

имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta\omega(\theta) = & -\frac{Ne^2v^{\frac{3}{2}}}{\gamma m_0 c \omega_0 W H^2 \sqrt{\sigma_z}} \operatorname{Re} \int_0^\infty \frac{d\theta'}{\sqrt{\theta'}} \left\{ e^{i\frac{\omega_0\theta'}{v}} \left[ \sum_{m=1}^\infty \left( \frac{k_x H \sin \frac{k_x W}{2}}{\operatorname{sh}^2 \frac{k_x H}{2}} \right)^2 + \right. \right. \\ & + \frac{H}{W} \sqrt{\frac{\sigma_z}{\sigma_x}} \sum_{n=1}^\infty \left( \frac{k_z W \cos k_z \frac{H}{2}}{\operatorname{ch} \frac{k_z W}{2}} \right)^2 + i \frac{\omega_0 H^2}{v} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta'} \sum_{m=1}^\infty \left( \frac{\sin k_x \frac{W}{2}}{\operatorname{sh} \frac{k_x H}{2}} \right)^2 \left. \right] e^{-ik_0\theta'} + \\ & + \sum_{m=1}^\infty \left( \frac{k_x H \sin k_x \frac{W}{2}}{\operatorname{ch} \frac{k_x H}{2}} \right)^2 - \frac{H}{W} \sqrt{\frac{\sigma_z}{\sigma_x}} \sum_{n=1}^\infty \left( \frac{k_z W \sin \frac{k_z H}{2}}{\operatorname{ch} \frac{k_z W}{2}} \right)^2 \left. \right\} g(\theta' + \theta). \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, влияние конечной величины проводимости стенок камеры на устойчивость когерентного поперечного движения сгустка конечной длины можно разделить условно на следующие эффекты.

1. Эффект, связанный с периодичностью азимутального движения сгустка. Соответствующий ему член в декременте определяется полным зарядом сгустка и существенно зависит от частоты бетатронных колебаний [1]. Этот эффект, очевидно, отсутствует в бесконечной камере.

2. Учет конечной величины длины сгустка приводит к появлению в декременте члена  $\delta_1$ , который при условии (3) может быть получен в рамках рассмотрения, проведенного в работе [1]. Этот член порядка  $\sim v (l/R)^{\frac{1}{2}}$  по отношению к первому и зависит от распределения фаз бетатронных колебаний по длине сгустка. В частности, он равен нулю при  $k_0 v = \omega_0$  (при этом все частицы движутся по одной траектории) и положителен при  $k_0 v < \omega_0$ . Если  $v \gg 1$ , учет этого члена может существенно сдвинуть границу неустойчивости даже для весьма короткого сгустка.

3. «Краевой» эффект, обусловленный членами  $\sim (t)^{\frac{3}{2}}$  в электрическом и магнитном полях, непосредственно связан с  $z$ -составляющей тока. Он вносит в декремент отрицательный член порядка  $\sim \frac{H^2}{l^2}$  относительно  $\delta_1$ , т. е. для достаточно короткого сгустка [при соблюдении, однако, условия (3)] этот эффект может быть сравним с двумя первыми.

Второй и третий эффекты могут быть условно названы «мгновенными», так как они не связаны с «возвращением» сгустка.

4. Эффекты, связанные с полями излучения. Ввиду сильной зависимости последних от геометрии камеры их оценка требует специального рассмотрения в каждом конкретном случае.

Поступила в Редакцию 26/XI 1966 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. С. Диканский, А. Н. Скринский. «Атомная энергия», 21, 176 (1966).
2. L. Lasslett et al. Rev. Sci. Instrum., 36, 436 (1965).
3. В. И. Балбеков, А. А. Коломенский. «Атомная энергия», 19, 126 (1965).

