

Разработка прототипа септум квадрупольного магнита для DESY*

Б.Л. Паркер (*BNL, США*)

Н.Л. Смирнов, Л.М. Ткаченко,

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Введение. С 1995 г. в DESY разрабатывается программа повышения светимости на ускорителе HERA. В соответствии с этой программой магнитная структура в участках $e-p$ -встреч должна быть заменена. Одним из элементов этой структуры является септум квадрупольный магнит MSQ, прототип которого разработан, изготовлен и исследован в ИФВЭ. Общий вид септум квадрупольного магнита показан на рис.1а, где левая половина квадрупольного магнита заменена на отражающую пластину толщиной 70 мм. Апертура протонного пучка размещена внутри апертуры магнита, и ее центр смещен в горизонтальном направлении на 17 мм вправо от септум пластины. Сумма модулей низших нелинейностей поля на радиусе нормализации 15 мм с центром окружности, совпадающим с центром протонного пучка, не должна превышать 5×10^{-4} . Апертура электронного пучка находится в вырезе отражающей пластины, внешнее магнитное поле в области электронного пучка должно быть не более 5 Гс, а расстояние между вакуумными камерами протонного и электронного пучков не должно превышать 18 мм.

1. Оптимизация геометрии септум пластины. Отражающая септум пластина изготовлена из стали марки СТ10, ее магнитные свойства представлены на рис.1б, где кривые 1 и 3 — магнитные проницаемости образцов, вырезанных из пластины соответственно до и после термодиффузионного отжига при температуре 880°C . Кривая 2 представляет магнитную проницаемость образца после отжига и механической обработки пластины. Видно, что отжиг увеличивает максимальную величину магнитной проницаемости почти вдвое, однако механическая обработка снижает эту величину на 30%. Во всех дальнейших расчетах использовалась кривая 2.

Оптимизация геометрии проводилась с помощью пакета программ MULTIC [1]. Поле в апертуре магнита может быть представлено в виде ряда

$$B_y + iB_x = B_0 \sum_{n=1}^{\infty} W_n \left(\frac{x + iy}{r_0} \right)^{n-1}, \quad (1)$$

где $B_0 = G_0 r_0$; G_0 — градиент поля; r_0 — радиус нормализации, а $W_n = b_n + ia_n$ — нелинейности порядка $n - 1$. В исходном QC квадруполе расчетный градиент поля при максимальном токе в витке $I_0 = 380 \text{ A}$ равен 16.05 Тл/м , и все законные нелинейности поля в центральном сечении вида b_{4n-2} на радиусе нормализации 25 мм не превышают 1×10^{-4} . На окружности, сдвинутой вправо от горизонтальной оси, появляются все нелинейности вида b_n . Низшие нелинейности на окружности с радиусом нормализации $r_0 = 25 \text{ мм}$ и сдвиге ее центра $x_c = 30 \text{ мм}$ представлены в табл.1 для симметричного

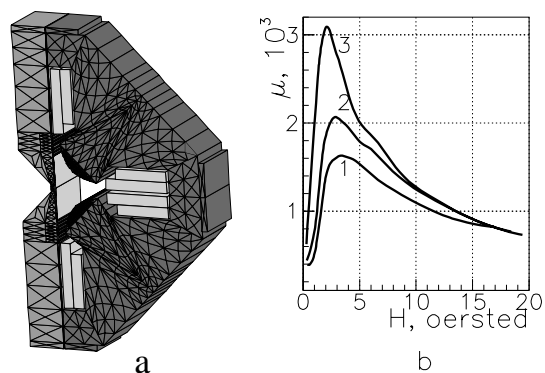


Рис. 1: Поперечное сечение MSQ магнита (а) и свойства стали септум пластины (б).

*Работа выполнена при финансовой поддержке DESY.

квадруполя и квадруполя с отражающей септум пластиной без выреза для электронного пучка. Для сравнения в последней строке таблицы представлены измеренные нелинейности квадруполя.

