



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 99-28
ОУ-У70

И.В.Богданов, Л.М.Васильев, В.И.Гридасов, К.П.Мызников,
В.В.Сытник, Л.М.Ткаченко, П.А.Щербаков

**РАЗРАБОТКА СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО КВАДРУПОЛЯ
С ВЫСОКИМ ГРАДИЕНТОМ ПОЛЯ НА ОСНОВЕ Nb₃Sn**

Протвино 1999

Аннотация

Богданов И.В. и др. Разработка сверхпроводящего квадруполь с высоким градиентом поля на основе Nb_3Sn : Препринт ИФВЭ 99-28. – Протвино, 1999. – 16 с., 13 рис., 7 табл., библиогр.: 14.

В рамках сотрудничества между ИФВЭ и FNAL в ИФВЭ разработана конструкция сверхпроводящего квадруполь с высоким градиентом поля. В двухслойной обмотке используется сверхпроводящий материал Nb_3Sn с критической плотностью тока 600 A/mm^2 в поле 12 Тл и при температуре 4,2 К. Квадруполь рассчитан на рабочий градиент 220 Тл/м в апертуре 70 мм при рабочей температуре 4,6 К. Представлены результаты оптимизации геометрии как поперечного сечения квадруполь, так и его лобовых частей. Оптимизированная геометрия обладает высоким качеством поля и интеграла поля. Превышения поля на лобовых частях подавлены до уровня максимального поля в центральном сечении. Показано, что арочная конструкция предпочтительней конструкции с неполностью кистоунированным кабелем. Приведены допуски на точность изготовления.

Abstract

Bogdanov I.V. et al. Development of Superconducting Quadrupole with High Gradient on Nb_3Sn Base: IHEP Preprint 99-28. – Protvino, 1999. – p. 16, figs. 13, tables 7, refs.: 14.

In the frames of collaboration between IHEP and FNAL the design of superconducting quadrupole with high gradient of field have been developed in IHEP. The superconducting material of Nb_3Sn with critical density current of 600 A/mm^2 in field of 12 T and 4,2 K temperature is used in a two-layer coil. The quadrupole is calculated on the operating gradient of 220 T/m in aperture of 70 mm under working temperature of 4,2 K. The results of geometry optimization, both of cross-section of quadrupole and end parts, are presented. The optimized geometry possesses a high field quality of field and field integral. The field enhancements at the end parts are suppressed down to a level of maximal field in the central cross-section. The arch design is shown to be preferential one to that with uncompletely keystoneed cable. The tolerances on manufacturing accuracy are presented.

Введение

Постоянное совершенствование ускорительной техники предъявляет новые требования к магнитным системам ускорителей заряженных частиц. В частности, для повышения светимости в ускорительно-накопительных комплексах необходимо увеличение силы квадрупольных магнитов в участках встреч. В существующих конструкциях СП-квадрупольей обмотки изготавливаются из NbTi и предназначены для работы при температуре 4,2 К [1]. Максимальное поле этих СП-магнитов достигло предельного значения, и для дальнейшего повышения поля необходимо применять новые технологии: либо применять новые СП-материалы, например Nb₃Sn, либо снижать рабочую температуру СП-магнита до 1,8 К для материала NbTi. Применение сверхтекучего гелия при температуре 1,8 К требует создания специального криогенного оборудования и имеет большие энергозатраты при эксплуатации. С другой стороны, известно, что критическая плотность тока для Nb₃Sn при температуре 4,2 К не уступает критической плотности тока для NbTi при температуре 1,8 К [2]. Поэтому использование в качестве СП-материала Nb₃Sn при 4,2 К, несмотря на его более высокую стоимость, может оказаться более экономичным, чем переход на криогенные температуры 1,8 К для NbTi.

В ИФВЭ разработана конструкция сверхпроводящего квадрупольа с высоким градиентом поля, обмотка которого использует СП-материал Nb₃Sn [3]. Основные требования, предъявляемые к такому квадрупольному магниту, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные требования к СП-квадруполью.

Максимальный градиент, Тл/м	220
Максимальная температура, К	4.6
Диаметр апертуры обмотки, мм	70
Радиус нормализации нелинейностей, мм	25
Центральные нелинейности, 10 ⁻⁴	≤ 1
Интегральные нелинейности, 10 ⁻⁴	≤ 1

Геометрия оптимизированной конструкции квадрупольа как в центральном сечении, так и лобовых частей имеет достаточно простое технологическое исполнение. При определении температурного запаса в расчетах использовалась реальная величина критического тока 550 А/мм² без меди в поле 12 Тл при температуре 4,2 К. Предполагается, что

для изготовления СП-квадруполя будет изготовлен СП-материал с критической плотностью тока, на 10% превышающей существующую, что позволит достичь максимального градиента 250 Тл/м.

1. Свойства материалов

1.1. Обмоточный блок

Для изготовления обмоточного блока в расчетах выбран имеющийся СП-материал Nb₃Sn марки МКНОС-08-25531 [4] с характеристиками, представленными в табл.2.

Таблица 2. Характеристики провода типа МКНОС.

Диаметр провода, мм	0.8
Число волокон	25531
Диаметр волокон, мкм	1.96
Шаг твиста, мм	10
Объемное содержание меди, %	36
Отношение Nb/бронза без меди	1:2.38

Зависимость критического тока I_c этого провода от индукции B при температуре 4,2 К представлена на рис. 1.

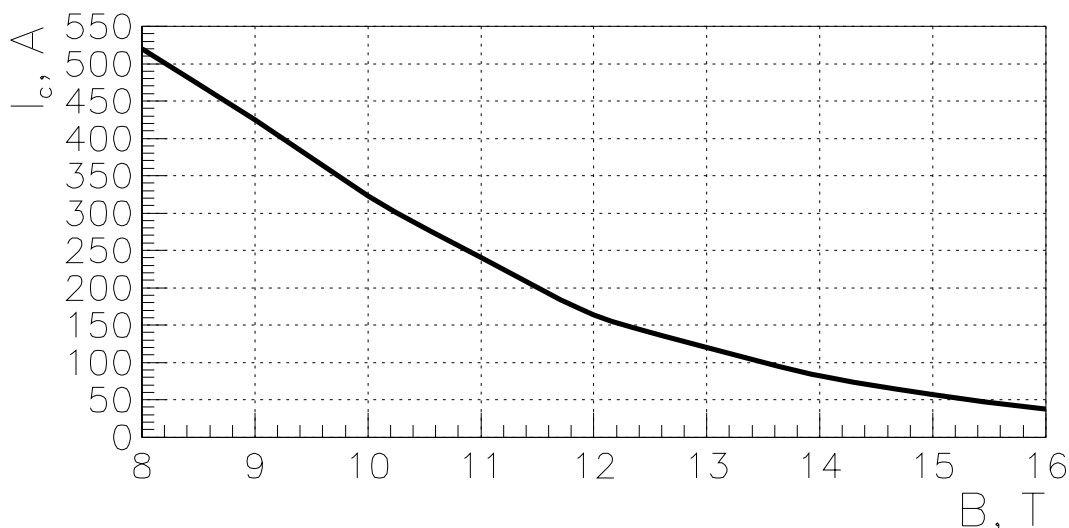


Рис. 1. Критический ток провода МКНОС-08-25531.

Как отмечалось выше, для изготовления СП-квадруполя разрабатывается новый СП-материал с характеристиками по критическому току, превышающими существующие не менее чем на 10%. В данных расчетах были использованы реальные характеристики СП-материала.

