

Электронный ускоритель с рециркуляцией пучка

А.М.Громов

Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

В Московском институте ядерных исследований РАН совместно с НИИЯФ МГУ сооружается разрезной микротрон непрерывного действия на энергию 175 МэВ [1]. Одна из проблем, которая не решена до конца в данном проекте, — это проблема инжекции электронного пучка в микротрон. Она возникла в связи с тем, что в микротроне первый оборот должен обойти ускоряющую секцию на расстоянии, позволяющем разместить на обратной трассе первого оборота устройства дополнительной фокусировки и коррекции пучка. Кроме того, в связи с тем, что поле в основных магнитах микротрона достаточно высокое (10 КГс), в то время как зазор магнита сравним с радиусом первого оборота, то начальные орбиты значительной частью проходят в сильно неоднородном краевом поле магнита. В этом случае поле оказывает на пучок существенное дефокусирующее действие в вертикальном направлении [2]. Для снижения дефокусирующего действия рассеянного поля применяется дополнительное поле противоположного направления, приложенное в узкой зоне вдоль края магнита. Однако этого поля недостаточно, чтобы полностью скомпенсировать рассеивающее действие краевого поля основного магнита.

Указанные причины, изложенные в упрощённой форме, приводят к выводу, что энергия частиц на первом обороте должна быть в 3–4 раза выше прироста энергии в ускоряющих секциях разрезного микротрона.

В настоящей работе предлагается один из вариантов инжекционного ускорителя–бустера для разрезного микротрона ИЯИ-МГУ. В основу положена ускорительная схема с применением рециркуляции пучка через общую ускорительную систему. Схема ускорителя с указанием основных размеров приведена на рис 1. Геометрия ускорителя, расположение поворотных магнитов, фокусирующих линз и величины параметров всех элементов смоделированы и рассчитаны с помощью программы TRACE 3-D LANL. При математическом моделировании приняты следующие исходные условия:

1. Система рециркулятора подразделяется на две области: область ускорения, когда частицы проходят ускоряющие секции и общие для всех орбит участки, свободные от ускоряющего поля, и область дрейфа, когда участки траектории, по которым частицы возвращаются ко входу в область ускорения.

2. Как в области ускорения, так и в области дрейфа пучок должен быть бездисперсионным.

3. Система должна быть симметричной относительно плоскости, проходящей через середину области ускорения, и перпендикулярной оси пучка (плоскость А–А на рис. 1).

4. В плоскости симметрии в области дрейфа вертикальный и горизонтальный эллиптические эмиттансы должны занимать каноническое положение и иметь одинаковое отношение полуосей.

5. Пучок ускоряется 6 линейными секциями на стоячей волне. Две из них осуществляют предварительное ускорение до энергии в 2 МэВ, остальные 4 включены в систему рециркуляции.

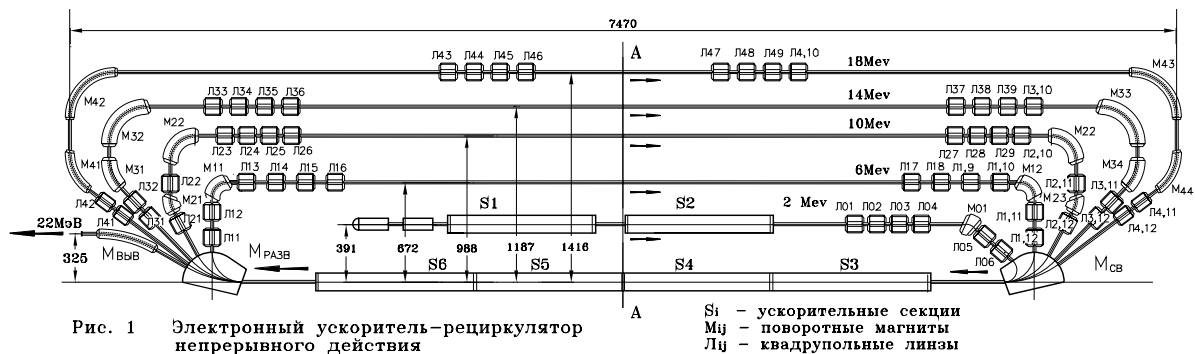


Рис. 1 Электронный ускоритель-рециркулятор непрерывного действия

Рис. 1: Электронный ускоритель-рециркулятор непрерывного действия. S_i — ускорительные секции; M_{ij} — поворотные магниты; L_{ij} — квадрупольные линзы.

СВЧ-мощность подаётся в каждую секцию от своего клистрона непрерывного действия с частотой 2450 МГц. Амплитудный прирост энергии пучка в каждой секции 1 МэВ, длина секции 1 м.

Отдельная проблема была с выбором формы полюсов магнитов, разводящих пучок по орбитам. В однородном магнитном поле частицы сильно фокусируются в горизонтальном направлении и дефокусируются краевыми полями рассеяния в вертикальном направлении. В результате, после поворота пучок становится расходящимся как по горизонтали из-за перефокусировки, так и по вертикали. Введение краевой фокусировки на выходе магнита, которая снижала бы схождение пучка по горизонтали и компенсировала вертикальную дефокусировку, приводит к увеличению угловой дисперсии, следовательно, и к расходимости пучка. Принят компромиссный вариант, в котором выходной край разводящего магнита имеет цилиндрическую форму. В этом случае все орбиты выходят из магнита по нормали к границе, а снижение радиальной фокусировки и частичная компенсация дефокусировки по вертикали осуществляется введением положительного краевого угла на входе в разводящий магнит, где пучок ахроматичен.