Таблица 1: Исходные нелинейности поля в центральном сечении, 10^{-4} .

	n	3	4	5	6	7	8	9	10
Расчет	QC-квадруполь	1.2	0.3	-0.7	-0.8	-0.3	-0.0	-0.3	-0.4
Расчет	MSQ без выреза	2.6	0.2	-0.7	-0.8	-0.3	-0.2	-0.3	-0.4
Измерения	MSQ без выреза	2.2	0.5	-0.5	-0.1	-0.1	-0.2	-0.4	-0.4

Для определения влияния отражающей септум пластины на качество поля в апертуре удобно воспользоваться функцией [2]:

$$f(r) = f(x = y) = \frac{G(x = 0, y)}{G(x, y = 0)} - 1. \quad (2)$$

Очевидно, что $f(r) \equiv 0$ в идеально симметричном квадруполе. Магнитный поток через септум пластину с нулевой толщиной перемычки не замыкается по магнитопроводу и сильно возмущает качество поля как в апертуре протонного пучка, так и в области электронного пучка. Так, вырез под 45° в обе стороны от медианной плоскости дает $f(r = 10)$ мм $> 10\%$. Уменьшение угла выреза слабо влияет на качество поля, но сильно уменьшает рабочую область для размещения электронного пучка. Поэтому угол 45° зафиксирован.

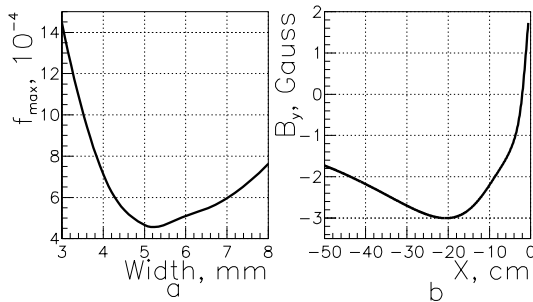


Рис. 2: Функция $f_{max}(r, w_1)$ (a) и распределение поля в области электронного пучка (b).

Перемычка в септум пластине толщиной w позволяет пропустить значительную часть магнитного потока через себя, и качество поля существенно улучшается. Зависимости максимальной величины $f(r)$ представлены на рис.2а при максимальном рабочем токе квадруполя I_0 , откуда видно, что функция $f_{max}(w)$ имеет четкий минимум, равный 4.5×10^{-4} при толщине перемычки около 5 мм. Рассеянные поля при $w = 5$ мм не превышают 3 Гс, и их максимальная величина находится за апертурой электронного пучка (рис.2б). Геометрия квадруполя с 5 мм толщиной перемычки имеет высокое качество поля при максимальном токе основной обмотки I_0 , однако на низких уровнях тока качество поля ухудшается. Например, при токе $I = I_0/8$ максимальное значение функции f превышает 6×10^{-3} .

2. Корректирующие обмотки. Для регулировки качества поля во всем диапазоне основного тока квадруполя разместим корректирующую обмотку с размерами 3×3 мм внутри перемычки септум пластины в верхней половине MSQ магнита с симметричным отражением в нижней полуплоскости. Суммарная толщина перемычки $w = w_1 + w_2$ состоит из внутренней стенки толщиной w_1 между корректирующей обмоткой и апертурой квадруполя и внешней стенки толщиной w_2 , закрывающей корректирующую обмотку со стороны электронного пучка. Величина w фиксирована и равна оптимальной толщине 5 мм. Эта геометрия с нулевым током в корректирующей обмотке дает максимальные значения функции $f_{max}(w_1, i)$ в интервалах $2 \text{ мм} \leq w_1 \leq 4 \text{ мм}$ и $0.125 \leq i \leq 1$, которые описываются формулой

$$f_{max}(i, w_1) = [147 - 246i + 114i^2 + (-17 + 24i - 9i^2)w_1]10^{-4}, i = I/I_0. \quad (3)$$

Из (3) следует, что функция $f_{max}(i, w_1)$ медленно уменьшается с ростом w_1 , но резко возрастает в области малых полей. Небольшие токи подстроечной обмотки могут изменить знак $f(r)$ в области высоких полей, как показано на рис.3а, где горизонтальными линиями обозначены допустимые пределы изменения функции $f(r)$. Следовательно, можно подобрать ток i_1 , устанавливающий $f(r)$ в заданные пределы во всей области протонного пучка. Однако на малых уровнях поля не удастся подавить эту функцию до требуемых значений.

