

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, В.В. Пермяков

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНоиДА С ПОМОЩЬЮ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ КОНТУРОВ

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

Статья поступила в редакцию 1 апреля 2019 года

На основе свойства сохранения потокосцепления для системы короткозамкнутых индуктивно связанных обмоток выведено условие стабилизации магнитного поля сверхпроводникового соленоида (СПС) с помощью дополнительного короткозамкнутого сверхпроводникового контура. Предложены варианты конструкции и расположения контура в соленоиде, а также способы увеличения степени стабилизации магнитного поля.

Ключевые слова: сверхпроводниковый соленоид, стабилизирующий контур, степень стабилизации магнитного поля, индуктивность и взаимная индуктивность, сверхпроводниковый вариометр индуктивности

Стабильность магнитного поля СПС определяется стабильностью тока источника питания, которая редко превышает 10^{-4} Ое/ч [1]. Закорачивание обмотки соленоида сверхпроводниковым ключом обеспечивает долговременную работу в режиме замороженного тока с высокой стабильностью магнитного поля, если гарантирована сверхпроводимость всех звеньев [2–4]. Однако контакты между отдельными частями обмотки не всегда можно выполнить идеальными, особенно в обмотках, изготовленных из многожильных композиционных сверхпроводников. По этой причине замороженный в СПС ток уменьшается за счет потери энергии в неидеальных контактах, а стабильность магнитного поля становится неудовлетворительной. Для ее повышения используют стабилизирующий сверхпроводниковый короткозамкнутый контур, имеющий с соленоидом индуктивную связь [5,6]. По мере затухания тока в СПС из-за наличия конечного сопротивления в контактах в стабилизирующем контуре наводится ток, обеспечивающий сохранение сцепленного с ним магнитного потока. Однако предположение, что сохранение постоянства магнитного потока, сцепленного со стабилизирующим контуром, всегда обеспечивает и сохранение величины магнитного поля в СПС, является недостаточно точным, поскольку второе является частным случаем первого при соблюдении дополнительных условий.

Найдем условие сохранения величины магнитного поля в центре системы, состоящей из соленоида с магнитной постоянной C_s и стабилизирующего контура, выполненного в виде короткозамкнутой сверхпроводниковой катушки, которая размещена коаксиально и симметрично относительно центра СПС. Стабилизирующий контур имеет магнитную постоянную C_c , индуктивность L_c и взаимную индуктивность с соленоидом M .

Через некоторое время работы системы, после уменьшения тока СПС на величину ΔI_s , в стабилизирующем контуре наведется ток I_c , определяемый величиной потокосцепления его с СПС. Согласно свойству сохранения потокосцепления

$$-\Delta I_s M = I_c L_c, \quad (1)$$

откуда

$$I_c = -\Delta I_s M / L_c. \quad (2)$$

Суммарное изменение магнитного поля в центре системы ΔB является суммой изменений поля соленоида

$$\Delta B_s = C_s \Delta I_s \quad (3)$$

и поля тока, наведенного в замкнутом стабилизирующем контуре

$$B_c = C_c I_c = -\Delta I_s M C_c / L_c, \quad (4)$$

и равно

$$\Delta B = \Delta B_s + B_c = \Delta I_s (C_s - M C_c / L_c). \quad (5)$$

Полученное соотношение является следствием свойства сохранения потокосцепления в замкнутом стабилизирующем контуре и выполняется всегда. Нас интересует случай стабилизации магнитного поля СПС, т.е. когда требуется выполнение условия $\Delta B = 0$. При этом возникает необходимость выбора определенных соотношений параметров соленоида и стабилизирующего контура, а именно

$$C_s / C_c = M / L_c. \quad (6)$$

Возможности стабилизации могут быть значительно расширены, если в условии (6) использовать понятие магнитной постоянной в произвольной точке, обозначающее отношение величины магнитного поля в любой выбранной точке внутри или вне СПС к ее току. Однако при стабилизации магнитного поля в произвольной точке направления магнитных полей СПС и стабилизирующего контура в этой точке могут не лежать на одной прямой, вследствие чего полная компенсация полей невозможна. Для гальваномагнитных, ЯМР- [7] и других исследований важно обеспечить стабилизацию составляющих магнитного поля по выбранному направлению. В этом случае параметры соленоида и стабилизирующего контура выбираются в соответствии с условием (6), где C_s и C_c соответствуют магнитным постоянным СПС и стабилизирующего контура в заданной точке и по выбранному направлению.

