

ПОВЕДЕНИЕ ПУЧКА В НАКОПИТЕЛЕ ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ ДВУХ РЕЗОНАНСОВ БЕТАТРОННЫХ КОЛЕБАНИЙ*

Г. Н. КУЛИПАНОВ, С. И. МИШНЕВ, А. Н. СКРИНСКИЙ

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

Вопрос о взаимодействии резонансов в нелинейных системах интересен как с теоретической, так и с практической стороны. Теоретически он интересен потому, что именно здесь, возможно, лежит переход от классической теории колебаний к статистической механике [1], практически — в связи с задачей устойчивости движения частиц, в накопителях, магнитных ловушках и т. д. В данной работе проведено экспериментальное изучение поведения пучка в электронном накопителе при одновременном действии нескольких резонансов бетатронных колебаний. Поскольку электронный пучок в накопителе — идеальная модель нелинейного осциллятора с очень малым трением [2], то полученные экспериментальные результаты могут быть применены и к другим нелинейным системам.

Эксперименты проводились на электронном накопителе ВЭП-1 [3]. Параметры магнитной системы, параметры электронного пучка, методы наблюдения за пучком подробно описаны в работах [2—5]. Резонансы бетатронных колебаний возбуждались с помощью внешней резонансной раскачки пучка. Благодаря этому мы имели возможность при любых значениях частот бетатронных колебаний независимо создавать тот или иной резонанс, регулировать мощность резонансов, изменять расстояние между резонансами, — чего нельзя делать с «машинными» резонансами [6]. Для возбуждения резонансов использовалась несколько модель нелинейного осциллятора с очень малым трением [2], то ле в районе пучка. Напряжение раскачки подавалось от ВЧ генераторов на частотах: $f=f_0-f_z$, $f=f_0-f_r$ и $f=2f_0-f_z$ для возбуждения вертикального (рис. 1а), радиального (рис. 1б) и суммового (рис. 1с) резонансов (f_0 — частота обращения, f_z и f_r — частоты вертикальных и радиальных бетатронных колебаний).

* Доклад не зачитывался.

При одновременном возбуждении двух резонансов в зависимости от соотношения первого и второго резонанса, расстояния между ними по частоте мы могли наблюдать: 1) существование двух независимых областей автофазировки (рис. 1г и 1д); 2) расщепление резонансов, приводящее к появлению новых устойчивых областей автофазировки внутри первых двух (рис. 1е-ж); 3) полное разрушение области бетатронной автофазировки, приводящее к стохастическому характеру изменения амплитуд бетатронных колебаний (рис. 1з-1к).

Подробно нами был изучен одномерный случай—взаимодействие двух резонансов вертикальных бетатронных колебаний. Основные характеристики резонансов: частоты малых фазовых колебаний в области бетатронной автофазировки (ОБА) $f_{\varphi 1}$ и $f_{\varphi 2}$, расстояние между резонансами по частоте Δf —могли изменяться в больших диапазонах и точно измерялись [2]. Это позволило характеризовать взаимодействие между резонансами двумя параметрами: параметром перекрытия

$$S = \frac{\Delta f}{f_{\varphi 1}} \quad (\text{следует помнить, что ширина ОБА по частоте } \Delta f_p = 4f_{\varphi 1} \text{ и}$$

параметром возмущения $m = \frac{f_{\varphi 1}}{f_{\varphi 2}}$. Под возмущением мы всегда будем понимать второй резонанс, в ОБА₂ обычно не было захваченных электронов. Разрушаемый резонанс мы будем обозначать первым, ОБА₁ была заполнена электронами, характер движения которых изучался экспериментально.

Следует сразу отметить, что в случае $S > 4$ оба резонанса существуют почти независимо (рис. 1г,д), наблюдается лишь небольшое диффузное увеличение размеров пучка в ОБА. Взаимодействие резонансов проявляется сильно лишь в области $0 \div 4$. Характер движения электронов существенно определялся параметром m . Несколько условно весь диапазон изменения параметра m можно разделить на три характерные области, хотя резкой границы при переходе из одной области в другую конечно нет.

