Научная статья

УДК 537.63 DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-3-20-30

## Дипольные магниты с однородным полем проекта СКИФ\*

## Ксения Константиновна Рябченко<sup>1</sup>, Александр Анатольевич Старостенко<sup>2</sup>

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН Новосибирск, Россия

> <sup>1</sup>K.K.Ryabchenko@inp.nsk.su <sup>2</sup>A.A.Starostenko@inp.nsk.su

Аннотация

В статье приведены результаты расчетов С-образных дипольных магнитов, которые будут располагаться в накопителе СКИФа, а также четырех горизонтальных дипольных магнитов для транспортного канала от ЛИНАКа к бустеру и трех дипольных магнитов для канала от бустера до накопителя. Требуемое качество поля в интегральном смысле для рассматриваемых диполей должно быть не хуже, чем 5 × 10<sup>-4</sup>.

Ключевые слова

дипольные магниты, СКИФ, интегральное качество поля, накопитель, транспортный канал

Для цитирования

Рябченко К. К., Старостенко А. А. Дипольные магниты с однородным полем проекта СКИФ // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 3. С. 20–30. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-3-20-30

# **Dipole Magnets with a Homogeneous Field of the SKIF**

## Kseniia K. Riabchenko<sup>1</sup>, Aleksandr A. Starostenko<sup>2</sup>

Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS Novosibirsk, Russian Federation

> <sup>1</sup>K.K.Ryabchenko@inp.nsk.su <sup>2</sup>A.A.Starostenko@inp.nsk.su

#### Abstract

This article presents the results of calculations of C-designed dipole magnets that will be located in the SKIF storage device, four horizontal dipole magnets for the transport channel from LINAC to the booster and three dipole magnets for the channel from the booster to the storage device. The required field quality in the integral sense for the dipoles should be no worse than  $5 \times 10^{-4}$ .

#### Keywords

dipole magnets, SKIF, integral field quality, storage device, transport channel

#### For citation

Riabchenko K. K., Starostenko A. A. Dipole magnets with a homogeneous field of the SKIF. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 3, pp. 20–30 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-3-20-30

<sup>\*</sup> По материалам доклада на конференции RuPAC'23, 10-15 сентября, ИЯФ СО РАН, Новосибирск.

© Рябченко К. К., Старостенко А. А., 2023

#### Введение

В 2019 г. началась активная работа по проектированию серий магнитных элементов для синхротронного источника СКИФ (Сибирский кольцевой источник фотонов). СКИФ – это источник синхротронного излучения четвертого поколения. Данная установка будет состоять из трех основных частей: линейного ускорителя на энергию 200 МэВ; бустера – синхротрона с максимальной энергией 3 ГэВ и длиной орбиты 158 м; накопительного кольца с 16-кратной симметрией, энергией 3 ГэВ и периметром в 476 м. В рамках данного проекта для накопительного кольца СКИФа проводились разработка и изготовление С-образных дипольных магнитов, которые будут располагаться в прямолинейных промежутках кольца с большой  $\beta_x$ . Требуемое качество поля в интегральном смысле для рассматриваемых диполей должно быть не хуже, чем 5 × 10<sup>-4</sup>. Кроме этого, на стадии изготовления находятся четыре горизонтальных дипольных магнита для транспортного канала от ЛИНАКа к бустеру, а также три дипольных магнита для канала от бустера до накопителя.

#### 1. Дипольные магниты накопительного кольца (ВМА)

Рассматриваемые дипольные С-образные магниты будут располагаться в прямолинейных промежутках кольца с большой  $\beta_x$ . Компоновка подобной секции подавления дисперсии показана на рис. 1: она состоит из квадрупольных линз с эффективными длинами L = 0,3 м и 0,15 м, и градиентами G в диапазоне  $-45 \div 52$  Тл/м, а также из дипольных С-образных магнитов с эффективной длиной L = 0,69 м, магнитным полем в центре *B* около 0,5 Тл.



*Puc. 1.* Компоновка секции подавления дисперсии *Fig. 1.* Dispersion suppression section layout

Основные требования к магнитным элементам данного типа показаны в табл. 1.

Таблица 1

Базовые требования к диполям ВМА

Table 1

Basic requirements for BMA dipoles

Параметр	Единица измерения	Значение
1	2	3
Магнитная длина	М	0,69
Апертура магнита	ММ	Ø 30
Поле в зазоре	Тл	0,53

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2023. Том 18, № 3 Siberian Journal of Physics, 2023, vol. 18, no. 3

Окончание табл. 1

1	2	3
Градиент	Тл/м	0
Максимальный интеграл поля	$T\pi \times m$	0,363
$\Delta B/B (R = 10 \text{ Mm})$	%	$\pm 0,08$
Качество поля		$\leq 5 \times 10^{-4}$
Область хорошего поля	мм2	$10 \times 10$
Количество	ШТ.	32

В табл. 2 показаны величины полученных интегральных гармоник на радиусе 10 мм для варианта с геометрией, показанной на рис. 3.

