

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



С 393 з  
В - 191

29/IX-75

13 - 9036

В.А.Васильев, Ю.А.Шишов

3761/2-75

ДИСКОВЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ СОЛЕНОИД  
С НЕПРЕРЫВНОЙ ОБМОТКОЙ

**1975**

13 - 9036

В.А.Васильев, Ю.А.Шишов

ДИСКОВЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ СОЛЕНОИД  
С НЕПРЕРЫВНОЙ ОБМОТКОЙ

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

## **1. ВВЕДЕНИЕ**

В сверхпроводящих обмотках контактные соединения проводников между собой, в том числе и паяные, являются нежелательными, так как усложняют конструкцию, понижают ее надежность и создают некоторое омическое сопротивление. При сплошной намотке проводника контактов обычно немного. Однако в ряде случаев ленточные проводники свивают в плоские спирали /диски/, между которыми до сих пор не удавалось обходиться без паяных соединений.

В электротехнике применяется технология изготовления трансформаторов с непрерывной обмоткой, уложенной в диски /1/, однако количество витков в таких дисках невелико. В дисках сверхпроводящих соленоидов содержатся десятки и сотни витков, и известная технология осуществления переходов проводника с диска на диск здесь неприемлема.

В криогенном отделе ЛВЭ ОИЯИ разработана и использована для изготовления лабораторного сверхпроводящего соленоида технология навивки дисковых обмоток из ленточного проводника без контактных соединений между дисками. Ниже приводятся данные о параметрах и результатах испытания соленоида и сведения о технологии его намотки.

## **2. КОНСТРУКЦИЯ СОЛЕНОИДА**

Соленоид состоит из двух секций с независимым электрическим питанием.

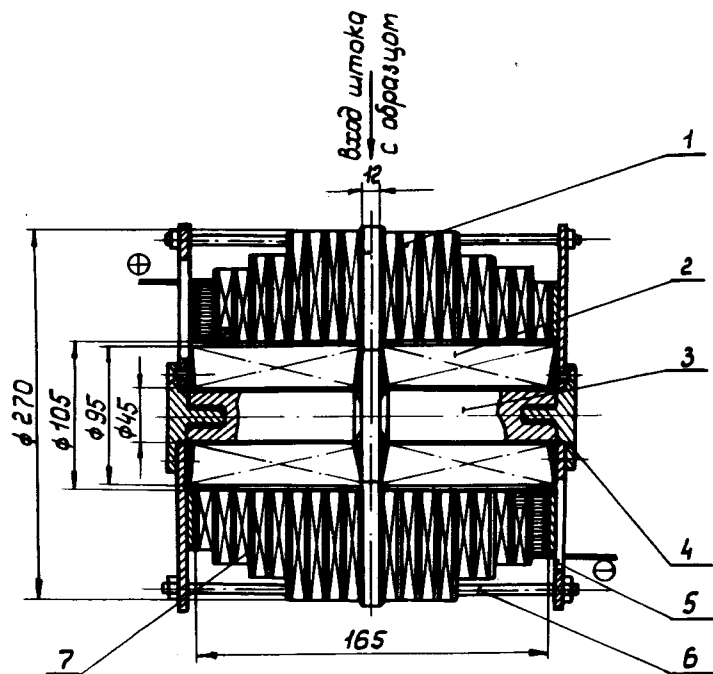


Рис. 1. Двухсекционный соленоид со щелью. 1 - наружная секция; 2 - внутренняя секция; 3 - полюса из пермендюра; 4 - фланец; 5 - фланец; 6 - стяжные шпильки.

Внешняя секция /рис. 1/, содержит 18 дисков различного наружного диаметра, образующих бочкообразную форму обмотки, которая позволяет максимально использовать объем криостата диаметром 300 мм. Соленоид размещается в криостате таким образом, что его ось перпендикулярна оси криостата. При таком положении соленоида через центральную щель сечением  $12 \times 45 \text{ мм}^2$  вводится шток с исследуемыми объектами, например, короткими образцами сверхпроводника. Щель образована двумя текстолитовыми сегментами. Диски внешней секции навиты на опорную трубку диаметром 102 мм, изолированную слоем текстолита толщиной 1 мм. В качестве

