

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Электротехника

УДК [UDC] 537

DOI 10.17816/transsyst20195154-73

Ю. Ф. Антонов

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

ПРИРОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ В СВЕРХПРОВОДНИКАХ С ДИНАМИЧЕСКИМ ПРОМЕЖУТОЧНО-СМЕШАННЫМ СОСТОЯНИЕМ

Цель: Описать научное достижение с изложением сущности явления. Подтвердить достоверность существования явления электромагнитной индукции постоянного тока на основании прямых доказательств.

Методы: Экспериментальное исследование намагничивания сверхпроводниковых образцов. Визуализация промежуточно-смешанного состояния сверхпроводников и движения квантованных нитей магнитного потока, пучков таких нитей. Разработка математической теории на базе фрактальной геометрии и функционального анализа.

Результаты: Сущность научного открытия состоит в доказательстве того, что прямым следствием образования промежуточно-смешанного состояния сверхпроводников и движения квантованных нитей магнитного потока, пучков таких нитей и макроскопических нормальных зон есть явление электромагнитной индукции постоянного тока.

Заключение: Сделано открытие явления электромагнитной индукции постоянного тока, созданы сверхпроводниковые топологические электрические генераторы на основе явления электромагнитной индукции постоянного тока с достижением высоких номинальных параметров: ток 10-100 кА, удельная токовая нагрузка 1 кА/кг.

Ключевые слова: сверхпроводимость, намагничивание, промежуточное состояние, смешанное состояние, нормальная зона, кластер, квантованная нить магнитного потока, электромагнитная индукция, топология, фрактал, переменный ток, постоянный ток.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта офи_м_РЖД No 17-20-04121

Yu. F. Antonov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

THE NATURE OF VOLTAGE IN SUPERCONDUCTORS WITH DYNAMIC INTERMEDIATE-MIXED STATE

Aim: to describe scientific achievement providing the essence of the phenomenon; to confirm reliability of existence of DC electromagnetic induction using direct evidence.

Methods: experimental research into magnetizing superconducting samples. Visualisation of intermediate and mixed state of superconductors and movement of quantised threads of magnetic flux, the beams of such threads. Development of mathematical theory on the basis of fractal geometry and functional analysis.

Results: The essence of the scientific discovery consists in the proof that the direct consequence of the formation of an intermediate-mixed state of superconductors and the movement of quantum magnetic fluxes threads, beams of such filaments and macroscopic normal zones is the phenomenon of direct current electromagnetic induction.

Conclusion: the discovery of DC electromagnetic induction has been made, superconducting topological electrical generators on the basis of DC electromagnetic induction have been built, that achieve high nominal parameters: 10–100 kA current, specific current load – 1 kA/kg.

Keywords: superconductivity, magnetization, intermediate state, mixed state, normal zone, cluster, quantum magnetic flux thread, electromagnetic induction, topology, fractal, alternating current, direct current.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследование структуры и динамики промежуточного и смешанного состояния сверхпроводников для обоснования сосуществования промежуточного и смешанного состояний в низкотемпературных сверхпроводниках I и II рода, а также в высокотемпературных сверхпроводниках второго поколения. Теоретическое обоснование возникновения электромагнитной индукции постоянного тока. Описание типовых конструкций сверхпроводниковых топологических генераторов и результатов их экспериментального исследования, в том числе в штатных режимах эксплуатации.



ВВЕДЕНИЕ

Известно явление электромагнитной индукции переменного тока, открытое М.Фарадеем [1], математически описанного Дж. Кл. Максвеллом [2]. Явление электромагнитной индукции переменного тока лежит в основе работы электрических машин и трансформаторов переменного тока. Так называемые электрические машины «постоянного» тока по существу являются устройствами переменного тока, снабженными внешним коммутатором, например, коллектором.

Природа разности потенциалов в сверхпроводниковых образцах, находящихся в динамическом промежуточно-смешанном состоянии, многие десятилетия оставалась дискуссионной. Так, например, вызывает сомнение модель, предложенная нобелевским лауреатом Дж. Бардиным, согласно которой разность потенциалов на зажимах сверхпроводника возникает в результате падения напряжения в сверхпроводнике от протекания в нем транспортного тока, поскольку нормальные электроны проводимости в нормальном остове квантованной нити магнитного потока воспринимают движение кванта магнитного потока как движущееся магнитное поле. Однако разность потенциалов на зажимах сверхпроводника возникает и в отсутствие транспортного тока. Кроме того, квантованная нить магнитного потока (синонимы: сверхпроводящий вихрь, вихрь Абрикосова) – это сложное образование, состоящее не только из микроскопического нормального остова, но и незатухающих сверхпроводящих токов, текущих на расстоянии от геометрического центра, равном лондоновской глубине проникновения λ_L .

И еще одна неточность, допущенная другим нобелевским лауреатом И. Гиавером, утверждающим, что трансформация постоянного тока в наложенных друг на друга сверхпроводниковых образцах происходит вследствие туннелирования сверхпроводящих электронов. В опытах с наложенными друг на друга толстыми (до 5 мм) сверхпроводниковыми образцами, разделенными толстым (до 4 мм) слоем электрической изоляции, имеет место трансформация тока, отнюдь не связанная с туннелированием сверхпроводящих электронов.

Голландский физик Дж. Фолгер впервые изложил принцип действия «flux pump» - «насоса магнитного потока» [3]. В Голландии, Германии, Англии, Франции, Швейцарии, Японии, Канаде, США созданы опытные образцы. В единичном агрегате достигнут ток 2,5 кА. Предложены сомнительные физические модели и ряд полуэмпирических формул, качественно и не совсем правильно объясняющих работу «насоса магнитного потока». После первых успехов ученые и разработчики зашли в тупик. Задача получения тока 10 кА и выше оказалась невыполнимой. Главным препятствием в создании основ теории, расчета и разработке

«насосов магнитного потока» на токи 10 кА и выше стало недостаточно глубокое понимание их принципа действия. Отсутствие фундаментальной теории мешало развитию «насосов магнитного потока» и достижению высоких номинальных параметров, которые бы обеспечили их конкурентоспособность при создании систем питания сверхпроводниковых устройств.

