

О. А. Иванова, Д. И. Молдаванский

Аппроксимируемость конечными π -группами некоторых групп с одним определяющим соотношением

Для произвольной группы с одним определяющим соотношением, входящей в семейство групп Баумслэга – Солитэра и являющейся метабелевой, указаны все одно- и двухэлементные минимальные множества π простых чисел такие, что эта группа аппроксимируема конечными π -группами.

§ 1. Введение. Формулировка результатов

Напомним, что группа G называется аппроксимируемой группами из некоторого класса \mathbf{K} (или \mathbf{K} -аппроксимируемой), если для любого неединичного элемента $g \in G$ существует такой гомоморфизм группы G на некоторую группу из класса \mathbf{K} , образ элемента g относительно которого отличен от единицы. В случае, когда \mathbf{K} совпадает с классом \mathbf{F} всех конечных групп, такая группа называется финитно аппроксимируемой. Естественно возникает вопрос нахождения всех минимальных множеств π простых чисел таких, что данная финитно аппроксимируемая группа является \mathbf{F}_π -аппроксимируемой (где \mathbf{F}_π – класс всех конечных π -групп; если π состоит из единственного простого числа p , будем писать \mathbf{F}_p вместо \mathbf{F}_π).

Очевидно, что свойство финитной аппроксимируемости группы совпадает со свойством \mathbf{F}_π -аппроксимируемости, где π состоит из всех простых чисел, и существуют примеры финитно аппроксимируемых групп, не являющихся \mathbf{F}_π -аппроксимируемыми при любом собственном подмножестве π множества всех простых чисел. Простейшим таким примером служит прямое произведение счетного семейства групп C_1, C_2, \dots , где C_n – конечная циклическая группа порядка n , а из результатов работы [1] следует и существование конечно порожденной группы с аналогичным свойством. С другой стороны, известны и примеры

противоположного характера. Так, произвольная свободная группа F_p -аппроксимируема для любого простого числа p , и, следовательно, для свободных групп все минимальные множества π с указанным свойством являются одноэлементными.

В данной работе с этой точки зрения рассматривается семейство групп с одним определяющим соотношением, входящих в известное семейство групп Баумслэга – Солитэра, а именно – семейство групп вида

$$G_k = \langle a, b; a^{-1}ba = b^k \rangle,$$

где k – произвольное целое число, отличное от нуля. Хорошо известно, что все эти группы финитно аппроксимируемы [2] и что группа G_k является F_p -аппроксимируемой тогда и только тогда, когда число $k-1$ делится на p [3]. Первым результатом данной работы является следующий критерий F_π -аппроксимируемости группы G_k :

Теорема 1. Пусть π – произвольное множество простых чисел. Группа G_k F_π -аппроксимируема тогда и только тогда, когда существует π -число $s > 1$, взаимно простое с k , порядок по модулю которого числа k также является π -числом.

Упомянутый выше критерий F_p -аппроксимируемости группы G_k является непосредственным следствием теоремы 1. Из этого критерия следует, очевидно, что если в множество π входит хотя бы один простой делитель числа $k-1$, то группа G_k F_π -аппроксимируема. Условия F_π -аппроксимируемости группы G_k конечными π -группами, для двухэлементного множества π , не содержащего делителей числа $k-1$, доставляет доказываемая с помощью теоремы 1

Теорема 2. Пусть $\pi = \{p, q\}$, где простые числа p и q таковы, что $p < q$ и каждое из них не является делителем числа $k-1$. Группа G_k F_π -аппроксимируема тогда и только тогда

, когда $(k, q) = 1$, p делит $q - 1$ и порядок числа k по модулю q является p -числом.

Формулировка теоремы 2 оставляет открытым вопрос, для каких целых чисел k действительно существуют простые числа p и q , удовлетворяющие ее условиям. Очевидно, что таких чисел нет при $k = 1$. Более того, группа G_1 является свободной абелевой и потому F_p -аппроксимируема при любом простом p . Легко понять также, что для любого множества π группа G_{-1} является F_π -аппроксимируемой в точности тогда, когда множество π содержит число 2. Действительно, если G_{-1} F_π -аппроксимируема, то в силу теоремы 1 для подходящих π -чисел r и $s > 1$ должно выполняться сравнение $(-1)^r \equiv 1 \pmod{s}$, невозможное, если оба числа r и s нечетны. Таким образом, при $k = \pm 1$ двухэлементного множества π , удовлетворяющего условиям теоремы 2, не существует. В остальных случаях имеет место

Теорема 3. Если $|k| > 1$, то для любого простого числа p , не делящего число $k - 1$, существует простое число q , не делящее $k - 1$ и такое, что группа G_k F_π -аппроксимируема при $\pi = \{p, q\}$.