Для дальнейших расчетов температура перехода магнита в нормальное состояние при максимальном поле на обмотке B и токе в одной проволоке I определялась по двум методам: методу Крамера [5] и методу Саммерса [6]. Температура перехода в нормальное состояние по методу Крамера определяется следующими соотношениями:

$$\frac{T^2 - T_k^2}{T_c^2 - T_k^2} = \left[\frac{I_c(4,2, B)}{I_c(T, B)} \right]^{1/2}, \quad T_k = T_{c0} \left(1 - \frac{B}{B_{c2}} \right). \quad (1)$$

Параметр T_{c0} равен 17,0 К [8], а параметр B_{c2} определяется из условия $F(B) = 0$ в предположении линейности функции $F(B) = I^{1/2}B^{1/4}$ и равен 19,28 Тл.

Связь критической плотности тока J_c , температуры перехода T и индукции поля B по методу Саммерса устанавливается следующими формулами:

$$J_c(B, T) = C_0 [B_{c2}(T)b]^{-1/2} (1 - t^2)^2 (1 - b)^2, \quad (2)$$

$$B_{c2}(T) = B_{c20}(1 - t^2) [1 - 0,31t^2(1 - 1,77 \ln t)], \quad (3)$$

где $t = T/T_{c0}$; $b = B/B_{c2}(T)$. Параметры B_{c20} , T_{c0} и C_0 определялись из фитирования кривой $I_c(B)$ (рис.1) при $T = 4,2$ К и равны: $B_{c20} = 21,0$; $T_{c0} = 18,8$; $C_0 = 10000$.

1.2. Магнитопровод

Магнитопровод будет изготавливаться из стали марки СТ2081, ее магнитные характеристики при температуре 4,2 К представлены на рис. 2.

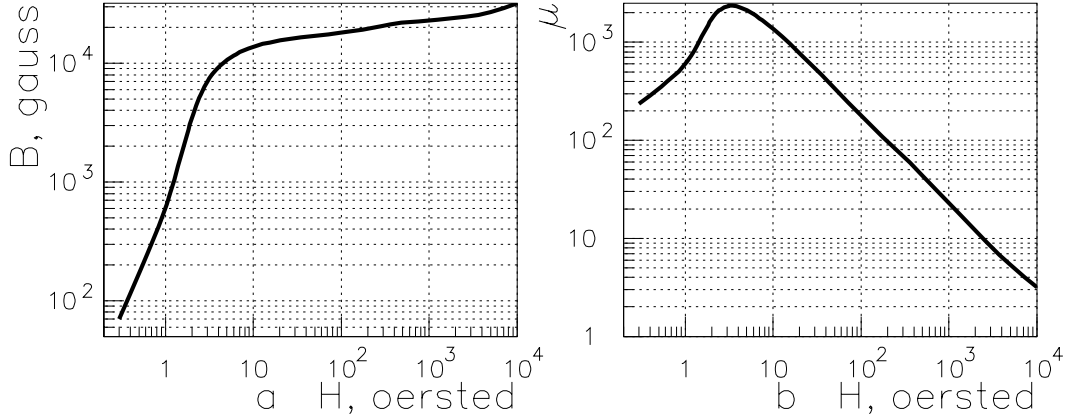


Рис. 2. Магнитные характеристики стали СТ2081: зависимость $B(H)$ (а); зависимость $\mu(H)$ (b).

Из этой стали была изготовлена опытная партия СП-диполей УНК, обладающая высокими магнитными характеристиками [7].

1.3. Бандаж

Для изготовления бандажа будет использована специальная нержавеющая сталь марки 05X20H15AG6, обладающая слабыми магнитными свойствами. Магнитная восприимчивость этого материала не превышает $6,5 \times 10^{-3}$ [9]. Такая сталь также использовалась при производстве опытной партии СП-диполей УНК.

Результаты численных вычислений и экспериментальных магнитных измерений изготовленных СП-диполей доказали слабое влияние такой восприимчивости на качество поля. После изготовления прототипа СП-квадруполя на основе магнитных измерений легко сделать небольшую коррекцию в геометрию квадруполя для учета как влияния намагниченности воротников, так и устранения систематических ошибок производства.

2. Представление поля

Поле в апертуре в произвольном сечении $z = const$ можно представить в виде ряда

$$B_y + iB_x = B_0 \sum_{n=1}^{\infty} W_n(z) \left(\frac{r}{r_0} e^{i\theta} \right)^{n-1}, \quad (4)$$

где $B_0 = G_0 r_0$ — поле на радиусе нормализации $r_0 = 25$ мм; G_0 — градиент поля в центре квадрупольной магниты; z — продольная ось магнита; $W_n = C_n + iS_n$ — нелинейности поля $n-1$ порядка. Для нормализации удобно выбрать G_0 при бесконечно большой магнитной проницаемости ярма, тогда разность $1 - C_2$ будет характеризовать величину насыщения магнитопровода.

Аналогично можно представить интегральное поле магнита, проинтегрировав выражение (4) по z от $-\infty$ до $+\infty$:

$$\hat{B}_y + i\hat{B}_x = \int_{-\infty}^{\infty} (B_y + iB_x) dz = \hat{B}_0 \sum_{n=1}^{\infty} \hat{W}_n \left(\frac{r}{r_0} e^{i\theta} \right)^{n-1}, \quad (5)$$

$$\hat{B}_0 = r_0 \int_{-\infty}^{\infty} G(0, 0, z) dz = r_0 \hat{G}_0, \quad (6)$$

где $\hat{W}_n = \hat{C}_n + i\hat{S}_n$; \hat{G}_0 — интеграл градиента поля.

Важным параметром для магнитов является его эффективная длина L_{ef} , определяемая по формуле

$$L_{ef} = \frac{\hat{B}_0}{B_0} = \frac{\hat{G}_0}{G_0}. \quad (7)$$

Из определения нелинейностей поля и интеграла поля следует

$$\hat{W}_n = \frac{1}{L_{ef}} \int_{-\infty}^{\infty} W_n dz. \quad (8)$$

Очевидно, что в идеально симметричных СП-квадрупольных с бесконечно большой магнитной проницаемостью в формулах (4) и (5) отличны от нуля только гармоники вида C_{4n-2} и \hat{C}_{4n-2} .

3. Оптимизация поперечного сечения

Расчеты по оптимизации геометрии как поперечного сечения, так и лобовых частей проводились с помощью программы HARM-3D [10] в приближении бесконечно большой магнитной проницаемости магнитопровода конечной длины с цилиндрической внутренней поверхностью. Реальная зависимость $\mu(B)$ в магнитопроводе учитывалась с помощью программы MULTIC [11] для определения толщины магнитопровода и различных вырезов в нем.

Влияние нелинейностей поля на динамику пучка в ускорителе резко уменьшается с ростом номера гармоники n . Двухслойная геометрия квадрупольной обмотки позволяет легко занулить первые две нелинейности C_6 и C_{10} , причем нелинейность C_6 подавляется выбором углов слоев, а для зануления гармоники C_{10} необходимо ввести межвитковую

прокладку в первом слое. Влияние более высоких нелинейностей на динамику пучка пренебрежимо мало. Из условий технологичности внешний угол второго слоя должен быть меньше, чем в первом слое.

Обмоточный блок изготавливается из кабеля трапецевидного сечения. Толщина изоляции кабеля принята в расчетах равной 0,1 мм. В арочной конструкции (рис. 3а) кабель имеет одинаковую ширину в обоих слоях, но разные углы трапеции, определяемые радиусами слоев.

