

ДЕМПФИРОВАНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ ФАЗОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ В СИНХРОТРОНЕ

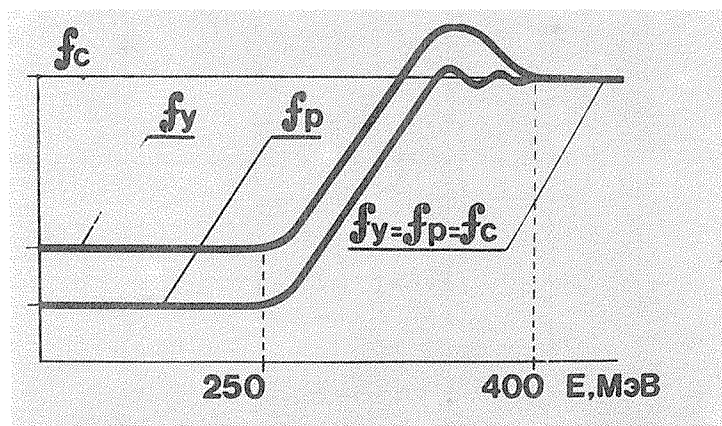
С.С. Молчанов, Е.М. Мороз, К.Н. Шорин

УДК 621.384.63

Описаны методика и результаты демпфирования когерентных радиально-фазовых колебаний, возникающих в синхротроне с энергией 0,6 ГэВ при интенсивности $(3 \div 5) \cdot 10^{10}$ электронов в сгустке.

В синхротроне ФИАН на 0,6 ГэВ /1/ с целью улучшить характеристики ускоренного сгустка и генерируемых вторичных пучков принят ряд мер для существенного ослабления когерентных неустойчивостей ускоряемого сгустка /2/ разной природы, в том числе раскачки фазовых колебаний электронов.

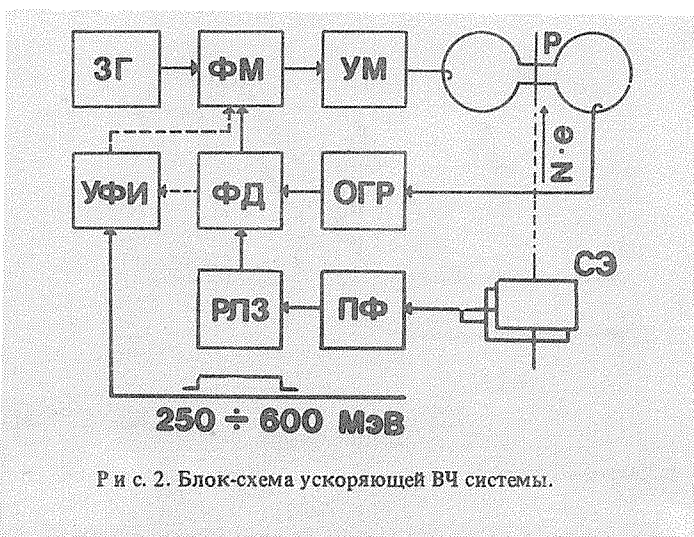
Чтобы обеспечить емкостной импеданс вакуумной камеры в комплексе с резонатором ускоряющей ВЧ системы /2/ на наиболее ответственных этапах цикла ускорения, высокодобротный тороидальный резонатор ВЧ системы синхротрона к моменту инжекции настраивается на собственную частоту f_p на 1% ниже конечной частоты f_c синхротронного ускорения (рис. 1). Рас-



Р и с. 1. Динамика частот резонатора f_p и генератора f_y в ускоряющей ВЧ системе.

стройка резонатора, соответствующая емкостному импедансу камеры с резонатором, сохраняется до энергии электронов ~ 250 МэВ. Правильность знака и достаточность величины начальной расстройки резонатора проверяются экспериментально по отсутствию при рабочей интенсивности самобунчировки пучка инжектированных электронов на этапе бетатронного ускорения. В диапазоне энергий $E \sim 250 \div 400$ МэВ резонатор перестраивается на конечную частоту f_c ускорения, что обеспечивает необходимый для компенсации возросших потерь на синхротронное излучение рост ускоряющего напряжения от ~ 300 В на расстроенном резонаторе до ~ 20 кВ к концу перестройки. При этом необходимая модуляция частоты ускорения f_y (частоты генератора) осуществляется по закону, учитывающему изменение частоты f_p резонатора и одновременно обеспечивающему сохранение емкостного импеданса вплоть до установления $f_p = f_y = f_c$ при $E = 400$ МэВ (рис. 1).

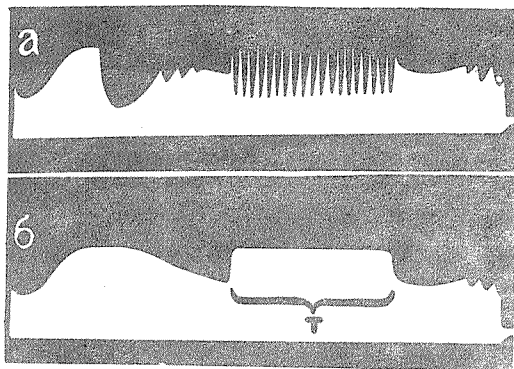
Для подавления когерентных фазовых колебаний ВЧ система синхротрона имеет комплект устройств отрицательной обратной связи по фазе ускоряемого сгустка (рис. 2). Блоки ЗГ (задающий генератор), ФМ (фазовый модулятор), УМ (усилитель мощности), Р (резонатор) составляют стандартный комплект ускоряющей ВЧ системы. Блоки ФД (фазовый детектор), ОГР (ограничитель сигнала фазы ускоряющего напряжения), СЭ и ПФ (сигнальные электроды и полосовой фильтр сигнала фазы центра ускоряемого сгустка), РЛЗ (регулируемая линия задержки), УФИ (управляемый фазоинвертор) образуют комплект устройств системы отрицательной обратной связи по фазе сгустка.



