

Измерение параметров сверхпроводящих катушек с неизолированными обмотками

Евгений Павлович Красноперов^{1✉}, Валентин Васильевич Гурьев², Василий Владимирович Сычугов³, Дмитрий Сергеевич Яшкин⁴, Сергей Викторович Шавкин⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

¹krasnoперov_ep@nrcki.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-9237-1535>

²gurev_vv@nrcki.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4946-2559>

³sychugov_vv@nrcki.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1150-1447>

⁴yashkin_ds@nrcki.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3620-5564>

⁵shavkin_sv@nrcki.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7369-5032>

¹ Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская область, Россия

Аннотация. Рассмотрена проблема определения электрических параметров сверхпроводящих катушек с неизолированными обмотками. Описаны процедуры измерений параметров неизолированных сверхпроводящих обмоток, в частности, индуктивность измерена по напряжению при линейном вводе тока с заданной скоростью. Показана невозможность определения индуктивности в обмотке с неизолированным сверхпроводником в нормальном состоянии. Отмечено, что в сверхпроводящем состоянии, при токах ниже критического значения, индуктивность обмотки сравнима с индуктивностью для изолированного провода. Приведены результаты измерений индуктивности, радиального сопротивления, статической вольт-амперной и магнитной характеристик двух ленточных катушек с неизолированными сверхпроводящими обмотками, одна из которых имела спаянное соединение. Проведено сравнение параметров изолированных и неизолированных сверхпроводящих обмоток и сформулированы условия измерений последних. Результаты исследования применимы при разработке и эксплуатации сверхпроводящих устройств с неизолированными обмотками, такими как катушки, магнитные накопители, обмотки статоров электрических машин и др.

Ключевые слова: электрические параметры, сверхпроводящие неизолированные обмотки

Для цитирования: Красноперов Е. П., Гурьев В. В., Сычугов В. В., Яшкин Д. С., Шавкин С. В. Измерение параметров сверхпроводящих катушек с неизолированными обмотками // Измерительная техника. 2021. № 9. С. 41–46. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-9-41-46>

Measurement of parameters of the superconducting non-insulated coils

Evgeniy P. Krasnoперov^{1✉}, Valentin V. Guryev², Vasyli V. Sychugov³, Dmitri S. Yashkin⁴, Sergei V. Shavkin⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

¹krasnoперov_ep@nrcki.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-9237-1535>

²gurev_vv@nrcki.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4946-2559>

³sychugov_vv@nrcki.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1150-1447>

⁴yashkin_ds@nrcki.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3620-5564>

⁵shavkin_sv@nrcki.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7369-5032>

¹ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region, Russia

Abstract. The electrical characteristics of superconducting coils with non-insulated windings are studied. The procedures for measuring the parameters of uninsulated superconducting windings are described. In particular, the inductance is measured by voltage with a linear current input at a given rate. Attention is focused on the impossibility of correctly determining the inductance in a winding with an uninsulated superconductor in a normal state. It is noted that in a superconducting state at currents below the critical value, the inductance of the winding is comparable to the inductance with an insulated wire. The results of measurements of inductance, radial resistance, static current-voltage and magnetic characteristics of two tape coils with non-insulated superconducting windings, one of which had a soldered connection, are presented. Conditions for measuring the parameters of non-insulated superconducting windings are formulated when they are compared with insulated windings.

Keywords: electrical parameters, superconducting bare windings

Введение. Традиционно в сверхпроводящих соленоидах применяются провода с изолированными сверхпроводящими обмотками (ИСО). Электрические параметры систем с ИСО, такие как индуктивность, сопротивление, индекс вольт-амперной характеристики (ВАХ) и др., рассчитываются с приемлемой точностью [1]. С развитием технологии изготовления высокотемпературных сверхпроводящих материалов (далее – сверхпроводников) системы с ИСО стали использоваться для создания магнитных полей в области температур 20–50 К. Магнитные системы обычно охлаждают, размещая их в криожидкости или в охлаждённых газах (гелии, водороде, неоне, азоте). В последние годы активно развиваются методы косвенного охлаждения [2]. При косвенном охлаждении магнитная система помещается в вакуумную камеру и охлаждается криокулером с помощью теплопроводящих материалов. При косвенном охлаждении изоляция провода обмотки существенно снижает скорость охлаждения. Эффективность косвенного охлаждения – одна из причин широкого распространения неизолированных сверхпроводящих обмоток (НИСО) [3, 4].

