

ИМПУЛЬСНЫЕ БЕЗЖЕЛЕЗНЫЕ ИНФЛЕКТОРЫ ДЛЯ ИНЖЕКЦИИ И ВЫВОДА ЧАСТИЦ В ЦИКЛИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЯХ

В. А. Буланов, Е. В. Горбачев, А. В. Тузиков, А. А. Фатеев¹

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлена схема вывода пучка из циклического ускорителя с использованием импульсного септум-магнита. Длительность импульса магнитного поля — около 10 мкс, амплитуда — около 1 Тл. Приводятся концептуальная конструкция септума и схема питания. Генератор питающего импульса обеспечивает ток около 100 кА в токовой петле с индуктивностью 1 мкГн.

The beam extraction system from cyclic accelerator using pulsed septum magnet is described. The magnetic field pulse is about 10 μ s duration with about 1 T amplitude. The conceptual septum design and power supply circuit is presented. The pulse power supply provides about 100 kA current in the 1 μ H load.

PACS: 29.20.D-

ВВЕДЕНИЕ

В Объединенном институте ядерных исследований продолжается разработка и создание ионного коллайдера NICA [1]. Одной из основных установок комплекса является бустер, в котором производится предварительное ускорение и охлаждение ионного пучка. В настоящее время предусмотрено размещение в кольце бустера ударного и септумного магнитов. Они служат для обеспечения быстрого (однооборотного) вывода ионного пучка из бустера. Схема размещения магнитов на участке быстрого вывода приведена на рис. 1.

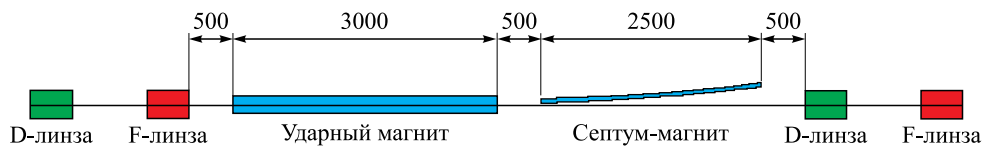


Рис. 1. Схема размещения элементов системы быстрого вывода пучка в третьем прямолинейном промежутке бустера

¹E-mail: fateev@sunse.jinr.ru

1. ВЫБОР ТИПА СЕПТУМНОГО МАГНИТА

Известно несколько основных типов септум-магнитов: магнит с токонесущим септумом постоянного тока с «теплыми» или сверхпроводящими обмотками; магнит Ламбертсона; магнит с токонесущим септумом импульсного тока; магнит с электромагнитным экраном в качестве септума.

Все перечисленные варианты септум-магнитов основаны на использовании магнитопроводов из шихтованного электротехнического железа для формирования магнитного поля в области вывода (ввода) пучка.

В данной работе рассматривается вариант «безжелезного» импульсного септум-магнита, который представляет собой токовую петлю, заключенную в проводящий экран. При выборе варианта септумного магнита решающим явился тот факт, что вывод из бустера спроектирован одноразовым с большой скважностью: цикличность 0,25 Гц при длительности выводимого пучка менее 1 мкс.

В современной ускорительной технике такой подход встречается крайне редко. Во всяком случае, в наиболее известных кольцевых ускорителях подобные устройства не применяются. Реальным прототипом послужило устройство, применявшееся в экспериментах по коллективному методу ускорения для инъекции электронного пучка в слабофокусирующее магнитное поле [2].

Эскизный вариант конструкции септум-магнита, предназначенного для системы вывода ионного пучка из бустера NICA, представлен на рис. 2. Более детальная проработка конструкции будет кардинально зависеть от того, на каком участке («теплом» или «холодном») располагается септум-магнит.

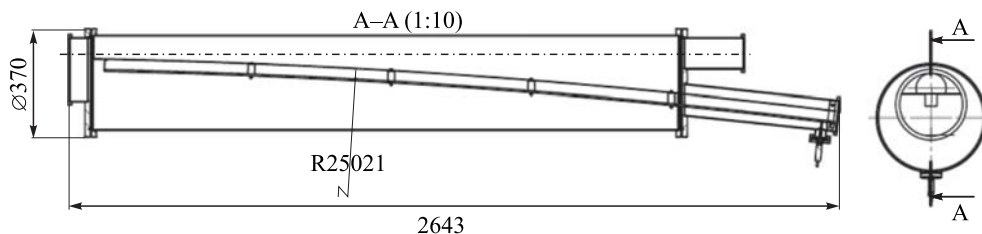


Рис. 2. Концептуальная конструкция «безжелезного» септум-магнита

В данной конструкции отклоняющее магнитное поле формируется в пространстве между токонесущей полосковой шиной и широкой септумной перегородкой, которая одновременно является и обратным токопроводом, и частью общего проводящего экрана, внутри которого сосредоточены все магнитные поля — как рабочее, так и рассеянное. Ток в септумном магните формируется разрядом емкостного накопителя и представляет собой полусинусоиду длительностью ~ 10 мкс.

