

УДК 621.317.4:539.12.185

EDN XYJVLK

КОРРЕКТИРУЮЩИЕ МАГНИТЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ПУЧКОВ В КОЛЛАЙДЕРЕ NICA

А.И. Агеев, Ю.В. Алтухов, И.В. Богданов, С.С. Козуб, Л.М. Ткаченко, В.И. Шувалов
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, Протвино
Yuriy.Altukhov@ihep.ru, ageyev@ihep.ru, bogdanov@ihep.ru, kozub@ihep.ru, tlm@ihep.ru,
shuvalov@ihep.ru

В.В. Борисов, Ю.В. Гусаков, С.А. Костромин, Д.Н. Никифоров, Е.М. Сыресин
Объединённый институт ядерных исследований – ОИЯИ, Дубна
borisov@jinr.ru, igoussak@yandex.ru, kostromin@jinr.ru, dmitnik@jinr.ru, esyresin@jinr.ru

В работе представлены результаты разработки сверхпроводящих дипольных корректирующих магнитов блока сверхпроводящих соленоидов для формирования поляризованных протонных пучков в кольцах коллайдера NICA, где планируется установить Сибирские змейки, в состав которых входят четыре блока соленоидов. В статье представлены результаты расчетов магнитного поля и параметры оптимизированных геометрий этих магнитов, предложена схема защиты корректирующих диполей и проведен расчет максимальной температуры при их переходе в нормальное состояние.

Ключевые слова: коллайдер NICA, поляризованные протонные пучки, Сибирские змейки, сверхпроводящий корректирующий магнит

КОРРЕКТИРУЮЩИЕ МАГНИТЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ПУЧКОВ В КОЛЛАЙДЕРЕ NICA

A.I. Ageyev, Y.V. Altukhov, I.V. Bogdanov, S.S. Kozub, L.M. Tkachenko, V.I. Shuvalov
SIK «Kurchatov Institute» – ИФВЭ, Протвино
Yuriy.Altukhov@ihep.ru, ageyev@ihep.ru, bogdanov@ihep.ru, kozub@ihep.ru, tlm@ihep.ru,
shuvalov@ihep.ru

V.V. Borisov, Y.V. Gusakov, S.A. Kostromin, D.N. Nikiforov, E.M. Syresin
Joint Institute for Nuclear Reserch
borisov@jinr.ru, igoussak@yandex.ru, kostromin@jinr.ru, dmitnik@jinr.ru, esyresin@jinr.ru

The paper presents the results of the development of superconducting dipole correcting magnets for a block of superconducting solenoids for the formation of polarized proton beams in the rings of the NICA collider, where it is planned to install Siberian snakes, which include four blocks of solenoids. The article presents the results of magnetic field calculations and the parameters of optimized geometries of these magnets, a protection scheme for the corrective dipoles is proposed, and the maximum temperature during their transition to the normal state is calculated.

Key words: NICA collider, polarized proton beams, Siberian snakes, superconducting corrective magnet

Введение

В ОИЯИ создается коллайдер NICA [1], основными целями экспериментов на котором являются исследования в области сверхплотной горячей барионной материи и спиновой физики. Интенсивность поляризованных встречных пучков с полной энергией в системе центра масс протонов $\sqrt{s}=12-27$ ГэВ и дейтронов $\sqrt{s_{NN}}=4-13.8$ ГэВ обеспечивает в коллайдере среднюю светимость до $10^{32}\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$.

Для формирования поляризованных протонных пучков в кольцах коллайдера планируется

установить Сибирские змейки, в состав которых входят четыре блока соленоидов, каждый из которых располагается в соответствующем прямолинейном промежутке коллайдера (рис.1.).

Сибирская змейка – это спиновый ротатор, то есть специальное устройство, которое используется в коллайдерах для сохранения поляризации пучков при ускорении. Простейшим вариантом сибирской змейки может быть один сильный соленоид. Эти змейки обеспечивают так называемый режим спиновой прозрачности.