У современной сверхпроводящей ленты многослойная структура. На подложку из сплава хастеллой или нержавеющей стали (в случае сверхпроводящей ленты Курчатовского института) наносится буферный оксидный слой, на котором формируется текстурированный сверхпроводящий слой Re(Y)BaCuO . Снаружи на ленту наносится защитное покрытие из серебра и стабилизирующий слой меди [5]. Если соленоид изготовлен из такой изолированной ленты, то его электродинамика подобна электродинамике классического низкотемпературного сверхпроводящего соленоида. В частности, измерения ВАХ короткого куска ленты в разных магнитных полях и ориентациях поля к плоскости ленты, а также при различных температурах позволяют достаточно надёжно спрогнозировать свойства магнитной системы с ИСО [5, 6].

Системы с НИСО требуют специального рассмотрения, поскольку ряд их параметров, например, индуктивность, не могут быть корректно определены в нормальном состоянии. Из-за отсутствия изоляции ток в НИСО может перетекать между соседними слоями. Междуслойное (межвитковое) сопротивление называют радиальным или контактным для соленоида с галетной обмоткой [10]. Значение этого контактного сопротивления определяет динамику НИСО. Динамику НИСО сложно прогнозировать, поскольку контактное сопротивление зависит от механических усилий при намотке соленоида, от температурных и поперечных деформаций обмотки (при протекании тока) и поперечной электропроводности самой ленты.

Серьёзным недостатком сверхпроводящих лент является низкая скорость распространения нормальной зоны и, как следствие, высокая плотность выделения тепловой энергии при переходе в нормальное состояние. В НИСО электрический контакт между витками обеспечивает высокую поперечную теплопроводность. В результате тепловая энергия может распространяться как в продольном (вдоль ленты), так и в поперечном (радиальном) направлении. Высокая поперечная теплопроводность радикально снижает плотность выделяемой

тепловой энергии, значительно повышает стабильность сверхпроводящего состояния и снижает вероятность разрушения обмотки при случайном локальном нагреве [7]. Устойчивость к тепловым возмущениям дополнительно стимулирует интерес к системам с НИСО.

Для многих конструкций, например магнитных накопителей энергии, требуется знать индуктивность системы сложной геометрии. Для галетной ленточной системы даже с изолированной обмоткой расчёты индуктивности весьма приближённые. Знание индуктивности ещё более актуально для НИСО, толщина ленты которых может изменяться из-за дополнительных стабилизирующих слоёв [8].

Цель работы – изучение электрических характеристик катушек с неизолированными обмотками для определения таких параметров сверхпроводящей обмотки, как индуктивность, радиальное сопротивление, статическая ВАХ и магнитная характеристика.

Конструкции катушек. Авторы настоящей статьи изготовили и исследовали две катушки галетного типа из неизолированной сверхпроводящей ленты. Катушки использовали в многосекционном соленоиде магнитного охлаждения [5]. Для спайки катушек необходимы галеты одинаковых размеров (внутренний и наружный диаметры соответственно 88 и 120 мм). Каждая катушка представляла собой двойную галету, намотанную на оксидированный алюминиевый каркас. Катушки наматывались с натяжением ленты около 40 Н. Катушка № 1 намотана единым куском ленты длиной 84 м, шириной 4 мм и толщиной 0,10 мм. Для достижения требуемого внешнего диаметра 120 мм, а также улучшения охлаждения и стабильности катушки, на каждой галете между наружными слоями обмотки помещали медную ленту толщиной 0,05 мм длиной 20 м. В катушке № 2 использовали ленту толщиной 0,16 мм, шириной 4 мм. Эту катушку наматывали двумя кусками ленты длиной 31 и 29 м, спаянными между собой дополнительным сверхпроводниковым отрезком длиной 8 см и толщиной 0,1 мм. Припаиваемый отрезок переворачивали, чтобы пайка проводилась сверхпроводящими сторонами, и подложки располагались снаружи. Пайку осуществляли с помощью ленточного паяльника [9] непосредственно на обмотке.

Основные измерения проводили в жидком азоте ($T = 77 \text{ К}$). Катушку № 1 также изучали при $T = 20 \text{ К}$ в криокулере с использованием косвенного охлаждения. В этом случае тепловую энергию от обмотки отводили алюминиевыми оксидированными дисками.

