

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

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

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КОРОТКОЗАМКНУТОГО СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО СОЛЕНОИДА

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

Статья поступила в редакцию 6 февраля 2018 года

Проведены исследования по экранированию рабочей зоны короткозамкнутого сверхпроводящего соленоида от внешних магнитных полей-помех (ВПП) с помощью дополнительных сверхпроводниковых контуров, индуктивно связанных с соленоидом. Получены решения, которые определяют размеры двух универсальных контуров для экранирования рабочей зоны соленоида от внешнего однородного поля-помехи. Экспериментальные исследования показали, что коэффициент экранирования от ВПП этих контуров составляет не менее 100. Получены также решения универсального контура для экранирования рабочей зоны соленоида от неоднородной помехи, обусловленной квадратичным градиентом поля. Показано, что использование сверхпроводниковых контуров для одновременной компенсации однородной и неоднородной помех повышает стабильность однородного магнитного поля соленоида в 200 раз.

Ключевые слова: сверхпроводниковый соленоид, стабильность магнитного поля, однородность поля, экранирующий контур, внешнее магнитное поле-помеха, коэффициент экранирования, градиент магнитного поля, сигнал ядерного магнитного резонанса

Сильные магнитные поля с высокой однородностью и стабильностью получают с помощью сверхпроводниковых соленоидов, замкнутых ключом. Однако часто работа соленоида в таком режиме сопровождается влиянием на стабильность поля ВПП, вызванных работой находящихся поблизости мощных электроустановок, контурами заземления, нестабильностью поля Земли и др. В некоторых случаях такие ВПП способны ухудшить стабильность магнитного поля соленоида до уровня, который становится неприемлемым для работы, например, спектрометров ЭПР и ЯМР.

Задача устранения влияния ВПП на стабильность магнитного поля соленоида не нова и имеет ряд традиционных решений, связанных с применением систем с обратной связью, управляемых сложной электроникой [1–3]. В соленоидах эту задачу можно решить путем использования явления сохранения потокосцепления для замкнутых контуров, которое связано с малым омическим сопротивлением либо с его отсутствием [4]:

$$\Phi + LI = \text{const} , \quad (1)$$

где Φ – поток вектора магнитной индукции, созданного внешним по отношению к контуру полем, L – индуктивность контура, I – ток в контуре.

Ранее такой способ повышения стабильности магнитного поля был рассмотрен для одноконтурных соленоидов [4,5,7], при этом ВПП считались квазистационарными, а повышенная стабильность поля достигалась выбором геометрии самого соленоида. В настоящей статье описывается общий случай, когда соленоид состоит из нескольких короткозамкнутых контуров, что является реальным в случае соленоида спектрометров ЭПР и ЯМР.

Рассмотрим сверхпроводниковую магнитную систему (СМС), состоящую из N короткозамкнутых контуров (секции соленоида, обмотка развертки поля, обмотки коррекции однородности поля соленоида, дополнительные обмотки для повышения стабильности магнитного поля). Полагаем, что ВПП направлены вдоль оси Z соленоида, так как составляющая поля, нормальная к оси соленоида, не наводит эдс в контуре и не влияет на стабильность поля соленоида. В центре соленоида на стабильность магнитного поля в первую очередь оказывает влияние изменение $\Delta B_z(t)$. В том случае, когда можно пренебречь омическим сопротивлением контуров СМС, изменение токов в них, вызываемое действием ВПП, описывается системой уравнений

$$\begin{cases} L_1 \frac{dI_1}{dt} + M_{12} \frac{dI_2}{dt} + \dots + M_{1N} \frac{dI_N}{dt} = E_1, \\ \dots \\ M_{N1} \frac{dI_1}{dt} + M_{N2} \frac{dI_2}{dt} + \dots + L_N \frac{dI_N}{dt} = E_N, \end{cases} \quad (2)$$