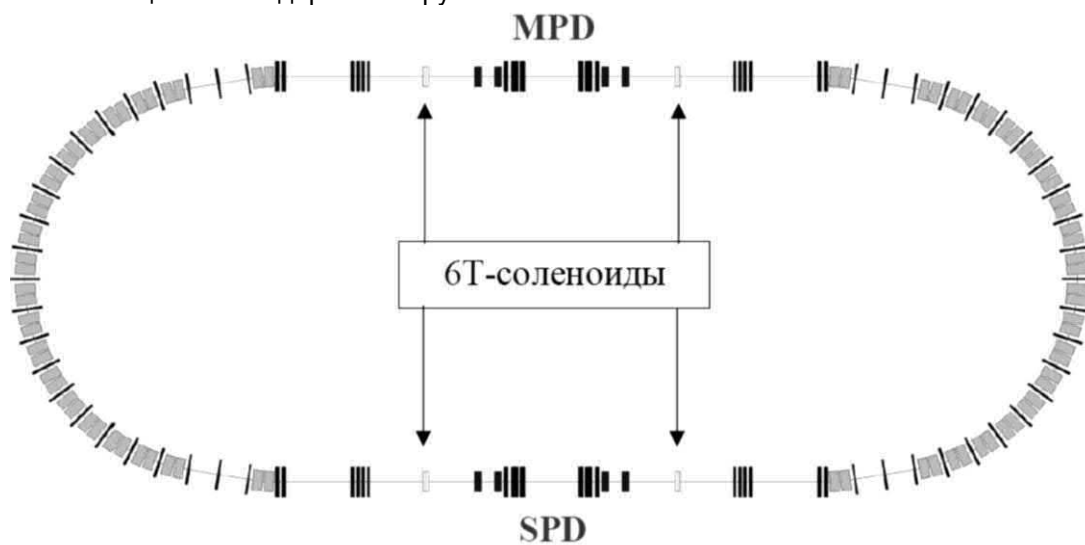


Рис. 1. Схема системы поляризации коллайдера для моды спиновой прозрачности с двумя Сибирскими змейками, включающими в себя четыре блока соленоидов

Требуемый интеграл продольного поля в апертуре одного соленоида составляет 0.5-6 Тл×м в зависимости от тока его питания. Использование режима спиновой прозрачности позволяет обеспечить вертикальную и продольную поляризацию пучков при столкновениях в детекторе SPD.

Целью данной работы является разработка концептуального проекта блока сверхпроводящих соленоидов с изменяемой в пределах 0.5-6 Тл×м величиной интеграла продольного поля в каждой апертуре. Продольная длина соленоидов 1000 мм, обмотки соленоидов в одном блоке расположены вертикально друг над другом. Расстояние между осями 320 мм.

Состав блока соленоидов:

- сверхпроводящий соленоид – 2 шт. (создает продольное движение циркулирующего пучка в коллайдере магнитное поле с дистанционно изменяемой величиной индукции);

- корректирующие дипольные сверхпроводящие обмотки седловидного типа – 12 шт. (по 6 шт. на каждый соленоид), установленные вокруг обмотки соленоида (по 2 шт. с каждого края и 2 шт. между ними вдоль всей длины). Величина интеграла магнитного поля составляет $3\cdot 10^{-3}$ от интеграла поля основной обмотки для длинных обмоток, которые служат для коррекции возмущений магнитного поля от основной обмотки в поперечных к движению пучка направлениях. Интеграл магнитного поля крайних обмоток составляет до $\sim 10^{-3}$ от интеграла поля основной обмотки. Относительная величина радиального магнитного поля на краю соленоида не должна превышать 10^{-3} поля основной обмотки. Максимальный угол между магнитной осью каждого из двух соленоидов в охлажденном состоянии и соответствующим направлением идеальной замкнутой орбиты не более 0.5 мрад.;

- криостат, общий для обоих соленоидов, должен обеспечить охлаждение и работу всех находящихся в нем обмоток в режиме сверхпроводимости.

Соленоиды создают магнитное поле, параллельное направлению идеальной замкнутой орбиты коллайдера в месте расположения блока соленоидов. Основные магнитные и тепловые характеристики оптимизированной геометрии соленоидов приведены в [2]. Величина и направление индукции магнитного поля может изменяться оператором независимо в каждом соленоиде до полного выключения одного из соленоидов в блоке. Режим работы источников питания (ИП) соленоидов и их корректирующих обмоток не зависит от режима работы ИП структурных элементов Коллайдера.

Коррекция перпендикулярных направлению идеальной орбиты компонент магнитного поля от основной обмотки соленоида осуществляется независимо дипольными корректирующими обмотками. Каждый соленоид обладает системой эвакуации энергии из соленоида при возникновении нештатных ситуаций, предотвращающей выход его из строя. Корректирующие диполи обладают собственными системами защиты. В данной работе проведено численное моделирование магнитных и тепловых характеристик корректирующих сверхпроводящих дипольных магнитов. Основные технические характеристики корректирующих диполей представлены в таблице 1.