Описание эквивалентной схемы галетной катушки. В катушке с неизолированной обмоткой в нормальном состоянии ($T > T_{\text{кр}}$, где $T_{\text{кр}}$ – критическая температура) не определены азимутальный (круговой) ток I_a и, соответственно, индуктивность L . В сверхпроводящем состоянии ($T < T_{\text{кр}}$), при токах ниже критического, ток течёт по сверхпроводнику с нулевым сопротивлением, имея только азимутальную составляющую. В этом случае индуктивность L обмотки будет такой же, как для изолированного провода.

В пределе низких частот (т. е. когда скорость ввода тока значительно ниже скорости релаксации – установления

равновесия в системе) катушку с НИСО можно описать эквивалентной схемой (рис. 1). Радиальное межвитковое сопротивление R_p возникает из-за отсутствия изоляции между витками. От управляемого источника питания на катушку подается ток I_n , который в обмотке имеет две составляющие: $I_n = I_a + I_p$. Круговой ток I_a течёт по сверхпроводящему слою. Именно этот ток создает магнитное поле в катушке. Радиальная составляющая тока I_p возникает из-за отсутствия изоляции между слоями. Радиальное сопротивление R_p включает сопротивление контактов между слоями и поперечное сопротивление собственно сверхпроводящей ленты. Когда круговой ток I_a достигает критической величины $I_{кр}$, сверхпроводник переходит в резистивное состояние, которое обычно описывают степенной ВАХ:

$$U(I_a) = U_0 (I_a / I_{кр})^N,$$

где напряжение U_0 определяет выбор критического тока $I_{кр}$ (ток считается критическим при напряжении U_0); N – крутизна ВАХ.

В резистивном состоянии в индуктивной цепи возникает добавочное нелинейное сопротивление $R_n = U(I_a) / I_a$ [10]. Пока значение R_n мало ($R_n \ll R_p$), его допустимо использовать для описания НИСО. При больших значениях R_n из-за роста радиального тока зависимость магнитного поля от тока становится нелинейной (об этом ниже), и определение индуктивности как изолированного сверхпроводника проблематично из-за неопределённости R_p . Если обмотка имеет паяные соединения, как в случае катушки № 2, то в сверхпроводящей цепи возникает постоянное сопротивление спая $R_{сп}$. На рис. 1 $R_{сп} = R_n$.

Измерение статической вольт-амперной характеристики. Измерение ВАХ служит для определения критического тока, выше которого могут произойти необратимые процессы нагрева и переход сверхпроводника в нормальное состояние. На коротком образце ленты найденный по ВАХ критический ток зависит от магнитного поля и его ориентации. Если магнитное поле перпендикулярно плоскости ленты, то критический ток при $T = 77$ К в три раза меньше, чем когда поле лежит в плоскости ленты [5]. ВАХ ленточной катушки является интегральной характеристикой, поскольку в обмотке изменяется и поле, и его ориентация к плоскости ленты. Принципиальная особенность измерения статической ВАХ катушки с НИСО состоит в том, что из-за радиальной составляющей тока требуется корректировать круговой ток I_a , текущий в сверхпроводящем слое.

Параметры ВАХ – критический ток и сопротивление индуктивной (сверхпроводящей) цепи – необходимо знать для корректного определения элементов эквивалентной схемы, изображенной на рис. 1. Для статической ВАХ в НИСО напряжение и токи измеряли после завершения релаксационных процессов перетекания токов следующим образом. Поступающий в катушку ток I_n фиксировали и измеряли напряжение U обмотки катушки. Поскольку $I_n = \text{const}$, то напряжение экспоненциально падало из-за снижения радиального (нормального) тока с характерным временем релаксации τ .

При времени $t \gg \tau$ значение $U(t \rightarrow \infty)$ представляло собой точку ВАХ для статического режима заданного тока.

На рис. 2 показана релаксация напряжения катушки № 1 при фиксации входного тока с последовательным увеличением его значений. При малых фиксированных токах $I \ll I_{кр}$, напряжение обмотки стремится к нулю. Это указывает на то, что $R_n = 0$; $R_{сп} = 0$, и весь ток течёт бездиссипативно по сверхпроводящему слою, т. е. $I_a = I_n$. Если напряжение стремится к конечному значению, значит в обмотке наступает резистивное состояние. Таким образом, статическая ВАХ катушки представляет собой зависимость напряжения $U(t \rightarrow \infty)$ при фиксированных токах I .

