

Д.В. Варюхин /к.ф.-м.н./, Н.В. Таряник, Д.О. Федюк
 ГУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина» (Донецк)

ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА В ЗАМКНУТОМ СВЕРХПРОВОДНИКОВОМ КОНТУРЕ И МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ СЛАБОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Описан метод и устройство его реализации для измерения затухания постоянного тока в короткозамкнутом сверхпроводниковом контуре в виде небольших катушек в сильном магнитном поле сверхпроводникового соленоида при воздействии на образец внешнего переменного магнитного поля. Разработанная методика позволяет с высокой точностью измерять затухание тока в короткозамкнутом сверхпроводниковом образце, обусловленное возникновением сопротивления на уровне 10^{-11} Ом при воздействии переменного магнитного поля. Предложена методика измерения магнитной восприимчивости слабомагнитных конструкционных материалов в магнитном поле сверхпроводникового соленоида и приведена универсальная конструкция исследуемого образца с улучшенной однородностью магнитного поля намагниченности, обеспечивающая высокую точность измерений. Методы основаны на измерении магнитного поля магнитометром ядерного магнитного резонанса.

Ключевые слова: короткозамкнутый сверхпроводниковый контур, внешнее переменное магнитное поле, магнитная восприимчивость, резонансная частота, магнитометр ядерного магнитного резонанса.

Постановка проблемы

При разработке различных устройств, изготовленных из сверхпроводниковых материалов, таких как соленоиды, трансформаторы, которые работают на переменном токе или при воздействии на них внешних переменных магнитных полей, существует проблема возникновения и измерения затухания тока.

В сложных экспериментальных исследованиях со сверхпроводниковыми соленоидными, например, для ускорителей заряженных частиц высоких энергий, ЭПР- и ЯМР-спектроскопии предъявляются высокие требования к распределению, однородности и стабильности магнитного поля, которые могут искажаться остаточной намагниченностью конструкционных материалов. Это приводит к ошибкам экспериментов и увеличению длительности их проведения. К таким материалам относятся нержавеющие стали, сплавы на основе алюминия, латунь, медь. Поэтому к магнитным характеристикам конструкционных материалов предъявляются высокие требования.

Анализ последних исследований и публикаций

Согласно модели критического состояния [1], если неидеальный сверхпроводник 2-го рода поместить в переменное магнитное поле, то внутри сверхпроводника магнитное поле также

будет изменяться. Изменение магнитного потока в толще сверхпроводника, вызванное полем протекающего в нем тока, приводит к движению вихревых нитей (скачком магнитного потока) и, следовательно, к омическим потерям. Механизм диссипации энергии, возникающей при движении вихревых нитей в сверхпроводнике, до конца не изучен. Поскольку потери энергии имеют электромагнитное происхождение, расчет потерь сводится к вычислению магнитной энергии, которая поглощается сверхпроводником за период изменения магнитного поля.

Существует несколько методов измерения потерь в сверхпроводниках на переменном токе или в переменном магнитном поле, которые используются применительно к коротким образцам и катушкам. К ним в первую очередь относятся калориметрический и электрический методы [2,3], которые неприемлемы для измерения затухания тока в сверхпроводниковом контуре.

Для измерения магнитных характеристик материалов, таких как намагниченность и магнитная восприимчивость, используют индукционный метод [4] и магнитный метод [5] с использованием СКВИД-магнитометра. Индукционный метод измерения используют при комнатных температурах, а магнитный только при гелиевых температурах (4,2 К). В широком диапазоне температур наиболее приемлемым является метод измерения на основе ядерного магнитного резо-

нанса (ЯМР).

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является:

1. Разработка метода и устройства его реализации для измерения затухания постоянного тока в короткозамкнутом сверхпроводниковом образце при воздействии внешнего переменного магнитного поля.
2. Измерение магнитной восприимчивости слабомагнитных конструкционных материалов в сильном магнитном поле сверхпроводникового соленоида.

Основной материал исследования

В качестве материала по измерению затухания тока в короткозамкнутом образце используется сверхпроводник сплава НТ-50, а для измерения магнитной восприимчивости конструкционных материалов – нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т.