Максимальный диапазон стабилизации ΔB_{\max} , обозначающий максимальную величину потери напряженности магнитного поля в замкнутом СПС, которая еще может быть скомпенсирована стабилизирующим контуром перед выходом его в нормальное состояние вследствие достижения критических параметров, например тока, определяется выражением

$$\Delta B_{\max} = C_c (I_{\max} - I_0), \quad (7)$$

где I_{\max} – максимальный ток стабилизирующего контура, I_0 – начальный ток контура.

С целью повышения эффективности и расширения диапазона стабилизации удобно использовать стабилизирующий контур с начальным максимальным обратным током, введенным в него перед началом работы через его токовводы от внешнего источника [8]. Тогда в первой половине диапазона стабилизации возникающий в контуре стабилизирующий ток будет вычитаться из начального тока, разгружая стабилизирующий контур от максимального тока до нуля, а во второй половине – нагружать контур от нуля до максимальной величины. Таким образом, использование стабилизирующего контура с максимальным обратным током позволяет примерно вдвое увеличивать диапазон стабилизации по магнитному полю, току и времени или вдвое уменьшать размеры стабилизирующего контура по числу витков или сечению сверхпроводника.

Поскольку токовводы к СПС и контуру являются одним из основных источников теплоподвода в криостат, сокращение их количества повышает экономичность работы сверхпроводниковой магнитной системы. Если соленоид и стабилизирующий контур выполнены из одного типа сверхпроводника, то их можно запитывать через общие токовводы от одного внешнего источника. Для этого соленоид 1 (рис. 1) при помощи контактов 2, имеющих потери, соединяется с ключом 3, образуя замкнутую цепь. Подогреватель 4 служит для размыкания ключа 3 переводом его в нормальное состояние. Дополнительный сверхпроводниковый стабилизирующий контур 5 замыкается ключом 6 с подогревателем 7. Все устройство расположено в криостате 8 и работает следующим образом. При разомкнутых ключах 3 и 6 соленоид и стабилизирующий контур, соединенные последовательно перемычкой, запитываются от общего внешнего источника тока через токовводы 9 и 12. При этом СПС запитывается в направлении его рабочего тока, а стабилизирующий контур – в направлении его обратного тока. После достижения заданного значения магнитного поля ключи 3 и 6 замыкаются, внешний источник отключается и СПС переходит в рабочий режим со стабилизацией магнитного поля.

Неточности, допущенные при расчете и изготовлении СПС и контура, искажение размеров и формы при охлаждении и действии электромагнитных сил, а также изменение индуктивных характеристик СПС и контура в сильном магнитном поле нарушают приведенное соотношение (6) и ухудшают стабильность поля.

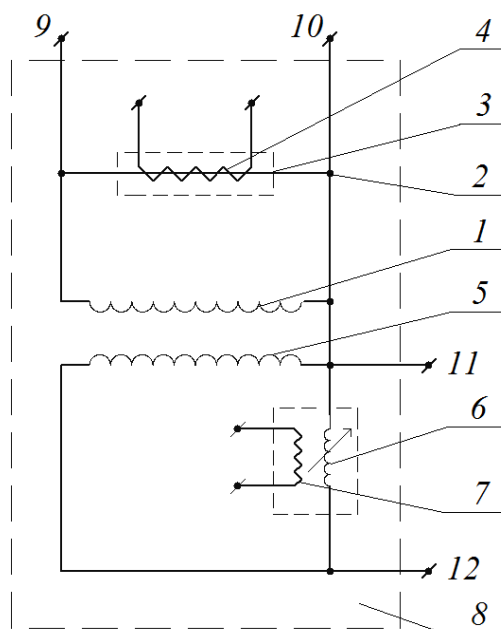


Рис. 1. Электрическая схема сверхпроводникового соленоида с подстраиваемым стабилизирующим контуром, нагруженным максимальным обратным током: 1 – соленоид, 2 – контакты, 3 – ключ соленоида, 4 – подогреватель ключа соленоида, 5 – стабилизирующий контур, 6 – ключ контура, 7 – подогреватель ключа контура, 8 – криостат, 9–12 – токовводы

С целью обеспечения выполнения условия (6) и повышения степени стабилизации магнитного поля последовательно к стабилизирующему контуру подключается дополнительная сверхпроводниковая обмотка переменной индуктивности. Такая обмотка в виде сверхпроводникового вариометра конструктивно выполняется из двух соединенных последовательно сверхпроводниковых катушек (рис. 2,а): неподвижной 1 и подвижной 2, взаимная индуктивность которых зависит от их относительного положения.

