

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

Н.В. Таряник, Д.В. Варюхин, Д.О. Федюк

КОРРЕКЦИЯ ОДНОРОДНОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО СОЛЕНОИДА

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

Статья поступила в редакцию 24 июня 2019 года

Предложено два метода повышения исходной однородности магнитного поля сверхпроводникового соленоида (СПС), которые существенно упрощают процесс коррекции однородности поля. Первый (токовый) позволяет уменьшить количество сверхпроводниковых обмоток компенсации радиальных градиентов поля соленоида в два раза. Вторым методом заключается в запитке обмоток компенсации осевых градиентов поля индуктивным путем без использования дополнительных источников питания.

Ключевые слова: сверхпроводниковый соленоид, обмотки компенсации, градиент магнитного поля, индуктивно-запитываемые обмотки компенсации, однородность магнитного поля, индуктивность и взаимная индуктивность

Введение

Для повышения однородности магнитного поля СПС используются методы пассивной и активной коррекции. Пассивная заключается в выполнении в обмотке соленоида корректирующего элемента – поперечной щели, внутреннего или наружного паза. Такой элемент позволяет сократить один или два члена разложения поля в степенной ряд по полиномам Лежандра [1,2], которыми обусловлена исходная однородность магнитного поля. Однородность поля этих соленоидов, преимущественно лабораторных, не высокая и редко превышает 10^{-4} Ое в объеме 1 см^3 . Метод активной коррекции однородности поля состоит в использовании дополнительных сверхпроводниковых обмоток, которые по отдельности запитывают током для компенсации осевых и радиальных градиентов поля СПС. Количество таких обмоток достигает 6–10 шт., что усложняет процесс коррекции и настройки высокой однородности магнитного поля соленоида.

В настоящей работе описано два метода коррекции однородности магнитного поля СПС, которые существенно упрощают этот процесс. Первый (токовый) позволяет уменьшить количество сверхпроводниковых обмоток компенсации радиальных градиентов поля СПС и источников питания в два раза. Вторым методом заключается в запитке обмоток компенсации осевых градиентов поля индуктивным путем без использования источников питания.

1. Токовый метод коррекции однородности магнитного поля СПС

Высокая однородность магнитного поля СПС для спектрометров ЭПР и ЯМР обеспечивается использованием сверхпроводниковых обмоток компенсации осевых dH/dz , d^2H/dz^2 , d^3H/dz^3 и радиальных dH/dx , dH/dy , $d^2H/dxdz$, $d^2H/dydz$, $d^2H/d(xy)$ и $d^2H/d(x^2-y^2)$ градиентов магнитного поля [3–5]. Обмотки компенсации осевых градиентов поля выполнены в виде цилиндрических катушек, а обмотки компенсации радиальных градиентов – в виде седлообразных. Коррекция однородности поля заключается в последовательной запитке током этих обмоток для уменьшения или полной компенсации соответствующих градиентов поля СПС. Контроль степени однородности поля осуществляют, как правило, по сужению линии сигнала ЭПР или ЯМР. Так как количество обмоток компенсации велико, процесс настройки высокой однородности поля (на уровне 10^{-6} – 10^{-7} Ое) трудоемкий, длительный во времени и выполняется в несколько круговых циклов до тех пор, пока не будут установлены оптимальные токи в обмотках компенсации градиентов поля, причем прежде всего в обмотках компенсации радиальных градиентов. Сложность процесса настройки высокой однородности поля соленоида с помощью обмоток компенсации радиальных градиентов поля dH/dR , d^2H/dR^2 , $d^2H/dRdz$ обусловлена тем, что их направление в СПС неизвестно. Поэтому традиционно производится компенсация их компонент dH/dx , dH/dy , $d^2H/dxdz$, $d^2H/dydz$, $d^2H/d(xy)$ и $d^2H/d(x^2-y^2)$ вдоль условно выбранных осей x и y в радиальном направлении. Следовательно, используется вдвое больше обмоток компенсации радиальных градиентов и источников питания, чем необходимо.

Цель работы – упрощение процесса настройки высокой однородности магнитного поля СПС.

На рис. 1 показан разрез сверхпроводниковой магнитной системы в плоскости, перпендикулярной оси симметрии. Магнитная система содержит соленоид 1 и набор обмоток компенсации осевых градиентов и компонент радиальных градиентов поля (условно показаны только обмотки 2 и 3 для компенсации компонент градиентов поля соответственно dH/dx и dH/dy).

