

## Тёплые дипольные магниты каналов транспортировки протонного синхротрона

*А.А. Малышев\*, Е.Д. Цыплаков, Т.В. Кулевой, А.В. Козлов*

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия*

*\*hakko97@yandex.ru*

**Аннотация.** Представленное исследование посвящено разработке физических моделей дипольных магнитов для каналов транспортировки протонных пучков низких и высоких энергий в синхротроне и включает в себя подробные результаты моделирования магнитного поля в среде CST Studio. В работе рассматривается несколько типов магнитов: один из них разработан для бустерного кольца, а другой для канала транспортировки высокоэнергетического пучка в основном кольце. Процесс электромагнитного расчёта выполнялся с соблюдением приемлемой технологической точности, предусматривающей возможность дальнейшего изготовления магнита. Для всех конструкций была получена область хорошего поля в рабочей области, удовлетворяющая требуемому допуску на неоднородность поля.

**Ключевые слова:** синхротронный комплекс, дипольный магнит, физическая модель, электромагнитный расчёт.

### 1. Введение

Синхротронные комплексы широко востребованы в области фундаментальной физики, для проведения исследований, связанных с радиационным воздействием на различные материалы пучками с энергией в диапазоне нескольких десятков ГэВ [1], для задач лучевой терапии – облучения опухолей протонными пучками высоких энергий (порядка нескольких МэВ). Снабжение транспортирующих каналов синхротрона магнитными элементами необходимо для удержания поперечного размера протонного пучка, отклонения его на требуемые углы магнитными полями. В зависимости от технических условий: значений рабочих полей, ограничений по габаритным размерам или предельным параметрам систем электропитания используются дипольные магниты из магнитомягкого железа с различной конфигурацией ярма и катушки, обеспечивающие заданную траекторию отклонения частицы с фиксированной магнитной жёсткостью. В связи с технологическими особенностями и ограничениями, которые могут возникать на этапе производства поворотных магнитов принято проводить их предварительное физическое моделирование [2] на основе аналитических данных с помощью специальных программных пакетов, таких как CST EM Studio, с возможностью визуализации магнитных полей в расчётной области, которое даёт представление о распределении индукции в ключевых областях магнитопровода, а также позволяет создавать и импортировать карты поля (field map), которые необходимы для последующего моделирования динамики пучка [3] в каналах.

### 2. Особенности инструментов моделирования

Используемая среда моделирования CST Studio обеспечивает возможность гибкой параметризации ключевых элементов дипольного магнита, позволяя задавать его конфигурацию посредством математических выражений и регулировать такие ключевые параметры, как радиус и угол отклонения, межполюсный и технологические зазоры, габариты медной катушки и магнитопровода. Программа использует сеточные методы конечных элементов и за счёт процедуры сшивки полей позволяет получить непрерывные распределения индукции или напряженности в элементарных объёмах. За счёт задания граничных условий на краях рабочей области и регулируемой густоты расчётной сетки возможно получить трёхмерную картину поля в ключевых участках конструкции, построить графические зависимости и импортировать полученные значения в пакеты моделирования динамики пучка.

### 3. Назначение и конструкция дипольных магнитов

На Рис. 1 представлена модель С-образного дипольного магнита [4], расположенного в кольце бустерного синхротрона с выходной энергией несколько ГэВ, а на Рис. 2 – распределение поля в поперечном сечении магнитопровода. В качестве материала магнитопровода во всех рассматриваемых физических моделях выбрано доступная на рынке магнитомягкая сталь НЛМК марки NV30S-110 с предельной индукцией 2.0 Т, соответствующей значению напряженности магнитного поля 7000 А/м. На Рис. 3 показано распределение поперечной компоненты магнитного поля, полученное вдоль траектории отклоняемого пучка (Рис. 4), где максимальное значение поля составляет 1.065 Т. В Таблице 3. представлен фрагмент технического задания на магнит бустерного кольца, ключевыми требованиями к моделированию является достижение заданного интеграла магнитного поля, обеспечивающего поворот пучка протонов на необходимый угол и обеспечения размера области однородности (Good field region), в пределах которой соблюдается заданный допуск на неоднородность  $\Delta B/B$ .

