

Лекция 7

Лемма 2.5. Пусть π — топологически неприводимое представление C^* -алгебры A в гильбертовом пространстве H . Тогда для любых $t \in \mathbb{B}(H)$, конечномерного подпространства $L \subset H$ и $\varepsilon > 0$ найдется такой $a \in A$, что $\pi(a)|_L = t|_L$ и $\|a\| \leq \|t\| + \varepsilon$.

Доказательство. По предыдущей лемме, найдется такой элемент $a_0 \in A$, что $\|a_0\| \leq \|t\|$ и $\|(\pi(a_0) - t)|_L\| < \varepsilon/2$. По индукции можем найти для каждого n такой элемент $a_n \in A$, что $\|a_n\| \leq 2^{-n}\varepsilon$ и $\|(\sum_{k=0}^n \pi(a_k) - t)|_L\| < 2^{-n-1}\varepsilon$. Действительно, предположим, что элементы найдены для некоторого n и всех меньших. Применяя предыдущую лемму к $s = -\sum_{k=0}^n \pi(a_k) + t$, тому же подпространству L и $2^{-n-2}\varepsilon$, находим такой элемент a_{n+1} , что $\|a_{n+1}\| \leq 2^{-n-1}\varepsilon$ и $\|(\sum_{k=0}^{n+1} \pi(a_k) - t)|_L\| < 2^{-n-2}\varepsilon$. Теперь положим $a = \sum_{k=0}^{\infty} a_k$. Тогда $a \in A$ и очевидно, что $\|a\| \leq \|t\| + \varepsilon$ и $a|_L = t|_L$. \square

Теорема 2.6. Всякое топологически неприводимое представление C^* -алгебры является алгебраически неприводимым.

Доказательство. Предположим противное. Пусть $V \subset H$ — незамкнутое инвариантное пространство, а \bar{V} — его замыкание. Оно тоже является инвариантным подпространством (так как действие непрерывно), так что $\bar{V} = H$. Возьмем $\eta \in H \setminus V$, для определенности нормы 1. Пусть $\xi \in V$ — ненулевой вектор, а t — такой оператор в H , что $t\xi = \eta$. Тогда по предыдущей лемме найдется такой $a \in A$, что $\pi(a)\xi = \eta$. Противоречие с инвариантностью V . \square

2.2 Положительные линейные функционалы

Определение 2.7. Линейный функционал (пока не требуем непрерывности, см. лемму 2.10 ниже) φ на C^* -алгебре A называется *положительным*, если $\varphi(a) \geq 0$ для любого $a \geq 0$. Если положительный линейный функционал непрерывен и имеет норму 1, то он называется *состоянием*.

Пример 2.8. Если π — представление A в гильбертовом пространстве H , а $\xi \in H$, то функционал $\varphi(a) := (\xi, \pi(a)\xi)$ является положительным. Если у A имеется единица и $\|\xi\| = 1$, то такое φ является состоянием.

С каждым положительным линейным функционалом φ можно связать полуторалинейную форму на A , заданную формулой $\langle a, b \rangle := \varphi(a^*b)$, то есть форма $\langle \cdot, \cdot \rangle$ линейна по второму аргументу, сопряженно линейна по первому аргументу. По определению положительности функционала $\langle a, a \rangle = \varphi(a^*a) \geq 0$ для любого $a \in A$. Поэтому по следующей лемме она эрмитово симметрична: $\langle b, a \rangle = \overline{\langle a, b \rangle}$.

Лемма 2.9 (из курса линейной алгебры). Если у полуторалинейной формы $\langle a, a \rangle \in \mathbb{R}$ для любого a , то она эрмитово симметрична.

Доказательство. Запишем поляризационные тождества

$$\langle a + b, a + b \rangle = \langle a, a \rangle + \langle a, b \rangle + \langle b, a \rangle + \langle b, b \rangle, \quad (2.1)$$

$$\langle a + ib, a + ib \rangle = \langle a, a \rangle + \langle a, ib \rangle + \langle ib, a \rangle + \langle ib, ib \rangle = \langle a, a \rangle + i(\langle a, b \rangle - \langle b, a \rangle) + \langle b, b \rangle. \quad (2.2)$$

Из первого получаем, что $\langle a, b \rangle + \langle b, a \rangle$ является вещественным, а из второго — что $\langle a, b \rangle - \langle b, a \rangle$ является мнимым. Значит, $\overline{\langle a, b \rangle} = \langle b, a \rangle$. \square

Таким образом, $\langle a, b \rangle$ — положительная эрмитова форма и, значит, для нее выполняется неравенство Коши-(Шварца-Буняковского): $|\langle a, b \rangle|^2 \leq \langle a, a \rangle \langle b, b \rangle$, то есть $|\varphi(a^*b)|^2 \leq \varphi(a^*a)\varphi(b^*b)$.

