

Исследование взаимодействия пучка синхротрона У-70 с ускоряющими резонаторами станции перегруппировки пучка

С.В. Иванов, В.В. Каталёв, В.Г. Кудрявцев, А.Ю. Маловицкий, И.И. Сулыгин
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

В проекте УНК принята следующая схема инжекции. Пучок после его ускорения в синхротроне У-70 на частоте 6 МГц разгруппировывается, перезахватывается на частоте ускоряющего поля УНК (200 МГц) специальной станцией перегруппировки пучка (СПГП) и уже сгруппированным переводится в первую ступень так, что каждый банч попадает в свою сепаратрису удерживающего ВЧ-поля УНК. В последнее время эта станция успешно используется также для улучшения структуры пучка при его медленном выводе на физические установки [1].

В основу СПГП положен модуль ускоряющей системы УНК [2], представляющий собой пару цилиндрических резонаторов с рабочим видом колебаний E_{010} , питаемых ВЧ-мощностью через трехдецибелльный квадратурный мост. Поскольку резонаторы СПГП могут приводить к неустойчивости пучка, то на время его ускорения в У-70 они шунтируются специальными устройствами — демпферами основного колебания (ДОК) [3]. Для определения необходимой степени демпфирования использовалась известная теория продольных неустойчивостей сгруппированного пучка (например, [4]).

График зависимости пороговых величин импеданса связи $Z_{пор}$ от энергии для синхротрона У-70, рассчитанных по методике работы [4] для интенсивности $8 \cdot 10^{12}$ прот/цикл при измеренном инвариантном продольном эмиттансе (произведении импульсного и линейного полуразмеров банча) $150 \frac{МэВ}{c}$ -м перед критической энергией ($\gamma_{кр} = 9.48$) и $220 \frac{МэВ}{c}$ -м после $\gamma_{кр}$ (параметры пучка в апрельском 96-го года сеансе работы У-70), приведён на рис.1.

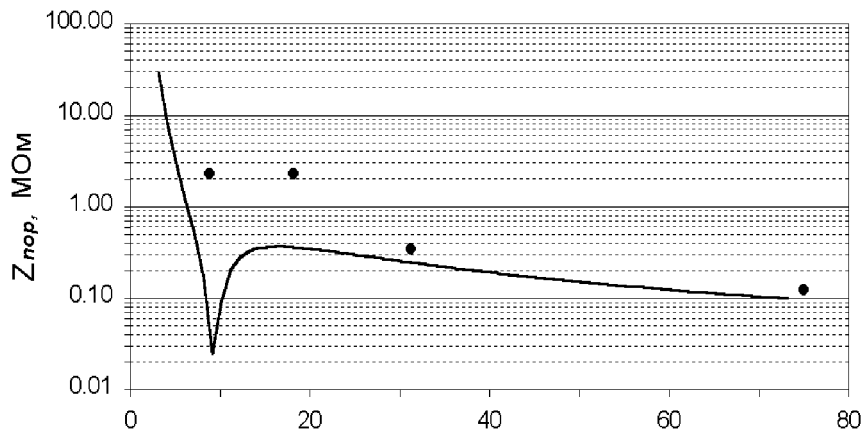


Рис.1

Из него видно, что имеются две наиболее опасные зоны, а именно конечная энергия и район в окрестности $\gamma_{кр}$, где $Z_{пор}$ стремится к нулю, и задача необходимого демпфирования кажется неразрешимой. Однако перед и сразу после $\gamma_{кр}$ частота обращения частиц изменяется достаточно быстро, и за время прохождения её гармоник через полосу пропускания резонаторов неустойчивость не успевает развиться. В то же время рассчитывать $Z_{пор}$ по указанной методике вблизи $\gamma_{кр}$ не совсем корректно из-за нарушения здесь условий квазистационарного приближения, молчаливо используе-

мого в теории когерентных неустойчивостей [4]. Поэтому при проектировании ДОК коэффициент демпфирования был выбран, исходя из оценки для конечной энергии [3].

