

PACS: 07.55.Db, 84.32.Nh, 84.40.Ik, 84.71.Ba, 84.71.Mn

Н.В. Таряник¹, Д.В. Варюхин¹, Д.О. Федюк¹, Н.С. Шеставин²

СВЕРХПРОВОДНИКОВАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА С БОЛЬШОЙ УГЛОВОЙ АПЕРТУРОЙ В РАДИАЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ

¹Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

²Донецкий национальный университет

Статья поступила в редакцию 12 марта 2021 года

Описана сверхпроводниковая магнитная система (СМС), состоящая из 4 пар катушек Гельмгольца с общим центром и осью симметрии. Внутренняя пара системы включена встречно остальным трем парам катушек. СМС создает магнитное поле с индукцией 3 Т, неоднородностью менее 3% на длине 50 мм и обеспечивает свободный доступ в рабочую зону в радиальном направлении с угловой апертурой 60°.

Ключевые слова: сверхпроводниковая магнитная система, система катушек Гельмгольца, угловая апертура, неоднородность магнитного поля, корректирующие катушки, аксиальная и радиальная силы

При проведении многих исследований требуется доступ в центральную рабочую область СМС в радиальном направлении. Так, при изучении взаимодействия и рассеяния нейтронов на магнитоактивных материалах возникает необходимость в создании установки, позволяющей наблюдать рассеяние нейтронов на образцах, которые находятся в сильном однородном магнитном поле с вектором индукции, перпендикулярным направлению пучка нейтронов. Иными словами, магнитная система должна иметь в радиальном направлении свободный доступ к изучаемому образцу с заданным углом раскрытия (угловой апертурой). Аналогичные требования к магнитной системе предъявляются и при проведении оптических исследований.

Задачей разработки было создание СМС, удовлетворяющей следующим требованиям:

- индукция магнитного поля в центре – 2–3 Т;
- неоднородность магнитного поля в радиальном направлении на образце длиной 50 мм – не более 5%;
- угловая апертура доступа в центральную область в радиальном направлении – не менее 60°;
- габаритные размеры СМС при горизонтальном расположении оси симметрии не должны превышать диаметр цилиндрической гелиевой емкости криостата величиной 300 мм.

Изучение возможных геометрических решений поставленной задачи показало, что на первый взгляд в качестве такой магнитной системы может быть использована система катушек Гельмгольца, имеющая в радиальном направлении кольцевой свободный зазор – поперечную щель, которая также служит для повышения однородности магнитного поля [1,2]. Расчеты показали, что при диаметре цилиндрической гелиевой емкости криостата величиной 300 mm и угловой апертуре 60° в радиальном направлении зазор между катушками системы Гельмгольца составляет не менее 100 mm, неоднородность магнитного поля на длине 50 mm в радиальном направлении – 12%, вес СМС – не менее 24 kg.

Одним из решений повышения однородности магнитного поля такой магнитной системы является уменьшение зазора между катушками хотя бы во внутренней ее части (рис. 1). Трапецевидное сечение обмотки позволяет создавать более сильное магнитное поле, однако его однородность существенно не улучшается. Кроме того, недостатком также является сложность в изготовлении обмоток с таким сечением.