Согласно широко распространенному представлению принципа действия «насоса магнитного потока», его работа возможна только при образовании в сверхпроводящем якоре нормальной зоны. Как известно, в «насосах магнитного потока» (в нашей терминологии – «топологических генераторах») из-за наличия ферромагнитных узлов магнитные поля находятся на уровне 1 Тл. Вследствие этого для обеспечения образования нормальной зоны при изготовлении сверхпроводящих якорей применялись сверхпроводники только с низким значением критического магнитного поля ~ 1 Тл. А ведь есть сверхпроводники, у которых критическое магнитное поле 20 Тл и более. Таким образом, следуя общепринятому пониманию принципа действия, при создании топологических генераторов из употребления была выведена большая часть сверхпроводников и, прежде всего, те из них, которые обладают наиболее высокими критическими параметрами по полю и току. Критические значения по полю и току взаимосвязаны. Вот почему самое высокое достижение в ранее разработанных «насосах магнитного потока» – это ток 2,5 кА при прогнозах в десятки килоампер.

Итак, суть проблемы находилась в принципе действия (в его первоначальной трактовке), который, кстати, выразился и в неверном названии устройства – «насос магнитного потока». Для ее решения потребовалось воспользоваться результатами теоретического исследования промежуточного и смешанного состояния сверхпроводников I и II рода, выполнив сопоставительный анализ соответствующих экспериментальных данных.

КВАНТОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОТОКА

Прямым следствием жесткой фазовой когерентности является эффект квантования магнитного потока. Имея фундаментальное значение, квантование магнитного потока присуще всем, без исключения, сверхпроводникам любой геометрической формы и связности. «Связность» есть топологическое понятие [3]. Топологическим пространством называется множество X , в котором выделено некоторое семейство τ подмножеств одновременно открытых и замкнутых. Такое семейство τ подмножеств называется «топологией» в множестве X . В данном контексте, применительно к сверхпроводникам, математический

термин «топология» используется преимущественно для исследования процессов, обусловленных изменением «связности» сверхпроводящих контуров вследствие фазовых переходов.

Формальное обоснование данного подхода состоит в следующем. Массивный сверхпроводниковый образец с математической точки зрения может рассматриваться как топологическое пространство (точнее, подпространство). По определению, данному выше, «топологическое пространство» – это множество X , на котором задана топологическая структура. В данном случае под «топологической структурой» понимается сверхпроводящая фаза, т.е. весь «сверхпроводящий объем» массивного образца. Множество X является одновременно открытым и замкнутым, равно как и пустое множество \emptyset . Если в X (т.е. в объеме сверхпроводника) нет других множеств, одновременно открытых и замкнутых, то топологическое пространство X называется связным. В частном случае массивного сверхпроводникового образца при условии обеспечения полного эффекта Мейсснера-Оксенфельда имеем односвязное топологическое пространство. Любое локальное нарушение сверхпроводимости в связи с проникновением в образец магнитного поля, например, с созданием локальной макроскопической нормальной зоны, промежуточного состояния или в виде отдельных квантованных нитей магнитного потока, пучков таких нитей изменяет топологию пространства, т.е. связность.

Известно, что стационарные электронные состояния, в данном случае сверхпроводимость, определяются квантовыми условиями. Следовательно, заводимый индуктивным способом в сверхпроводящее кольцо ток может принимать только дискретные значения. Так как квантовые уровни отстоят друг от друга на чрезвычайно малом расстоянии, дискретные значения тока обычными измерительными приборами не улавливаются.

С целью получения полной картины квантования магнитного потока вместо кольца следует рассмотреть сверхпроводящую пластину с отверстием.

С точки зрения топологии кольцо и пластина с отверстием являются гомеоморфными фигурами. Более того, в качестве «геометрического» отверстия в сверхпроводящей пластине может служить «фазовое» отверстие – нормальная зона. Она может быть создана приложенным извне магнитным полем, индукция которого выше критического значения, свойственного данному сверхпроводнику. Локализация нормальной зоны поддерживается сверхпроводящим током, циркулирующим вокруг нее. Это значит, что магнитный поток, созданный сверхпроводящим током, в нормальной зоне совпадает по направлению с внешним магнитным потоком, а вне нормальной зоны имеет противоположное направление,

обеспечивая экранирование остальной части сверхпроводящей пластины от внешнего магнитного поля. Средняя плотность циркулирующего вокруг отверстия (нормальной зоны) тока $\vec{j}_c = n_c e v_c \vec{v}_c$, где v_c - скорость куперовских пар. Циркулирующий вокруг нормальной зоны (отверстия) сверхпроводящий ток течет в слое толщиной, равной лондоновской глубине проникновения λ_L .

В отличие от выше рассмотренного случая «макроскопического отверстия» в виде нормальной зоны, квантованная нить магнитного потока представляет собой «микроскопическое отверстие» радиусом ξ , состоящее из нормальной фазы, вокруг которого циркулирует вихревой незатухающий сверхпроводящий ток j_c . Его направление такое же, как циркулирующего тока вокруг нормальной зоны. На этом их сходство исчерпывается. Циркулирующий ток вокруг нормальной зоны обеспечивает лишь кратное кванту магнитного потока значение внешнего магнитного потока, пронизывающего отверстие макроскопических размеров. Вихревой сверхпроводящий ток квантованной нити магнитного потока (вихря) создает равный одному кванту магнитный поток, который распространен в области с радиусом λ_L . Магнитный поток квантованной нити магнитного потока совпадает по направлению с приложенным магнитным полем. Объем сверхпроводника экранирован от внешнего магнитного поля сверхпроводящими поверхностными токами, текущими по периметру образца, а также вихревыми токами. Их направления взаимно противоположны.

Линии фазовых границ квантованной нити магнитного потока, кластера (пучка) квантованных нитей магнитного потока и нормальной зоны - это пример статистического самоподобия [5].

Фрактальная кривая фазной границы кластера, нормальной зоны строится путем генерации линии фазной границы квантованной нити магнитного потока.

На базе учения о сверхпроводимости ГЛАГ В.Л. Гинзбурга (Нобелевская премия, 2003 г.), Л.Д. Ландау (Нобелевская премия, 1962 г.), А.А. Абрикосова (Нобелевская премия, 2003 г.), дополненных исследованиями проникновения магнитного поля, структуры и динамики промежуточного и смешанного состояний технических низкотемпературных сверхпроводников серийного производства с ненулевым магнитометрическим коэффициентом размагничивания, а также высокотемпературных сверхпроводников второго поколения, открыто явление электромагнитной индукции постоянного тока. С этой целью выполнены следующие опыты:

1) Визуализация промежуточно-смешанного состояния ленточных низкотемпературных сверхпроводников серийного производства (Рис. 1);