Настройку высокой однородности магнитного поля СПС выполняют следующим образом. После изготовления соленоида снаружи или между его секциями устанавливают обмотки компенсации осевых градиентов и компонент радиальных градиентов поля. Затем СПС охлаждают до температуры жидкого гелия, размыкают сверхпроводниковый ключ (на рисунке не показан), от внешнего источника питания вводят ток и возбуждают заданное значение магнитного поля. После этого ключ «замораживают» и переводят СПС в режим работы с высокой стабильностью поля.

Для измерения и контроля однородности магнитного поля используют, например, тесламетр ЯМР [6]. По ширине сигнала ЯМР определяют исходную однородность поля СПС и производят ее коррекцию посредством компенсации осевых градиентов поля dH/dz , d^2H/dz^2 , d^3H/dz^3 путем запитки током

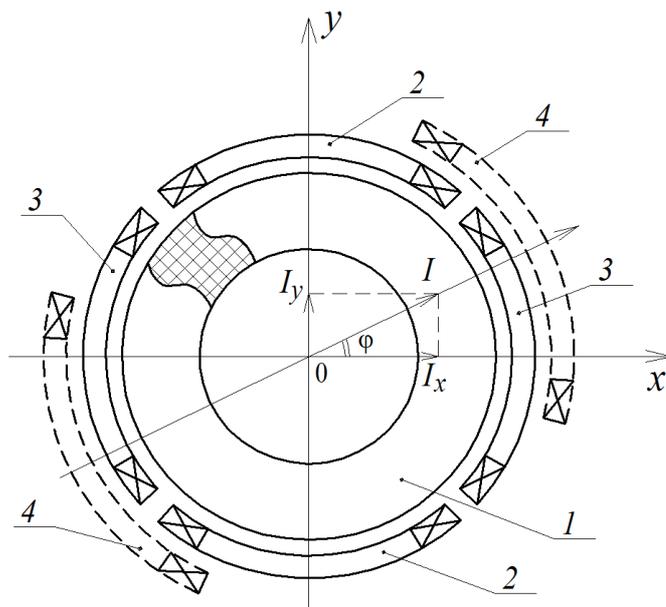


Рис. 1. Сверхпроводниковая магнитная система в разрезе (вид сверху): 1 – соленоид, 2 и 3 – обмотки компенсации компонент градиентов поля соответственно dH/dx и dH/dy , 4 – обмотка компенсации результирующего радиального градиента поля dH/dR

соответствующих обмоток. Затем вводят токи в обмотки компенсации компонент радиальных градиентов с целью достижения наивысшей однородности поля СПС. Для этого сначала определяют оптимальные токи I_{1x} и I_{1y} соответственно в обмотках 2 и 3 компенсации компонент градиентов поля dH/dx и dH/dy . Затем вычисляют угол φ_1 , под которым, например, по отношению к оси x направлен результирующий радиальный градиент поля dH/dR :

$$\varphi_1 = \text{arctg}(I_{1y}/I_{1x}). \quad (1)$$

Аналогично определяют оптимальные токи I_{2x} и I_{2y} в обмотках компенсации компонент градиентов поля соответственно $d^2H/dxdz$ и $d^2H/dydz$, а также токи I_{3x} и I_{3y} в обмотках компенсации компонент градиентов соответственно $d^2H/d(xy)$ и $d^2H/d(x^2-y^2)$. Затем вычисляют углы φ_2 и φ_3 для определения направления результирующих радиальных градиентов поля соответственно $d^2H/dRdz$ и d^2H/dR^2 .

Повышают температуру СПС до комнатной и вместо двух обмоток 2, 3 компенсации компонент градиентов поля dH/dx и dH/dy устанавливают под углом φ_1 одну из этих обмоток (условно показана на рис. 1 под номером 4) для компенсации результирующего градиента поля dH/dR ; вместо двух обмоток компенсации компонент градиентов $d^2H/dxdz$ и $d^2H/dydz$ под углом φ_2 – одну для компенсации градиента $d^2H/dRdz$ и, наконец, вместо обмоток компенсации компонент градиентов $d^2H/d(xy)$ и $d^2H/d(x^2-y^2)$ под углом φ_3 – обмотку для компенсации градиента d^2H/dR^2 .