Статические ВАХ обеих катушек показаны на рис. 3. В рамках приведены релаксационные функции напряжения в логарифмическом масштабе $\log U(t)$, из которых путём аппроксимации определялись значения U при $t \rightarrow \infty$.

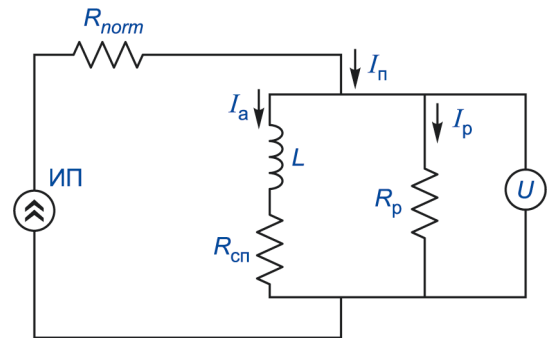


Рис. 1. Эквивалентная схема катушки с неизолированной сверхпроводящей обмоткой: ИП – управляемый источник питания

Fig. 1. Equivalent circuit of the bare superconducting coil: SP – controlled power supply

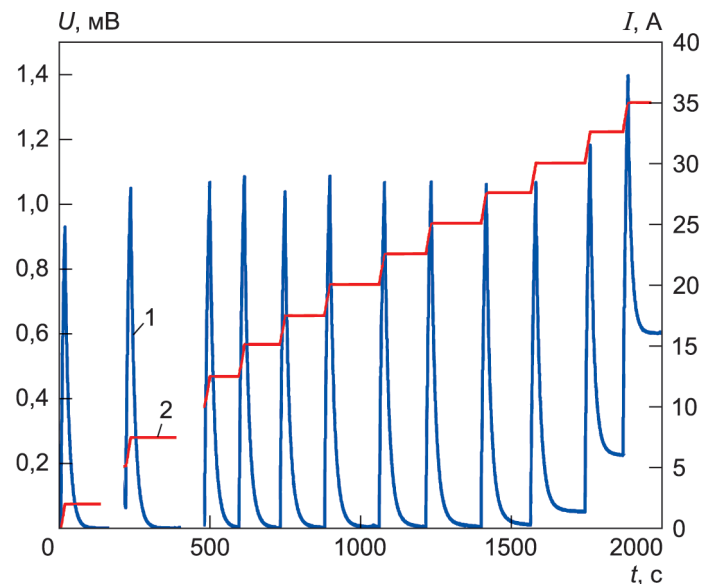


Рис. 2. Релаксация напряжения катушки № 1 при фиксации входного тока (1) и зависимость тока от времени (2)

Fig. 2. Relaxation of the voltage of the coil No. 1 when fixing the input current (1) and the dependence of the current on time (2)

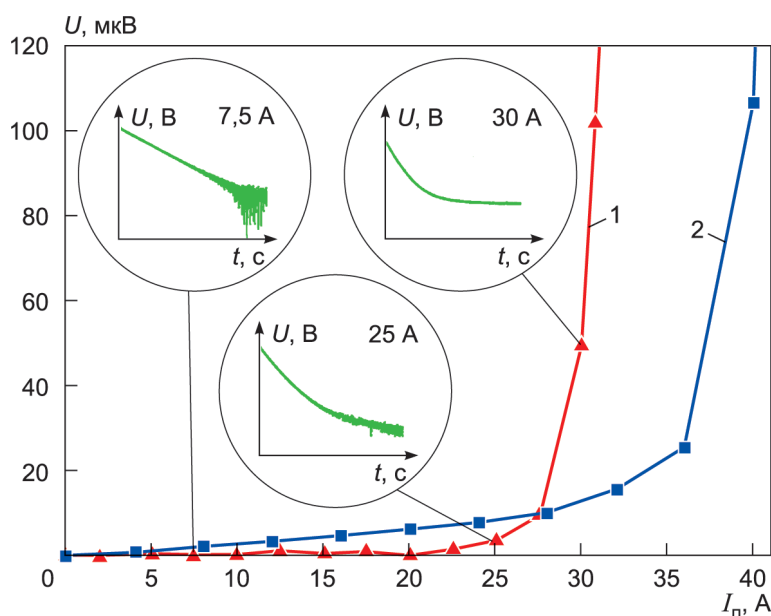


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики катушки № 1 и спаянной катушки № 2 при $T = 77$ К – соответственно 1, 2; на врезках показаны релаксации напряжения $\log U(t)$ при выбранных токах