Таблица 1

Требования к корректирующим сверхпроводящим дипольным магнитам

Параметр	Центральные диполи	Краевые диполи
Тип обмотки	Седловидная на цилиндре	Седловидная на цилиндре
Число обмоток	Горизонтальный и вертикальный диполи	два горизонтальных и два вертикальных
Интеграл поля	3×10^{-3} от основного поля соленоида	1×10^{-3} от основного поля соленоида
Длина диполей	По согласованию с заказчиком	По согласованию с заказчиком
Рабочий ток	Не более 100 А	Не более 100 А

Материалы

Сверхпроводящий кабель

Для расчетов геометрии корректирующих диполей выбран плоский кабель из провода диаметром 0.3 мм, который был изготовлен Ульяновским металлургическим заводом для проекта УНК. Его основные характеристики представлены в таблицах 2 [3].

Таблица 2

Основные характеристики сверхпроводящего провода

Диаметр провода, мм	0.3
Количество NbTi волокон в проводе	150
Диаметр NbTi волокон, мкм	15
Шаг скрутки волокон, мм	25
Коэффициент заполнения по NbTi	0.40
Остаточное сопротивление медной матрицы (RRR)	≥ 70
Критическая плотность транспортного тока, J_0 , А/мм ²	1.4×10^{10}
Критический ток ($B = 5$ Тл, $T = 4.2$ К), А	≥ 50

Основные характеристики кабеля представлены в таблице 3.

Таблица 3

Основные характеристики сверхпроводящего кабеля

Диаметр СП проволоки, мм	0.3
Число проволок	8
Шаг транспонирования, мм	14
Поперечные размеры без изоляции, мм ²	1.48×0.45
Толщина изоляции, мм	0.09
Поперечные размеры с изоляцией, мм ²	1.66×0.63
Угол транспонирования, град.	12
Удельное электрическое сопротивление матрицы, ρ _e , Ом×м	5×10 ⁻¹⁰

Для уменьшения тепловыделений в кабеле выбрано оксидное покрытие сверхпроводящих проводов, позволяющее подавить кабельные потери от вихревых токов [4, 5]. Эффективные поперечное и продольное сопротивления для него равны 84 мОм.

Тепловыделения в сверхпроводящем кабеле вызывают нагрев обмоток корректирующих магнитов и определяют требования к системе их охлаждения. Они состоят из трех составляющих [6,7] и описываются следующими формулами за треугольный цикл 0- B_{\max} -0 в размерности (Дж/м³):

1. Гистерезисные потери в единице объема провода W_h равны интегралу потерь мощности за цикл. Они имеют простую логарифмическую зависимость от магнитного поля B :

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

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:

$$J_c = \frac{J_0 B_0}{B + B_0}, \quad (2)$$

где J_0 - критическая плотность тока при $B=0$, B_0 соответствует полю, когда J_0 уменьшается в 2 раза. Таким образом, критическая плотность тока J_c имеет обратно пропорциональную зависимость от магнитного поля B . Формулы (1) и (2) показывают, что существует только один параметр d_f , который оказывает влияние на потери при сохранении высокой токоведущей способности провода.

2. Матричные потери W_m при скорости изменения магнитного поля \dot{B} и постоянном эффективном матричном сопротивлении ρ_e равны

$$W_m = \frac{1}{2\pi^2} \frac{l_p^2}{\rho_e} \dot{B} B_{\max}, \quad (3)$$

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.

3. Кабельные потери W_c вызваны вихревыми токами в кабеле и зависят от шага транспонирования провода p ; отношения α ширины/толщине (a/b) кабеля и эффективными поперечным ρ_{\perp} и продольным ρ_{\parallel} сопротивлениями между проводами в кабеле:

$$W_c = \frac{p^2}{16} \left(\frac{16}{15} \frac{\alpha^2 \dot{B}_{\perp} B_{\perp \max}}{\rho_{\perp}} + \frac{2}{3} \frac{\dot{B}_{\perp} B_{\perp \max}}{\rho_{\parallel}} + \frac{1}{2} \frac{\dot{B}_{\parallel} B_{\parallel \max}}{\alpha^2 \rho_{\parallel}} \right), \quad (4)$$

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

Формула (4) показывает, что можно использовать следующие параметры для снижения потерь кабеля: повышение эффективного поперечного сопротивления ρ_{\perp} ; уменьшение коэффициента α ; уменьшение длины транспонирования p .

Магнитопровод

Снаружи сверхпроводящих корректирующих дипольных магнитов расположен магнитопровод, служащий одновременно бандажом и защитой внешнего пространства от рассеянных полей. Магнитопровод предполагается изготовить из стали 20, магнитный момент насыщения

которой равен 2.19 Тл; зависимость магнитной проницаемости от магнитной индукции представлена на рис. 2. Измеренная величина коэрцитивной силы стали 20 равна 286 А/м. Толщина неламинированной пластины 20 мм.

