

Является ли проводник с током электронейтральным?

Бытует мнение, что проводник с током является электронейтральным, т.е. протекание тока через проводник не приводит к появлению электрического поля вокруг такого проводника. Но посмотрим, что говорит по этому поводу эксперимент.

Рассмотрим постановку эксперимента, который должен дать ответ на поставленные вопросы. Схема эксперимента изображена на рис. 1.

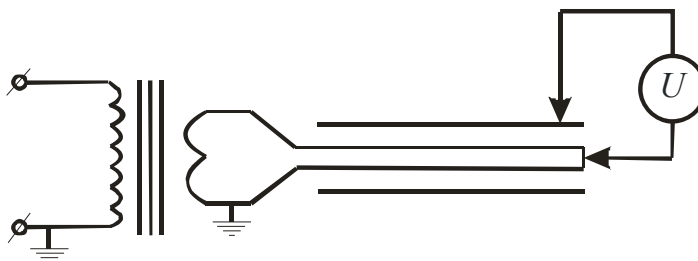


Рис. 1. Схема эксперимента по обнаружению электрических полей вокруг проводника с током

Если сложенную пополам сверхпроводящую проволоку (будем называть ее бифилярной) окружить проводящим цилиндром и ввести в нее ток индукционным способом, то в случае зависимости заряда от скорости электрометр с высоким внутренним сопротивлением, подключенный между цилиндром и проволокой, должен показать наличие разности потенциалов. Бесконтактный индукционный ввод тока применяется с той целью, чтобы исключить наличие контактных разностей потенциалов при контактном вводе тока. Трудность проведения такого эксперимента заключается в том, что входная емкость электрометра (обычно несколько десятков пикофард) будет значительно больше, чем емкость между бифилярной петлей и цилиндром. Поскольку мы измеряем не ЭДС, а разность потенциалов, обусловленную статическими зарядами, то при подключении к такому устройству входной емкости электрометра заряд, наведенный на цилиндре, перераспределится между обеими емкостями. Получается, что для получения максимальной разности потенциалов на самом электрометре следует увеличивать емкость между проводником и цилиндром

В экспериментах использовался вибрационный электрометр с входной емкостью ~ 60 пФ и чувствительностью ~ 1 мВ. Чтобы обеспечить хотя бы такую же емкость коаксиала нужно взять длину коаксиала порядка 4 метров. По техническим причинам такой коаксиал трудно охладить до гелиевых температур.

Поэтому экспериментальный образец был создан по другой схеме. Для введения тока в сверхпроводящую обмотку использован охлаждаемый до гелиевых температур трансформатор с железным сердечником. Используя в

качестве вторичной обмотки трансформатора сверхпроводящую обмотку, соединенную с соленоидом, можно без наличия гальванических контактов вводить ток в соленоид. В трансформаторе использовался кольцеобразный сердечник из трансформаторной стали с поперечным сечением 9 см^2 . Первичная и вторичная обмотки трансформатора были намотаны ниобий-титановым проводом с медным покрытием и содержали 150 и 10 витков соответственно. Таким образом, трансформатор имеет коэффициент трансформации 15. Диаметр проволоки – 0.25 мм. Вторичная обмотка трансформатора соединена последовательно с низкоиндуктивным соленоидом, который намотан бифилярно и содержит 2448 витков такого же провода. Общая длина намотки – 910 м. Концы соленоида и вторичной обмотки трансформатора сварены лазерной сваркой. Соленоид намотан на каркасе из фторопласта. Внутренний и внешний диаметр обмотки соленоида – 35 и 90 мм соответственно, ширина намотки – 30 мм. К средней точке соленоида подключен внутренний провод коаксиала, выходящего наружу криостата, такой же коаксиал подключен и к экрану соленоида. Конструкция низкоиндуктивного соленоида показана на рис. 2.