Однако такая оценка годится лишь как первое приближение. Более точное знание этой величины необходимо, так как слабо зашунтированные резонаторы будут вызывать неустойчивость пучка при ускорении, а чрезмерное их шунтирование увеличивает токовую нагрузку на р-і-п-диодные ВЧ-коммутаторы демпферов и делает их работу ненадёжной.

Поэтому для уточнения требований к степени демпфирования резонаторов СПГП были проведены дополнительные исследования на ускорителе. При экспериментальном определении $Z_{пор}$ в различных точках цикла ускорения использовался один резонатор (второй был сильно задемпфирован и отстроен от первого). Шунтовой импеданс связи резонатора с учетом его шунтирования мостом составляет 2.3 МОм, а нагруженная добротность — 25000. Степень демпфирования резонатора менялась путём регулирования напряжения смещения на р-і-п-диодах ДОК [3]. Продольный эмиттанс пучка определялся по измеренной длительности сгустков при известных энергии, ускоряющем ВЧ-напряжении и производной магнитного поля по времени. За пороговый принимался импеданс резонатора, при котором лишь в одном из 5–10 циклов ускорения (результат разброса от цикла к циклу эмиттанса и интенсивности пучка) возникали едва заметные искажения пиковой кривой (объяснение термина ниже).

На рис.1 точками нанесены экспериментально полученные значения $Z_{пор}$ для различных моментов цикла ускорения. Видно, что, как и ожидалось, влияние резонаторов на пучок при больших энергиях ($\gamma > 20$) наступает при импедансах связи, близких к расчётным. О возможных причинах заметного превышения экспериментальных порогов над расчётными в окрестности $\gamma_{кр}$ сказано выше.

Для детального исследования данного вопроса с помощью программы LONGIT [5] численно моделировалось продольное движение пучка с учётом импеданса резонаторов СПГП при различной степени их демпфирования. Расчёты проводились с ансамблем из тысячи макрочастиц. Ниже приводятся рисунки, иллюстрирующие выполненные экспериментальные и расчётные исследования, и даются пояснения к ним. Все экспериментальные кривые начинаются на 200 мс от начала ускорения. Коэффициент пересчёта напряжения осциллограмм к зазору резонатора равен $16 \cdot 10^3$.

На рис.2 и 3 приведены осциллограммы напряжения, наводимого пучком на резонаторе при различной степени его демпфирования в допороговой зоне значений импеданса связи ($Z_{св} = 2.3; 0.35$ и 0.15 МОм соответственно). Здесь резонатор выступает в роли резонансного датчика 200-мегагерцовой гармоник тока пучка. Видно, как по мере увеличения степени шунтирования резонатора уменьшается наведённое на нём напряжение и растёт ширина резонансной кривой резонатора. Верхняя кривая на рис.2 — сигнал с пикового детектора напряжения, наводимого на пикап-электроде током банчей и обратно пропорционального величине их продольного размера (так называемая пиковая кривая). Прохождение всех гармоник частоты обращения пучка через полосу пропускания резонатора не отражается на форме пиковой кривой. Небольшое её понижение на времени 590 мс ($\gamma \simeq 18$) говорит о том, что в данном цикле ускорения предел по допустимому импедансу связи уже несколько превышен. Не приведённые здесь пиковые кривые, соответствующие условиям рис.3, искажений не имели.