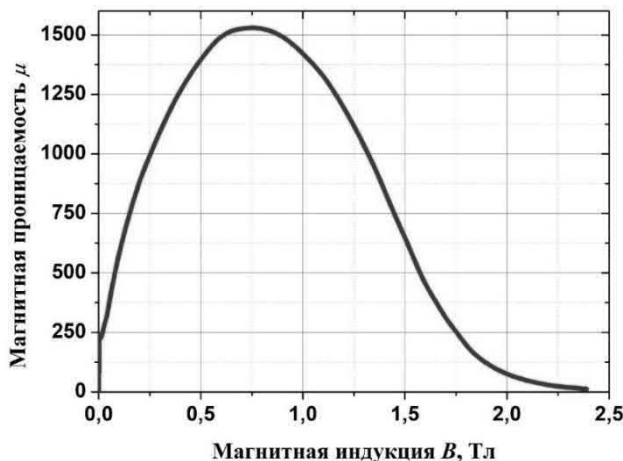


Рис. 2. Зависимость магнитной проницаемости от магнитной индукции для стали 20

Геометрия корректирующих дипольных магнитов

Для проведения расчетов выбран седловидный тип корректирующих дипольных магнитов. Расположение горизонтальных

и вертикальных корректирующих магнитов показано на поперечном сечении обмоточного блока (рис. 3).

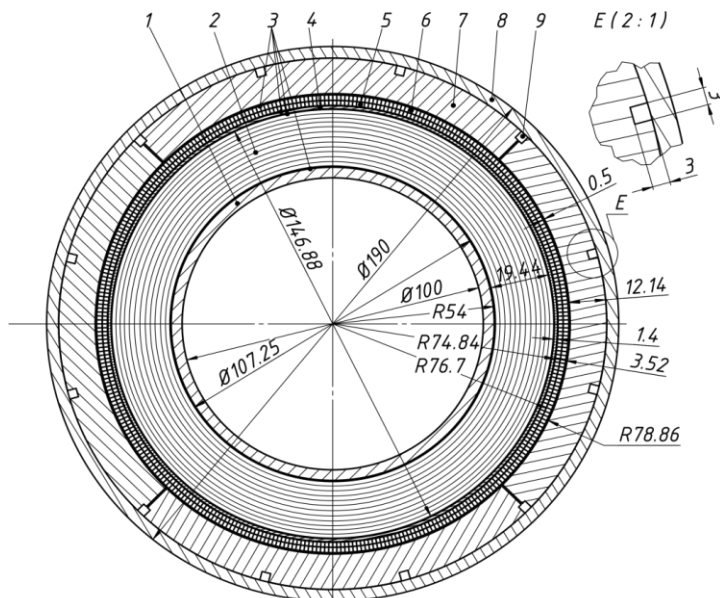


Рис. 3. Поперечное сечение обмоточного блока.

1 – внутренняя труба гелиевого сосуда, 2 – сверхпроводящая обмотка соленоида, 3 – полиимидная электрическая изоляция, 4 – защитная нержавеющая прокладка, 5 – вертикальные корректирующие дипольные магниты, 6 – горизонтальные корректирующие дипольные магниты, 7 – магнитопровод, 8 – обечайка гелиевого сосуда, 9 – каналы для двухфазного гелия, охлаждающего магниты.

Все магнитные характеристики посчитаны с помощью программы MULTIC [8]. На наружной поверхности обмотки соленоида расположена нержавеющая проставка толщиной 1 мм. Проставка с обеих сторон имеет электрическую изоляцию толщиной 0.2мм. Такая же изоляция разделяет вертикальные и горизонтальные дипольные магниты. Между наружной поверхностью обмоток и магнитопроводом расположена корпусная изоляция толщиной 0.5 мм. Для расчета потерь выбран режим,

в котором рабочий ток в диполях синхронно увеличивается с током соленоида вплоть до достижения поля в соленоиде 6 Тл за время 353 с.

Внутренний радиус магнитопровода равен 78.86 мм. Остальные данные для четырех корректирующих диполей представлены в таблице 4. Максимальное поле в обмотках и потери считались с учетом влияния магнитного поля соленоида с центральным полем 6 Тл и магнитопровода.

