

специального рассмотрения. Тем не менее можно считать, что в сгустке с $N_e = 10^{14}$ наблюдение процесса накопления протонов осуществимо при условии, что плотность молекул водорода в окрестности сгустка будет примерно на два порядка выше концентрации молекул остаточного газа.

В заключение отметим, что предлагаемый метод диагностики позволяет также определить полное число электронов в кольце, поскольку известна начальная концентрация тяжелых частиц.

Авторы благодарят А. Б. Кузнецова, Ю. Ц. Оганесяна и Н. В. Рубина за обсуждение рассмотренных вопросов.

Поступило в Редакцию 4/1 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Векслер и др. «Атомная энергия», 24, 317 (1968).
2. М. Л. Ионович, Н. Б. Рубин, В. П. Савранцев. Препринт ОИЯИ, Р9-4257. Дубна, 1969.
3. Symposium on Electron Ring Accelerators, Berkeley, 1968, UCRL-18103.
4. М. Л. Ионович, М. М. Фикс. См. настоящий выпуск, стр. 429.
5. Экспериментальная ядерная физика. Под ред. Э. Сегре. Т. 1. М., Изд-во иностр. лит., 1955.

Возбуждение радиальных бетатронных колебаний продольным ускоряющим полем

Ю. С. ИВАНОВ, А. А. КУЗЬМИН, Г. Ф. СЕНАТОРОВ

УДК 621.384.6

При наладке и эксплуатации протонных синхротронов необходимо иметь информацию о значении частоты бетатронных колебаний в течение всего цикла ускорения.

Обычно в начале цикла существуют собственные когерентные колебания центра тяжести пучка ускоряемых протонов, обусловленные ненулевыми начальными условиями при инжекции, но их время «когерентности», которое в основном определяется функцией распределения частиц в пучке по частотам бетатронных колебаний, невелико. Например, для ускорителя на 70 ГэВ Института физики высоких энергий (ИФВЭ) при нормальных условиях работы оно не превышает 3–5 мсек.

Для измерения частот бетатронных колебаний во всем цикле ускорения необходимо их возбуждать [1].

В настоящей работе рассмотрен один из методов возбуждения радиальных когерентных бетатронных колебаний. Метод является резонансным, но в отличие от способа, описанного в работе [2], вынуждающая периодическая сила изменяет не поперечный, а продольный импульс центра тяжести пучка.

Известно [3], что радиальные бетатронные колебания частицы с импульсом, отличным от равновесного, описываются уравнением

$$\frac{d^2x}{dt^2} + Q^2\omega^2x = \omega^2r_0 \frac{\delta p}{p}, \quad (1)$$

где x — отклонение частицы по радиусу от равновесного значения; ω — частота обращения; t — время; Q — частота бетатронных колебаний; δp — отличие продольного импульса от равновесного; p — полный импульс частицы; r_0 — средний радиус ускорителя.

Если напряжение на одной из ускоряющих станций модулировано по закону $f(t)$, то

$$\frac{d^2x}{dt^2} + Q^2\omega^2x = r_0\omega^2 \sum_{n=0}^{N-1} \frac{\Delta p_0}{p} f(t) H(t - n\tau_0), \quad (2)$$

где Δp_0 — максимально возможное отличие импульса от равновесного; H — единичная функция; τ_0 — период обращения частицы; N — число оборотов.

Рассмотрим только вынужденное решение (2):

$$x = \omega r_0 \Delta p / p Q \int_0^t \sum_{n=0}^{N-1} f(t) H(t - n\tau_0) \sin Q\omega(t - \tau) d\tau. \quad (3)$$

Если $f(t) = \sin q\omega t$ (где q — произвольное число), то выражение (3) примет вид

$$x = \omega r_0 \Delta p_0 / p Q \sum_{n=0}^{N-1} \sin q\omega n\tau_0 \int_{n\tau_0}^t \sin Q\omega(t - \tau) d\tau, \quad (4)$$