## Исследование когерентных фазовых автоколебаний в накопителях

В. Л. АУСЛЕНДЕР, М. М. КАРЛИНЕР, В. А. ЛАЗАРЕНКО, С. Г. ПОПОВ,  
Ц. К. СЕДЛЯРОВ, А. Н. СКРИНСКИЙ, И. А. ШЕХТМАН

УДК 621.384.60:621.384.612.4

Приведены результаты экспериментального исследования различных видов фазовой неустойчивости в накопителях ВЭП-2 и ВЭП-4. Изучались фазовые автоколебания сгустка как целого и распад сгустка на две части, колеблющиеся по-разному. Наблюдалось возбуждение автоколебаний при взаимодействии сгустка с резонатором на 18-й гармонике. Измерены пороговые токи в зависимости от настройки основного и вспомогательного резонаторов.

Фазовая неустойчивость является одним из факторов, ограничивающих ток в накопителях релятивистских частиц. Она возникает при неблагоприятной частотной характеристике ускоряющей системы и проявляется в том, что, начиная с некоторого тока пучка, когерентные радиально-фазовые колебания само-

произвольно раскачиваются. Эти колебания могут приводить к потере некоторой части пучка; кроме того, они уменьшают время жизни накопленных частиц.

Причина фазовой неустойчивости в общих чертах сводится к следующему [1]. При когерентных фазовых колебаниях напряжение, введенное сгустком на ускоряющей системе, содержит боковые частоты, отличающиеся от частоты обращения (или ее гармоник) на величину синхротронной частоты. Таким образом, ускоряющее напряжение оказывается модулированным. Модуляция ускоряющего напряжения приводит к усилению или, наоборот, затуханию фазовых колебаний, вызвавших эту модуляцию. В первом случае возможно самовозбуждение фазовых колебаний. Условия устойчивости были найдены в работе [1].

В настоящей работе приведены некоторые результаты экспериментального исследования явления фазовой неустойчивости в накопителе ВЭПП-2 и ВЭП-1.

Блок-схема ВЧ-системы накопителя ВЭПП-2 приведена на рис. 1. Напряжение генератора с частотой 25,1 МГц подается на усилитель мощности ( $P_{\max} = 20 \text{ квт}$ ), а затем на ускоряющий резонатор. Шунтовое сопротивление резонатора 85 ком, собственная добротность около 5000, нагруженная  $\sim 4000$ . Ток пучка электронов измерялся при помощи интегрального пикап-электрода, расположенного в одном из прямолинейных промежутков накопительного кольца. Когерентные фазовые колебания регистрировались измерителем частотной мо-

дуляции, в состав которого входят усилитель-ограничитель и частотный детектор. На вход измерителя частотной модуляции подается сигнал с пикап-электрода. На выходе частотного детектора появляется напряжение с частотой фазовых колебаний  $\Omega_0$ . Амплитуда этого напряжения пропорциональна произведению  $\Omega_0 \Phi_m$  ( $\Phi_m$  — амплитуда фазовых колебаний центра тяжести сгустка).

Изменение основных величин регистрировалось многоканальным шлейфовым осциллографом. Кроме того, фазовые колебания можно было непосредственно наблюдать при помощи телевизионной камеры и фотографировать.

Как выяснилось при исследовании, пространство между дисками ускоряющего резонатора образует радиальную линию, резонирующую на частоте около 452 МГц, т. е. несколько выше 18-й гармоники частоты обращения. Такой паразитный резонатор должен вызывать фазовую неустойчивость [1], что и было обнаружено. Для подавления этой неустойчивости в конструкцию резонатора введено устройство для перестройки паразитного резонатора на более низкую частоту.

Возникновение фазовых автоколебаний иллюстрируется осциллограммами, полученными при помощи шлейфового осциллографа (рис. 2). Амплитудная модуляция измерялась на 6-й гармонике частоты обращения, наиболее чувствительной к изменению длины сгустка. Осциллограммы, приведенные на рис. 2, снимались следующим образом. Вначале резонатор расстраивался в сторону низких частот так, чтобы напряжение на нем было около 2 кв (при резонансном напряжении 10 кв). После накопления электронов резонатор плавно перестраивался в сторону высоких частот. Осциллографирование проводилось в процессе перестройки за время  $\sim 8 \text{ сек}$ .

Осциллограмма рис. 2, а снята при токе электронов около 300 ма. Видно, что фазовые колебания возникают после перехода на неблагоприятный склон резонансной кривой. Нарастание колебаний происходит за несколько миллисекунд и приводит к потере части накопленных электронов, после чего колебания срываются. При более глубокой расстройке резонатора фазовые колебания вновь возникают, но уже не вызывают сброса тока, а их амплитуда релаксирует с низкой частотой.