Таблица 4

Основные характеристики корректирующих диполей

Корректирующий диполь	краевой		центральный	
	вертикальный	горизонтальный	вертикальный	горизонтальный
Продольная длина, мм	230	230	480	480
Длина прямолинейной части обмотки, мм	49.93	49.46	299.9	299.5
Внутренний радиус обмотки, мм	74.84	76.70	74.84	76.70
Начальный угол, град.	1.617	2.298	1.617	2.298
Конечный слой, град.	58.38	57.70	58.38	57.70
Число слоев	1	1	1	1
Число витков/квадрант	119	119	119	119
Ток в витке, А	20.22	20.22	22.53	22.52
Собственное центральное поле, Тл	0.0406	0.0407	0.0453	0.0453
Максимальное поле в центральном сечении с учетом соленоида, Тл	0.0743	0.0743	0.0889	0.0897
Максимальное поле в лобовых частях, Тл	0.0864	0.0966	0.1034	0.1043
Запасенная энергия, Дж	0.46	0.47	6.14	6.32
Индуктивность, мГн	9.0	9.2	24.2	24.9
Критическая температура, град.	8.7	8.7	8.7	8.7
Интеграл поля, Тл*м	0.006	0.006	0.018	0.018
Эффективная длина, м	0.1481	0.1476	0.3978	0.3976
Гистерезисные потери, Дж	0.130	0.133	0.386	0.393
Матричные потери, Дж	9.7×10^{-7}	1.0×10^{-7}	3.0×10^{-7}	3.3×10^{-7}
Кабельные потери, Дж	0.7×10^{-9}	0.8×10^{-9}	2.5×10^{-10}	2.5×10^{-10}
Полные потери в дипольной обмотке, Дж	0.130	0.133	0.386	0.393
Радиальная компонента пондеромоторной силы, кН/м/квадрант	0.0504	0.0542	0.0626	0.0672
Азимутальная компонента пондеромоторной силы, кН/м/квадрант	-0.0420	-0.0405	-0.0522	-0.0502
Полная пондеромоторная сила, кН/м/квадрант	0.0656	0.0676	0.0815	0.0839

Как пример, поперечное сечение центрального вертикального диполя представлено на рис. 4, а развертка лобовых частей в плоскости $R\Theta-Z$ – на рис. 5. Витки в развертке изгибаются с минимальным радиусом 10 мм на угол 75° , далее с большим радиусом до 90° . В плоскости $X = 0$ они устанавливаются перпендикулярно оси Z .

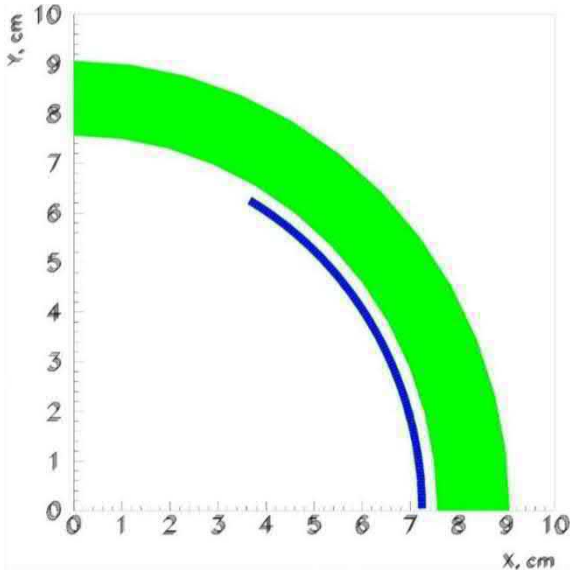


Рис. 4. Поперечное сечение центрального вертикального диполя

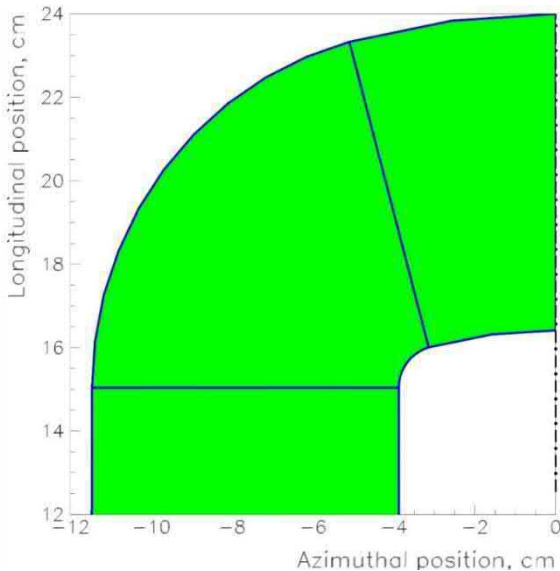


Рис. 5. Развертка лобовых частей обмотки центрального вертикального диполя в плоскости $R\Theta-Z$

Распределение поля вдоль оси соленоида в каждом корректирующем диполе при выключенных остальных магнитах представлено на рис. 6 и рис. 7.