Fig. 3. Current-voltage characteristics with $T = 77$ K of coil No. 1 (1) and soldered coil No. 2 (2); the insets shown voltage relaxation $\log U(t)$ at the selected currents

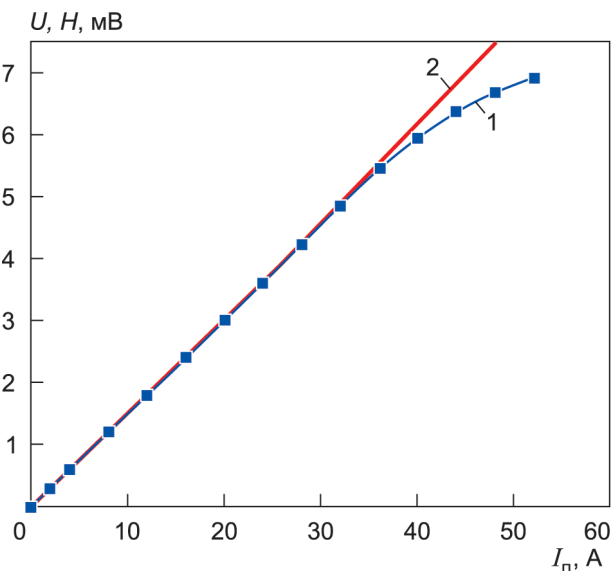


Рис. 4. Магнитное поле в центре катушки с НИСО № 2 в зависимости от фиксированного внешнего тока I_{ext} (1) и магнитная характеристика $H(I)$ ИСО (2)

Fig. 4. The magnetic field in the center of the bare superconducting coil No. 2 depending on the fixed external current I_{ext} (1) and the magnetic characteristic $H(I)$ of the insulated winding (2)

В катушке № 1 появление остаточного напряжения связано с движением флюксидов при приближении к критическому току. В случае паяного соединения сверхпроводника для катушки № 2 напряжение отлично от нуля при всех токах и резко возрастает при токах выше критического. Сопротивление спая, оцененное на линейном

участке ВАХ спаянной катушки № 2, составляло $R_{сп} = dU/dI = 0,33$ мкОм.

Отметим, что получаемые таким способом ВАХ катушек с НИСО, не вполне сопоставимы с ВАХ катушек с ИСО. Дело в том, что в эксперименте измеряется ток от источника I_n , а ток в катушке совпадает с ним только если $U = 0$. При наличии напряжения в катушке течёт радиальный ток $I_p = U/R_p$. Поскольку для ВАХ требуется ток в сверхпроводнике $I_a = I_n - I_p$, то для истинной ВАХ измеряемый ток на рис. 3 следует уменьшить на величину радиальной составляющей тока. Вблизи $I_{кр}$ поправки невелики. Так для ВАХ катушки № 2 на рис. 3 при максимальном $U = 0,55$ мВ и $R_p = 0,55$ мОм ток $I_a = 43$ А, что на 1 А меньше тока источника I_n . Как известно, ВАХ является степенной функцией с большим индексом $U \sim (I/I_{кр})^N$, где $N = 10 \dots 20$ [1], поэтому для сопоставления ВАХ катушек с ИСО и НИСО при больших токах разницу $(I_n - I_p)$ необходимо учитывать.

Радиальный ток, возникающий из-за отсутствия изоляции, влияет на магнитную характеристику катушки, т. е. на зависимость поля от протекающего тока $H(I)$. И в нормальных, и в сверхпроводящих катушках с изоляцией $H(I)$ – линейная функция. В катушках с НИСО это не так. На рис. 4 изображена магнитная характеристика катушки с НИСО. Вблизи $I = 40$ А наблюдается отклонение от линейной зависимости. Из ВАХ на рис. 3 следует, что это значение близко к критическому току. В катушке с НИСО при $I > I_{кр}$ в сверхпроводящем слое резко увеличивается сопротивление, которое снижает кольцевой ток на величину радиального тока, что уменьшает магнитное поле. В результате магнитная характеристика становится нелинейной при закритических токах.

Измерение индуктивности катушек с НИСО. Для измерения индуктивности в обмотку катушки вводим с постоянной скоростью $v = dI_n/dt = \text{const}$ ток I_n от источника питания. Примем условие, что круговой ток I_a меньше критического, поскольку это отвечает корректному определению индуктивности НИСО.

