

Санкт-Петербургский государственный университет

ХРОМОВ Никита Олегович

Выпускная квалификационная работа

***Моделирование и анализ магнитных полей сверхпроводящих магнитов ускорительного
комплекса NICA***

Уровень образования: *Магистратура*

Направление 03.04.01 *“Прикладные математика и физика”*

Основная образовательная программа

BM.5896* *“Информационные и ядерные технологии”*

Научный руководитель:

доцент, кафедра ИиЯТ ПМ-ПУ,
доктор физ.-мат. наук, профессор
Костромин С.А.

Рецензент:

нач. сектора ЛФВЭ ОИЯИ,
кандидат физ.-мат. наук,
Михайлов В.А.

Санкт-Петербург

2019

Содержание

Содержание	1
Введение	2
Постановка задачи	4
Обзор литературы	5
Глава 1. Моделирование распределения магнитного поля в центральном сечении корректирующего магнита для Коллайдера	9
1.1 Система навигации The Opera Manager	9
1.2 Модуль The Opera-2d	10
1.3 Построение центрального сечения корректирующего магнита в Opera 2d	11
1.4 Полученные результаты	12
Глава 2. 3-х мерное моделирование корректирующего магнита коллайдера	18
2.1 Модуль The Opera 3d.	18
2.2 Построение геометрии в моделлере	19
2.3 Полученные результаты	20
Глава 3. Оптимизированная модель обмоток корректирующего магнита	23
3.1 Полученные координаты для моделирования	24
3.2 Построение моделей	27
3.3 Полученные результаты	28
Выводы	31
Заключение	32
Список литературы	33

Введение

Объединенный институт ядерных исследований (Дубна, Россия) — международная межправительственная организация, созданная в целях объединения научного и материального потенциала государств-членов для изучения фундаментальных свойств материи [1]. В своей деятельности ОИЯИ осуществляет интеграцию фундаментальных теоретических и экспериментальных исследований с разработкой и применением новейших технологий и университетским образованием. Основными направлениями проводимых исследований являются:

- физика элементарных частиц;
- ядерная физика;
- физика конденсированных сред.

Флагманским проектом института в области релятивистской ядерной физики и физики частиц является создание комплекса сверхпроводящих ускорителей и накопителя со встречными пучками тяжелых ионов NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility). Проект реализуется в рамках национального проекта Наука.

Главной экспериментальной установкой комплекса NICA является коллайдер [2]. Он сооружается в отдельном туннеле с дополнительными павильонами для детекторов и системы электронного охлаждения. Два кольца коллайдера имеют форму “стадиона” с периметром 503,04 метра. Они расположены одно над другим и расстояние между их медианными плоскостями составляет 0,32 м. Формирование орбиты, фокусировка пучков, сведение и разведение пучков в точках встречи осуществляется

сверхпроводящими дипольными и квадрупольными магнитами. Для компенсации погрешностей изготовления и установки этих магнитов используются комбинированные корректирующие магниты, каждый из которых включает в себя несколько типов мультипольных обмоток. Кольца коллайдера имеют 136 специальных магнитов-корректоров.

Корректирующий магнит должен воздействовать на пучок, циркулирующий в одном из колец коллайдера, при этом влияние его рассеянных полей на пучок во втором кольце должно быть минимально. Для решения этой задачи набор корректирующих обмоток размещается внутри железного ярма, толщина которого должна быть достаточной, чтобы замкнуть в нем обратные поля всех обмоток. Выбор толщины ярма осуществляется на основе численного моделирования полей, создаваемых обмотками, и определения величины поля в ярме. При правильном выборе толщины величина поля в ярме должна быть меньше, чем поле насыщения материала ярма. Численное моделирование проводится с помощью одного из специализированных пакетов программ, и осуществляется в два этапа: оценочный расчет проводится путем решения двумерной задачи, геометрия которой соответствует центральному сечению магнита, точный расчет проводится путем решения трехмерной задачи, по модели, геометрия которой максимально точно воспроизводит геометрию реального магнита.

Постановка задачи

Целями данной работы являются:

- освоение программного пакета Opera Simulation Software, в частности его модуля The Opera Static Electromagnetics, используемого для расчета магнито- и электростатических полей в трех измерениях;
- построение модели центрального сечения корректирующего магнита;
- построение 3-х мерной модели корректирующего магнита с использованием стандартной геометрии в Opera-3d;
- оптимизация 3-х мерной модели обмотки корректирующего магнита с помощью элементарных графических примитивов, доступных в Opera-3d;
- расчет главных гармоник магнитного поля для всех разработанных моделей;
- анализ полученных результатов.

Обзор литературы

Классификация корректирующих обмоток в данной работе осуществляется по номеру главной гармоники A_n или B_n разложения магнитного поля в ряд Фурье по азимутальным гармоническим функциям. Описание электромагнитного поля, а также его разложение в ряд Фурье по гармоническим функциям описывается во многих учебниках, например в книге Д. Бома “Квантовая теория” [3] или в книге И.Н. Мешкова «Электромагнитное поле: Электричество и магнетизм» [4].

Формула разложения магнитного поля на выделенном радиусе r_0 :

$$B(\varphi)|_{r=r_0} = A_0/2 + \sum_{n=1}^N A_n \cos(n\varphi + \varphi_0) + B_n \sin(n\varphi + \varphi_0) \quad (1.1)$$

Структура и функции системы коррекции магнитного поля в коллайдере NICA описаны в [5-7].

Система коррекции магнитного поля предназначена для:

- коррекции горизонтального и вертикального положений замкнутой орбиты обоих пучков и их сведения в точке встречи (дипольные обмотки с главными гармониками B_0, A_0);
- коррекции хроматичности магнитной структуры кольца (секступольные обмотки с главной гармоникой B_2);
- подавления X-Y- связи между движением частиц в поперечном направлении (косые квадрупольные обмотки с главной гармоникой A_1);
- коррекции влияния нелинейных полей и резонансов оптической структуры коллайдера (октупольные обмотки с главной гармоникой B_3).

Конструкция основных типов магнитов приведена в [8]. Описание геометрии корректирующих обмоток, используемых на ускорительном комплексе ОИЯИ, впервые было представлено в работе [9]. Данная геометрия мультипольных корректоров была использована и для оптической системы коллайдера NICA [10]. Ближайшим зарубежным аналогом является конструкция и технология изготовления корректирующих магнитов коллайдера RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider, Брукхэйвенская лаборатория, США) [11].

Технология изготовления корректирующих магнитов коллайдера NICA заключается в следующем. Плоская однослойная обмотка наносится на гибкую полимерную основу (Рис. 1, 2).

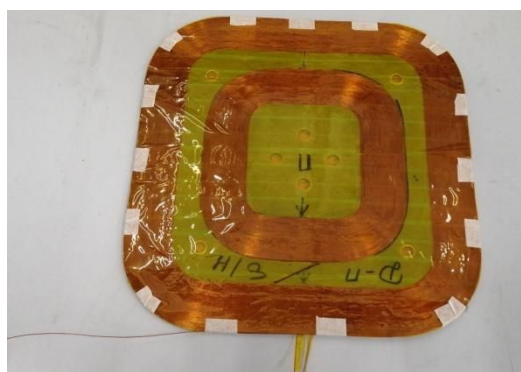


Рис.1 Дипольная обмотка.



Рис.2 Квадрупольные обмотки.

Обмотки наклеиваются на охлаждающий цилиндр слой за слоем. Вся конструкция помещается в железное ярмо, окружающее обмотки. Основные части корректора представлены на Рис.3.