Рис.3б показывает, что даже при 30 А токе корректирующей обмотки $f(r)$ лежит вне заданных допусков. Функция имеет общий уровень, близкий к плато, величиной около 2.5×10^{-3} , и узкий максимум в окрестности подстроечной обмотки. Корректирующая катушка влияет только на этот максимум и практически не изменяет общий уровень функции.

Для подавления плато функции $f(r)$ введем вторую подстроечную обмотку, примыкающую к отражающей пластине внутри апертуры протонного пучка. Высота плоской обмотки должна перекрывать всю рабочую область апертуры магнита. Из-за жестких требований к размещению вакуумной камеры протонного пучка плоская обмотка должна иметь достаточно малую ширину. Реально ее толщину можно сделать менее 1 мм.

Расчеты показали, что при оптимальной высоте плоской катушки 6 см и $i_1 = i_2 = 6$ А функция $f(r)$ полностью лежит в заданных пределах. Нижний край плоской катушки должен лежать в медианной плоскости без зазоров между верхней и нижней половинами обмоток. Попытки обрезать плоскую катушку снизу для увеличения пространства под размещение вакуумной камеры протонного пучка приводят к сильному возмущению магнитного поля в апертуре, которое невозможно подавить подстроечными токами.

3. Анализ возмущений поля и допуски на точность изготовления. Оптимизированная геометрия MSQ позволяет получить высокое качество поля во всем рабочем диапазоне токов основной обмотки в идеальном магните. Ошибки изготовления, неизбежно появляющиеся в процессе производства, искажают поле в апертуре. Как было показано выше, максимальное возмущение поля проявляется на низких уровнях основного тока, поэтому дальнейшие вычисления приводятся при $I = I_0/8$.

Влияние ошибок изготовления приведено на рис.4а. Все результаты на этом рисунке представлены при оптимальных подстроечных токах для идеальной геометрии $i_1 = i_2 = 6$ А. Нижняя кривая представляет $f(r)$ для идеальной геометрии. Искажения в геометрии плоской корректирующей катушки, такие как: параллельное смещение обмотки вправо от септум пластины на 0.5 мм; перекос катушки в вертикальном направлении, ее нижняя или верхняя часть смещена вправо от септум пластины на 0.5 мм; увеличение толщины обмотки на 0.5 мм, не оказывают никакого влияния на качество поля в апертуре магнита, все кривые $f(r)$ полностью совпадают с нижней кривой. Таким образом, допуски на точность изготовления плоской катушки свободны. Геометрические искажения малой обмотки также не влияют на качество поля, так как ее

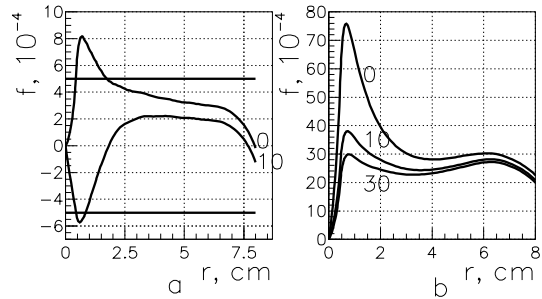


Рис. 3: Зависимости $f(r, i_1)$ при $I = I_0$ (а) и при $I = I_0/8$ (б).

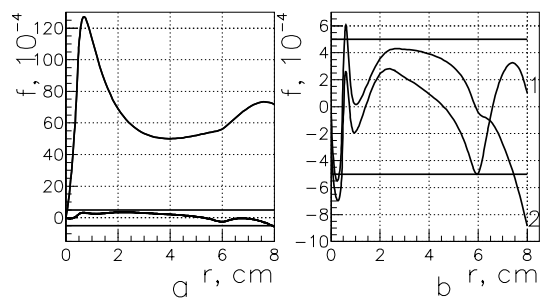


Рис. 4: Зависимости функции $f(r)$ при искажениях геометрии (а) и функция $f(r, i_1, i_2)$ (б) при $\delta_f = -20$ мкм (1) и $\delta_f = +20$ мкм (2).