Лемма 2.10. *Положительные линейные функционалы непрерывны. Если u_λ — аппроксимативная единица в A , то $\|\varphi\| = \lim_{\lambda \in \Lambda} \varphi(u_\lambda)$. В частности, если A имеет единицу, то $\|\varphi\| = \varphi(1)$.*

Доказательство. Рассмотрим сначала унитарный случай. Если $0 \leq a \leq 1$, то, поскольку φ положителен, получаем, что $0 \leq \varphi(a) \leq \varphi(1)$. Для $x \in A$ с $\|x\| \leq 1$ имеем $0 \leq x^*x \leq 1$, так что $|\varphi(x)|^2 = |\varphi(1 \cdot x)|^2 \leq \varphi(1) \cdot \varphi(x^*x) \leq \varphi(1)^2$ по неравенству Коши-Шварца-Буняковского. Значит, $\|\varphi\| \leq \varphi(1) \leq \|\varphi\|$.

Теперь рассмотрим неунитарный случай. Предположим, что φ не ограничен на единичном шаре A . Тогда он не ограничен на подмножестве единичного шара, состоящем из положительных элементов (поскольку любой элемент a разлагается в линейную комбинацию из четырех положительных элементов с нормами, не превосходящими $\|a\|$, см. (1.7)). Таким образом, для каждого $k \in \mathbb{N}$ существует такой положительный элемент $a_k \in A$, что $\|a_k\| \leq 1$ и $\varphi(a_k) > 2^k$. Положим $a := \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{2^k} \in A$. Тогда для любого $n \in \mathbb{N}$ имеем $a \geq \sum_{k=1}^n \frac{a_k}{2^k}$ и

$$\varphi(a) \geq \varphi\left(\sum_{k=1}^n \frac{a_k}{2^k}\right) = \sum_{k=1}^n \frac{\varphi(a_k)}{2^k} > n,$$

что невозможно. Таким образом, φ ограничен и в неунитарном случае.

Положим $m := \lim_{\lambda \in \Lambda} \varphi(u_\lambda^2)$, причем предел существует, поскольку направленность является возрастающей и ограниченной $\|\varphi\|$ сверху. Тогда, для любого $x \in A$ с $\|x\| \leq 1$ имеем $|\varphi(x)| = \lim_{\lambda \in \Lambda} |\varphi(u_\lambda x)|$ в силу непрерывности φ . Поэтому, по неравенству Коши-Шварца-Буняковского имеем $|\varphi(x)|^2 \leq \varphi(u_\lambda^2)\varphi(x^*x) \leq m\|\varphi\|$. Для любого $\varepsilon > 0$ выберем такой элемент $x \in A$, что $\|\varphi\|^2 < |\varphi(x)|^2 + \varepsilon$. Тогда $\|\varphi\|^2 < m\|\varphi\| + \varepsilon$. Следовательно, $\|\varphi\|^2 \leq m\|\varphi\|$ и $\|\varphi\| \leq m$. Поскольку для любого $\varepsilon > 0$ имеется u_{λ_0} , для которого $\varphi(u_{\lambda_0}^2) > m + \varepsilon$, то приходим к равенству $\|\varphi\| = m$. Поскольку $m \leq \lim_{\lambda \in \Lambda} \varphi(u_\lambda) \leq \|\varphi\| = m$, то $\lim_{\lambda \in \Lambda} \varphi(u_\lambda) = \|\varphi\|$. \square

Следствие 2.11. *Если φ — состояние на C^* -алгебре с единицей, то $\varphi(1) = 1$.*

Доказательство. По предыдущей лемме, $1 = \|\varphi\| = \varphi(1)$. \square

2.3 ГНС-конструкция (Гельфанд-Наймарк-Сегал)

Определение 2.12. Вектор $\xi \in H$ называется *циклическим* для $\pi : A \rightarrow \mathbb{B}(H)$, если $\pi(A)\xi$ плотно в H .

Теорема 2.13. Пусть φ — положительный линейный функционал на C^* -алгебре A . Тогда найдутся такие представление π_φ алгебры A в гильбертовом пространстве H и циклический вектор $\xi_\varphi \in H$, что $\|\xi_\varphi\|^2 = \|\varphi\|$ и $(\xi_\varphi, \pi_\varphi(a)\xi_\varphi) = \varphi(a)$ для всех $a \in A$.

