05

Изучение переходных процессов в катушке с резистивно-связанными витками при температуре жидкого азота

© Д.С. Яшкин, Д.Н. Диев, А.В. Наумов, А.В. Поляков, Я.В. Гольтяпин, Д.И. Шутова, В.И. Щербаков, М.Н. Макаренко, С.В. Шавкин

Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия
e-mail: Yashkin_DS@nrcki.ru

Поступило в Редакцию 20 июня 2025 г.
В окончательной редакции 6 октября 2025 г.
Принято к публикации 23 декабря 2025 г.

Для изучения переходных процессов при вводе/выводе тока в сверхпроводниковый магнит с резистивной межвитковой связью разработана и создана экспериментальная катушка, представляющая собой двойную галету, намотанную путем укладки стопки сверхпроводящих лент в канавку, фрезерованную в корпусе из нержавеющей стали. Проведена серия экспериментов по вводу/выводу тока в катушку при температуре жидкого азота. Измерены токополевая зависимость катушки и временные зависимости падения напряжения на различных ее участках. Представлена эквивалентная электрическая схема для описания переходных процессов. Обработка экспериментальных результатов позволила определить характерные времена в процессе затекания тока в сверхпроводящую катушку.

Ключевые слова: сверхпроводимость, сверхпроводящие магниты, эквивалентная схема, неизолированные сверхпроводящие обмотки, ВТСП-2.

DOI: 10.61011/JTF.2026.06.62996.156-25

Введение

Прогресс в области создания устройств термоядерного синтеза ставит перед прикладной сверхпроводимостью новые задачи как чисто технического, так и научного характера. К разрабатываемым устройствам предъявляются достаточно жесткие требования: компактность, магнитные поля с высокой индукцией, отказ от жидкого гелия в качестве хладагента и переход к более высоким рабочим температурам магнитных систем. Как следствие, крайне остро встает вопрос о том, как именно реализовать на практике создание требуемых магнитных систем, поскольку в технических требованиях к ним заложено несколько классов прикладных задач: вопрос механической прочности материалов, вопрос стабилизации системы при локальных перегревах, вопрос радиационной стойкости материалов, наличие потерь энергии в сверхпроводнике на переменном токе, организация эффективного охлаждения и др.

Одним из вариантов решения проблемы стабилизации является создание обмоток магнитных систем с резистивной связью между витками (РСВ), также называемых неизолированными сверхпроводящими обмотками (НИСО, англ.: no-insulation coils, NI HTS) [1]. За счет резистивной связи между витками при переходе отдельных участков сверхпроводника в нормальное состояние ток перетекает в соседние витки, и катушка „самозащищается“ от теплового повреждения [2]. Также катушка с резистивно-связанными витками менее чувствительна к дефектам сверхпроводника [3]. Следствием этих преимуществ стало то, что перспективной нишей использования РСВ магнитных систем становится широкий класс устройств, таких как томографы [4,5], циклотроны [6,7], электродвигатели и электрогенераторы [8], плазменные двигатели [9], устройства управляемого термоядерного синтеза [10].

Обратной стороной наличия межвитковой резистивной связи является неопределенность пути протекания тока через катушку и, как следствие, способность образовывать круговые токи, замыкающиеся через нормальное межвитковое сопротивление. Такие токи, возникающие при динамических процессах, могут приводить к перераспределению магнитного потока между частями обмотки и к локализации тепловыделения, поэтому магнитные системы с РСВ остаются склонными к перегоранию при динамических процессах, наиболее яркой иллюстрацией чего является результаты эксперимента в работе [10]. Таким образом, для повышения надежности магнитных систем с РСВ и определения допустимых режимов их работ необходимо всестороннее изучение электродинамики таких систем. В настоящей работе рассмотрена созданная экспериментальная обмотка на основе ленты ВТСП-2, в которой резистивная связь между витками осуществлялась через общий корпус, без непосредственного контакта витков.

1. Описание катушки

Общие технические характеристики сдвоенной ВТСП-2-галеты с РСВ представлены в таблице.