В этой схеме выделенная фильтром ПФ первая гармоника напряжения, наведенного на электродах СЭ сгустком электронов, подается (через задержку РЛЗ) на вход детектора ФД, где сравнивается по фазе с сигналом, поступившим на другой вход ФД от резонатора Р (через блок ОГР). Сигнал разности фаз обоих входных напряжений с выхода ФД (непосредственно или через блок УФИ) передается на модулятор ФМ и затем на входе усилителя УМ изменяет фазу ускоряющего напряжения, замыкая таким образом цепь обратной связи по фазе. Регулировкой задержки РЛЗ знак обратной связи устанавливается отрицательным и в отсутствие блока УФИ сохраняется до конца цикла ускорения.

При интенсивности сгустка $N < 3 \cdot 10^{10}$ электронов система обратной связи по фазе работала достаточно результативно без блока УФИ (рис. 2): регулировкой РЛЗ и выбором глубины связи достигались оптимум захвата частиц в синхротронное ускорение и отсутствие потерь интенсивности на остальных участках цикла. Однако при $N \geq 3 \cdot 10^{10}$ в этом же режиме обратной связи по фазе (т.е. без блока УФИ) на отдельных участках цикла ускорения и в некоторых специальных режимах работы синхротрона возникали когерентные фазовые колебания с амплитудой, увеличивающейся по мере увеличения интенсивности или азимутальной плотности частиц в сгустке. Эти колебания сопровождалась также увеличивающимися с ростом N низкочастотными пульсациями усредненных азимутального и радиального размеров сгустка, грубыми нарушениями нормального азимутального распределения частиц, но до $N \approx 5 \cdot 10^{10}$ еще не вызывали потерь интенсивности.

Рис. 3а иллюстрирует основные эффекты возбуждения когерентных фазовых колебаний. Осциллограмма рис. 3а — развертка на весь период ускорения без блока УФИ (рис. 2), обработанного специальным стробоскопическим устройством /1/ сигнала широкополосных сигнальных электродов, пропорционального плотности усредненного азимутального распределения частиц при $N \sim 4 \cdot 10^{10}$. Здесь верхняя огибающая сигнала описывает динамику величин максимумов плотности распределения частиц. Нижняя огибающая используется для контроля динамики полной интенсивности сгустка. Экстремальный спад верхней огибающей и ее низкочастотные (10 ÷ 50 Гц) колебания свидетельствуют о наличии на соответствующих участках цикла значительных по амплитуде низкочастотных пульсаций азимутального размера сгустка. Форма нижней огибающей на осциллограмме рис. 3а свидетельствует об отсутствии потерь частиц при наблюдаемых эффектах. Когерентная раскачка азимутальных колебаний в сгустке сопровождается синфазной раскачкой радиально-фазовых колебаний, подтвержденной скоростной киносъемкой сечения сгустка.



Р и с. 3. Эффекты раскачки (а) и демпфирования (б) колебаний, индицируемые датчиком плотности частиц в сгустке.

Колебания азимутального и радиального размеров сгустка, иллюстрируемые рис. 3а, до $N \sim 5 \cdot 10^{10}$ еще не вызывают потерь интенсивности сгустка, но тем не менее нежелательны, так как ограничивают возможности исследований по СИ-спектроскопии с временным разрешением [3].

С целью демпфирования когерентных фазовых колебаний и устранения пульсаций радиального и азимутального размеров сгустка для ускоряющей ВЧ системы ускорителя был разработан управляемый фазоинвертор сигнала обратной связи (блок УФИ на рис. 2), сохраняющий ее знак до энергии $E = 250$ МэВ и изменяющий знак связи на противоположный при $E > 250$ МэВ. Рис. 3б иллюстрирует полное отсутствие пульсаций и значительное увеличение плотности азимутального распределения частиц на участке Т, соответствующем плоской вершине магнитного цикла, и существенное ослабление пульсаций на остальных участках цикла ускорения.

Устранены также искажения кривых плотности азимутального распределения частиц, а на плоской вершине магнитного цикла синхротрона существенно минимизирован азимутальный размер сгустка.

Авторы благодарны Ю.В. Дронову, П.А. Кирейко, В.А. Орлову, М.Н. Сперанскому и А.С. Ярову за помощь в работе на отдельных этапах ее выполнения.

Поступила в редакцию 30 января 1985 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров Ю.М. и др. Препринт ФИАН № 168. М., 1980.
2. Лебедев А.Н., Шальнов А.В. Основы физики и техники ускорителей, т. 2, М., Энергоиздат, 1982.
3. Александров Ю.М. и др. ЖПС, 36, вып. 6, 941 (1982).