Доказательство. Пусть $N := \{a \in A : \varphi(a^*a) = 0\}$. Тогда $N = \{a \in A : \varphi(b^*a) = 0 \text{ для всех } b \in A\}$ по неравенству Коши-Шварца-Буняковского. Поэтому N замкнуто как пересечение ядер непрерывных функционалов $a \mapsto \varphi(b^*a)$. Кроме того, N — левый идеал, поскольку $\varphi(b^*an) = \varphi((a^*b)^*n) = 0$ для любых $a, b \in A$ при $n \in N$, так что $an \in N$.

Определим эрмитово скалярное произведение на банаховом фактор-пространстве A/N формулой $(\dot{a}, \dot{b}) = \varphi(a^*b)$, где через \dot{a} обозначен класс смежности $a + N$. Это произведение корректно определено, поскольку, если $n_1, n_2 \in N$, то $\varphi((a + n_1)^*(b + n_2)) = \varphi(a^*b) + \varphi((a + n_1)^*n_2) + \overline{\varphi(b^*n_1)} = \varphi(a^*b)$. Также выполняется $(\dot{a}, \dot{a}) > 0$ при $\dot{a} \neq 0$. Пусть H — гильбертово пространство, полученное из A/N пополнением по норме, заданной этим скалярным произведением. Обозначим через π_0 представление A в A/N (тут мы несколько расширяем понятие представления на предгильбертово пространство) по формуле $\pi_0(a)\dot{x} = (ax)^\cdot$, где $\dot{x} \in A/N$. Если $n \in N$, то $(a(x + n))^\cdot = (ax)^\cdot$, так что π_0 корректно определено. Оно является инволютивным, поскольку $(\pi_0(a)\dot{x}, \dot{y}) = \varphi((ax)^*y) = \varphi(x^*(a^*y)) = (\dot{x}, \pi_0(a^*)\dot{y}) = (\pi_0(a^*)^*\dot{x}, \dot{y})$ и $\pi_0(a^*)^* = \pi_0(a)$. При этом $\|\pi_0\| \leq 1$. Действительно,

$$\begin{aligned} \|\pi_0(a)\|^2 &= \sup_{\|\dot{x}\| \leq 1} \|\pi_0(a) \cdot \dot{x}\|^2 = \sup_{\|\dot{x}\| \leq 1} \varphi(x^*a^*ax) \leq \\ &\leq \sup_{\|\dot{x}\| \leq 1} \|a^*a\|\varphi(x^*x) \leq \|a\|^2. \end{aligned}$$

Поэтому π_0 продолжается по непрерывности до представления π_φ алгебры A в H .

Если алгебра A унитарна, то положим $\xi_\varphi := \dot{1}$. Тогда $(\xi_\varphi, \pi_\varphi(a)\xi_\varphi) = \varphi(a)$ и ξ_φ является циклическим, поскольку $\pi_\varphi(A)\xi_\varphi = A/N$ плотно в H . Наконец, $\|\varphi\| = \varphi(1) = \|\xi_\varphi\|^2$.

Для алгебры A общего вида рассмотрим ее аппроксимативную единицу u_λ . Покажем, что \dot{u}_λ является направленностью Коши. Выберем $\varepsilon > 0$. Тогда найдется такой индекс $\alpha \in \Lambda$, что $\varphi(u_\alpha) > \|\varphi\| - \varepsilon$ (поскольку $\|\varphi\| = \lim_{\lambda \in \Lambda} \varphi(u_\lambda)$ по лемме 2.10). Теперь найдем такой индекс $\beta \in \Lambda$, что $\beta \geq \alpha$ и $\|u_\lambda u_\alpha - u_\alpha\| < \varepsilon$ для любого $\lambda \geq \beta$. Тогда

$$\operatorname{Re}(\varphi(u_\lambda u_\alpha)) = \varphi(u_\alpha) + \operatorname{Re}(\varphi(u_\lambda u_\alpha - u_\alpha)) > \|\varphi\| - 2\varepsilon.$$

Поэтому

$$\begin{aligned} \|\dot{u}_\lambda - \dot{u}_\alpha\|^2 &= \varphi((u_\lambda - u_\alpha)^2) = \varphi(u_\lambda^2) + \varphi(u_\alpha^2) - 2\operatorname{Re}(\varphi(u_\lambda u_\alpha)) \leq \\ &\leq \varphi(u_\lambda^2) + \varphi(u_\alpha^2) - 2(\|\varphi\| - 2\varepsilon) \leq 4\varepsilon. \end{aligned}$$