Одиночный резонанс ($m=0$). Возбуждение одного резонанса и поведение частиц, захваченных в ОБА подробно изучалось ранее [2]. Напомним только, что благодаря своеобразному механизму автофазировки и наличию радиационного затухания частицы имеют ограниченный набор амплитуд и фаз бетатронных колебаний вблизи равновесных величин. Наличие фазировки частиц приводит к тому, что на данном азимуте накопителя интенсивность синхротронного излучения от пучка меняется с частотой $f = pf_0 - f_z$. Это изменение интенсивности можно регистрировать, используя ФЭУ со щелевой диафрагмой [4]. Распределение частиц по амплитудам бетатронных колебаний можно было определять по фотографиям пучка, либо осциллограммам тока диссектора [5]. Следует отметить, что в зависимости от напряжения раскачки и расстройки частоты относительно точного резонанса возможно су-

ществование одной (рис. 1л) либо двух (рис. 1а) устойчивых амплитуд. В первом случае время жизни частиц в ОБА равно времени жизни основного пучка, во втором случае время жизни частиц в ОБА, расположенной вблизи большей амплитуды, примерно на порядок меньше ($\tau = 50$ сек), однако частица, выпавшая из ОБА как правило не теряется совсем, а затухает на малые амплитуды [2].

Два резонанса ($m < 0.6$; $m > \frac{1}{0.6}$). Основной эффект, наблюдаемый при этих значениях m — возбуждение вынужденных колебаний пучка как целого в ОБА с частотой $f = \Delta f$, которые фиксировались по модуляции ВЧ-сигнала с быстрого ФЭУ. Следует отметить что в случае $S \approx 1$ и $S \approx 2$ амплитуда модуляции была существенно больше, чем при других значениях S . Возбуждение колебаний пучка в ОБА при $S=1$ и $S=2$ было заметно и по осциллограммам распределения плотности (см. рис. 2а-б).

Удобным процессом, позволяющим изучать характерные особенности взаимодействия резонансов, при этих значениях m , оказалось измерение времени жизни частиц в ОБА (см. рис. 3а). Зависимость времени жизни от S носит резонансный характер, время жизни в ОБА уменьшалось при $S=4; 3; 2; 1; 1/2; 1/3...$

Все эти результаты легко объяснимы, если учесть, что наличие ОБА₂ является нелинейной возмущающей силой для колебаний в ОБА₁, причем частота возмущения $f = \Delta f$. Поскольку колебания в ОБА₁, также нелинейны, в такой системе возможны резонансы при $\Delta f = \frac{p}{q} f_{r1}$, (p и q — целые числа). Соответственно при $S = \frac{p}{q}$ возможно образование ОБА второго порядка внутри ОБА₁. При значениях $S=1$ и $S=2$ ОБА второго порядка достаточно велики по размеру и заметны по распределению частиц по амплитудам (рис. 2б), при других резонансных значениях S ОБА второго порядка проявляют себя лишь как промежуточная зона для частиц, выходящих из основной ОБА за счет рассеяния на атомах остаточного газа, сказываясь на времени жизни (см. рис. 3а).

Два резонанса ($0.6 < m < \frac{1}{0.6}$). В этом диапазоне изменения параметра m основными наблюдаемыми эффектами являются диффузное «размазывание» пучка в области амплитуд, определяемой размерами ОБА₁ и полное разрушение ОБА.

О разрушении ОБА прежде всего можно было судить по резкому уменьшению ВЧ-сигнала с диафрагмированного ФЭУ. При $S=0.2 \div 1.2$ и $S \approx 2$ ФЭУ регистрировал только шумовой сигнал, что говорит о равномерном распределении частиц по фазам бетатронных колебаний, о полном отсутствии механизма автофазировки.

По рис. 1л, где показаны фотографии пучка, видно, что при $S=1$ и $S=2$ частицы и по амплитудам распределены почти равномерно в области амплитуд, определяемой размерами OBA_1 . Максимум в распределении был при $a=0$ (рис. 2в). При $S=3$ наблюдалось большое диффузное увеличение размера пучка в OBA_1 , однако распределение по амплитудам имело максимум при $a=a_0$ (a_0 — равновесная амплитуда OBA). При $S=1,5$ и $S=2,5$ наблюдалось только образование OBA второго порядка.