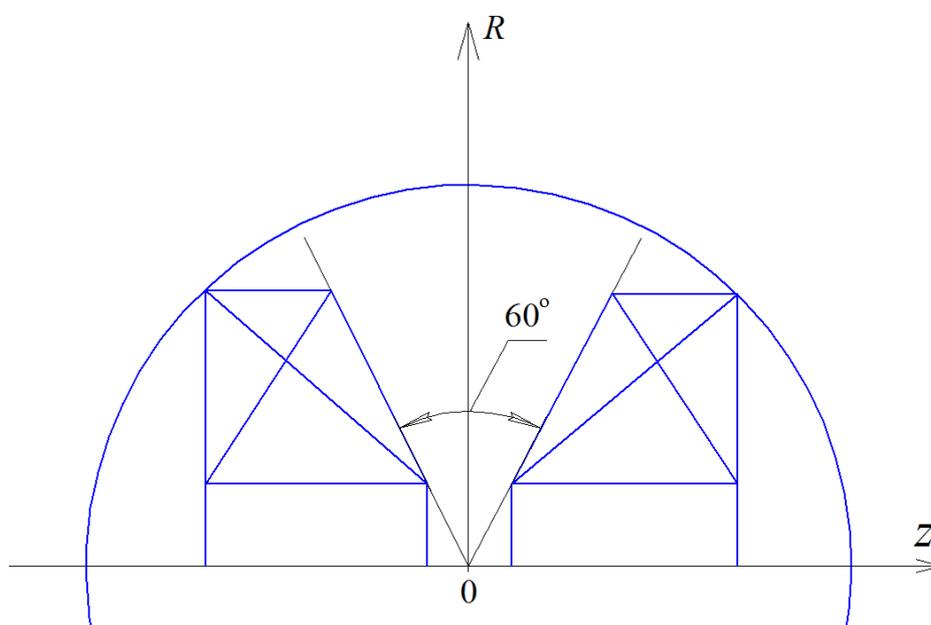


Рис. 1. Схема магнитной системы с трапецевидными катушками

Нами предложена новая конструкция магнитной системы, состоящая из 4 пар катушек Гельмгольца с прямоугольным сечением обмоток, имеющих общие центр и ось симметрии (рис. 2). В качестве корректирующего элемента для повышения однородности магнитного поля используется пара внутренних катушек, которые по току включены встречно остальным трем парам катушек [3,4]. Геометрические размеры катушек и механические усилия в них приведены в таблице.

Таблица

№ пары катушек	Диаметр		Длина		Суммарная сила в поле ЗТ, Н	
	mm				радиальная F_{Rsum}	аксиальная F_{Zsum}
	внутренний	наружный	поперечной щели	пары катушек		
1	20	50	44	86	-412.8	-77.0
2	53	97	68	154	2996.0	302.7
3	100	140	92	174	2117.2	69.7
4	143	190	120	190	225.5	-615.0

На рис. 3 представлено распределение магнитного поля вдоль оси симметрии каждой пары катушек, а также их суммарное распределение поля как со встречным включением тока в 1-й паре катушек, так и при согласном включении. Из хода кривой 5 видно, что при встречном включении 1-й пары катушек по отношению к остальным парам неоднородность поля вдоль оси на длине 10 mm составляет 0.23%, а на 30 mm – 2.5%. Расчетная неоднородность поля в радиальном направлении на длине 50 mm составляет 2.62%, что обеспечивает выход магнитной системы на заданные параметры с учетом возможных неточностей изготовления обмотки.

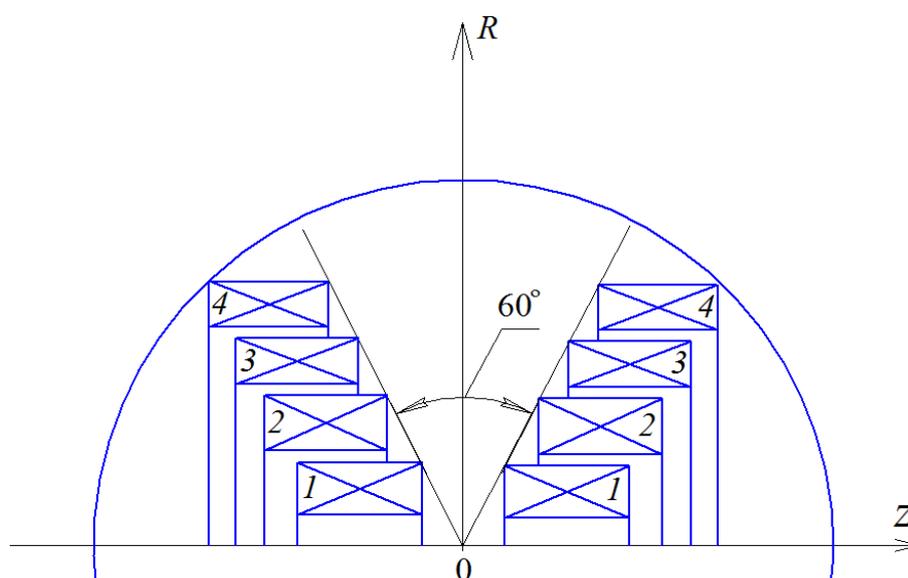


Рис. 2. Схема магнитной системы, состоящей из 4 пар катушек: 1 – корректирующая катушка с обратным током, 2–4 – основные катушки

При согласном включении всех пар катушек СМС абсолютная величина магнитного поля увеличивается, а его однородность, наоборот, ухудшается на порядок.