Роль дополнительной обмотки переменной индуктивности может выполнять сверхпроводниковая катушка 1, индуктивность которой подстраивается

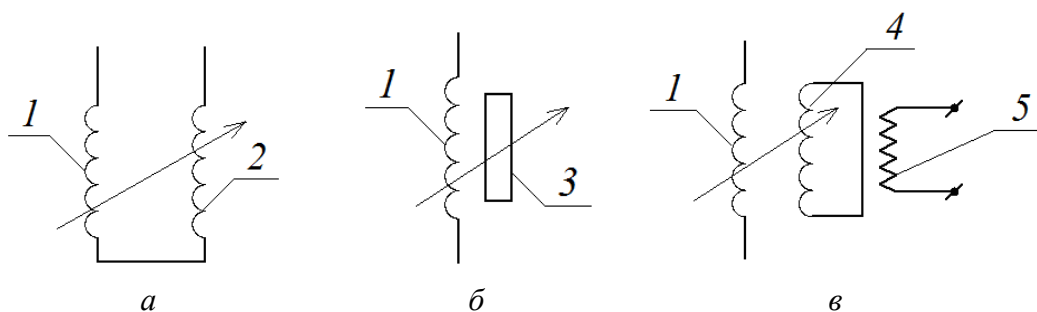


Рис. 2. Варианты выполнения сверхпроводниковой обмотки переменной индуктивности: 1 – неподвижная катушка, 2 – подвижная катушка, 3 – ферромагнитный сердечник, 4 – короткозамкнутая катушка, 5 – подогреватель

механическим перемещением ее сердечника 3, выполненного из ферромагнитного материала или сверхпроводника (рис. 2,б). В качестве такого сердечника также может использоваться короткозамкнутая катушка 4 (рис. 2,в). Сверхпроводниковый ключ, замыкающий и размыкающий стабилизирующий контур, содержит рабочий элемент, переходящий из сверхпроводникового в нормальное состояние при действии подогревателя 5 и обратно – за счет охлаждения в ванне с жидким гелием при выключении подогревателя. При этом эффективность действия ключа пропорциональна сопротивлению его рабочего элемента в нормальном состоянии, вследствие чего этот элемент и ключ в целом должны быть достаточно длинными (1–5 м). С учетом этого обстоятельства в качестве рабочего элемента ключа используется дополнительная обмотка переменной индуктивности, снабженная подогревателем и закрепленная на верхнем фланце СПС.

Стабилизирующий контур может быть размещен в рабочем отверстии или снаружи соленоида либо внутри обмотки. Занимать место в рабочем отверстии СПС неэкономично, а наибольшая величина магнитного поля в этом месте снижает токонесущую способность материала контура. При установке последнего снаружи СПС снижается эффективность использования и увеличиваются габариты контура. Размещение его в обмотке СПС обеспечивает более широкие возможности его применения. Учитывая неравномерность распределения величины магнитного поля по сечению обмотки соленоида 1 (рис. 3), в качестве стабилизирующего контура удобно использовать часть обмотки СПС 2, расположенной в относительно слабом магнитном поле и имеющей запас по токонесущей способности [9]. При этом по данной части витков одновременно проходит ток замкнутого соленоида и ток стабилизации.

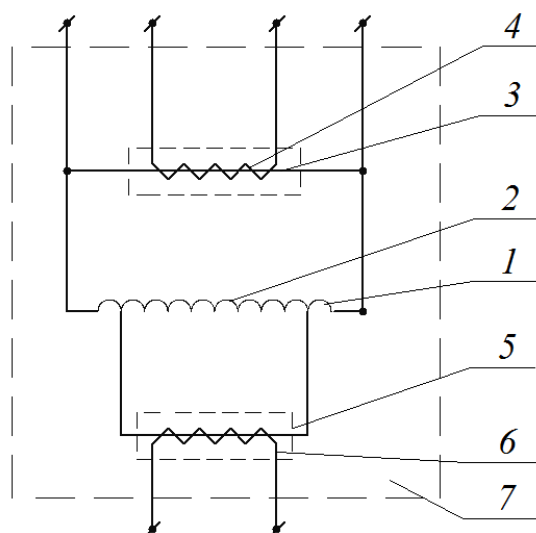


Рис. 3. Электрическая схема сверхпроводникового соленоида со стабилизирующим контуром, образованным из части витков обмотки соленоида: 1 – соленоид, 2 – контур, 3 – ключ соленоида, 4 – подогреватель ключа соленоида, 5 – ключ контура, 6 – подогреватель ключа контура, 7 – криостат

