varphi = \{\varphi(g) \mid g \in G\} \subseteq H.$$

Поскольку $\varphi(e) = e$, нейтральный элемент всегда лежит в ядре.

Теорема 4. (Критерий инъективности гомоморфизма) Гомоморфизм $\varphi: G \rightarrow H$ инъективен тогда и только тогда, когда $\text{Ker } \varphi = \{e\}$.

Доказательство. Пусть $\text{Ker } \varphi \neq \{e\}$. Тогда существует $g \neq e$, $g \in \text{Ker } \varphi$. То есть $\varphi(g) = e = \varphi(e)$. Следовательно, гомоморфизм φ не инъективен.

Допустим, гомоморфизм φ не инъективен. Тогда $\varphi(g_1) = \varphi(g_2)$ для некоторых $g_1 \neq g_2 \in G$. Значит, $\varphi(g_1 g_2^{-1}) = \varphi(g_1) \varphi(g_2)^{-1} = e$. То есть $g_1 g_2^{-1} \in \text{Ker } \varphi$, но $g_1 g_2^{-1} \neq e$. Значит, $\text{Ker } \varphi \neq \{e\}$. $\square$

Определение 10. Пусть g – элемент группы G , а n – целое число. Определим n -ю степень элемента g следующим образом. Если n положительное, то $g^n = g \cdot \dots \cdot g$ – произведение n элементов g . Если n отрицательное, то $g^n = (g^{-1})^n$. Нулевая степень любого элемента равна нейтральному элементу e .

Упражнение 2. Выполнены следующие свойства степеней элемента группы:

$$1) g^m g^n = g^{m+n},$$

$$2) (g^m)^n = g^{mn}$$

Указание. Рассмотреть все случаи знаков m и n .

Определение 11. Пусть g – элемент группы G . Порядок g – это минимальное натуральное число n такое, что $g^n = e$. Если такого числа не существует, то порядок элемента g равен бесконечности. Порядок элемента g обозначается $\text{ord}(g)$.

Определение 12. Группа G называется *циклической*, если найдется элемент $g \in G$ такой, что каждый элемент G имеет вид g^k для некоторого целого числа k .

Элемент g называется *порождающим элементом группы G* , при этом группа G обозначается $\langle g \rangle$.

Замечание 2. В предыдущем определении не требуется, чтобы все степени g были различны.

Пример 5. а) Группа $\mathbb{Z}$ является циклической. В самом деле, $\mathbb{Z} = \langle 1 \rangle$.

б) Аналогично $\mathbb{Z}_n = \langle 1 \rangle$.