Таблица 2

Величины интегральных гармоник на R = 10 мм

Table 2

Values of integral harmonics at R = 10 mm

Номер интегральной гармоники	Величина интегральной гармоники
2	$-1.9  imes 10^{-4}$
3	-1,37 × 10 <sup>-4</sup>
4	$1,43  imes 10^{-5}$
5	$-3,74  imes 10^{-6}$
6	$-3,52 \times 10^{-6}$

3D-модель, полученная в ходе ряда оптимизаций, показана на рис. 2.





a

*Рис.* 2. 3D-модель дипольного магнита с выдвижными шимами (две фаски под разными углами для выравнивания интегрального качества поля), высота накладки 25 мм (*a*). Основные габариты диполя (в мм) (б)

*Fig. 2.* 3D model of a dipole magnet with retractable shims (two chamfers at different angles to equalize the integral field quality), cover height 25 mm (*a*). Main dimensions of the dipole (in mm) ( $\delta$ )

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2023. Том 18, № 3 Siberian Journal of Physics, 2023, vol. 18, no. 3 На рис. 3 показана конструкторская модель.



*Puc. 3.* Конструкторская модель диполя BMA *Fig. 3.* Design model of the BMA dipole

В табл. 3 показаны полученные параметры дипольного магнита ВМА при расчетах конструкторской модели в Opera.

Таблица 3

полученные параметры дипольного магнита
Dpera.
F
Параметры, полученные в ходе оптимизации
конструкторской 3D молени липоня
конструкторской эр-модели диполя

Table 3

Parameters obtained during optimization of the 3D dipole design model

Параметр	Единица измерения	Значение
Длина магнитопровода	М	0,618
Длина по железу с накладками	М	0,666
Эффективная длина	М	0,695
Радиус поворота	М	19
Длина с катушками	М	0,689
Поле в зазоре	Тл	0,522
$\Delta B/B$ (по окружности $R = 10$ мм)		3,73 × 10 <sup>-4</sup>
Интеграл	$T_{\Pi} \times M$	0,363
Ток	ампер × витки	6335
Максимальное значение плотности тока	А/мм <sup>2</sup>	3,9
Толщина обмотки	MM	47
Ширина обмотки	ММ	35,3

На этапе конструирования важную роль играет анализ и определение системы охлаждения магнитного элемента, для чего необходимы такие параметры, полученные в ходе разработки магнита, как ток, размер медного проводника, мощность.

В табл. 4 представлены расчетные параметры охлаждения для дипольного магнита ВМА (тип теплоносителя – вода).

#### Таблица 4

## Параметры системы охлаждения диполя ВМА

Table 4

Параметр	Единица измерения	Значение
Ток номинальный	А	430
Сечение шины	ММ	$1,7 \times 8,0 - \emptyset 5,8$
Площадь канала охлаждения	MM <sup>2</sup>	26,42
Площадь сечения	MM <sup>2</sup>	58,32
Длина обмотки	М	26,1
Сопротивление обмотки при 20 °С	мОм	7,7
Номинальное напряжение на обмотке	В	3,3
Номинальная мощность потерь на обмотке	Вт	1427
Параметры системы охлаждения		
Количество подключенных последовательно катушек	ШТ.	1
Температура воды на входе	°C	21
Диапазон нагрева воды	°C	4,2
Перепад давления в системе охлаждения	атм	6
Скорость воды в канале охлаждения	м/с	3
Расход воды в ветви	л/мин	4,4

# Parameters of the BMA dipole cooling system

#### 2. Дипольные магниты транспортного канала от линака до бустера (DIP)

Канал от линака до бустера предназначен для транспортировки пучков электронов энергией 200 МэВ и согласования параметров впускаемого пучка с оптикой бустера (рис. 4). Канал состоит из четырех горизонтальных дипольных магнитов: два магнита с углом поворота 225 мрад и еще два с углом поворота 162,5 мрад; 14 квадрупольных линз; 2 горизонтальных и 2 вертикальных корректора.



*Puc. 4.* Схема транспортного канала от линака до бустера *Fig. 4.* Scheme of the transport channel from the linak to the booster

Основные требования к магнитным элементам показаны в табл. 5.