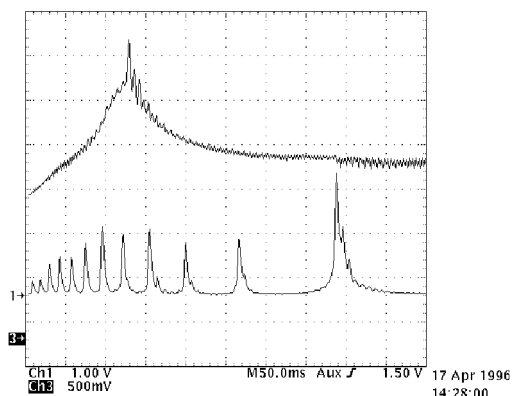


Рис.2

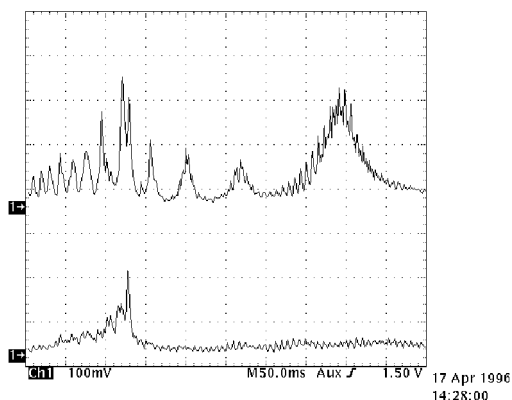


Рис.3

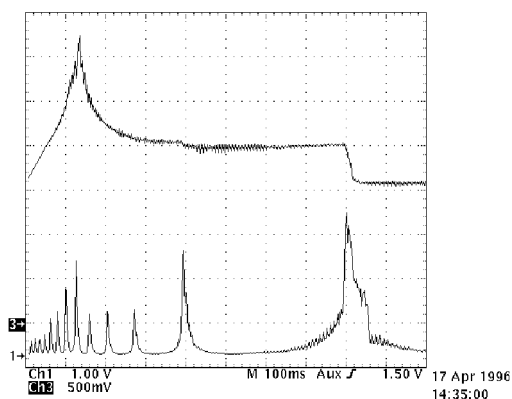


Рис.4

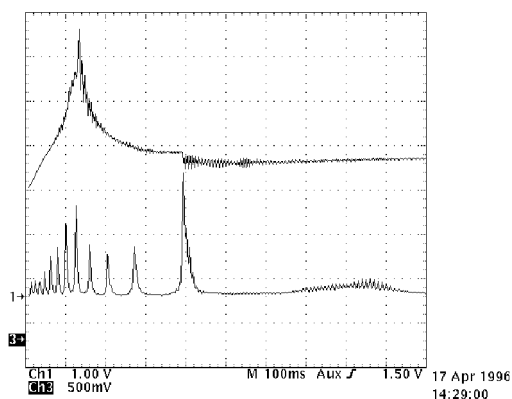


Рис.5

Рис.4 отличается от рис.2 лишь более медленной развёрткой, что позволило захватить ещё один резонанс на времени около 1000 мс ($\gamma \simeq 32$). Здесь импеданс связи резонатора 2.3 МОм значительно превышает экспериментально определённую величину $Z_{\text{пор}} = 0.35$ МОм и снижение пиковой кривой (т.е. рост эмиттанса пучка) заметно больше, чем во время прохождения предыдущего резонанса на времени 590 мс. Длительность банчей, измеренная на времени 1100 мс, при расшунтированном резонаторе составила 42 нс, что примерно на 20% больше, чем при зашунтированном и хорошо коррелируется с поведением пиковой кривой. В данном опыте сильное демпфирование включалось на времени 1050 мс. Этим объясняется крутой спад напряжения на резонаторе на этом времени. Рис.5 аналогичен рис.4, но здесь сильное демпфирование ($Z_{\text{св}} = 0.15$ МОм) включалось на времени 700 мс, и поэтому резонанс на времени 1000 мс проходит без последствий для эмиттанса пучка.

На рис.6 и 7 приведены результаты численного моделирования продольного движения пучка при тех же условиях демпфирования резонатора, при которых снимались осциллограммы, показанные на рис.2 и 4. Видно, что согласие между расчётом и экспериментом вполне удовлетворительное. Несколько большие значения напряжений на

резонаторе до $\gamma_{кр}$ в эксперименте можно объяснить тем, что при расчётах эмиттанс пучка принимался одинаковым как до, так и после $\gamma_{кр}$, и равным $220 \frac{МэВ}{c}$ -м, тогда как реально на ускорителе перед $\gamma_{кр}$ он заметно меньше ($150 \frac{МэВ}{c}$ -м).