1. Измерение затухания тока в замкнутом сверхпроводниковом контуре

В сверхпроводнике в виде короткого образца или катушки, находящемся в переменном магнитном поле, возникают потери энергии различного происхождения: потери на вихревые токи в металлической матрице, потери на гистерезис в сверхпроводниковых нитях и потери за счет изменения собственного магнитного поля от протекающего в нем тока.

Метод измерения затухания тока в образце основан на измерении уменьшения магнитного поля тока с помощью магнитометра ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Схема установки приведена на рис. 1.

В гелиевом криостате 1 расположен источник внешнего магнитного поля в виде сверхпроводниковой магнитной системы, состоящей из внешнего 2 и внутреннего 3 соленоидов, установленных соосно, один внутри другого. Внешний соленоид 2 используется для создания постоянного магнитного поля высокой однородности в центральной зоне. Обмотка соленоида изготовлена из одножильного сверхпроводникового провода диаметром 0,38 мм сплава НТ-50 и имеет размеры: внутренний диаметр 45 мм, внешний диаметр 95 мм и длину 198 мм. Для повышения однородности магнитного поля до 10^{-4} - 10^{-5} на длине 10 мм вдоль оси в обмотке выполнен наружный корректирующий паз [6]. При токе 46 А соленоид создает постоянное магнитное поле с индукцией 6,0 Т. К началу и концу обмотки соленоида подключен сверхпроводниковый ключ, который обеспечивает короткозамкнутый режим с высокой стабильностью поля

во времени.

Внутренний соленоид 3 служит для создания переменного магнитного поля и выполнен в виде двух одинаковых встречно включенных однослойных обмоток диаметром 36 мм, длиной 25 мм и зазором между ними 5 мм. Обмотки соленоида изготовлены из сверхпроводникового провода диаметром 0,5 мм и содержат 90 витков. При токе 10 А соленоид создает переменное поле амплитудой до 150 эрстед, частотой до 10 Гц.

Короткозамкнутый ключом исследуемый сверхпроводниковый образец 4, выполненный в виде колец Гельмгольца, установлен в отверстии внутреннего соленоида 3. Внутри образца 4 соосно и симметрично относительно его центра установлен датчик магнитного поля 5 – датчик магнитометра ядерного магнитного резонанса [7]. Выполнение образца 4 в виде колец Гельмгольца обеспечивает в области расположения датчика 5 магнитное поле повышенной однородности от протекающего в нем тока. Каждая однослойная обмотка колец Гельмгольца содер-

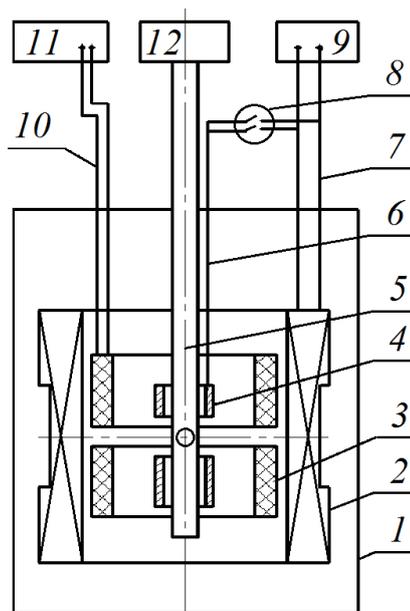


Рис. 1. Схема установки для измерения затухания тока в короткозамкнутом сверхпроводниковом контуре:

- 1 – криостат; 2 – внешний соленоид для создания постоянного магнитного поля;
- 3 – внутренний соленоид для создания переменного поля;
- 4 – короткозамкнутый образец;
- 5 – датчик ЯМР-магнитометра;
- 6 – токовводы для запитки образца;
- 7 – токовводы для запитки внешнего соленоида;
- 8 – переключатель;
- 9 – источник питания внешнего соленоида и образца;
- 10 – токовводы для запитки внутреннего соленоида;
- 11 – источник питания внутреннего соленоида;
- 12 – регистрирующий прибор

жит по 12 витков провода диаметром 0,75 мм, имеет диаметр 30 мм и длину 11 мм. Зазор между обмотками – 14 мм. Расчетное значение индуктивности образца $2,5 \cdot 10^{-5}$ Гн.