При использовании сверхпроводникового провода из сплава НТ-50 диаметром 0.5 mm с реальной плотностью намотки 330 turn/cm^2 и токе в обмотке 70 А индукция магнитного поля в центре магнитной системы составляет 3 Т.

Включение тока в 1-й паре катушек встречно току остальных трех пар катушек приводит к увеличению индукции магнитного поля в обмотке. Расчеты распределения магнитного поля показали, что максимальное значение отношения величины индукции в данной точке обмотки к величине индукции в центре СМС составило 2.45, что при индукции поля в центре системы 3 Т соответствует максимальному значению поля в обмотке 7.4 Т, которое имеет место во 2-й паре катушек в нижних слоях обмотки. Минимальное значение индукции поля наблюдается в 4-й паре катушек.

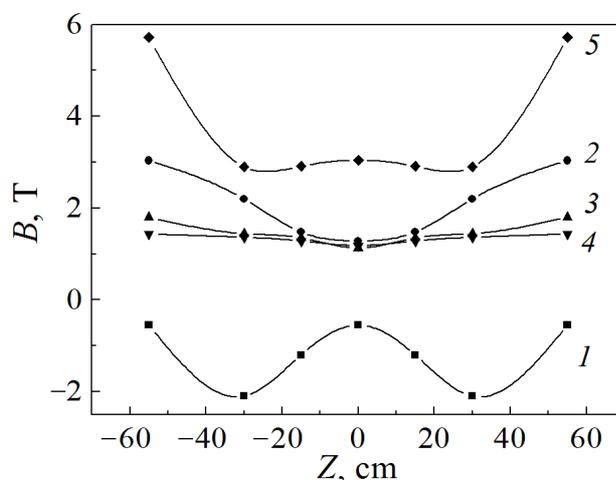
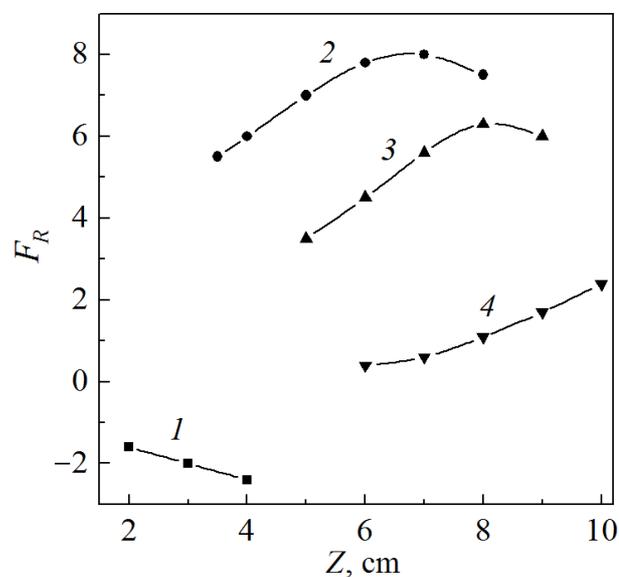


Рис. 3. Распределение магнитных полей вдоль оси Z магнитной системы, создаваемых 1–4-й парами катушек (кривые 1–4); 5 – суммарное поле

