



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2023–17

Л.М. Ткаченко

**Программа HARM-3D для оптимизации геометрии и
расчета основных магнитных характеристик
сверхпроводящих слоевых магнитов с седловидной
обмоткой**

Протвино 2023

Аннотация

Ткаченко Л.М. Программа HARM-3D для оптимизации геометрии и расчета основных магнитных характеристик сверхпроводящих слоевых магнитов с седловидной обмоткой: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2023–17. – Протвино, 2023. – 28 с., 7 рис., библиогр.: 14.

Программа HARM-3D предназначена для расчета основных магнитных характеристик и оптимизации геометрии поперечного сечения и лобовых частей сверхпроводящих магнитов с седловидной обмоткой оболочечного типа. Магнитопровод имеет внутреннюю цилиндрическую поверхность с бесконечно большой магнитной проницаемостью. Использование аналитических формул позволяет сократить время вычисления до нескольких секунд.

Abstract

Tkachenko L.M. HARM-3D program for geometry optimization and calculation of the main magnetic characteristics of superconducting layered magnets with saddle coil: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2023–17. – Protvino, 2023. – p. 28, fig.7, refs.: 14.

The HARM-3D program is designed to calculate the main magnetic characteristics and optimization of the geometry of the cross-section and end parts of superconducting magnets with a saddle-shaped coil of the shell type. The magnetic iron has an inner cylindrical surface with an infinitely large magnetic permeability. The use of analytical formulas reduces the calculation time to several seconds.

Оглавление

Введение	2
1 Геометрия центрального сечения	3
2 Геометрия лобовых частей	4
3 Методы расчета магнитного поля и оптимизации геометрии	6
3.1 Представление центрального поля	6
3.2 Представление интегрального поля	7
3.3 Расчет нелинейностей центрального поля	8
3.4 Расчет интегральных нелинейностей поля	9
4 Оптимизация геометрии мультипольных магнитов	10
4.1 Центральное сечение	10
4.2 Лобовые части	11
5 Управление программой	13
6 Задание геометрии	15
6.1 Центральное сечение	15
6.2 Лобовые части	17
7 Оптимизация центрального сечения	18
8 Вычисление магнитного поля	19
9 Вычисление запасенной энергии в магните	20
10 Пондеромоторные силы	21
11 Вычисление динамических потерь в сверхпроводящей обмотке	21
11.1 Основные формулы расчета потерь	21
11.2 Вычисление потерь	23
12 Максимальное поле на обмотке в центральном сечении и критическая температура	24
13 Вычисление вклада в нелинейности поля от намагниченности сверхпроводника	24
14 Пример файла с входными данными для квадрупольного магнита	24

Введение

Программа HARM-3D предназначена для расчета магнитного поля в слоевых магнитах в приближении бесконечно большой проницаемости в магнитопроводе с внутренней цилиндрической поверхностью. Программа состоит из следующих функциональных блоков:

- Оптимизация центрального сечения;
- Вычисление поля в произвольной точке, вдоль линии или на сетке в декартовой или цилиндрической системе координат;
- Вычисление пондеромоторных сил, давления в обмотке и запасенной энергии в разных областях магнита;
- Поиск максимального поля на обмотке в центральном сечении;
- Определение температурного запаса обмотки по критическому току сверхпроводника;
- Определение геометрических искажений обмотки и вызванных ими изменений нелинейностей поля под действием пондеромоторных сил;
- Вычисление таблицы производных нелинейностей поля в центральном сечении по геометрическим параметрам магнита;
- Вычисление влияния намагниченности сверхпроводника на качество поля;
- Расчет тепловых потерь в обмотке при изменении магнитного поля;
- Вычисление интегралов различных компонент магнитного поля вдоль линии, по области или объему;
- Вывод графической информации;
- Встроенный интерфейс к программам MULTIC [1], PAW [2];
- Расчет интегральных нелинейностей поля;
- Оптимизация геометрии лобовых частей обмоток;

- Поиск максимального поля на лобовых частях обмоток;
- Расчет поперечных сил в лобовых частях обмоток.

Программа HARM-3D создана на основе компьютерных программ HARM [3], [4] и INCO [5], [6]. Быстродействие программы и ее широкие функциональные возможности позволяют рассматривать большой набор различных вариантов геометрий, что очень важно при оптимизации геометрии слоевых магнитов. При разработке программы особое внимание было уделено созданию удобного интерфейса для управления программой.

1 Геометрия центрального сечения

На Рис. 1 показаны два типа кабеля, применяемых для намотки обмоточного блока.

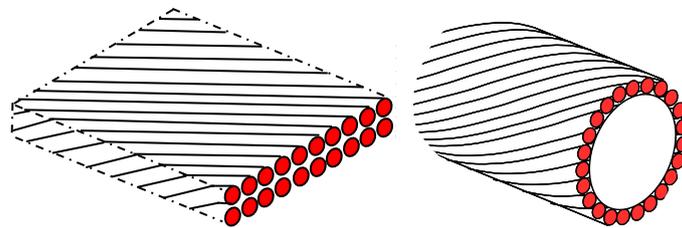


Рис. 1. Два типа кабеля для намотки обмоточного блока. Слева – кабель резерфордовского типа, справа – нуклотроновский кабель.

На Рис. 2 показано поперечное сечение дипольного двухслойного магнита в первом квадранте с кабелем резерфордовского типа. Обмотка намотана кабелем с трапециевидным поперечным сечением. Углы трапеции выбираются таким образом, чтобы начальный и конечный углы слоев совпадали с центром магнита (полностью кистоунированный кабель). При малой внутренней апертуре магнита углы трапеции становятся слишком большими, что приводит к сильной деформации сверхпроводящего провода и вызывает деградацию критического тока. Для таких магнитов кабель изготавливается с меньшим углом трапеции и угловые растворы обмоточного блока не совпадают с центром магнита. Такой кабель называется не полностью кистоунированный. В каждом слое установлена межвитковая проставка для улучшения качества центрального поля.

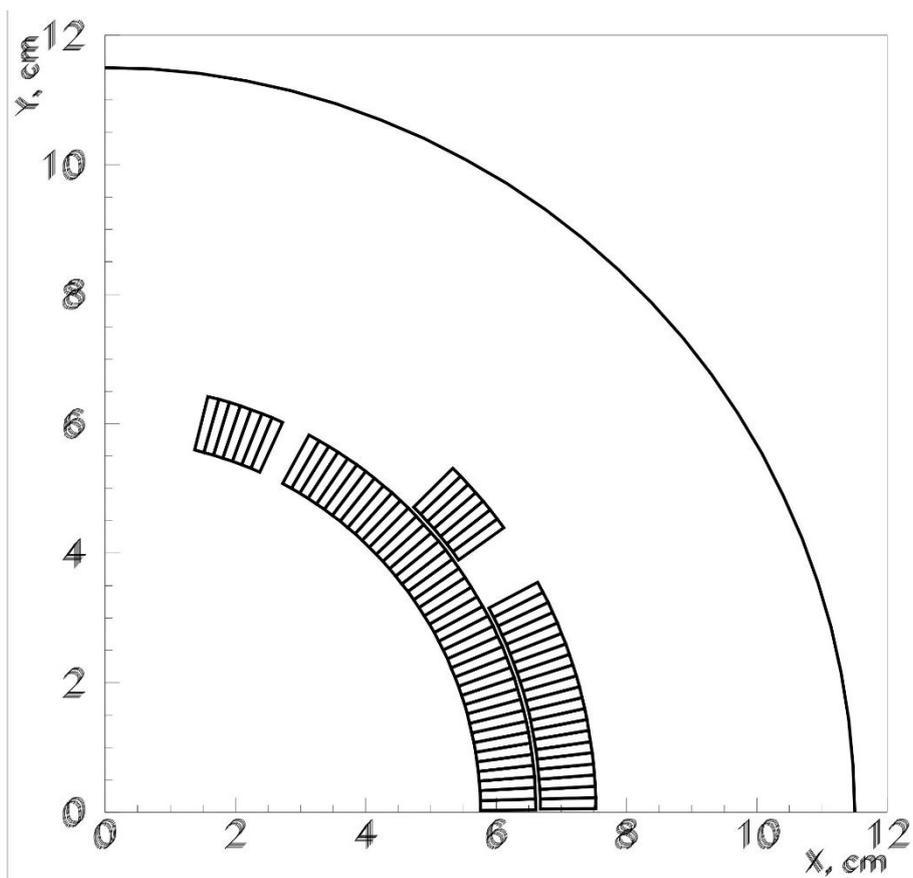


Рис. 2. Поперечное сечение дипольного двухслойного слоевого магнита в первом квадранте. Дуга окружности представляет внутреннюю поверхность цилиндрического магнитопровода.