Технические характеристики двойной ВТСП-2-галеты с РСВ

Внутренний диаметр двойной галеты	200 mm
Внешний диаметр двойной галеты	386 mm
Высота стального каркаса	14 mm
Число витков спиральной канавки	36 (18 × 2)
Число пакетов в ВТСП-2 пачке в 1 канавке	12
Число лент в ВТСП-2 пакете в 1 канавке	24
Полная длина двухленточного промежуточного пакета	422 m
Минимальный критический ток одиночной 4 mm ВТСП-2-ленты в собственном поле при 77 K	130 A
Расчетный критический ток ВТСП-2-галеты при 78 K/магнитное поле в центре	1 kA/0.15 T
Расчетный критический ток ВТСП-2-галеты при 20 K/магнитное поле в центре	10.3 kA/1.5 T
Расчетный критический ток ВТСП-2-галеты при 4.2 K/магнитное поле в центре	15.6 kA/2.3 T

Расчетные критические токи получены сопоставлением полевых зависимостей критического тока ленты и нагрузочной характеристики катушки.

Сдвоенная ВТСП-галета с резистивно-связанными витками представляет собой плоский каркас из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с фрезерованной на его обеих поверхностях спиральной канавкой шириной 3 mm, глубиной 5 mm и шагом 5 mm. К каркасу подсоединены токоподводы и изоляционная проставка на внешнем радиусе, разделяющая токоподводы. На внутреннем радиусе находится переходной виток, выполненный в виде канавки с траекторией винтовой спирали. На внешнем радиусе канавка плавно переходит в канавку токоподводящих элементов. Токоподводящие элементы изготовлены из меди марки М1 и представляют собой прямоугольные медные шины также с фрезерованным пазом. Токоподводящие элементы обхватывают галету и формируют часть наружного витка.

В спиральную канавку запаян пакет из ВТСП-2-лент. Пакет набран из попарно спаянных face-to-face (сверхпроводящими сторонами друг к другу) ВТСП лент шириной 4 mm производства компании СуперОкс.

Трехмерная модель сдвоенной галеты изображена на рис. 1.

Ленты собирались в пакет, который протягивался через центральное отверстие корпуса, укладывался в канавку от внешнего витка к внутреннему с одной стороны галеты. Затем галета была перевернута, и пакет после формирования внутреннего переходного витка продолжал укладываться с другой стороны галеты от внутреннего витка к внешнему. После осуществления укладки ВТСП-лент в закладную канавку обратной стороны корпуса пакет протягивался по внешнему диаметру, заводился в токоподводящие элементы и фиксировался. Таким образом, формировался непрерывный сверхпроводящий контур от конца одного токоподвода до конца другого.

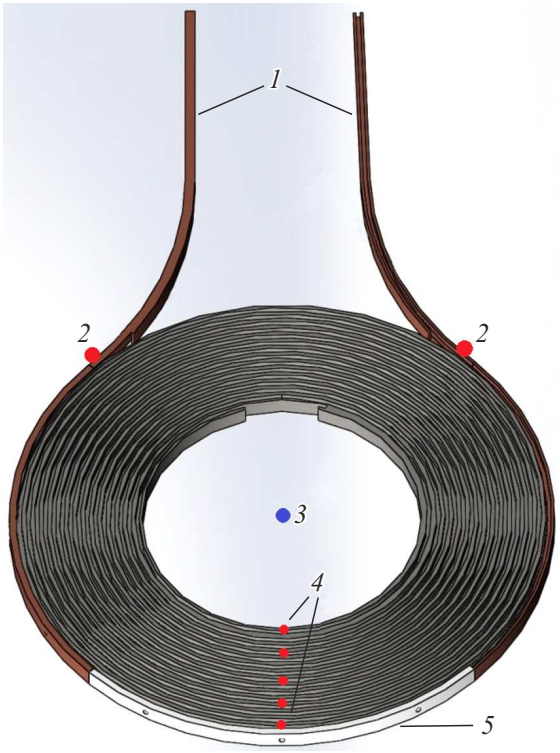


Рис. 1. Модель РСВ-галеты с токоподводами: *1* — токоподводы, *2* — основные потенциальные контакты, *3* — датчик Холла, *4* — дополнительные потенциальные контакты, *5* — изоляционная проставка.

Пакет в корпусе и на токоподводах после укладки запаивался припоями ПОС-61 с одной стороны корпуса и сплавом Розе с другой.



Рис. 2. Фотография PCB-катушки в процессе испытаний.

2. Описание экспериментального стенда

Проведена серия испытаний PCB-катушки при температуре жидкого азота. Установка включает в себя PCB-катушку, источник тока, способный выдавать ток до 10 kA при напряжении до 16 V, датчики магнитного поля, потенциальные контакты. Фотография катушки в процессе испытаний дана на рис. 2.