Из этих результатов получается следующее описание состоящих из не более двух элементов минимальных множеств π простых чисел, для которых группа G_k является F_π -аппроксимируемой:

если $k = 1$, то все одноэлементные множества обладают требуемым свойством, и других минимальных множеств нет;

если $k = -1$, то единственным минимальным является множество $\pi = \{2\}$;

если $|k| > 1$, то все одноэлементные минимальные множества имеют вид $\pi = \{p\}$, где p — произвольный простой делитель числа $k - 1$, и для любого простого числа, не делящего $k - 1$,

существует двухэлементное минимальное множество, содержащее это число.

В частности, при $k = 2$ одноэлементных минимальных множеств не существует, и произвольное простое число входит в некоторое двухэлементное минимальное множество. Заметим также, что поскольку число 2 является примитивным корнем по модулю 29, т. е. порядок числа 2 по модулю 29 равен 28, в силу теоремы 1 группа G_2 является F_π -аппроксимируемой, где $\pi = \{2, 7, 29\}$. Более того, поскольку порядок числа по модулю 7 равен 3, из теоремы 2 следует, что это множество для группы G_2 является минимальным. В общем случае вопрос об описании минимальных множеств с числом элементов, большим 2, остается открытым.

§ 2. Доказательство теоремы 1

Необходимость условия в теореме 1 почти очевидна. В самом деле, если для некоторого множества π простых чисел группа $G_k = \langle a, b; a^{-1}ba = b^k \rangle$ является F_π -аппроксимируемой, то поскольку ее элемент b отличен от единицы, найдется гомоморфизм φ группы G_k на конечную π -группу такой, что $b\varphi \neq 1$. Обозначим порядки элементов $a\varphi$ и $b\varphi$ через r и s соответственно. Тогда r и s являются π -числами, причем $s > 1$. Непосредственной индукцией проверяется, что для любого целого числа $t \geq 0$ в группе G_k выполнено равенство $a^{-t}ba^t = b^{k^t}$. Переходя к φ -образам и полагая $t = r$, имеем $b\varphi = (b\varphi)^{k^r}$, откуда $k^r \equiv 1 \pmod{s}$. Следовательно, порядок числа k по модулю s делит r и потому является π -числом. Поскольку, к тому же, числа r и s являются, очевидно, взаимно простыми, число s искомое.

Докажем достаточность условия. Для произвольной пары положительных целых чисел r и s , удовлетворяющих сравнению $k^r \equiv 1 \pmod{s}$, обозначим через $G_k(r, s)$ фактор-группу группы

G_k по нормальному замыканию элементов a^r и b^s , а через φ_{rs} – естественный гомоморфизм группы G_k на группу $G_k(r, s)$. Хорошо известно (см., напр., [5, с. 31]), что произвольный элемент группы $G_k(r, s)$ однозначно представим в виде $a^i b^j$, где $0 \leq i < r, 0 \leq j < s$. В частности, порядок группы $G_k(r, s)$ равен rs , а порядки ее элементов a и b равны r и s соответственно. Таким образом, если r и s – π -числа, то группа $G_k(r, s)$ является конечной π -группой.

Пусть Ω – некоторое множество пар (r, s) положительных целых чисел таких, что $k^r \equiv 1 \pmod{s}$. Утверждается, что если обе проекции множества Ω бесконечны, то группа G_k аппроксимируема семейством групп $G_k(r, s)$, где $(r, s) \in \Omega$.

В самом деле, пусть g – произвольный неединичный элемент группы G_k . Легко видеть, что элемент g может быть представлен в виде $g = a^m b^t a^{-n}$, для подходящих целых чисел $m \geq 0$, $n \geq 0$ и t . Следовательно, заменяя его сопряженным, мы можем без потери общности считать, что наш элемент имеет вид $g = a^u b^v$ для подходящих целых u и v . Поскольку хотя бы одно из этих чисел отлично от нуля, из предположения относительно множества Ω следует существование пары $(r, s) \in \Omega$ такой, что или u не делится на r , или v не делится на s . Очевидно, что тогда $g\varphi_{rs} \neq 1$, и наше утверждение доказано.

Для произвольного множества π простых чисел обозначим через $\Omega(\pi)$ множество всех пар (r, s) положительных целых π -чисел, удовлетворяющих сравнению $k^r \equiv 1 \pmod{s}$. Ввиду предыдущего замечания, для завершения доказательства теоремы 1 достаточно показать, что если множество $\Omega(\pi)$ содержит

хотя бы одну пару (r, s) с $s > 1$, то обе проекции этого множества бесконечны.

Поскольку из сравнения $k^r \equiv 1 \pmod{s}$ при любом целом $n > 0$ следует сравнение $k^{rn} \equiv 1 \pmod{s}$, бесконечность первой проекции множества $\Omega(\pi)$ очевидна.

Пусть $(r, s) \in \Omega(\pi)$, где $s > 1$, и пусть p – простой делитель числа s . Так как тогда $p \in \pi$ и из сравнения $k^r \equiv 1 \pmod{p}$ следует сравнение $k^{rp^n} \equiv 1 \pmod{p^{n+1}}$, то для любого целого положительного π -числа n имеем $(rp^n, p^{n+1}) \in \Omega(\pi)$, что и доказывает бесконечность второй проекции множества $\Omega(\pi)$.