Из равенства напряжений индуктивной L и резистивной R_p ветвей схемы рис. 1

$$U = I_p R_p = L dI_a/dt + I_a R_{сп}$$

получим следующее дифференциальное уравнение для кругового тока I_a :

$$dI_a/dt + I_a/\tau - v\tau R_p/L = 0, \quad (1)$$

где v – скорость ввода тока; $\tau = L/(R_p + R_{сп})$ – характерное время релаксации тока.

Уравнение (1) имеет решение

$$I_a = R_p / (R_p + R_{сп}) v \{ t - \tau [1 - \exp(-t/\tau)] \}.$$

Соответственно, напряжение на катушке зависит от времени

$$U = v\tau R_p R_{сп} / (R_p + R_{сп}) + v\tau L R_p^2 [1 - \exp(-t/\tau)] / (R_p + R_{сп})^2. \quad (2)$$

Катушка № 1 намотана единым куском (без спая), и $R_{\text{сп}}=0$. Поэтому для неё

$$U = \nu L [1 - \exp(-t/\tau)]. \quad (3)$$

На рис. 5 показана зависимость напряжения катушки № 1 при линейном вводе тока с постоянной скоростью $\nu=0,067$ А/с. Аппроксимируя зависимость $U(t)$ выражением (3), получаем значения L , τ и радиальные сопротивления, вычисленные как $R_p=L/\tau$. В табл. 1 приведены значения параметров катушки № 1 при двух значениях температуры.

Из табл. 1 следует, что с изменением температуры индуктивность не изменяется, а радиальное сопротивление после охлаждения уменьшается примерно в три раза.

Для спаянной катушки № 2 сопротивление спая $R_{\text{сп}}=0,33$ мкОм выше определено из ВАХ. Сопротивление спая $R_{\text{сп}}$, как показано ниже, оказывается на три порядка меньше радиального сопротивления $R_{\text{сп}} \ll R_p$, и напряжение с высокой точностью можно описать выражением

$$U = \nu t R_{\text{сп}} + \nu L [1 - \exp(-t/\tau)]. \quad (4)$$

Это выражение отличается от (3) линейно возрастающим слагаемым, которое возникает из-за наличия сопротивления спая в цепи сверхпроводника.

На рис. 6 символами показана зависимость $U(t)$ при $T=77$ К, в которой вычтена линейная составляющая – напряжение спая $U_{\text{сп}}=\nu t R_{\text{сп}}$. Кривой 1 изображена аппроксимирующая функция (3). Линией 2 показан ввод тока с постоянной скоростью ν .

В табл. 2 приведены результаты измерений с использованием как исходной, так и скорректированной на сопротивление спая зависимости $U(t)$. Без учёта напряжения спая значение индуктивности завышено на 0,4 %.

Радиальное сопротивление $R_p=0,54$ мОм на три порядка больше сопротивления спая, что оправдывает пренебрежение последним в выражении (2).

Описанная процедура измерения параметров НИСО справедлива до токов ниже критических $I_{\text{кр}}$. При больших токах напряжение катушки степенным образом зависит от протекающего тока, и уравнения становятся нелинейными, с весьма сложным алгоритмом решения. Кроме того, при больших значениях R_n возникают значительные радиальные токи, что требует определить понятие индуктивности.

Закключение. В НИСО из-за низкого радиального сопротивления между витками их индуктивность надёжно определяется только при температурах ниже сверхпроводящего перехода. Если в пределе низких частот входной ток заметно ниже критического тока сверхпроводника, то ток в обмотке имеет только азимутальную составляющую. В этом случае индуктивность НИСО такая же, какая была бы в ИСО.

Экспериментально индуктивность НИСО и межвитковое сопротивление определяются путём изменения напряжения катушки при линейном вводе тока с заданной скоростью.