2. МАКЕТ СЕПТУМНОГО МАГНИТА

Для проведения предварительных магнитных измерений был изготовлен макет длиной 1 м с поперечными размерами экрана, близкими к реальным. Токонесущая шина шириной 60 мм со слегка (30°) загнутыми краями расположена в 40 мм над септумом.

Замыкание шины на септум осуществляется двумя проводниками шириной 10 мм, расположенными по краям. Расстояние от точки закорачивания до выходного отверстия экрана менялось в пределах 0–40 мм. Вид макета показан на рис. 3.

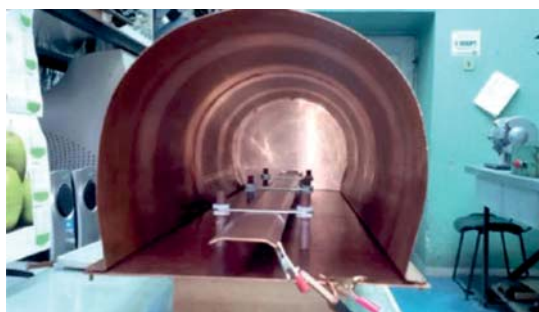


Рис. 3. Макет импульсного септумного магнита с экраном

С помощью макета были проведены измерения погонной индуктивности (~ 350 нГн/м), вычислена величина тока, необходимая для получения магнитного поля 1 Тл (~ 130 кА), а также измерены распределения поля по вертикали и по горизонтали.

Магнитное поле по сечению пучка вдоль всей траектории в септум-магните должно быть достаточно однородным. В рассматриваемом варианте распределение поля определяется в первую очередь геометрией токовой шины. Следует отметить, что и расчеты, и измерения осложняются из-за относительно короткой длительности импульса.

Промышленных измерителей полей при таких длительностях просто не существует, поэтому приходилось проводить относительные измерения, а абсолютную привязку основывать на расчетах и косвенных измерениях.

Расчеты же при такой длительности, когда толщина скин-слоя составляет 0,3 мм (толщина медной шины 2 мм), являются не совсем стандартной процедурой и требуют аккуратного подхода.

Измерения проводились по следующей методике: токовая петля запитывалась от тиристорного импульсного источника тока; длительность полуволны $\pi\tau = 12$ мкс; регистрировался дифференциальный сигнал с индукционного датчика при помощи двух каналов цифрового осциллографа.

При измерениях вертикального распределения измерительная катушка располагалась в центральном положении по горизонтали внутри токовой петли. Амплитуда сигналов приводится в миллиметрах экрана осциллографа (рис. 4).

Видно, что в диапазоне ± 10 мм от центра апертуры относительное изменение не превышает 3%, хотя и заметна тенденция к увеличению поля от экрана к токовой шине.

При измерениях горизонтального распределения измерительная катушка расположена в центральном положении по вертикали внутри токовой петли.

При перемещении катушки ± 10 мм по горизонтали от центра апертуры относительное изменение не превышает 2%. Более точно измерить было невозможно по техническим характеристикам осциллографа.

При измерениях продольного распределения (рис. 5) измерительная катушка расположена в центральном положении по вертикали и горизонтали внутри апертуры токовой петли. Отсчет ведется от входной апертуры токовой петли внутрь.

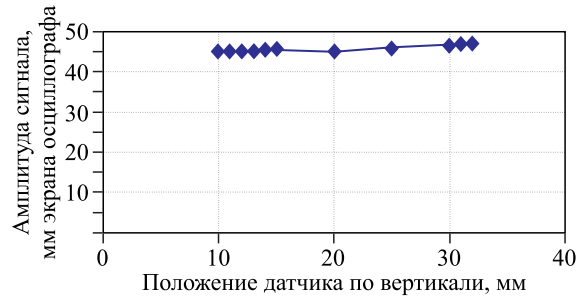


Рис. 4. Распределение магнитного поля по вертикали

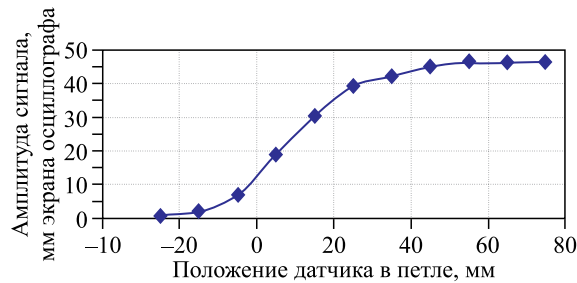


Рис. 5. Распределение магнитного поля вдоль продольной оси

Из рис. 5 видно, что:

- уже через 50 мм от точки закорачивания на экран начинается область продольной однородности;
- поле между петлей и фронтальным экраном имеет то же направление, что и внутри петли, по крайней мере на длине 30 мм, хотя априори должна быть точка перехода к противоположному направлению.

