

Магнитотвердые регулируемые квадруполи для фокусировки протонного пучка на мишень нейтронного генератора ИТЭФ

В.С. Скачков, В.В. Васильев, М.М. Кац, А.М. Козодаев, А.М. Степанов, О.В. Шведов
ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

Проектом нейтронного генератора ИТЭФ предусмотрена подача протонов с выхода ускорителя-драйвера Истра-36 на бериллиевую мишень подкритической сборки с помощью канала транспортировки, содержащего горизонтальный и вертикальный участки [1, 2]. Для облегчения теплового режима и для повышения срока службы мишени предполагается обеспечить достаточно равномерное распределение пучка по ее сечению. Магнитные элементы, диагностическая аппаратура и вспомогательное оборудование вертикального участка расположены в зоне реактора и подвергаются действию нейтронного и гамма-облучений. Эти элементы должны быть достаточно надежными, а ввиду крайней ограниченности места для их размещения — весьма компактными.

1. Основные режимы работы транспортирующего канала

На этапе физического пуска нейтронного генератора в упрощенном варианте предполагается работать в режиме одиночных относительно коротких импульсов пучка током величиной 10–100 мА. Транспортирующий канал при этом должен обеспечивать только фокусировку пучка на мишень и помимо поворотных магнитов будет включать в себя только квадруполи Q2, Q3, Q4, Q6, Q7 (рис.1).

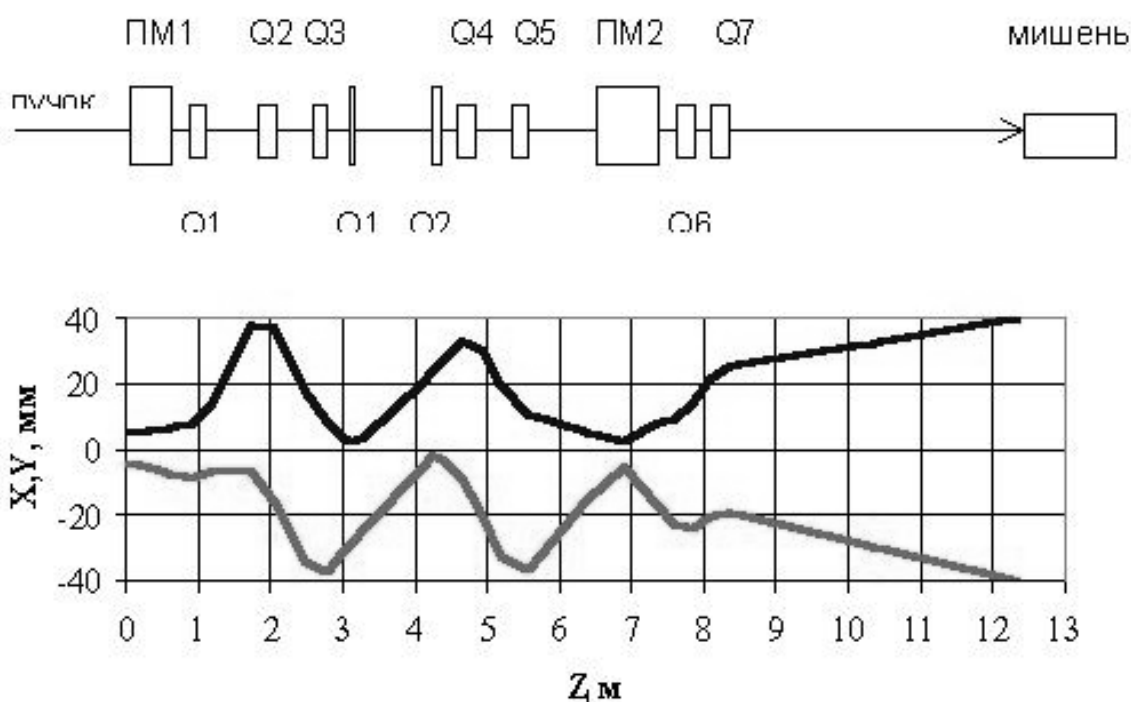


Рис. 1: Схема расположения магнитных элементов транспортирующего канала (спрямленное изображение) и изменение поперечных размеров x (верхняя кривая) и y (нижняя кривая) пучка вдоль канала в штатном режиме работы драйвера.