Внешний соленоид 2 с помощью токовводов 7 и исследуемый образец 4 с помощью токовводов 6 через переключатель 8 подключены к источнику постоянного тока 9. Внутренний соленоид 3 подключен к источнику переменного тока 11 посредством токовводов 10. Датчик 5 магнитометра соединен с генератором высокой частоты (на рис. 1 не показан) и регистрирующим прибором 12.

Устройство работает следующим образом. После охлаждения устройства до температуры 4,2 К и заливки в криостат 1 жидкого гелия от источника постоянного тока 9 по токовводам 7 вводят ток во внешний соленоид 2 и с помощью сверхпроводникового ключа (на рисунке не показан) переводят его в режим «замороженного» магнитного потока с высокой стабильностью магнитного поля. Магнитное поле соленоида 3 контролируют и измеряют датчиком 5 магнитометра. Величина магнитного поля B_0 и резонансная частота f_0 сигнала ЯМР связаны соотношением:

$$f_0 = \gamma \cdot B_0, \quad (1)$$

где γ – гиромагнитная константа для данного спинсодержащего вещества, на котором наблюдают сигнал ЯМР. Точность измерения резонансной частоты f_0 зависит от амплитуды и ширины сигнала ЯМР. Чем выше однородность магнитного поля, тем больше амплитуда и меньше ширина сигнала ЯМР и, соответственно, выше точность измерения резонансной частоты. С целью повышения однородности поля внешний соленоид выполнен с наружным корректирующим пазом в обмотке.

Затем от этого же источника тока 9 по токовводам 6 через переключатель 8 вводят постоянный ток в исследуемый короткозамкнутый сверхпроводниковый образец 4, предварительно разомкнув сверхпроводниковый ключ (на рисунке не показан), который после набора заданного тока «замораживают», а источник тока отключают. Образец 4 в результате протекания в нем тока создает дополнительное постоянное магнитное поле, после чего резонансная частота сигнала ЯМР изменится и станет, например, f_1 . Чтобы однородность результирующего постоянного магнитного поля оставалась высокой и не ухудшалась при вводе тока в образец, последний выполнен в виде колец Гельмгольца, магнитное поле которых однородно в пространстве в

окрестности центра.

Кроме того, с целью повышения стабильности постоянного магнитного поля и, соответственно, повышения точности измерений соединительные контакты в обмотках внешнего соленоида и сверхпроводникового образца выполнены холодной сваркой сверхпроводников с остаточным сопротивлением не более $10^{-11} - 10^{-12}$ Ом [8], что обеспечивает стабильность магнитного поля на уровне $10^{-6} - 10^{-8}$ в час.

Затем с помощью токовводов 10 от источника тока 11 вводят переменный ток во внутренний соленоид 3 и возбуждают переменное магнитное поле заданной частоты и амплитуды в области расположения исследуемого сверхпроводникового образца 4. Выполнение соленоида 3 в виде двух одинаковых встречно включенных обмоток обеспечивает слабую, близкую к нулю, индуктивную связь с соленоидом 2 и исследуемым образцом 4. Амплитуда переменного магнитного поля не превышала 100 эрстед, а изменение постоянного магнитного поля соленоида 2 за счет индуктивной связи с соленоидом 3 – менее 1 эрстеда. Кроме того, переменное магнитное поле возбуждают таким образом, чтобы его амплитуда со временем плавно уменьшалась от заданного значения до нуля. Такой характер переменного магнитного поля выбирают исходя из того, что индуктивная связь соленоидов 2 и 3 вследствие неточности изготовления отлична от нуля, и поэтому короткозамкнутый соленоид 2 «реагирует» на переменное поле, в результате чего стабильность его поля может ухудшиться, а точность измерений снизится. Если же амплитуда переменного магнитного поля во времени затухает, стабильность поля соленоида 2 не ухудшается.

Как отмечалось выше, в исследуемом сверхпроводниковом образце, находящемся в переменном магнитном поле, возникают потери энергии на вихревые токи в металлической матрице и потери на гистерезис в сверхпроводниковых волокнах, которые приводят к появлению сопротивления в сверхпроводнике.