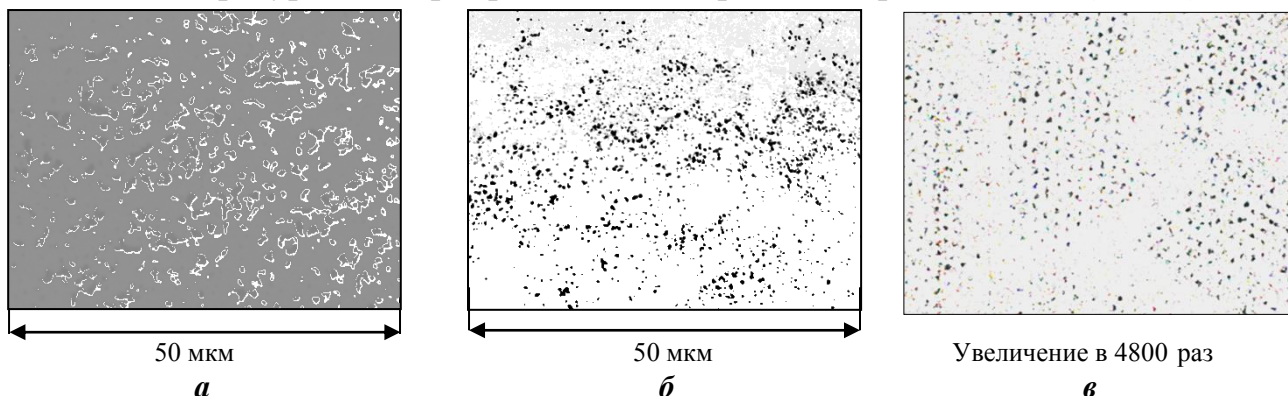


Рис. 1. Иллюстрация сосуществования промежуточного и смешанного состояний низкотемпературных сверхпроводников.

a - образец из сплава Nb+1,5%Zr (по массе), диск без медного покрытия, диаметр $\varnothing 5$ мм, толщина $d = 25$ мкм; $T = 4,4\text{K}$ ($T_K = 9,2\text{K}$), $B = 0,085$ Тл; $N = 1 - d/2a = 0,999$; белые образования – кластеры из ферромагнитных частиц в местах проникновения магнитного потока;

б - образец из Nb+50%Ti (по массе), диск с медным покрытием, диаметр $\varnothing 5$ мм, толщина $d = 25$ мкм; $T = 4,4\text{K}$ ($T_K = 9,5\text{K}$), $B = 0,3$ Тл; $N = 1 - d/2a = 0,999$; темные образования – пучки и отдельные квантованные нити магнитного потока;

в - образец из сплава Pb+1,89% Tl (по массе), диск диаметром $\varnothing 2$ мм, толщиной $d = 1$ мм, $\chi = 0,73$; $T = 1,2$ К, $B = 0,0365$ Тл; темные образования – домены из квантованных нитей магнитного потока [6].

2) Визуализация промежуточно-смешанного состояния высокотемпературных сверхпроводников второго поколения (Рис. 2);

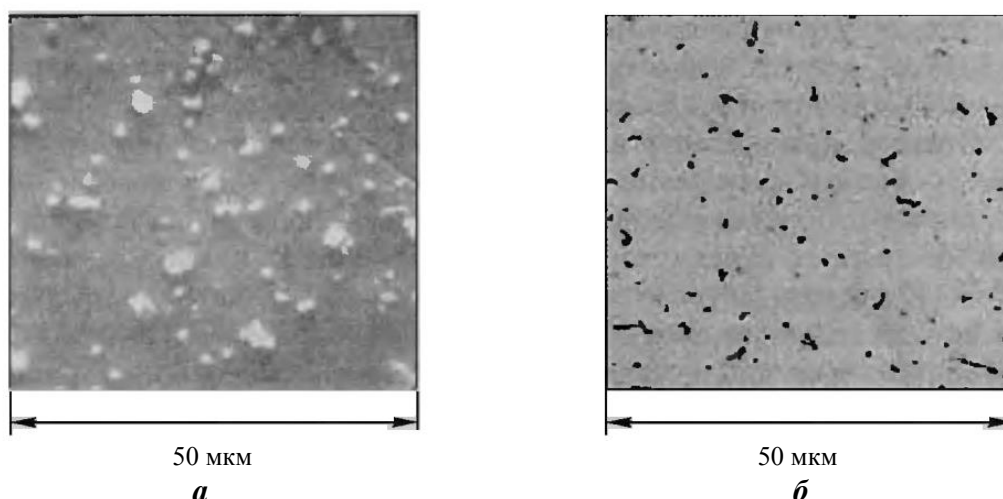


Рис. 2. Иллюстрация сосуществования промежуточного и смешанного состояний высокотемпературных сверхпроводников.

a – образец из ленты производства SuperOx; белые образования – кластеры из ферромагнитных частиц в местах проникновения магнитного потока;

б - образец из ленты производства AmSc; темные образования – пучки и отдельные квантованные нити магнитного потока.

3) Создание и исследование лабораторной модели сверхпроводящего топологического трансформатора постоянного тока на основе связанного движения квантованных нитей магнитного потока в наложенных друг на друга сверхпроводящих пластинах – фольгах, лентах и пленках (Рис. 3).

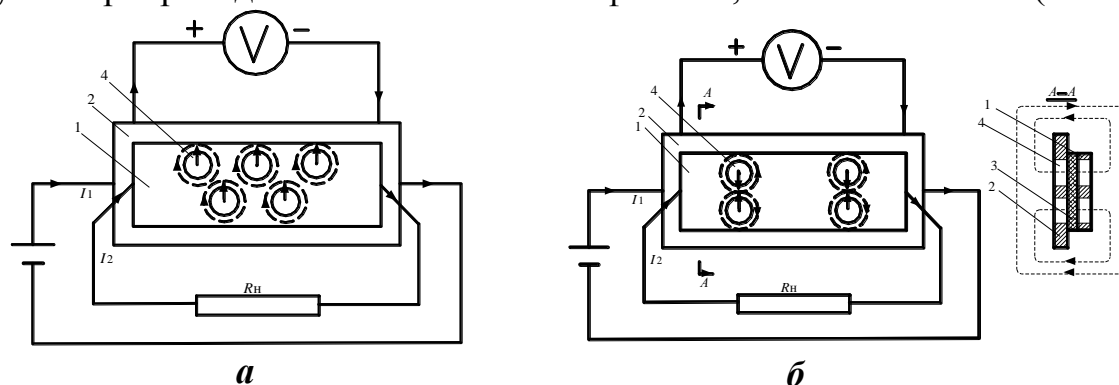


Рис. 3. Сверхпроводящий топологический трансформатор постоянного тока

a – стационарное магнитное поле B приложено перпендикулярно плоскости рисунка,
б – внешнее магнитное поле отсутствует.

- 1 – первичная сверхпроводящая обмотка (слой, пленка, пластина);
- 2 – вторичная сверхпроводящая обмотка (слой, пленка, пластина);
- 3 – изолятор (оксидный слой, фторопластовая пленка, любая изоляционная подложка);
- 4 – условное обозначение квантованной нити магнитного потока.