2 Геометрия лобовых частей

В программе HARM-3D имеется семь геометрических форм лобовых частей. В первых трех из них витки расположены перпендикулярно образующей цилиндра (Рис. 3). В развертке (плоскость $R\Theta-Z$) лобовые части имеют следующий вид (Рис. 4):

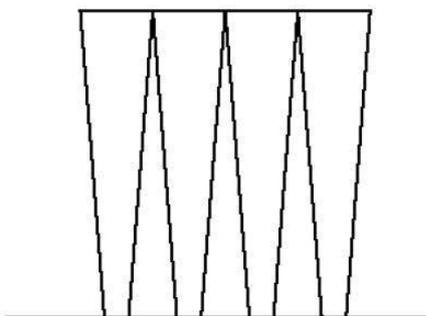


Рис. 3. Установка витков на лобовых частях в первых трех геометриях.

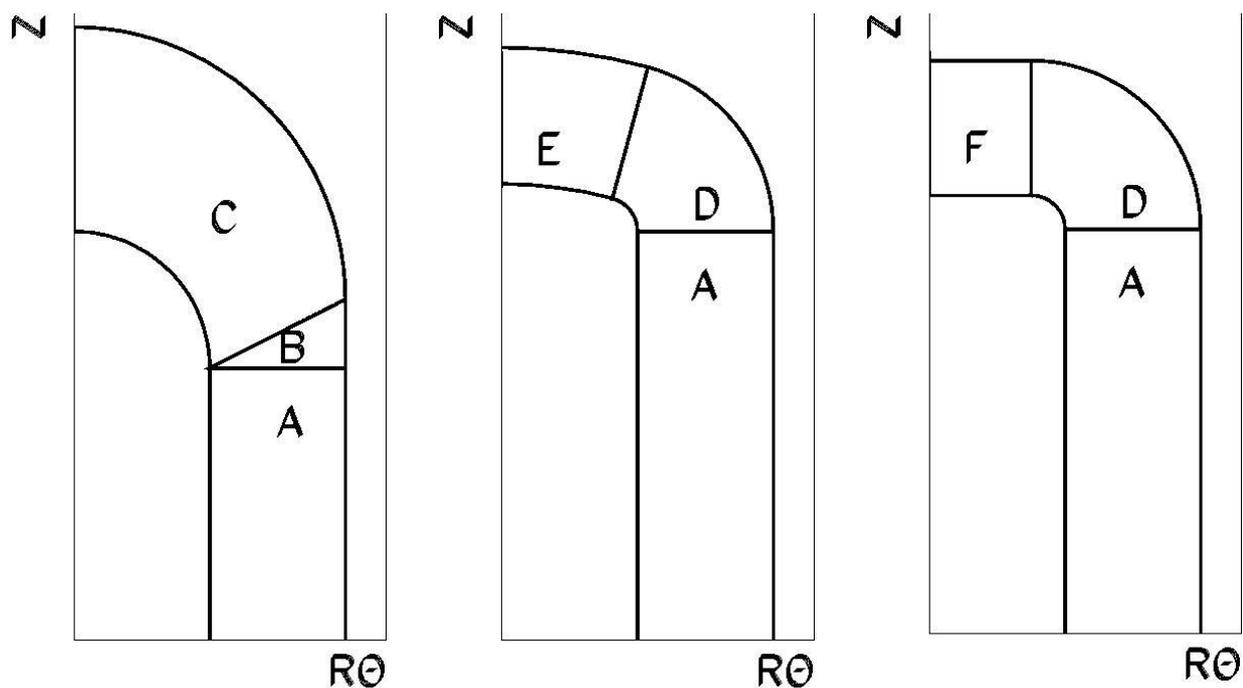


Рис. 4. Развертки лобовых частей.

Обмоточный блок может состоять из нескольких геометрических частей:

- А – прямая часть;
- В – переходный участок;
- С – дуга окружности, между витками могут быть установлены прокладки, уменьшающие плотность тока в лобовых частях и, следовательно, максимальное поле в них;
- D – Дуга окружности малого радиуса, позволяющая увеличить длину прямой части и приблизить форму развертки к прямоугольной, что улучшает фиксацию лобовых частей и способствует лучшей тренировке магнита;
- E – Дуга окружности большого радиуса, сопряженная с участком D;
- F – Дуга на цилиндре. Этот участок создает только B_z компоненту поля и не дает вклада в интегральные нелинейности.

Жесткость витка создает трудности при укладке его в форме лобовой части, изображенной в средней части Рис. 5. Как правило, при намотке используется либо левая, либо правая геометрия.

Остальные четыре формы лобовых частей имеют вид «постоянного периметра» [7] - [9]. Поскольку невозможно уложить виток таким образом, чтобы все его грани соответствовали

этой форме, по форме постоянного периметра укладывается средняя плоскость витка, при этом минимизируются механические напряжения в каждом ребре витка. Для двух геометрий лобовых частей центральный виток обмоточного блока укладывается по постоянному периметру, а соседние витки тесно примыкают к нему с обеих сторон. В двух остальных геометриях внутренний виток лежит по форме постоянного периметра, а каждый последующий наружный примыкает к предыдущему. Из этих четырех геометрий в двух витки на торцах лобовых частей выравниваются по нижней образующей цилиндра, а две остальные – по верхней. Как пример на Рис. 5 показана установка витков на лобовых частях с первым левым витком, уложенным по постоянному периметру и выравниваем по нижней образующей цилиндра.

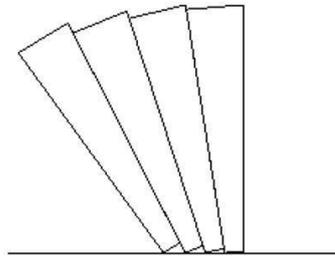


Рис. 5. Установка витков на лобовых частях, первый левый виток лежит по форме постоянного периметра.

3 Методы расчета магнитного поля и оптимизации геометрии

3.1 Представление центрального поля

Компоненты магнитного поля в поперечном сечении длинного мультиполюсного магнита можно представить в цилиндрической системе координат в виде:

$$\begin{aligned}
 B_{\theta}(r, \theta, z) &= B_0(0,0,0) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{n-1} [b_n(z) \cos(n\theta) + a_n(z) \sin(n\theta)], \\
 B_r(r, \theta, z) &= B_0(0,0,0) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{n-1} [-b_n(z) \sin(n\theta) + a_n(z) \cos(n\theta)].
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Здесь,

- B_0 - фактор нормализации;

- r_0 – радиус нормализации, который, как правило, равен радиусу полезной апертуры магнита (области хорошего поля). Например, для основных диполей и квадруполей УНК $r_0 = 35$ мм;
- Величины b_n и a_n представляют прямые и косые нелинейности магнитного поля $(n-1)$ -го порядка;
- z – продольная ось магнита.