Значит, при $\lambda, \mu \geq \beta$, имеем

$$\|\dot{u}_\lambda - \dot{u}_\mu\| \leq \|\dot{u}_\lambda - \dot{u}_\alpha\| + \|\dot{u}_\alpha - \dot{u}_\mu\| \leq 4\varepsilon^{1/2}.$$

Таким образом, \dot{u}_λ — направленность Коши. Пусть $\xi_\varphi := \lim_{\lambda \in \Lambda} \dot{u}_\lambda \in H$. Тогда $(\xi_\varphi, \pi_\varphi(a)\xi_\varphi) = \lim_{\lambda \in \Lambda} \varphi(u_\lambda a u_\lambda) = \varphi(a)$. Поскольку $\pi_\varphi(A)\xi_\varphi = A/N$, то ξ_φ — циклический. Из $\dot{a} = \pi_\varphi(a)\xi_\varphi$ следует, что

$$\lim_{\lambda \in \Lambda} \pi_\varphi(u_\lambda)\dot{a} = \lim_{\lambda \in \Lambda} \pi_\varphi(u_\lambda)\pi_\varphi(a)\xi_\varphi = \pi_\varphi(a)\xi_\varphi = \dot{a}$$

для любого $\dot{a} \in A/N$, так что направленность $\pi_\varphi(u_\lambda)$ сильно сходится к 1. Поэтому $\|\varphi\| = \lim_{\lambda \in \Lambda} \varphi(u_\lambda) = \lim_{\lambda \in \Lambda} (\xi_\varphi, \pi_\varphi(u_\lambda)\xi_\varphi) = \|\xi_\varphi\|^2$. \square

2.4 Реализация C^* -алгебр как операторных алгебр в гильбертовом пространстве

Следствие 2.14. *Любое состояние φ на C^* -алгебре A без единицы допускает единственное продолжение до состояния на A^+ .*

Доказательство. Пусть π_φ — представление A , заданное ГНС-конструкцией. Положим $\pi_\varphi(1) = 1$. Тогда π_φ продолжается до представления A^+ и $\tilde{\varphi}(a) := (\xi_\varphi, \pi(a)\xi_\varphi)$ является состоянием. Оно единственно, поскольку должно выполняться $\tilde{\varphi}(1) = 1$ (следствие 2.11). \square

Задача 45. Пусть u_λ , $\lambda \in \Lambda$, — некоторая аппроксимативная единица в унитарной алгебре. Доказать, что $1 = \lim_{\lambda \in \Lambda} u_\lambda$.

Лемма 2.15. *Пусть $\varphi : A \rightarrow \mathbb{C}$ — такой непрерывный линейный функционал, что $\|\varphi\| = 1 = \lim_{\lambda \in \Lambda} \varphi(u_\lambda)$ для некоторой аппроксимативной единицы u_λ . Тогда φ — состояние.*

Доказательство. Сначала сведем доказательство к унитарному случаю. Пусть $\tilde{\varphi}$ — некоторое продолжение (по теореме Хана-Банаха) функционала φ до непрерывного функционала на A^+ . Пусть $\tilde{\varphi}(1) =: \alpha$. Поскольку $\|\tilde{\varphi}\| = 1$, то $|\alpha| \leq 1$. Из неравенства $\|2u_\lambda - 1\| \leq 1$ следует, что $|2 - \alpha| = \lim_{\lambda \in \Lambda} |\varphi(2u_\lambda - 1)| \leq 1$. Таким образом, $\alpha = 1$. Значит, можем считать, что A унитарна и $\varphi(1) = 1$ (если A с самого начала была унитарной, то пользуемся задачей 45).

Покажем теперь, что $\varphi(a) \in \mathbb{R}$, если $a = a^*$ (а значит, содержится в $[-\|a\|, \|a\|]$). Пусть a — самосопряженный элемент нормы 1. Тогда $\|a \pm in\|^2 = \|a^2 + n^2\|^2 = n^2 + 1$, так что $|\varphi(a) \pm in| \leq \sqrt{n^2 + 1}$ для любого $n \in \mathbb{N}$. Значит, $\varphi(a)$ содержится в пересечении всех дисков с центрами в $\pm in$ и радиусов $\sqrt{n^2 + 1}$. Это пересечение равно вещественному интервалу $[-1, 1]$.

Если $0 \leq a \leq 1$, то $\|2a - 1\| \leq 1$. Применяя предыдущее рассуждение к самосопряженному элементу $2a - 1$, получаем, что $-1 \leq 2\varphi(a) - 1 \leq 1$, так что $\varphi(a) \geq 0$ и φ является положительным. \square