В Таблице 2 представлены габаритные размеры модели, характеристики магнитного поля, полученные в результате электромагнитного расчёта. В Таблице 3 отражены электротехнические параметры катушки, которые позволяют подобрать требуемые параметры источника электропитания, согласно полученным напряжениям и установленной форме импульса. Выбранная медная шина сечением  $12 \times 12 \text{ мм}^2$  соответствует доступному типоразмеру проводника, в котором предусмотрен канала водяного охлаждения диаметром 5 мм. Оценка эффективной длины производилась в приближении квадратной волны, согласно выражению (1).

$$L_{eff} = \frac{\int B_y ds}{B_0} = \frac{3.009}{1.065} = 2.825(\text{м}), \quad (1)$$

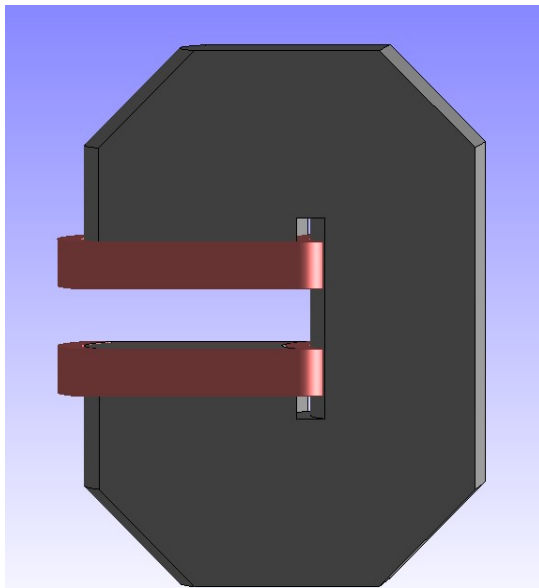


Рис. 1. Физическая модель бустерного диполя.

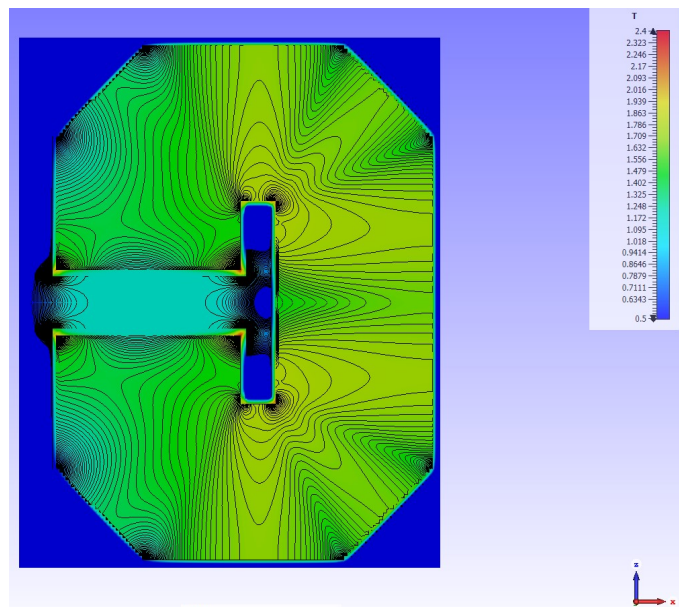


Рис. 2. Распределение поля в поперечном сечении магнитопровода.

**Таблица 1.** Техническое задание на магнит бустерного кольца.

Размер вакуумной камеры, мм <sup>2</sup>	202.2×154.8
Good field region, Ш×В, мм <sup>2</sup>	139.7×104.2
Интеграл поля, Тл·м	3.0 + 5%
Неоднородность поля	$\Delta B/B=5 \cdot 10^{-4}$
Максимальное магнитное поле в центре магнита, Тл	Согласно интегралу поля в расчётной модели
Тип магнита	секторный
Угол поворота орбиты, °	9.0
Эффективная длина магнита, м	Согласно интегралу поля
Габаритная длина, м	2.857

**Таблица 2.** Габариты магнита и результаты моделирования магнитного поля.

Габариты магнита, Д×Ш×В, мм×мм×мм	2857×1134×1375
Межполюсный зазор, мм	155
Полученный размер Good field region, Ш×В, мм×мм	160×140
Максимальное магнитное поле в центре магнита, Тл	1.065
Интеграл магнитного поля, Тл·м	3.009
Эффективная длина магнита, м	2.825

**Таблица 3.** Электротехнические параметры катушки.

Число катушек в обмотке, шт	2
Сечение провода (канал охлаждения), мм <sup>2</sup>	12×12 Ø5
Количество витков в катушке, шт	50
Номинальный ток возбуждения, А	1298
Плотность тока, А/мм <sup>2</sup>	10.4
Электрическое сопротивление обмотки, мОм	95
Рассеиваемая мощность, кВт (режим DC)	159
Индуктивность, Гн	0.143
Импульс: $t_{\text{пр}} \times t_{\text{уст}} \times t_{\text{пад}}$ , мс	50×5×20