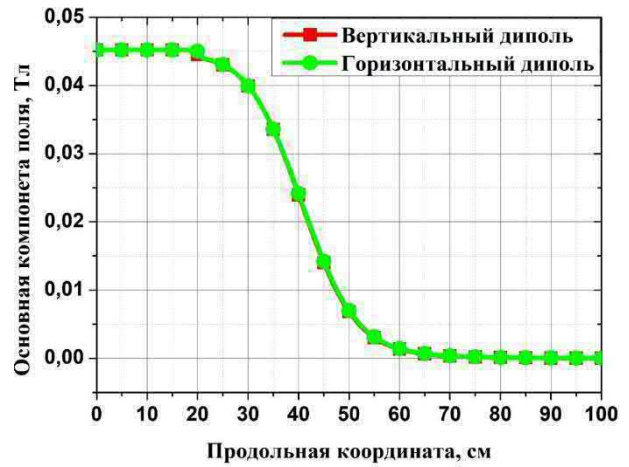


Рис. 6. Распределение поля центрального корректора вдоль оси соленоида

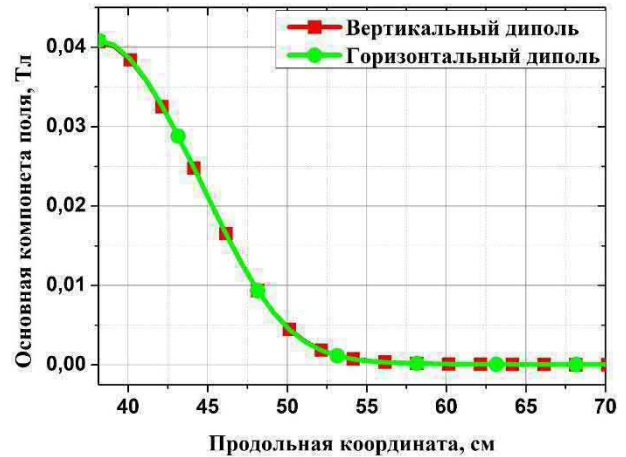


Рис. 7. Распределение поля краевого корректора вдоль оси соленоида

Защита корректирующих диполей

Из таблицы 4 видно, что токи через диполи небольшие, а также невелика запасенная в диполях энергия. Например, для диполя с наибольшей запасенной энергией, т.е. горизонтального центрального диполя, при использовании схемы вывода с резистором, подобной схеме для соленоидов [2], максимальная температура разогрева сверхпроводника в обмотке составит 44, 44 и 45 К. Эти значения получены для таких величин сопротивления вывода, при которых максимальное напряжение при выводе энергии равно 100, 10 и 1. В соответственно, а время отключения источника тока равно 1 мс. Столь малое различие в температурах связано с тем, что для данного проводника и тока для достижения напряжения на нормальной фазе порогового значения срабатывания датчика нормальной фазы требуется значительное

время (таблица 5), так как скорость распространения нормальной фазы мала. За это время происходит основной разогрев сверхпроводника, тогда как разогрев в процессе вывода запасенной энергии на внешнее сопротивление незначительный. То есть из-за малости запасенной энергии выводить ее при больших скоростях вывода тока (т.е. при большом напряжении на выводах обмоток) для данных корректирующих диполей нет необходимости. Чтобы оградить выходную цепь источника от действия эдс самоиндукции, возникающей при отключении источника тока, достаточно параллельно диполю подключить диод, который также будет служить элементом, рассеивающим запасенную в диполе энергию. При запитывании диполя от двухполярного источника тока это приводит к такой схеме, рис. 8.

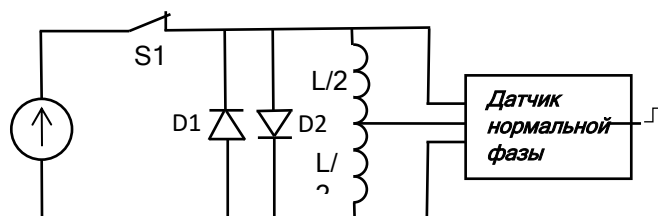


Рис. 8. Схема с выводом запасенной энергии на диод

После обнаружения датчиком нормальной фазы перехода сверхпроводящей обмотки в нормальное состояние сбрасывается в ноль ток источника. Для этого на схеме условно изображен ключ $S1^*$, хотя в действительности это может быть подача соответствующего опорного управляющего напряжения источника тока, либо блокировка его выходных каскадов, либо еще какой-либо другой способ отключения тока вплоть до механического разрыва цепи. При этом диоды будут обеспечивать протекание тока в цепи после отключения источника, а максимальное напряжение на обмотке корректирующего диполя будет равно прямому напряжению открытого диода. С учетом заданной скорости изменения магнитного поля диполей индуктивное напряжение при установке рабочего тока корректирующих диполей будет составлять 1.6 мВ и менее. Если воспользоваться данными, представленными в таблице 5, то можно получить грубую оценку максимального падения напряжения на тоководах, приписав весь теплоприток по тоководам корректоров только лишь джоулевым тепловыделением. В этом случае суммарная величина для двух то-

ководов составляет менее 145 мВ, а в реальности она будет меньше. Такого напряжения будет недостаточно для отпириания диода, т.е. ток утечки через диод будет малым, чтобы оказывать существенное влияние на процесс установления рабочего тока в диполе.