Токи в обмотках компенсации градиентов поля dH/dR , $d^2H/dRdz$ и d^2H/dR^2 определяют из выражения

$$I_i = \left[(I_{ix})^2 + (I_{iy})^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где $i - 1, 2$ и 3 .

В целях экономии жидкого гелия аналогичные измерения можно провести при температуре жидкого азота 77 К. В этом случае обмотки компенсации осевых градиентов и компонент радиальных градиентов поля СПС изготавливают из материала с высокой электропроводностью, например меди.

Таким образом, предложенный способ коррекции однородности магнитного поля упрощает процесс настройки высокой однородности поля СПС за счет использования в два раза меньшего количества обмоток компенсации радиальных градиентов поля и источников питания этих обмоток.

И в заключение следует отметить, что процесс коррекции однородности магнитного поля соленоида можно еще существенно упростить. Для этого необходимо рассчитать геометрические размеры всех обмоток компенсации градиентов поля, при которых ток в соленоиде будет равен токам в обмотках. Затем нужно последовательно соединить их между собой и с соленоидом и запитать всю магнитную систему от одного источника питания током, равным току СПС. При таком соединении и запитке током обмотки компенсации градиентов поля будут автоматически осуществлять коррекцию однородности поля соленоида.

2. Коррекция однородности магнитного поля СПС с помощью индуктивно-запитываемых обмоток компенсации градиентов поля

Известно, что при возбуждении магнитного поля в СПС в индуктивно-связанном с ним короткозамкнутом контуре наводится ток, магнитное поле которого направлено встречно полю соленоида. Ток в короткозамкнутом контуре определяется из выражения

$$I_2 = -I_1 (M / l_2), \quad (3)$$

где I_1, I_2 – ток и соответственно в СПС и контуре; l_2 – индуктивность контура; M – взаимная индуктивность СПС и контура.

С учетом этого свойства индуктивно-связанных контуров [7,8] была разработана конструкция индуктивно-запитываемых короткозамкнутых сверхпроводниковых обмоток компенсации линейного dH/dz и квадратичного d^2H/dz^2 градиентов поля с целью повышения однородности магнитного поля СПС. Расчет обмотки градиента поля dH/dz выполнен с учетом того, чтобы она не создавала кубический градиент поля d^3H/dz^3 , а расчет обмотки d^2H/dz^2 – из условия, чтобы она не создавала четвертый градиент поля d^4H/dz^4 .

Обмотки компенсации градиентов магнитного поля dH/dz и d^2H/dz^2 в разрезе показаны на рис. 2,а и б соответственно. Первая обмотка представляет собой

две одинаковые встречно-включенные однослойные катушки. При этом соблюдается следующее условие: если приведенная к диаметру общая длина обмотки $\beta_1 = l_1/D = 1.37$, а приведенный зазор между катушками $\beta_2 = l_2/D = 0.61$, то такая обмотка должна создавать только линейный градиент поля dH/dz , а следующий кубический градиент d^3H/dz^3 будет равен нулю [8].

