

## Контролируемое увеличение продольного эмиттанса пучка протонного синхротрона У-70

А.Ю. Маловицкий, И.И. Сулыгин, Е.Ф. Троянов  
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Проектная вакуумная камера протонного синхротрона У-70 была гофрированной и имела большой импеданс связи с пучком в диапазоне частот 6–6,5 ГГц, что вызывало микроволновую неустойчивость пучка и увеличение его продольного эмиттанса [1]. Последний начинал расти при приближении к критической энергии и особенно сильно (в несколько раз) возрастал в момент ее пересечения. После замены гофрированных участков камеры на гладкие, как и ожидалось, эмиттанс пучка существенно уменьшился. Но это, в свою очередь, сделало пучок более чувствительным к его окружению, и ускорение интенсивного пучка (больше  $5 \cdot 10^{12}$  прот/цикл) стало вызывать заметные трудности. Причины этих затруднений пока до конца не ясны. До их выяснения и устранения проблема ускорения интенсивного пучка решается частично за счет контролируемого увеличения его продольного эмиттанса. Это делается с помощью резонаторов станции перегруппировки пучка на частоту ускоряющего поля УНК — 200 МГц (СПГП) [2].

Использование СВЧ-резонаторов для увеличения эмиттанса пучка не ново. На PS в ЦЕРН для этой цели используются резонаторы, изначально предназначенные для предварительной группировки пучка на частоте, близкой к 200 МГц, перед его переводом в SPS. Для осуществления контролируемого увеличения эмиттанса там незадолго до критической энергии в магнитном цикле предусматривается специальное плато на времени, когда частота неперестраиваемых резонаторов совпадает с одной из гармоник частоты ускорения пучка [3]. В У-70 из-за большой постоянной времени обмотки магнита это делать неудобно — заметно увеличивается длительность цикла работы ускорителя. По этой причине резонаторы СПГП включаются на некоторое время перед критической энергией при нарастающем магнитном поле. Эффективное взаимодействие пучка с ними происходит лишь когда очередная гармоника частоты обращения частиц находится в окрестности собственной частоты резонаторов. Но, как оказалось, этого достаточно, чтобы добиться заметного увеличения эмиттанса.

Проведенные численные расчеты и эксперименты показали, что, строго говоря, увеличение эмиттанса достигается и при простом расшунтировании резонаторов на достаточно большое время. Это происходит из-за возникновения продольной неустойчивости пучка при его взаимодействии с относительно высоким импедансом (4,6 МОм) пары резонаторов СПГП в моменты совпадения их частоты с очередной гармоникой частоты обращения частиц. Однако при этом инкремент неустойчивости сильно зависит от интенсивности пучка и от его исходного эмиттанса. Получить стабильное и заранее заданное увеличение эмиттанса в этом случае не удается.

Поэтому в У-70 используется дополнительное внешнее возбуждение резонаторов от мощного ВЧ-генератора СПГП. Существует целый ряд довольно очевидных, но противоречивых требований на момент включения раскачки. С одной стороны, ее желательно начинать при как можно более низких энергиях, пока еще велика частота фазовых колебаний, а на длине сгустка укладывается достаточно большое число длин волн напряжения раскачки. Это приближает процесс раскачки к микроволновому воздействию на сгусток, что должно обеспечить хорошее “перемешивание” всех его частиц и получение сгустка с относительно

гладким распределением. В то же время, раскачку можно начинать лишь после того, как в процессе ускорения пучка произойдет достаточно сильное адиабатическое затухание размеров сгустка и в сепаратрисе высвободится место для требуемого роста эмиттанса пучка. Реально на У-70 раскачка начинается при энергии примерно 3,5 ГэВ (110 мс от начала ускорения) и продолжается до 7,5–8 ГэВ. Естественно, перед этим ранее зашунтированные резонаторы СПГП (для исключения их влияния на пучок) расшунтируются. Амплитуда внешнего напряжения в момент включения составляет около 50–70 кВ. По мере ускорения пучка и высвобождения места в сепаратрисе напряжение увеличивается для более эффективного его воздействия на пучок. Закон изменения напряжения подбирается по эффекту.

Момент повторного шунтирования резонаторов выбирается так, чтобы после достижения эмиттансом заданной величины и выключения внешнего напряжения раскачки, шунтирование происходило примерно посередине между двумя последовательными совпадениями гармоник частоты обращения пучка с частотой резонаторов. Это гарантирует от выхода из строя из-за наведенного пучком напряжения достаточно деликатного узла демфера основного колебания резонатора — р-і-п-диодного выключателя [5].

Осциллограммы рис. 1 иллюстрируют результат воздействия резонаторов раскачки на эмиттанс пучка. Кривые 2 и 2а показывают форму напряжения с пикового детектора, на вход которого подается сигнал с широкополосного датчика интенсивности. Это напряжение обратно пропорционально длине сгустка. Кривая 2 соответствует выключенным резонаторам раскачки, кривая 2а — включенным. Видно, что в данном конкретном случае пиковая плотность уменьшается примерно на 40%. Опыты показали, что при тщательно подобранном законе изменения напряжения на резонаторах сравнительно не сложно добиться двукратного уменьшения пиковой плотности частиц в сгустке, т.е. четырёхкратного увеличения эмиттанса, практически без потерь частиц.