Таблица 5

Table 5

Базовые требования к дипольным магнитам типа DIP

Basic requirements for dipole magnets DIP

			~
Параметр	Единица измерения	DIP1-DIP2	DIP3-DIP4
Магнитная длина	М	0,35	
Апертура магнита	MM	Ø 50	
Поле в зазоре	Тл	0,429	-0,310
Угол поворота	мрад	225	162,5
Максимальный интеграл поля	$T_{\Pi} \times MM$	0,18	
$\Delta B/B \ (R = 10 \text{ mm})$	%	±0,08	
Качество поля		$\leq$ 5 × 10 <sup>-4</sup>	
Область хорошего поля	MM <sup>2</sup>	20 × 20	
Количество	ШТ.	2	2

В ходе моделирования был получен профиль полюса с двумя шимами, торцевой фаской и сквозным круглым отверстием диаметром 25 мм, которое позволяет скорректировать величины интегральных гармоник (рис. 5). Также были оценены величины интегральных гармоник на окружности радиусом 10 мм. В табл. 6 приведены величины полученных интегральных гармоник. На рис. 6 показана конструкторская модель.



Рис. 5. Профиль полюса дипольного магнита DIP (длина по Z – 300 мм). Диаметр сквозного отверстия в полюсе 25 мм, расстояние от верхней точки отверстия до плоскости полюса – 6 мм Fig. 5. Profile of the pole of a DIP dipole magnet (Z length: 300 mm).

The diameter of the through hole in the pole is 25 mm, the distance from the top point of the hole to the plane of the pole is 6 mm



*Puc. 6.* Конструкторская модель диполей типа DIP *Fig. 6.* Design model of DIP type dipoles

Таблица б

## Величины интегральных гармоник

Table 6

Номер	Величина интегральной гармоники		
интегральной гармоники	DIP1-DIP2	DIP3-DIP4	
2	$-3,07 \times 10^{-3}$	$-2,19 \times 10^{-3}$	
3	-4,36 × 10 <sup>-5</sup>	$-3,98 \times 10^{-5}$	
4	$-1,15 \times 10^{-5}$	$-1,03 \times 10^{-5}$	
5	$-7,35 \times 10^{-7}$	$-1,27 \times 10^{-6}$	
6	8,98 × 10 <sup>-7</sup>	$-7,67 \times 10^{-7}$	

Integral harmonic values

В табл. 7 показаны полученные параметры дипольного магнита, а также параметры катушки.

Таблица 7

# Параметры, полученные для 3D-моделей дипольных магнитов транспортного канала линак-бустер

Table 7

Параметр	Единица измерения	DIP1-DIP2	DIP3-DIP4
Длина магнитопровода	М	0,3	
Эффективная длина	М	0,371	
Радиус поворота	М	1,56	2,15
Длина с катушками	М	0,55	
Поле в зазоре	Тл	0,404	-0,294
$\Delta B/B$ (по окружности $R = 10$ мм)		7,39 × 10-4	4,34 × 10 <sup>-4</sup>
Интеграл	Тл × м	0,151	-0,109
Ток	ампер × витки	6052	8332
Максимальное значение плотности	А/мм <sup>2</sup>	0,5	0,7
тока			
Толщина обмотки	ММ	95	
Ширина обмотки	ММ	12	7

## Parameters obtained for 3D models of dipole magnets of the linac-booster transport channel

## 3. Дипольные магниты транспортного канала от бустера до синхротрона (BM)

Канал от бустера до синхротрона предназначен для транспортировки пучков электронов энергией 3 ГэВ и согласования параметров впускаемого и циркулирующего в синхротроне пучков (рис. 7, 8).



Рис. 7. Схема выпуска из бустера Fig. 7. Booster release diagram



Рис. 8. Схема участка подъема из тоннеля в зал накопителя Fig. 8. Diagram of the ascent section from the tunnel to the storage chamber

Канал состоит из 3 дипольных магнитов: одного горизонтального дипольного магнита с углом поворота 161 мрад; двух вертикальных поворотных магнитов с углами поворота 126,64 мрад; 24 квадрупольных линз; 4 горизонтальных и 4 вертикальных корректора.

Основные требования к магнитным элементам показаны в табл. 8.

Таблица 8

Базовые требования к дипольным магнитам типа ВМ

Table 8

Параметр	Единица измерения	BM1	BM2-BM3
Магнитная длина	М	1,1	
Апертура магнита	MM	Ø 30	
Поле в зазоре	Тл	1,442	-1,152
Угол поворота	мрад	158,5	126,64
Максимальный интеграл поля	$T_{\Pi} \times {}_{MM}$	0,18	
Качество поля		$\leq$ 5 × 10 <sup>-4</sup>	
Область хорошего поля	MM <sup>2</sup>	$20 \times 20$	
Количество	ШТ.	1	2

Basic requirements for dipole magnets BM

Величины интегральных гармоник на окружности радиусом 10 мм показаны в табл. 9.