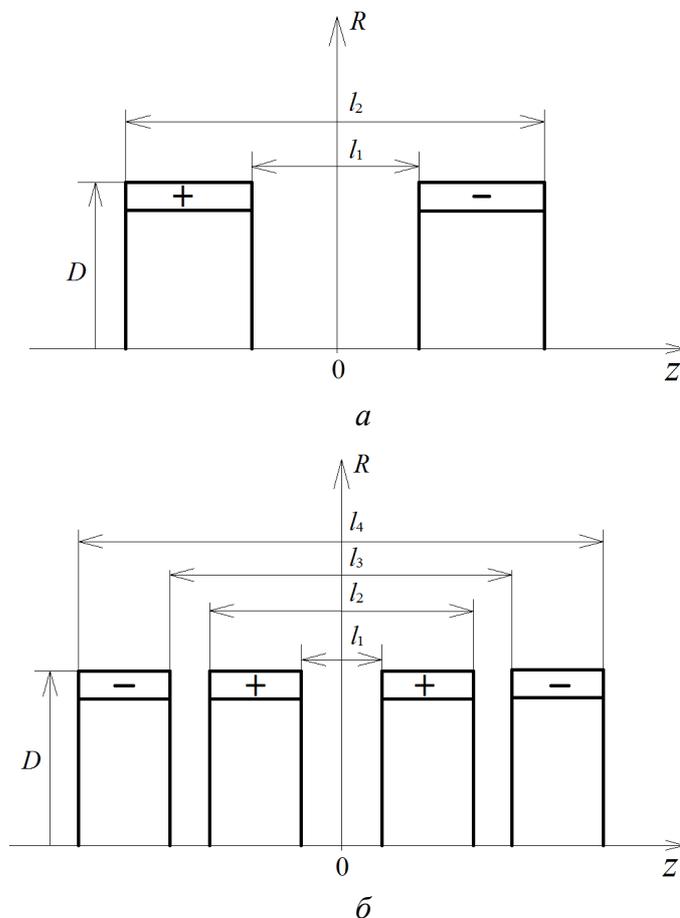


Рис. 2. Индуктивно-запитываемые обмотки компенсации градиентов поля dH/dz (а) и d^2H/dz^2 (б)

Обмотка компенсации градиента d^2H/dz^2 выполнена в виде двух пар одинаковых катушек, при этом пара согласно-включенных крайних катушек включена встречно паре согласно-включенных внутренних катушек. Если приведенный к среднему диаметру зазор между внутренними катушками $\beta_1 = l_1/D = 0.07$, приведенная общая длина этих катушек $\beta_2 = l_2/D = 0.73$, приведенный зазор между крайними катушками $\beta_3 = l_3/D = 0.78$ и приведенная общая длина обмотки $\beta_4 = l_4/D = 1.44$, то такая обмотка будет создавать только квадратичный градиент поля d^2H/dz^2 и не будет создавать четвертый градиент d^4H/dz^4 [11].

Обмотки компенсации градиентов поля dH/dz и d^2H/dz^2 изготавливают из сверхпроводящего провода с высокими критическими параметрами, наматывают на тонкостенном каркасе и устанавливают в отверстиях и центре СПС.

К выводам обмоток подключены сверхпроводниковые ключи, а для обеспечения высокой стабильности магнитного поля соединительные контакты выполнены холодной сваркой сверхпроводников [9]. Их сопротивление не превышает 10^{-12} – 10^{-14} Ω и при нем индуктивно-наведенный в обмотках ток практически не затухает.

Коррекцию однородности магнитного поля СПС с помощью этих обмоток выполняют следующим образом.

Если при вводе тока в соленоид последний создает магнитное поле, распределение вдоль оси которого характеризуется квадратичным градиентом поля d^2H/dz^2 (кривая 1, рис. 3,а), то в короткозамкнутой сверхпроводниковой обмотке компенсации этого градиента индуктивным путем наводится ток. Этот ток создает магнитное поле, изменяющееся вдоль оси как градиент поля d^2H/dz^2 . А поскольку магнитные поля соленоида и обмотки компенсации этого градиента направлены встречно друг другу (кривые 1 и 2, рис. 3,а), то и их градиенты также направлены встречно. Поэтому результирующий градиент поля d^2H/dz^2 будет равен или близок к нулю, а однородность магнитного поля в центре соленоида улучшится (кривая 3, рис. 3,а) и будет определяться в первую очередь нескомпенсированным градиентом поля d^4H/dz^4 СПС.

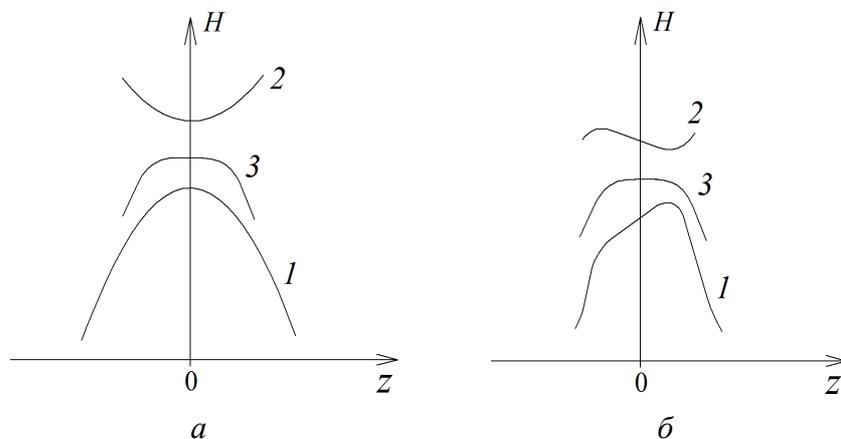


Рис. 3. Коррекция однородности магнитного поля соленоида с помощью индуктивно-запитываемых обмоток компенсации градиентов d^2H/dz^2 (а) и dH/dz (б): 1 – профиль поля соленоида до коррекции, 2 – профили поля обмоток компенсации градиентов d^2H/dz^2 (изображение а) и dH/dz (б), 3 – результирующий профиль поля соленоида