Магнитное поле измерялось в центре катушки при помощи датчика Холла. Потенциальные контакты, расположенные на витках вблизи токоподводов, измеряли падение напряжения на всей катушке. Дополнительный потенциальный контакт располагался на переходном витке, что позволяло измерять напряжение на верхней и нижней половинах катушки по отдельности. Отдельно измерялось падение напряжения на токовых вводах. Для записи сигналов с потенциальных контактов, а также датчиков Холла, и измерения терминального тока была задействована DAQ-система в режиме одновременного измерения. Дополнительные потенциальные контакты были также припаяны к пакетам лент на одной из половин галеты на 1, 4, 9, 13 и 18 витках, что позволяло измерять напряжения на различных участках полугалеты. Измерения этих напряжений, а также дублирующее измерение терминального тока осуществлялись через мультиплексор с частотой приблизительно два измерения в секунду.

3. Проведение эксперимента

В катушку ступенчато вводился постоянный терминальный ток 1 и 1.5 kA. Ток поддерживался достаточное время для завершения большей части релаксационных процессов, после чего сбрасывался до нуля, и катушка также выдерживалась в этом состоянии продолжительное время. Графики зависимостей напряжения на всей обмотке и магнитного поля в центре представлены на рис. 3. В целом характер зависимости этих величин от времени близок к экспоненциальному с характерным временем ~ 5400 s.

Более детальный анализ зависимости магнитного поля от времени позволяет увидеть ее более сложный характер (рис. 4). Зависимость хорошо описывается суммой экспоненциальных затуханий с различными характерными временами, представленной формулой (1):

$$B(t) = B_{\max} - \sum_i B_{i0} \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau_i}\right), \qquad (1)$$

где $B_{\max}$ — величина, к которой асимптотически стремится магнитное поле, τ_i — характерное время экспоненциального затухания, B_{i0} — начальные коэффициенты — „амплитуды“ соответствующих экспоненциальных процессов. В представленной зависимости можно выделить три процесса с характерными временами 5400, 200 и 40 s. Отдельно стóит заметить, что такой характер не может быть объяснен каким-либо нестационарным воздействием источника тока, поскольку время выхода источника на целевой ток много меньше характерной длительности наблюдавшихся процессов.

Зависимость напряжения от времени также можно описать суммой экспоненциальных затуханий с теми же временами (рис. 5). По зависимости также определяется вторая характеристика магнитной системы: асимптотическое напряжение на катушке.

По напряжениям с дополнительных потенциальных контактов можно увидеть еще более сложную структуру (рис. 6). По графикам можно предположить существование процессов с характерными временами порядка 10 и 2 s. Изменение знака напряжения на различных участках катушки указывает на изменение направления радиального тока на соответствующих участках.

Дополнительно проведены измерения при различных токах в диапазоне от 100 до 1500 A. Вычислены асимптотические значения поля и напряжения (рис. 7).

4. Обсуждение

Экспериментально изучена релаксация PCB-катушки к некоторому равновесному состоянию. Экспериментальные данные позволяют уверенно констатировать наличие по меньшей мере нескольких экспоненциальных процессов. Для объяснения этого явления можно обратиться к описанию системы эквивалентными схемами [11].

Эквивалентная схема, соответствующая изучаемой катушке, представлена на рис. 8. Здесь каждый виток двойной сплошной PCB-катушки представлен в виде индуктивного элемента с собственной индуктивностью L_{ii}, индуктивно связанного с остальными элементами (L_{in} — взаимная индуктивность i-го и n-го элементов из одной полугалеты, L_{t_in} — из разных полугалет). Параллельно каждому индуктивному элементу подсоединен резистор R_i, представляющий собой радиальное сопротивление перехода на соседний виток той же галеты. Симметричные элементы разных полугалет соединены сопротивлением R_{t_i}. Таким образом, в схеме допустимы