По истечении определенного промежутка времени переменное магнитное поле выключают и измеряют новое значение резонансной частоты f_2 сигнала ЯМР. Изменение резонансной частоты от f_1 до f_2 позволяет определить величину затухания тока в образце как:

$$\frac{I_2 - I_1}{I_1} = \frac{f_2 - f_1}{f_1 - f_0}, \quad (2)$$

где I_1 и I_2 – начальное и конечное значения тока.

Затухание тока за время t в короткозамкну-

той цепи индуктивностью L и сопротивлением R описывается выражением:

$$I_2 = I_1 \exp\left(-\frac{Rt}{L}\right). \quad (3)$$

При $R(t/L) < 1$ выражение (3) приобретает вид:

$$I_2 = I_1 \left(1 - \frac{Rt}{L}\right). \quad (4)$$

Подставив (4) в (2), получим, что сопротивление короткозамкнутой цепи определяется из выражения:

$$R = \frac{L}{t} \left| \frac{f_2 - f_1}{f_1 - f_0} \right| = \frac{L}{t} \left| \frac{I_2 - I_1}{I_1} \right|. \quad (5)$$

Экспериментальные исследования по измерению затухания тока в короткозамкнутом сверхпроводниковом образце при воздействии на него переменного магнитного поля выполнялись в постоянном магнитном поле сверхпроводникового соленоида с индукцией 5 Т. В качестве спинсодержащего вещества датчика магнитометра ЯМР использовался мелко-дисперсный Al_{27} , растворенный в эпоксидной смоле, гиромагнитная константа которого $\gamma = 11,111975$ МГц/Т. Для повышения точности измерений резонансной частоты к магнитометру ЯМР подключен синтезатор частоты Ч6-31, который обеспечивал погрешность измерений не более 20 Гц.

Резонансная частота сигнала ЯМР на ядрах Al_{27} в постоянном магнитном поле 5 Т составила $f_0 = 55,5598$ МГц. После ввода тока в исследуемый сверхпроводниковый образец величиной $I_1 = 100$ А резонансная частота сигнала ЯМР изменилась и составила $f_1 = 56,671$ МГц, а после воздействия на образец переменного магнитного поля амплитудой 50 эрстед и частотой 5 Гц в течение 15 минут резонансная частота уменьшилась до $f_2 = 56,668$ МГц. Для исследуемого образца индуктивностью $2,5 \cdot 10^{-5}$ Гн, используя выражение (5), вычислено его сопротивление, которое составило $4,5 \cdot 10^{-11}$ Ом. Степень затухания тока при этом равнялась 0,14 А.

Таким образом, разработанная методика позволяет с высокой точностью измерять затухание тока в короткозамкнутом сверхпроводниковом образце, обусловленное появлением в нем сопротивления при воздействии таких факторов как внешнее переменное магнитное поле.

2. Измерение магнитной восприимчивости слабомагнитных материалов

Метод измерения магнитной восприимчивости слабомагнитных конструкционных материалов в сильном магнитном поле сверхпроводникового соленоида основан на измерении магнитного поля намагниченности исследуемого образца магнитометром ЯМР. Для повышения точности измерений предложена универсальная конструкция исследуемого образца, который создает собственное однородное магнитное поле намагниченности.

Схема установки для измерения магнитной восприимчивости приведена на рис. 2.

Установка содержит гелиевый криостат 1, в котором установлен сверхпроводниковый соленоид 2, создающий сильное магнитное поле с высокой однородностью и стабильностью, магнитометр ЯМР, включающий датчик 3, генератор высокой частоты (на рис. 1 не показан) и регистрирующий прибор 4. Исследуемый образец 5 выполнен в виде полого цилиндра из слабомагнитного материала и закреплен на штанге 6, позволяющей перемещать образец вдоль и снаружи датчика 3. Датчик 3 и штанга 6 герметично установлены в горловине криостата 1 с помощью уплотнения 7.

После заливки в криостат 1 жидкого гелия от внешнего источника питания (на рис. 2 не показан) в обмотку соленоида 2 вводят ток и возбуждают магнитное поле с высокой однородностью и стабильностью. Исследуемый образец 5 располагают в верхней части за пределами соленоида, а датчик 3 магнитометра устанавливают в отверстии соленоида так, чтобы ампула со спинсодержащим веществом Al_{27} располагалась в центральной однородной зоне магнитного поля соленоида, и измеряют резонансную частоту f_1 сигнала ЯМР. Затем с помощью штанги 6 опускают образец 5 вниз и устанавливают его в центре соленоида и симметрично датчику 3.

