

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

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

СВЕРХПРОВОДНИКОВАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА С ИНДУКЦИЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ 9.5 Т ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРА ЯМР

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

Статья поступила в редакцию 30 января 2020 года

Приведены результаты разработки и исследований сверхпроводниковой магнитной системы с индукцией магнитного поля 9.5 Т для спектрометра ЯМР высокого разрешения на 400 МГц. Показана возможность получения магнитного поля с индукцией 9.5 Т, высокой однородностью и стабильностью с помощью сверхпроводникового соленоида (СПС), изготовленного из сверхпроводникового сплава НТ-50 и имеющего диаметр рабочего отверстия не менее 80 мм. Стабильность магнитного поля в СПС на уровне 10^{-8} Ое/ч и выше достигается при токе, величина которого на 6–8% меньше критического. Применение сверхпроводниковых обмоток для компенсации осевых и радиальных градиентов магнитного поля соленоида позволило повысить однородность поля от 10^{-6} до $5 \cdot 10^{-8}$ Ое в объеме ампулы диаметром 5 мм и высотой 10 мм.

Ключевые слова: сверхпроводниковый соленоид, индукция магнитного поля, спектрометр ЯМР высокого разрешения, критический ток, сверхпроводниковые шиммы, однородность и стабильность магнитного поля

Разработки по созданию СПС с высокой однородностью и стабильностью магнитного поля для спектрометров ЯМР на 200 и 300 МГц и спектрометра ЭПР представлены в [1–4].

Логичным продолжением этих работ является создание сверхпроводниковой магнитной системы для спектрометра ЯМР высокого разрешения на 400 МГц (на ядрах водорода) с индукцией магнитного поля 9.4 Т. Такое поле по величине близко к критическому для сверхпроводников из сплава НТ-50 при температуре 4.2 К, а ток в обмотке СПС близок к критическому значению тока короткого образца исходного материала. С учетом этих требований были проведены исследования по созданию соленоида с индукцией магнитного поля не менее 9.5 Т с высокой однородностью и стабильностью.

Для изготовления СПС использовали многожильный сверхпроводниковый провод диаметром 0.5, 0.7 и 0.85 мм сплава НТ-50. Чтобы исключить обрывы сверхпроводниковых волокон, использовали проводник с количеством волокон не менее 60.

Максимальная магнитная индукция в СПС обеспечивается путем достижения в нем тока, близкого к критическому току короткого образца исходного материала. Ввиду того, что завод-изготовитель проводника указывает

значения критического тока в полях с индукцией до 7 Т, критический ток применяемых проводников в поле 7–9.5 Т определяли экспериментально на коротких образцах (рис. 1).

Конструктивно обмотка СПС спектрометра ЯМР на 400 МГц выполнена трехсекционной с одинаковой длиной секций. Каркасы секций изготовлены из немагнитного алюминиевого сплав Д16Т. При намотке все секции компандировали полимерной композицией УП-6-125, а две внутренние секции дополняли силовым бандажом, намотанным поверх обмоток стальной проволокой марки 12Х18Н10Т в два слоя.

Диаметр внутреннего отверстия СПС величиной не менее 80 мм выбирали из условия обеспечения диаметра «теплого» вертикального канала рабочего криостата не менее 50 мм, в котором устанавливали сверхпроводниковую магнитную систему.

С целью достижения конечной однородности магнитного поля на уровне 10^{-8} – 10^{-9} Ое в объеме 1 см^3 выбирали обмотку длиной 340 мм.

Изначально исследовали характеристики СПС, изготовленного из сверхпроводникового провода диаметром 0.5 мм. Геометрические размеры секций соленоида приведены в таблице.

Таблица
Геометрические размеры (мм) и магнитные постоянные секций

Диаметр		Длина	Размеры внутреннего паза			Магнитная постоянная, Т/А
внутренний	наружный		диаметр		длина	
			внутренний	наружный		
82.6	105.8	340.0	–	–	–	0.048
119.0	141.0		–	–	–	0.042
157.8	180.4		157.8	164.7	132.8	0.033

Испытания секций СПС показали, что критический ток последовательно включенных первых двух секций составил 92.3 А, а максимальная магнитная индукция 8.23 Т. Этот ток практически равен критическому току короткого образца исходного материала (рис. 1, т. А) и достигнут в СПС после второго перехода в нормальное состояние. На трех секциях достигнута индукция 8.81 Т при токе 71.5 А, который также близок к критическому току короткого образца в данном поле (рис. 1, т. В) и достигнут после первого перехода в нормальное состояние. Из хода кривой I следует, что для достижения индукции 9.5 Т магнитную постоянную СПС необходимо повысить с 0.123 до 0.24 Т/А. Однако это приведет к увеличению веса СПС в 2 раза, что не приемлемо с экономической точки зрения. Можно сделать вывод, что приведенная конструкция СПС из провода диаметром 0.5 мм позволяет получать магнитное поле с индукцией 8.5–8.8 Т в рабочем отверстии диаметром 80 мм, а практическое отсутствие тренировки и деградации тока свидетельствует о ее надежности.