Был измерен пороговый ток пучка при перестройке резонатора от 2 кв на низкочастотной стороне до 2 кв на высокочастотной (при резонансной амплитуде 10 кв). Этот порог лежит

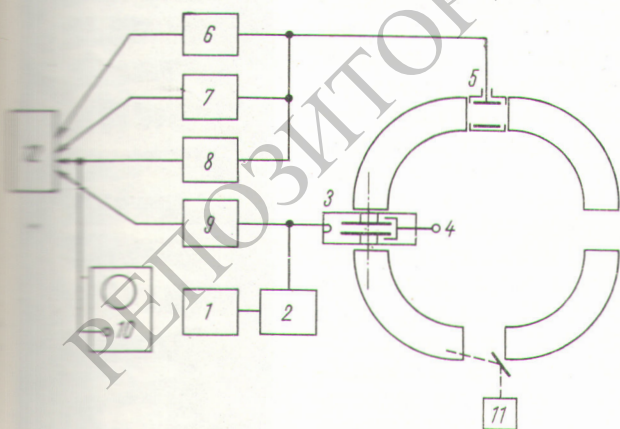
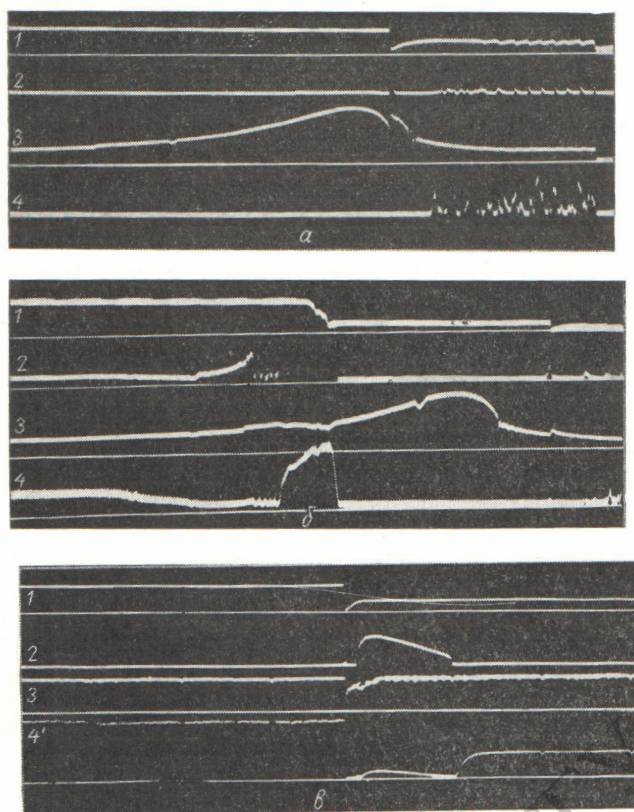


Рис. 1. Блок-схема ВЧ-системы ВЭПП-2:

1 — излучающий генератор; 2 — усилитель мощности; 3 — резонатор; 4 — устройство для настройки паразитного резонатора; 5 — пикап-электрод; 6 — измеритель тока пучка; 7 — измеритель амплитудной модуляции; 8 — измеритель частотной модуляции; 9 — измеритель напряжения на резонаторе; 10 — осциллограф; 11 — теле- и кинокамера; 12 — шлейфовый осциллограф.



Р и с. 2. Осциллограммы возникновения фазовых автоколебаний:

а — ток пучка 300 ма; б — ток пучка 500 ма; в — «паразитный» резонатор настроен на частоту, соответствующую 18-й гармонике; 1 — первая гармоника тока пучка; 2 — амплитуда фазовых колебаний; 3 — амплитуда ускоряющего напряжения на резонаторе; 4 — амплитудная модуляция 6-й гармоники тока пучка; 4' — напряжение 18-й гармоники, наведенное пучком на паразитном резонаторе.