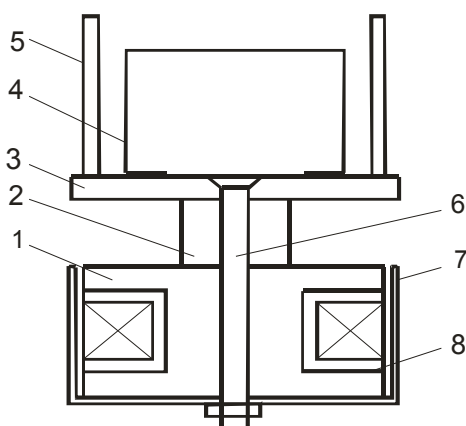


Рис. 2. Конструкция низкоиндуктивного сверхпроводящего соленоида

Цифрами на рис. обозначены: 1 - алюминиевый каркас, 2 - фторопластовая втулка, 3 - фторопластовый диск, 4 - скоба, 5 - стойки, 6 - болт, 7 - медный экран, 8 - фторопластовый каркас. Соленоид намотан на фторопластовом каркасе 8, который заключён в алюминиевый каркас 1. Снаружи соленоид окружён медным экраном 7, который совместно с каркасом 1 является экраном соленоида. К каркасу 1 посредством болта 6 и фторопластовой втулки 2 крепится фторопластовый диск 3, на котором смонтирована скоба 4. Витки вторичной обмотки трансформатора охватывают скобу 4, через которую, не касаясь её, проходит магнитопровод трансформатора. Вся конструкция крепится к трансформатору посредством стоек 5. Трансформатор совместно с соленоидом размещается в баке гелиевого криостата.

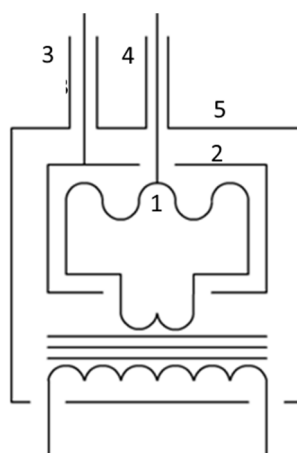


Рис. 3. Схема соединения низкоиндуктивного соленоида

Схема подключения коаксиалов к малоиндуктивному соленоиду показана на рис. 3.

На рисунке приняты следующие обозначения: 1 - малоиндуктивный соленоид, 2 - экран соленоида, 3,4 - коаксиалы, 5 - общий экран, которым является гелиевый бак. Сопротивление между заземленными элементами, экраном соленоида и самим соленоидом составляет не менее 10^{14} Ом. Ёмкости относительно земли элементов конструкции: коаксиал 3 – 44 пФ, коаксиал 4 – 27 пФ, емкость экран–земля составляет 34 пФ, емкость экран–соленоид составляет 45 пФ. В качестве электрометра использовался емкостной вибрационный электрометр с входной емкостью 60 пФ и входным сопротивлением 10^{14} Ом.

При измерениях электрометр подключался непосредственно к экрану посредством коаксиала 4, а средняя точка сверхпроводящего соленоида посредством коаксиала 3 заземлялась. Ток в первичную обмотку трансформатора вводился от источника постоянного тока, показания электрометра при этом не зависели от направления тока. При величинах вводимого тока ~ 9 А происходил самопроизвольный сброс показаний электрометра. Это означает, что ток в обмотке соленоида достигал критического значения, и обмотка переходила в нормальное состояние. Железный сердечник при этом захватывал магнитный поток и при уменьшении вводимого в соленоид тока кривая зависимости измеряемого потенциала от тока повторялась, а потенциал достигал максимального значения при нулевом значении тока.

Зависимость измеряемой разности потенциалов приведена на рис. 4.