С целью обеспечения поворота пучка на 180° и отвода участка обратного дрейфа частиц от ускорительных секций, а также для размещения линз, обеспечивающих ахроматизацию поворота, на каждой орбите установлено несколько заворачивающих магнитов M_{ij} и линз L_{ij} (i — номер орбиты; j — номер места на орбите; см. рис. 1). Разворот первой орбиты осуществляется двумя магнитами: разводящим $M_{раз}$ на 90° и последующим M_{11} , также 90° -градусным. На прямолинейном участке между ними размещаются две квадрупольные линзы с помощью которых осуществляется ахроматизация поворота и фокусировка пучка на участке дрейфа. Свободный участок между магнитами служит также для регулировки длины орбиты и, следовательно, фазы входа пучка при возврате в ускорительные секции.

На последующих орбитах пара квадрупольных линз, установленных после разводящего магнита, также ахроматизируют и фокусируют пучок на участке дрейфа. Второй заворачивающий магнит разбит на два магнита с целью образовать прямолинейный промежуток между ними для регулировки длины орбиты. Две линзы на этом участке, стоящие между заворачивающими и сводящим ($M_{св}$) магнитами, ахроматизируют пучок, проходящий через ускорительные секции. Симметричная половина рециркулятора организована подобным образом.

На участке обратного дрейфа на каждой орбите расположено по 8 квадрупольных линз, объединённых в два симметричных квадруплета. Первый квадруплет фокусирует пучок в плоскости симметрии ускорителя А–А. Градиенты в линзах подбираются так, чтобы в плоскости симметрии вертикальный и горизонтальный эмиттансы совпадали. В этом случае на всём участке обратного дрейфа пучок круглый и имеет наименьшие размеры. Второй квадруплет формирует поперечный эмиттанс пучка на входе в область ускорения для обеспечения наилучшего прохождения через ускорительные секции. С целью облегчения работы линз и снижения поперечных пульсаций пучка на заворачивающих магнитах применяется краевая фокусировка.

С помощью программы TRACE-3D подобраны градиенты всех линз, их положение, краевые углы магнитов и определены огибающие пучка и шестимерный эмиттанс по всей трассе на всех орбитах. Исходными данными при моделировании были следующие параметры:

Энергия инжекции 2 МэВ
 Выходная энергия 20-25 МэВ
 Ток пучка 0-100 мА

Эмиттансы:

Горизонтальный по x 10π мм · мрад
 Вертикальный по y 10π мм · мрад
 Продольный по z 250π КэВ·град

Напряжённость магнитного поля:

В разводящих магнитах 1 КГс
 В заворачивающих магнитах 2 КГс

Математическое моделирование показало, что при указанных выше эмиттансах поперечное сечение пучка не превышает 20 мм на первой орбите и 10 мм на последующих. Реальные эмиттансы пучка, измеренные на действующем ускорителе НИИЯФ МГУ, [3] следующие:

Горизонтальный по x $0,4\pi$ мм · мрад
 Вертикальный по y $0,4\pi$ мм · мрад
 Продольный по z $4,8\pi$ КэВ·град

Из сравнения реальных эмиттансов и эмиттансов, принятых при моделировании, видно, что реальный пучок проходит по всей трассе с апертурой в 2 см с большим запасом, в который укладываются допустимые нестабильности всех фокусирующих и отклоняющих элементов в пределах $\pm 0,1\%$. Допуски на градиенты и поля линз и магнитов и на их положение на трассе в пределах $\pm 1\%$ могут быть скомпенсированы изменением токов в обмотках магнитных элементов.

При увеличении ускоряемого тока до 100 мА не происходит заметных изменений в огибающей пучка под действием объёмного заряда на всех стадиях ускорения. Дальнейшее увеличение тока до 500 мА вызывает некоторое разбухание пучка, которое может быть скомпенсировано изменением режимов питания квадрупольных линз.

Градиенты квадрупольных линз, полученные при моделировании, не превышают 200 Гс/см. При апертуре в 2 см и поле в магнитах до 2 кГс размеры линз и магнитов невелики и могут быть изготовлены в лабораторных условиях.

Ускоритель–рециркулятор рассчитывался как вариант инжектора разрезного микро-трона. Но он может быть применён также для сверхпроводящих ускоряющих секций, у

которых поперечный размер существенно больше, чем у тёплых секций, и также может найти применение как самостоятельный ускоритель для различных исследовательских и прикладных целей.

В заключение автор приносит благодарность В.И.Шведунову за полезные обсуждения и выражает признательность коллективу Los Alamos Accelerator Code Group LANL за предоставленную возможность использовать для расчётов программу TRACE 3-D.

Список литературы:

1. Алимов А.С. и др. Состояние работ по сооружению разрезного микротрона непрерывного действия на энергию 175 МэВ центра ЭМИЯ. XIV Собрание по ускорителям заряженных частиц. — ИФВЭ, Протвино, т. 4, стр. 168.
2. Котов В.И., Миллер В.В. Фокусировка и разделение по массам частиц высоких энергий. — М.: Атомиздат, 1969, стр. 64.
3. Alimov et al. Moscow CW Race-Track Microtron. — Preprint INR MSU N-93-9/301.