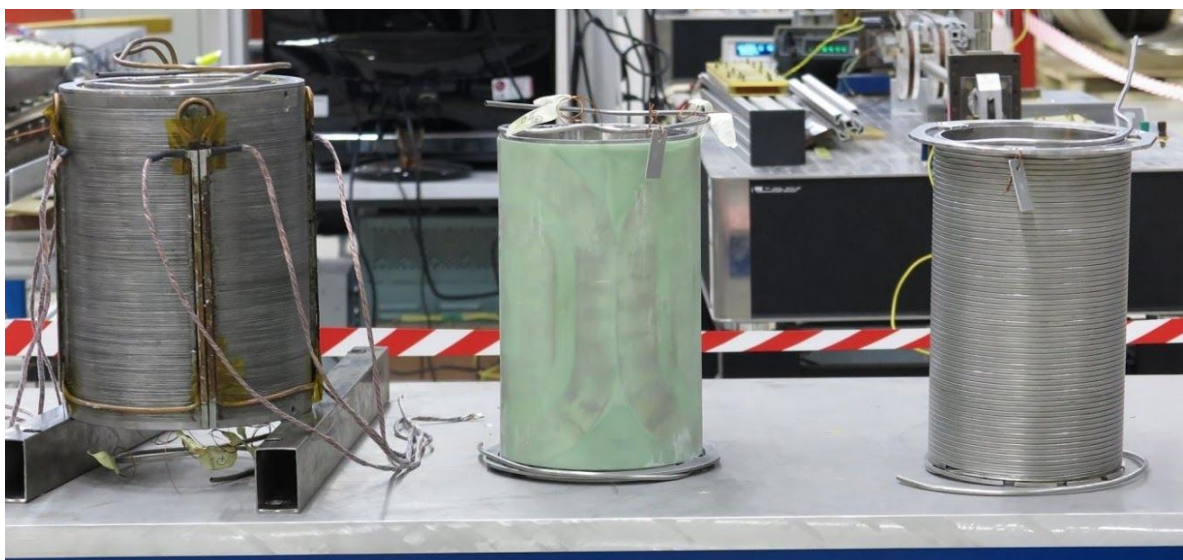


Рис.3. Элементы конструкции корректирующего магнита. Слева направо: железное ярмо; охлаждающий цилиндр с обмотками; охлаждающий цилиндр без обмоток.

Для моделирования магнитных полей корректирующих магнитов был выбран программный пакет Opera Simulation Software, в котором предусмотрено построение геометрии модели, задание граничных условий, а

также анализ полученных результатов. Пакет детально описан в [12, 13], и структурно может быть разбит на:

1. Opera Manager - центр навигации и управления для всех компонентов программы Opera;
2. Модуль Opera-2d, который позволяет моделировать и анализировать электромагнитные поля при двумерной геометрии;
3. Модуль Opera-3d, который является пре- и постпроцессором для обработки и анализа электромагнитных полей.

Все программы используют метод конечных элементов для решения частных дифференциальных уравнений, которые описывают поведение полей. Такие уравнения включают:

- уравнение Пуассона;
- уравнение Гельмгольца;
- уравнение диффузии.

Решение этих уравнений является неотъемлемой частью моделирования в следующих областях:

- Магнитостатика
- Электростатика
- Изменяемые во времени магнитных поля (низкочастотные)
- Изменяемые во времени электрические поля (низкочастотные)

Возможность моделировать нелинейные материалы имеет важное значение для этих областей.

Глава 1. Моделирование распределения магнитного поля в центральном сечении корректирующего магнита для Коллайдера

1.1 Система навигации The Opera Manager

The Opera Manager - центр навигации и управления для всех компонент программ Opera . Opera Manager обеспечивает отображение браузера файлов в стиле Windows и предоставляет доступ ко всем программам анализа Opera, глобальным параметрам, средствам лицензирования, сериям работ и документации.

Главное окно программы (Рис. 4) состоит из:

- рабочей среды, позволяющей открывать несколько окон из папок и иметь доступ к содержимому в этих папках;
- очереди работ, которая управляет всеми запущенными анализами и оптимизатором.

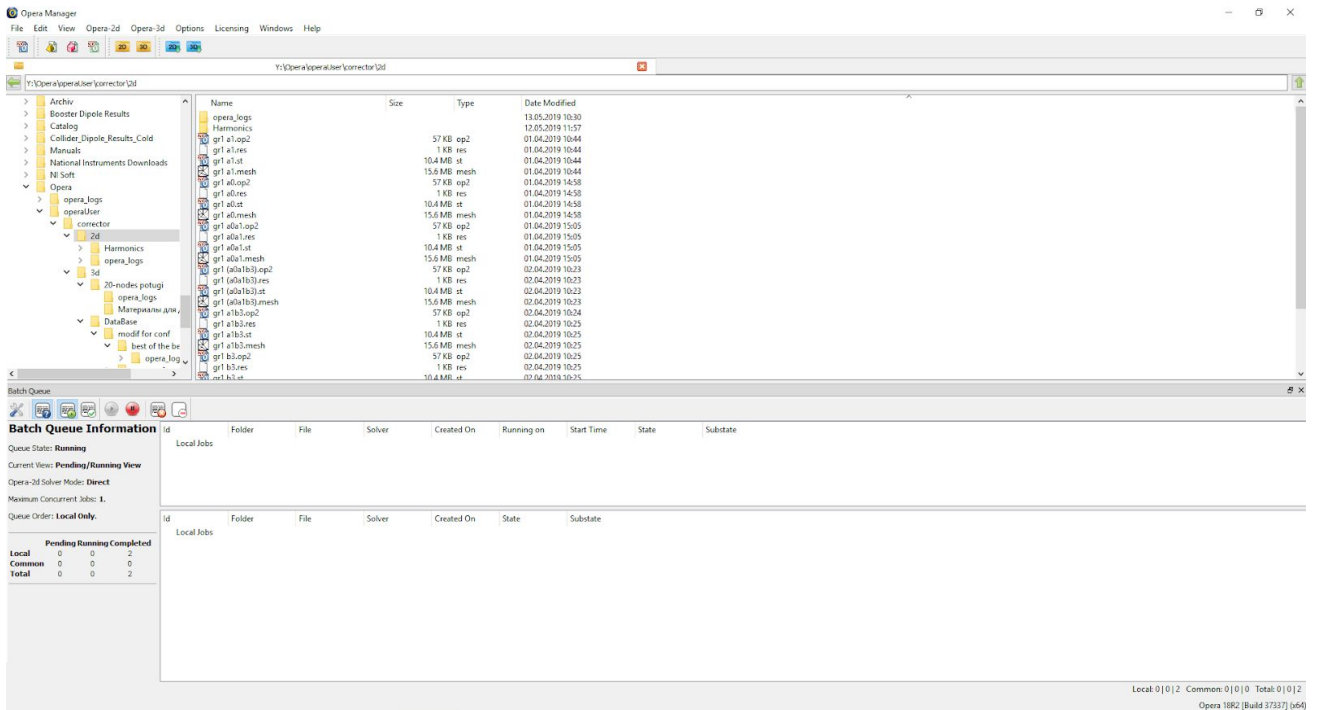


Рис.4 Главное окно The Opera Manager

1.2 Модуль The Opera-2d

Opera-2d представляет собой набор программ для 2-мерного анализа электромагнитного поля. В частности, в нее входят модули для стрессового и термического анализа, которые позволяют проводить мультифизический анализ.

Opera Simulation Software использует метод конечных элементов. Его суть заключается в том, что область, в которой выполняется поиск дифференциальных решений делится на конечное количество поддоменов (узлов, элементов). Так как анализ занимает много памяти, перед его выполнением ввод данных осуществляется с помощью мощного интерактивного препроцессора.

Графическое взаимодействие внутри препроцессора приводит к тому, что пространство модели становится согласованным пространством из

набора элементов (треугольников). Физическая модель может описываться в декартовых или полярных цилиндрических координатах.

После подготовки модели решение будет рассчитано с помощью соответствующего аналитического модуля.

Существует несколько настроек для анализа различных типов электромагнитных состояний, например такие как статический, фиксированный. Программа анализа будет итеративно определять правильное решение, включая нелинейные эффекты, при моделировании.

Результат может быть рассмотрен с помощью интерактивного постпроцессора. Для исследования имеется множество системных переменных, включая потенциалы, потоки, поля, силы, температуру. Применение пользовательских переменных позволяет адаптировать результаты решений для конкретного приложения.