С целью повышения степени стабилизации магнитного поля СПС контур также изготавливается составным из нескольких последовательно соединенных катушек, часть которых обладает возможностью перемещения относительно СПС [10]. На рис. 4 приведена электрическая схема соленооида и контура из двух симметрично расположенных катушек, выполненных с возможностью поступательного перемещения относительно СПС вдоль его оси в разные стороны на равные расстояния.

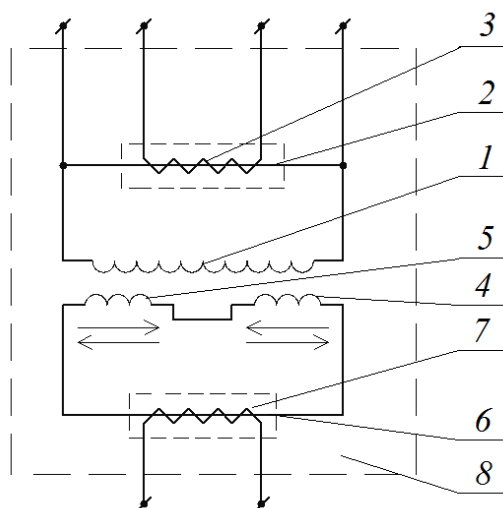


Рис. 4. Электрическая схема соленооида и стабилизирующего контура, выполненного с возможностью перемещения: 1 – соленоид, 2 – ключ соленооида, 3 – подогреватель ключа соленооида, 4, 5 – катушки контура, 6 – ключ контура, 7 – подогреватель ключа контура, 8 – криостат

Экспериментальные исследования по стабилизации магнитного поля с помощью короткозамкнутого контура проведены на соленоиде со следующими параметрами, мм: внутренний диаметр 40, наружный 96, длина 193. Магнитная постоянная соленооида $C_s = 0.21$ Т/А, индуктивность $L_s = 18$ Н. К выводам соленооида подпаян сверхпроводниковый ключ. Стабилизирующий контур в виде четырехслойной катушки длиной 72 мм, намотанной сверхпроводниковым проводом диаметром 0.33 мм, размещен в отверстии соленооида. Магнитная постоянная контура $C_c = 0.0115$ Т/А, индуктивность $L_c = 1.2 \cdot 10^{-2}$ Н, взаимная индуктивность с соленоидом 0.22 Н.

Исходная стабильность магнитного поля СПС в режиме замороженного тока, измеренная датчиком ЯМР (при разомкнутом стабилизирующем контуре), составила $1.5 \cdot 10^{-4}$ Ое/ч. После замыкания контура стабильность магнитного поля повысилась до $6 \cdot 10^{-6}$ Ое/ч, т.е. в 25 раз. Для подстройки параметров контура использовали сверхпроводниковый вариометр, состоящий из двух коаксиальных катушек индуктивностью $2 \cdot 10^{-5}$ Н и последовательно соединенный с контуром. В процессе подстройки контура за счет механического перемещения внутренней катушки вариометра относительно внешней общая индуктивность стабилизирующего контура изменялась в пределах

10%, что позволило подобрать нужное значение индуктивности контура и повысить стабильность магнитного поля соленоида до уровня $(2-3) \cdot 10^{-6}$ Ое/л.

Таким образом, стабильность магнитного поля замкнутого СПС с неидеальными соединительными контактами в обмотке может быть повышена на один-два порядка за счет применения стабилизирующего контура при определенном выборе его параметров и возможности их подстройки в процессе работы.

Все соотношения, полученные для замкнутого СПС с неудовлетворительной стабильностью магнитного поля, возникающей за счет потерь в неидеальных контактах соленоида, можно без изменений применять к СПС без ключа с неудовлетворительной стабильностью поля, возникающей за счет нестабильности тока источника питания.

Выводы

1. Приведено условие стабилизации магнитного поля СПС с помощью дополнительного короткозамкнутого сверхпроводникового стабилизирующего контура, индуктивно связанного с соленоидом.