После формовки кабеля в нужный размер СП-провод деформируется, причем деформация кабеля с меньшим основанием трапеции h_1 для провода диаметром d составляет величину $\delta = (2d - h_1)/2d \sim 30\%$. Из-за опасения, что сильно деформированный кабель имеет деградацию критического тока, помимо арочной конструкции были рассмотрены и геометрии обмоточного блока с различными величинами деформации кабеля (слабо кистунированный кабель). Схематически геометрия квадруполь с деформацией витков 15% показана на рис.3б.

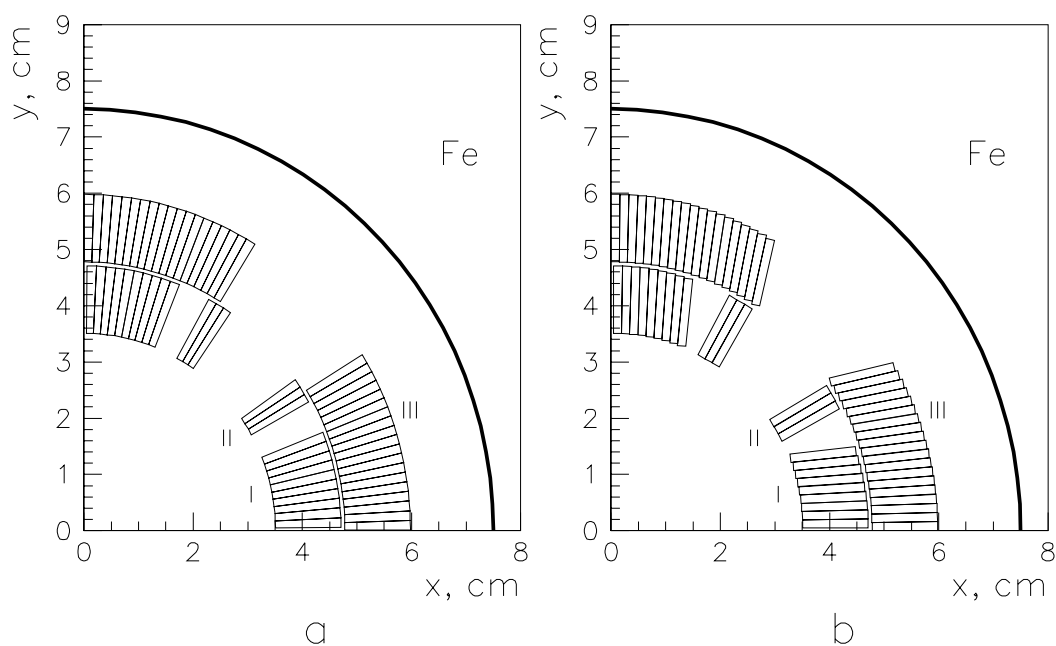


Рис. 3. Поперечное сечение квадруполь: арочная конструкция (а); геометрия с неполностью кистунированным кабелем (б).

После проведения цикла расчетов оказалось, что обе геометрии дают практически одинаковые как качество поля, так и все остальные магнитные характеристики. Арочная конструкция обладает более надежными механическими свойствами и имеет более простую технологию изготовления. С другой стороны, были большие опасения, что в арочной конструкции из-за большой деформации СП-проволок в кабеле, достигающей величины 30%, может быть большая деградация критического тока. Поэтому были проведены экспериментальные исследования по изучению этой деградации от различных величин деформации кабеля [12]. В результате этих исследований оказалось, что деградация критического тока при деформации провода в 30% не превышает 5%, что вполне допустимо. Поэтому в дальнейшем за основу выбрана именно арочная конструкция.

При выборе размеров кабеля использовались эмпирические соотношения, полученные экспериментальным путем при производстве опытной партии СП-диполей [7] и связывающие число проволок в кабеле n_w , с его шириной a и толщиной витка по средней линии \bar{h} в миллиметрах:

$$n_w = \left[1,85 \frac{a}{d} + 0,5 \right], \quad \bar{h} = (2d - 0.05) \frac{R_{out}}{R_{in}} - 2\delta_{is}, \quad (9)$$

где δ_{is} — толщина изоляции, равная 0,1 мм; R_{in} , R_{out} — внутренний и наружный радиусы слоя.

Число проволок в кабеле n_w , определяющее его ширину, необходимо выбирать из условия $T > 4,6$ К, где T — температура перехода квадруполья в нормальное состояние, зависящая от максимального поля на обмотке B_{max} и тока в проволоке i . Для определения T использовались зависимости $T(B_{max}, i)$ как по методу Крамера [5], так и методу Саммерса [6] без учета деградации кабеля.

На рис. 4 представлены зависимости $T(B_{max}, i)$ от числа проволок в кабеле n_w при толщине бандажа 15 мм. Пунктирными линиями показан среднеквадратичный разброс для различных деформаций кабеля от 15 до 35%. Жирной горизонтальной линией обозначена допустимая температура 4,6 К.

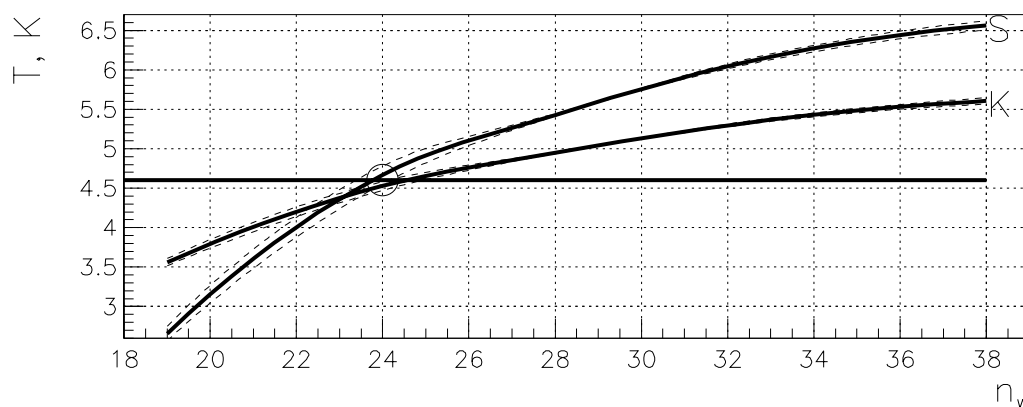


Рис. 4. Зависимость температуры перехода в нормальное состояние от числа проволок в кабеле: К — метод Крамера; S — метод Саммерса.

Требуемая температура 4,6 К для данной толщины бандажа, обозначенная на рис. 4 кружочком, достигается при $n_w \geq 24$ и не зависит от деформаций кабеля. Из рис. 4 следует, что:

- Арочная конструкция и геометрия со слабо кистоунированным кабелем дают практически одинаковые характеристики по магнитному полю, что подтверждается и нелинейным составом поля для всех этих геометрий.
- Критическая температура, определяемая по методу Крамера T_K , в области $T \lesssim 4,2$ К превышает соответствующие значения, определенные по методу Саммерса T_S . В области $T \gtrsim 4,2$ К мы имеем обратное соотношение $T_S > T_K$. В дальнейших расчетах для определения критической температуры перехода квадруполья из этих двух значений выбиралась минимальная величина. Для точного определения критической температуры необходимо экспериментально измерить реальные зависимости $I_c(B, T)$.