вклад в поле определяется только влиянием ее токов на распределение магнитного потока в магнитопроводе, что и подтверждается расчетами.

Верхняя кривая рис.4а иллюстрирует поведение функции $f(r)$ при смещении отражающей пластины влево от магнита на $\delta_f = 0.1$ мм. В этом случае были рассмотрены два положения плоской катушки: исходное и сдвинутое совместно с пластиной. Как и следовало ожидать, кривая $f(r)$ также не зависит от положения плоской обмотки, но сдвиг пластины сильно искажает качество поля в апертуре. Реальная точность изготовления может быть не хуже 20 мкм. Тем не менее даже при таких возмущениях не удается полностью добиться требуемого качества поля на всех уровнях тока.

Вычисления показали, что толщина стенки $w_1 = 3$ мм достаточно большая, чтобы изменить магнитный поток малыми токами корректирующей обмотки в вырезе. Для улучшения качества поля необходимо повышать ток в этой обмотке, что нежелательно. Более эффективно уменьшить толщину w_1 до 2 мм и одновременно увеличить толщину w_2 до 3 мм для того, чтобы сохранить оптимальную полную толщину перемычки. При такой геометрии легко подавить возмущения поля малыми корректирующими токами при любом сдвиге септум пластины в пределах 20 мкм в обе стороны, как показано на рис.4б, где кривая 1 соответствует сдвигу пластины влево на -20 мкм, и корректирующими токами 5 А в малой обмотке и 9 А в плоской катушке. Для пластины, сдвинутой вправо на $+20$ мкм (кривая 2), соответствующие токи равны 1 и 3 А.

4. Анализ возмущений нелинейностей поля. На практике невозможно непосредственно измерить функцию $f(r)$, поэтому более удобно характеризовать качество магнитного поля по его гармоническому составу. Величины корректирующих токов на двух уровнях поля и для двух положений септум пластины со сдвигом Δ_f представлены в табл.2 с соответствующим набором нелинейностей в единицах 10^{-4} , определенных на радиусе нормализации 15 мм со сдвинутым вправо центром окружности на 17 мм. Следует заметить, что выбор корректирующих токов проводился приблизительно. Более удобно найти точный их набор экспериментально при магнитных измерениях.

Таблица 2: Нелинейности поля MSQ-квадруполя 10^{-4} при $r_0 = 15$ мм и $x_c = 17$ мм.

I	Δ_f , мкм	i_1 , А	i_2 , А	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_0/8$	-20	5	10	1.5	0.6	-0.0	0.1	-0.0	0.0	-0.2	0.2
$I_0/8$	+20	2	3	2.1	0.6	0.2	-0.1	0.1	0.0	-0.1	0.2
I_0	-20	1.5	9	-0.0	0.5	-0.4	0.2	-0.2	0.2	-0.3	0.3
I_0	+20	1	3	-0.7	-0.0	-0.1	0.1	-0.2	0.1	-0.3	0.3

Магнитные свойства стали имеют сильное влияние на качество поля. Расчеты показали, что максимальное значение магнитной проницаемости должно быть не менее 2500.

Зазор в задней стенке, закрывающей малую корректирующую обмотку со стороны электронного пучка, недопустим, так как он сильно искажает качество поля в апертуре магнита и увеличивает внешнее поле в области электронного пучка.

Закключение. Результаты проведенных разработок и исследований прототипа септум квадруполя определили конструкцию полномасштабного магнита для использования его на участке встреч ускорителя HERA. Магнитные характеристики прототипа полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к септум магниту в DESY для монтажа на канале вывода PR-Weg.

Список литературы

- [1] Ткаченко Л.М. Пакет программ MULTIC для расчета магнитных полей произвольной конфигурации. Препринт ИФВЭ 98–28, Протвино, 1998.
- [2] Marx M., Parker B., Wümpelmann H. Concept for a New Magnetic Septum Quadrupole, EPAC, Barcelona, Spain, June, 1996.