в интервале 0,9—1,25 ма. Расчетный порог, полученный с помощью условий устойчивости [1] с учетом нелинейности и квантовых флуктуаций излучения, находится в пределах 0,5—1,5 ма.

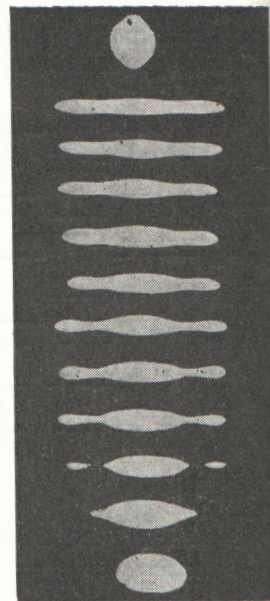
На рис. 2, б приведены осциллограммы при токе электронов около 500 ма. Здесь фазовые колебания возникают до перехода через резонанс при напряжении 3—4 кв. После сброса части тока колебания срываются и затем возникают на другом склоне резонансной кривой, причем также наблюдается релаксация амплитуды колебаний. Порог возбуждения фазовых колебаний на благоприятном склоне резонансной кривой составляет около 320—350 ма. Конкретная причина возникновения таких колебаний не выяснена.

На рис. 2, в показаны осциллограммы, иллюстрирующие возбуждение фазовых автоколеба-

ний благодаря взаимодействию с паразитным резонатором на 18-й гармонике. При осциллографировании ускоряющий резонатор был настроен в резонанс при напряжении около 10 кв. Паразитный резонатор вначале был настроен на частоту ниже 18-й гармоники. После накопления электронного тока около 300 ма паразитный резонатор перестраивался в сторону высших частот. При некоторой настройке этого резонатора фазовые колебания быстро нарастают, в результате чего часть тока сбрасывается, колебания срываются, но затем вновь возникают при дальнейшей перестройке. Экспериментально измеренный пороговый ток этих колебаний лежит в пределах 50—100 мка. Расчетный порог составляет 1,5—4 мка. Расхождение, по-видимому, вызвано неучтенной дополнительной нелинейностью, обусловленной напряжением 18-й гармоники, длина волны которого уже сравнима с длиной сгустка.

Как уже указывалось выше, после возникновения фазовых колебаний наблюдается релаксация их амплитуды с периодом 0,5—5 сек. Механизм этой релаксации, по-видимому, состоит в следующем. Непосредственно после развития фазовых колебаний сгусток колеблется как целое с частотой, которая заметно ниже частоты малых колебаний (вследствие нелинейности).

По тем или иным причинам (рассеяние на остаточном газе, ада-эффект и пр.) амплитуда колебаний некоторого электрона может уменьшаться. Тогда его собственная частота увеличивается, он выходит из резонанса, и его колебания затухают. Такой процесс приводит через некоторое время к тому, что сгусток разбивается на две части, одна из которых совершает колебания большой амплитуды, а другая почти не колеблется. Если ток колеблющейся части недостаточен для поддержания автоколебаний, то последние срываются, и сгусток вновь объединяется, что приводит к новой раскачке колебаний.



Р и с. 3. Релаксация фазовых колебаний (кинограмма).

Этот процесс иллюстрируется кинограммой рис. 3. На ней сняты кадры с интервалом 0,1 сек, показывающие цикл от начала колебаний до их затухания. Кинограмма снята при энергии пучка 150 Мэв, постоянная времени радиационного затухания при этой энергии около 0,3 сек. Видно, что после возникновения фазовых колебаний радиальный размер сгустка резко возрастает. Через некоторое время в центральной части образуется уплотнение, которое постепенно увеличивается. В конце цикла колебания затухают. Затем этот цикл повторяется.

Фазовая неустойчивость наблюдалась также в накопителе ВЭП-1 [2]. Резонаторы накопительных колец выполнены в виде четвертьволновой коаксиальной линии (см. схему на рис. 4). Настройка осуществляется двумя дисками, расположенными у открытого конца. Такой резонатор, помимо резонанса на основной частоте 221 Мгц (кратность 2), имеет резонансы на нечетных гармониках. Сдвигая диски, можно менять настройку высших резонансов, не изменяя основного резонанса. На рис. 4 приведена зависимость величины порогового тока от настройки резонатора. Настройка проводилась диском 1. Кривые 1, 2, 3 соответствуют различным положениям диска 2. Как видно из графиков, при одной и той же настройке на основной частоте пороговое значение тока резко зависит от положения диска, т. е. от настройки более высоких резонансов (по-видимому, это 13-я гармоника основной частоты).