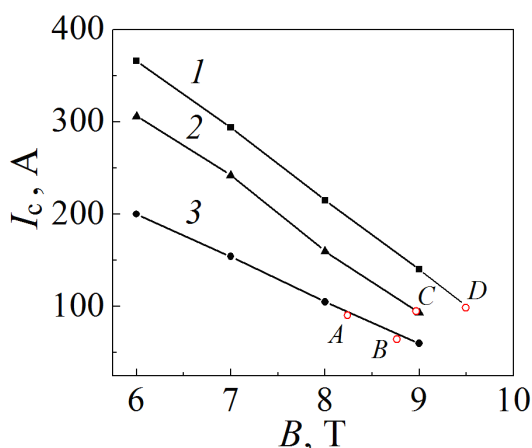


Рис. 1. Зависимость критического тока от индукции магнитного поля сверхпроводникового провода сплава НТ-50: 1 – \varnothing 0.85 mm, 2 – \varnothing 0.7 mm, 3 – \varnothing 0.5 mm. Экспериментальные значения в точках: А – $I = 92.3$ А, $B = 8.23$ Т; В – $I = 71.5$ А, $B = 8.8$ Т; С – $I = 97.15$ А, $B = 9$ Т; D – $I = 91.5$ А, $B = 9.55$ Т

Ввиду того, что испытания проводили методом последовательного приближения к достижению максимальной индукции поля, на следующем этапе работ изучали возможность применения провода большего диаметра (0.7 mm), который использовали в качестве внутренних слоев первой секции, где магнитное поле СПС достигает максимального значения. Кривая 2 зависимости критического тока от магнитной индукции для этого провода (рис. 1) свидетельствует, что для достижения, например, индукции 9 Т ток в СПС должен быть около 90 А. Расчеты показали, что первая секция вместо 22 слоев провода диаметром 0.5 mm должна состоять из 6 слоев провода диаметром 0.7 mm и последующих 12 слоев провода диаметром 0.5 mm. Вторая и третья секции, имеющие «запас» по току, оставлены без изменения. Магнитная постоянная первой секции при этом уменьшилась с 0.048 до 0.029 Т/А.

Испытания этого СПС дали следующие результаты: критический ток двух первых секций после первого перехода в нормальное состояние составил 119 А, после второго – 122 А, что обеспечило величину магнитной индукции 8.54 Т. Секции больше не переводили в нормальное состояние, так как критический ток был равен 95% тока короткого образца. Критический ток второй и третьей секций составил 105 А, а индукция магнитного поля в отверстии второй секции диаметром 119 mm – 7.88 Т. С целью сохранения целостности обмоток от повреждений при переходе в нормальное состояние испытания секций больше не проводили.

При испытаниях СПС в составе трех секций имела место тренировка критического тока, который изменялся от 78 до 85 А, при этом максимальная индукция составила 8.8 Т. Для ускорения процесса тренировки СПС температура жидкого гелия была понижена до 3 К, при которой критический ток соленоида увеличился до 95 А, а индукция – до 9.8 Т. После повышения температуры жидкого гелия от 3 до 4.2 К повторно перевели СПС в нормальное состояние при токе 87.5 А, индукция при этом достигла 9.1 Т. Данное значение тока равно 94% тока короткого образца провода диаметром 0.7 mm (рис. 1, т. С). Дальнейшие испытания соленоида не проводили, так как достичь индукции 9.5 Т на этой конструкции не представлялось возможным.

На заключительном этапе исследований использовали провод диаметром 0.85 mm. Из хода кривой I (рис. 1) видно, что при магнитной индукции 9.5 Т критический ток провода равен 82 А, поэтому рабочий ток СПС был выбран не более 81 А. Первая секция была перемотана, после чего она состояла из четырех слоев провода 0.85 mm и по шесть слоев провода диаметром 0.7 и 0.5 mm. Кроме того, на третьей секции дополнительно были намотаны десять слоев провода диаметром 0.5 mm. Магнитная постоянная соленоида составила 0.117 Т/А.

Первое испытание СПС проводили при температуре 3 К. В соленоид был введен ток величиной 81.5 А без перехода в нормальное состояние, при котором индукция составила 9.55 Т. При повторных испытаниях при 4.2 К были достигнуты те же значения тока и магнитной индукции. Ток величиной 81.5 А составил 98% критического тока короткого образца провода диаметром 0.85 mm (рис. 1, т. D).