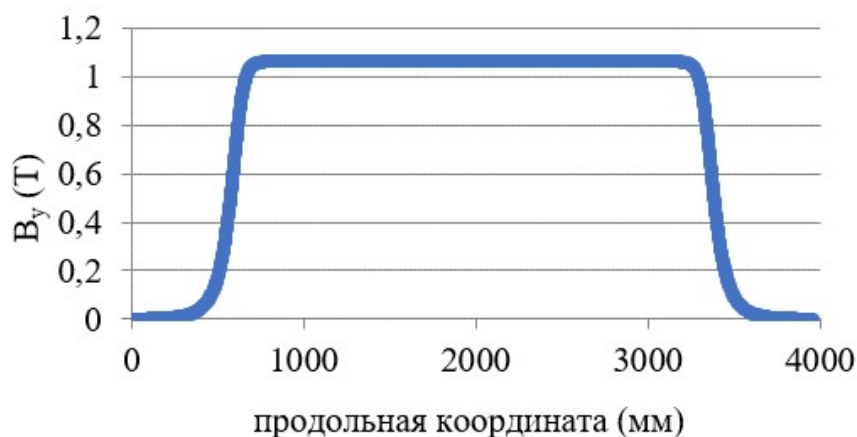


Рис.3. Распределение поля вдоль траектории пучка.

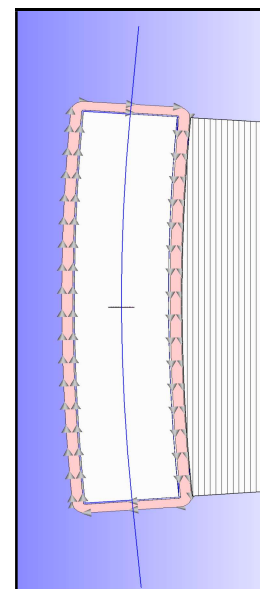


Рис. 4. Траектория протонного пучка в медианной плоскости.

На Рис. 5 представлен С-образный дипольный магнит кольца основного синхротрона (ОС), на выходе которого энергия ускоренного протонного пучка достигает десятки ГэВ [5]. Размер области однородности, удовлетворяющей допуску на неоднородность  $\Delta B/B = 0.05\%$  выбран с учётом результатов динамики. Размеры вакуумной камеры (106.2×96.4 мм<sup>2</sup>)

превышают поперечное сечение протонного пучка, отклоняемого магнитом. На Рис. 6 показано распределение поля в поперечном сечении магнитопровода, распределение поля вдоль траектории пучка отражены на Рис. 7 и Рис. 8, соответственно. В Таблице 4 представлен фрагмент технического задания на данный магнит, в Таблице 5 – результаты моделирования магнитного поля, а в Таблице 6 – электротехнические параметры катушки.

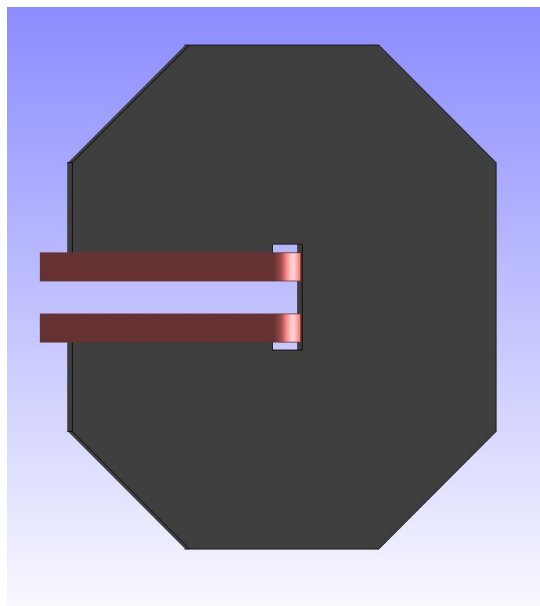


Рис. 5. Физическая модель диполя основного синхротрона.

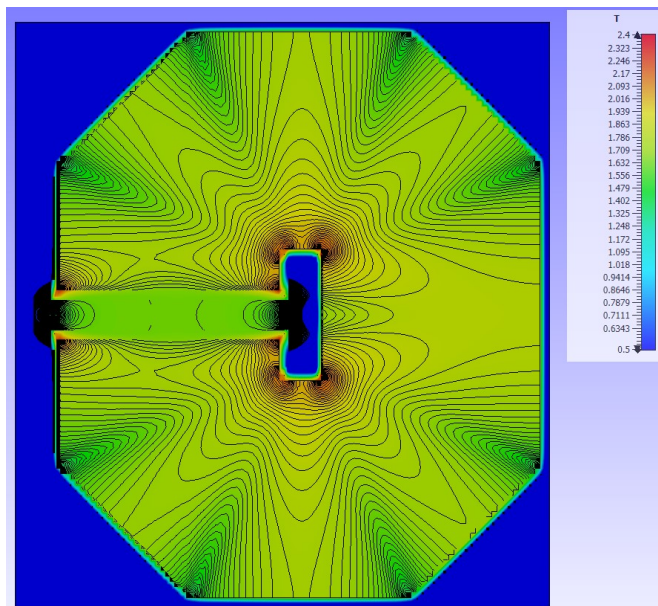


Рис. 6. Распределение поля в поперечном сечении магнитопровода.