После проведения цикла расчетов, аналогичных результатам, представленным на рис. 4, была получена эмпирическая формула, связывающая необходимое число проволок в кабеле, удовлетворяющее условию $T > 4,6$ К, с толщиной бандажа квадрупольа Δ_c (в миллиметрах):

$$n_w \geq [0, 2\Delta_c + 22, 5]. \quad (10)$$

Очевидно, что при постоянной толщине Δ_c с увеличением числа проволок в кабеле растет ширина витка a , при этом магнитный экран отодвигается, вклад в поле от него уменьшается, и необходимо увеличивать ток в витке. Тем не менее, ток в одной проволоке i при этих условиях уменьшается. Зависимость величины тока в витке I для достижения градиента поля 220 Тл/м от числа проволок в кабеле при $\Delta_c = 25$ мм представлена на рис. 5а, а на рис. 5б показано изменение тока в одной проволоке. Пунктирными линиями обозначен среднеквадратичный разброс по току для геометрий с разной деформацией витка. Разброс объясняется тем, что для разных геометрий имеется дискретный набор витков, подавляющий низшие нелинейности поля.

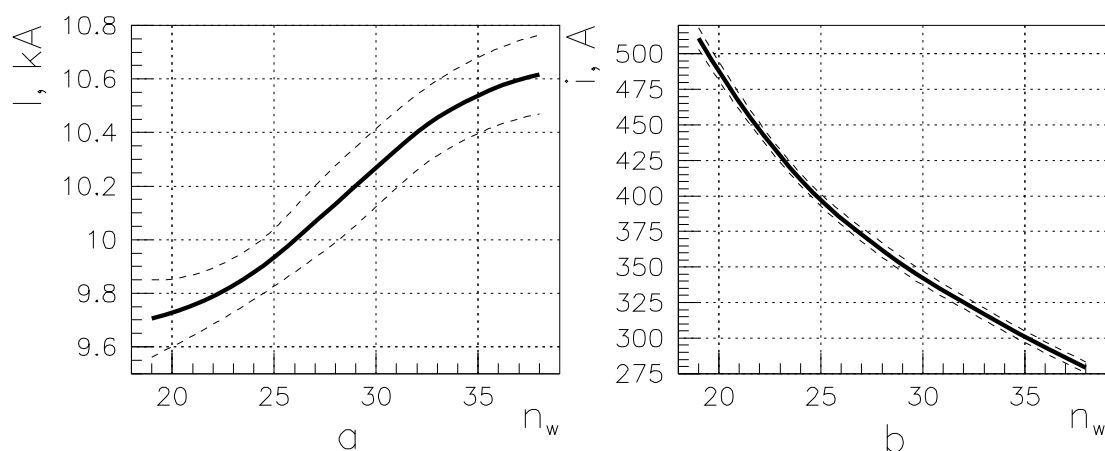


Рис. 5. Зависимость тока в витке (а) и тока в одной проволоке (б) от числа проволок в кабеле при $\Delta_c = 25$ мм.

Результаты, представленные на рис. 4-5, получены в приближении бесконечно большой проницаемости магнитопровода. Насыщение магнитопровода оказывает сильное влияние на основную гармонику поля C_2 и нелинейность C_6 . Высшие нелинейности создаются только обмоточным блоком. Толщина бандажа Δ_c определяет внутренний радиус магнитопровода R_F . Очевидно, что при увеличении R_F уменьшается вклад в центральное поле квадрупольа от магнитопровода, а также все искажения поля, связанные с эффектами насыщения магнитопровода.

На рис. 6 показаны зависимость нормализованного градиента поля C_2 и нелинейности C_6 с учетом реальной зависимости $\mu(B)$ от толщины бандажа (Δ_c) для разного числа проволок в кабеле. Расчеты проведены при толщине магнитопровода 100 мм. Из рис.6 видно, что для достижения высокого качества поля в апертуре на всех уровнях тока необходимая толщина бандажа должна быть не менее 25 мм. Тогда формула (10) дает необходимое число проволок в кабеле, равное 28.

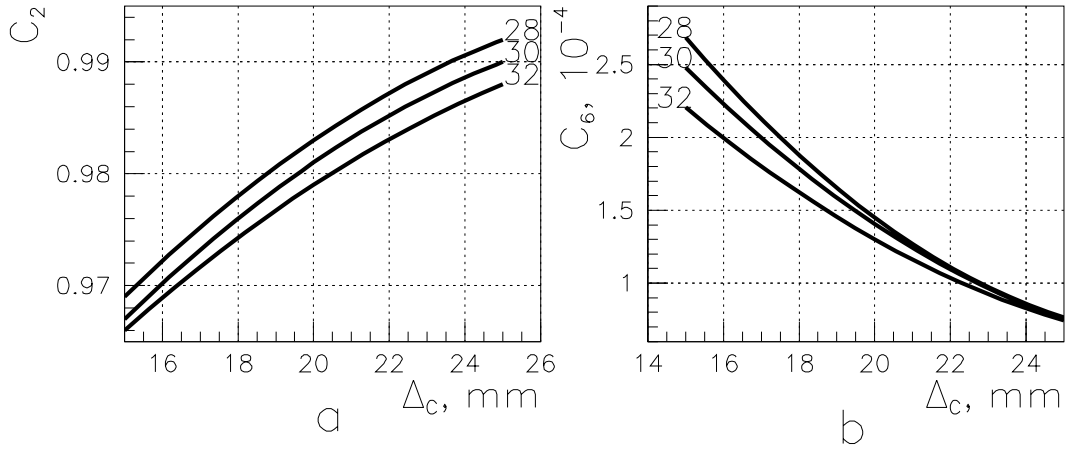


Рис. 6. Зависимость нормализованного градиента поля C_2 (a) и нелинейности C_6 (b) от толщины бандажа для разного числа проволок в кабеле.

С другой стороны, отодвигая магнитопровод от обмотки, мы тем самым уменьшаем его вклад в градиент поля, что приводит к увеличению тока в витке (рис. 7b), и в конечном счете, к уменьшению температурного запаса квадруполья (рис. 7a). Здесь также учтено, что для достижения номинального градиента необходимо повышать ток в витке, компенсирующий эффекты насыщения магнитопровода. Из рис. 7a также следует, что Δ_c имеет верхний предел порядка 25 мм с небольшим запасом.

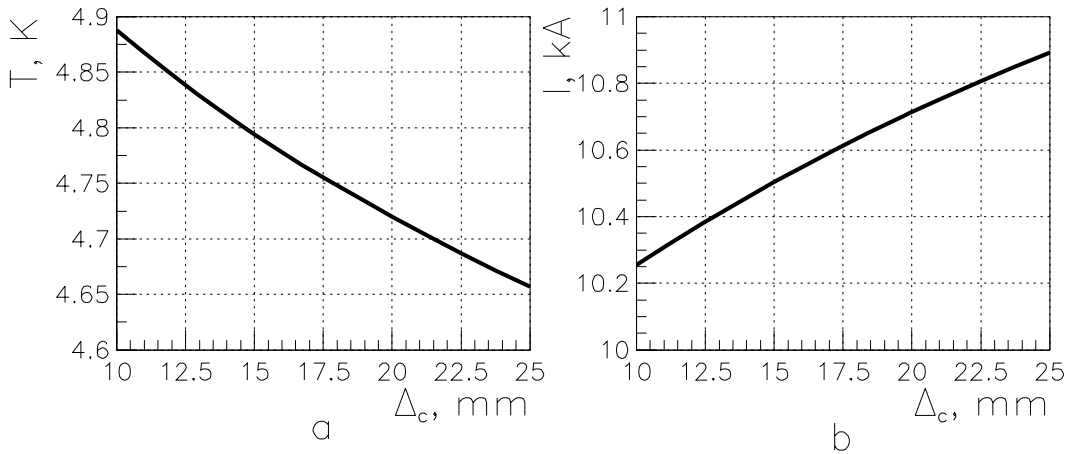


Рис. 7. Зависимость температуры перехода в нормальное состояние (a) и номинального тока (b) от толщины бандажа.