1.3 Построение центрального сечения корректирующего магнита в Opera 2d

Для моделирования центрального сечения корректирующего магнита (Рис. 5) была предложена система с разделением областей корректирующего магнита на:

- внешний воздух, на границе которого было задано касательное магнитное поле;
- железное ярмо, для которого известна кривая намагничивания;
- прямые октупольные обмотки, которые были построены на заданном радиусе и имели плотность тока $j = I * n/S = 2.5E + 8 \text{ A/m}^2$;
- косые квадрупольные обмотки, которые были построены на заданном радиусе и имели плотность тока $j = I * n/S = 3.3E + 8 \text{ A/m}^2$;

- косые дипольные обмотки, которые были построены на заданном радиусе и имели плотность тока $j = I * n/S = 1.9E + 8 \text{ A/m}^2$;
- вакуум внутри корректора.

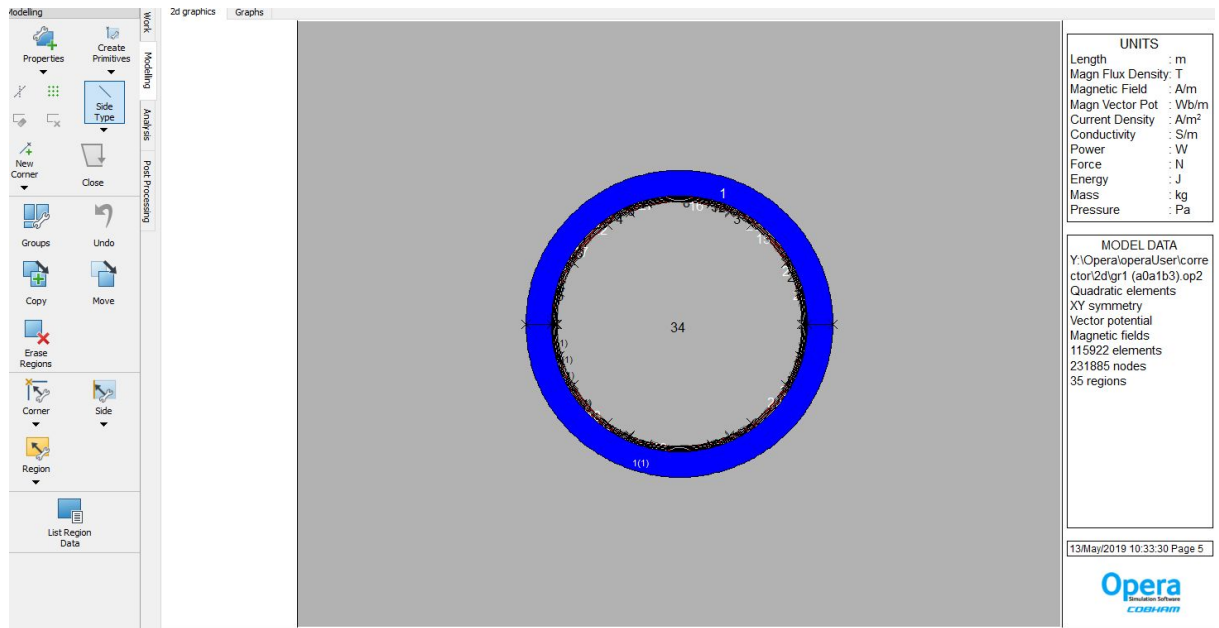


Рис.5 Центральное сечение корректирующего магнита.

1.4 Полученные результаты

Для проверки правильности моделирования центрального сечения включались поочередно обмотки, проверялась симметричность распределения магнитного поля в железе, а также анализировалась корректность величины магнитного поля при включенной обмотке.

Все гармоники были подсчитаны для касательной компоненты магнитного поля (B_x).

Распределение магнитного поля в железе при включенной косо́й дипольной обмотке, а также максимальная величина магнитного поля 0.82 Тл показано на рисунке 6.

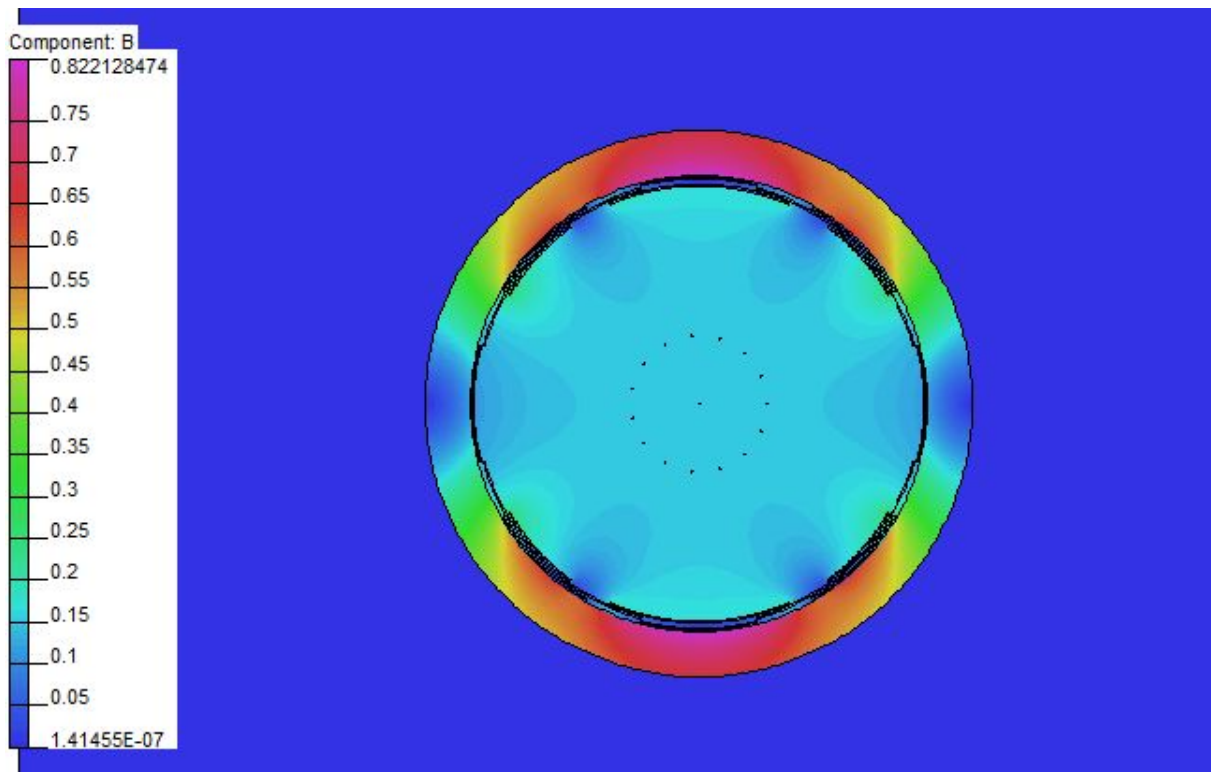


Рис.6 Величина магнитного поля в железном ярме для косоого диполя.

Касательная гармоника магнитного поля для косоого диполя выделена цветом в таблице 1.

Табл. 1 Гармоники косоого диполя.

Порядок	Синус-гармоника	Косинус-гармоника	Амплитуда	Фаза
n	A_n	B_n		
0	0	0.15	0.15	0
1	2.14E-09	-1.55E-08	1.56E-08	-172.13
2	1.64E-08	-8.31E-09	1.84E-08	-116.89
3	2.24E-08	-2.15E-09	2.25E-08	-95.48
4	1.44E-08	3.11E-08	3.43E-08	-24.83

5	3.24E-09	2.96E-07	2.96E-07	-0.63
---	----------	----------	----------	-------

Распределение магнитного поля при включении косоугольного магнитного ядра, а также его максимальная величина 0.07 Тл показаны на рисунке 7.