где L_i – индуктивность i -го контура; dI_i/dt – изменение тока в i -м контуре; M_{ij} – взаимная индуктивность i -го и j -го контуров; $E_i = -S_i dB_{\text{INF}}/dt$ – эдс, наведенная в i -м контуре под действием ВПП, индукция которого B_{INF} ; S_i – суммарная площадь витков i -го контура. Решение этой системы уравнений имеет вид

$$\frac{dI_i}{dt} = \frac{D_i}{D}, \quad (3)$$

где D – детерминант матрицы из коэффициентов левой части системы уравнений (2); D_i – детерминант, который получается из этой матрицы заменой i -го столбца на столбец, составленный из правых частей системы (2). Поскольку E_i пропорциональна dB_{INF}/dt , вынесем этот множитель из D_i , а оставшееся выражение обозначим через D'_i (i -й столбец состоит из величин S_i), после чего выражение (3) приобретает вид

$$\frac{dI_i}{dt} = -\frac{D'_i}{D} \frac{dB_{\text{INF}}}{dt}. \quad (4)$$

Из выражения (4) видно, что в N -контурной СМС ток в каждом контуре безынерционно следует за изменением ВПП, поэтому квазистационарность последних не учитывается.

Результирующее изменение магнитного поля dB_{res}/dt , состоящего из ВПП и полей, созданных токами, наведенными в контурах, выглядит так:

$$\frac{dB_{\text{res}}}{dt} = \frac{dB_{\text{INF}}}{dt} + \sum_{i=1}^N \left[C_i \frac{dI_i}{dt} \right] = \left[1 - \frac{1}{D} \left(\sum_{i=1}^N C_i D'_i \right) \right] \frac{dB_{\text{INF}}}{dt}, \quad (5)$$

где C_i – магнитная постоянная i -го контура ($B_i = C_i I_i$ – поле, создаваемое i -м контуром). Полученное выражение (5) позволяет сформулировать условие компенсации изменения магнитного поля соленоида, вызванного ВПП:

$$K = \frac{dB_{\text{res}}/dt}{dB_{\text{INF}}/dt} = 1 - \frac{1}{D} \sum_{i=1}^N C_i D'_i = 0. \quad (6)$$

Отметим, что условие (6) не зависит от величины и скорости изменения ВПП и определяется лишь геометрическими размерами обмоток контуров и их электрическими параметрами (L , M , C и R). В случае одноконтурного соленоида приходим к известному результату [4,6]:

$$K = 1 - C \frac{S}{L}. \quad (7)$$

Однако использование одноконтурного соленоида, удовлетворяющего условию (7), не позволяет изготовить реальную магнитную систему, так как на геометрические размеры соленоида заранее накладываются ограничения. При расчете же реального соленоида в первую очередь стремятся обеспечить требуемую величину и однородность магнитного поля путем нахождения его оптимальных размеров. Кроме того, СМС для создания высокооднородных полей содержат порядка десяти обмоток коррекции однородности поля соленоида, т.е. они не являются одноконтурными. Поэтому реальной представляется следующая схема компенсации нестабильности магнитного поля, вызванной ВПП.

Если СМС состоит из $N - 1$ контуров, то добавляется еще один контур, по возможности, простой конструкции. Этот дополнительный контур называют компенсатором нестабильности магнитного поля (КНМП). Он также содержит сверхпроводниковый ключ, который разомкнут во время запитки током соленоида и обмоток коррекции неоднородности поля. Поэтому наличие такого компенсатора и его индуктивная связь с соленоидом не влияют на процессы работы с соленоидом. После запитки соленоида и обмоток коррекции неоднородности поля КНМП замыкается ключом, и с этого момента он осуществляет компенсацию нестабильности поля соленоида, вызванной ВПП.

В ряде работ [5–7] рассматривался дополнительный контур для устранения внутренней нестабильности магнитного поля, обусловленной наличием

остаточного сопротивления в местах соединения выводов обмотки соленоида, которую будем называть внутренней помехой. Эта помеха и ВПП – два различных типа нестабильности магнитного поля, и не обязательно, чтобы один дополнительный контур устранял оба типа нестабильности одновременно. Однако для соленоида с однородным полем в области, где размещается контур, было показано [8], что КНМП, устраняющий внутреннюю помеху, устраняет и ВПП.

Согласно выражению (6) для двухконтурной системы коэффициент проникновения ВПП в центральной зоне соленоида

$$K = 1 - \frac{C_1(S_1L_2 - S_2L_1) + C_2(S_2L_1 - S_1L_2)}{L_1L_2 - M^2}. \quad (8)$$

