

Разработка и испытание квадрупольных магнитов для TESLA–Test Facility

Р. Бахер

ДЕЗИ, Гамбург, ФРГ

О.В. Курнаев, П.А. Милов, Н.В. Милова, Н.Л. Смирнов,

В.А. Сычев, Л.М. Ткаченко

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Введение

В соответствии с Соглашением DESY—ИФВЭ от 1995 г. для транспортировки электронного пучка с энергией 800 МэВ в зону экспериментальной установки ТТФ были разработаны, изготовлены и испытаны 4 квадрупольных магнита со следующими характеристиками (табл. 1).

Таблица 1: Исходные данные для проектирования квадрупольного магнита TESLA.

Полная габаритная длина магнита, мм	450
Диаметр апертуры по полюсам квадрупольного магнита, мм	70
Диаметр рабочей области, мм	40
Сопротивление магнита при 20°С, мОм	50
Номинальный ток в витке, А	< 270
Номинальный интеграл градиента поля, Тл	6
Неоднородность градиента поля в рабочей области, %	< 0.05

1. Выбор геометрии

Оптимизация поперечного сечения квадрупольного магнита

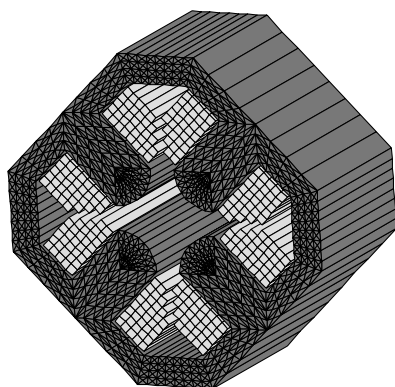


Рис. 1: Поперечное сечение квадрупольного магнита.

Для оптимизации геометрии поперечного сечения за основу выбрана конструкция квадрупольного магнита, схематически изображенная на рис. 1. В квадрупольных магнитах, длина которых сравнима с поперечными размерами, краевые поля дают существенный вклад в полный интеграл поля. Гиперболические полюса дают хорошее качество центрального поля, но не позволяют компенсировать искажения краевых полей. Для таких линз магнитопровод с профильными полюсами в виде дуг радиуса R имеет преимущество при оптимизации интегрального поля, как будет показано ниже. Кроме того, круглые полюса проще в изготовлении. Расположение витков (рис. 1) дает минимальный расход токонесущего материала. Форма лобовых частей типа RACETRACK более технологична.

Оптимизация геометрии проводилась с помощью программы MULTIC [1]. Для расчета геометрии поперечного сечения воспользуемся представлением поля

$$H_\theta(r, \theta, z) = H_0 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{n-1} [C_n(z) \cos(n\theta) + S_n(z) \sin(n\theta)], \quad (1)$$

где H_θ — азимутальная компонента напряженности поля; $H_0 = G_0 r_0$ — нормировочный множитель, равный заданной напряженности поля в центральном сечении на радиусе нормализации $r_0 = 20$ мм, совпадающем с радиусом рабочей области магнита. Очевидно, что при $r \leq r_0$ максимальная неоднородность градиента поля в центральном сечении квадруполья определяется суммой модулей законных нелинейностей поля.

Поле в апертуре формируется полюсами магнитопровода, изготовленного из стали марки СТ10, а его качество определяется магнитными свойствами ярма и величиной радиуса закругления полюса R . Влияние R на нелинейности резко уменьшается с ростом номера нелинейности. Нелинейность C_6 имеет слабую квадратичную зависимость от $R \in [35, 45]$ (мм):

$$C_6 = (-0,141R^2 + 17,784R - 487,510) \times 10^{-4}. \quad (2)$$

Нелинейность C_{10} уже практически не зависит от R и равна $-1,5 \times 10^{-4}$.

Таким образом, критерием оптимизации геометрии центрального сечения является подавление C_6 . Расчеты показали, что C_6 равна нулю при $R = 40,27$ мм. Заметим, что радиус закругления полюса определяет и его толщину, равную 56,95 мм.

Толщина стенок ярма ΔFe в ненасыщенном состоянии влияет только на C_2 . Исходя из требований минимизации веса и приемлемого градиента было выбрано $\Delta Fe = 40$ мм. Разница в градиенте при увеличении ΔFe до 60 мм не превышает 0,5%.

Значения низших нелинейностей поля в центральном сечении магнита приведены в табл. 2. Градиент поля равен $G_0 = 18,223$ Тл/м при токе возбуждения 260 А.

Таблица 2: Расчетные центральные и интегральные нелинейности поля.

R, мм	n	6	10	14	18
40,27	$C_n, 10^{-4}$	0,0	-1,5	0,02	0,00
40,27	$C_n^{int}, 10^{-4}$	-5,3	-1,3	0,02	0,00
41,30	$C_n, 10^{-4}$	-5,2	-1,5	0,0	0,00
41,30	$C_n^{int}, 10^{-4}$	0,3	-1,4	0,02	0,00

Оптимизация краевых полей

Суммарное воздействие на динамику частиц оказывает полное интегральное поле квадруполья, которое может быть представлено в виде, аналогичном представлению центрального поля (1). Связь интегральных нелинейностей и нелинейностей поля в центральном сечении определяется по формуле

$$C_n^{int} = \frac{1}{L_{ef}} \int_{-\infty}^{\infty} C_n(z) dz, \quad L_{ef} = \frac{1}{G_0} \int_{-\infty}^{\infty} G(0, 0, z) dz = \frac{G^{int}}{G_0}. \quad (3)$$

