

ЛЕКЦИЯ 6

Предложение 1. Пусть $\varphi: G \rightarrow \tilde{G}$ – гомоморфизм. И пусть N – нормальная подгруппа в G . Тогда существует гомоморфизм $\xi: G/N \rightarrow \tilde{G}$ такой, что $\varphi = \xi \circ \pi_N$, тогда и только тогда, когда $\text{Ker } \varphi \supseteq N$.

Доказательство. Мы можем заменить $\tilde{G}$ на образ φ и считать, что гомоморфизм φ сюръективен. Тогда $\tilde{G} = \text{Im } \varphi \cong G/\text{Ker } \varphi$. Если $\text{Ker } \varphi \supseteq N$, то мы находимся в условии предыдущего следствия имея в виду соответствие $H = \text{Ker } \varphi$. Тогда по следствию выполнено $\tilde{G} \cong G/\text{Ker } \varphi \cong (G/N)/\pi_N(\text{Ker } \varphi)$. Обозначим изоморфизм $(G/N)/\pi_N(\text{Ker } \varphi) \rightarrow \tilde{G}$ через α . Тогда обозначим через ξ композицию канонического гомоморфизма $(G/N) \rightarrow (G/N)/\pi_N(\text{Ker } \varphi)$ и α . $\square$

Пример 1. Рассмотрим нормальные подгруппы $V_4 \subset A_4$ в S_4 . По предыдущему следствию получаем $S_4/A_4 \cong (S_4/V_4)(A_4/V_4)$. В самом деле, $S_4/A_4 \cong \mathbb{Z}_2$, $S_4/V_4 \cong S_3$ (см. пример из прошлой лекции), $|A_4/V_4| = 3$, а значит, $A_4/V_4 \cong \mathbb{Z}_3$. При этом $\pi_{V_4}(A_4) \cong \mathbb{Z}_3$ – подгруппа в S_3 , следовательно, $\pi_{V_4}(A_4) = A_3$. И мы получаем, что

$$(S_4/V_4)(A_4/V_4) \cong S_3/A_3 \cong \mathbb{Z}_2.$$

Пусть S – некоторое множество. Рассмотрим множество конечных слов от букв $s \in S$ и s^{-1} , где $s \in S$. (Так как на множестве S нет никакой операции, то s^{-1} – некий формальный символ. Мы считаем, что множества S и S^{-1} не пересекаются.) Также мы рассматриваем пустое слово $\emptyset$. Два слова назовем *эквивалентными*, если одно переводится в другое некой конечной цепочкой следующих элементарных преобразований:

- 1) Если в некотором месте есть пара подряд идущих букв ss^{-1} или $s^{-1}s$, то их можно убрать.
- 2) В любое место можно вписать пару ss^{-1} или $s^{-1}s$.

Конкатенацией двух слов называется операция приписывания одного слова к другому. Например, $(xux^{-1})(xzzx) = xux^{-1}xzzx$.

Лемма 1. Класс эквивалентности конкатенации слов из двух классов эквивалентности не зависит от выбора представителей в этих классах.

Доказательство. Пусть слово A эквивалентно слову B , а слово C эквивалентно слову D . Наша задача доказать, что слова AC и BD эквивалентны. Заметим, что мы можем делать с левой частью слова AC те же элементарные преобразования, что и со словом A и получим слово BC . Затем будем делать с правой частью BC те же элементарные преобразования, что и с C . Получим BD . $\square$

Определение 1. Свободной группой с множеством порождающих S называется множество классов эквивалентности конечных слов от букв $s \in S$ и s^{-1} , где $s \in S$ с операцией конкатенации. Обозначать эту группу мы будем $\mathfrak{F}(S)$.

Мощность $|S|$ называется *рангом* свободной группы $\mathfrak{F}(S)$.

Замечание 1. Легко видеть, что свободная группа действительно является группой. Ассоциативность конкатенации очевидна. Нейтральный элемент – класс пустого слова. Обратный элемент к каждому слову легко выписать.

Напомним, что слова называются эквивалентными, если от одного до другого можно добраться следующими элементарными преобразованиями: можно сокращать подряд идущие пары символов типа xx^{-1} или $x^{-1}x$, а также можно приписывать в любое место

слова пары символов xx^{-1} или $x^{-1}x$. Преобразования первого типа назовем *сокращениями*, а второго – *приписываниями*. Любое слово можно сокращениями привести к *несократимому виду*, то есть к виду, в котором нет подряд идущих сочетаний вида xx^{-1} и $x^{-1}x$.