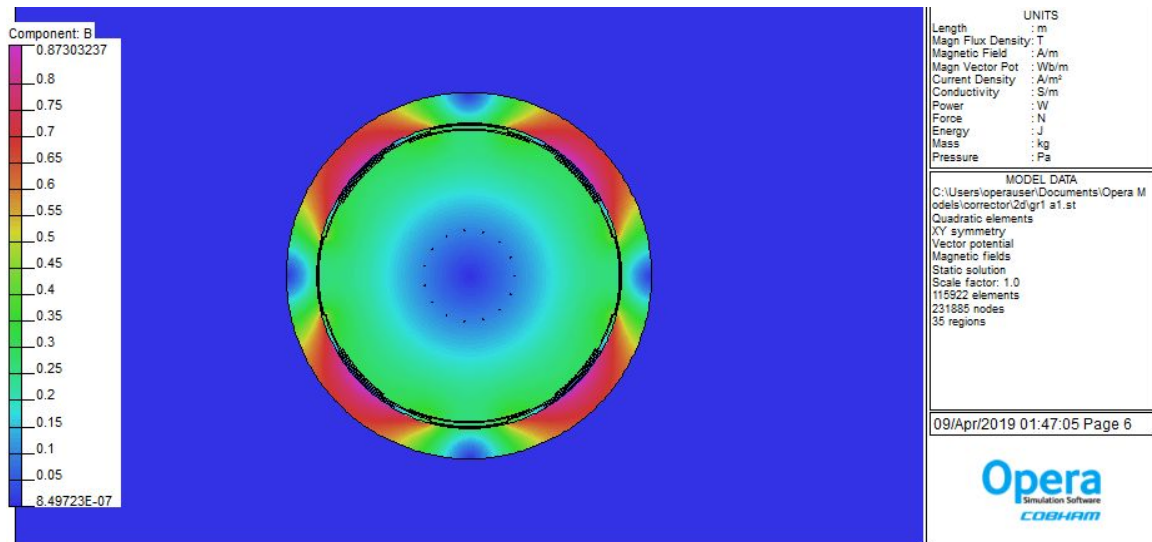


Рис.7 Величина магнитного поля в железном ярме для косоугольного магнитного ядра.

Касательная гармоника магнитного поля для косоугольного магнитного ядра выделена цветом в таблице 2.

Табл. 2 Гармоники косоугольного магнитного ядра.

Порядок	Синус-гармоника	Косинус-гармоника	Амплитуда	Фаза
n	A_n	B_n		
0	0	2.55E-06	2.55E-06	0
1	1.66E-09	0.10	0.10	-9.70E-07
2	1.52E-07	1.45E-07	2.10E-07	-46.40
3	4.40E-08	-7.88E-10	4.40E-08	-91.03
4	4.65E-09	-4.32E-09	6.34E-09	-132.89
5	1.78E-09	-8.97E-10	1.99E-09	-116.74

Распределение магнитного поля при включении прямого октуполя, а также его максимальная величина 0.39 Тл показаны на рисунке 8.

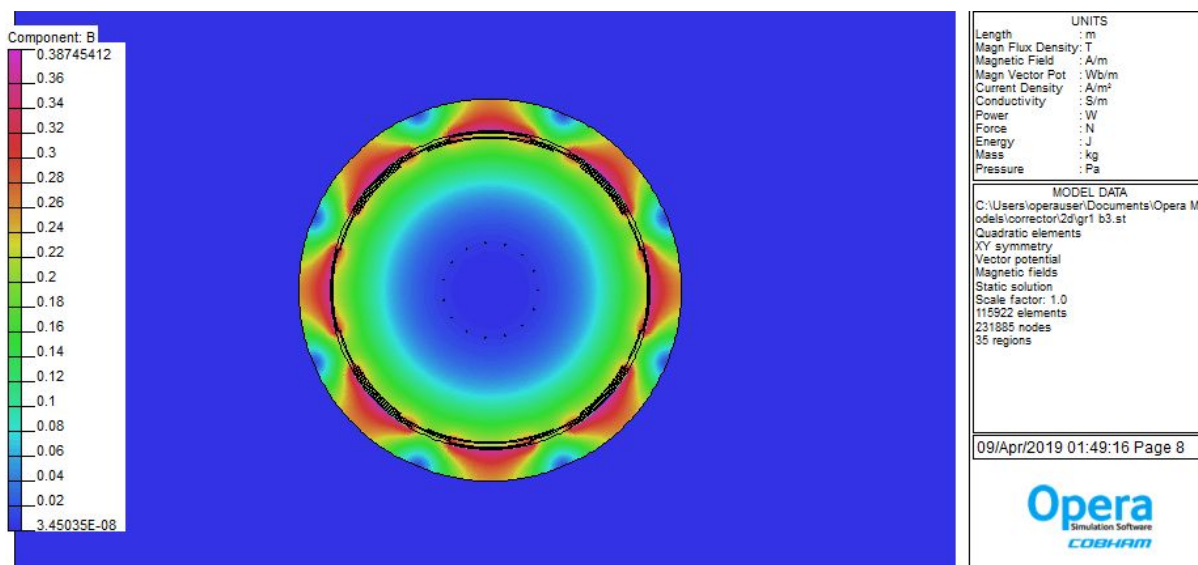


Рис.8 Величина магнитного поля в железном ярме для прямого октуполя.

Касательная гармоника магнитного поля для прямого октуполя выделена цветом в таблице 3.

Табл.3 Гармоники прямого октуполя.

Порядок	Синус-гармоника	Косинус-гармоника	Амплитуда	Фаза
n	A_n	B_n		
0	0	5.97E-07	5.97E-07	0
1	1.03E-06	6.38E-07	1.21E-06	-58.28
2	-2.96E-07	9.74E-07	1.02E-06	16.90
3	-3.82E-07	6.85E-03	6.85E-03	3.20E-03
4	-1.94E-07	-1.31E-07	2.34E-07	124.02
5	8.94E-09	2.31E-07	2.31E-07	-2.22

Как видно из представленных выше примеров, Opera Simulation Software строит корректную магнитостатику для всех необходимых нам обмоток в отдельности.

Далее был получен результат, когда включены все обмотки (Рис. 9).

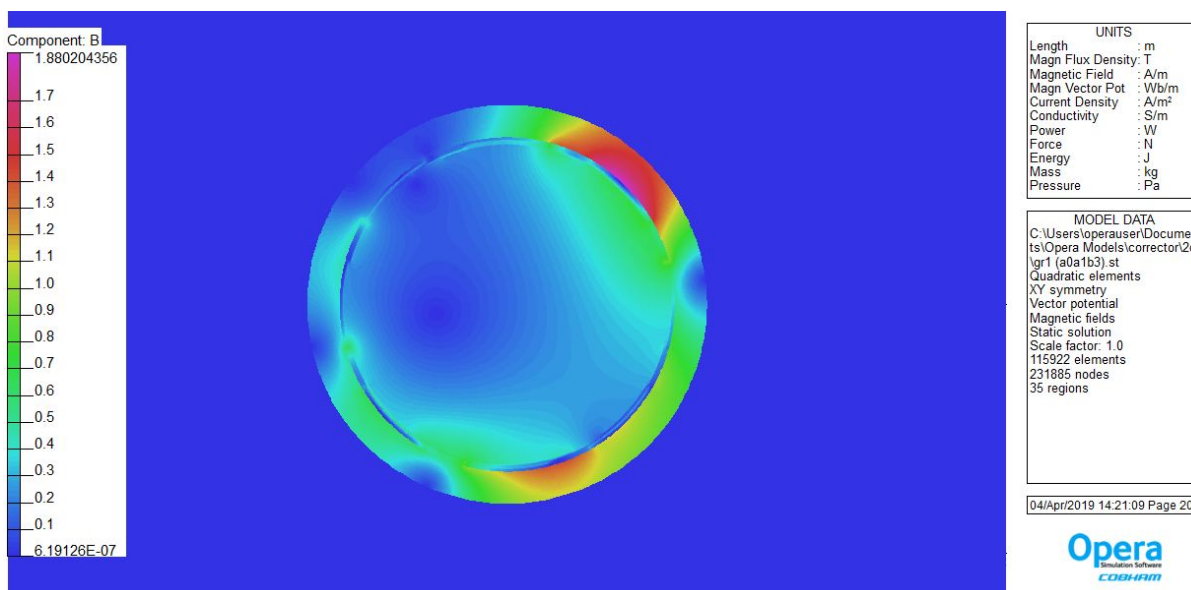


Рис.9 Распределение магнитного поля в железном ярме, когда работают все типы обмоток.