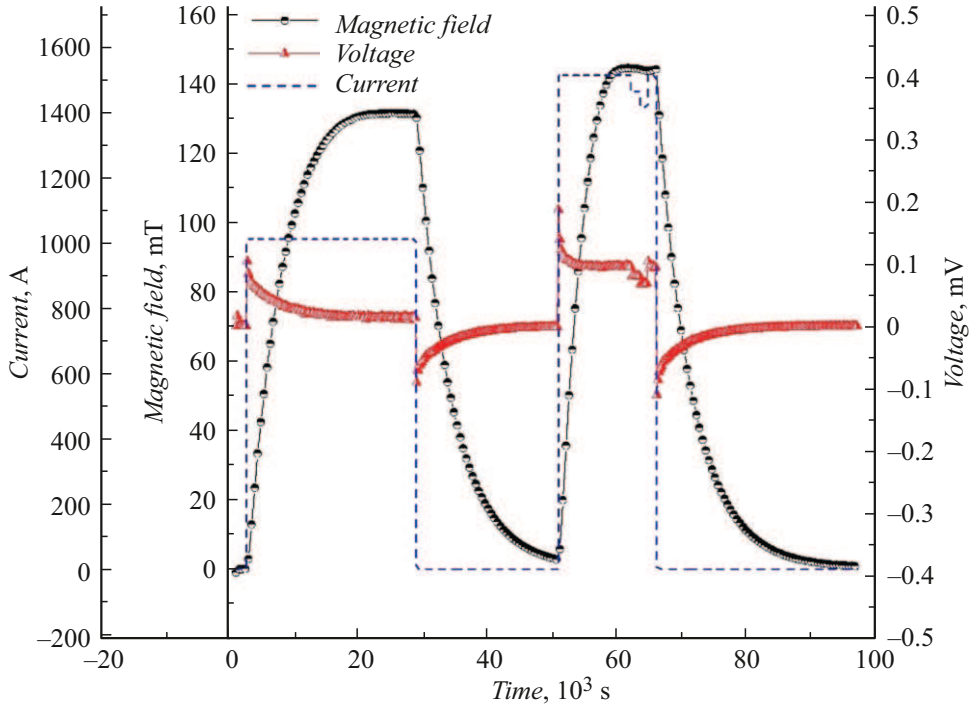


Рис. 3. Зависимости терминального тока, магнитного поля и напряжения от времени при эксперименте.

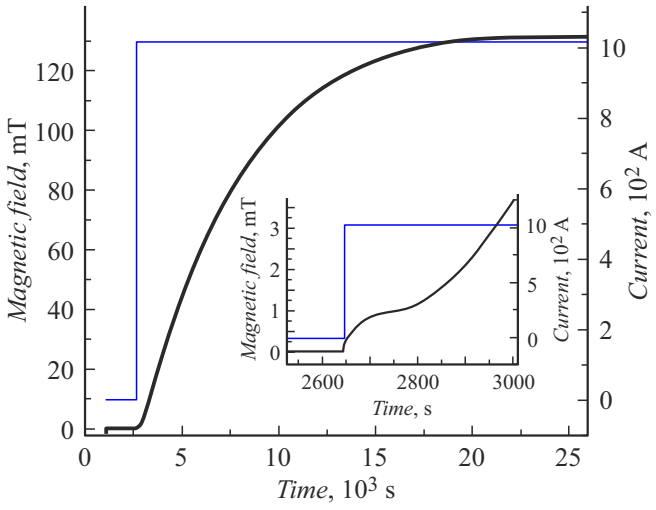


Рис. 4. Зависимость магнитного поля от времени при введении тока 1 kA в катушку. На врезке — укрупненно начальный участок.

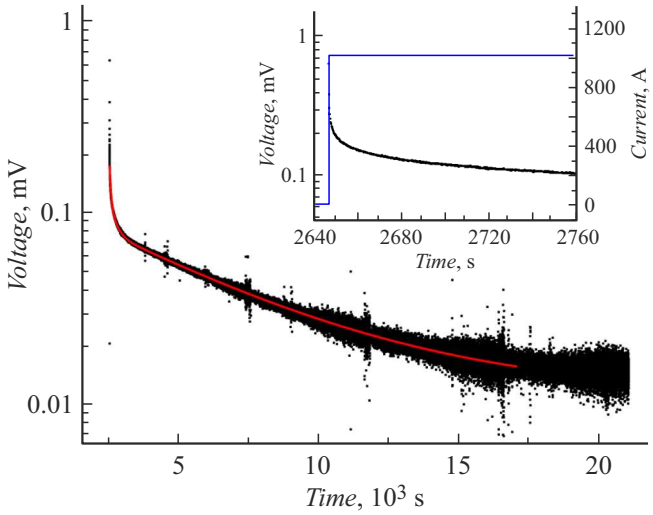


Рис. 5. Зависимость напряжения на катушке от времени при введении тока 1 kA; на врезке — укрупненно начальный участок. Красная линия — аппроксимация зависимости суммой трех экспонент.

два типа нормального тока: радиальный ток с витка на виток одной полугалеты и аксиальный поперечный ток между симметричными витками разных полугалет. Эквивалентная схема представляет собой совокупность большого количества RL-цепочек, и эта закономерность общая для такого рода эквивалентных схем.