При расчете максимальной температуры разогрева в обмотке при ее переходе в нормальное состояние были сделаны следующие предположения:

1. Переход сверхпроводящей обмотки в нормальное состояние обнаруживается датчиком нормальной фазы со следующими характеристиками: пороговое напряжение срабатывания датчика нормальной фазы $U_{th} = 60$ мВ, а время срабатывания датчика нормальной фазы (время подтверждения, после которого датчик нормальной фазы выдает сигнал о переходе обмотки в нормальное состояние) $t_{val} = 5$ мс.

2. При расчете времени достижения напряжением на нормальной зоне величины порогового напряжения срабатывания датчика нормальной фазы t_{th} рассматривался случай, когда нормальная зона возникает на внутреннем витке внутреннего слоя обмотки на лобовой части и распространяется вдоль проводника в две стороны. При этом скорость распространения нормальной фазы, так же как и для соленоидов, определялась на основе данных, представленных в [9].

3. После обнаружения нормальной фазы происходит отключение (сброс в ноль тока) источника питания сверхпроводящего диполя. Время отключения t_{s1} условно принято равным 1 мс.

4. Постоянно подключенные параллельно сверхпроводящему диполю диоды D1 и D2 в штатном режиме закрыты. В случае перехода обмотки в нормальное состояние, через время $t_{th} + t_{val} + t_{s1}$ отключается источник питания, открывается соответствующий диод и на него выводится вся энергия, запасенная в обмотке диполя. Рассеяние энергии в обмотке не учитывается. Для простоты предполагалось, что диод имеет условную прямоугольную вольт-амперную характеристику с прямым напряжением 1.2 В, т.е. фактически рассматривается случай вывода тока с постоянной скоростью.

На рис. 9 и 10 приведен процесс разогрева места, где произошло зарождение нормальной фазы (так называемой горячей точки) при переходе в нормальное состояние обмоток центрального и краевого горизонтальных диполей.

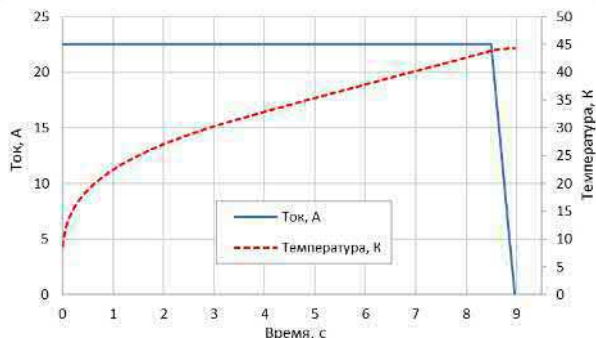


Рис. 9. Температура горячей точки при переходе в нормальное состояние обмотки горизонтального центрального диполя

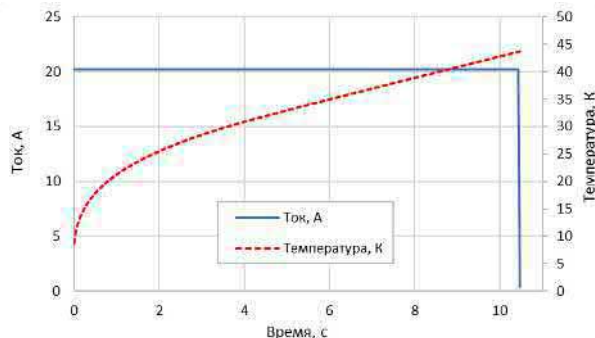


Рис. 10. Температура горячей точки при переходе в нормальное состояние обмотки горизонтального краевого диполя

Из рисунков хорошо видно, что практически весь разогрев сверхпроводника происходит до момента срабатывания датчика нормальной фазы и отключения источника тока, тогда как последующий процесс вывода запасенной энергии из диполя почти не влияет на температуру горячей точки. Для вертикальных диполей

рисунки будут практически такими же. Основные параметры диполей и параметры элементов защиты, заложенные как исходные для расчетной модели, наряду с результатами оценки максимальной температуры разогрева точки, в которой произошло зарождение нормальной фазы, приведены в таблице 5.