Влияние толщины магнитопровода ΔFe на низшие нелинейности поля представлено на рис. 8 для различных толщин бандажа. Из этих рисунков следует, что для уменьшения эффектов насыщения магнитопровода Δ_c необходимо выбирать равной 25 мм, а ΔFe с учетом дальнейших вырезов в нем для протока гелия, фиксаций с бандажом и т.д. следует выбирать не менее 80 мм.

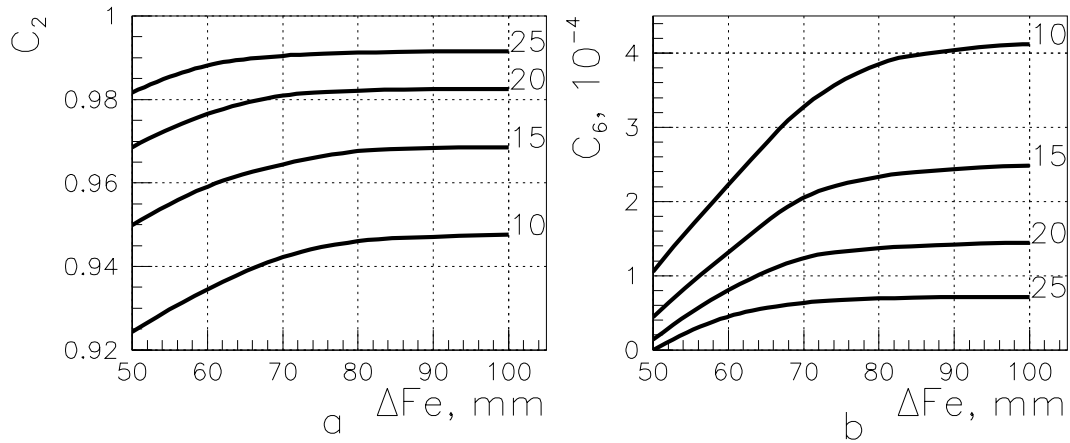


Рис. 8. Зависимость нормализованного градиента (а) и нелинейности C_6 (б) от толщины магнитопровода.

Векторная диаграмма распределения пондеромоторных сил для оптимизированной геометрии поперечного сечения представлена на рис. 9, а азимутальные зависимости различных компонент сил — на рис. 10, на котором слева представлены компоненты сил для первого слоя, справа — для второго, а прямоугольниками показано положение витков.

Компоненты пондеромоторных сил и их интегральные величины учитывались при расчетах механической прочности бандажа. Результаты этих расчетов показывают, что минимальная толщина бандажа должна быть не менее 25 мм. Следовательно, из условий качества поля и механической прочности бандажа мы имеем нижний предел толщины бандажа, равный 25 мм, а из требований по температурному запасу — верхний предел, равный тем же 25 мм. Поэтому в дальнейшем толщина бандажа выбрана равной 25 мм.

Основные параметры оптимизированной геометрии поперечного сечения сведены в табл.3.

Таблица 3. Основные параметры оптимизированной геометрии поперечного сечения квадруполья.

	I-слой	II-слой
Ширина витка, мм	12.2	12.2
Толщина витка по средней линии, мм	1.54	1.54
Число проволок в витке	28	28
Внутренний радиус слоя, мм	35.0	47.7
Начальный угол слоя, гр.	0.21	0.21
Конечный угол слоя, гр.	36.77	28.16
Начальный угол прокладки, гр.	23.88	—
Конечный угол прокладки, гр.	30.31	—
Число витков	11-3	17
Ток в витке, кА	10.9	10.9
Максимальное поле, Тл	8.75	7.84
Максимальная температура, К	4.70	5.50
Компоненты пондеромоторных сил		
Горизонтальная, кН/м/октант	760	-450
Вертикальная, кН/м/октант	70	-610
Запасенная энергия, кДж/м	205	

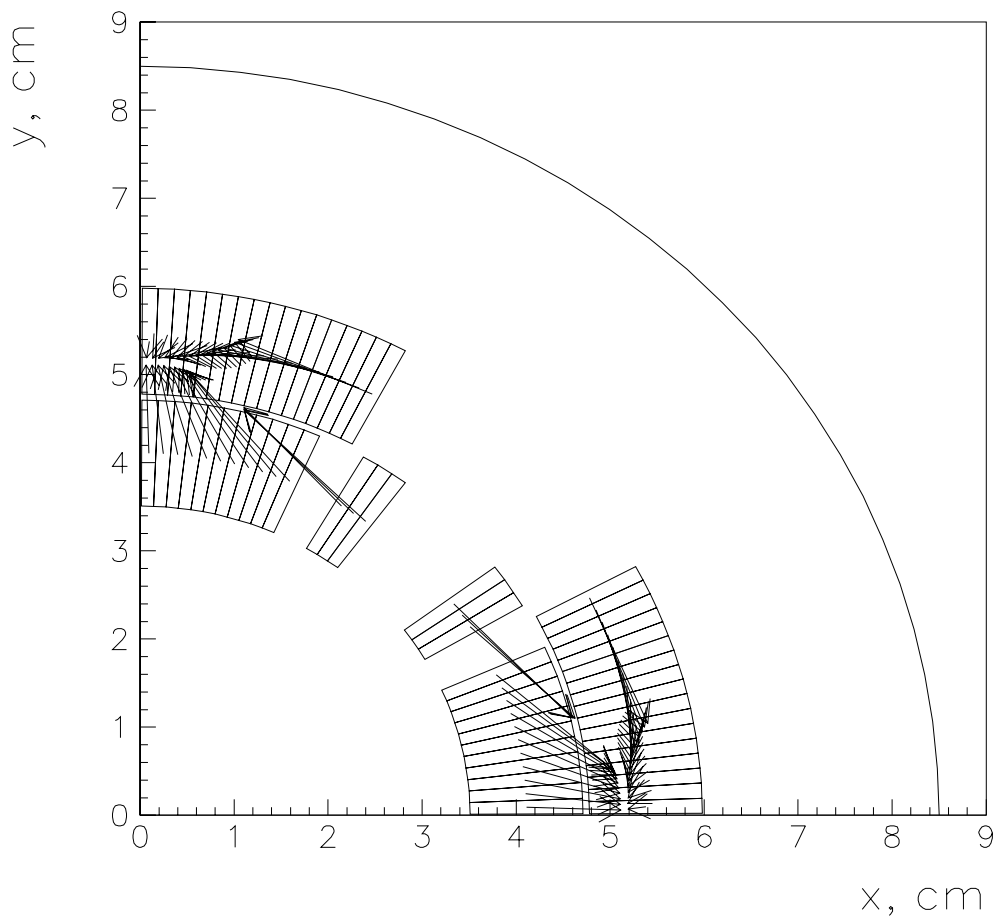


Рис. 9. Векторная диаграмма распределения пондеромоторных сил в оптимизированной геометрии поперечного сечения квадруполь.

