

Изучение многооборотной инжекции в компактный протонный синхротрон

И.Е. Жуль, А.Н. Кирпотин, В.Е. Пальчиков, М.В. Петриченко

Институт ядерной физики им. Г.И.Буджера СО РАН, Новосибирск, Россия

Приводятся результаты экспериментов по многооборотной инжекции в компактный протонный синхротрон, рассчитанный на энергию 200 МэВ при использовании импульсных одновитковых диполей с полем до 5 Т. Инжекция осуществляется по вертикали путем предварительного искажения медианной плоскости на первой гармонике с линейным по времени выключением искажения за время 10–30 оборотов. Инжектором служит 1–МэВ ускоритель-тандем оригинальной конструкции. Описывается система автоматизации эксперимента и управления синхротроном.

На протяжении ряда лет в ИЯФ СОРАН ведется работа по созданию компактного протонного синхротрона для протонной терапии раковых заболеваний [1, 2]. Ускоритель рассчитан на энергию протонов 80–200 МэВ. Магнитная система состоит из 4 импульсных одновитковых дипольных 90° магнитов с максимальным полем 5 Т и четырех квадрупольных линз, по одной в каждом промежутке (см. рис.1). Питание магнитов и линз раздельное, что позволяет настраивать рабочую точку, варьируя градиент поля в линзах. Для работы выбрана рабочая точка с $\nu_z = 0.43$, $\nu_r = 1.43$ при градиенте поля в линзах $G = 40$ E/cm на энергии 640 кэВ.

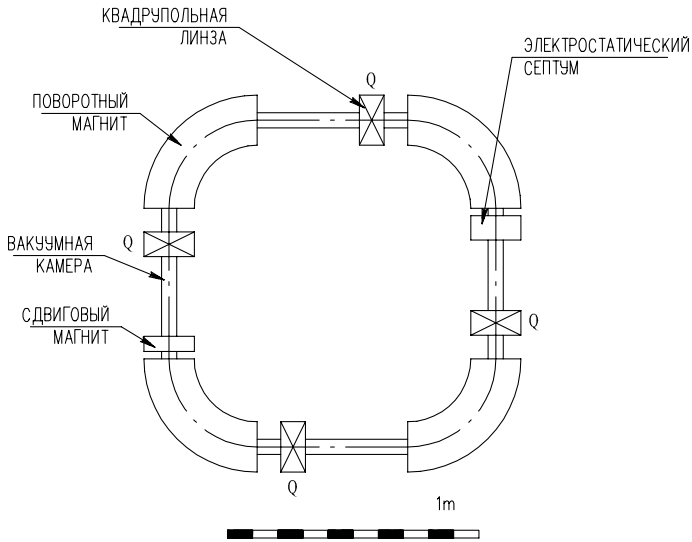


Рис. 1: Магнитная система ускорителя.

Инжекция осуществляется по вертикали путем создания линейно спадающего во времени (за 10–15 оборотов) сдвига медианной плоскости ускорителя в сторону выходного окна септум-магнита. Такой сдвиг создается посредством специального сдвигового магнита [1], расположенного в пустом промежутке симметрично месту впуска ($\nu_z = 0.43$). Интеграл поля в магните ≈ 2.5 kOe·cm [1]. Сдвиговый магнит питается синусоидальными импульсами тока, для инжекции используется линейно спадающая часть заднего фронта длительностью $5 \div 7 \mu\text{s}$, что соответствует 10–15 оборотам. Соответственно, эмиттанс инжектируемого пучка должен быть как минимум в 15 раз меньше акцептанса ускорителя.

В качестве инжектора используется электростатический ускоритель-тандем оригинальной конструкции, разработанный в ИЯФ. Ионы H^- с энергией около 20 кэВ ускоряются до половинной энергии 320 кэВ, затем обдираются на воздушной мишени в центре ускорителя, и полученные протоны ускоряются далее до полной энергии 640 кэВ.

Транспортный канал состоит из двух поворотных магнитов и трех квадрупольных линз. Впуск в ускоритель осуществляется с помощью электростатического септума с толщиной ножа 0.3 мм и окном $\pm 0.3 \times \pm 0.6$ cm². Эмиттанс пучка инжектора равен $\varepsilon_{inj} \approx \pi$ cm·mrad при вертикальном акцептансе ускорителя $A_z \cong 7.8\pi$ cm·mrad. Ток инжектируемого пучка 2 mA при максимальной эффективности прохождения пучка через канал до 90 %.