Начало координат совмещено с центром магнита. В идеальной геометрии магнита с m полюсами из-за симметрии отличны от нуля только «конструктивные» прямые нелинейности вида b_k , $k = m(n-1/2)$, $n = 1, 2, \dots, \infty$. В центральном сечении магнита, где не ощущается влияние лобовых частей, коэффициенты b_n не зависят от z . Далее такие нелинейности будут называться центральными нелинейностями поля. Разумеется, реальная геометрия магнита всегда будет иметь отклонения от идеальной в результате погрешностей изготовления и разброса магнитных параметров и свойств материалов. Поэтому в такой геометрии будет присутствовать весь спектр нелинейностей и их величины будут характеризовать точность изготовления. При этом четные косинусные гармоники появляются при нарушении симметрии относительно вертикальной оси, четные синусные гармоники — при нарушении симметрии относительно горизонтальной оси. Нечетные синусные нелинейности обусловлены угловым смещением измерительной системы координат относительно системы координат магнита.

В ускорительных машинах влияние таких нелинейностей на динамику пучка компенсируется системами коррекции. Обычно множитель B_0 в дипольных магнитах равен центральному полю. Для мультиполей высших порядков этот множитель выбирается в зависимости от магнитной системы и требований к ней.

Для диполей удобно выбрать величину B_0 как центральное поле в приближении бесконечно большой магнитной проницаемости магнитопровода. Тогда отличие b_1 от единицы в дипольном магните будет характеризовать относительное изменение центрального магнитного поля в результате отклонения геометрии от идеальной, эффектов насыщения магнитопровода, намагниченности сверхпроводника, влияния краевых эффектов магнита и т.д.

3.2 Представление интегрального поля

Проинтегрировав выражения (1) по z можно получить представление интегрального поля:

$$\begin{aligned}\hat{B}_\theta(r, \theta) &= \hat{B}_0(0,0) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{n-1} \left[\hat{b}_n \cos(n\theta) + \hat{a}_n \sin(n\theta)\right] \\ \hat{B}_r(r, \theta) &= \hat{B}_0(0,0) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{n-1} \left[-\hat{b}_n \sin(n\theta) + \hat{a}_n \cos(n\theta)\right]\end{aligned}\quad (2)$$

Здесь:

$$\begin{aligned}\hat{B}_\theta(r, \theta) &= \int_{-\infty}^{\infty} B_\theta(r, \theta, z) dz; \quad \hat{B}_r(r, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} B_r(r, \theta, z) dz; \\ \hat{B}_0(0,0) &= \int_{-\infty}^{\infty} B_0(0,0, z) dz; \\ \hat{b}_n &= \frac{B_0}{\hat{B}_0} \int_{-\infty}^{\infty} b_n(z) dz; \quad \hat{a}_n = \frac{B_0}{\hat{B}_0} \int_{-\infty}^{\infty} a_n(z) dz;\end{aligned}\quad (3)$$

Нормировочный множитель $\hat{B}_0(0,0)$ удобен для дипольных полей.

По аналогии с b_n и a_n величины \hat{b}_n и \hat{a}_n представляют нормальные и косые интегральные нелинейности поля $(n-1)$ -го порядка. Величины

$$L_m = \frac{\hat{B}_0}{B_0} = \frac{\hat{G}_0}{G_0}\quad (4)$$

определяют эффективную (магнитную) длину диполя или квадруполь соответственно. Аналогичное определение эффективной длины справедливо и для высших мультипольных магнитов с соответствующими первыми коэффициентами поля и интеграла поля.

3.3 Расчет нелинейностей центрального поля

Нелинейности гармонического поля в слоевых магнитах в программе HARM-3D рассчитываются по аналитическим формулам. Обозначим

$$w_n = b_n + ia_n$$

Для полностью кистунированного кабеля токовый слой имеет вид кольцевого сектора, который характеризуется параметрами: r_1 , r_2 – внутренний и наружный радиусы; φ , α – начальный и конечный углы слоя, j – плотность тока; R_F – внутренний радиус магнитного экрана. Тогда на радиусе нормализации r_0 :

$$\begin{aligned}
w_{n=2} &= \frac{ijr_0}{c} \left(e^{-2i\alpha} - e^{-2i\varphi} \right) \left(\ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_2^4 - r_1^4}{4R_F^4} \right), \\
w_{n \neq 2} &= \frac{2ijr_0^{n-1}}{nc} \left(e^{-in\alpha} - e^{-in\varphi} \right) \left[\frac{r_2^{2-n} - r_1^{2-n}}{2-n} + \frac{r_2^{2+n} - r_1^{2+n}}{(2+n)R_F^{2n}} \right].
\end{aligned} \tag{5}$$

Для не полностью кистунированного кабеля трапецевидный виток разбивается на бесконечно тонкие полоски с координатами $z_k = x_k + iy_k$, $k = 1, 2$. По полоске протекает ток I . Вклад в нелинейность от одной полоски определяется по формуле:

$$\begin{aligned}
w_1 &= \frac{2I}{c} \left[\frac{\ln(z_2 / z_1)}{z_2 - z_1} + \frac{z_2^* + z_1^*}{2R_F^2} \right], \\
w_n &= \frac{2I}{c} r_0^{n-1} \left[\frac{1}{(n-1)(z_2 - z_1)} \left(\frac{1}{z_2^{n-1}} - \frac{1}{z_1^{n-1}} \right) + \frac{(z_2^*)^{n+1} - (z_1^*)^{n+1}}{(n+1)(z_2^* - z_1^*)R_F^{2n}} \right].
\end{aligned} \tag{6}$$

3.4 Расчет интегральных нелинейностей поля

Интеграл поля $\vec{\hat{H}}$ удовлетворяет уравнениям:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \hat{H}_x}{\partial x} + \frac{\partial \hat{H}_y}{\partial y} &= 0; \\
\frac{\partial \hat{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \hat{H}_x}{\partial y} &= -\frac{4\pi \hat{J}}{c}; \\
\hat{J}(x, y) &= \int_{-\infty}^{\infty} j_z(x, y, z) dz
\end{aligned} \tag{7}$$

Для бесконечно длинного цилиндрического магнитопровода с внутренним радиусом R_F и бесконечно большой магнитной проницаемостью граничное условие имеет вид:

$$\hat{H}_\theta(r, \theta) \Big|_{r=R_F} = 0; \tag{8}$$

где r, θ - полярные координаты. Считая, что развертка каждого витка есть эллипс с разностью полуосей $a_z - a_x = \Delta r$, из решения системы (7) – (8) получаются следующие формулы для расчета интегральных нелинейностей, создаваемых разными частями обмоточного блока:

$$\begin{aligned}
A: \quad b_n &= \frac{16j}{c} F_n L(\cos n\theta_1 - \cos n\theta_2); \quad F_n = \frac{\sin \frac{\pi n}{2}}{nr_0^{2-n}} \left[\frac{r_2^{2-n} - r_1^{2-n}}{2-n} + \frac{r_2^{2+n} + r_1^{2+n}}{(2+n)R_F^{2n}} \right]; \\
B: \quad b_n &= \frac{16j}{c} F_n d \left(\frac{\sin n\theta_1 - \sin n\theta_2}{n\theta_1 - n\theta_2} - \cos n\theta_1 \right); \quad \theta_1 = \frac{\pi}{2} - \alpha; \quad \theta_2 = \frac{\pi}{2} - \varphi; \\
C: \quad b_n &= \frac{8\pi j}{c} r_2 F_n \left\{ \left(\theta_1 + \frac{\Delta r}{r_2 n} \right) J_0(n\theta_1) - \left(\theta_2 + \frac{\Delta r}{r_2 n} \right) J_0(n\theta_2) + \frac{1}{n} \int_{n\theta_1}^{n\theta_2} J_0(x) dx \right\}; \\
D: \quad b_n &= \frac{16jr_2}{nc} F_n \int_0^{\pi/2-\beta} \left\{ \begin{aligned} &\left[\zeta_2 \cos(\zeta_2 \cos \theta + \psi_0) - \frac{\sin(\zeta_2 \cos \theta + \psi_0)}{\cos \theta} \right] - \\ &\left[\zeta_1 \cos(\zeta_1 \cos \theta + \psi_0) - \frac{\sin(\zeta_1 \cos \theta + \psi_0)}{\cos \theta} \right] \end{aligned} \right\} d\theta; \\
E: \quad b_n &= \frac{16jr_2}{nc} F_n \int_0^\beta \left\{ \begin{aligned} &\left[\xi_2 \cos(\xi_2 \sin \theta) - \frac{\sin(\xi_2 \sin \theta)}{\sin \theta} \right] - \\ &\left[\xi_1 \cos(\xi_1 \sin \theta) - \frac{\sin(\xi_1 \sin \theta)}{\sin \theta} \right] \end{aligned} \right\} d\theta; \\
\zeta_k &= n(\theta_k - \psi_0); \quad \xi_k = n \left[\theta_k + \psi_0 \left(\frac{1}{\sin \beta} - 1 \right) \right], \quad k = 1, 2; \quad \psi_0 = \frac{(R_2 - R_1) \sin \beta}{r_2}.
\end{aligned} \tag{9}$$

Здесь R_1 и R_2 – малый и большой радиусы сопряженных дуг; β - угол сопряжения; J_0 – функция Бесселя. Интегралы в (9) вычисляются численно.