Переход к штатному режиму работы нейтронного генератора будет осуществляться путем постепенного наращивания длительности импульсов пучка до 220 мкс и частоты повторения — до проектной величины 25 Гц. На этом этапе должна быть обеспечена качественная фокусировка пучка на мишень и необходимая равномерность его распределения по сечению. В этом режиме вводятся в действие все элементы: квадруполь Q1–Q7 (фокусировка) и октупольные линзы O1, O2 (обеспечение равномерности поперечного распределения пучка на входе в мишень).

На обоих этих этапах предусмотрена стадия настройки транспортирующего канала, при которой на низких уровнях средней мощности выходного пучка драйвера осуществляется поиск оптимальных режимов работы магнитных элементов канала по требуемым параметрам пучка на мишени. На этой стадии в действие вводятся только те элементы, которые необходимы последующему основному режиму.

Предусмотрен широкий диапазон перестройки магнитных полей фокусирующих элементов, причем, как показывают расчеты, никаких дополнительных перемещений элементов вдоль ионопровода не потребуется.

2. Квадрупольный дублет вертикального участка

Дублет Q6-Q7 осуществляет преобразование сильно удлиненного поперечного профиля пучка, выходящего из рабочего зазора 30x60 мм поворотного магнита, в круг диаметром 90 мм на входе в мишень. (Размеры пучка (диаметр 80 мм) на входе в мишень, указанные на рис.1, соответствуют той части поперечного сечения пучка, в которой он распределен наиболее равномерно.) Апертура 100 мм квадруполь дублета обеспечивает проводку пучка, который имеет максимальный размер 60 мм в линзе Q7, а на 4-метровом участке дрейфа от дублета до мишени пучок имеет относительно малую расходимость (3–12 мрад в зависимости от режима работы драйвера).

Первоначально линзы дублета были спроектированы как электромагнитные, имели расчетную длину полюсных наконечников по 250 мм и градиенты 5.82 и 3.61 Т/м (в Q6 и Q7 соответственно и для штатного режима). Однако в дальнейшем для размещения дополнительных средств диагностики пучка и вакуумного затвора потребовалось расширить свободные участки ионопровода как между линзами, так и между линзой Q7 и входом в реактор, чему препятствовали обмотки, выступающие за габариты полюсных наконечников. Кроме того, размещение и монтаж самих линз требовали значительных переделок конструкции надстройки реактора и сооружения для линз специальных опор. Конструкция этого узла вертикального участка существенно упрощается, если линзы дублета выполнить из постоянных магнитов, во-первых, за счет исключения обмоток, а во-вторых, благодаря появляющейся возможности сократить длину линзы Q7, увеличив в ней градиент. Расчет канала показывает, что любой режим работы драйвера обеспечивается при максимальном значении градиента 9 Т/м в обеих линзах и уменьшении длины линзы Q7 до 150 мм.

В вертикальном канале ионопровода предусмотрена дополнительная защита от потоков нейтронов, восходящих из центральной зоны реактора. Это необходимо для обеспечения безопасной работы персонала в лабораторных помещениях, примыкающих к реакторному блоку, а также дает возможность существенно ослабить радиационную нагрузку на технологические узлы драйвера, расположенные в реакторном помещении. Защитные блоки будут содержать традиционные поглотители нейтронов и размещены в вакуумной трубе за пределами расходящегося конуса (на участке после линзы Q7, см. рис. 1), в котором распространяется пучок протонов. Исходным требованием при выборе толщины поглотителя было снижение средней интенсивности нейтронов в местах расположения обмоток пово-

ротного магнита и квадруполь дублета до $10^7 - 10^8$ нейтрон/см² с. Постоянные магниты, изготовленные из сплава Nd-Fe-B, в условиях непрерывного облучения такой интенсивности теряют до 10% (этому уровню деградации соответствует флюэкс $3 \cdot 10^{15}$ нейтрон/см² [3]) первоначальной намагниченности за период не менее года. С учетом 15% запаса на регулировку и такого же запаса на радиационную деградацию верхняя граница диапазона изменения градиента в каждой линзе определена в 12 Т/м, а нижняя — 5 Т/м, при этом глубина регулировки составит 58%.

3. Конструкция квадруполей

Линзы спроектированы в рамках неявнополюсной конструкции и не содержат магнитопровода [4–6]. Форма магнитных элементов (из сплава Nd-Fe-B), идентичных в обеих линзах, выбрана квадратной для минимизации числа типоразмеров. В каждом из двух рядов устанавливается по 16 элементов в азимутальном направлении (рис.2). Внешние диаметры линз (без учета электродвигателей, устанавливаемых на корпусе) одинаковы и равны 190 мм. Вес постоянных магнитов 22 и 13 кг в линзах Q6 и Q7 соответственно.