После изготовления сверхпроводникового ключа и соединительных контактов холодной сваркой сверхпроводников [5], сопротивление которых не превышало 10^{-12} – 10^{-14} Ω , были проведены исследования по измерению нестабильности магнитного поля в режиме «замороженного» магнитного потока. В качестве измерителя магнитного поля использовали автодинный ЯМР-магнитометр [6]. Нестабильность поля, измеренная в полях с индукцией 8.8, 9.0 и 9.4 Т (при токах в соленоиде 75.2, 77 и 80.3 А соответственно), составила $3 \cdot 10^{-8}$, $8 \cdot 10^{-6}$ и $5 \cdot 10^{-6}$ Ое/ч соответственно. То есть при индукции больше 8.8 Т нестабильность поля увеличивается, что свидетельствует о появлении в обмотке СПС резистивности на уровне 10^{-8} Ω .

Резистивность в сверхпроводнике может быть вызвана размытием вольт-амперной характеристики многоволоконного сверхпроводника при токе, близком к критическому (рис. 2) [7]. При этом зона размытия обусловлена геометрической неоднородностью поперечного сечения сверхпроводниковых волокон, зависит от их количества, диаметра и может достигать 5–8% от критического значения тока в зависимости от уровня измеряемой резистивности. В нашем случае область резистивного состояния сверхпроводника, характеризующая низкую ста-

бильность магнитного поля, составила: $\Delta I_{\text{uns}} = I_c - I_s = (81.5 - 75.2) \text{ А} = 5.3 \text{ А}$ (6.5% от значения критического тока СПС), где I_c – критический ток, I_s – максимальный рабочий ток, при котором обеспечивается высокая стабильность магнитного поля. Из этого следует, что резистивность в сверхпроводнике

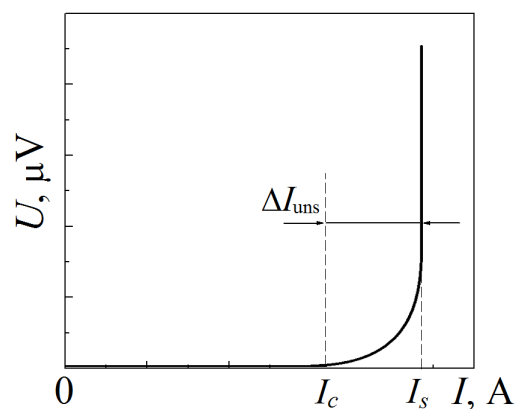


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика сверхпроводникового провода из сплава НТ-50

появляется не при критическом токе, а раньше – при токе, выше максимального, но ниже критического. То есть, если в СПС будет введен и «заморожен» рабочий ток I_w , величина которого выбрана из соотношения $I_s \leq I_w \leq I_c$, то обмотка будет иметь резистивность, которая приведет к затуханию «замороженного» тока, а следовательно, к неудовлетворительной стабильности магнитного поля. Таким образом, высокая стабильность поля на данной конструкции СПС обеспечивается при магнитной индукции до 8.8 Т ($B = 0.117 \text{ Т/А} \times 75.2 \text{ А} = 8.8 \text{ Т}$).

Для повышения стабильности магнитного поля используют сверхпроводниковые короткозамкнутые стабилизирующие контуры [8,9], применение которых не всегда приемлемо. Как правило, такие контуры устанавливают в рабочем отверстии СПС, что ведет к уменьшению диаметра отверстия. Кроме того, эффективность контура не всегда достаточна для повышения стабильности магнитного поля СПС. Так, стабилизирующий контур [9] позволяет повысить стабильность поля на один-два порядка, в то время как в описанном СПС необходимо повысить стабильность поля на три-четыре порядка – с уровня 10^{-5} до $(10^{-8}-10^{-9}) \text{ Ое/ч}$.

В данном СПС использован метод повышения стабильности магнитного поля за счет понижения рабочего тока до уровня, который на 6–8% меньше критического, что обеспечивается путем увеличения магнитной постоянной СПС. С этой целью был увеличен наружный диаметр СПС с 192 до 202 мм намоткой дополнительных слоев провода диаметром 0.5 мм, в результате чего магнитная постоянная соленоида увеличилась от 0.117 до 0.125 Т/А, а расчетное значение рабочего тока при индукции 9.5 Т уменьшилось с 81.5 до 75 А. Для повышения однородности поля на последних шести слоях обмотки соленоида выполнен наружный паз, который обеспечил вдоль оси СПС неоднородность магнитного поля $5 \cdot 10^{-6} \text{ Ое}$ на длине 20 мм, а максимальный ток составил 76 А при индукции 9.5 Т.

Измеренная нестабильность магнитного поля при индукции 9.4 Т (ток 75.2 А) не превышала 10^{-8} Ое/ч и является не предельной, а скорее ограничена временем измерений (в течение 10 ч).