Вычисление нелинейностей интеграла поля в программе HARM-3D для лобовых частей в виде «постоянного периметра» производится численно, решая систему уравнений (2). Вклад в интеграл поля от токового отрезка вычисляется по аналитическим формулам с учетом его отражения в ферромагнетике.

В программе также происходит численное разложение (2). При этом возможно проинтегрировать по z векторы \vec{B}_J и \vec{B}_M , что существенно сокращает время расчета.

4 Оптимизация геометрии мультипольных магнитов

4.1 Центральное сечение

Как правило, пучок заряженных частиц наиболее чувствителен к нелинейностям низших порядков. Выбором соответствующих угловых размеров обмоточных блоков можно по-

давить число низших нелинейностей, равное числу обмоточных блоков, решая систему нелинейных уравнений, например, для диполя:

$$\sum_n \frac{\partial b_k}{\partial \theta_n} \Delta \theta_n = b_k^{(0)}; \quad k = 3, 5, 7, \dots \quad (10)$$

Здесь $\Delta \theta_n$ – обобщенная координата, равная либо начальному углу слоя φ , либо конечному углу α , либо их разности $\alpha - \varphi$. Из-за угловой дискретности, определяемой конечной толщиной витка, уравнение (10) либо имеет одно решение, либо ни одного. Путем перебора различного соотношения витков в блоках, можно добиться минимизации поля на обмотке в центральном сечении. Из всех возможных вариантов решения необходимо выбирать тот, который дает максимальную критическую температуру обмотки, что приводит к увеличению температурного запаса магнита. Из условий динамики пучка иногда требуется иметь ненулевую величину $b_k^{(0)}$. Заметим, что решение системы (10) дает гораздо ощутимей выигрыш в вычислительных ресурсах по сравнению с минимизацией функционала

$$\min \{F[\bar{b}(\bar{\theta}) - \bar{b}^{(0)}(\bar{\theta})]\}; \quad \bar{b} = (b_3, b_5, b_7, \dots); \quad \bar{b}^{(0)} = (b_3^{(0)}, b_5^{(0)}, b_7^{(0)}, \dots); \quad \bar{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots). \quad (11)$$

4.2 Лобовые части

На динамику пучка в ускорителе основное влияние оказывают интегральные нелинейности низших порядков и их воздействие убывает с ростом номера нелинейности. Подавление центральных и краевых нелинейностей поля должно осуществляться независимо, так как они по-разному влияют на движение частиц и не компенсируют друг друга [10].

Относительное превышение поля на обмотке положительно как в центральном сечении (η_0), так и на лобовых частях (η_e). В зависимости от η_{max} меняется предельно достижимая величина интеграла поля

$$\hat{B}_0 = \frac{L_m k_0 \lambda}{\chi + k_0 (1 + \eta_{max})}, \quad (12)$$

где L_m – эффективная длина диполя; $k_0 = B_0/I_{op}$ – постоянная магнита; I_{op} – ток в одном витке; параметры λ и χ связывают критическое поле сверхпроводника с током:

$$B_c = \lambda - \chi I_{op}. \quad (13)$$

Изменение формы лобовых частей одновременно меняет L_m и η_{max} , конечной же целью является получение максимальной величины \hat{B}_0 однако, как показано в [11], L_m меняется в сравнительно небольших пределах и максимальное значение интеграла поля достигается при

$$\eta_e = \eta_0. \quad (14)$$

Итак, оптимизация формы лобовых частей сверхпроводящих диполей сводится как минимум к выполнению двух условий:

1. Подавление низших интегральных нелинейностей;
2. Минимизация превышения поля в лобовых частях к уровню (14).

Интегральные нелинейности можно представить в виде суммы центральных и краевых нелинейностей поля:

$$\hat{b}_n = \frac{2l}{L_m} \left[b_{n0} + \frac{1}{l} \int_l^\infty b_{nl}(z) dz \right] \quad (15)$$

где $2l$ – длина прямолинейной части магнита, где $b_{n0} = const$, а $b_{ne}(z)$ – нелинейности поля на краю магнита. Поскольку наиболее жесткие требования к качеству поля предъявляются к дипольным магнитам, в них, как показано в [11] можно независимо подавить центральные и интегральные нелинейности. Для подавления краевых нелинейностей в лобовых частях магнита необходимо устанавливать проставку. Местоположение этой проставки, а также ее толщина S влияет на нелинейность n -го порядка по синусному закону:

$$\Delta \hat{b}_n(k) = S [a_{n1} + a_{n2} \sin(a_{n3}k + a_{n4})], \quad (16)$$

где k – число витков, размещенных от прокладки ближе к центру магнита; $a_{n1}, a_{n2}, a_{n3}, a_{n4}$ – коэффициенты, разные для каждой нелинейности и каждого слоя обмотки. Если нет возможности подавить интеграл в (15), интегральную гармонику можно подавить ненулевой нелинейностью поля b_{n0} соответствующим выбором углов токовых блоков в центральном сечении.

В двухслойных дипольных магнитах наиболее эффективно использование двух проставок в лобовых частях для подавления двух низших интегральных нелинейностей поля. Первая из них, расположенная ближе к центру магнита, минимизирует поле на лобовых частях, а вторая проставка в основном предназначена для подавления низших интегральных нелиней-

ностей поля \hat{b}_3 и \hat{b}_5 . Местоположение второй проставки, определяемое числом витков k_0 , выбирается из (16) при условии

$$r(k_0) = \frac{\Delta \hat{b}_3}{\Delta \hat{b}_5} \cong \frac{\hat{b}_3^{(i)}}{\hat{b}_5^{(i)}} \quad (17)$$

Точные значения величин проставок S_n определяются из решения системы нелинейных уравнений методом простых итераций, например, для диполя:

$$\sum_n \frac{\partial \hat{b}_k}{\partial S_n} \Delta S_n = \hat{b}_k^{(0)}; \quad k = 3, 5. \quad (18)$$

Использование закона (16) для дипольных магнитов с формой лобовых частей обмоток, представленных на Рис. 2, во многих случаях позволяет ограничиться всего одной - двумя проставками, которые являются многофункциональными, минимизируют превышение поля на лобовых частях, подавляют низшие интегральные нелинейности поля и позволяют получить максимальный интеграл поля. Для сравнения можно указать, что оптимизация геометрии лобовых частей без использования (16) требует установки в лобовых частях от 5 до 13 проставок [11].

5 Управление программой

Входные данные для программы находятся в файле **ch.dat**. Основные результаты выдаются в файле **lh.lis**. Входные данные для программ MULTIC2 и MULTIC3 [1] создаются программой после оптимизации геометрии в файлах **inp2.dat** и **inp3.dat** соответственно. Параметры оптимизированной геометрии могут сохраняться в файле **cp.dat** для дальнейшей работы с программой **HARM-3D**. Входные данные для графической программы PAW [2] находятся в файлах **paw.kumac** и **paw10.kumac**. Все управление программой и входные данные вводятся с помощью оператора **namelist** во входном файле данных. Переменные величины на входе и выходе в системе Гаусса: см, с, А, Гс, Н, атм, Запасенная энергия выдается в Дж, индуктивность в Гн. Углы задаются в градусах.