Будучи универсальным, закон электромагнитной индукции переменного тока М. Фарадея, тем не менее, исключает возможность трансформации тока без изменения потокосцепления, т.е. построение трансформатора постоянного тока. В устройстве (Рис. 3) трансформация тока осуществляется за счет локального переноса магнитного потока движущимися квантованными нитями в отсутствие изменения суммарного потокосцепления первичного и вторичного контуров. Первичной и вторичной обмотками трансформатора служат отрезки сверхпроводящей ленты из сплава Nb+50%Ti (производство ВНИИКТ, Россия) без медного покрытия, снятого с помощью азотной кислоты.

Эффект трансформации постоянного тока наблюдается и в отсутствие внешнего магнитного поля. Вместо внешнего магнитного поля B смешанное состояние в лентах создает транспортный ток I_1 , текущий по первичной обмотке (Рис. 3б). Аналогичный эксперимент, однако, с другой целью, а именно с целью доказательства туннельного эффекта, был поставлен норвежским физиком И. Гиавером [4] (Нобелевская премия по физике, 1973 г.). В его эксперименте первичной и вторичной обмотками трансформатора (Рис. 3) служили оловянные пленки толщиной $d < \lambda_L$. (исходным материалом для пленок служил сверхпроводник I рода, который вследствие малой толщины d пленки приобрел свойства

сверхпроводника II рода). Пленки разделены оксидным слоем изолятора толщиной 100 \AA . Данный эксперимент с туннелированием сверхпроводящих электронов является частным случаем, поскольку наибольший вклад в трансформацию постоянного тока вносит связанное движение квантованных нитей магнитного потока, имеющее место не только в случае тончайших сверхпроводящих пленок и тончайшего изоляционного слоя, но и при использовании сравнительно толстых сверхпроводящих лент и утолщенной изоляционной прокладки. Более того установлена трансформация постоянного тока в наложенных друг на друга через утолщенную (до 4 мм) изоляцию весьма толстых (до 5 мм) пластин из иттриевой металлокерамики - высокотемпературного сверхпроводника (производство ИПС ЦНИИчермет, Россия).

Обе схемы на Рис. 3 могут служить основой для создания различного типа сверхпроводниковых топологических трансформаторов постоянного тока.

Перпендикулярно лентам приложено стационарное магнитное поле B , необходимое только для создания в обеих лентах смешанного состояния. Постоянный ток I_1 , текущий по первичной обмотке трансформатора, приводит в движение квантованные нити в обеих лентах. В результате на зажимах вторичной обмотки появляется напряжение. В стационарном магнитном поле с индукцией $B = 0,1 \text{ Тл}$ (Рис. 3а) и токе $I_1 = 1 \text{ А}$ на зажимах вторичной обмотки зафиксировано постоянное напряжение $V = 0,5 \text{ мВ}$.

4) Создание лабораторной модели сверхпроводникового топологического генератора постоянного тока, преобразующего тепловую энергию в электрическую (Рис. 4).

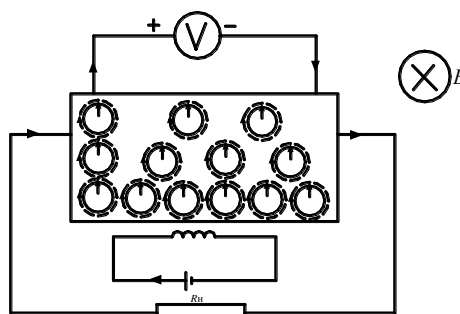


Рис. 4. Сверхпроводниковый топологический генератор, преобразующий тепловую энергию в электрическую

Приложенное поле с магнитной индукцией B обеспечивает образование в сверхпроводниковой пластине смешанного состояния. Нагревание (с помощью константанового нагревателя) одного из краев (на

Рис. 4 – нижний край) пластины приводит к увеличению плотности квантованных нитей на теплом крае, вследствие чего поперек пластины возникает градиент плотности квантованных нитей. Выравнивание плотности квантованных нитей происходит за счет их движения в направлении от теплого края к холодному. Подключенный к боковым сторонам пластины вольтметр регистрирует появление напряжения.

Испытания лабораторной модели (Рис. 4) убедительно доказали то, что генерируемая ЭДС в сверхпроводнике, находящемся в динамическом смешанном состоянии, связана исключительно с движением квантованных нитей, поскольку в данном устройстве нет транспортного тока, а, следовательно, нет прямого падения напряжения. В эксперименте использовалась холоднокатаная лента из сплава Nb+1,5%Zr (сверхпроводник II рода) толщиной 25 мкм, шириной 30 мм без медного покрытия, снятого с помощью азотной кислоты. Лента изготовлена во ВНИИКП (Россия). Сверхпроводниковая пластина помещается во внешнее магнитное поле B , перпендикулярное ее плоскости. В выше описанных экспериментах (Рис. 3, 4) сверхпроводниковые пластины находятся в стационарном однородном магнитном поле. Тем самым автоматически обеспечивается неизменность потокосцепления с измерительным контуром. Согласно с законом электромагнитной индукции постоянного тока получается, если квантованные нити, возникшие благодаря внешнему магнитному полю, не отождествляются ему, а рассматриваются как самостоятельные магнитные образования.

В эксперименте при $B=0,1$ Тл получено постоянное напряжение $V=0,5$ мВ. Полярность ЭДС зависит от направления вектора магнитной индукции B . Данное устройство может служить прототипом сверхпроводникового генератора, преобразующего тепловую энергию в электрическую энергию. Применение такой схемы для изготовления соответствующего генератора непрактично, поскольку размещение нагревателя в криогенной среде энергетически неоправданно. Однако поставленный эксперимент имеет принципиальное значение для доказательства наведения постоянной ЭДС исключительно за счет направленного движения квантованных нитей магнитного потока.

Справедливость такого рассмотрения показана и в эксперименте с “винтовым” топологическим генератором со скошенными зубцами-полюсами, в котором обеспечивается постоянство суммарного потокосцепления в измерительной цепи (Рис. 5). В отсутствие транспортного тока нет прямого падения напряжения и, таким образом, напряжение на зажимах топологического генератора есть результат движения квантованных нитей магнитного потока, приводящего к наведению постоянной ЭДС.