Если первый резонанс возбуждался с двумя устойчивыми амплитудами, то включение OBA_2 при $0,6 < m < \frac{1}{0,6}$ приводило к увеличению размеров пучка в OBA , частицы покидали OBA , расположенную вблизи большей амплитуды и затухали в область малых амплитуд. В этом случае оказалось удобным наблюдать уменьшение плотности электронов в OBA_1 после быстрого ($\tau_{вкл} \sim 10$ мсек) включения OBA_2 . Уменьшение плотности регистрировалось с помощью ФЭУ, диафрагма которого была настроена на центр OBA_1 . Характер уменьшения плотности был экспоненциальный (см. рис. 3), зависимость постоянной времени от параметров S и m показана на рис. 3б-в. Характерно, что и в этом случае зависимость носит резонансный характер.

Чтобы полнее выяснить как меняется характер движения отдельной частицы при переходе от $m=0$ к $m=1$ ($S \approx 2$) был проделан специальный эксперимент. Включался первый резонанс, после чего быстро включали OBA_2 и с помощью диафрагмированного ФЭУ наблюдали переход частиц из OBA_1 в OBA_2 . Щелевая диафрагма была настроена на OBA_2 так, чтобы первоначально сигнала с ФЭУ не было. На рис. 4 показаны осциллограммы тока ФЭУ, по которым видно, что изменение амплитуды у частиц происходит скачкообразно, причем возможно как уменьшение, так и увеличение амплитуды (очень напоминает многократное рассеяние на атомах остаточного газа — чисто стохастический процесс).

Заключение. Полученные экспериментальные данные убедительно показывают, что при определенных величинах S и m в результате действия двух периодических возмущений характер изменения амплитуды бетатронных колебаний становится стохастическим. На первый взгляд кажется парадоксальным, что для этого требуются определенные резонансные условия по параметрам S и m (рис. 3). Однако, если учесть, что область автофазировки разрушается как раз за счет перекрытия OBA второго порядка, которые образуются при определенных величинах S и перекрываются, по-видимому, лишь при $m \sim 1$ (см. рис. 3в), то такой вывод становится вполне естественным.

В заключение авторы выражают свою благодарность Б. В. Чирикову, Н. С. Диканскому, С. Г. Попову и Г. М. Тумайкину за полезные обсуждения, Б. А. Лазаренко, А. П. Чабанову за помощь в работе.

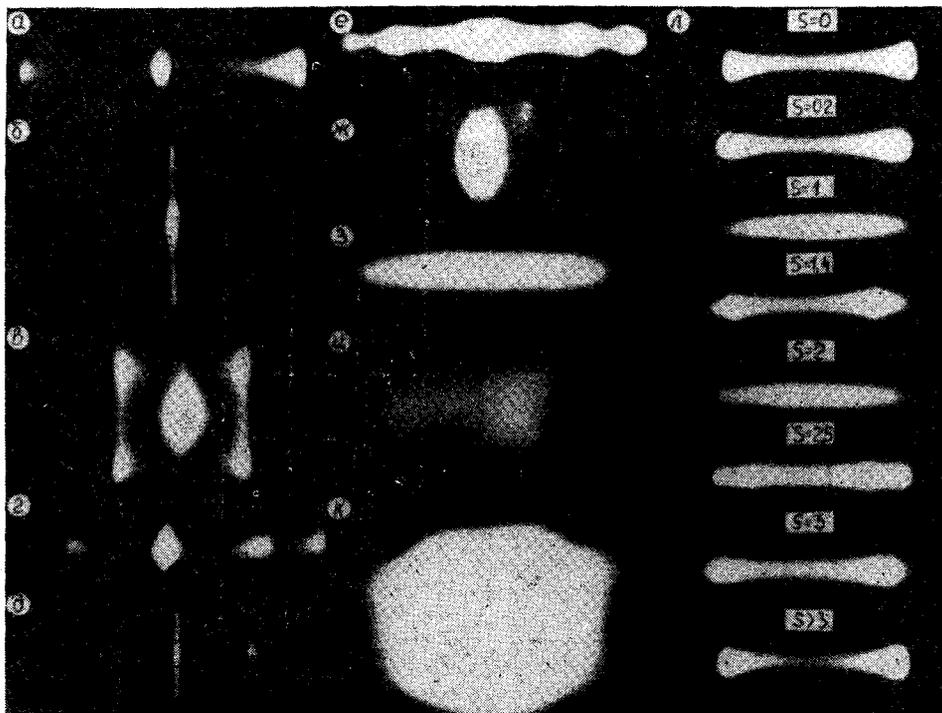


Рис. 1. Фотографии пучка вблизи резонансов: а) вертикального, б) радиального, в) суммового, г), е), з) — двух вертикальных, д), и), к) — вертикального и радиального, ж) — радиального и суммового, л) двух вертикальных при разных S .