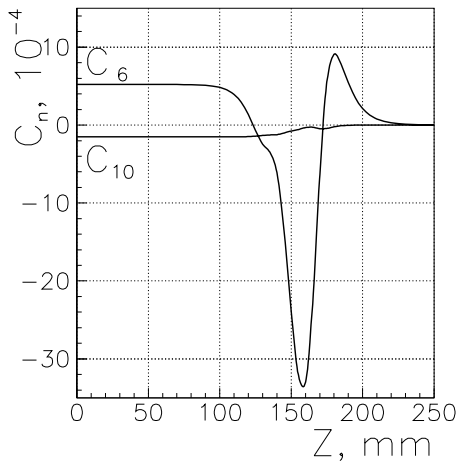


Рис. 2: Продольное изменение низших нелинейностей.

2. Изготовление квадруполей

Так как основной режим работы магнитов — постоянноточный, магнитопровод изготовлен из нешихтованной стали. Для удобства монтажа вакуумной камеры ярмо выполнено из 4 идентичных частей, состоящих из 4 блоков длиной 85 мм. Блоки вырезались из листовой стали с последующей шлифовкой полюсных и базовых поверхностей с требуемой погрешностью не более 20 мкм.

Обмотки магнита изготавливались из стандартной медной трубки квадратного сечения с размерами $8,0 \times 8,0$ мм² с последующей вакуумной заливкой. Гидравлические, тепловые и высоковольтные испытания обмоточных блоков показали полное соответствие требуемым характеристикам.

3. Магнитные измерения

Для измерения квадруполей была использована стандартная измерительная система [2], состоящая из вращающегося индукционного датчика (ИД), включающего в себя плоские, радиальные измерительные рамки, привод ИД на основе шагового двигателя (ШД), усилитель сигнала с ИД, интегратор на ПНЧ и сервисных блоков для синхронизации и связи с ЭВМ и источник тока возбуждения. Анализ погрешностей магнитных измерений показал, что полная погрешность измерения интеграла поля не превышает 10^{-3} , а нелинейностей интеграла поля — 2×10^{-5} .

Измерение интегральной фокусирующей силы

Измерения посредством вращающейся измерительной рамки дают средний на ее длине градиент поля, определяемый по формуле (3), с интервалом интегрирования, равным длине рамки $L_p = 1$ м. Так как выполняется условие ($L_p \gg L_{ef}$), справедливо равенство $G^{int} = L_p \bar{G}_{meas}$.

Идентичность фокусирующей силы в серии наиболее наглядно показывает параметр I_{nom} — величина тока возбуждения при требуемом интеграле градиента 6 Т. Максимальный разброс в серии параметра I_{nom} не превышает 0.32%, а при соответствующей сортировке квадруполей в дублет (Q1 – Q4, Q2 – Q3) — 0,24%. Идентичность фокусирующей силы в серии наглядно показывает табл. 3, где приведены

Интегральные нелинейности квадруполя с выбранной выше геометрией центрального сечения представлены в табл. 2. Краевые нелинейности определяются геометрией лобовых частей обмотки и дают значительный вклад в интегральное поле для короткого магнита, уменьшающийся с ростом n . Интегральная нелинейность C_6^{int} подавляется изменением центральной нелинейности посредством увеличения R до 41,30 мм. Распределение нелинейностей C_6 и C_{10} вдоль продольной оси квадруполя в окончательной геометрии представлено на рис. 2, а значения низших нелинейностей поля и интеграла поля — в табл. 2.

значения тока возбуждения линзы (I_{nom}) при требуемом интеграле градиента, равном $6 T$. В табл. 3 также приведен остаточный градиент G_{rem}^{int} в цикле тока $0 - 250 - 0 A$.

Измерение нелинейностей

Используемый метод измерений дает усредненные на длине измерительной рамки нелинейности, определяемые по формуле (3). Измеренные нелинейности представлены в табл. 3, где $\sum |C_n|$ есть сумма модулей законных нелинейностей. Заметим, что незаконная нелинейность C_4 появляется из-за асимметрии, вызванной погрешностью сборки магнита (60 мкм), а все $S_n < 2 \times 10^{-5}$.

Таблица 3: Измеренные магнитные характеристики квадруполей.

Номер магнита	Q1	Q2	Q3	Q4
I_{nom}, A	235,48	235,29	234,72	235,44
$G_{rem}^{int} \times 10^3, T$	9,5	9,6	9,4	9,8
$C_4 \times 10^4$	0,4	1,8	1,9	-0,1
$C_6 \times 10^4$	-1,3	-1,4	-1,1	-1,2
$C_{10} \times 10^4$	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4
$\sum C_n \times 10^4$	3,1	4,6	4,4	2,7

Как следует из табл. 3, даже с учетом C_4 качество поля выше требуемого. После переборки магнитов изменение законных гармоник не превысило 2×10^{-5} , что сравнимо с точностью измерений, а нелинейность C_4 изменилась на $1,5 \times 10^{-4}$, что также не превысило допуска.

Заключение

Результаты испытаний показали полное соответствие с расчетами, а параметры изготовленных магнитов оказались лучше требуемых.

Список литературы

- [1] Tkachenko L.M. In "Computer Codes in Accelerator Domain", DESY Internal Report HERA M-92-07 (1992) 40.
- [2] Смирнов Н.Л. — Препринт ИФВЭ 91-178, Протвино, 1991.