Порядок операторов:

Первый оператор в файле **ch.dat** должен быть **&begin num = 0 &end**. После него должна быть строка с кратким описанием задачи, которая будет появляться в файле **lh.lis**. Следующий оператор-**namelist &in**, в котором должны находиться переменные:

ro – радиус нормализации мультиполей центрального магнитного поля и интегрального поля;

rf – внутренний радиус цилиндрического магнитопровода;

ns – число обмоточных блоков;

flen – продольная длина магнитопровода, необязательный параметр;

ife = 0 задается для геометрии без магнитопровода.

Далее следуют столько операторов **&mag**, сколько указано в переменной **ns**. Эти операторы задают геометрию каждого обмоточного блока.

Следующий оператор-**namelist &h**, содержит переменные-команды, которые надо выполнить, если они не нулевые. Первые два параметра задают общую информацию:

nprint – уровень выдачи информации в файле **lh.lis** для некоторых команд. По умолчанию **nprint = 0**. Может иметь значения от 0 до 5. Применяется крайне редко.

ncoef – число вычисляемых гармоник поля или интеграла поля, по умолчанию 45.

nopt = 1 – включает оптимизацию геометрии центрального сечения для обмоток с полностью кистоунированным кабелем. **nopt = 2** – включает оптимизацию геометрии центрального сечения для обмоток с не полностью кистоунированным кабелем: Параметры оптимизации задаются в **namelist &opt**. **nopt = 0** вычисляет гармонические коэффициенты центрального поля заданной геометрии без оптимизации, **nopt = -1** вычисляет гармонические коэффициенты центрального поля заданной геометрии без оптимизации, но подбирает ток в витке для заданного значения центрального поля.

maxb = 1 – находит максимальное поле на обмотке в центральном сечении:

ntemp = 1 – определяет критическую температуру сверхпроводящей обмотки, изготовленной из NbTi или Nb₃Sn по максимальному магнитному полю, определяемому переменной **maxb = 1**.

ngetb = 1 – вычисляет компоненты магнитного поля в области, определенной оператором **&getb**.

nforce = 1 – вычисляет поперечные силы обмоточных блоков в центральном сечении на метр длины магнита.

npress = 1 – определяется давление на обмоточные блоки в центральном сечении.

inte = 1 – интегрирование компонент поля по площади. Параметры задаются в **namelist &int**. Применяется для вычисления запасенной энергии и индукции в магните.

inco = 1 – включает вычисление интегральных гармоник. Требуется оператор-namelist **&inpinco**.

maxb3 = 1 – находит максимальное поле на лобовых частях в обмотках с геометрией постоянного периметра. Необходим оператор-namelist **&maxfld**.

nwrite = 1 – готовит файлы **inp2.dat** и **inp3.dat** для расчетов магнитных характеристик программами **MULTIC2** или **MULTIC3** соответственно, учитывающие реальную зависимость магнитной проницаемости от поля, а также записывает оптимизированную геометрию центрального сечения в файл **cp.dat** для дальнейшей работы с программой **HARM-3D**.

eli = 1 – вычисляет гармонические коэффициенты обмоточных блоков в центральном сечении при изменении вертикального радиуса средней дуги окружности обмоточного блока на 1 мм. При этом витки обмотки располагаются по дуге эллипса.

nsplit = 1 – расщепление обмоточного блока на два. Требуется namelist **&spl**.

npaw = 1 – подготовка данных в файле **paw.kumac** для графического отображения геометрии центрального сечения с помощью графического пакета **PAW** [2].

nderiv = 1 – вычисление производных низших гармоник поля по их геометрическим параметрам центрального сечения. Необходим для определения допусков на точность изготовления магнита.

loss = 1 – вычисление потерь в сверхпроводящей обмотке. Параметры для их вычисления задаются в операторе namelist **&loss**.

nmag = 1 – вычисление вклада в мультиполи поля от намагниченности сверхпроводника. Необходим файл **magsc**.

iharm = 1 – устанавливает новые значения переменных для гармонического анализа. Требуется оператор-namelist **&harm**.

6 Задание геометрии

6.1 Центральное сечение

Данные для задания геометрии обмоточного блока в центральном сечении и некоторые параметры лобовых частей обмоточного блока находятся в операторе-namelist **&MAG**. Перечень всех переменных в этом операторе:

phi, alpha, r, a, turn, cur, hphi, halpha, height, his, diam, hs, hb, deltah, gamma, hcore, wcore, rin, rou, wire, ikey, symm, npole, h2, r1, kend, space

Здесь:

phi, alpha – начальный и конечный углы слоя;

r – внутренний радиус слоя;

a – ширина слоя;

turn – число витков в слое;

cur – начальный рабочий ток в витке;

hphi, halpha – начальный и конечный угол слоя в линейных размерах по средней линии слоя;

height – высота трапециевидного витка по средней линии;

his – толщина изоляции кабеля;

hcore, wcore – высота и ширина проставки между двумя слоями сверхпроводящих проволок в кабеле резерфордовского типа для подавления кабельных потерь;

diam – диаметр сверхпроводящей проволоки в кабеле;

hs, hb – основания трапеции в не полностью кистоунированном кабеле;

deltah – высота трапеции в не полностью кистоунированном кабеле;

gamma – угол трапеции в не полностью кистоунированном кабеле;

rin, rou – внутренний и внешний радиусы кабеля нуклотроновского типа;

wire – число проволок в кабеле теглотроновского типа;

ikey = 0 – геометрия с полностью кистоунированным кабелем резерфордовского типа;

1 – геометрия с не полностью кистоунированным кабелем, начальный виток лежит параллельно медианной плоскости;

2 – геометрия с не полностью кистоунированным кабелем, угол среднего витка совпадает с центром магнита;

3 – геометрия с кабелем нуклотроновского типа.

npole – число полюсов магнита: 2 – диполь, 4 – квудруполь, 6 – сектуполь, 8 – октуполь;

symm – симметрия магнита, как правило совпадает с **npole**;

h2 – продольная длина обмоточного блока от центра магнита;

r1 – длина витков на лобовой части по внешнему радиусу, иногда для снижения превышения поля на лобовых частях витки разреживаются с помощью проставок между ними;

kend – тип лобовой части: 10 или 11 для лобовых частей, представленных на Рис. 3; 21, 22, 23, 24 – для лобовых частей постоянного периметра, как указано в разделе 2;

space – начальная толщина проставки в лобовых частях.

Угловые величины токового блока можно задавать несколькими способами:

- **phi, alpha, turn;**
- **hphi, alpha, turn;**
- **phi, halpha, turn;**
- **phi, height, turn;**
- **hphi, height, turn.**

Если в следующем **&mag** отсутствует переменная, она сохраняет свое предыдущее значение.

6.2 Лобовые части

Данные для геометрии лобовых частей находятся в операторе-namelist **&inpinco**. Перечень всех переменных:

ife, flen, ngeom, r1, teta, rb1, rb2, kgeom3, nprint, step, nopt, bt1, deriv, is1, is2, nt1, nt2, dfe, epsilon, kint, nit, maxb3, nforce3, c3z, c5z

Здесь:

ife = 0, продольная длина магнитопровода совпадает с продольной длиной обмотки;

ife = 1 – продольная длина магнитопровода задается переменной **flen**;

ngeom = 1 – выдача графической информации лобовых частей в файле **paw10.kumac** для программы **PAW**;

r1 – длина витков на лобовой части по внешнему радиусу, иногда для снижения превышения поля на лобовых частях витки разреживаются с помощью проставок между ними;

teta – угол сопряжения малого и большого радиуса внутреннего витка в развертке лобовых частей с **end = 11**;

rb1 – минимальный радиус изгиба первого внутреннего витка в развертке лобовых частей с **end = 11**;

rb2 – максимальный радиус изгиба первого внутреннего витка в развертке лобовых частей с **end = 11**, если задан **rb1**, этот параметр вычисляется автоматически в программе;

kgeom3 = 1 – численное вычисление гармоник, требуется оператор-namelist **harm**;

nprint – задает уровень печати в выходном файле, **nprint** = 0 – минимальный уровень;

step – начальное значение изменения оптимизируемого параметра, по умолчанию 0.01;

nopt = 0 – интегральные коэффициенты не вычисляются, 1 – вычисляются, 2 – проводится оптимизация лобовых частей;

bt1 – угол начала дуги для лобовых частей третьей геометрии в проекции плоскости **XУ**, Рис. 3;

epsilon – точность подавления интегральных гармоник при оптимизации лобовых частей;

deriv = 1 – вычисление производных низших гармоник интеграла поля по их геометрическим параметрам лобовых частей. Необходим для определения допусков на точность изготовления магнита.