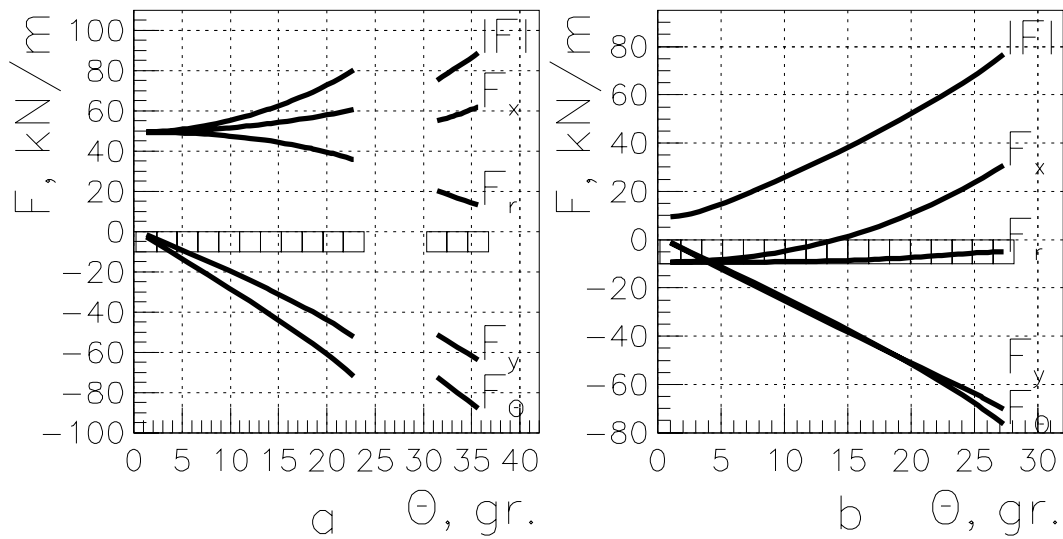


Рис. 10. Азимутальные зависимости компонент пондеромоторных сил: первый слой (а); второй (б). Положение витков обозначено прямоугольниками.

4. Оптимизация геометрии лобовых частей

Оптимизация краевых полей состоит из:

- выбора формы лобовых частей обмотки, обеспечивающей минимальную деформацию кабеля;
- минимизации превышения поля на лобовых частях;
- оптимизации нелинейностей интегрального поля;
- максимизации эффективной длины магнита.

Для уменьшения деформации кабеля на лобовых частях каждый слой делится на три блока, между блоками устанавливаются прокладки.

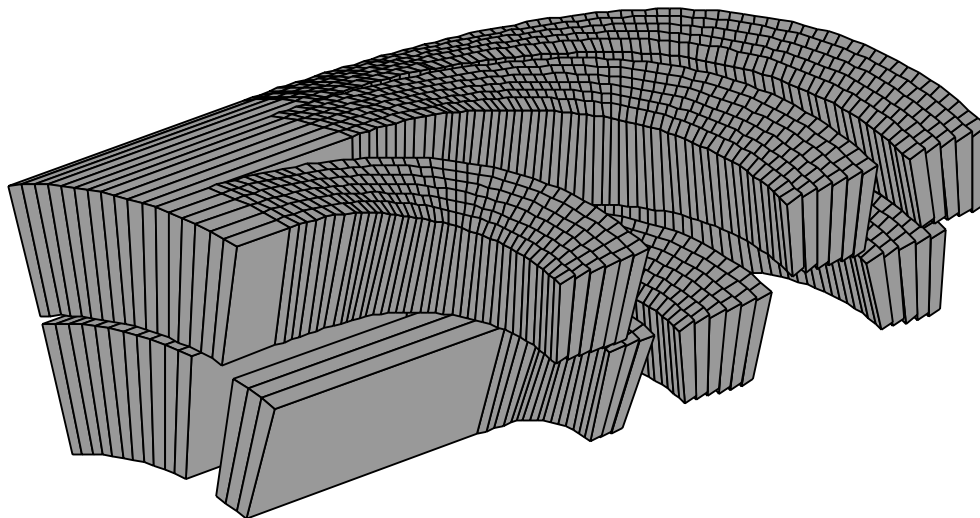


Рис. 11. Общий вид оптимизированных лобовых частей квадрупольа.

В каждом блоке средний виток укладывается по форме “постоянного периметра”, а соседние — плотно поджимаются к нему и т.д. (рис. 11). Из технологических соображений оба слоя должны быть выравнены по полным длинам обмоток.

Интегральные нелинейности состоят из суммы нелинейностей поля прямолинейной части обмотки и краевых нелинейностей. Низшие нелинейности поля подавляются соответствующим подбором геометрии центрального сечения, поэтому для подавления низших интегральных гармоник достаточно занулить краевые нелинейности, которые формируются в основном лобовыми частями обмоток. Установка прокладки в лобовых частях оказывает влияние на первые две низшие нелинейности краевого поля C_6 и C_{10} по синусоидальному закону в зависимости от числа отодвигаемых витков и толщины прокладки [13]. Здесь и далее нумерация витков и межблочных прокладок отсчитывается от края магнита к его центру. Первая прокладка S_{11} (первый индекс обозначает номер слоя, второй — номер прокладки) должна разделять блок из 11 витков, положение второй прокладки S_{12} совпадает с положением прокладки в центральном сечении, зануляющей нелинейность поля C_{10} .

На рис. 12 представлены зависимости толщин обеих прокладок S_{11} и S_{12} , подавляющих нелинейности интеграла поля \hat{C}_6 и \hat{C}_{10} , от числа наружных витков n_1 , отодвигаемых

первой прокладкой. Размеры прокладок определяются по нижней образующей цилиндра. Длина магнитопровода при этих расчетах совпадала с полной длиной обмоточного блока.

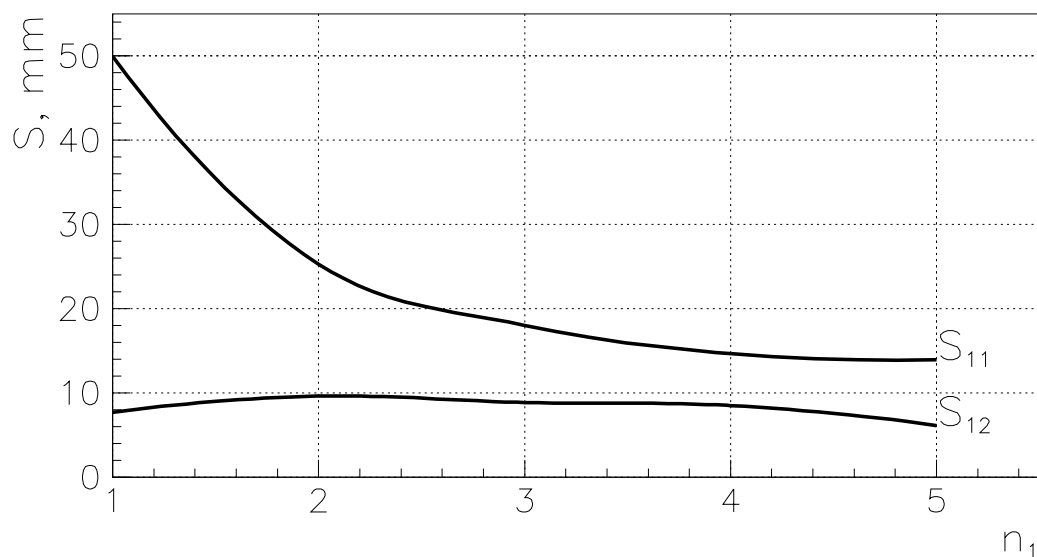


Рис. 12. Зависимость толщин прокладок на лобовых частях, подавляющих краевые нелинейности, от числа наружных отодвигаемых витков.