В таблице 4 показаны гармоники B_0 , B_1 , A_3 для косоугольного диполя, косоугольного квадрупольного и прямого октапольного соответственно.

Табл.4 гармоники всех обмоток.

Порядок	Синус-гармоника	Косинус-гармоник а	Амплитуда	Фаза
n	A_n	B_n		
0	0	0.15	0.15	0
1	-8.27E-07	0.10	0.10	4.83E-04
2	2.65E-07	1.03E-07	2.84E-07	-68.80
3	6.85E-03	1.96E-07	6.85E-03	-90.00
4	-2.00E-07	-1.76E-07	2.66E-07	131.28

5	2.04E-08	1.70E-07	1.71E-07	-6.85
---	----------	----------	----------	-------

Для центрального сечения корректирующего магнита самое большое значение магнитного поля в ярме наблюдается в I и IV квадрантах. Это объясняется тем, что направление токов в I квадранте для всех обмоток совпадает, а в IV квадранте направление токов совпадает для косых диполя и квадруполья.

Однако, насыщения железного ярма не происходит ($\mu \neq 1$) и магнитное поле сохраняется внутри корректора.

Глава 2. 3-х мерное моделирование корректирующего магнита коллайдера

Для построения модели корректирующего магнита была использована программа Opera 3d, в которой реализована возможность построения 3-х мерной геометрии.

В данной главе будет рассмотрено построение корректирующего магнита с использованием геометрии обмоток из стандартной библиотеки.

2.1 Модуль The Opera 3d.

Opera 3d - это система пре- и постобработки электромагнитных, термических и стресс-решений [13].

Метод конечных элементов является основой для решений в данном модуле программы. Данная широко применяемая методика решения уравнений в частных производных требует специальных усовершенствований, чтобы сделать ее применимой к вычислениям электромагнитных полей. Доступ к этим функциям осуществляется с помощью геометрического *моделлера* и *препроцессора*. Эти программы обеспечивают условия для создания конечно-элементных моделей, спецификации сложной геометрии проводника, определения характеристики материала (включая нелинейные, анизотропные и гистерезисные материалы) и графические дисплеи для взаимодействия с данными и их исследования [13, стр. 107].

Аналогичным образом, постпроцессор предоставляет средства, необходимые для расчета электромагнитных, температурных и смещающих полей, отображения их в виде графиков и контурных карт.

Постпроцессор может также вычислять и показывать различные вычисленные величины, а также строит траектории частиц, проходящих сквозь магнитное поле.

2.2 Построение геометрии в моделлере

Для задания геометрии обмоток корректирующего магнита при построении его модели использовались проводники, которые можно применять, используя стандартную библиотеку проводников в Opera 3d. Их геометрия приближена к геометрии реального корректирующего магнита. Различия составляют некоторые участки, которые в Opera 3d представлены скругленными, а в реальном корректоре эти же участки прямые.

Также внутри корректора на радиусе 30 мм необходимо сделать более мелкое разбиение - помимо распределения в ярме также интерес составляет в распределении поля вдоль оси цилиндра.

Корректор (Рис. 10) был разбит на несколько областей так же, как было показано в 1.3.

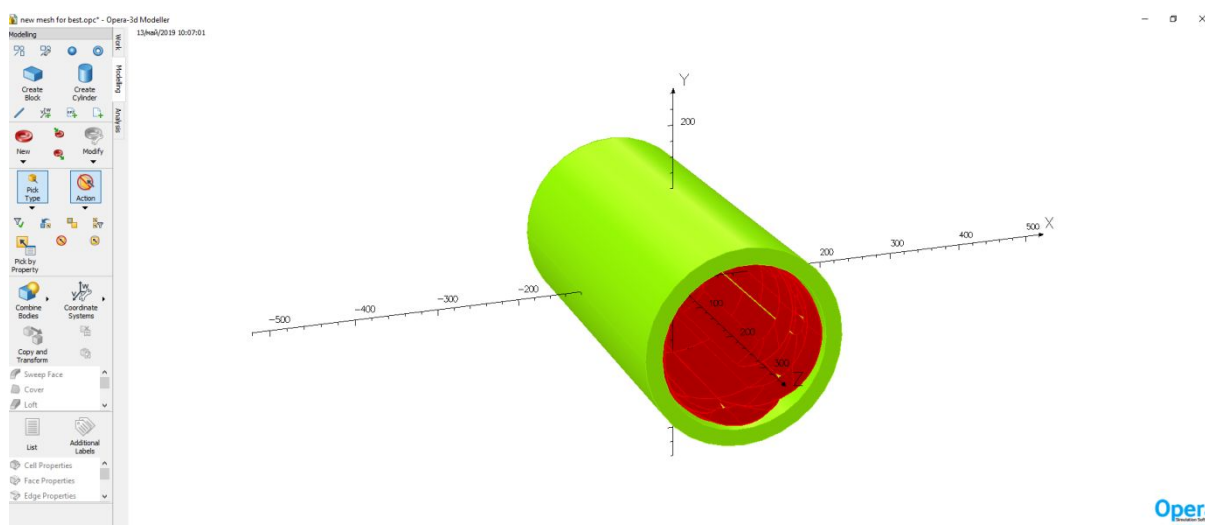


Рис.10 Геометрия корректирующего магнита

2.3 Полученные результаты

Так как центральное сечение, рассмотренное в предыдущей главе было построено корректно в условиях данной программы, то для полного корректора необходимо получить ту же картину и те же величины гармоник для каждой из обмоток.

На рисунке 11 представлено распределение магнитного поля в корректоре, когда обмотки задаются с помощью стандартной библиотеки проводников, которая доступна в Opera-3d.

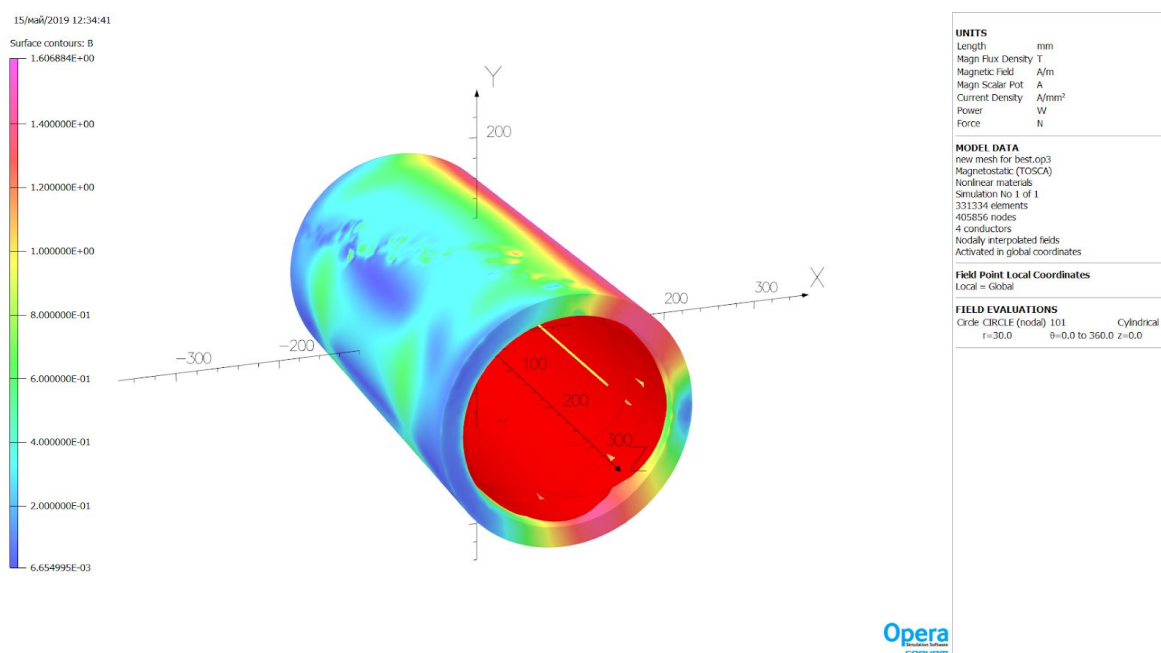


Рис. 11 Распределение магнитного поля в железном ядре

На рисунке 12 показано распределение магнитного поля в центральном сечении.