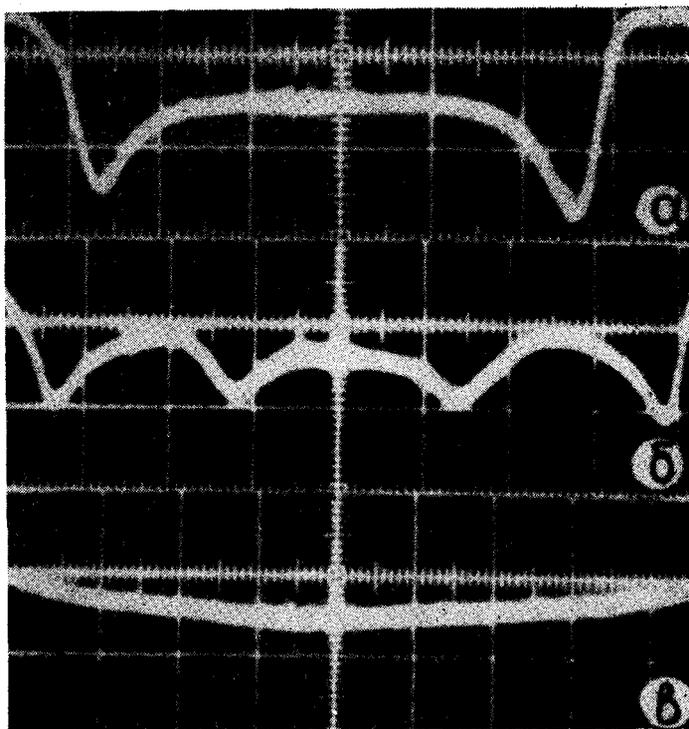


Рис. 2. Осциллограммы распределения плотности пучка: а) один резонанс, б) два резонанса $m < 0,6$, $S \sim 1$; в) два резонанса $m = 1$, $S = 1$

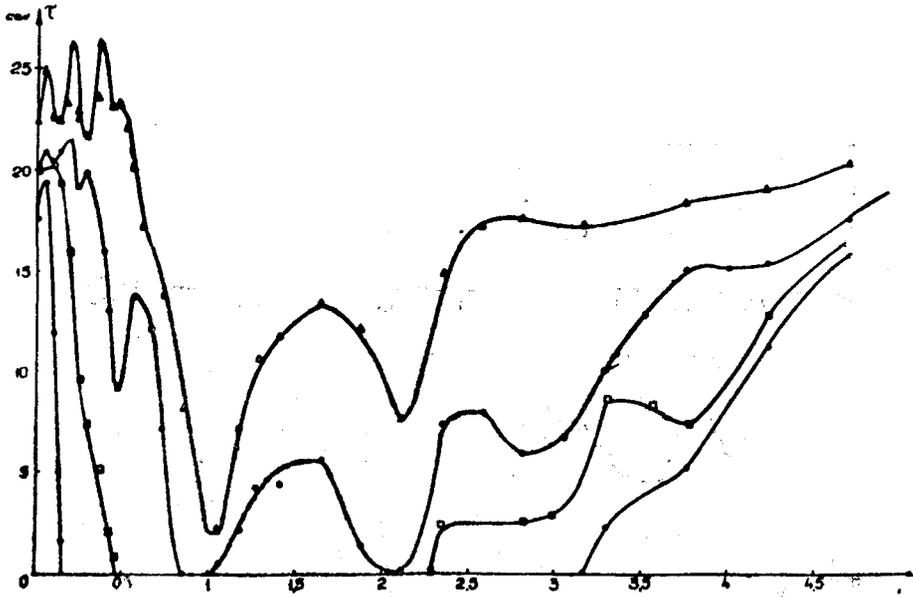


Рис. 3а. Зависимость времени жизни пучка в ОБА от S :
 Δ — $m=0.3$; \circ — $m=0.5$; \square — $m=0.7$; \bullet — $m=1$