В 1997 г. на прототипе данного ускорителя была проведена начальная серия экспериментов по изучению инжекции пучка на энергию 640 кэВ при полях в магнитах 2.7 кГс. Апертура магнитов прототипа равна 40×40 мм².

Предварительно динамика инжекции была исследована с помощью компьютерного моделирования. В результате получилось, что эффективное число оборотов инжекции составляет ~ 9 , что примерно соответствует соотношению вертикального акцептанса ускорителя и эмиттанса инжектируемого пучка. График эффективности захвата частиц в зависимости от времени впуска при 15-оборотной инжекции приведен на рис. 2.

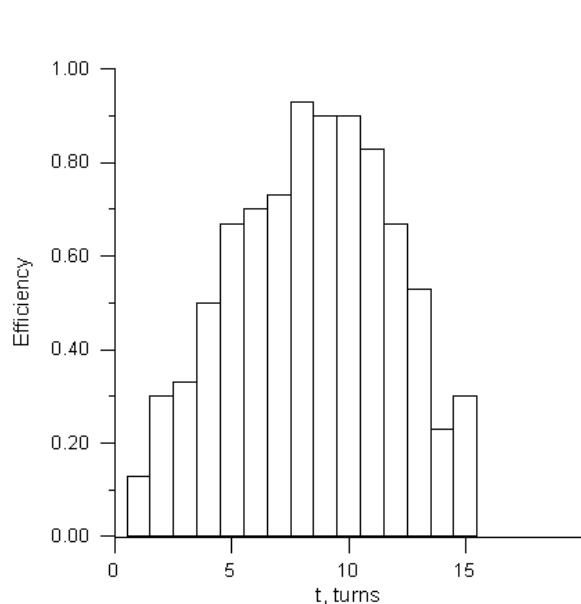


Рис. 2: Динамика 15-оборотной инжекции.

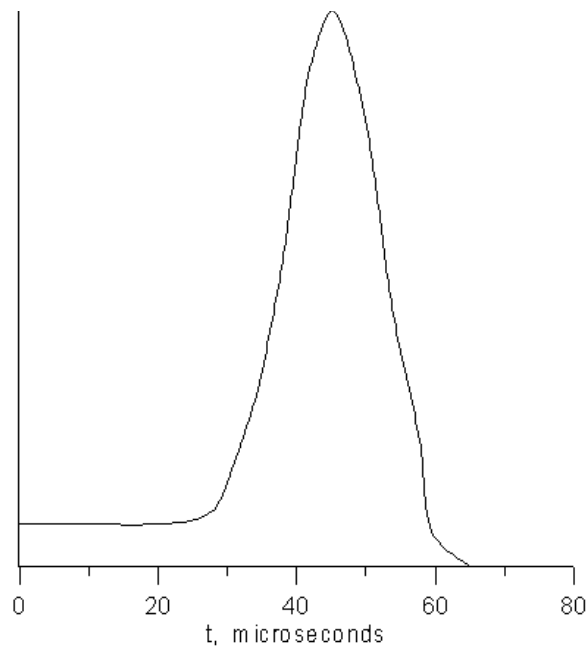


Рис. 3: Оциллограмма сигнала с коллектора.

Зависимость получена при $\Delta p/p = 0.5\%$, угловом разбросе в пучке ± 0.002 рад, $E = 640$ кэВ, $G = 40$ Ое/см, максимальном угле сдвигового магнита 0.013 радиан. Простые вычисления показывают, что для накопления $\sim 6 \cdot 10^{10}$ частиц, что является пределом по пространственному заряду, достаточно тока инжекции 2.3 мА при эффективности инжекции 0.6 на 15 оборотах.

Ток захваченного пучка в эксперименте измерялся датчиком, состоящим из тороидального трансформатора с усилителем. Инжектированный пучок не ускорялся, поэтому время его жизни ограничивалось его дрейфом на внешний радиус при спаде поля в магнитах, питаемых синусоидальными импульсами тока, и составляло около 1000 оборотов (≈ 450 мкс), после чего пучок высаживался на коллектор, расположенный на внешнем радиусе поворотного магнита. Оциллограмма сигнала на коллекторе приведена на рис.3.