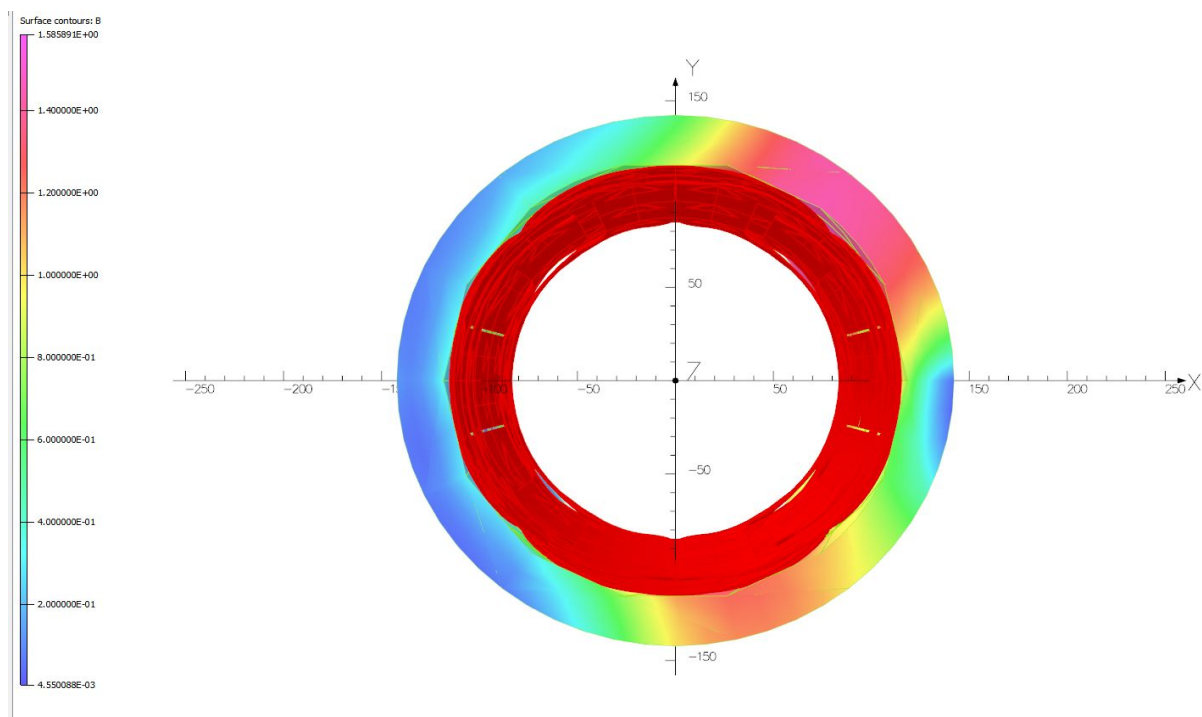


Рис.12 Распределение магнитного поля в центральном сечении.

В таблице 5 показаны гармоники B_0 , B_1 , A_3 для косоугольного диполя, косоугольного квадрупольного и прямого октупольного, соответственно.

Табл.5 Гармоники для всех обмоток.

Порядок	Синус-гармоника	Косинус-гармоника	Амплитуда	Фаза
n	A_n	B_n		
0	0.0	0.31	0.31	0.0
1	1.01E-04	0.10	0.10	-0.06
2	-7.87E-04	-1.74E-03	1.91E-03	155.63
3	6.57E-03	1.42E-03	6.72E-03	-77.80
4	-1.25E-04	-7.57E-04	7.67E-04	170.61
5	3.52E-04	6.52E-04	7.41E-04	-28.34

Максимальная величина магнитного поля и его распределение в железном ярме различаются от тех же значений, приведенных в главе 2: величина главной гармоники для косоугольного диполя отличается более чем в 2 раза от значения, полученного в расчете центрального сечения.

Следовательно, использование проводников из стандартной библиотеки не обеспечивает требуемой точности расчета распределения магнитного поля в реальном корректирующем магните. В Opera 3d существуют элементарные графические примитивы для построения проводников любой геометрии. В следующей главе будет рассмотрен способ задания геометрии, которая используется в корректирующих магнитах для коллайдера.

Глава 3. Оптимизированная модель обмоток корректирующего магнита

Обмотки корректирующих магнитов для коллайдера состоят из 4 прямых участков и 4 скруглений, которые соединяют прямые участки вместе [10]. Чтобы их корректно построить в Opera-3d, существуют элементарные графические примитивы, из которых внутри программы можно моделировать проводники любой сколь угодно сложной геометрии. Элементарные графические примитивы представляют собой кубики с 20 узлами. В контексте Opera-3d они называются двадцатинодными кубами [12, стр. 386].

Обмотка для корректирующих магнитов, которая находится на заданном радиусе цилиндра, рассматривается в локальной системе координат, а затем переводится в координаты глобальной СК.

Двадцатинодные кубы в Opera-3d задаются в декартовой системе координат, где один нод (точка) задается тремя координатами (x, y, z) . Так как обмотка находится на радиусе цилиндра, который известен, а также известна длина корректирующего магнита и радиус скругления, то можно найти координаты в локальной СК (u, v) , а затем перейти в координаты глобальной СК (x, y, z) , в которой описывается двадцатинодный куб.

Для скорости счета было предложено построить модель обмотки в стороннем графическом приложении SolidWorks, брать координаты U, V , а затем, используя формулы перехода из локальной СК (u, v) в глобальную СК (x, y, z) , рассчитывать координаты узлов куба.

Формулы перехода из цилиндрической СК в декартову СК представлены ниже

$$\begin{aligned} X &= R_0 * \cos(\pi/2 - (U/R_0)) \\ Y &= R_0 * \sin(\pi/2 - (U/R_0)) \\ Z &= 155 - V \end{aligned} \quad (3.1)$$

Здесь R_0 - радиус цилиндра, на котором находится узел; $\pi/2$ добавляется из-за выбора места локальной СК; 155 - значение половины длины корректирующего магнита.

3.1 Полученные координаты для моделирования

В таблицах 6-8 представлены значения для прямого участка дипольной обмотки; поворота на 30 градусов для квадрупольной обмотки; поворота на 60 градусов для октупольной обмотки корректирующего магнита.

Табл. 6 Координаты прямого участка дипольной обмотки.

X	Y	Z
5.92972E-15	96.8	77.5
5.88378E-15	96.05	77.5
39.06401251	87.74739555	77.5
39.081855	88.55985891	77.5
5.92972E-15	96.8	0
5.88378E-15	96.05	0
39.06401251	87.74739555	0
39.081855	88.55985891	0
5.90675E-15	96.425	77.5

19.96828932	93.9514232	77.5
39.07298519	88.15374327	77.5
19.97054904	94.71756527	77.5
5.92972E-15	96.8	38.75
5.88378E-15	96.05	38.75
39.06401251	87.74739555	38.75
39.081855	88.55985891	38.75
5.90675E-15	96.425	0
19.96828932	93.9514232	0
39.07298519	88.15374327	0
19.97054904	94.71756527	0

Табл. 7 Координаты участка поворота на 30 градусов для квадрупольной обмотки.

X	Y	Z
-63.5559	75.05577	120.7542
-63.0239	74.52351	120.7542
-24.0506	94.59032	95.22777
-24.6251	95.21726	95.22777
-69.544	69.54395	89
-69.0136	69.01362	89
-25.3604	94.24759	89
-25.9336	94.86924	89
-63.2899	74.78965	120.7542
-44.6784	86.77327	107.991

-24.3379	94.90398	95.22777
-45.2283	87.33343	107.991
-68.0213	71.03394	105.6336
-67.4909	70.50349	105.6336
-25.0294	94.33604	92.18776
-25.6029	94.95901	92.18776
-69.2788	69.27879	89
-48.8447	84.49826	89
-25.6471	94.5586	89
-49.3896	85.04934	89

Табл. 8 Координаты участка поворота на 60 градусов для октупольной обмотки.