Аналогично, если распределение магнитного поля СПС вдоль его оси будет характеризоваться линейным градиентом поля dH/dz (кривая 1, рис. 3,б), то в короткозамкнутой сверхпроводниковой обмотке компенсации этого градиента индуктивным путем наведется ток, магнитное поле которого скомпенсирует линейный градиент поля соленоида, в результате чего однородность его магнитного поля улучшится (кривая 3, рис. 3,б). Кривая 2 на рисунке характеризует профиль поля этой обмотки.

Индуктивно-запитываемые сверхпроводниковые обмотки компенсации градиентов поля dH/dz и d^2H/dz^2 были использованы для повышения одно-

родности магнитного поля лабораторного СПС диаметром внутреннего отверстия 45 mm, наружным диаметром 90 mm и длиной 140 mm. Соленоид создает магнитное поле с индукцией 7 Т и относительной неоднородностью $1.3 \cdot 10^{-3}$ Ое на 10 mm вдоль оси, что соответствует абсолютной неоднородности поля 91 Ое. Обмотка компенсации градиента поля dH/dz состоит из двух однослойных встречно-включенных катушек диаметром 40 mm. Общая длина обмотки равна 54.8 mm, зазор между катушками – 24.4 mm, число витков в катушках – по 40. Суммарная площадь витков обмотки 0.1 m^2 , индуктивность $2.3 \cdot 10^{-4}$ Н. Обмотка размещена в отверстии СПС.

Из закона сохранения потокосцепления для короткозамкнутых контуров с нулевым омическим сопротивлением наводимый ток в контуре определяется из выражения

$$\Phi = \Delta BS = -LI, \quad (4)$$

где Φ – поток вектора магнитной индукции, созданного внешним по отношению к контуру полем, ΔB – изменение индукции магнитного поля в области расположения контура, S – суммарная площадь витков обмотки, L – индуктивность контура, I – ток в контуре. Из выражения (3) следует, что ток в контуре будет

$$I = -\Delta BS / L. \quad (5)$$

Если неоднородность магнитного поля обусловлена присутствием в распределении поля СПС градиента dH/dz , то согласно (5) в индуктивно-запитываемой сверхпроводниковой обмотке компенсации градиента dH/dz наведется ток величиной $I = (0.0091 \text{ Т} \times 0.1 \text{ m}^2) / 2.3 \cdot 10^{-4} \text{ Н} = 3.9 \text{ А}$, градиент магнитного поля которой скомпенсирует соответствующий градиент поля соленоида. Однородность магнитного поля СПС повысится более чем на порядок.

Индуктивно-запитываемая сверхпроводниковая обмотка компенсации градиента d^2H/dz^2 выполнена в виде двух встречно-включенных пар четырехслойных катушек, намотана сверху обмотки компенсации градиента dH/dz и имеет средний диаметр 42 mm. Число витков в каждой катушке равно 120, суммарная площадь витков обмотки – 0.77 m^2 , а ее индуктивность – $6.5 \cdot 10^{-4}$ Н. Если абсолютная неоднородность магнитного поля соленоида равна тем же 91 Ое, то при возбуждении магнитного поля СПС с индукцией 7 Т в обмотке компенсации градиента d^2H/dz^2 наведется ток величиной 10.8 А, градиент магнитного поля которого скомпенсирует соответствующий градиент поля соленоида. Конечная однородность поля улучшится и будет определяться некомпенсированным градиентом поля соленоида d^4H/dz^4 .

Если в распределении магнитного поля одновременно присутствуют оба градиента поля dH/dz и d^2H/dz^2 , то при вводе тока в соленоид в индуктивно-запитываемых обмотках автоматически наведутся токи, магнитные поля которых скомпенсируют эти градиенты поля соленоида.