**Таблица 4.** Техническое задание на магнит основного кольца.

Размер вакуумной камеры, мм <sup>2</sup>	106.2×96.4
Good field region, Ш×В, мм <sup>2</sup>	67.6×60.4
Неоднородность поля	$\Delta B/B=5 \cdot 10^{-4}$
Максимальное магнитное поле в центре магнита, Тл	1.60 + 5%
Тип магнита	секторный
Эффективная длина магнита, м	3.475
Габаритная длина, м	Согласно расчётной модели

**Таблица 5.** Габариты магнита и результаты моделирования магнитного поля.

Габариты магнита, Д×Ш×В, мм×мм×мм	3586×1386×1498
Межполюсный зазор, мм	98
Полученный размер Good field region, Ш×В, мм×мм	118×61
Максимальное магнитное поле в центре магнита, Тл	1.63
Интеграл магнитного поля, Тл·м	5.675
Эффективная длина магнита, м	3.475

**Таблица 6.** Электротехнические параметры катушки.

Число катушек в обмотке, шт	2
Сечение провода (канал охлаждения), мм <sup>2</sup>	12×12 Ø5
Количество витков в катушке, шт	42
Номинальный ток возбуждения, А	1584
Рассеиваемая мощность, кВт (режим DC)	237
Индуктивность, Гн	0.222
Импульс: $t_{\text{фр}} \times t_{\text{уст}} \times t_{\text{спад}}$ , мс	40×5×20



Рис. 7. Распределение поля вдоль траектории пучка.

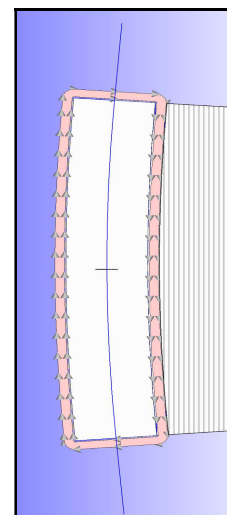


Рис. 8. Траектория протонного пучка в медианной плоскости.

#### 4. Заключение

В данной работе были рассмотрены результаты численного моделирования дипольных магнитов бустерного и основного кольца протонного синхротрона в CST Studio. В результате проведения электромагнитного расчёта были достигнуты требуемые значения индукции в рабочей области, соблюдены требования по размерам области хорошего поля с заданным допуском на неоднородность  $\Delta B/B = 0.05\%$ . По полученным двумерным распределениям поля удалось оценить интегралы поля и вычислить эффективные длины для каждой из моделей, которые соответствуют заданным техническим требованиям. Также проведена оценка ключевых электротехнических параметров (мощность, индуктивность) катушек, на которые следует ориентироваться при дальнейшем формировании системы импульсного питания магнитов.

#### Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2022-830 от 27 мая 2022 г. (продолжение Соглашения № 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021 г.).

#### 5. Список литературы

- [1] Shoji Nagamiya, Construction status of the J-PARC project, *Journal of Nuclear Materials*, vol. **343**, 1, 2005; doi: 10.1016/j.jnucmat.2005.02.012
- [2] T. Takayanagi, et al., Design of the pulse bending magnets for the injection system of the 3-GeV RCS in J-PARC, *Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee, USA*, 2005 doi: 10.1109/PAC.2005.1590654
- [3] A.V. Ziatdinova, P.A. Fedin, T.V. Kulevoy, A.A. Malishev, S.L. Bogomolov, and A.A. Efremov, LEPT Development for High-Current Multicharged Ion InjectorBased on SC ECR Ion Source, *Physics of Atomic Nuclei*, vol. **85**(9), 1535, 2022; doi: 10.1134/S1063778822090435
- [4] S. Russenchuck, Electromagnetic design of accelerator magnets, *CERN 1211 Geneva 23*: 411; doi: 10.5170/CERN-2006-002.411
- [5] S. Sato, J-PARC Facilities and Physics, *Nuclear Physics A*, vol. **862-863**, 238, 2011; doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2011.05.046