В однородном магнитном поле соленоида образец намагничивается и создает дополнительное магнитное поле ΔH , в результате чего резонансная частота сигнала ЯМР снова изменится и станет равной f_2 , соответствующей полю $(H - \Delta H)$. Изменение магнитного поля на ΔH вызывает изменение резонансной частоты:

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \gamma \Delta H. \quad (6)$$

С другой стороны, изменение магнитного поля за счет намагниченности образца равно:

$$\Delta H = \chi H F_0, \quad (7)$$

где χ – магнитная восприимчивость; H – магнит-

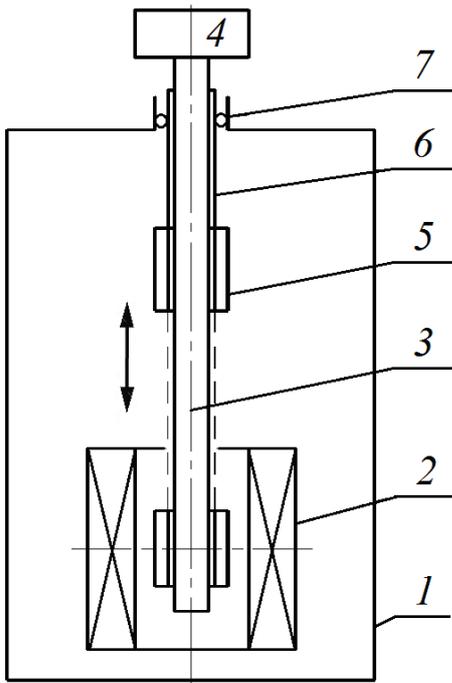


Рис. 2. Схема установки для измерения магнитной восприимчивости:

- 1 – криостат; 2 – сверхпроводниковый соленоид;
- 3 – датчик ЯМР-магнитометра;
- 4 – регистрирующий прибор; 5 – образец;
- 6 – штанга образца; 7 – уплотнение

ное поле соленоида; F_0 – фактор формы образца.

Из уравнений (6) и (7) определяют магнитную восприимчивость:

$$\chi = \frac{\Delta H}{HF_0} = \frac{1}{F_0} \left(\frac{f_2 - f_1}{f_1} \right). \quad (8)$$

Распределение магнитного поля намагниченности внутри исследуемого образца, выполненного в виде полого цилиндра, описывается выражением:

$$H_z(r, \theta) = M_z \left[F_0(\alpha, \beta) + F_2(\alpha, \beta) P_2(\cos \theta) \left(\frac{r}{\alpha} \right)^2 + F_4(\alpha, \beta) P_4(\cos \theta) \left(\frac{r}{\alpha} \right)^4 + \dots \right], \quad (9)$$

где M_z – намагниченность материала образца; $\alpha = D/d$ – приведенный наружный диаметр; $\beta = l/d$ – приведенная длина; l – длина; d – внутренний диаметр; D – наружный диаметр; $P_{2n}(\cos \theta)$ – полиномы Лежандра, описывающие зависимость членов разложения ряда от полярного угла θ ;

$$F_0(\alpha, \beta) = \beta \left[\frac{1}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \beta^2}} \right],$$

$$F_2(\alpha, \beta) = \frac{3\beta}{2} \left[\frac{1}{(1 + \beta^2)^{5/2}} - \frac{1}{(\alpha^2 + \beta^2)^{5/2}} \right],$$

$$F_4(\alpha, \beta) = \frac{5\beta}{8} \left[\frac{4\beta^2 - 3}{(1 + \beta^2)^{9/2}} - \frac{\alpha^2(4\beta^2 - 3\alpha^2)}{(\alpha^2 + \beta^2)^{9/2}} \right].$$