2. В качестве стабилизирующего контура можно использовать часть витков обмотки соленоида, имеющей запас по току.

3. Степень стабилизации магнитного поля СПС повышается за счет изготовления стабилизирующего контура из нескольких последовательно соединенных катушек, часть которых обладает возможностью перемещения относительно СПС. Кроме того, для этой цели можно использовать вариометр переменной индуктивности, последовательно соединенный с контуром.

4. Результаты экспериментальных исследований по применению стабилизирующих контуров для повышения стабильности магнитного поля замкнутого СПС показали возможность повышения стабильности его поля в десятки раз.

1. Ю.В. Киселев, Приборы и техника эксперимента № 5, 162 (1972).
2. В.В. Пермяков, В.В. Шапаренко, Н.В. Таряник, в сб.: Вопросы атомной науки и техники. Серия: фундаментальная и прикладная сверхпроводимость, ХФТИ АН УССР, Харьков (1975), вып. 1(3), с. 28–30.
3. Дж. Уильямс, Сверхпроводимость и ее применение в технике, Мир, Москва (1973).
4. Р.Д. Исаак, Р.Б. Шварц, Приборы для научных исследований **46**, № 5, 146 (1975).
5. А.с. МКИ Н 01 F 7/22, 28.У11. Сверхпроводящая магнитная система со стабилизацией магнитного поля, С.М. Кохановский, В.Н. Шахтарин, Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки № 23, 1972.
6. Пат. США 3.818.396, МКИ Н 01 F 7/22, 18.У1. Сверхпроводящая катушка повышенной стабильности, Изобретения за рубежом № 11 (часть 1), 1974.
7. Д.В. Варюхин, Н.В. Таряник, Д.О. Федюк, В.В. Сухой, ФТВД **28**, № 2, 121 (2018).
8. А.с. 609387, МКИ Н 01 F 13/00. Способ стабилизации магнитного поля, В.В. Пермяков, Н.В. Таряник, И.Р. Клименко; Оpubл. 07.02.1978.
9. А.с. 600967, МКИ Н 01 F 7/22, Н 01 L 39/16. Сверхпроводящая магнитная система со стабилизацией магнитного поля, В.В. Пермяков, Н.В. Таряник, З.Ф. Матюшина; Оpubл. 06.12.1977.

10. А.с. 683491, МКИ Н 01 L 39/16, Н 01 F 7/22. Сверхпроводящая магнитная система со стабилизацией магнитного поля, В.В. Пермяков, Н.В. Таряник, И.Г. Гавриш, И.И. Аршавский; Опубл. 11.05.1979.

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

ENHANCEMENT OF THE SOLENOID MAGNETIC FIELD STABILITY BY SHORTED SUPERCONDUCTING CIRCUITS

On the basis of the ability of conservation of flux linkage in a system of shorted inductively-coupled coils, a condition was derived for magnetic field stabilization in a superconducting solenoid (SCS) by an additional shorted superconducting circuit. Variants of the design and the solenoid are presented as well as the methods of enhancement of the degree of stabilization of the magnetic field.

Keywords: superconducting solenoid, stabilizing circuit, degree of magnetic field stabilization, inductance and mutual inductance, superconducting variable inductor

Fig. 1. Electric schematic of a superconducting solenoid with an adjustable stabilizing circuit loaded by the maximum reverse current: 1 – solenoid, 2 – contacts, 3 – solenoid key, 4 – solenoid key heater, 5 – stabilizing circuit, 6 – circuit key, 7 – circuit key heater, 8 – cryostat, 9–12 – input leads

Fig. 2. Variants of the superconducting coil of adjustable inductance: 1 – stationary coil, 2 – moving coil, 3 – ferromagnetic core, 4 – shorted coil, 5 – heater

Fig. 3. Electric schematic of the superconducting solenoid with the stabilizing coil formed by a part of solenoid coil: 1 – solenoid, 2 – circuit, 3 – solenoid key, 4 – solenoid key heater, 5 – coil key, 6 – coil key heater, 7 – cryostat

Fig. 4. Electric schematic of the solenoid and the stabilizing circuit suitable for transfer: 1 – solenoid, 2 – solenoid key, 3 – solenoid key heater, 4, 5 – circuit coils, 6 – circuit key, 7 – circuit key heater, 8 – cryostat