Такая схема была выбрана, поскольку является аналитически разрешимой. Однако она является сильно упрощенной. В частности, диссипацией в материале сверхпроводника пренебрегается, поэтому схема применима только при токе ниже критического тока каждого участка магнитной системы. Схема не учитывает тепловые эффекты, поэтому предполагается эффективное охлаждение галеты. Схема является симметричной, что не вполне соответствует катушке, при изготовлении которой использовались разные припои, что сказывается на резистивных элементах. По этой причине результаты

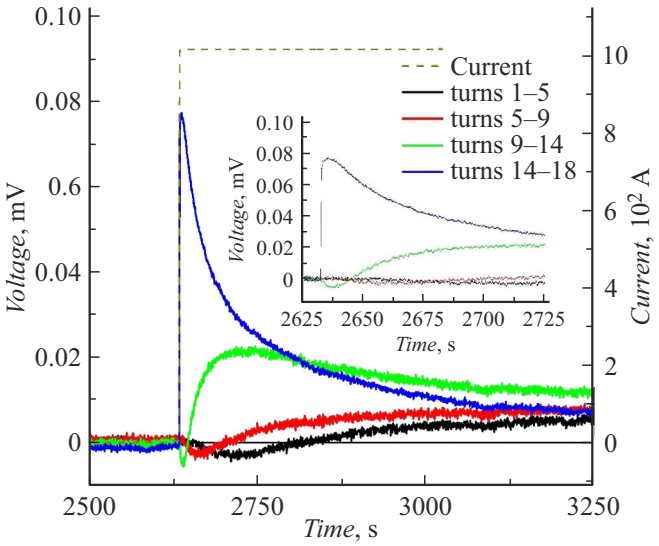


Рис. 6. Зависимости напряжений на различных участках катушки от времени при введении тока 1 kA.

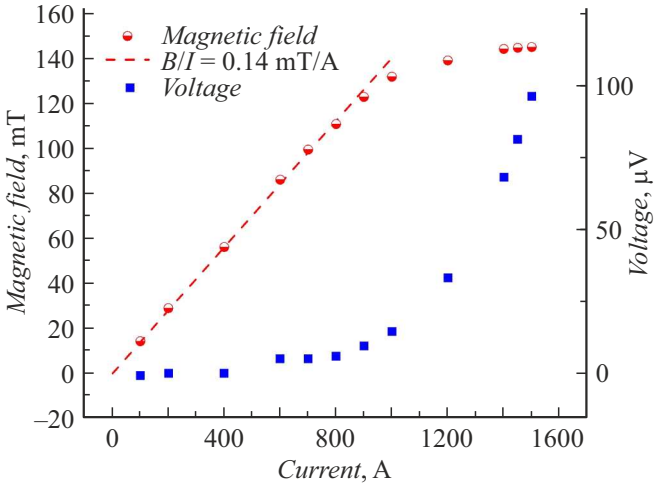


Рис. 7. Зависимость асимптотических значений магнитного поля и напряжения на катушке от терминального тока; пунктиром показано соотношение тока и поля на датчике Холла при условии полного затекания тока.

моделирования могут быть применены только для качественного объяснения наблюдавшихся в эксперименте процессов.

Математическое описание такой модели представляет собой систему линейных уравнений (2):

$$\begin{cases} I_{L_i} + I_{r_i} + \sum\limits_{j=1}^{i} I_{t_j} = I_0, \\ \sum\limits_{j} (L_{ij} + L_{t_ij}) \frac{d}{dt} I_{L_j} = I_{r_i} R_i, \\ 2 \sum\limits_{j=1}^{n} I_{r_j} R_j = I_{t_i} R_{t_i}. \end{cases} \qquad (2)$$

Здесь I_{L_i} — токи через индуктивный элемент, I_{r_i} — токи через радиальное сопротивление, I_{t_j} — межгалетные токи. Первая группа уравнений представляет собой первый закон Кирхгофа для узла, замещающего i идущих подряд RL-ячеек, вторая — второй закон Кирхгофа для i-й ячейки, третья — второй закон Кирхгофа для контура, идущего по резистивным элементам от перемычки и переходящего с одной галеты на другую по i-му элементу (рис. 8).