С целью дальнейшего увеличения однородности магнитного поля с уровня 10^{-6} Ое использовали сверхпроводниковые обмотки для компенсации осевых и радиальных градиентов поля СПС [7], которые размещены в зазоре между второй и третьей секциями соленоида. Применение обмоток компенсации позволило повысить однородность поля от 10^{-6} до $5 \cdot 10^{-8} \text{ Ое}$ в объеме рабочей ампулы диаметром 5 мм и высотой 10 мм.

Выводы

1. Показана принципиальная возможность получения магнитного поля с индукцией 9.5 Т с высокой однородностью и стабильностью на СПС диаметром внутреннего отверстия не менее 80 мм, изготовленного из сверхпроводникового провода сплава НТ-50 для спектрометра ЯМР высокого разрешения на 400 МГц.

2. Максимальное значение индукции магнитного поля СПС, изготовленного из провода диаметром 0.5 mm, составило 8.5 Т. Использование в качестве внутренней обмотки первой секции провода диаметром 0.7 mm позволило достичь индукции 9 Т, а провода диаметром 0.85 mm – 9.5 Т при температуре 4.2 К.

3. Высокая стабильность магнитного поля в «замороженном» режиме на уровне 10^{-8} Ое/ч и выше достигается при токе в СПС, который на 6–8% меньше критического значения.

4. Применение сверхпроводниковых обмоток для компенсации осевых и радиальных градиентов магнитного поля СПС позволило повысить однородность поля от 10^{-6} до $5 \cdot 10^{-8}$ Ое в объеме ампулы диаметром 5 mm и высотой 10 mm.

1. И.С. Краинский, И.Ф. Щеголев, В.А. Рубцов, в кн.: Сверхпроводящие сплавы и соединения, Наука, Москва (1972), с. 177.
2. В.И. Курочкин, А.Я. Лаптиенко, Н.В. Таряник, В.П. Луценко, ПТЭ № 2, 183 (1983).
3. Д.О. Федюк, Д.В. Варюхин, Л.Н. Прокофьева, Н.В. Таряник, ФТВД **29**, № 1, 121 (2019).
4. Д.В. Варюхин, Н.В. Таряник, Е.А. Дворников, Д.О. Федюк, ФТВД **29**, № 2, 98 (2019).
5. 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.
6. А.А. Глуценко, А.Я. Лаптиенко, Н.Н. Карагай, В.И. Курочкин, Измерительная техника № 6, 56 (1984).
7. А.с. № 1551150 СССР, Способ возбуждения сильного магнитного поля в сверхпроводящем соленоиде (для служебного пользования).
8. А.с. № 346758 СССР, Сверхпроводящая магнитная система со стабилизацией магнитного поля (для служебного пользования).
9. Н.В. Таряник, А.Я. Лаптиенко, В.В. Сухой, В.И. Курочкин, Н.Н. Карагай, в сб.: Вопросы атомной науки и техники. Серия: Общая и ядерная физика, ХФТИ АН УССР, Харьков (1985), вып. 1(30), с.79–83.

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

SUPERCONDUCTING SYSTEM WITH MAGNETIC FIELD INDUCTION OF 9.5 T FOR A NMR SPECTROMETER

The results of design and testing of a superconducting magnetic system with magnetic field induction of 9.5 T for a high-resolution NMR spectrometer of 400 MHz are reported. The ability of generation of magnetic field of 9.5 T in induction that is characterized by high uniformity and stability is demonstrated. The characteristics are provided by the use of a superconducting solenoid (SCS) made of superconducting alloy HT-50. The diameter of the operation area is not less of 80 mm. Magnetic field stability within the SCS is of 10^{-8} Ое/ч and higher. It is achieved at the current less of the critical one by 6–8%. The application of superconducting coils to compensation of axial and radial gradients of the magnetic field of the solenoid allowed an increase in the uniformity from 10^{-6} to $5 \cdot 10^{-8}$ Ое within the ampoule of 5 mm in diameter and 10 mm in height.

Keywords: superconducting solenoid, magnetic field induction, high-resolution NMR spectrometer, critical current, superconducting shim, uniformity and stability of the magnetic field

Fig. 1. Magnetic field induction dependence of the critical current in a superconducting wire made of HT-50 alloy: 1 – \varnothing 0.85 mm, 2 – \varnothing 0.7 mm, 3 – \varnothing 0.5 mm. Experimental data are at the points: A – $I = 92.3$ A, $B = 8.23$ T; B – $I = 71.5$ A, $B = 8.8$ T; C – $I = 97.15$ A, $B = 9$ T; D – $I = 91.5$ A, $B = 9.55$ T

Fig. 2. Current-voltage characteristic of a superconducting wire of HT-50 alloy