is1, is2 – номера токовых блоков для оптимизации лобовых частей. Необязательный параметр. Как правило, местоположение проставок в лобовых частях совпадает с местоположением проставок в центральном сечении обмоточного блока;

nt1, nt2 – число витков в токовых блоках, определяемых параметрами **is1, is2**. Необязательный параметр;

dfe – укорачивание продольной длины магнитопровода;

nit – число итераций для оптимизации лобовых частей. По умолчанию **nit = 10**;

maxb3 = 1 – вычисление максимального поля на лобовых частях с геометрией постоянного периметра;

nforce3 = 1 – вычисление пондеромоторных сил на лобовых частях с геометрией постоянного периметра;

c3z, c5z – ненулевые значения интегральных нелинейностей 3-го и 5-го порядков в дипольном магните, до которых надо подавить интегральные гармоники. По умолчанию **c3z, c5z** равны нулю.

7 Оптимизация центрального сечения

Параметры для оптимизации задаются в операторе **namelist &opt:**

nangl, nharm, wfac, ratioj, czero, h0, g0, nit

Здесь:

nangl задается через запятую для каждого токового слоя и имеет следующие значения:

0 – блок не участвует в оптимизации;

1 – оптимизация изменением конечных углов **alpha**, сохраняется ток в витке;

- 2 – оптимизация изменением начальных углов **phi**; сохраняется ток в витке;
- 3 – оптимизация поворотом углового раствора слоя **alpha-phi**,
- 4 – оптимизация изменением конечных углов **alpha**, сохраняется плотность тока в витке;
- 5 – оптимизация изменением начальных углов **phi**; сохраняется плотность тока в витке.

- nharm** – последовательность нулей и единиц, соответствующих порядковым номерам низших гармоник. 1 – эта гармоника подлежит оптимизации, 0 – нет;
- wfac** – весовые множители для оптимизации гармоник, по умолчанию 1. Задаются по количеству слоев через запятую;
- ratioj** – весовой множитель для изменения плотности тока в слоях, по умолчанию 1. Задаются по количеству слоев через запятую;
- czero** – значения низших гармоник, которые должны быть после оптимизации геометрии. По умолчанию равны нулю;
- h0** – требуемое центральное поле диполя, для которого определяются токи в витке;
- g0** – требуемое центральное поле квадруполья, для которого определяются токи в витке;
- nit** – число итераций для оптимизации, по умолчанию 10.

8 Вычисление магнитного поля

Вычисление магнитного поля в программе возможно только в области, ограниченной внутренним радиусом магнитопровода и определяется с помощью закона Био-Савара:

$$\vec{B}_j(\vec{r}) = -\frac{1}{c} \int_{S'} \frac{j(\vec{r} - \vec{r}') \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} dS' \quad (19)$$

Здесь j – плотность тока.

Интегрирование ведется по площади токового проводника. Вклад от магнитопровода вычисляется отраженными токами в нем.

Переменные для вычисления магнитного поля задаются в операторе **namelist &getb**:

x, dx, nx, y, dy, ny, z, dz, nz, r, dr, nr, phi, dphi, nphi, xc, yc, comp, h0, file, maxit

Здесь:

x, dx, nx, y, dy, ny, z, dz, nz – вычисление поля вдоль линии или площади в декартовой системе координат. Вычисление поля в продольном направлении возможно только для

лобовых частей с геометрией постоянного периметра. Для каждой координаты задается начальное значение, шаг и число точек;

r, dr, nr, phi, dphi, nphi, xc, yc – вычисление поля вдоль линии или площади в цилиндрической системе координат, **xc, yc** – начало координат;

comp – компоненты поля в последней колонке выдачи результатов. Могут иметь следующие значения:

'HY ', 'HX ', 'HZ ', 'HR ', 'HPI', 'HT ', 'DNBH', 'H2 ', 'A ', 'PHI '

где **hx, hy, hz, ht, hr, hphi** – компоненты поля в декартовых и цилиндрических координатах;

ht – модуль поля. Компонента **hz** вычисляется только для лобовых частей с геометрией постоянного периметра;

dhbh – однородность поля, определяемая как $(ht - h0)/h0$, **h0** – центральное поле, если не задано в операторе, то вычисляется в программе в центре магнита;

h2 – квадрат модуля поля;

a, phi – векторный или скалярный потенциалы;

maxit – максимальное число итераций для вычисления максимального поля в лобовых частях с геометрией постоянного периметра;

9 Вычисление запасенной энергии в магните

Запасенная энергия магнита вычисляется по формуле:

$$W = \frac{1}{4\pi} \int_S B^2 dS \quad (20)$$

Область интегрирования задается оператором-наместником **&int** с параметрами:

x1, x2, y1, y2, r1, r2, phi1, phi2, xc, yc, tol

Здесь:

x1, x2, y1, y2 – область интегрирования в декартовых координатах;

r1, r2, phi1, phi2, xc, yc – область интегрирования в цилиндрических координатах;

tol – точность вычисления интеграла, необязательный параметр.

Результат выдается в Дж/м. Попутно вычисляется индуктивность магнита в Гн. Область интегрирования задается только в симметричной части магнита. По умолчанию рассматривается вся область, ограниченная радиусом магнитопровода. Программа выдает результаты в этой области и во всем магните.

10 Пондеромоторные силы

Пондеромоторные силы вычисляются при задании параметра **nforce** = 1 по формуле:

$$\vec{F} = \frac{1}{c} \int_S [\vec{j} \times \vec{H}] dS. \quad (21)$$

Все компоненты сил вычисляются в каждом витке слоя в кН/м, запасенная энергия в кДж/м. Для каждого витка данные представлены в две строки, первая из которых в полярных координатах, вторая строка – в декартовых. В первой строке **N** – номер витка, **R**, **Theta** – координата центра витка, **Frj**, **Ftj** – радиальная и азимутальная компоненты силы, создаваемые током в обмотке, **Fr_f**, **Ft_f** – радиальная и азимутальная компоненты силы от магнитопровода, **Fr**, **Ft** – полная радиальная и азимутальная компоненты силы, **Total** – модуль суммарной силы.

Во второй строке **X**, **Y** – координаты центра витка, **Fxj**, **Fyj**, **Fxf**, **Fyf**, **Fx**, **Fy** – компоненты сил от тока (**j**), магнитопровода (**f**) и суммарные компоненты сил, **Energy** – запасенная энергия в витке. После каждого токового блока выдаются суммарные компоненты сил в блоке в полярных и декартовых координатах, модуль полной силы в блоке и запасенная энергия в нем. Вычисление сил заканчивается выдачей суммарных компонент сил и модуля полной силы, действующих на обмотку в задаваемой области (квадрант для диполя, октант для квадруполь и т.д.), а также полная запасенная энергия в обмотке. После всех блоков определяется суммарные компоненты силы и ее модуль на весь обмоточный блок, полная запасенная энергия в апертуре магнита и ее обмотке.