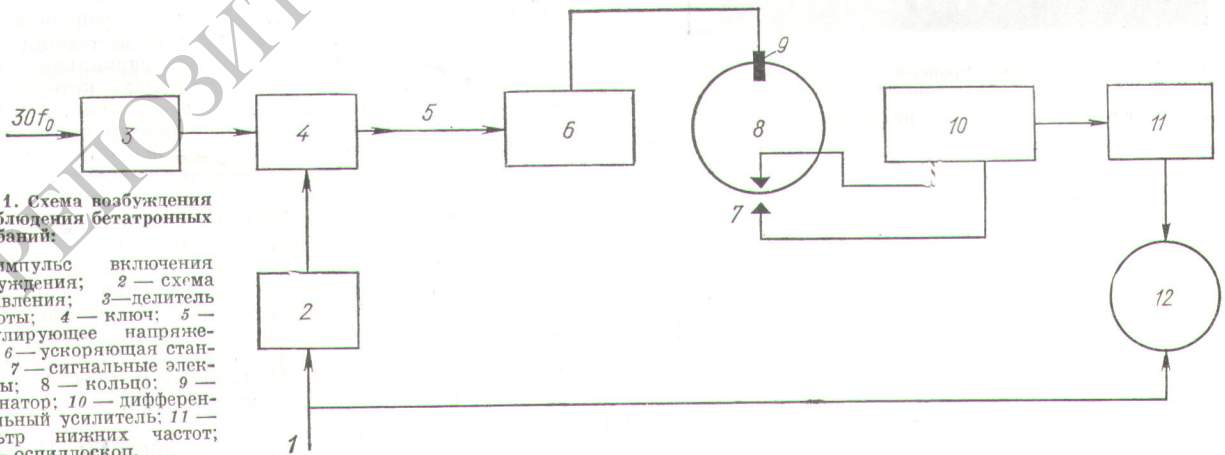


Рис. 1. Схема возбуждения и наблюдения бетатронных колебаний:

- 1 — импульс включения возбуждения; 2 — схема управления; 3 — делитель частоты; 4 — ключ; 5 — модулирующее напряжение; 6 — ускоряющая станция; 7 — сигнальные электроды; 8 — кольцо; 9 — резонатор; 10 — дифференциальный усилитель; 11 — фильтр нижних частот; 12 — осциллоскоп.

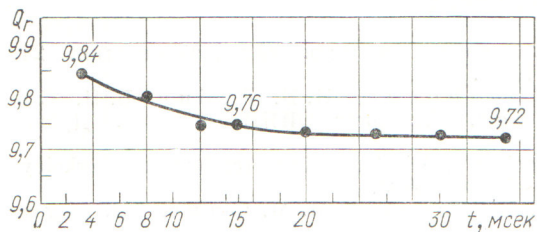


Рис. 2. Зависимость частоты бетатронных колебаний от времени.

где $\phi = \omega t$.

При

$$Q \pm q = m$$

(где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) решение (5) становится резонансным.

Наиболее интересен случай, когда m — ближайшее к частоте бетатронных колебаний Q целое число. Он соответствует наименьшей частоте модуляции, а это важный фактор, так как ускоряющие станции достаточно узкополосны (ширина полосы ускоряющих станций синхротрона ИФВЭ порядка 80—100 $\mu\text{гу}$).

Частоты фазовых колебаний далеки от частот q_0 , и взаимным влиянием радиальных и фазовых колебаний можно пренебречь [2]. Для проверки результатов расчета были проведены эксперименты по возбуждению радиальных колебаний на протонном синхротроне ИФВЭ.

Блок-схема возбуждения и наблюдения бетатронных колебаний представлена на рис. 1. Напряжение с задающего генератора с частотой $30f_0$ (f_0 — частота обращения частиц) подается на делитель частоты, который делит эту частоту на целое число n (n можно менять через единицу в пределах 67—300). Сигнал с частотой $30f_0/n$ усиливается и через управляемый таймером ключ поступает на сетку выходной лампы ускоряющей станции, в результате чего происходит модуляция амплитуды ускоряющего напряжения.

Система измерения также управляется таймером и содержит фильтры нижних частот, которые значительно увеличивают ее чувствительность.

Осциллограф с памятью позволяет обработать информацию о бетатронных колебаниях непосредственно с экрана либо осуществить фотографирование процессов с целью дальнейшей обработки.

Проведенный эксперимент позволил измерить частоту радиальных бетатронных колебаний, а также выявить связь между радиальными и вертикальными колебаниями в отдельных точках цикла до энергий порядка 2 ГэВ . На энергии, большей 2 ГэВ , при использовании лишь одной ускоряющей станции не удалось раскатать бетатронные колебания пучка до амплитуд ($\sim 0,5 \text{ м.м.}$), обеспечивающих надежное измерение.

На рис. 2 приведена найденная экспериментально зависимость частоты бетатронных колебаний от времени в цикле ускорения. Эта зависимость может меняться при настройке ускорителя.

На рис. 3, а, б представлены фотографии двух осциллограмм, полученных при наблюдении раскочки бетатронных колебаний. На верхнем луче осциллографа наблюдался процесс возбуждения радиальных колебаний, а на нижнем — вертикальных, которые возникли из-за связи радиальных и вертикальных колебаний пучка. Процессы имеют характер прохождения через резонанс, и на рис. 3, б при более быстрых развертках видно, как идет перекачка энергии из одного вида колебаний в другой.

Приведенные результаты показывают достаточную эффективность предложенного метода возбуждения радиальных бетатронных колебаний на малых энергиях. Применение его не требует создания специальных устройств для возбуждения и, следовательно, места для размещения аппаратуры на кольце ускорителя.

В заключение авторы приносят благодарность В. Е. Писаревскому, А. М. Гудкову и В. П. Устинову за помощь в проведении эксперимента.

Поступило в Редакцию 17/XII 1969 г.