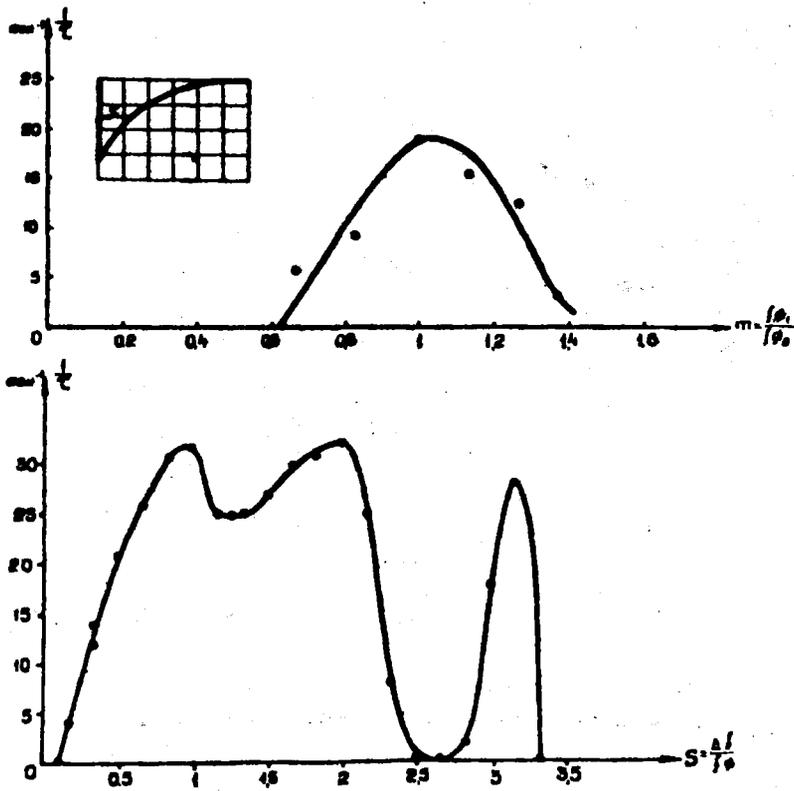


Рис. 36-в. Зависимость времени ухода частиц из ОБА: б) от S при $\eta \approx 1$; в) от η при $S=0.5$

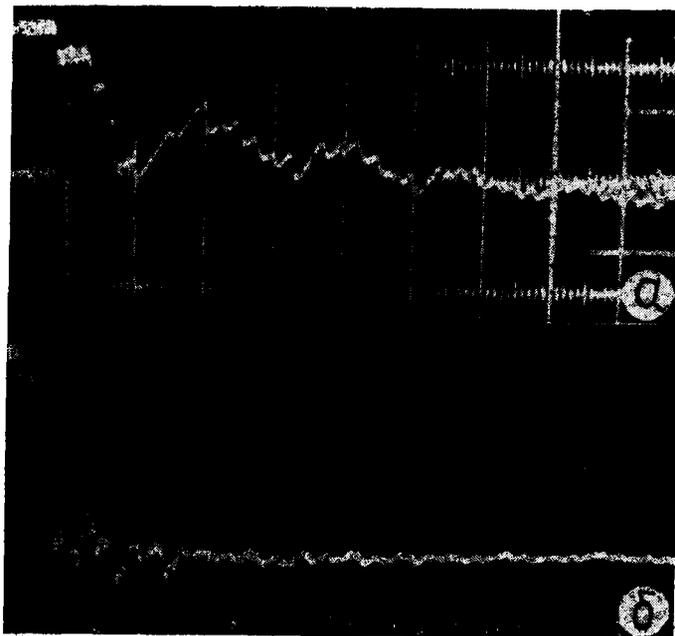


Рис. 4. Осциллограммы тока ФЭУ при быстром включении ОБА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. В. Чириков, Исследования по теории нелинейного резонанса и стохастичности, диссертация, Новосибирск, 1969 г.
2. Г. Н. Кулипанов и др., Труды Всесоюзного совещания по ускорителям, Москва, 1968 г.
3. Г. И. Будкер, А. А. Наумов и др., Труды Международной конференции по ускорителям, стр. 275, Дубна, 1963 г.
4. Н. С. Диканский и др., Изучение прохождения частиц через область автофазировки бетатронных колебаний за счет радиационного затухания. Доклад на настоящей конференции.
5. Э. И. Зинин, Труды Всесоюзного совещания по ускорителям, Москва, 1968 г.
6. В. Л. Ауслендер и др., Ат. энергия, 22, 179, 1967.