X	Y	Z
20.70342757	97.73115	150.9122
20.70113749	96.96487	150.9122
33.2608809	93.40469	128.2846
33.27066264	94.19699	128.2846
5.512307995	99.7478	136.7163
5.512265466	98.99665	136.7163
27.67627811	95.20896	123.7064
27.68183011	95.98816	123.7064
20.70228898	97.34804	150.9122
27.03966661	95.39171	139.5984
33.2657992	93.80092	128.2846

27.04483644	96.16957	139.5984
11.10693145	99.28064	143.8701
11.10658224	98.52597	143.8701
30.38848822	94.37829	126.6636
30.39588826	95.16354	126.6636
5.512286851	99.37223	136.7163
16.70199074	97.73314	130.2113
27.67906971	95.59861	123.7064
16.70318597	98.49372	130.2113

3.2 Построение моделей

Геометрия железного ядра, вакуума внутри корректирующего магнита и наружного воздуха не изменилась в ходе оптимизация моделирования. Однако, геометрия обмоток (Рис. 13-15) стала схожей с геометрией реальных обмоток корректирующих магнитов

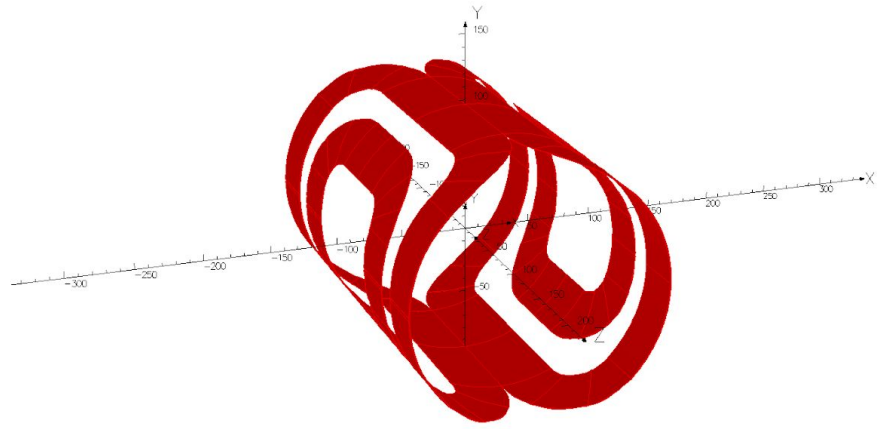
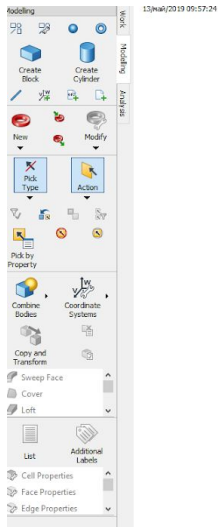


Рис.13 Дипольная обмотка.

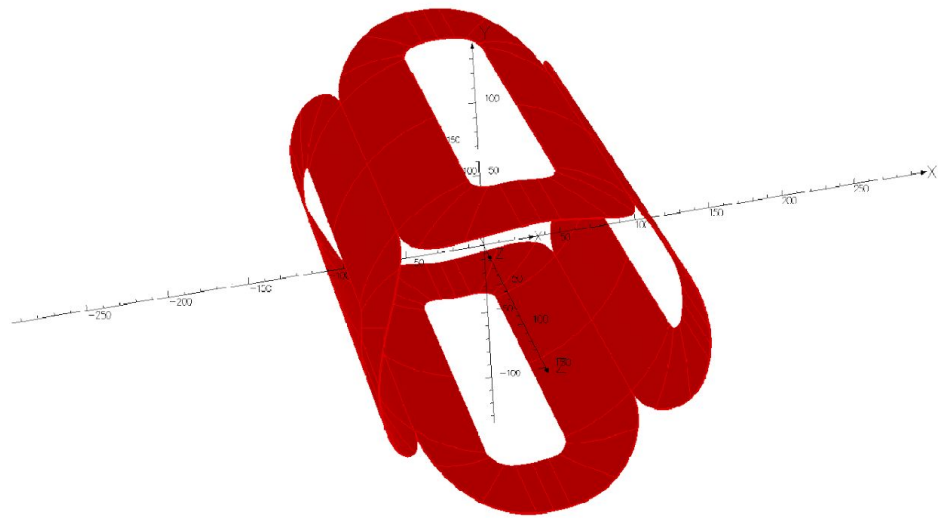
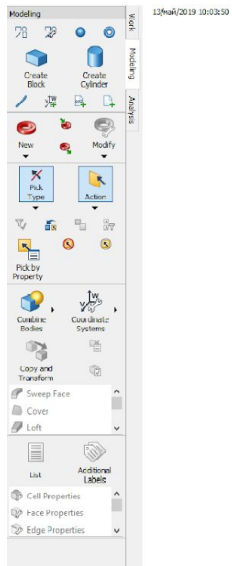


Рис.14 Квадрупольная обмотка.

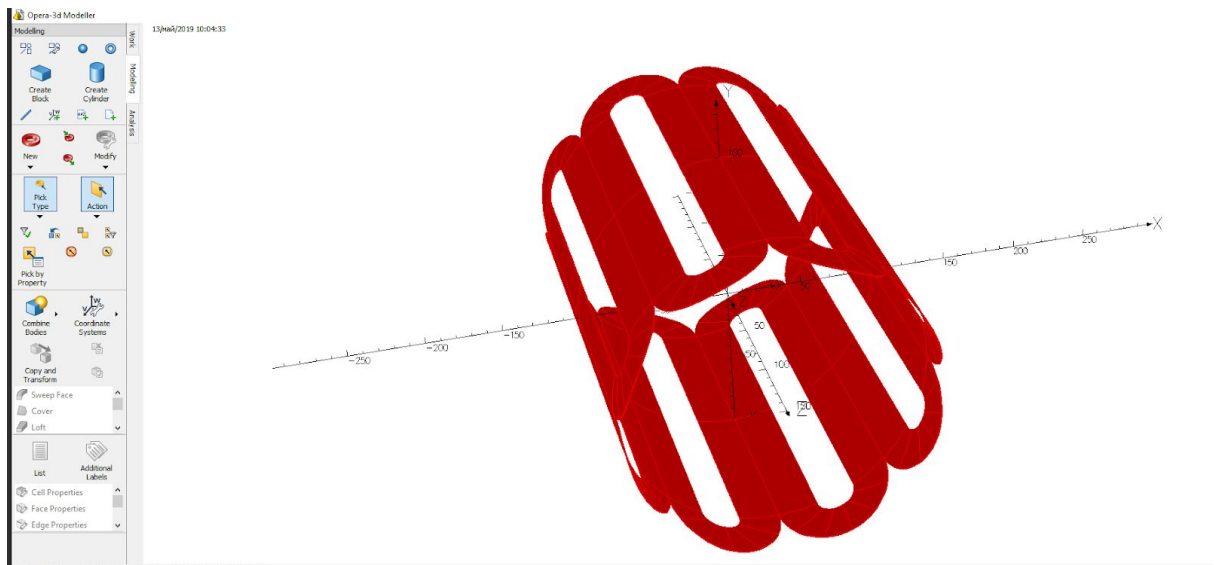


Рис.15 Окупольная обмотка.

3.3 Полученные результаты

На рисунке 16 представлены значения магнитного поля, а также его распределение в корректирующем магните.