Возможны различные решения условия компенсации (8) при заданных размерах соленоида, но наибольший интерес представляют те решения, которые носят универсальный характер, т.е. не зависят от геометрии соленоида. В процессе расчетов оказалось, что условие (8) допускает такие решения, но при этом возникает требование, чтобы соленоид создавал однородное магнитное поле в объеме, в котором расположен КНМП. Данное требование автоматически выполняется, если необходимо стабилизировать однородное магнитное поле соленоида спектрометра ЭПР или ЯМР. Поэтому сначала рассматривались решения условия компенсации (8), приемлемые с точки зрения их использования в соленоидах с однородным магнитным полем. Таким решением может быть однослойный стабилизирующий контур. Ранее было показано [4], что бесконечно длинный тонкий контур экранирует однородные ВПП. Однако его нельзя использовать совместно с соленоидом, так как на его краях поле неоднородное. Поэтому было найдено решение – вместо бесконечно длинного тонкого контура использовать однослойный контур с длиной, приведенной к его внутреннему диаметру:

$$\beta = \frac{l}{D} = 0.87, \quad (9)$$

где l – длина контура, D – его диаметр.

Однако этот контур имеет естественный предел возможности повышения стабильности магнитного поля, обусловленный неоднородностью собственного магнитного поля. Учет наибольшего квадратичного члена в разложении в ряд поля, создаваемого контуром:

$$B = B_0 \left[1 + E_2 \left(\frac{r}{a} \right)^2 + E_4 \left(\frac{r}{a} \right)^4 + \dots \right] \quad (10)$$

(где a – радиус контура, r – радиус рабочей зоны) дает следующее ограничение на величину коэффициента проникновения ВПП:

$$K > E_2 \left(\frac{r}{a} \right)^2.$$

Это ограничение возникает по причине того, что в однородных СМС (например, спектрометрах ЭПР и ЯМР) важно не только стабилизировать магнитное поле, но и обеспечивать его высокую однородность. Однако однослойный универсальный контур, стабилизируя величину магнитного поля, будет ухудшать его однородность.

Данные обстоятельства потребовали поиска новых решений универсальных контуров, которые создавали бы собственное однородное магнитное поле. Такому требованию удовлетворяет трехслойный контур [9], в котором наружный корректирующий паз в последнем слое позволяет скомпенсировать наибольший квадратичный член разложения поля в ряд. Универсальный трехслойный контур имеет следующие приведенные размеры (рис. 1):

$$\beta = \frac{l}{D} = 1.475, \quad \beta_c = \frac{l_c}{D} = 0.55, \quad (11)$$

где l – длина контура, l_c – длина наружного паза, $D = 2a$ – средний диаметр контура.

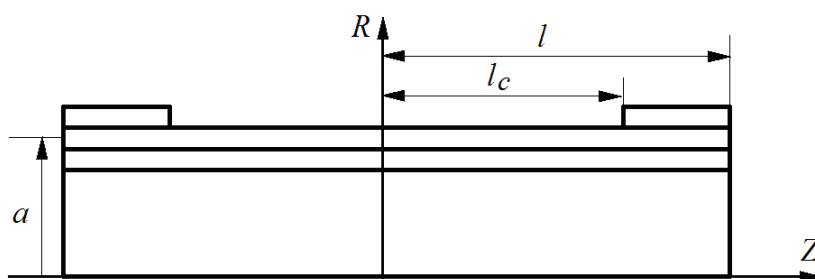


Рис. 1. Экранирующий контур для компенсации однородного ВПП

Однако для экранирования рабочей зоны СМС одновременно от однородного и неоднородного ВПП не достаточно одного контура, служащего для экранирования однородного ВПП. Совместно с этим контуром необходимо использовать дополнительный контур для компенсации того градиента поля, которым обусловлена неоднородность ВПП.

Теоретическое обоснование возможности компенсации внешнего неоднородного магнитного поля с помощью индуктивно связанных контуров рассмотрено в работе [10]. Расчет контура для компенсации градиента магнитного поля, которым обусловлено неоднородное ВПП, состоит в следующем. Пусть малое изменение внешнего поля в области, где расположен контур, в сферической системе координат с осью Z , направленной вдоль оси соленоида, имеет вид

$$\Delta B_z(r, \theta) = \Delta B_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \Delta(BE_m) P_m(u) \left(\frac{r}{a_1} \right)^m, \quad (12)$$