Однородность поля намагниченности образца определяется членами ряда $F_2(\alpha, \beta)$, $F_4(\alpha, \beta)$, $F_6(\alpha, \beta)$ и т.д., при этом:

$$F_2(\alpha, \beta) > F_4(\alpha, \beta) > F_6(\alpha, \beta).$$

Если образец, выполненный в виде полого цилиндра, имеет приведенные к внутреннему диаметру наружный диаметр α и длину β , удовлетворяющие условию:

$$\beta = \sqrt{\frac{\alpha^2 - \alpha^{4/5}}{\alpha^{4/5} - 1}},$$

то он создает однородное поле намагниченности в силу того, что наибольший по абсолютной величине член разложения $F_2(\alpha, \beta)$ в уравнении (9) равен нулю. Улучшение однородности магнитного поля ведет к повышению точности измерения резонансной частоты сигнала ЯМР и, следовательно, к повышению точности измерения магнитной восприимчивости, особенно материалов со слабой магнитной восприимчивостью.

В исследованиях по измерению магнитной восприимчивости использовались два образца разных размеров из конструкционной немагнитной нержавеющей стали марки 12X18H10T. Первый образец имел размеры: диаметр внутреннего отверстия 15 мм, наружный диаметр 24 мм, длину 23,4 мм и изготовлен из круглой стальной заготовки. Второй образец диаметром отверстия 20 мм, наружным диаметром 24 мм и длиной 26,7 мм вырезан из нержавеющей трубы вышеприведенных диаметров. Фактор формы $F_0(\alpha, \beta)$ первого образца равен 0,145, второго образца – 0,0566. Магнитное поле с индукцией до 7 Т, однородностью $2 \cdot 10^{-5}$ отн. ед. в объеме $0,5 \text{ см}^3$ и стабильностью $1 \cdot 10^{-6}$ в час создавалось сверхпроводниковым соленоидом.

Измерения магнитной восприимчивости проводились при температуре 4,2 К в магнитном поле с индукцией 5 Т. В отсутствие исследуемо-

го образца резонансная частота сигнала ЯМР на ядрах Al_{27} в магнитном поле 5 Т составила 55560 кГц. После установки образца снаружи и симметрично датчика ЯМР резонансная частота сигнала изменилась на 3,35 кГц. Магнитная восприимчивость первого образца, вычисленная по формуле (7), составила $4,15 \cdot 10^{-4}$, восприимчивость второго образца – $4,1 \cdot 10^{-4}$, что с приемлемой точностью совпадает с результатами работы [4].

В заключение отметим, что предложенный метод может быть также успешно использован и для измерения магнитной восприимчивости материалов на уровне 10^{-5} - 10^{-6} , для чего однородность магнитного поля соленоида должна быть еще выше и составлять 10^{-6} - 10^{-7} отн. ед., которая достигается путем использования сверхпроводниковых обмоток коррекции однородности поля [9].

Выводы

1. Предложенный метод измерения затухания постоянного тока в короткозамкнутом сверхпроводниковом образце в сильном магнитном поле сверхпроводникового соленоида при воздействии на образец переменного магнитного поля позволяет с высокой степенью точности измерять затухание тока в образце, которое обусловлено возникновением сопротивления в последнем. Так, после воздействия на образец с током 100 А переменного магнитного поля амплитудой 50 эрстед и частотой 5 Гц в течение 15 минут степень затухания тока в образце составила 0,14 А, а его сопротивление составило $4,5 \cdot 10^{-11}$ Ом.

2. В исследованиях по измерению магнитной восприимчивости использовались образцы из конструкционной немагнитной нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т.

Для повышения точности измерения магнитной восприимчивости слабомагнитных конструкционных материалов в магнитном поле сверхпроводникового соленоида предложена универсальная конструкция исследуемого образца, который создает однородное магнитное поле намагниченности. Магнитная восприимчивость образцов составила $(4,1-4,15) \cdot 10^{-4}$, что с приемлемой точностью совпадает с результатами

ми работы [5].

3. Высокая степень точности измерения затухания тока в короткозамкнутом сверхпроводниковом образце и магнитной восприимчивости слабомагнитных материалов основана на использовании высокоточного метода ЯМР для измерения магнитного поля.