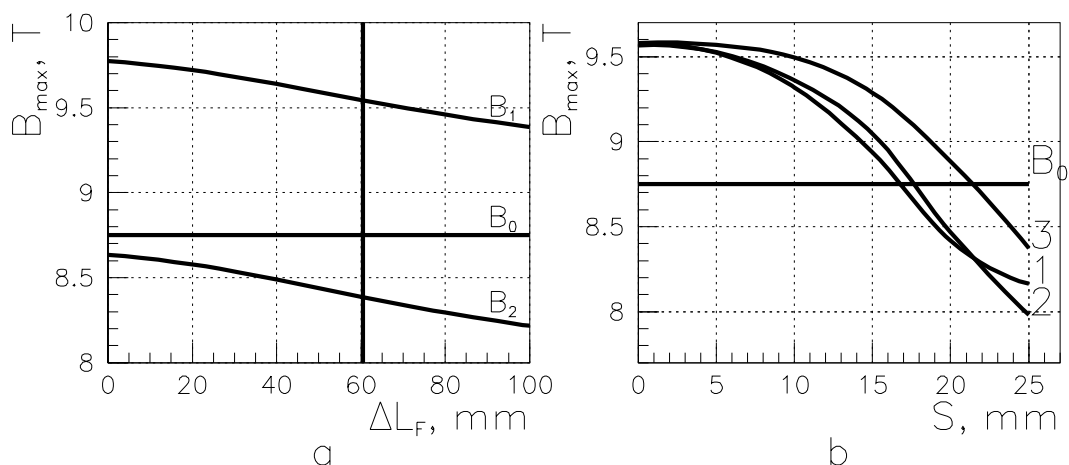


Рис. 13. Зависимость максимального поля на лобовых частях от укорачивания магнитопровода (a) и толщины второй прокладки во втором слое (b); B_1, B_2, B_0 — максимальные поля на лобовых частях первого и второго слоев и в центральном сечении.

Очевидно, интеграл поля при прочих условиях максимален при минимальной сумме обеих прокладок, что выполняется при $n_1 = 5$. При этом $S_{11} = 13,96$ мм, а $S_{12} = 6,15$ мм. Изменение длины магнитопровода слабо влияет на оптимальные размеры прокладок.

Максимальное поле на лобовых частях первого слоя после установки прокладок в нем, подавляющих низшие краевые нелинейности C_6 и C_{10} и при нулевых толщинах межблочных прокладок во втором слое, на 12% выше максимального поля в центральном

сечении при длине магнитопровода, равной полной длине обмоток. Как видно из рис. 13а, укорачиванием магнитопровода ΔL_F не удается полностью выравнять эти значения. Вертикальной линией на этом рисунке показана граница минимальной прямолинейной длины блоков.

Наиболее эффективно для снижения максимального поля на лобовых частях оказалось увеличение прокладок во втором слое, разбитом на блоки из 5, 6 и 6 витков. На рис. 13б показаны зависимости максимального поля на лобовой части первого слоя B_1 : от толщины второй прокладки S_{22} во втором слое при толщине первой прокладки $S_{21} = 4$ мм (кривая 1); от толщины первой прокладки S_{21} во втором слое при толщине второй прокладки $S_{22} = 4$ мм (кривая 2) и от суммы $S_{21} + S_{22}$ при $S_{21} = S_{22}$ (кривая 3). Рис. 13б показывает, что максимальный интеграл поля получается при толщинах прокладок $S_{21} = 4$ мм и $S_{22} = 17$ мм. Поле на лобовой части первого слоя всегда меньше B_0 . Результаты, представленные на рис. 13б, получены при длине магнитопровода, равной минимальной длине прямолинейной части блоков, и подавленных низших краевых нелинейностях поля.

Основные параметры квадруполья с оптимизированной геометрией лобовых частей представлены в табл.4.

Таблица 4. Основные параметры лобовых частей квадруполья.

Номер слоя	I	II
Толщина первой прокладки, мм	11.89	4.0
Толщина второй прокладки, мм	3.36	17.0
Максимальное поле, Тл	8.69	8.60
Максимальная температура, К	4.70	4.73

Расчетные нелинейности поля в центральном сечении и интеграла поля представлены в табл.5.

Таблица 5. Расчетные нелинейности поля и интеграла поля.

n	6	10	14	18	22
Поле, $C_n, 10^{-4}$	0.0	0.0	-4.0	0.1	0.2
Интеграл, $\tilde{C}_n, 10^{-4}$	0.0	0.0	-3.7	0.1	0.2

5. Допуски на точность изготовления

В процессе изготовления магнита неизбежно появляются отклонения геометрических размеров от расчетных значений, влияющих на качество поля квадруполья. Влияние этих ошибок на нелинейности магнитного поля удобно представить в табл. 6 в виде производных $\partial S_n / \partial p$ и $\partial C_n / \partial p$, где p — геометрический параметр блока, как предлагается в работе [14]. Нумерация блоков указана на рис. 3 римскими цифрами. Радиальные размеры блока задаются параметрами: R — внутренний радиус блока и A — его толщина, параметры ϕ и α определяют начальный и конечный углы блока. Параметр ρ определяет эллиптичность обмотки и равен разности горизонтального и вертикального радиусов по средней линии слоя. Внутренний радиус магнитного экрана обозначен R_F .

Таблица 6. Производные нелинейности по геометрическим параметрам квадруполя.

Параметр	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\partial C_n/\partial R_1$	-212.2				-27.3				7.3
$\partial C_n/\partial R_2$	-25.4				29.3				-7.9
$\partial C_n/\partial R_3$	-123.1				-1.5				0.5
$\partial C_n/\partial A_1$	-99.9				-10.4				2.2
$\partial C_n/\partial A_2$	-11.9				11.2				-2.4
$\partial C_n/\partial A_3$	-57.6				-0.6				0.2
$\partial C_n/\partial \rho_1$	-104.7				-5.3				4.1
$\partial C_n/\partial \rho_2$	-11.7				15.5				-4.4
$\partial C_n/\partial \rho_3$	-52.8				1.5				0.2
$\partial C_n/\partial R_F$	-43.3				-0.0				0.0
$\partial C_n/\partial \phi_1$	-4.6	-5.8	-6.0	-5.4	-4.5	-3.4	-2.5	-1.8	-1.2
$\partial C_n/\partial \phi_2$	-4.1	-4.0	-2.5	-0.8	0.5	1.1	1.0	0.7	0.3
$\partial C_n/\partial \phi_3$	-4.0	-3.6	-2.7	-1.8	-1.0	-0.6	-0.3	-0.2	-0.1
$\partial C_n/\partial \alpha_1$	-8.7	-10.6	-10.1	-8.3	-6.0	-3.8	-2.1	-1.0	-0.3
$\partial C_n/\partial \alpha_2$	-4.2	-3.9	-2.2	-0.3	0.9	1.3	1.0	0.6	0.1
$\partial C_n/\partial \alpha_3$	-7.5	-6.4	-4.3	-2.4	-1.1	-0.5	-0.1	-0.0	0.0
$\partial S_n/\partial \phi_1$	-15.7	-12.9	-9.5	-6.4	-4.1	-2.4	-1.3	-0.7	-0.3
$\partial S_n/\partial \phi_2$	-1.9	0.5	2.1	2.4	1.9	1.0	0.2	-0.3	-0.4
$\partial S_n/\partial \phi_3$	-11.6	-6.7	-3.5	-1.7	-0.7	-0.3	-0.1	-0.0	-0.0
$\partial S_n/\partial \alpha_1$	-13.8	-9.4	-4.8	-1.3	0.8	1.7	1.9	1.6	1.2
$\partial S_n/\partial \alpha_2$	-1.6	1.0	2.5	2.5	1.7	0.7	-0.1	-0.5	-0.5
$\partial S_n/\partial \alpha_3$	-9.7	-4.2	-1.1	0.2	0.5	0.5	0.3	0.2	0.1