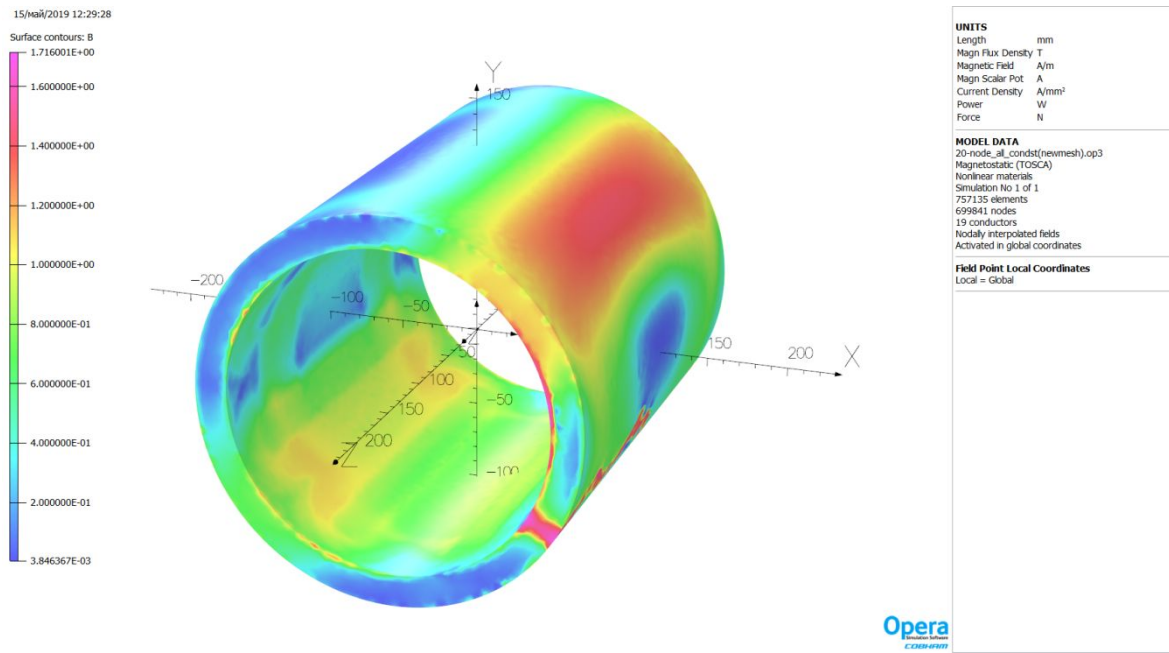


Рис.16 Распределение магнитного поля в корректирующем магните.

Также получены значения гармоник (Таб. 9) B_0 , B_1 , A_3 для косоого диполя, косоого квадруполя и прямоого октуполя, соответственно.

Табл. 9 Главные гармоники для корректирующего магнита.

Порядок	Синус-гармоника	Косинус-гармоника	Амплитуда	Фаза
n	A_n	B_n		
0	0	0.16	0.16	0
1	2.30E-05	0.10	0.10	-0.01
2	1.07E-04	-3.01E-03	3.01E-03	-2.03
3	6.71E-03	-5.76E-05	6.71E-03	-90.50
4	4.66E-05	-2.36E-06	4.66E-05	-92.91
5	2.77E-05	2.19E-04	2.21E-04	-7.19
6	8.09E-05	-1.01E-04	1.30E-04	-141.41
7	2.49E-04	-3.06E-05	2.51E-04	-97.00

8	-8.62E-05	-7.04E-05	1.11E-04	129.26
9	-5.43E-05	-1.56E-04	1.65E-04	160.83

Сравнение таблиц 9 и 5 из раздела 2.3 показывает, что главная гармоника для дипольного магнита уменьшилась в 2 раза. Это связано с тем, что реальная геометрия обмотки и геометрия обмотки из стандартной библиотеки Opera-3d сильно различаются в прямых участках на краях.

Гармоники для квадрупольного и октупольного магнитов при геометриях описанных в Главе 2 и Главе 3 практически равны.

Однако, сравнение с гармониками для центрального сечения показывает, что значения различаются во втором знаке после запятой. Это может говорить о некачественной сетке, а также о необходимости более мелкого разбиения участков скруглений.

Выводы

В ходе выполнения данной работы был изучен программный пакет Opera Simulation Software.

С использованием модуля Opera 2d рассчитано распределение магнитного поля в железном ярме в центральном сечении корректирующего магнита коллайдера NICA.

Для учета влияния краевых эффектов, возникающих в корректирующем магните при данных типах обмоток, были проведены расчеты в 3-х мерной модели.

Было использовано два способа построения геометрии обмоток в 3-х мерной модели. Первый способ заключается в использовании обмоток, которые находятся в стандартной библиотеки проводников Opera Simulation Software. Второй - в моделировании геометрии обмоток с использованием элементарных графических примитивов. Была установлена целесообразность данной оптимизации для косой дипольной обмотки, распределение поля в которой отличалось незначительно от распределения поля, полученного при построении центрального сечения корректора.

Полученные расчеты полезны при проектировании корректирующих магнитов, когда на стадии производства имеется возможность построить модель и проверить ее на отсутствие насыщения железа магнитным полем, при котором теряется эффект экранирования обратных потоков.

Заключение

В ходе данной работы для корректирующих магнитов коллайдера NICA:

- построена модель центрального сечения корректирующего магнита;
- получены значения гармоник для центрального сечения;
- построена 3-х мерная модель корректирующего магнита с использованием обмотки заданной по умолчанию в Opera-3d;
- посчитаны значения гармоник для 3-х мерной модели;
- оптимизирована объемная модель обмотки корректирующего магнита с помощью специальных элементов : *20-ти-нодных* кубов;
- посчитаны гармоники для оптимизированной 3-х мерной модели корректора;
- проведен анализ результатов.

Анализ показал, что при использовании в расчетах геометрии обмоток из стандартного набора Opera 3d количественно величины главных гармоник для дипольной обмотки различаются в два раза. Данная разница недопустима, что вызвало необходимость в оптимизации модели. Результаты расчетов для оптимизированной модели различаются с результатами расчета поля в центральном сечении на 6%. При выбранной конструкции магнитов, поле в железном ярме не превышает 1.8 Тл, что достаточно далеко от насыщения.

Полученные результаты представлены на 23-ей Международной научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ AYSS-2019 [10].

Список литературы

1. Сайт Объединенного института ядерных исследований
<http://www.jinr.ru/about/>
2. Коллайдер комплекса NICA. <http://nica.jinr.ru/ru/projects/collider.php>
3. Бом Д. Квантовая теория. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1965г.
4. Мешков И. Н. Электромагнитное поле: Электричество и магнетизм. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1987. – Т. 1.
5. S.Kostromin, O.Kozlov, I.Meshkov, et. al., COMPENSATION OF NONLINEARITIES IN NICA COLLIDER OPTICS, Proceedings of RuPAC-2010, Protvino, Russia, pp. 35-37.
6. Kozlov O. et al. Collider of the NICA accelerator complex: optical structure and beam dynamics //Proc. of Russian Particle Accelerator Conf., St. Petersburg, 2012. pp. 278-280.
7. O. Kozlov, A. Butenko, S. Kostromin, et. al., CORRECTION OF THE MAGNETIC FIELD IN THE NICA COLLIDER, Proc. of RUPAC2018, Protvino, Russia, pp. 149-151.
8. Khodzhibagiyan H. G. et al. Superconducting magnets for the NICA accelerator collider complex //IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, T. 24, №. 3, pp. 1-4.
9. Балдин А.М., Агапов Н.Н., Аверичев С.А. и др. Сверхпроводящие мультипольные корректирующие магниты для ускорителя нуклотрон. Препринт ОИЯИ, Дубна: 1995.

10. Костромин С.А., Козлов О.С. Техническое задание на разработку и создание мультиполюсных корректирующих магнитов коллайдера NICA. Дубна: 2018.
11. A. Morgillo, J. Escallier, G. Ganetis, et. al., SUPERCONDUCTING 8 CM CORRECTOR MAGNETS FOR THE RELATIVISTIC HEAVY ION COLLIDER (RHIC), Proceedings of sixteenth biennial Particle Accelerator Conference, May 1–5, 1995, Dallas, USA, p. 1393
12. Сайт Opera Simulation Software. <https://operafea.com>
13. Opera Manager User Guide/ Под ред. Cobham Technical Services Network House. Kidlington:Langford Locks, 2016.