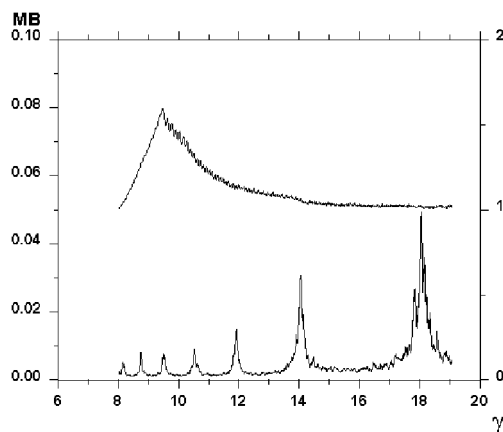


Рис.6

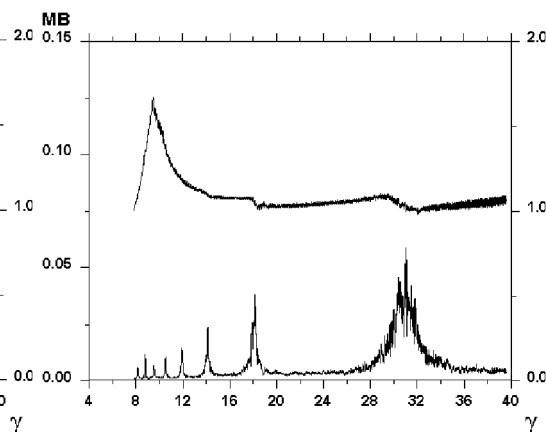


Рис.7

Подытоживая вышесказанное, можно сделать вывод, что программа LONGIT позволяет достаточно точно моделировать процесс взаимодействия пучка с резонаторами СПГП и более обоснованно, без трудоёмких экспериментов выбирать необходимую степень их демпфирования для конкретных режимов работы ускорителя. В частности, расчёты подтвердили высказанное в [2] и выше предположение о влиянии на процесс увеличения эмиттанса пучка времени прохождения гармоники частоты обращения частиц через полосу пропускания резонаторов. Кроме того, и это особенно важно, программа позволяет рассчитывать напряжение, наводимое пучком на резонаторе. А его крайне важно знать при формулировании требований к r-i-n-диодному ВЧ-коммутатору демпфера основного колебания.

В результате проведённых экспериментальных исследований и численного моделирования были выбраны коэффициент демпфирования, понижающий суммарный импеданс связи обоих резонаторов до 50 КОм, схема и конструкция r-i-n-диодного коммутатора, обеспечивающие надёжную и качественную работу демпфера основного колебания СПГП при крейсерской на данный момент интенсивности синхротрона У-70, равной $1.5 \cdot 10^{13}$ прот/цикл.

Список литературы

- [1] Афонин А.Г., Максимов А.В., Сулыгин И.И. и др. В сб.: Труды XIV совещания по ускорителям заряженных частиц. — Протвино, 1994, т. IV, с. 159–162.
- [2] Бутряков Э.Н., Гуров Г.Г., Каталёв В.В. и др. В сб.: Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1987, т. 1, с. 193–196.
- [3] Каталёв В.В., Кудрявцев В.Г., Сергеев С.В. и др. В сб.: Труды XIII совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1993, т. 2, с. 356–359.
- [4] Балбеков В.И., Иванов С.В. — Препринт ИФВЭ 84–211, Серпухов, 1984.
- [5] Маловицкий А.Ю. Программа LONGIT. Сборник аннотаций "Программы расчёта и моделирования ускорительной техники". — Москва, 1992, с. 63.