Угловые параметры ϕ и α переведены в линейные по среднему радиусу блока: $\overline{S_i(\phi)} = \overline{R_i}\phi$, $\overline{S_i(\alpha)} = \overline{R_i}\alpha$, $\overline{R_i} = R_i + A_i/2$, и их изменение приводится для первого октанта. Знак этих производных для других октантов и соответствующие изменения симметрии устанавливаются по табл. 7. Радиальные значения R , A , ρ и R_F изменяются симметрично в каждом октанте, и в таблице приведено их суммарное значение. Значения каждой из производных соответствуют увеличению геометрических параметров на 1 мм.

Все величины в таблице приведены в единицах 10^{-4} .

Таблица 7. Изменения знаков нелинейностей по октантам.

Октант	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
C_{4n-3}	+	+	-	-	-	-	+	+
C_{4n-2}	+	+	+	+	+	+	+	+
C_{4n-1}	+	-	+	-	-	+	-	+
C_{4n}	+	-	-	+	+	-	-	+
S_{4n-3}	+	+	+	+	-	-	-	-
S_{4n-2}	+	-	+	-	+	-	+	-
S_{4n-1}	+	-	-	+	-	+	+	-
S_{4n}	+	+	-	-	+	+	-	-

Анализ табл. 6 показывает, что наиболее сильное влияние на нелинейности оказывают параметры ϕ_1 , α_1 и α_3 . При самом неблагоприятном раскладе, когда искажение параметра в каждом октанте создает нелинейности одного знака (табл.7), допуски на точность изготовления этих параметров должны составлять 20 мкм, для остальных угловых

размеров — 40 мкм. Реально такая ситуация маловероятна, поэтому можно допустить фактическую точность изготовления 50 мкм, что соответствует реальным возможностям производства. Так как первый и второй блоки лежат на одном радиусе, то при определении допусков на радиальные размеры их влияние на нелинейности будет суммарным и допуски на эти размеры достаточно свободны. Тем не менее допуски на радиальные и азимутальные размеры взаимосвязаны, поэтому допуски на радиальные размеры также не должны превышать 50 мкм.

Влияние толщин межблочных прокладок на лобовых частях на краевое поле имеет существенно меньшую чувствительность, чем влияние углов в центральном сечении на соответствующие нелинейности поля, поэтому и допуски на точность изготовления прокладок более свободны. Расчеты показывают, что прокладки можно изготавливать с точностью 0,5 мм. Допуски на длины слоев и длину магнитопровода равны 1 мм.

Заключение

Разработана конструкция СП-квадруполя с номинальным градиентом поля 220 Тл/м, использующая имеющийся СП-провод из Nb_3Sn с критической плотностью тока $j_c = 550 \text{ A/мм}^2$ в поле 12 Тл и температуре 4,2 К. Учитывая возможность увеличения j_c , можно рассчитывать на повышение градиента до 250 Тл/м. Арочная конструкция обмоточного блока и выбор достаточной толщины бандажа из нержавеющей стали обеспечивают механическую прочность квадруполя. Оптимальное распределение витков в центральной и краевой частях обмоток подавляет низшие нелинейности поля и интеграла поля и минимизирует превышение поля на лобовых частях. При оптимизации лобовых частей учитывалась возможность получения максимальной эффективной длины магнита. Расчеты проведены с учетом существующей в ИФВЭ технологии изготовления СП-квадруполей.

Список литературы

- [1] Ageev A.I. et al. The Development and Study of Superconducting Magnets for the UNK. In: Proc. of XII Conf. on Magnet Technology, Leningrad, 1991, p. 682.
- [2] Wada H. and Tashikawa K. Fabrication of New Superconductors, ICFA Workshop, 1986, p. 123.
- [3] Bogdanov I.V., Gridasov V.I. et al. Geometry Optimization of a High Gradient Quadrupole Magnet. In: Proc. of XV Conf. on Magnet Technology, Beijing, China, 1997, v. 2, p. 1388.
- [4] Davidov I. et al. Development and Investigation of Multifilamentary Nb_3Sn Conductors to be used in the ITER. In: IEEE Trans. Magn., 1994, v. 30, № 4, p. 2316.
- [5] Kramer E.J. Scaling laws for flux pinning in hard superconductors. // Journal of Applied Physics, 1973, v. 44, № 3, p. 1360.
- [6] Summers L.T., Guinan M.W., Miller J.R. and P.A. Hahn. A model for the prediction of Nb_3Sn critical current as a function of field, temperature, strain and radiation damage. In: IEEE Transactions on Magnetics, 1991, v. 27.

- [7] Balbekov V.I. et al. Magnetic Field Quality in the Pilot Industrial Batch's SC Dipoles for the UNK. In: Proc. of XV Int. Conf. on High Energy Accelerators, Hamburg, Germany, 1992, v. 2, p. 632.
- [8] Металловедение и технология сверхпроводящих материалов./Под редакцией С.Фонера,Б.Шварца.— М.: Металлургия, 1987, с. 211;
Superconducting Materials Science. Metallurgy, Fabrication and Applications. Edited by Simon Forner and Brian V.Schwartz, Plenum Press, New York and London,1981.
- [9] Байдаков А.Н. и др. Исследование намагниченности воротников СП-диполей УНК: Препринт ИФВЭ 89-59. — Серпухов, 1989.
- [10] Purtoy S.V., Tkachenko L.M. HARM-3D — a Code to Calculate magnetic characteristics of superconducting magnets. In: Proc. of XV Conf. on Magnet Technology, Beijing, China, v. 2, p. 1335, 1998.
- [11] Ткаченко Л.М. Пакет программ MULTIC для расчета магнитных полей произвольной конфигурации: Препринт ИФВЭ 98-28. — Протвино, 1998.
- [12] Bogdanov I.V. et al. Study of the Nb_3Sn cable characteristics for SC-quadrupole with high gradient. In: Proc. of XV Conf. on Magnet Technology, Beijing, China, 1997, v. 1, p. 179.
- [13] Балбеков В.И., Ткаченко Л.М. Оптимизация формы лобовых частей сверхпроводящих диполей УНК: Препринт ИФВЭ 82-167. — Серпухов, 1982.
- [14] Балбеков В.И., Португалов Ю.И., Ткаченко Л.М. Анализ факторов, влияющих на однородность поля сверхпроводящего диполя: Препринт ИФВЭ 82-109. — Серпухов, 1982.

Рукопись поступила 25 мая 1999 г.

И.В.Богданов и др.

Разработка сверхпроводящего квадрупольного с высоким градиентом поля на основе Nb_3Sn .

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 27.05.99. Формат $60 \times 84/8$. Офсетная печать.

Печ.л. 2. Уч.-изд.л. 1,6. Тираж 130. Заказ 119. Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