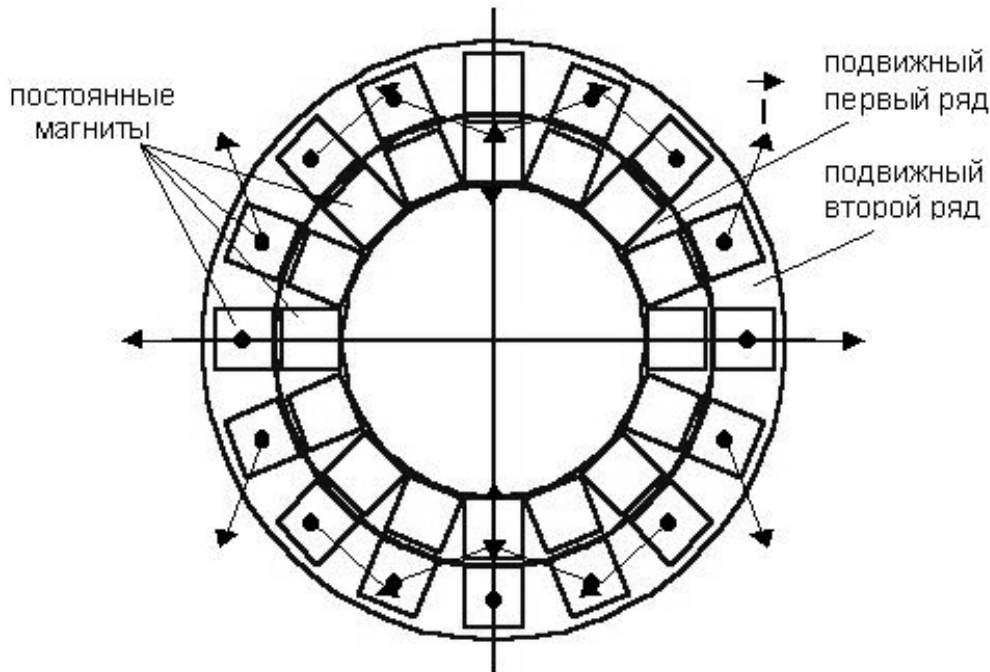


Рис. 2: Поперечное сечение магнитотвердой квадрупольной линзы с регулируемым градиентом. Показанное для второго ряда распределение намагниченности I и унификация формы магнитных элементов (сечение — квадрат) позволяют снизить количество типоразмеров элементов до двух (минимально возможно — до одного).

Градиент регулируется путем вращения рядов друг относительно друга, для чего предусмотрен автоматизированный привод. Непрерывный контроль положения медианных плоскостей в лабораторной системе координат и величины градиента осуществляется измерителями с неподвижными холловскими датчиками. Система измерения позволит производить дистанционную установку режима работы дублета и ввести информацию о его состоянии в систему безопасности нейтронного генератора.

Список литературы

- [1]. I.V.Chuvilo, A.A.Kolomiets et al. Subcritical Neutron Generator Test Facility for Nuclear Waste Transmutation Studies. – Proc. 346 of Int. Conf. on Accelerator-Driven Technologies and Applications, Las Vegas, NV, 1994, p.826.
- [2]. A.M.Kozodaev, A.A.Drozdovsky et al. Program of Activities for Linac-Driver of ITEP Subcritical Facility. 1997 Particle Acceler. Conf., Vancouver, Canada. – Bulletin of the American Phys. Soc., 1997, v.42, 3, p.1339.
- [3]. J.R.Cost and R.D.Brown. Sm-Co Permanent Magnets: Effect of Fast Neutron Irradiation. Preprint LA-UR-88-4263.
- [4]. I.M.Kapchinskiy, A.M.Kozodaev et al. Drift Tubes for a Focusing Channel of Ion Linear Accelerator. – Proc. of 1989 PAC, IEEE, vol.2, Chicago, IL, USA, 1989, p.1073.
- [5]. I.M.Kapchinskiy, N.V.Lazarev et al. Circular Permanent Magnet Quadrupoles for Higher Frequency and Higher Shunt-Impedance Linacs. – Proc. of EPAC-92, Berlin, 1992, p.1400.
- [6]. V.S.Skachkov. Split-Pole PM Dipoles and Quadrupoles with Variable Field. – Proc. of the Fifth European Particle Accelerator Conference (EPAC-96). Spain Barcelona, 10-14 June 1996, v.3, p.2190.