Ширина пика в несколько десятков оборотов соответствует наблюдаемому радиальному размеру пучка, который определяется эмиттансом инжектируемого пучка и его энергетическим разбросом. Ток, захваченный в ускоритель, был равен $1.2 \div 1.5$ мА, что соответствует измерениям числа протонов, выходящих на коллектор, — $4 \div 5 \cdot 10^9$.

Эксперименты носили предварительный характер и проводились при неоптимальном согласовании инжекционного тракта и ускорителя — септум-магнит не был корректно выставлен и уменьшал апертуру ускорителя, что наблюдалось во время экспериментов. После тщательной юстировки можно ожидать увеличения количества захваченных частиц до расчетной величины $4 \div 6 \cdot 10^{10}$.

В процессе экспериментов по инжекции была отработана система управления ускорительным комплексом.

Аппаратная часть системы управления была собрана из типовых КАМАК-модулей, разработанных в ИЯФ. В качестве управляющего компьютера использовалась IBM PC.

Программное обеспечение построено по схеме “клиент-сервер”. “Сервер”, или в другой терминологии, “система сбора данных”, обеспечивает функционирование аппаратуры и состоит из управляющего ядра, коллекции драйверов и унифицированного интерфейса для обслуживания запросов клиентских приложений.

“Клиентские приложения” — это программы, посредством которых оператор манипулирует установкой. Для собственно управления есть две возможности — занести во все управляющие элементы (или в любое их подмножество) заранее подготовленный массив данных, или вручную подстраивать отдельно выбранный элемент. Можно также запомнить текущий режим.

Другая группа приложений информирует оператора о состоянии ускорителя. Это табло для индикации точек контроля и многоканальный быстрый цифровой осциллограф.

В отдельную группу можно выделить программы, работающие автономно, без взаимодействия с оператором. Это “сторож”, который следит за тем, чтобы контролируемые параметры не вышли из нормы, а также программа, которая отслеживает и компенсирует медленные дрейфы поля в магнитах (с точностью до 10^{-5}).

К управляющей аппаратуре клиентские приложения имеют доступ не непосредственно, а только через сервер. Все каналы управления унифицированы, аппаратно зависимые характеристики каналов скрыты от клиентских приложений. Предусмотрено преобразование управляющих данных (в первом приближении — масштабирование), благодаря чему клиентские программы работают с физическими параметрами, а не с управляющими кодами.

Структура программного обеспечения была тщательно продумана с целью максимально облегчить настройку оборудования и неизбежную перманентную модификацию программ. В тексте программ нет никаких предположений о конфигурации управляющей аппаратуры, конфигурация задается в текстовом файле, файл этот читается сервером при запуске. Добавление новых блоков, перемещение их на другие позиции, изменение их параметров не требуют ничего, кроме редактирования соответствующей строки в файле. Идеология максимальной мобильности программного обеспечения использовалась и при автоматизации других экспериментальных комплексов [3, 4].

Описанный комплекс программ для управления ускорительным комплексом реализован на языке “С” и может работать под MS DOS, Windows-95/98 и после минимальной модификации под UNIX.

Список литературы

- [1] *I.I.Averbukh et al.* “Project of small-dimensional 200 MeV proton synchrotron”, EPAC-88, Rome, June 7-11, vol. 1, p. 413.
- [2] *L.Picardi, C.Ronsivalle, A.Vignatti, G.Silvestrov, T.Vsevolozhskaya, R.Bartolini.* “Preliminary design of a technologically advanced and compact synchrotron for proton therapy”, RT/INN/94/20.
- [3] *А.С.Донин, А.Н.Кирпотин, Ю.В.Коваленко, В.Я.Савкин.* “Система управления инжекторным комплексом установки АМБАЛ-М”, ИЯФ 99-88.
- [4] *A.B.Boldyrev, A.N.Kyrpotin et al.* “Investigation of Atmospheric Turbulence, Velocity and Direction of a Wind and Doppler Spectrum Sea Echo by Quasi-Coherent Pulse Radar at Frequency of 150 MHz”. PIERS-96, Innsbruck, Austria, July 8-12.