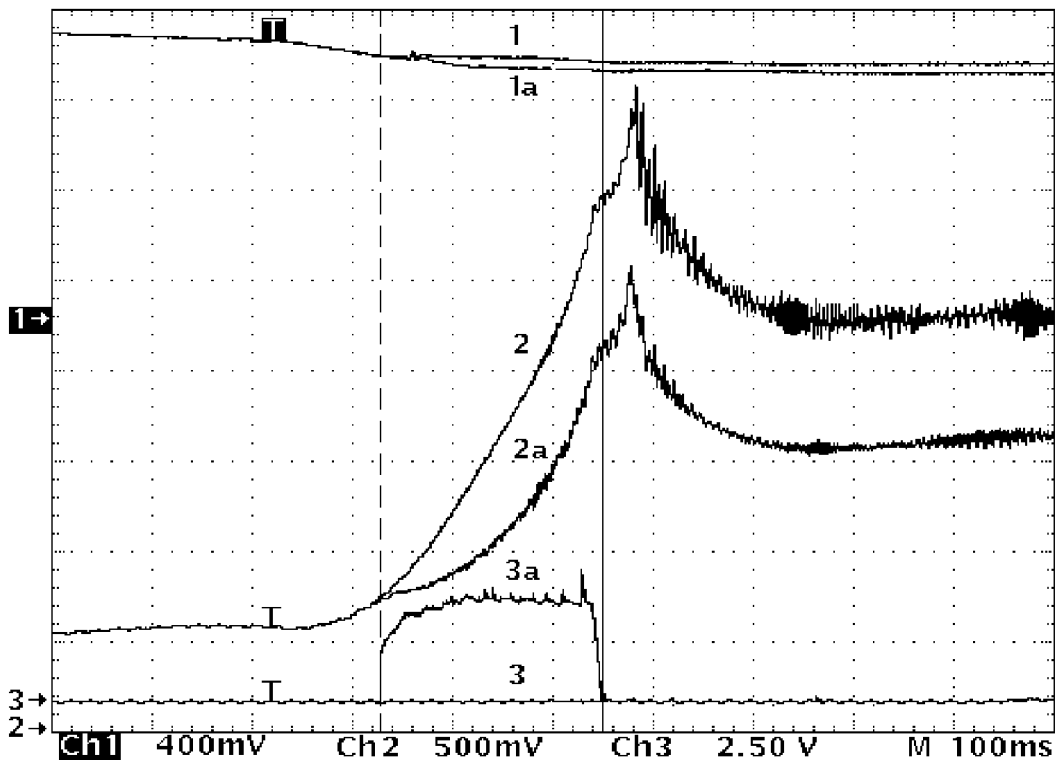


Рис. 1: Осциллограммы сигналов. Развертка 100 мс/дел. Т — момент начала ускорения.

В процессе последующего численного моделирования с помощью программы LONGIT [4] было показано, что более оптимальным является режим, когда раскачка производится при энергии пучка от 6 до 7 ГэВ. При этом напряжение на резонаторах необходимо поднимать примерно по линейному закону от 50 до 500–600 кВ. За это время гармоники частоты обращения пучка четыре раза пересекают полосу пропускания резонаторов. Как показали расчеты, этого оказалось достаточно для того, чтобы получить сгустки со сравнительно гладким распределением и примерно в четыре раза большим эмиттансом. Данный режим, как предпочтительный из-за большего места в сепаратрисе и поэтому менее критичный к закону изменения напряжения раскачки, предполагается опробовать в предстоящем сеансе работы ускорителя.

Модуляция сигнала пикового детектора на рис. 1, особенно заметная после прохождения критической энергии и при отсутствии раскачки, в основном связана с возбуждением в пучке паразитных квадрупольных колебаний.

Кривая 3а показывает закон изменения напряжения на резонаторах. Из нее видно, что в моменты совпадения гармоник частоты обращения пучка с частотой резонаторов суммарное напряжение на резонаторах от воздействия на них пучка и внешнего генератора может заметно превышать напряжение, задаваемое последним.

Кривая 1 соответствует сигналу с индукционного датчика интенсивности пучка при выключенных резонаторах. На ней видны незначительные, но практически всегда имеющие место потери частиц при переходе от накопления пучка из бустера в режим его ускорения. На кривой 1а, соответствующей случаю включенных резонаторов раскачки, потери продолжают несколько дольше, что свидетельствует в данном случае о чрезмерном темпе увеличения эмиттанса в самом начале раскачки. Опыты показали, что при правильном подборе закона изменения напряжения на резонаторах потери частиц из-за раскачки практически отсутствуют.

Итак, применение контролируемого увеличения эмиттанса в сочетании с тщательной настройкой ускорителя позволяет добиться перевода пучка через критическую энергию практически без потерь при интенсивностях вплоть до  $1,3 \cdot 10^{13}$  прот/цикл, при которых проводились эксперименты.

## Список литературы

- [1] Г.Г.Гуров. Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1981, т.1, с.213–216.
- [2] Э.Н.Бутряков, Г.Г.Гуров, В.В.Каталев и др. Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1987, т.1, с.193–196.
- [3] D.Boussard. CERN-SPS/ARF/78-6.
- [4] А.Ю.Маловицкий. Программа LONGIT. Сборник аннотаций "Программы расчета и моделирования ускорительной техники". Москва, 1992, с.63.
- [5] В.В.Каталев, В.Г.Кудрявцев, С.В.Сергеев и др. Труды XIII совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1993, т.2, с.356–359.