11 Вычисление динамических потерь в сверхпроводящей обмотке

11.1 Основные формулы расчета потерь

Тепловые потери, возникающие в сверхпроводящих проводах, состоят из трех составляющих [13]:

11.1.1 Гистерезисные потери

Гистерезисные потери в единице объема провода, W_h , за треугольный цикл $0-B_{max}-0$ равны интегралу потерь мощности за цикл. Они имеют простую логарифмическую зависимость от магнитного поля B (в Дж/м³):

$$W_h = \frac{4}{3\pi} \lambda_s d_f J_0 B_0 \ln \left(1 + \frac{B_{\max}}{B_0} \right), \quad (22)$$

где λ_s – коэффициент заполнения сверхпроводящей нити, d_f – ее диаметр, J_0 и B_0 – параметры, описывающие реальную зависимость критической плотности транспортного тока $J_c(B)$, которая обычно аппроксимируется выражением:

$$J_c = \frac{J_0 B_0}{B + B_0}. \quad (23)$$

Здесь J_0 – критическая плотность тока при $B = 0$, B_0 соответствует полю, когда J_c уменьшается в 2 раза. Таким образом, критическая плотность тока J_c имеет обратно пропорциональную зависимость от магнитного поля B . Формулы (19) и (20) показывают, что существует только один параметр d_f , который оказывает влияние на потери при сохранении высокой токонесущей способности провода.

11.1.2 Матричные потери

Матричные потери W_m (J/m^3) за треугольный цикл $0-B_{\max}-0$ при скорости изменения магнитного поля dB/dt и постоянном эффективном матричном сопротивлении ρ_e равны

$$W_m = \frac{1}{2\pi^2} \frac{l_p^2}{\rho_e} \dot{B} B_{\max}. \quad (24)$$

где l_p – шаг скрутки сверхпроводящей нити.

Матричные потери имеют квадратичную зависимость от шага скручивания l_p , и обратно пропорциональны поперечному сопротивлению ρ_e . Оба эти параметра могут быть использованы для уменьшения матричных потерь.

11.1.3 Кабельные потери

Кабельные потери, W_c в треугольном цикле $0-B_{\max}-0$ ($Дж/м^3$), вызваны вихревыми токами в кабеле и зависят от шага транспонирования кабеля p ; отношения α ширины/толщине (a/b) кабеля, коэффициентом упаковки кабеля f и эффективными поперечным ρ_{\perp} и продольным ρ_{\parallel} сопротивлениями между проводниками в кабеле:

$$W_C = \frac{p^2 f}{16} \left(\frac{16}{15} \frac{\alpha^2 \dot{B}_\perp B_{\perp \max}}{\rho_\perp} + \frac{2}{3} \frac{\dot{B}_\perp B_{\perp \max}}{\rho_\parallel} + \frac{1}{2} \frac{\dot{B}_\parallel B_{\parallel \max}}{\alpha^2 \rho_\parallel} \right), \quad (25)$$

где B_\perp и B_\parallel - поперечная и параллельная широкой стороне кабеля компоненты магнитного поля.

Формула (22) показывает, что можно использовать следующие параметры для снижения потерь кабеля:

- повышение эффективного поперечного сопротивления ρ_\perp ;
- уменьшение коэффициента α ;
- уменьшение длины транспонирования p .

11.2 Вычисление динамических потерь в обмотке

Переменные для вычисления потерь в сверхпроводящей обмотке задаются в операторе-namelist **&loss** при задании параметра $loss = 1$. Перечень всех переменных:

diamf, **lambdas**, **stepl**, **stepp**, **angp**, **roper**, **ropar**, **fill**, **paccab**, **dbdt**, **Vmin**, **Vmax**, **b0**, **curden0**, **rom**.

Здесь:

diamf – диаметр сверхпроводящей нити d_f , задается в мкм;

lambdas – коэффициент заполнения сверхпроводящей нити λ_s ;

stepl – шаг скрутки сверхпроводящей нити l_p (см);

stepp – шага транспонирования кабеля p (см);

angp – угол транспонирования кабеля, град. Задается либо **stepp** либо **angp**;

roper, **ropar** – эффективные поперечное ρ_\perp и продольное ρ_\parallel сопротивления между проводниками в кабеле (мкОм×м);

fill – коэффициент заполнения сверхпроводящего провода f ;

paccab – коэффициент упаковки кабеля f ;

db/dt – скорость изменения поля (Тл/с);

Vmin, **Vmax** – минимальное и максимальное магнитное поле в цикле (Тл/с);

b0, **curden0** – константы из формулы (20). По умолчанию **b0** = 0.251 Тл,

$$\mathbf{curden0} = 4.27 \times 10^{10} \text{ А/см}^2;$$

rom – эффективное матричное сопротивление ρ_e (Ом). По умолчанию **rom** = 5×10^{-10} .

Все компоненты потерь вычисляются в каждом витке. После каждого слоя выдаются суммарные значения компонент потерь в обмоточном слое и мощности потерь. После всех слоев выдается суммарный результат потерь и мощности потерь в магните.

12 Максимальное поле на обмотке в центральном сечении и критическая температура

Поиск максимального поля на обмотке в центральном сечении производится вдоль радиусов по начальному и конечному углам слоев при $\mathbf{maxb} = 1$. Далее, если включен параметр $\mathbf{ntemp} = 1$, определяются критические температуры при найденном максимальном поле для NbTi сверхпроводящего провода диаметром 0.85 мм и критическими токами 550, 600, 650 и 700 А.

13 Вычисление вклада в нелинейности поля от намагниченности сверхпроводника

Вычисление вклада в гармоники поля от намагниченности сверхпроводника производится при включенном значении переменной $\mathbf{NMAG} = 1$. Для его вычисления необходимо задать файл **magsc** с экспериментально измеренными данными зависимостей $\mathbf{B(H)}$. Величины $\mathbf{B(i)}$ и $\mathbf{H(i)}$ располагаются обе в одной строке в свободном формате. Вклад в гармоники вычисляется по формуле (2).

14 Пример файла с входными данными для квадрупольного магнита

Ниже представлен пример файла с данными для расчета и оптимизации квадрупольного магнита [14]. Поперечное сечение квадрупольного магнита в первом квадранте представлено на Рис. 6, а развертка лобовых частей – на Рис. 7.

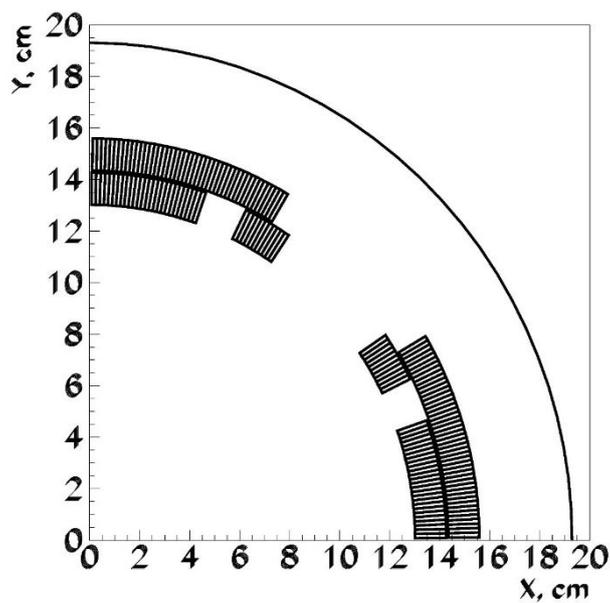


Рис. 6. Поперечное сечение квадрупольного магнита в первом квадранте.

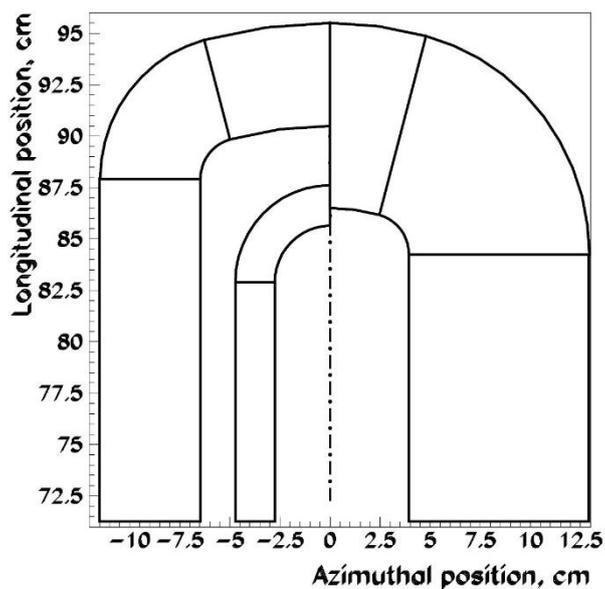


Рис. 7. Развертки лобовых частей квадрупольного магнита в плоскости $R\Theta-Z$. Слева – внутренний слой, справа – наружный.