Несложными, но достаточно громоздкими преобразованиями система (2) сводится к системе из n-линейных дифференциальных уравнений относительно какой-либо из группы токов. Удобнее всего в качестве независимой переменной использовать радиальные токи I_{r_i}. Получившаяся система линейных дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\hat{M}\dot{\mathbf{I}}_{\mathrm{r}} = \mathbf{I}_{\mathrm{r}}(t) - \mathbf{I}_{\mathrm{r_eq}}, \qquad (3)$$

где $\mathbf{I}_r$ $(I_{r_1}, I_{r_2}, \ldots, I_{r_n})$ — вектор, координатами которого являются радиальные токи через соответствующие сопротивления, $\mathbf{I}_{\mathbf{r_eq}}$ — вектор, описывающий

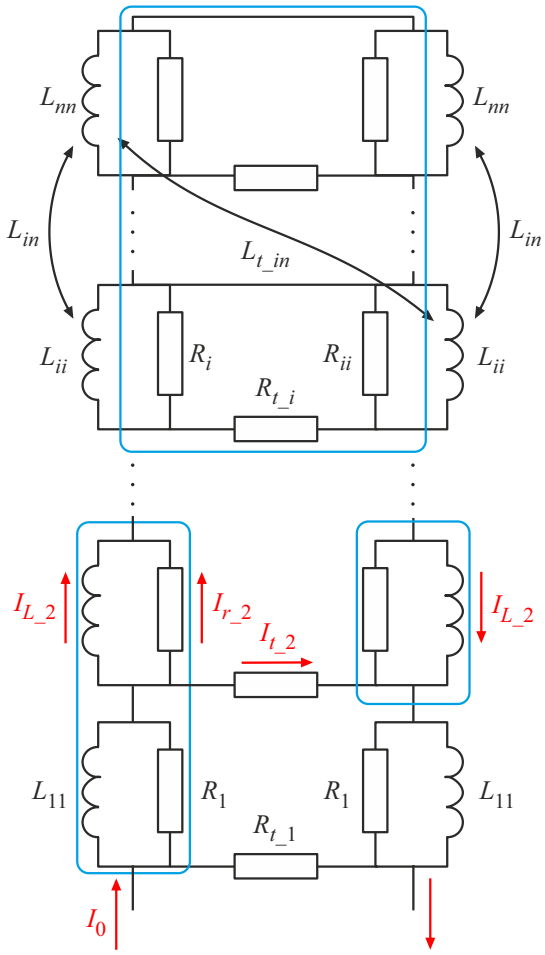


Рис. 8. Эквивалентная схема PCB-катушки с резистивной связью между верхней и нижней полугалетами. В рамки обведены участки цепи, по которым составлялись уравнения Кирхгофа системы (2).

равновесное распределение радиальных токов в текущем процессе, определяемое скоростью ввода терминального тока dI_0/dt (при переходных процессах вследствие ступенчатого ввода тока равен нулю), M — получившаяся после преобразований матрица системы линейных дифференциальных уравнений.

Тогда общее решение системы можно записать в виде

$$\mathbf{I}_r(r) = \mathbf{I}_{\mathbf{r_eq}} - \sum_{\alpha} k_\alpha \mathbf{I}_{\mathbf{self_}\boldsymbol{\alpha}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_\alpha}\right). \qquad (4)$$

Решение записано в векторном виде, где, $\mathbf{I}_{\mathbf{self_}\boldsymbol{\alpha}}$ — собственный вектор матрицы M, k_α — коэффициенты, определяемые начальными условиями, τ_α — собственные времена, получаемые из собственных значений матрицы M. Суммирование производится по всем собственным векторам.

Схожий вид будут иметь и временные зависимости магнитного поля и электрического напряжения на катушке. В частности, суммируя индуктивные токи с учетом коэффициентов ток–поле, получим формулу (1).

Таким образом, эквивалентная схема позволяет обосновать наличие нескольких экспоненциальных процессов, как на рис. 4–6. Более того, схема постулирует наличие гораздо большего числа процессов со все уменьшающимися характерными временами. Возникает вопрос, чему эти математически полученные процессы соответствуют физически.

Нагляднее всего это можно представить на магнитной системе без межгалетной связи. Представим, что между галетами находится изолятор и нормальный ток может течь только с витка на виток в рамках одной галеты. Если мы предположим, что после резкого включения нормальный ток, практически не дающий вклад в магнитное поле, заходит в сверхпроводник с одинаковой для всех витков скоростью, то вследствие различной индуктивности этих витков на них будет наблюдаться различное напряжение. При этом сверхпроводящий ток во всех витках в любой момент времени будет одинаковым по нашему предположению. В общем случае, за исключением специально подобранных распределений нормального сопротивления, различное напряжение между витками будет соответствовать различному нормальному току. Но ведь на каждом витке сумма нормального тока и сверхпроводящего в геометрии изолированных друг от друга полугалет должна быть равна полному току через катушку. Получается противоречие, значит, предположение неверно, и ток затекает в различные витки с разной скоростью.