где ΔB_0 – изменение величины ВПП в начале координат; $P_m(u)$ – полиномы Лежандра; θ – полярный угол радиус-вектора r ; a_1 – масштаб разложения, используемый для выделения безразмерных коэффициентов E_m . Отметим, что изменение градиента m -го порядка $\Delta(BE_m)$ происходит за счет изменения как величины внешнего поля B , так и коэффициентов E_m . Обозначим через $\Delta\Phi$ изменение суммарного (через все витки контура) потока вектора индукции магнитного поля, которое создается изменением внешнего поля. Если L_{cir} – индуктивность контура, то наведенный в нем ток будет

$$\Delta I_{\text{cir}} = -\frac{\Delta\Phi}{L_{\text{cir}}}. \quad (13)$$

Поле, создаваемое этим током в контуре, имеет вид

$$\Delta B_z^{\text{cir}}(r, \theta) = \mu_0 n \Delta I_{\text{cir}} \sum_{m=1}^{\infty} A_m P_m(u) \left(\frac{r}{a_1}\right)^m, \quad (14)$$

где A_m – коэффициенты разложения, зависящие от геометрии контура и отношения a_1/a , a – радиус обмотки контура; μ_0 – магнитная постоянная; n – линейная плотность витков обмотки. Используя выражения (12) и (14) и учитывая (13), получаем условие компенсации изменения m -го градиента поля:

$$\Delta(BE_m) - \mu_0 n \left(\frac{\Delta\Phi}{L_{\text{cir}}}\right) A_m = 0. \quad (15)$$

Геометрию такого контура следует выбирать с условием, чтобы $\Delta\Phi$ было пропорционально $\Delta(BE_m)$. Тогда, осуществляя компенсацию малой величины изменения градиента m -го порядка, контур будет компенсировать изменение градиента поля на любую конечную величину.

Рассмотрим компенсацию наибольшего по величине квадратичного градиента ВПП d^2H/dz^2 . В этом случае контур выбирают в виде двух пар однослойных катушек, при этом центральная пара включена встречно паре крайних катушек. Сумма длин катушек с «положительной» намоткой витков равна сумме длин катушек с «отрицательной» намоткой. Это обеспечивает равенство нулю суммарной площади витков с учетом их взаимной ориентации, а следовательно, равенство нулю потока вектора индукции поля, создаваемого постоянной составляющей внешнего поля через обмотку контура. Условие (15) при таком выборе геометрии контура переходит в уравнение [11]:

$$\frac{L_{\text{cir}}}{\mu_0 n^2 a^3} = \left(\frac{2\pi}{3}\right) \Delta f_2 \left[(\gamma_1^2 - \beta_1^2) - (\gamma_2^2 - \beta_2^2) \right], \quad (16)$$

где $\beta_1 = l_1/a$, $\gamma_1 = l_2/a$, $\beta_2 = l_3/a$, $\gamma_2 = l_4/a$ – приведенные к внутреннему диаметру длины обмоток контура и зазоры между ними, а $\Delta f_N = [f_N(\gamma_1) - f_N(\beta_1)] - [f_N(\gamma_2) - f_N(\beta_2)]$, при этом

$$f_2(x) = \left(\frac{3x}{2}\right)(1+x)^{-5/2}, \quad (17)$$

$$f_4(x) = -\left(\frac{5x}{8}\right)(4x^2 - 3)(1+x^2)^{-7/2}. \quad (18)$$

Чтобы контур не создавал четвертого градиента поля, ухудшающего его однородность, дополнительно к уравнению (16) необходимо условие $\Delta f_4 = 0$. Тогда уравнения (16) и (18) имеют решения:

$$\beta_1 = 0.0676, \quad \gamma_1 = 0.7276, \quad \beta_2 = 0.7776, \quad \gamma_2 = 1.4376. \quad (19)$$

Геометрия экранирующего контура для компенсации квадратичной составляющей ВПП приведена на рис. 2.