На синхротроне Б-2С [3], входящем в состав комплекса ВЭП-1, также была обнаружена

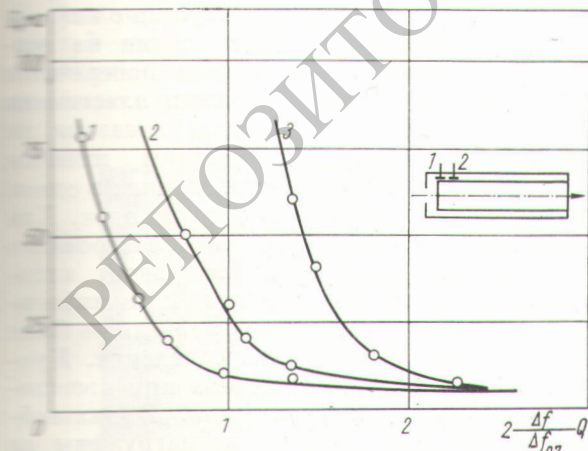


Рис. 4. Зависимость величины порогового тока от расстройки резонатора в накопителе ВЭП-1.

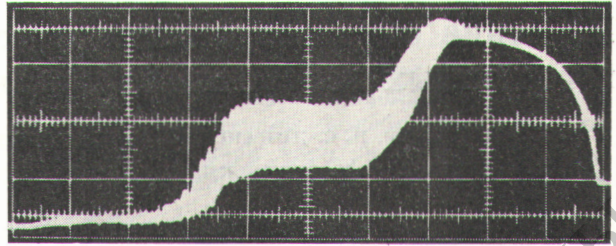


Рис. 5. Осциллограмма ускоряемого тока в синхротроне Б-2С.

фазовая неустойчивость. На рис. 5 приведена осциллограмма сигнала с пикап-электродов, где видна раскачка синхротронных колебаний и сброс тока. Для подавления неустойчивости был установлен дополнительный пассивный резонатор, взаимодействующий со второй гармоникой ускоряющего тока. Добротность резонатора ~200, резонансная частота ~230 Мгц.

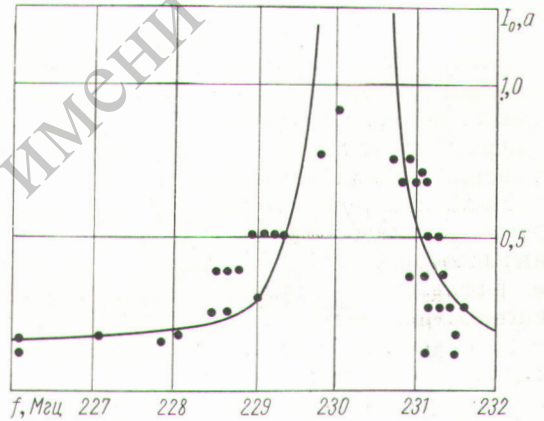


Рис. 6. Зависимость порогового тока в синхротроне Б-2С от настройки пассивного резонатора.

На рис. 6 приведены расчетная (сплошная кривая) и снятая экспериментально зависимость порогового тока от расстройки пассивного резонатора. Ввиду того что параметры системы не были точно известны, они выбирались так, чтобы расчетная кривая в двух точках совмещалась с экспериментальной.

Применение пассивного резонатора позволяет устойчиво получать в синхротроне Б-2С циркулирующий ток до 1,5 а (ранее был получен максимальный ток 0,5 а [3]).

Поступила в Редакцию 26/ХІ 1966 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Ауслендер и др. А. Э., 20, 210 (1966).
2. Г. И. Будкер и др. А. Э., 19, 498 (1965).
3. Е. А. Абрамян и др. В кн. «Труды Международной конференции по ускорителям (Дубна, 1963)». М., Атомиздат, 1964, стр. 1065.