Сделаем следующее предположение. Пусть скорость захода тока в сверхпроводник хоть для разных витков и различная, но меняется со временем пропорционально одному и тому же закону (разумеется, экспоненциальному, что характерно для систем с сопротивлением и индуктивностью). Из чего сразу следует очевидный вывод, что на каких-то витках сверхпроводящий ток достигнет значения полного тока раньше, чем на других. Но ведь асимптотически система должна стремиться к полному переходу нормального тока в сверхпроводник (напомним — мы считаем, что ток нигде не достигает критического). Снова противоречие.

Противоречие снимается предположением, что, наряду с процессом, отвечающим за заход нормального тока в сверхпроводник, в магните в целом существуют процессы, отвечающие за перераспределение сверхпроводящего и соответственно нормального тока между различными частями магнита. Системе становится энергетически выгодно быстрее изменить ток в одной части витков, пусть даже за счет того, что в другой части витков изменение тока будет происходить медленнее, а то и вовсе в противоположном направлении [12]. Такие процессы происходят с меньшими характерными временами. Наличие межгалетной связи меняет количественные параметры процессов, оставляя справедливыми качественные выводы.

Таким образом, необычное поведение напряжений на участках обмотки можно объяснить тем, что, наряду с процессом захода тока в сверхпроводник (в индуктивный элемент) как целое, происходящим с максимальным характерным временем 5400 s (определяемым отношением индуктивности катушки к полному сопротивлению), происходят процессы перераспределения магнитного потока между участками обмотки в соответствии с законами Кирхгофа, имеющие меньшие характерные времена 200, 40 s и т.д. При этом все меньшим характерным временам отвечают все более сложные конфигурации перераспределения, соответствующие собственным векторам матрицы M (формулы (3), (4)).

Следует заметить, что хотя наибольшее время релаксации определяется из зависимости на рис. 4 достаточно надежно, меньшие времена, отвечающие за перераспределение тока, определить можно только примерно. Результат оказывается очень чувствительным к параметрам аппроксимации. Также при аппроксимации не учитывается наличие экранирующих токов в сверхпроводнике и их динамика. В проведенном эксперименте начальные „коэффициенты разложения“ магнитного поля по экспонентам получились знакопеременными, что облегчило их идентификацию, но, в общем случае, это не является обязательным. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что необходимо с осторожностью подходить к числовым значениям меньших характерных времен.

Графики на рис. 7 представляют собой, по сути, описание рабочих параметров магнитной системы. На графиках можно выделить два режима работы. Первый, который можно назвать „докритическим“, — это режим, в котором вся лента находится в докритическом состоянии, т.е. ни в каком участке катушки не превышен локальный критический ток ленты. При таком режиме асимптотическая величина магнитного поля линейно зависит от терминального тока, а напряжения — нулевая.

Второй режим — критический. В этом режиме в части ВТСП-ленты, находящейся в большем магнитном поле,

ток достигает локальной критической величины, после чего дополнительный ток перестает заходить в этот участок, обходя его по шунтирующему нормальному сопротивлению. Этот режим характеризуется появлением ненулевой величины асимптотического напряжения и отклонением асимптотической величины магнитного поля от линейной зависимости.

По графикам на рис. 7 можно определить границу между докритическим и критическим режимами на уровне около 800 A. При этом даже при превышении терминальным током этого значения почти в два раза асимптотическое напряжение на катушке составило менее $100\,\mu$V, что делает закритический режим вполне допустимым режимом работы. Эта особенность является следствием наличия поперечной резистивной связи между полугалетами, позволяющей току, „не поместившемуся“ в сверхпроводник, фактически развернуться и утечь в менее нагруженные области катушки. В схеме двойной галеты с отдельными полугалетами этот ток так или иначе должен протечь через радиальное сопротивление всех витков, вызывая джоулев нагрев и, кроме того, нагружая конструкцию переходного внутреннего витка, которая является одним из слабых мест такой системы. При недопустимости таких нагрузок приходится ограничивать рабочий ток, а это значит, что часть сверхпроводника в менее нагруженных областях будет работать неэффективно.