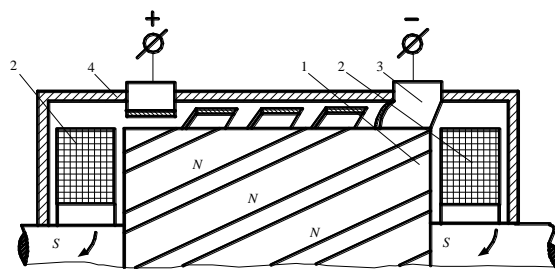


Рис. 5. Конструктивная схема сверхпроводниковой топологической электрической машины постоянного тока

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Основные понятия о топологии сверхпроводников, которые требуются для анализа динамики промежуточного и смешанного состояний, сводятся к следующему. Магнитное состояние сверхпроводника определяет его топологию. Падение напряжения от протекания транспортного тока и генерирование постоянной ЭДС в отсутствие тока есть следствие изменения топологии (связности) сверхпроводника.

Для того чтобы дать строгое математическое обоснование выше представленной физической интерпретации возникновения ЭДС и падения напряжения, рассмотрим плоскую модель топологического устройства на Рис. 6. Предположим, что измерительная цепь располагается в той же плоскости, что и сверхпроводниковая пластина. Выберем лежащий в плоскости рисунка некоторый кусочно-гладкий замкнутый путь (контур) γ с носителем γ (Θ) $\equiv ODABCO$, где $\Theta \in [a, b] \subset R$ - множество вещественных чисел.

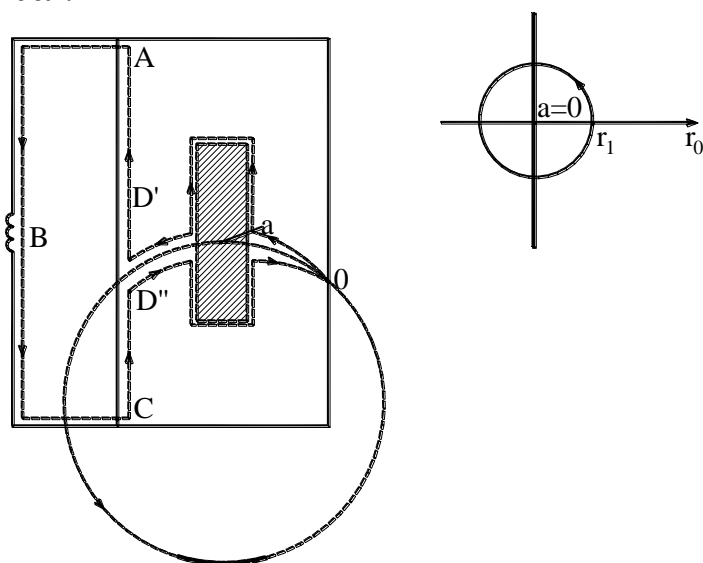


Рис. 6. Плоская топологическая схема

Точка a , совпадающая с центром проекции магнита на плоскость рисунка, при движении магнита совершает путь γ_1 , носитель которого $\gamma_1(t)$ также лежит в плоскости рисунка и совпадает с окружностью радиуса r . Здесь время $t \in [0, +\infty)$.

Определим индекс точки a относительно контура γ , когда она занимает множество положений $\{\gamma_1(kT)\}$ $k = 0, 1, 2, \dots$, где T – период одного цикла вращения магнита:

$$j(a, \gamma) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{ind \xi}{\xi - a} = n; \quad \xi \in \gamma(\Theta), \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Так как при $t \in [0, T)$ контур γ гомотопен постоянному контуру (может быть стянут в одну точку), то, применяя теорему Коши, имеем

$$\int_{\gamma} \frac{d\xi}{\xi - a} = 0,$$

следовательно, $j(a, \gamma) = 0$.

При $t \in [T, 2T)$ контур γ может быть деформирован в контур ε_n , носитель которого есть окружность единичного радиуса $1 > r / r_1$ (Рис. 6), $\varepsilon_1(\Theta_1) = 1 \cdot e^{i\Theta_1}$ причем $\Theta_1 \in [0, 2\pi]$. Тогда индекс точки a относительно контура γ

$$j(a, \gamma) = j(a, \varepsilon_1) \equiv j(0, \varepsilon_1) = \frac{1}{2\pi i} \int_0^{2\pi} \frac{d\xi}{\xi - 0} = \frac{1}{2\pi i} \int_0^{2\pi} \frac{ie^{i\Theta_1}}{e^{i\Theta_1}} d\Theta_1 = 1.$$

При $t \in [nT, (n+1)T]$

$$j(a, \gamma) = \frac{1}{2\pi i} \int_0^{2\pi} \frac{ine^{in\Theta_1}}{e^{in\Theta_1}} d\Theta_1 = n.$$

Пусть Φ_0 – магнитный поток, содержащийся в зоне проникновения, тогда, применив интегральную формулу Коши, получим

$$j(a, \gamma)(-\Phi(a)) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{\Phi(\xi)}{\xi - 0} d\xi = -\Phi_0.$$

Таким образом, после первого цикла потокосцепление с контуром, заключающим нагрузку, составляет $|\psi| = |-\Phi_0|$.

При $t = 2T$ $|\psi| = |-2\Phi_0|$, и т.д. Из этого следует, что средняя ЭДС, наводимая в электрической цепи с нагрузкой, равна $e = -f\Phi_0$, где f -

частота циклов. Направление индуцированного тока противоположно направлению обхода носителя пути γ .

С другой стороны, пусть на носителе кусочно-гладкого пути рассматриваемого контура γ задана непрерывная вектор-функция $\vec{E}(\xi)$ – напряженность электрического поля. Тогда для любой точки z , принадлежащей области проникновения магнитного поля, в частности, нормальной зоне, используя интегральную формулу Коши, можно записать следующее соотношение

$$j(a, \gamma) \vec{E}(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{\vec{E}(\xi)}{\xi - z} dz.$$

Так как интересующая нас точка a при $t \in [nT, (n+1)T)$ всегда лежит во внутренней компоненте связности, то

$$j(a, \gamma) \vec{E}(a) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{\vec{E}(\xi)}{\xi - a} d\xi = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{\vec{E}(\xi)}{\xi - 0} d\xi = \frac{1}{2\pi i} \int_0^{2\pi} \frac{\vec{E}(\Theta_1) i n e^{in\Theta_1}}{e^{in\Theta_1}} d\Theta_1 = \frac{n}{2\pi} \int_0^{2\pi} \vec{E}(\Theta_1) d\Theta_1$$

Учитывая $j(a, \gamma) = n$, $\vec{E}(\Theta_1) = \text{const}$, имеем $\vec{E}(a) = \vec{E}(\Theta_1) = \vec{E}$.