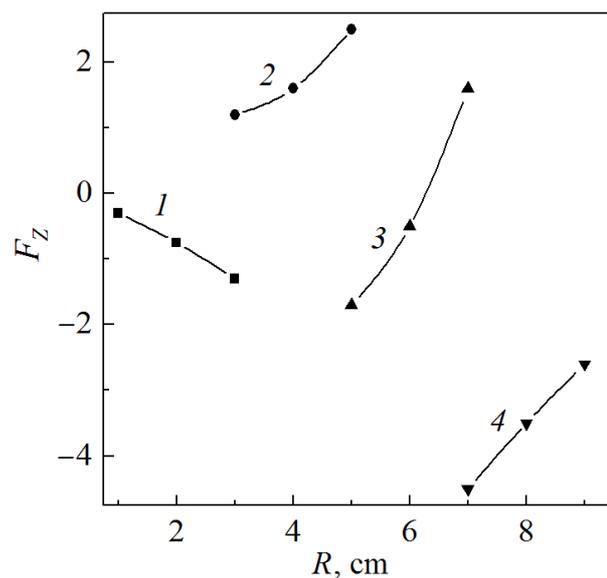
Выполнены расчеты механических усилий в обмотке СМС. Аксиальная составляющая индукции магнитного поля вызывает радиальные силы F_R , действующие на условные витки обмотки с током. Максимальное значение радиальной силы, приложенной к виткам 1-го слоя 2-й пары катушек, $F_{R_{\max}} = 35.5 \text{ Н}$. Просуммировав силы, действующие на ряды ячеек, получим распределение сил F_R , приведенных к $F_{R_{\max}}$, действующих на основание каркаса 1-й пары катушек и на бандажи остальных пар катушек (рис. 4,а).

Радиальная составляющая индукции магнитного поля создает аксиальные силы, которые стремятся сместить витки с током в осевом направлении СМС. Максимальное значение аксиальной силы $F_{Z_{\max}} = 30.7 \text{ Н}$, и она действует на последние витки 1-го слоя 4-й пары катушек. Распределение при-

веденных к $F_{Z_{\max}}$ сил F_Z , действующих на боковые стенки каркасов катушек, показано на рис. 4,б. Значения суммарных аксиальных $F_{Z_{\text{sum}}}$ и радиальных $F_{R_{\text{sum}}}$ сил, действующих на пары катушек, приведены в таблице.



а



б

Рис. 4. Силы, действующие на 1–4-ю пары катушек: а – радиальные, б – аксиальные

В результате расчета распределения магнитного поля и механических сил решено большинство конструктивных вопросов сложной сверхпроводниковой магнитной системы, состоящей из 4 пар катушек Гельмгольца и обеспечивающей угловую апертуру в радиальном направлении величиной 60° .

Выводы

1. Проведены исследования возможных геометрических решений магнитной системы, обеспечивающей свободный доступ в ее центральную зону в радиальном направлении с угловой апертурой 60° . Оптимальной конструкцией является СМС, которая состоит из 4 пар катушек Гельмгольца с общим центром и осью симметрии. При этом внутренняя пара включена встречно остальным трем парам катушек.

2. Магнитная система позволяет создавать магнитное поле с индукцией 3 Т при однородности в радиальном направлении 2.62% на длине 50 мм и в осевом направлении – 0.23% на длине 10 мм.

1. *Д.Б. Монгомери*, Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов, Мир, Москва (1971).
2. *Г.А. Штамбергер*, Устройство для создания слабых постоянных магнитных полей, Наука, Новосибирск (1972).
3. *В.И. Зонзов, В.И. Курочкин, Н.С. Шеставин*, Вопросы атомной науки и техники. Серия: Общая и ядерная физика № 2 (23), 42 (1983).
4. *Н.С. Шеставин, В.И. Зонзов*, Вопросы атомной науки и техники. Серия: Общая и ядерная физика № 2 (23), 48 (1983).

N.V. Taryanik, D.V. Varyukhin, D.O. Fedyuk, N.S. Shestavin

SUPERCONDUCTING MAGNETIC SYSTEM WITH HIGH ANGULAR APERTURE IN RADIAL AXIS

A superconducting magnetic system (SMS) is described that is composed by four pairs of Helmholtz coils with the common center and symmetry axis. The internal pair of the system is connected opposite to the rest of coils. SMS forms magnetic field characterized by induction of 3 T, non-uniformity less of 3% at the length of 50 mm and provides free access to the operation zone in radial axis with the angular aperture of 60° .

Keywords: superconducting magnetic system, system of Helmholtz coils, angular aperture, non-uniformity of magnetic field, correcting coils, axial and radial forces

Fig. 1. Scheme of a magnetic system with trapezium-shaped coils

Fig. 2. Scheme of a magnetic system composed by 4 pairs of coils: 1 – correcting coil with reverse current, 2–4 – basic coils

Fig. 3. Magnetic field distribution along Z – axis of the magnetic system formed by the 1–4-th pairs of coils (curves 1–4); 5 – total field

Fig. 4. Forces applied to the 1–4-th pair of coils: a – radial, b – axial