Теорема 1 доказана. Частным случаем этой теоремы является упомянутый выше результат из работы [3]:

Следствие. Для любого простого числа p группа G_k является F_p -аппроксимируемой тогда и только тогда, когда p делит число $k-1$.

Действительно, если группа G_k F_p -аппроксимируема, то в силу теоремы 1 для некоторых целых чисел m и $n > 0$ имеет место сравнение $k^{p^m} \equiv 1 \pmod{p^n}$ и потому $k^{p^m} \equiv 1 \pmod{p}$. Поскольку тогда $(k, p) = 1$, по теореме Ферма имеем также $k^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$. Так как числа p^m и $p-1$ взаимно просты, из последних двух сравнений следует, что $k \equiv 1 \pmod{p}$. Обратно, если $k \equiv 1 \pmod{p}$, то множество $\pi = \{p\}$ и число $s = p$ удовлетворяют условиям теоремы 1.

§ 3. Доказательство теорем 2 и 3

Достаточность условий в теореме 2 вытекает, очевидно, непосредственно из теоремы 1. Для доказательства необходимости предположим, что группа G_k F_π -аппроксимируема, где мно-

жество π состоит из простых чисел p и q , $p < q$, не делящих числа $k-1$. По теореме 1 существуют π -числа r и $s > 1$, удовлетворяющие сравнению $k^r \equiv 1 \pmod{s}$.

Покажем, прежде всего, что число s не делится на p и потому является q -числом. Действительно, если $p \mid s$, то выполнено сравнение $k^r \equiv 1 \pmod{p}$. Так как числа r и $p-1$ взаимно просты, отсюда и из сравнения $k^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$ следует, что $k \equiv 1 \pmod{p}$, что противоречит условию теоремы.

Теперь легко понять, что числа p и q удовлетворяют требованиям теоремы. Взаимная простота чисел k и q очевидна. Кроме того, поскольку имеет место сравнение $k^r \equiv 1 \pmod{q}$, порядок числа k по модулю q делит r и потому является π -числом. Но так как $k^{q-1} \equiv 1 \pmod{q}$, порядок числа k по модулю q делит число $q-1$ и потому взаимно прост с q . Таким образом, порядок числа k по модулю q является p -числом, и теорема 2 доказана.

Для доказательства теоремы 3 фиксируем простое число p , не являющееся делителем числа $k-1$. Пусть $S_n(x)$ обозначает многочлен $x^{n-1} + x^{n-2} + \dots + x + 1$.

Покажем, что если простое число q не делит число $k-1$ и является делителем числа $S_{p^m}(k)$ для некоторого $m \geq 1$, то числа p и q удовлетворяют требованиям теоремы 2.

Действительно, взаимная простота чисел k и q очевидна. Поскольку число $k^{p^m} - 1 = (k-1)S_{p^m}(k)$ делится на q , порядок числа k по модулю q является p -числом. Из сравнения $k^{q-1} \equiv 1 \pmod{q}$, следует, что порядок числа k по модулю q должен делить и число $q-1$, и так как $k-1$ не делится на q , число $q-1$ делится на p .

Покажем теперь, что при наших предположениях каждый простой делитель числа $S_{p^m}(k)$ не является делителем $k-1$.

Действительно, если для простого числа q выполнены сравнения $S_{p^m}(k) \equiv 0 \pmod{q}$ и $k \equiv 1 \pmod{q}$, то поскольку тогда из второго сравнения следует, что $S_{p^m}(k) \equiv p^m \pmod{q}$, число p^m должно делиться на q . Отсюда $p=q$, что невозможно в силу выбора числа p .

Итак, нам остается заметить, что при $k \neq \pm 1$ абсолютная величина числа $S_{p^m}(k)$ отлична от единицы для некоторого $m \geq 1$. В самом деле, элементарные рассуждения показывают, что если $k \neq -2$ или $p \neq 2$, то уже $S_p(k) \neq \pm 1$. Поскольку $S_{2^2}(-2) = -5$, доказательство теоремы 3 закончено.

Библиографический список

1. *Wilson John S.* Embedding theorems for residually finite groups // *Math. J.* 1980. 174. №2. p. 149–157.
2. *Baumslag G., Solitar D.* Some two-generator one-relator non-Hopfian groups. *Bull. Amer. Math. Soc.* 1962. Vol. 68. P. 199–201.
3. *Молдаванский Д. И.* Аппроксимируемость конечными p -группами HNN-расширений. *Вестн. Иван. гос. ун-та.* 2000. Вып. 3. С. 129–140.
4. *Магнус В., Каррас А., Солитар Д.* Комбинаторная теория групп. М.: Наука, 1974. 455 с.