Таким образом, зная значение вектора напряженности $\vec{E}(\xi)$ электрического поля на носителе контура γ , можно определить его значение в любой точке, лежащей в области проникновения магнитного поля $\vec{E}(z)$, и наоборот. В этом проявляется органичная связь двух формул для определения ЭДС индукции. А именно,

$$e = \int_{\gamma} \vec{E}(\xi) d\vec{\xi} = \int_{\xi_1} \vec{E}(\xi) d\vec{\xi} = \int_S \text{rot} \vec{E}(\xi) d\vec{\xi} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} d\vec{S} = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

Итак, применительно к описанию принципа действия сверхпроводниковой топологической электрической машины топологическое представление дает ответ на принципиальный вопрос: почему в случае якоря из обыкновенного, например, медного проводника топология такого якоря не меняется, и он не выполняет своих функций. К этому следует добавить: если пластина будет сверхпроводящей и в ней не будет создаваться зона в нормальном или промежуточно-смешанном состоянии и не будут обеспечены условия для перманентных фазовых превращений с изменением топологии цепей, то мы будем иметь дело с обычным явлением индукции переменного тока Фарадея. В этом и заключается суть открытия явления электромагнитной индукции постоянного тока, обусловленного перманентными фазовыми превращениями, приводящими

к изменению топологии сверхпроводящего якоря и нагрузки, которая, следует подчеркнуть, принципиально может быть и не сверхпроводящей.

Для описания структуры и динамики промежуточного и смешанного состояния сверхпроводников и явления электромагнитной индукции постоянного тока топологический метод описания и анализа дает возможность вести рассуждения просто и в полном соответствии с действительной природой того, что происходит. Топологический метод является основой для создания инженерной теории и методики расчета сверхпроводниковых топологических электрических машин постоянного тока. При этом с принятием физически обоснованных допущений открывается возможность рассмотрения эквивалентных схем замещения с сосредоточенными параметрами методами классической электромеханики [3]. Топологический метод позволяет объяснить явление электромагнитной индукции постоянного тока в висмуте, не являющимся сверхпроводником, но обладающим магниторезистивным эффектом [7].

ДОКАЗАТЕЛЬСТВА НОВИЗНЫ И ДОСТОВЕРНОСТИ ОТКРЫТИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Впервые показано, что явление электромагнитной индукции постоянного тока позволяет создавать трансформаторы постоянного тока и электрические машины постоянного тока без применения внешних коммутаторов, в отличие от закона электромагнитной индукции переменного тока М. Фарадея, исключающего такую возможность.

Несмотря на то, что явление электромагнитной индукции постоянного тока в сверхпроводниках имеет квантовомеханическую природу, однако, в отличие от явления туннелирования сверхпроводящих электронов [6], при трансформации постоянного тока за счет направленного движения квантованных нитей магнитного потока достигается макроскопический результат, позволяющий создавать сверхпроводниковые топологические трансформаторы постоянного тока из сравнительно массивных сверхпроводниковых материалов, что способствует достижению высоких номинальных параметров.

Фундаментальность подтверждается открытием явления электромагнитной индукции постоянного тока в полупроводниках.

Достоверность открытия подтверждается прямыми доказательствами – измерениями постоянной ЭДС и постоянного тока стандартными приборами – осциллографом, вольтметром и амперметром (Рис. 7, 8).

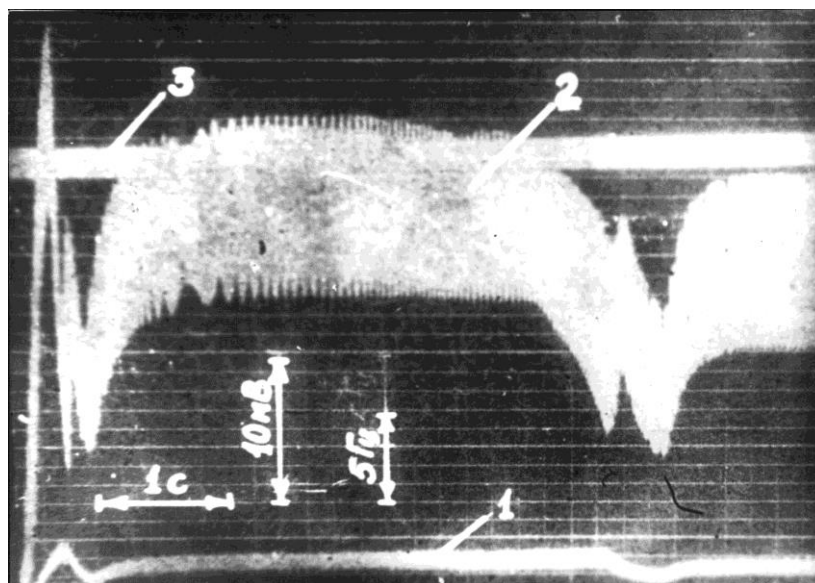


Рис. 7. Осциллограмма характеристик сверхпроводникового топологического генератора

- 1 – частота вращения;
- 2 – напряжение;
- 3 – ток в тестовом сверхпроводящем соленоиде (показания преобразователя Холла).

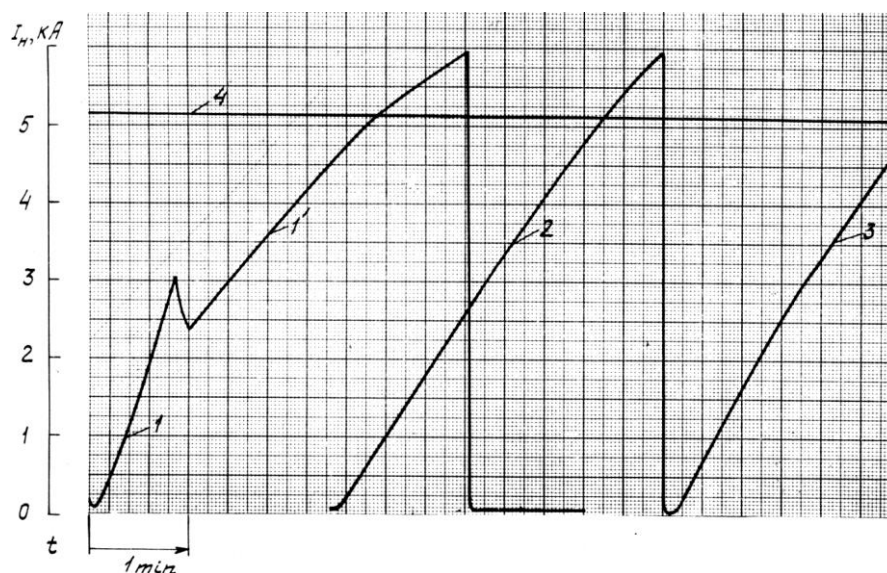


Рис. 8. Характерные кривые сверхпроводникового топологического генератора постоянного тока при питании сверхпроводящей нагрузки

- 1, 2, 3 – изменение тока в сверхпроводящей нагрузке, в том числе во время перехода сверхпроводящей нагрузки в нормальное состояние при достижении критического тока;
- 4 – постоянное напряжение.