Файл с данными для оптимизации геометрии центрального сечения и лобовых частей магнита, а также вычисления других магнитных характеристик.

&begin num = 0

&end

q = 39.8864 t/m, r fe = 193 mm, dfe = 145, new cable

```

&in  ro = 11.0, rf = 19.300, ns = 3                &end
&mag  hphi = 0.0450, r = 13.017
      a = 1.2450, turn = 26, cur = 5500
      npole = 4, symm = 4, h2 = 94.5, r1 = 0, kend = 11
      diam = 0.0850, height = 0.171                &end
&mag  phi = 25.644, r = 13.017
      a = 1.24500, turn = 11, cur = 5500
      npole = 4, symm = 4, h2 = 87.0839, r1 = 0, kend = 10
      diam = 0.0850, height = 0.171                &end
&mag  hphi = 0.0650, r = 14.346
      a = 1.24500, turn = 47, cur = 5500
      npole = 4, symm = 4, h2 = 94.5, r1 = 0, kend = 11
      diam = 0.0850, height = 0.171                &end
&h  nopt = 1, ncoef = 20, nprint = 0, maxb = 1, ntemp = 1, inco = 1
     ndvx = 0, ndvy = 0, ngetb = 0, nforce = 1, npress = 0, nsplit = 0
     nwrite = 1, nderiv = 0, inte = 1, maxb3 = 0, npaw = 2 &end
&opt  g0 = 0.398864 + 04, h0 = 4.3844 + 04
     nangl = 1, 3, 1, nharm = 1, 1, 1, wfac = 3*1
     czero = -6.5778e-4, -10.0606e-4, -7.1898e-4    &end
&inpinco kgeom3 = 0, ife = 1, nopt = 1, kint = 1, maxb3 = 0
     teta = 15, 0, 15, rb1 = 2, 0, 2, is1 = 2, is2 = 2
     dfe = 0.0, nit = 10, ngeom = 1, deriv = 0, step = 0.1 &end
&int  tol = 0.001, comp = 'h2 '                    &end

```

Во внутреннем слое двухслойной обмотки вставлена межвитковая проставка, разделяющая слой на два обмоточных блока. Три обмоточных блока позволяют подавить первые три нелинейности поля в центральном сечении. В лобовых частях находится одна проставка, подавляющая 6-ю интегральную гармонику поля. При включенной оптимизации лобовых частей (**nopt = 1** в **&inpinco**) параметры **is1** и **is2** задают номер обмоточного блока для оптимизации 6-ой гармоники. На динамику пучка основное влияние оказывают интегральные гар-

моники. Поэтому 10-я и 14-я интегральные нелинейности подавляются соответствующим выбором ненулевых центральных гармоник.

Оптимизация проводилась в несколько этапов:

- На первом этапе программой **HARM-3D** были выбраны число витков в обмоточных блоках и подавлены низшие гармоники поля 6-го, 10-го и 14-го порядков и интегральная нелинейность 6-го порядка.
- На втором этапе программой **MULTIC** в этой геометрии были рассчитаны влияния реальной зависимости $\mu(\mathbf{B})$ в магнитопроводе, а также вклад лобовых частей в центральные нелинейности.
- На следующем этапе эти искажения были учтены программой **HARM-3D** в переменной **czero** путем поворотов угловых растворов обмоточных блоков (параметр **nangl = 3**).
- Из технологических соображений необходимо, чтобы толщины проставок в медианной плоскости были кратны десяткам микрон. Поэтому на последнем этапе были зафиксированы необходимые толщины медианных проставок, близкие к оптимальным, а коррекция геометрии проводилась за счет изменения наружных углов обмоточных блоков **alpha** (параметр **nangl = 1**). При этом в этих блоках слегка изменялись толщины витков.

Далее в программе вычислялось максимальное поле на обмотке в центральном сечении (**MAXB = 1**) и соответствующая ему критическая температура (**NTEMP = 1**). Также в программе были рассчитаны пондеромоторные силы в центральном сечении (**NFORCE = 1**), запасенная энергия и индуктивность магнита (**INT = 1**) и интегральные нелинейности поля (**INCO = 1**). Параметр **NWRITE = 1** включает подготовку файлов **inp2.dat** и **inp3.dat**, а **NPAW = 2** – файлов **paw.kumac** и **paw10.kumac**.

Список литературы

- [1] Л.М. Ткаченко. Пакет программ **MULTIC** для расчёта магнитных полей произвольной конфигурации. Препринт ИФВЭ 98-28. – Протвино, 1998.
- [2] **PAW** – Physical Analysis Workstation. CERN Program Library Long Writeup Q121. CERN, Geneva, Switzerland.

- [3] L.M. Tkachenko. Code HARM. In "Computer Codes in Accelerator Domain", Internal Report, DESY M-92-07, p.21. Nov., 1992.
- [4] Ткаченко Л.М. Программ HARM. В кн. "Программы расчета и моделирования для уск. техники" (сборник аннотаций), НС АН и Минатома РФ по комп. проблеме "Персп. уск. комплексы и новые методы ускорения ЗЧ". Информационный фонд алгоритмов и программ по ускорительной тематике. Москва, 1992, с.39.
- [5] Tkachenko L.M. Code INCO. In "Computer Codes in Accelerator Domain", Internal Report, DESY M-92-07, p.24. Nov., 1992.
- [6] Ткаченко Л.М. Программа INCO. В кн. "Программы расчета и моделирования для уск. техники" (сборник аннотаций), НС АН и Минатома РФ по комп. проблеме "Персп. уск. комплексы и новые методы ускорения ЗЧ". Информационный фонд алгоритмов и программ по ускорительной тематике. Москва, 1992, с.51.
- [7] Colyer B. The Geometry of Constant Perimeter Dipole Windings/ RL-73-143.
- [8] Bossert R.C. et al. Analytical Solution to SSC Coil End Design. FERMILAB-Conf-89/54.
- [9] Rosten H.I. A Method for the Calculation of the Magnetostatic Field from a Wide Class of Current Geometries. RL-74-077, 1974.
- [10] Балбеков В.И., Чирков П.И. Влияние сектупольной и декапольной нелинейностей на бетатронное движение частиц в УНК. Препринт ИФВЭ 84-167, Серпухов, 1984.
- [11] Балбеков В.И., Ткаченко Л.М. Оптимизация лобовых частей дипольного магнита УНК. Препринт ИФВЭ
- [12] Ерегин В.Е., Сычевский С.Е., Титов В.А. Оптимизация формы лобовых частей сверхпроводящего дипольного магнита с седлообразной обмоткой. Препринт НИИЭФА П-Б-0580, Ленинград, 1982.
- [13] Г. Брехна "Сверхпроводящие магнитные системы". "Мир", Москва, 1976, стр. 291, 298
- [14] Y. Altukhov, I. Bogdanov, S. Kozub, L. Tkachenko. Numerical Optimization of the FFS Quadrupole. IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 32, NO. 4, JUNE 2022.

Рукопись поступила 7 ноября 2023 г.

Л.М. Ткаченко

Программа HARM-3D для оптимизации геометрии и расчета основных магнитных характеристик сверхпроводящих слоевых магнитов с седловидной обмоткой.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного автором.

Подписано к печати	08.11.2023	Формат	60 × 84/16.	Цифровая печать.					
Печ.л.	2.	Уч.–изд.л.	2,9.	Тираж	60.	Заказ	20.	Индекс	3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2023-17,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2023