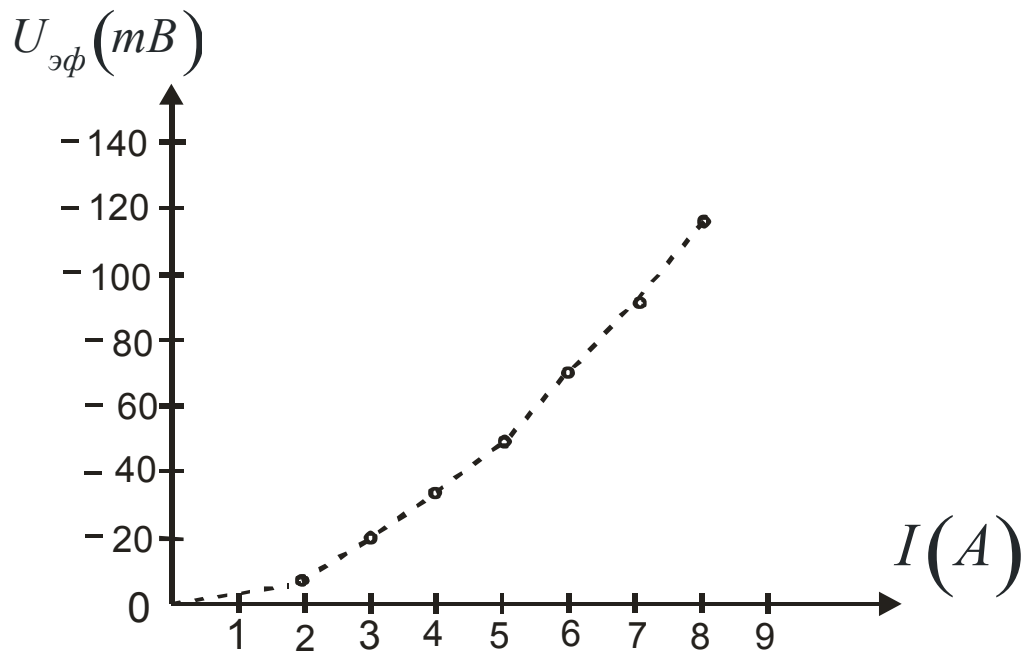


Рис. 4. Зависимость разности потенциалов между экраном и низкоиндуктивным соленоидом от тока в его обмотке

Экспериментальные данные приведены в следующей таблице.

$I(A)$	1	2	3	4	5	6	7	8
$I_1(A)$	15	30	45	60	75	90	105	120
$H(A/m) \cdot 10^4$	1.91	3.82	5.73	7.64	9.55	11.5	14.6	15.3
$-U_2(mV)$	-	2	6	10	15	21	27	35
$-U_1(mV)$	-	7	20	34	50	71	90	117
$U_{эф}/I^2 (mV/A)$	-	1.75	2.22	2.13	2.00	1.94	1.84	1.83

В первой строке таблицы приведены значения вводимого тока I . Во второй – значения тока I_1 в обмотке соленоида с учётом значения 15 коэффициента трансформации. Предполагается, что во всем диапазоне вводимых токов намагниченность сердечника остается пропорциональной току. В третьей – значения магнитных полей на поверхности сверхпроводящих проводов соленоида. В четвертой – показания электрометра. В пятой – эффективные значения разности потенциалов, которые были бы между соленоидом и экраном до подключения к последнему суммарной емкости коаксиала и электрометра. В шестой – коэффициент, указывающий на отклонение полученной зависимости от квадратичного закона. Коэффициент k_1 составил

величину 3.35, он вычислялся исходя из того, что емкость между экраном и соленоидом $C_1 = 45$ пФ, а суммарная емкость C_2 , подключаемая к емкости C_1 и состоящая из емкостей коаксиала и электрометра, равна 111 пФ. Среднеквадратичное относительное отклонение коэффициента k от своего среднего значения 1.93 составляет 0.13, что дает относительную среднеквадратичную погрешность 7%. Таким образом, полученная зависимость между током и измеряемым значением потенциала очень близка к квадратичной. Из таблицы видно, что при значениях тока в проводниках соленоида порядка 120 А напряженность поля на их поверхности достигает своего критического значения, которое для используемого сверхпроводника составляет $1.5 \cdot 10^5$ А/м, с чем и связан сброс показаний электрометра при достижении этих токов. Таким образом, экспериментальные результаты указывают на то, что сверхпроводящий провод, по которому течёт ток, не является электронейтральным. Это свидетельствует о том, что величина зарядов, текущих через сверхпроводящий провод, зависит от скорости.

Указанные эксперименты проведены в начале 90-х годов в МГП НИИ криогенного приборостроения ФТИНТ НАН Украины.