Таблица 1

Параметры катушки № 1			
T , К	ν , А/с	L , мГн	R_p , мОм
20	0,067	13	0,118
77	0,087	13	0,330

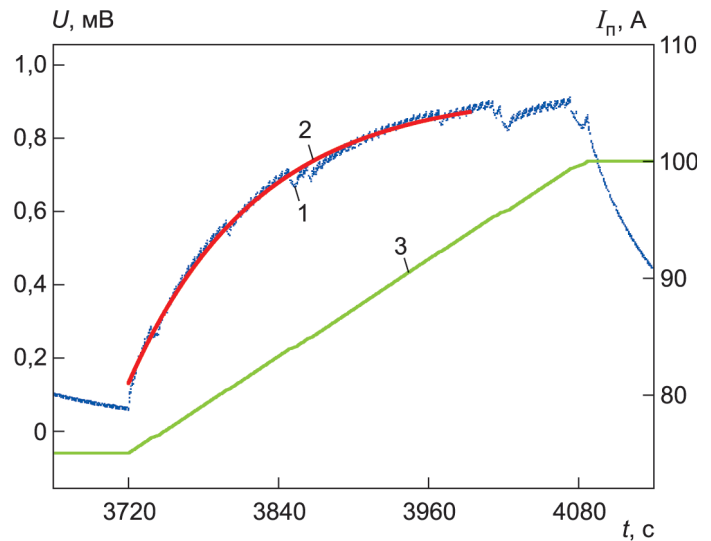


Рис. 5. Зависимость напряжения на катушке № 1 при линейном подъёме тока и значениях $T=20$ К, $\nu=0,067$ А/с и её аппроксимация функцией (3) (соответственно 1, 2); зависимость тока от времени (3)

Fig. 5. Dependence of the voltage on the coil No. 1 with a linear rise in current and values $T=20$ К, $\nu=0,067$ А/с and its approximation by function (3) (respectively 1, 2); time dependence of current (3)

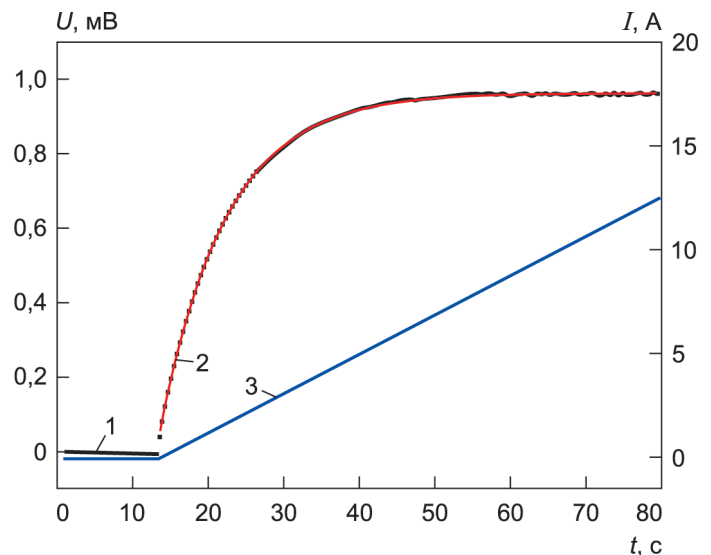


Рис. 6. Скорректированное при $T=77$ К напряжение катушки № 2 $U=U_{\text{н}}-\nu t R_{\text{сп}}$ и его аппроксимация выражением (3) (соответственно 1, 2); ввод тока с постоянной скоростью $\nu=0,19$ А/с; $R_{\text{сп}}=0,33$ мкОм (3)

Fig. 6. The corrected at $T=77$ К voltage of the coil No. 2 $U=U_{\text{н}}-\nu t R_{\text{сп}}$ and its approximation by expression (3) (respectively 1, 2); constant speed current injection $\nu=0,19$ А/с; $R_{\text{сп}}=0,33$ мкОм (3)

Таблица 2

Параметры катушки № 2 при $T=77$ К и скорости ввода тока $\nu=0,19$ А/с

$U(t)$	τ , с	L , мГн	R_p , мОм
Исходная	9,16	4,94	0,539
Коррекция	9,10	4,92	0,541

Данным методом измерены индуктивности и межвитковые сопротивления двух катушек при 77 и 20 К. Выяснено, что с уменьшением температуры индуктивность не изменяется, а контактное сопротивление уменьшается в три раза.

При фиксации тока измерено напряжение обмотки после завершения релаксационных процессов. Полученная зависимость напряжения от тока $U(I)$ представляла собой статическую ВАХ. При больших токах, вблизи перехода в нормальное состояние, статическая ВАХ катушки отличалась от истинной, поскольку из-за межвиткового (контактного) сопротивления возникала радиальная составляющая тока.

При возникновении радиальной составляющей магнитная характеристика $H(I)$ катушки с НИСО становилась нелинейной в отличие от катушки с изолированной обмоткой.