3. ЗАВИСИМОСТЬ АМПЛИТУДЫ РАССЕЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СЕПТУМ-МАГНИТА ОТ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ТОКОВОЙ ПЕТЛЕЙ И ФРОНТАЛЬНЫМ ЭКРАНОМ

При измерениях распределений магнитных полей расстояние между координатой закорачивания токовой петли и фронтальным экраном было неизменным и составляло 40 мм. Априори предполагалось, что чем больше это расстояние, тем меньше величина полей, проникающих через выходную апертуру в зону циркулирующего пучка. Однако оказалось, что есть точка минимума проникающего поля при расстоянии, значительно меньшем 40 мм. Это объясняется тем, что сложное распределение токов в области закорачивания токовой петли создает между петлей и экраном изменяющееся в пространстве по амплитуде и даже направлению магнитное поле.

И, меняя расстояние между петлей и экраном, можно изменять амплитуду и полярность (направление) магнитного поля вне экрана, в том числе в области орбиты пучка.

В результате проведенных измерений было оптимизировано продольное положение токовой петли и получен уровень рассеянных полей в области циркулирующего пучка $\sim 2 \cdot 10^{-4}$ от уровня поля в септуме.

4. МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ НАГРУЗКИ В СЕПТУМ-МАГНИТЕ

На токонесящие поверхности септумного магнита воздействуют механические силы, которые довольно просто оценить по формуле $F_l = BI l / 2$, где F_l — результирующая сила (Н) на длине l (м); I — суммарный ток (А); B — индукция магнитного поля на поверхности (Тл).

В случае шины прямого тока следует вычесть силы, действующие на внешнюю поверхность. Для тока 130 кА и поля 1 Тл получим силу 40 кН на 1 м длины.

При длительности полусинусоидального импульса 10 мкс полученный механический импульс не представляется чрезмерным и может быть легко погашен элементами крепления.

Нагрев шины прямого тока, а тем более нагрев септума импульсным током можно оценить только весьма приблизительно, поскольку расчет распределения плотности тока по сечению в проводящих элементах — задача довольно сложная. Предварительная оценка показывает, что средняя выделяемая мощность при частоте 0,25 Гц не должна превысить 100 Вт для всего устройства. Для «теплого» варианта септумного магнита эта величина не представляется критичной. Более точно оценить нагрев можно экспериментальными методами.

5. СХЕМА ПИТАНИЯ

Для запитки септума была выбрана схема аperiodического разряда сосредоточенной емкости на индуктивную нагрузку (рис. 6).

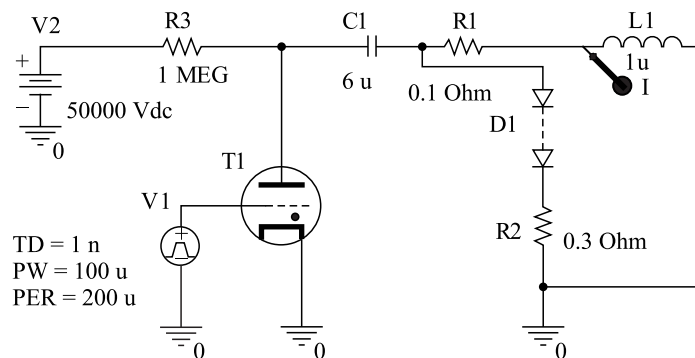


Рис. 6. Схема импульсного питания септума. $L1$ — полная эквивалентная индуктивность схемы; $C1$ — накопительная емкость; $R1$ — эквивалентное сопротивление омических и диэлектрических потерь

Цепь D1–R2 позволяет диссипировать энергию, что может иметь важное значение для криогенного варианта. Для коммутации предполагается использовать водородный тиратрон типа ТДИ. В расчетной схеме он смоделирован как коммутатор с внутренним сопротивлением 0,01 Ом.

Длительность импульса (~ 10 мкс) выбрана минимально возможной для обеспечения требуемой неоднородности магнитного поля во времени.

Расчетная форма импульса тока показана на рис. 7.

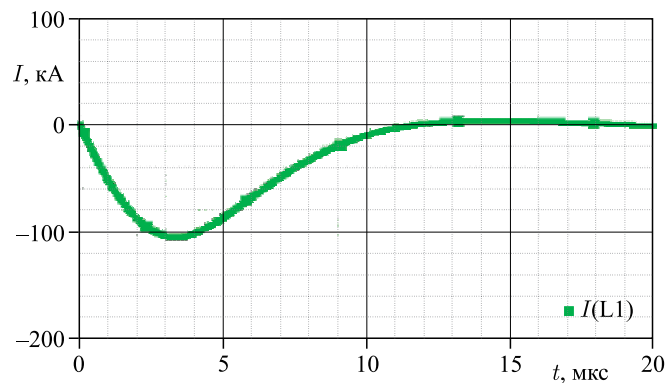


Рис. 7. Расчетная форма импульса тока

ВЫВОД

Предлагаемый вариант септумного магнита представляется вполне реализуемым и удовлетворяет всем основным требованиям, предъявляемым к септум-магниту бустера комплекса NICA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ускорительно-накопительный комплекс NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility): Техн. проект / Под ред. И. Н. Мешкова и А. О. Сидорина. Дубна, 2009; <http://nucloweb.jinr.ru/nica/index1.htm>.
2. Азорский Н. И. и др. Исследование инжекции электронного пучка в адгезатор КУТИ-20. Препринт ОИЯИ 9-88-224. Дубна, 1988.