## Таблица 9

Величины интегральных гармоник

Table 9

Номер	Величина интегральной гармоники		
интегральной гармоники	BM1	BM2-BM3	
2	$-7,06 \times 10^{-4}$	$-5,47 \times 10^{-4}$	
3	1,53 × 10-5	9,96 × 10 <sup>-5</sup>	
4	4,01 × 10 <sup>-6</sup>	$-3,97 \times 10^{-7}$	
5	$-2,00 \times 10^{-6}$	$-3,41 \times 10^{-5}$	
6	$-3,66 \times 10^{-6}$	$1,94 \times 10^{-6}$	

Values of integral harmonics

3D-модель дипольного магнита, полученная в ходе ряда оптимизаций, показана на рис. 9.



*Puc. 9.* 3D-модель дипольного магнита с основными габаритами. Размеры указаны в мм *Fig. 9.* 3D model of a dipole magnet with main dimensions. Dimensions in mm

В табл. 10 показаны полученные параметры магнитов типа BM, а также необходимые параметры катушки.

Таблица 10

## Параметры, полученные в ходе оптимизации 3D-модели дипольных магнитов BM

Table 10

Parameters obtained during optimization of the 3D model of BM dipole magnets

Параметр	Единица измерения	BM1	BM2-BM3
Длина магнитопровода	М	1,12 и 1,07	
Эффективная длина	М	1,1	
Радиус поворота	М	6,93	8,68
Длина с катушками	М	1,3	
Поле в зазоре	Тл	1,412	1,135
$\Delta B/B$ (по окружности $R = 10$ мм)		$1,22 \times 10^{-4}$	$4,08  imes 10^{-4}$
Интеграл	$T_{\Pi} \times M$	0,156	0,127
Ток	ампер × витки	32 000	18 700
Максимальное значение плотно-	А/мм <sup>2</sup>	4,2	2,45
сти тока			
Толщина обмотки	MM	82	
Ширина обмотки	MM	ç	93



На рис. 10 показана конструкторская модель дипольных магнитов типа ВМ1.

*Puc. 10.* Конструкторская модель дипольного магнита BM1 *Fig. 10.* Design model of dipole magnet BM1

В табл. 11 показаны параметры системы охлаждения для диполей BM1 и BM2-BM3 (тип теплоносителя – вода).

Таблица 11

Параметры системы охлаждения дипольных магнитов транспортного канала бустер–накопитель

Table 11

Parameters of the cooling system for dipole magnets	S
of the booster-storage transport channel	

Параметр	Единица измерения	BM1	BM2-BM3	
Ток номинальный	А	762,5	445	
Сечение шины	MM	$12 \times 12 - \emptyset6$		
Площадь канала охлаждения	MM <sup>2</sup>	0,942		
Площадь сечения	MM <sup>2</sup>	2,8 × 10 <sup>-5</sup>		
Длина обмотки	М	50		
Сопротивление обмотки при 20 °С	мОм	7,5	7,5	
Номинальное напряжение на обмотке	В	5,7	3,3	
Номинальная мощность потерь	Вт	4363	1486	
на обмотке				
Параметры системы охлаждения				
Количество подключенных последова-	ШТ.	1		
тельно катушек				
Температура воды на входе	°C	21		
Диапазон нагрева воды	°C	18	6	
Перепад давления в системе охлаждения	атм	6		
Скорость воды в канале охлаждения	м/с	2,1	2,2	
Расход воды в ветви	л/мин	3,5	3,6	

ISSN 2541-9447 Сибирский физический журнал. 2023. Том 18, № 3 Siberian Journal of Physics, 2023, vol. 18, no. 3

#### Заключение

Подготовительные работы были завершены, магнитные элементы находятся в производстве.

## Информация об авторах

Рябченко Ксения Константиновна, младший научный сотрудник

Старостенко Александр Анатольевич, кандидат физико-математических наук

### Information about the Authors

Kseniia K. Riabchenko, Junior Researcher

Aleksandr A. Starostenko, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Статья поступила в редакцию 08.11.2023; одобрена после рецензирования 08.11.2023; принята к публикации 08.11.2023

The article was submitted 08.11.2023; approved after reviewing 08.11.2023; accepted for publication on 08.11.2023