И в заключение следует отметить, что индуктивно-запитываемые сверхпроводниковые обмотки компенсации осевых dH/dz и d^2H/dz^2 градиентов

магнитного поля могут быть использованы для повышения точности измерения магнитного поля вдоль оси СПС. В этом случае эти обмотки устанавливаются снаружи штанги измерителя магнитного поля, например датчика Холла или датчика тесламетра ЯМР. При перемещении датчика поля вдоль оси соленоида в этих обмотках будут наводиться токи, магнитные поля которых, накладываясь на поле соленоида, повысят однородность поля последнего в области расположения датчика поля и соответственно повысится точность измерения поля.

Выводы

1. Предложенный метод токовой коррекции однородности магнитного поля СПС упрощает процесс настройки высокой однородности магнитного поля за счет использования в два раза меньшего количества обмоток компенсации радиальных градиентов поля dH/dR , d^2H/dR^2 и $d^2H/dRdz$.

2. Разработана конструкция и приведены размеры индуктивно-запитываемых короткозамкнутых сверхпроводниковых обмоток компенсации линейного dH/dz и квадратичного d^2H/dz^2 градиентов поля для компенсации соответствующих градиентов поля соленоида с целью повышения его однородности.

1. Д. Монтгомери, Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов, Мир, Москва (1971).
2. Г. Брехна, Сверхпроводящие магнитные системы, Мир, Москва (1976).
3. В.Б. Назаров, В.А. Забродин, И.С. Краинский, Л.И. Гальперин, ПТЭ № 5, 208 (1971).
4. Д.В. Варюхин, Н.В. Таряник, Е.А. Дворников, Д.О. Федюк, ФТВД 27, № 2, 98 (2017).
5. Д.О. Федюк, Д.В. Варюхин, Л.Н. Прокофьева, Н.В. Таряник, ФТВД 29, № 1, 121 (2019).
6. А.А. Глуценко, А.Я. Лаптиенко, Н.Н. Карагай, В.И. Курочкин, Измерительная техника № 6, 56 (1984).
7. С.Ф. Непрstead, Y.B. Kim, A.R. Strnad, J. Appl. Phys. 34, 3226 (1963).
8. В.В. Сухой, В.И. Курочкин, А.Я. Лаптиенко, А.О. Тимошенко, в сб.: Вопросы атомной науки и техники. Серия: Общая и ядерная физика, ХФТИ АН УССР, Харьков (1981), вып. 3(17), с. 46–49.
9. А.Я. Лаптиенко, В.А. Похилов, в сб.: Вопросы атомной науки и техники. Серия: Общая и ядерная физика, ХФТИ АН УССР, Харьков (1986), вып. 2(6), с. 27–30.
10. А.с. № 1371236, Зонд ЯМР-тесламетра, Н.В. Таряник, В.В. Сухой, А.Я. Лаптиенко, В.И. Курочкин, Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 01 октября 1987 г.
11. А.с. № 1230281, Сверхпроводящая магнитная система, Н.В. Таряник, В.В. Сухой, А.Я. Лаптиенко, В.И. Курочкин, Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 8 января 1986 г.

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

CORRECTION OF UNIFORMITY OF MAGNETIC FIELD OF AN SUPERCONDUCTING SOLENOID

Two methods of enhancement of the original uniformity of the magnetic field of a superconducting solenoid (SCS) are suggested that substantially simplify the correction of the field homogeneity. The first method (current-inducing one) allows twice reduction of the number of superconducting coils aimed to compensation of radial gradients of the solenoid field. The second method implies inductive powering of the coils of compensation of the axial field gradients without additional power sources.

Keywords: superconducting solenoid, compensation coils, magnetic field gradient, inductively powered compensation coils, magnetic field uniformity, inductance and mutual inductance

Fig. 1. Section of the superconducting magnetic system (top view): 1 – solenoid, 2 and 3 – coils of compensation of the field gradient components dH/dx and dH/dy , respectively, 4 – coil of compensation of the resulting radial field gradient dH/dR

Fig. 2. Inductively powered coils of compensation of the field gradients dH/dz (a) and d^2H/dz^2 (b)

Fig. 3. Correction of uniformity of the solenoid magnetic field by inductively powered coils of compensation of the gradients d^2H/dz^2 (a) and dH/dz (b): 1 – solenoid field profile before correction, 2 – field profiles of the coils of compensation of the gradients d^2H/dz^2 (image a) and dH/dz (b), 3 – resulting profile of the solenoid field