Список литературы

1. Bean, С.Р. Magnetization of High-Field Superconductors / С.Р. Bean // Reviews of Modern Physics. – 1964. – Vol. 36. No.1. – P. 31-39.
2. Hlasnik G., Lefrancois J.P., Pouillange J.P., SEDAP 69-308, SUP 84, 1969; SEDAP 18/11, 1969.
3. Fietz, W.A. Electronic Integration Technique for Measuring Magnetization of Hysteretic Superconducting Materials / W.A. Fietz // Rev. Sci. Instr. – 1965. – No.36. – P.1621.
4. Костышин, А.М. Установка для исследования магнитных свойств материалов при низких температурах / А.М. Костышин, И.И. Сыч, Г.А. Такзей // Физические основы исследований металлов: сб. научн. тр. – Киев: Наукова думка, 1981. – С. 31-36.
5. Применение магнитных методов для исследования эволюции структуры в аустенитных нержавеющей сталях после длительной эксплуатации энергоблоков на АЭС / В.М. Ажажа [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. – 2009. – № 4-2. – С. 241-246.
6. Монтгомери, Д. Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов / Д. Монтгомери. – Москва: Мир, 1971. – 360 с.
7. Автодинный ЯМР-тесламетр. / А.А. Глущенко [и др.] // Измерительная техника. – 1984. – № 6. – С. 56.
8. Лаптиенко, А.Я. Исследование параметров соединительных контактов обмоточных сверхпроводников / А.Я. Лаптиенко, В.А. Похилов // Вопросы атомной науки и техники. – 1986. – Вып.2. – № 6. – С.27.
9. Сверхпроводящая магнитная система для радиоспектрометра ядерного магнитного резонанса высокого разрешения на 200 МГц / В.И. Курочкин [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 1983. – № 2. – С.183-185.

D.V. Varyukhin /Cand. Sci. (Phys.-Math.)/, N.V. Taryanik, D.O. Fedyuk
Donetsk Institute for Physics and Engineering Named after A.A. Galkin (Donetsk)

THE CURRENT MEASUREMENT IN A SHORTED SUPERCONDUCTING CIRCUIT AND MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF SUB-MAGNETIC MATERIALS

Background. The analysis of the magnetic field influence on the dissipationless current in the super-

conductor and the measurement of magnetic susceptibility of sub-magnetic materials is a key in designing devices based on superconductors, in particular, the solenoids. The objective of this paper is to develop a method of measuring the damping of the current in a shorted superconducting sample and the magnetic susceptibility of sub-magnetic structural materials in a strong magnetic field of the superconducting solenoid by using a nuclear magnetic resonance (NMR) magnetometer.

Materials and/or methods. Measurement of the current damping in the superconducting sample in the form of Helmholtz rings exposed to an alternating magnetic field performed in a strong magnetic field of a superconducting solenoid. A high degree of measurement accuracy is achieved by using of NMR magnetometer. The magnetic susceptibility of sub-magnetic materials determined by the same method, the material is stainless steel 12X18H10T, and the sample is made in the form of a hollow cylinder.

Results. The proposed method is based on nuclear magnetic resonance and provides high stability and measurement accuracy. It is experimentally determined that the proposed method allows measuring the resistance in a superconducting sample at 10-11 Ohms.

The magnetic susceptibility of stainless steel 12X18H10T is at the level of $4 \cdot 10^{-4}$, which corresponds well with the results of other researchers.

Conclusion. Presented the technique and the results of damping measurements of the current in a shorted superconducting circuit sample exposed to an external alternating magnetic field and the magnetic susceptibility of sub-magnetic materials in a magnetic field of the superconducting solenoid.

Keywords: shorted superconducting circuit, external alternating magnetic field, magnetic susceptibility, resonant frequency, nuclear magnetic resonance magnetometer.

Сведения об авторах

Д.В. Варюхин

Телефон: +380 (50) 774-82-69
Эл. почта: fedykdim@gmail.com

Д.О. Федюк

Телефон: +380 (50) 774-82-69
Эл. почта: fedykdim@gmail.com

Н.В. Таряник

Телефон: +380 (95) 219-00-96
Эл. почта: fedykdim@gmail.com

Статья поступила 17.10.2017 г.

© Д.В. Варюхин, Н.В.Таряник, Д.О. Федюк, 2017
Рецензент д.т.н., доц. И.А. Бершадский