ФОРМУЛА ОТКРЫТИЯ

Открытие фундаментального явления электромагнитной индукции постоянного тока в веществах, обладающих магниторезистивным эффектом, прежде всего в сверхпроводниках и полупроводниках, создание нового класса сверхпроводниковых топологических электрических машин и трансформаторов постоянного тока, разработка и внедрение сверхпроводниковых топологических генераторов постоянного тока с рекордными значениями номинальных параметров – ток 10 кА (в мультитактном исполнении - до 100 кА), удельная токовая нагрузка 1 кА/кг.

РАДИКАЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР

При питании сверхпроводящей нагрузки, располагающейся в криогенной зоне криостата, от традиционных источников постоянного тока, находящихся вне криостата в теплой зоне, требуются резистивные токовводы, которые являются тепловыми мостами из окружающей среды в криостат и таким образом вносят тепло в криостат, что энергетически невыгодно. Сверхпроводниковый топологический генератор постоянного тока располагается в криостате в непосредственной близости от сверхпроводящей нагрузки и поэтому не вносит тепло извне в криогенную зону. При использовании традиционных теплых источников постоянного тока вместе с резистивными токовводами трудно обеспечить режим “незатухающего тока”, в то время как сверхпроводниковый топологический генератор постоянного тока в пассивном режиме (в выключенном состоянии) шунтирует сверхпроводящую нагрузку, переводя ее в режим “незатухающего тока” с возможностью регулирования тока, в том числе прецизионного регулирования тока 1 мкА/с, которое технически трудно обеспечить с помощью теплых источников постоянного тока.

Явление электромагнитной индукции постоянного тока, обусловленное направленным движением квантованных нитей магнитного потока, позволяет осуществлять парциальную “накачку” магнитного потока в сверхпроводящий контур и поэтому сверхпроводниковые топологические генераторы постоянного тока могут работать в режиме “насоса магнитного потока”. В связи с этим радикально изменяется технология питания сверхпроводящих магнитных систем различного назначения в стационарных и вращающихся криостатах. Поскольку сверхпроводниковые топологические генераторы постоянного тока имеют относительно малые массо-габаритные показатели и в режиме “насоса магнитного потока” требуют для своего привода низковольтные электродвигатели небольшой мощности традиционного исполнения, они

эффективно могут применяться на летательных аппаратах, в том числе космического назначения [3].

СФЕРА НАУЧНОГО И ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Явление электромагнитной индукции постоянного тока применяется в:

а) новом классе сверхпроводниковых топологических электрических машин и трансформаторов постоянного тока с высокими значениями номинальных параметров – ток 10 кА (в мультикорном исполнении - до 100 кА), удельная токовая нагрузка 1 кА/кг (рис. 9, 10);

б) бесщеточных системах возбуждения турбогенераторов и ветрогенераторов со сверхпроводящей обмоткой возбуждения; поскольку сверхпроводниковые топологические генераторы постоянного тока являются высокотокowymi – 10-100 кА, но низковольтными – до 1 В электрическими машинами, то с их помощью обеспечивается режим начального заведения тока, регулирование, поддержание заданного значения без затухания тока, штатный вывод тока, однако невозможна форсировка тока возбуждения, требующая высокого напряжения до 10 кВ, что, впрочем, на практике не требуется, поскольку существуют ограничения по скорости изменения тока в сверхпроводящей обмотке возбуждения турбогенератора или ветрогенератора [8];

в) автоматизированной системе автономного питания сверхпроводниковых магнитов каналов частиц (единичная запасенная энергия магнита 1 МДж) Ускорительно-накопительного комплекса на энергию 2x7 ТэВ;

г) источниках питания сверхпроводящих обмоток, в том числе тороидальной обмотки на токи до 100 кА, термоядерных реакторов;

д) источниках питания сверхпроводниковой электрофизической аппаратуры, особенно для проведения длительных экспериментов при высоких требованиях к стабильности магнитного поля;

е) источниках питания сверхпроводниковых ЯМР, в том числе МРТ с высокой разрешающей способностью для медицинской диагностики;

ж) источниках питания для сверхпроводящих приборов и техники эксперимента наземных лабораторий и в особенности лабораторий космического базирования;

з) чувствительном диагностическом устройстве для измерения критических параметров сверхпроводниковых обмоточных материалов и контактных соединений.