Благодарности. Авторы признательны В. Е. Крылову и И. В. Куликову за предоставленную сверхпроводящую ленту.

Список литературы

1. Morandi A., Gholizad B., Fabbri M., *Superconductor Science and Technology*, 2016, vol. 29, no. 1, 015014. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/29/1/015014>
2. Parkinson B. J., Slade R., Mallett M. J. D., Chamritski V., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2013, vol. 23, no. 3, 4400405. <https://doi.org/10.1109/TASC.2012.2235893>
3. Hahn S., Park D. K., Bascunan J., Iwasa Y., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2011, vol. 21, no. 3, pp. 1592–1595. <https://doi.org/10.1109/TASC.2010.2093492>
4. Choi S., Jo H. C., Hwang Y. J., Hahn S., Ko T. K., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2012, vol. 22, no. 3, 4904004. <https://doi.org/10.1109/TASC.2011.2175892>
5. Krasnoperov E. P., Guryev V. V., Shavkin S. V., Krylov V. E., Sychugov V. V., Korotkov V. S., Ovcharov A. V., Volkov P. V., *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2019, vol. 12, no. 1, pp. 104–109. <https://doi.org/10.25103/jestr.121.12>
6. Cubero A., Nunez-Chico A. B., Navarro R., Angurel L. A., Martines E., *Cryogenics*, 2019, vol. 108, 103070. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2020.103070>
7. Kim W. S., Trillaud F., Ang I. C., Hahn S. Y., Iwasa Y., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2007, vol. 17, no. 2, pp. 2478–2481. <https://doi.org/10.1109/TASC.2007.898159>

8. Zimmermann A. W., Sharkh S. M., *Energy Reports*, 2020, vol. 6, supplement 5, pp. 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.03.023>

9. Пат. № 2723142 РФ / А. А. Картамышев, Е. П. Краснoperov, Ю. Д. Куроедов, В. В. Сычугов, В. С. Шавкин // Изобретения. Полезные модели. 2020. № 16.

10. Wang X., Hahn S., Kim Y., Bascunan J., Voccio J., Lee H., Iwasa Y., *Superconductor Science and Technology*, 2013, vol. 26, no. 3, 035012. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/26/3/035012>

References

1. Morandi A., Gholizad B., Fabbri M., *Superconductor Science and Technology*, 2016, vol. 29, no. 1, 015014. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/29/1/015014>
2. Parkinson B. J., Slade R., Mallett M. J. D., Chamritski V., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2013, vol. 23, no. 3, 4400405. <https://doi.org/10.1109/TASC.2012.2235893>
3. Hahn S., Park D. K., Bascunan J., Iwasa Y., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2011, vol. 21, no. 3, pp. 1592–1595. <https://doi.org/10.1109/TASC.2010.2093492>
4. Choi S., Jo H. C., Hwang Y. J., Hahn S., Ko T. K., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2012, vol. 22, no. 3, 4904004. <https://doi.org/10.1109/TASC.2011.2175892>
5. Krasnoperov E. P., Guryev V. V., Shavkin S. V., Krylov V. E., Sychugov V. V., Korotkov V. S., Ovcharov A. V., Volkov P. V., *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2019, vol. 12, no. 1, pp. 104–109. <https://doi.org/10.25103/jestr.121.12>
6. Cubero A., Nunez-Chico A. B., Navarro R., Angurel L. A., Martines E., *Cryogenics*, 2019, vol. 108, 103070. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2020.103070>
7. Kim W. S., Trillaud F., Ang I. C., Hahn S. Y., Iwasa Y., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2007, vol. 17, no. 2, pp. 2478–2481. <https://doi.org/10.1109/TASC.2007.898159>
8. Zimmermann A. W., Sharkh S. M., *Energy Reports*, 2020, vol. 6, supplement 5, pp. 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.03.023>
9. Kartamyshev A. A., Krasnoperov E. P., Kuroedov Yu. D., Sychugov V. V., Shavkin V. S., RF Patent no. 2723142, *Byull. Izobret.*, no. 16 (2020)
10. Wang X., Hahn S., Kim Y., Bascunan J., Voccio J., Lee H., Iwasa Y., *Superconductor Science and Technology*, 2013, vol. 26, no. 3, 035012. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/26/3/035012>

Статья поступила в редакцию 09.02.2021; принята к публикации 09.04.2021.