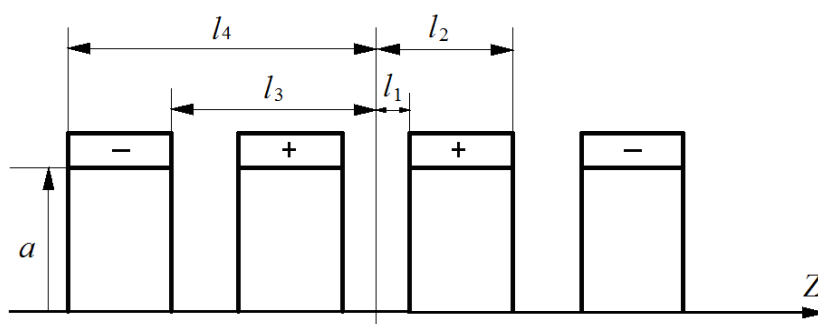


Рис. 2. Экранирующий контур для компенсации квадратичной составляющей ВПП

Полученные решения контуров для экранирования от однородного ВПП (выражения (9) и (11)) были проверены в экспериментах на лабораторном сверхпроводниковом соленоиде с размерами: $D_{\text{inn}} = 42 \text{ mm}$, $D_{\text{ext}} = 94 \text{ mm}$ и длиной 193 mm . Однородность поля соленоида составляла $4 \cdot 10^{-5}$ arb. units на длине 10 mm , а нестабильность поля в короткозамкнутом режиме – не более $1 \cdot 10^{-6}$ arb. units/h. Однослойный экранирующий контур с приведенной длиной $\beta = l/D = 0.87$ имел диаметр 38 mm и длину 33 mm , а трехслойный контур – средний диаметр 36.2 mm , длину 53.4 mm и длину паза 20 mm . Контуров были закорочены сверхпроводниковыми ключами и размещались в отверстиях соленоида.

Внешнее поле-помеха создавалось медной обмоткой, намотанной на гелиевый криостат КГ-100, в котором размещался соленоид. Обмотка была выполнена в виде системы колец Гельмгольца диаметром 350 mm и длиной 250 mm , что обеспечивало неоднородность ВПП на длине соленоида не более $5 \cdot 10^{-2}$ arb. units. Магнитное поле соленоида измерялось автодинным ЯМР-тесламетром [11].

Исследования работы сверхпроводниковых контуров проводили следующим образом. При разомкнутых ключах контуров и соленоида в последний вводили ток и возбуждали заданное значение магнитного поля, после чего

ключ соленоида замыкали, и он переходил в режим «замороженного» магнитного потока. Тесламетром измеряли резонансную частоту сигнала ЯМР f_0 , соответствующую величине магнитного поля соленоида. Затем с помощью медной обмотки создавали ВПП, которое, накладываясь на поле соленоида, изменяло его величину. Измеряли резонансную частоту сигнала ЯМР f_1 и вычисляли разность частот $f_0 - f_1 = \Delta f_1$.

Затем замыкали ключ конкретного контура, возбуждали ВПП и измеряли новое значение резонансной частоты f_2 , после чего вычисляли $f_0 - f_2 = \Delta f_2$. Коэффициент экранирования контура определяли как отношение $\Delta f_1 / \Delta f_2$.

Исследования показали, что однослойный контур обеспечивает коэффициент экранирования от ВПП, равный 68, при этом контур ухудшает однородность магнитного поля соленоида примерно на 25%; трехслойный контур обеспечивает коэффициент экранирования 64, однородность поля соленоида при этом не ухудшается. Измеренные значения коэффициента экранирования не предельны, и, как отмечалось выше, их можно существенно увеличить, варьируя такие параметры контура, как L , M и C (8). Индуктивность контура в исследованиях изменяли путем включения в его цепь сверхпроводникового вариометра индуктивности, использование которого позволило увеличить коэффициент экранирования от ВПП более чем до 100.

Аналогичные исследования по экранированию от ВПП с неоднородным распределением поля были проведены на СМС для спектрометра ЭПР [12], однородность магнитного поля которого была на уровне $1 \cdot 10^{-6}$ arb. units в объеме ампулы диаметром 5 mm. В состав СМС входят соленоид для возбуждения магнитного поля с индукцией 6 Т, обмотка развертки поля и обмотки компенсации осевых (dH/dz , d^2H/dz^2 , d^3H/dz^3) и радиальных (dH/dx , dH/dy , $d^2H/dzdx$, $d^2H/dzdy$) градиентов для повышения однородности поля соленоида. Трехслойный контур с наружным пазом для компенсации однородного ВПП изготовлен из сверхпроводника диаметром 0.1 mm, имеет диаметр 72 mm, длину 106 mm, длину наружного паза 39.6 mm и размещается в отверстии соленоида. Сверхпроводниковый контур для компенсации квадратичной составляющей ВПП намотан проводником диаметром 0.33 mm сверху соленоида и состоит из двух пар встречно-включенных однослойных обмоток. Длина каждой обмотки 48 mm, зазор между центральными обмотками 10.5 mm, между крайними – 112 mm. Этот контур одновременно использовали и в качестве обмотки компенсации квадратичного градиента поля d^2H/dz^2 при коррекции однородности магнитного поля соленоида. ВПП создавали медной обмоткой, намотанной снаружи на гелиевый криостат, для возбуждения как однородного, так и ВПП, создающего квадратичный градиент.