Обратной стороной наличия такой связи является большее время захода тока в магнит вследствие уменьшения общей резистивности системы, что накладывает ограничения на применимость магнитов рассматриваемой конструкции. Таким образом, конструкция с межгалетной резистивной связью может быть рекомендована к использованию в устройствах, в которых требуется наиболее эффективно использовать доступное для заполнения сверхпроводником пространство, но при этом без жестких требований к времени заведения тока. Примером такого устройства может быть работающая в постоянном режиме обмотка тороидального поля токамака.

Заключение

Разработана и изготовлена экспериментальная катушка с резистивно связанными витками. Разработан стенд для ввода/вывода тока в катушку с возможностью измерения магнитного поля и падения электрического напряжения на разных участках катушки и токоподводов. Проведена серия экспериментов по вводу/выводу тока в катушку при температуре жидкого азота. Обработка экспериментальных результатов и расчеты соответствующей математической модели позволяют сделать вывод о наличии при релаксации нормального тока дополнительных экспоненциальных процессов помимо основного, предсказываемого простейшей эквивалентной схемой. Эти дополнительные экспоненциальные процессы соответствуют перераспределению тока между частями катушки, происходят каждый со своим характерным временем, которое меньше характерного времени основного процесса.

Анализ асимптотических характеристик экспериментальной катушки позволяет выделить как основное достоинство данной конструкции повышенную эффективность использования сверхпроводящего материала. Основным же недостатком является крайне высокое время ввода/вывода тока. Такие особенности делают ее перспективным вариантом при разработке обмоток тороидального поля токамака.

Финансирование работы

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Национального исследовательского центра „Курчатовский институт“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] S. Hahn, D.K. Park, J. Bascunan, Y. Iwasa. IEEE Trans. Appl. Supercond., **21** (3), 1592 (2010). DOI: 10.1109/TASC.2010.2093492
[2] S. Choi, H.C. Jo, Y.J. Hwang, S. Hahn, T.K. Ko. IEEE Trans. Appl. Supercond., **22** (3), 4904004 (2011). DOI: 10.1109/TASC.2011
[3] S. Hahn, K. Radcliff, K. Kim, S. Kim, X. Hu, K. Kim, J. Jaroszynski. Supercond. Sci. Technol., **29** (10), 105017 (2016). DOI: 10.1088/0953-2048/29/10/105017
[4] J.Y. Jang, Y.J. Hwang, J.H. Han, M. Ahn, H. Yang, S. Hahn, S. Lee. Supercon. Sci. Technol., **33** (2), 025005 (2020). DOI: 10.1088/1361-6668/ab601d
[5] K. Wang, Q. Wang, B. Zhou, L. Wang, Z. Zhang, J. Liu. Physica C: Supercond. Applicat., **615**, 1354372 (2023). DOI: 10.1016/j.physc.2023.1354372
[6] J. Park, G. Hahn, J. Bang, U. Bong, K. Choi, J.T. Lee, S. Hahn. IEEE Transactions on Appl. Supercond., **30** (4), 1 (2020). DOI: 10.1109/TASC.2020.2967271
[7] O. Kaito, A. Ishiyama, H. Ueda, S. Noguchi. IEEE Transactions on Appl. Supercond., **34** (5), 1 (2023). DOI: 10.1109/TASC.2023.3334254
[8] J.B. Song, S. Hahn, Y. Kim, D. Miyagi, J. Voccio, J. Bascuñán, Y. Iwasa. IEEE Transactions on Appl. Supercond., **25** (3), 1 (2014). DOI: 10.1109/TASC.2014.2384739
[9] J.R. Olatunji, H.W. Weijers, N.M. Strickland, S.C. Wimbush. IEEE Transactions on Appl. Supercond., **33** (5), 1 (2023). DOI: 10.1109/TASC.2023.3264170
[10] Z.S. Hartwig, R.F. Vieira, D. Dunn, T. Golfinopoulos, B. LaBombard, C.J. Lammi, A. Zhukovsky. IEEE Transactions on Appl. Supercond., **34** (2), 1 (2023). DOI: 10.1109/TASC.2023.3332613
[11] Д.С. Яшкин. Сверхпроводимость: фундаментальные и прикладные исследования, **1**, 41 (2024). DOI: 10.62539/2949-5644-2024-0-1-41-52
[12] K.R. Bhattarai, K. Kim, S. Kim, S. Lee, S. Hahn. IEEE Transactions on Appl. Supercond., **27** (4), 1 (2017). DOI: 10.1109/TASC.2017.2669962