Теорема 1. *В каждом классе эквивалентности есть только одно несократимое слово.*

Доказательство. Пусть есть два различных несократимых слова u и v , которые эквивалентны. Рассмотрим цепочку элементарных преобразований, переводящих u в v . Пусть в этой цепочке есть сокращение, идущее после приписывания. Докажем, что эту пару можно заменить либо на пару сокращение, а затем приписывание, либо убрать. В самом деле если ни один из сокращенных символов не совпадает с только что приписанными, то можно поменять эти две операции. Остается случай, когда было приписывание xx^{-1} , а затем сокращение, использующее один или оба из приписанных символов. Но тогда в результате этих двух операций слово не поменялось и можно эту пару убрать. Назовем такую замену одной пары другой (или убирание пары) перестройкой.

Для цепочки элементарных преобразований рассмотрим сумму позиций, на которых стоят сокращения. (То есть в цепочке "сокращение, приписывание, приписывание, сокращение, сокращение" сокращения стоят на 1, 4 и 5 местах и сумма равна 10.) При перестройке данная сумма уменьшается. Следовательно, не возможно бесконечное число перестроек и за конечное число перестроек мы достигнем цепочки, в которой сначала идут несколько сокращений, а затем несколько приписываний. Однако слово u несократимо. Значит, цепочка не могла начинаться с сокращений. Тогда она состоит только из приписываний. Но это противоречит несократимости слова v . $\square$

Теорема 2. *Пусть G группа с порождающими $g_1, \dots, g_k$. Существует единственный гомоморфизм из свободной группы $\mathfrak{F}(x_1, \dots, x_k)$ ранга k в группу G такой, что $\varphi(x_i) = g_i$. Гомоморфизм φ сюръективен.*

Доказательство. Пусть φ переводит класс слова $x_{i_1}^{\varepsilon_1} x_{i_2}^{\varepsilon_2} \dots x_{i_m}^{\varepsilon_m}$, $\varepsilon_j = \pm 1$, в

$$g = g_{i_1}^{\varepsilon_1} g_{i_2}^{\varepsilon_2} \dots g_{i_m}^{\varepsilon_m} \in G.$$

Чтобы проверить корректность определения, нужно доказать, что g не зависит от выбора представителя в классе. Если два слова отличаются элементарным преобразованием, то в одном из них есть "дополнительное" $x_i x_i^{-1}$, которое переходит в $g_i g_i^{-1} = e$. Это не меняет образ. То, что φ – гомоморфизм и $\varphi(x_i) = g_i$ очевидно. Сюръективность следует из того, что G порождается $g_1, \dots, g_k$. $\square$

Определение 2. Пусть M – некоторое подмножество группы G . Нормальное замыкание M – это наименьшая по включению нормальная $N(M)$ в G подгруппа, содержащая M .

Легко видеть, что пересечение нормальных подгрупп – это нормальная подгруппа. Из этого следует, что наименьшая нормальная подгруппа, содержащая M существует.

Лемма 2. *Подгруппа $N(M)$ совпадает с подгруппой, порожденной элементами gtg^{-1} для всех $t \in M, g \in G$.*

Доказательство. Поскольку $N(M)$ – нормальная подгруппа и $M \subset N(M)$, получаем $gtg^{-1} \in N(M)$, а значит, $\langle gtg^{-1} \mid g \in G, t \in M \rangle \subset N(M)$. С другой стороны $\langle gtg^{-1} \mid$

$g \in G, m \in M$ – это нормальная подгруппа. В самом деле, $(gmg^{-1})^{-1} = gm^{-1}g^{-1}$. А значит, любой элемент $\langle gmg^{-1} \mid g \in G, m \in M \rangle$ имеет вид

$$(g_1 m_1^{\varepsilon_1} g_1^{-1}) \dots (g_k m_k^{\varepsilon_k} g_k^{-1}) \quad \varepsilon_j = \pm 1.$$

При этом

$$\begin{aligned} g(g_1 m_1^{\varepsilon_1} g_1^{-1}) \dots (g_k m_k^{\varepsilon_k} g_k^{-1}) g^{-1} = \\ = (gg_1 m_1^{\varepsilon_1} g_1^{-1} g^{-1})(gg_2 m_2^{\varepsilon_2} g_2^{-1} g^{-1}) \dots (gg_k m_k^{\varepsilon_k} g_k^{-1} g^{-1}) \in \langle gmg^{-1} \mid g \in G, m \in M \rangle. \end{aligned}$$

□