Исследования работы сверхпроводниковых контуров проводили по аналогичной методике, за исключением того, что сначала была произведена коррекция однородности поля соленоида до уровня $1 \cdot 10^{-6}$ arb. units в объеме рабочей ампулы с помощью обмоток компенсации градиентов поля. Амплитуда ВПП не превышала нескольких эрстед. Суммарный коэффициент экранирования

как от однородного, так и от ВПП с неоднородным распределением поля, обусловленным квадратичным градиентом поля d^2H/dz^2 , составил не менее 200.

Выводы

1. Расчеты по экранированию рабочей зоны короткозамкнутого соленоида от однородных ВПП позволили получить решения, которые определяют приведенные к диаметру длины двух универсальных контуров. Экспериментальные исследования показали, что коэффициент экранирования от ВПП этих контуров составляет не менее 100.

2. Получены решения универсального контура для экранирования от неоднородного ВПП, обусловленного квадратичным градиентом поля. Контур выполнен в виде двух пар последовательно соединенных однослойных катушек, при этом пара согласно-включенных центральных катушек включена встречно паре согласно-включенных крайних катушек.

3. Применение сверхпроводниковых контуров для одновременной компенсации однородного и неоднородного ВПП, обусловленного квадратичным градиентом поля, повышает стабильность высокооднородного магнитного поля СМС в 200 раз.

1. С.Г. Рабинович, Р.Г. Скрынников, Измерительная техника № 8, 38 (1968).
2. Р.Г. Скрынников, В.В. Филиппов, в сб.: Труды ВНИИМ (1972), вып. 140, с. 83–88.
3. Р.Г. Скрынников, в кн.: Стабилизаторы напряженности магнитного поля, Энергия, Ленинград (1975).
4. C.F. Hempstead, Y.B. Kim, A.R. Strnad, J. Appl. Phys. **34**, 3226 (1963).
5. В.В. Пермяков, В.В. Курочкин, Н.В. Таряник, И.Р. Клименко, в сб.: Вопросы технической сверхпроводимости, Черногловка (1979), вып. 3, с. 97–101.
6. А.с. СССР № 346758, Сверхпроводящая магнитная система со стабилизацией магнитного поля, С.М. Кохановский, В.Н. Шахтарин.
7. В.В. Пермяков, Н.В. Таряник, И.Г. Гавриши, З.Ф. Матюшина, в сб.: Вопросы технической сверхпроводимости, Черногловка (1979), вып. 3, с. 84–88.
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.с. СССР 1075853, Сверхпроводящее устройство для стабилизации магнитного поля, В.В. Сухой, Н.В. Таряник, А.Я. Лаптиенко, В.И. Курочкин, Н.Н. Карагай, Н.В. Морковин.
10. 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. 50–55.
11. А.А. Глущенко, А.Я. Лаптиенко, Н.Н. Карагай, В.И. Курочкин, Измерительная техника № 6, 56 (1984).
12. Д.В. Варюхин, Н.В. Таряник, Е.А. Дворников, Д.О. Федюк, ФТВД **27**, № 2, 98 (2017).

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

ENHANCEMENT OF MAGNETIC FIELD STABILITY OF A SHORT-CIRCUITED SUPERCONDUCTING SOLENOID

Experiments are performed that are aimed to shielding of the working zone of a short-circuit superconducting solenoid from external magnetic field noise (EFN) by additional superconducting circuits inductively coupled to the solenoid. The solutions are obtained that determine the sizes of two universal circuits that screen off the working zone of the solenoid from external homogeneous noise field. The tests have shown that the screening factor of the circuits is above 100. The solutions of an universal circuit shielding the working zone of the solenoid from an inhomogeneous noise determined by square gradient of field. It is demonstrated that the application of superconducting circuits to simultaneous compensation of both homogeneous and inhomogeneous noise enhances the stability of homogeneous magnetic field of the solenoid by the factor of 200.

Keywords: superconducting solenoid, magnetic field stability, field homogeneity, shielding circuit, external magnetic field noise, screening factor, magnetic field gradient, signal of nuclear magnetic resonance

Fig. 1. Shielding circuit aimed at compensation of homogeneous EFN

Fig. 2. Shielding circuit aimed at compensation of quadratic component of EFN