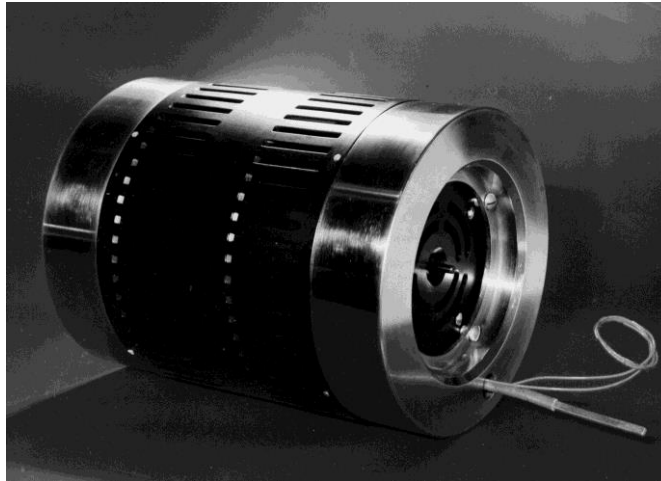


Рис.9. Головной образец серийной продукции

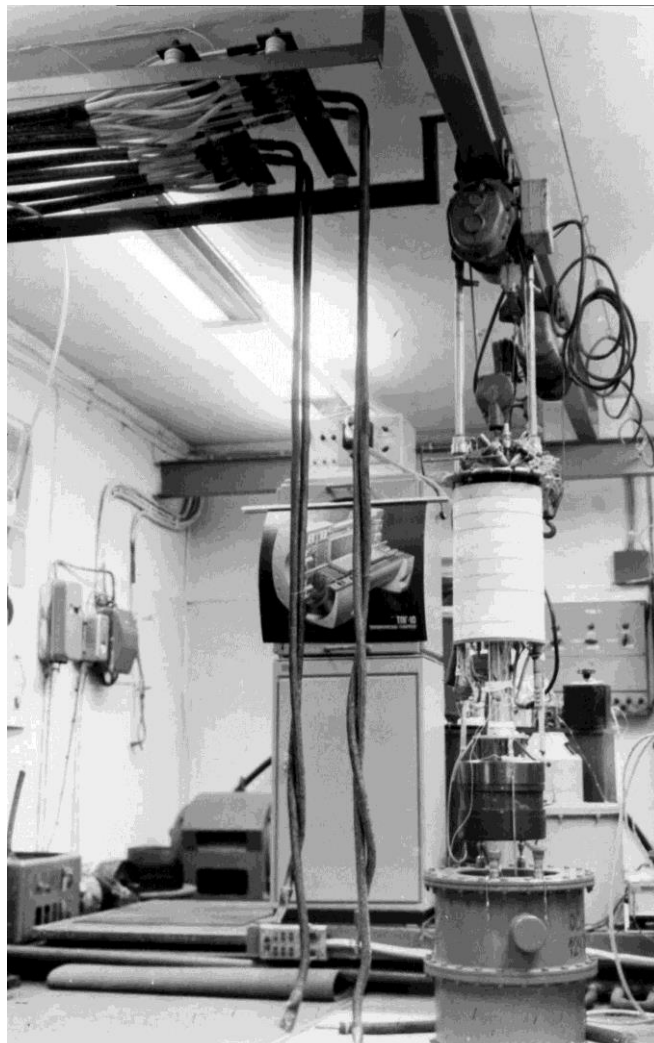


Рис. 10. Многофункциональный экспериментальный стенд для исследований сверхпроводниковых топологических электрических машин и трансформаторов постоянного тока

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе феноменологической теории сверхпроводимости и экспериментальных данных намагничивания низкотемпературных сверхпроводников I и II рода, а также высокотемпературных сверхпроводников второго поколения, визуализации структуры и динамики промежуточного и смешанного состояния сверхпроводниковых образцов с отличным от нуля магнитометрическим коэффициентом размагничивания открыто явление электромагнитной индукции постоянного тока в веществах, обладающих магниторезистивными свойствами, сформулирован закон электромагнитной индукции постоянного тока, разработана адекватная математическая теория с использованием понятий и методов фрактальной геометрии и функционального анализа (топологических пространств), создан новый класс сверхпроводниковых топологических электрических машин и трансформаторов постоянного тока, изготовлена и испытана в штатных режимах эксплуатации серия многофункциональных сверхпроводниковых топологических генераторов с рекордными значениями номинальных параметров – ток (10–100) кА, удельная токовая нагрузка 1 кА/кг, на базе сверхпроводниковых топологических генераторов постоянного тока разработаны и внедрены бесщеточные системы возбуждения турбогенераторов и ветрогенераторов со сверхпроводящей обмоткой возбуждения мощностью 20–300 МВт, автономные источники питания 200 сверхпроводниковых отклоняющих магнитов каналов частиц суперколлайдера – ускорительно-накопительного комплекса на энергию частиц 2×7 ТэВ (единичная запасенная электромагнитная энергия сверхпроводниковых отклоняющих магнитов 1 МДж), прецизионный источник питания сверхпроводникового МРТ для медицинской диагностики с высокой разрешающей способностью, встроенный в сверхпроводящий соленоид источник питания сверхпроводниковой электрофизической аппаратуры для медико-биологических исследований в условиях космического базирования.

Автор заявляет, что:

1. У него нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

Список литературы / References

1. Faraday M. *Experimental Researches of Electricity*. London: Richard Taylor and William Francis, 1855. 588 p.

2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 620 с. [Landau LD, Lifshits EM. *Ehlektrodinamika sploshnyh sred*. Moscow: Nauka, 1982. 620 p. (In Russ.)].
3. Рудин У. Функциональный анализ. – М.–Л.: Мир, 1975. – 443 с. [Rudin U. *Funkcional'nyj analiz*. Moscow-Leningrad: Mir, 1975. 443 p. (In Russ.)].
4. Гиавер И. Туннелирование электронов и сверхпроводимость // Успехи физических наук. – 1975. – №11. – С. 585–595. [Giaver I. Tunnelirovanie ehlektronov i sverhprovodimost'. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1975;(11):585-595 (In Russ.)].
5. Мандельброт Б.М. Фрактальная геометрия природы. – М.: Изд-во Института компьютерных исследований, 2002. – 656 с. [Mandel'brot BM. *Fraktal'naya geometriya prirody*. Moscow: Izd-vo Instituta komp'yuternyh issledovaniy, 2002. 656 p. (In Russ.)].
6. Träuble H, Essmann U. Die Beobachtung magnetischer Strukturen von Supraleitern zweiter Art. *Physica Status Solidi*. 1967;20:95-111.
7. Данилевич Я.Б., Антонов Ю.Ф. Топологический генератор с магниторезистивным коммутатором из висмута // Электричество. – 1997. – № 11. – С. 41–46. [Danilevich YaB., Antonov YuF. Topologicheskij generator s magnitorezistivnym kommutatorom iz vismuta. *Ehlektritchestvo*. 1997;(11):41-46. (In Russ.)].
8. Антонов Ю.Ф., Данилевич Я.Б. Криотурбогенератор КТГ-20: опыт создания и проблемы сверхпроводникового электромашиностроения. – М.: Физматлит, 2003 – 600 с. [Antonov YuF, Danilevich YaB. *Krioturbogenerator KTG-20: opyt sozdaniya i problemy sverhprovodnikovogo ehlektromashinostroeniya*. Moscow: Fizmatlit, 2003 600 p. (In Russ.)].
9. Антонов Ю.Ф., Данилевич Я.Б. Сверхпроводниковые топологические электрические машины. – М.: Физматлит, 2009. – 368 с. [Antonov YuF, Danilevich YaB. *Sverhprovodnikovye topologicheskie ehlekticheskie mashiny*. Moscow: Fizmatlit, 2009. 368 p. (In Russ.)].

Сведения об авторе

Антонов Юрий Федорович, д.т.н., профессор кафедры «Теоретические основы электротехники»

SPIN-код: 2335-5765; ORCID: 0000-0002-6910-1622;

E-mail: yuri-anto@yandex.ru

Information about author:

Yuri F. Antonov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department "Theoretical Foundations of Electrical Engineering"

PIN-код: 2335-5765; ORCID: 0000-0002-6910-1622;

E-mail: yuri-anto@yandex.ru

Цитировать:

Антонов Ю.Ф. Природа электрического напряжения в сверхпроводниках с динамическим промежуточно-смешанным состоянием // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 1. – С. 54–73. doi: 10.17816/transsyst20195154-73

To cite this article:

Antonov YuF. The Nature of Voltage in Superconductors with Dynamic Intermediate-Mixed State. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(1):54-73. doi: 10.17816/transsyst20195154-73