Таблица 5
Основные параметры диполей и максимальная температура в обмотках диполей при переходе в нормальное состояние.

Корректирующий диполь	краевой		центральный	
	вертикальный	горизонтальный	вертикальный	горизонтальный
Диаметр провода, мм	0.3	0.3	0.3	0.3
Число проволок в кабеле	8	8	8	8
Рабочий ток, А	20.22	20.22	22.53	22.52
Максимальное поле в обмотке, Тл	0.0864	0.0966	0.1034	0.1043
Запасенная энергия, Дж	0.46	0.47	6.14	6.32
Индуктивность, мГн	9.0	9.2	24.2	24.9
Индуктивное напряжение на диполе при вводе/выводе тока, мВ	0.52	0.53	1.54	1.59
Пороговое напряжение срабатывания датчика нормальной фазы, мВ	60	60	60	60
Время достижения порогового напряжения датчика нормальной фазы, с	10.4	10.4	8.5	8.5
Временная задержка срабатывания датчика нормальной фазы, мс	5	5	5	5
Время отключения источника тока, мс	1	1	1	1
Напряжение на диполе при выводе запасенной энергии на диод, В	1.2	1.2	1.2	1.2
Максимальная температура горячей точки обмотки, К	43.7	43.7	44.3	44.3

Таким образом, при переходе сверхпроводящих корректирующих диполей в нормальное состояние при использовании диодов для шунтирования их обмоток максимальная температура этих магнитов составит примерно 44 К.

Заключение

В результате выполненной работы определена геометрия корректирующих дипольных вертикальных и горизонтальных магнитов блока сверхпроводящих соленоидов для управления поляризацией пучков в коллайдере NICA.

Проведен расчет основных магнитных и тепловых характеристик этих магнитов. Предложена схема защиты диполей и проведен расчет максимальной температуры в процессе перехода корректирующих диполей в нормальное состояние.

Список литературы

1. <https://nica.jinr.ru/ru/>
2. Агеев А.И., Алтухов Ю.В., Богданов И.В., Козуб С.С., Ткаченко Л.М., Шувалов В.И., Борисов В.В., Гусаков Ю.В., Костромин С.А., Никифоров Д.Н., Сыресин Е.М. «Сверхпроводящие соленоиды для управления поляризацией пучков в коллайдере NICA». // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2025. №2(128) стр.130-134.
3. I. Bogdanov, E. Kashtanov, S. Kozub, G. Kuznetsov, L. Tkachenko, V. Pleskach, A. Sery, V. Shiltsev, V. Sytnik, S. Zintchenko, V. Zubko, "Tevatron Electron Lens Magnetic System", Proc. of 2001 Particle Accelerator Conf., Chicago, Illinois, USA, June 18-22, 2001, pp.3630-3633.
4. V.Y. Fil'kin, V.P. Kosenko, V.L. Mette, K.P. Myznikov, A.D. Nikulin, V.A. Vasiliev, G.K. Zelensky, A.V. Zlobin, The Properties of Industrial Superconducting Composite Wire for the UNK Magnets, Adv. in Cryog. Eng., vol. 36 part A (1990) 317.
5. I. Bogdanov, S. Kozub, P. Shcherbakov, L. Tkachenko, V. Zubko, C. Muehle, G. Moritz, L. Tommasini. "Optimization of a Dipole with Partially Keystoned Cable for the SIS 300" IEEE Trans. Appl. Sup Vol. No 395-398.
6. Г. Брехна. "Сверхпроводящие магнитные системы". "Мир", Москва, 1076, стр. 291, 298.
7. I. Bogdanov, S. Kozub, P. Shcherbakov, P. Slabodchikov, L. Tkachenko, V. Zubko, G. Moritz, V. Sytnikov. "Methods for Reducing Cable Losses in Fast-Cycling Dipoles for the SIS300 Ring". EPAC 2004, Lucerne, Switzerland, 2004, p.p.1750-1752.
8. Л. М. Ткаченко. "Пакет программ MULTIC для расчета магнитного поля произвольной конфигурации", препринт ИФВЭ 92-28, 1992, 48 стр.
9. Физическое обоснование УНК. Сверхпроводящий кольцевой электромагнит. Ускорительно-накопительный комплекс на энергию 300 ГэВ. II очередь УНК. т.9 альбом 2, Серпухов, 1990.

Поступила в редакцию / Received 10.04.2025

Поступила после рецензирования / Revised 09.06.2025

Принята к публикации / Accepted 20.08.2025