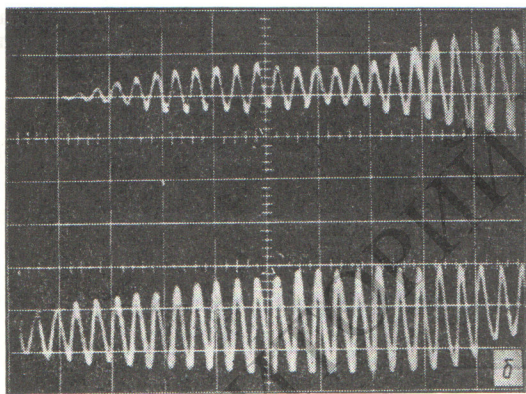
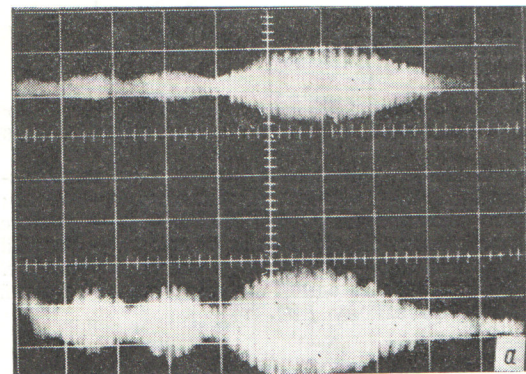


Рис. 3. Осциллограммы процесса раскочки радиальных и вертикальных бетатронных колебаний:

а — развертка 200 $\mu\text{сек/см}$; б — развертка 70 $\mu\text{сек/см}$.

или окончательно:

$$x = r_0 \Delta p_0 / 2pQ^2 \left\{ 2 \sum_{n=0}^N \sin 2\pi nq + \right. \\ \left. + \cos Q\phi \sum_{n=0}^N [\sin 2\pi n(q+Q) + \sin 2\pi n(q-Q)] + \right. \\ \left. + \sin Q\phi \sum_{n=0}^N [\cos 2\pi n(q-Q) - \cos 2\pi n(q+Q)] \right\}, \quad (5)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Уваров, Г. Ф. Сенаторов. «Приборы и техника эксперимента», № 6, 20 (1968).
2. А. А. Коломенский, А. Н. Лебедев. Тео-

рия циклических ускорителей М., Физматгиз, 1962.

3. A. S h o c h. Theory of linear and non-linear perturbations of betatron oscillation in alternating gradient synchrotrons. Geneva, CERN, 1958.

Порядок депонирования статей

Депонирование статей осуществляется или по просьбе авторов, или по решению редакционной коллегии журнала.

В журнале печатаются подробные аннотации статей, а полные тексты хранятся в редакции в течение 5 лет и высылаются читателям по их требованию наложенным платежом. Объем аннотации не должен превышать 2 стр. машинописного текста, а объем депонируемого текста — 12 стр. В отдельных случаях в аннотацию можно включать рисунок, таблицу, основные формулы и т. п. (уменьшив соответственно объем текстового материала аннотации).

Депонированные статьи являются научными публикациями и учитываются при защите диссертаций.

Статьи, представленные для депонирования, должны быть окончательно отработаны авторами и пригодны для фотографического воспроизведения (первый экземпляр), в связи с чем необходимо соблюдать следующие правила их подготовки.

1. Текст следует печатать на машинке с жирной черной лентой через два интервала на одной стороне белой односортовой бумаги форматом 21×30 см с полями слева и снизу не менее 3 см и справа 1 см. При перепечатке текста на первой странице оригинала необходимо отступать на 10 см сверху (место для клише «Атомная энергия»). Никакие поправки чернилами или карандашом над словами не допускаются. Исправления выполняются путем вклеивания.

2. Необходимо вписывать формулы тушью или черными чернилами; разметку формул в тексте (подчеркивание красным или синим карандашом и т. д.) делать не следует.

3. Рисунки необходимо выполнять на ватманской бумаге или кальке, наклеивать их на стандартные форматные страницы и помещать в конце статьи, после таблиц и списка литературы. Каждый рисунок следует снабжать подрисункочной подписью. Рисунки должны быть достаточно отчетливыми для фотографического воспроизведения. Включение в рукопись тоновых рисунков не допускается в связи с трудностью их копирования. В необходимых случаях тоновый рисунок выполняется штриховым методом.

4. Допускается в виде исключения печатать отдельные (большие) таблицы на неформатных листах (вклейках).

5. Все страницы рукописи (включая приложение) должны быть пронумерованы (первой страницей считается титульный лист, на нем цифра «1» не ставится, на следующей странице представляется цифра «2» и т. д.). Порядковый номер печатается в середине верхнего поля страницы.

6. Первый экземпляр рукописи должен быть подписан автором в конце статьи.

В случае несоблюдения указанных правил оформления статей рукописи возвращаются авторам.