межвитковой изоляции применена фторопластовая лента шириной 5 мм и толщиной 0,3 мм. Сечение ленты, из которой навиты диски, равно  $1 \times 7,5 \text{ мм}^2$ . Диски изолированы друг от друга текстолитовыми проставками 7 толщиной 1 мм с радиальными пазами для прохода жидкого гелия. Диски удерживаются от осевого смещения на трубе фланцами толщиной 3 мм. Таким образом, диски внешней секции имеют собственный каркас из трубы и фланцев. Подобная автономность внешней секции позволяет использовать ее внутреннее отверстие для испытания катушек с наружным диаметром до 100 мм.

Для изготовления непрерывной дисковой обмотки была использована лента с ниобий-циркониевыми проволоками. Лента состоит из 10 сверхпроводящих и 8 медных проволок, покрытых с обеих сторон слоем гальванической меди.

Внутренняя секция 2 соленоида собрана из двух цилиндрических катушек, навитых проводом с ниобий-титановыми жилами. Провод изолирован двумя слоями лавсановой нити. Наружный диаметр провода с изоляцией составляет 0,65 мм. Каркасы катушек - латунные. Между слоями в обмотках проложена изоляция из двух слоев лавсановой пленки толщиной 0,02 мм. Обе катушки покрыты бандажом из проволоки из стали X18H10T диаметром 1 мм. В отверстие внутренней секции вставлены полюса 3 из пермендюра диаметром 38 мм. Зазор между полюсами - 12 мм.

Полюса прикреплены латунными фланцами 4 к фланцам 5 из стали X18H10T. Секции подсоединены с помощью фланцев 5 и шпилек 6.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ СОЛЕНОИДА

Критический ток внешней секции, равный  $700 \pm 5 \text{ А}$ , определен полным переходом соленоида в нормальное состояние. Переход был резким и неуправляемым, что свидетельствует о неполной стабилизации сверхпроводника нормальным металлом при этом токе.

Катушки внутренней секции, соединенные последовательно, запитывались током от выпрямителя ВУ 12/600.

Контроль за полем осуществлялся датчиком Холла с точностью  $\pm 4 \cdot 10^4$  А/м.

Техническая характеристика соленоида представлена в табл. 1.

Таблица № 1

Параметры соленоида со щелью.

№№ п/п :	Наименование характеристики :	Внешняя секция :	Внутренняя секция :
1.	Внутренний диаметр обмотки, мм	105	45
2.	Наружный диаметр, мм	переменный, макс. 270	95
3.	Длина соленоида, мм	165	175
4.	Ширина центральной щели, мм	12	15
5.	Число дисков	18	-
6.	Размеры сечения проводника	7,5x1 мм <sup>2</sup>	Ø 0,5 мм
7.	Длина проводника, м	720	1800
8.	Материал сверхпроводника	ниобий-50% циркония	ниобий - 50% титана
9.	Диаметр сверхпроводника, мм	0,25	0,07
10.	Материал проводника	10 проволок + медь (1:14)	19 жил + медь (1:3)
11.	Критический ток, А	700	54 (в поле внеш. секции 2410 А/м)
12.	Плотность критического тока в обмотке, А/м.кв.	6410 <sup>7</sup>	1,540 <sup>8</sup>
13.	Собственное критическое поле секции, А/м	2,8·10 <sup>6</sup>	1,35·10 <sup>6</sup>
14.	Суммарное критическое поле (две секции + полюса), А/м		4,8·10 <sup>6</sup>
15.	Запасенная энергия соленоида, кДж	24	

#### 4. ТЕХНОЛОГИЯ НАМОТКИ

На рис. 2 показано приспособление для непрерывной намотки дискового соленоида, укрепленное на токарном станке. На вал 1 устанавливается каркас соленоида 2, планшайба 3 и питающая катушка 4 со стопорным винтом 5. Намотку первой пары дисков ведут обычным порядком<sup>/2/</sup>. Начиная от внутренних витков, навивают первый диск, затем, изменив направление вращения вала 1, навивают второй диск. При намотке нечетных дисков всех последующих пар, с целью осуществления плавного внешнего перехода между четными и нечетными дисками, используется планшайба 3.

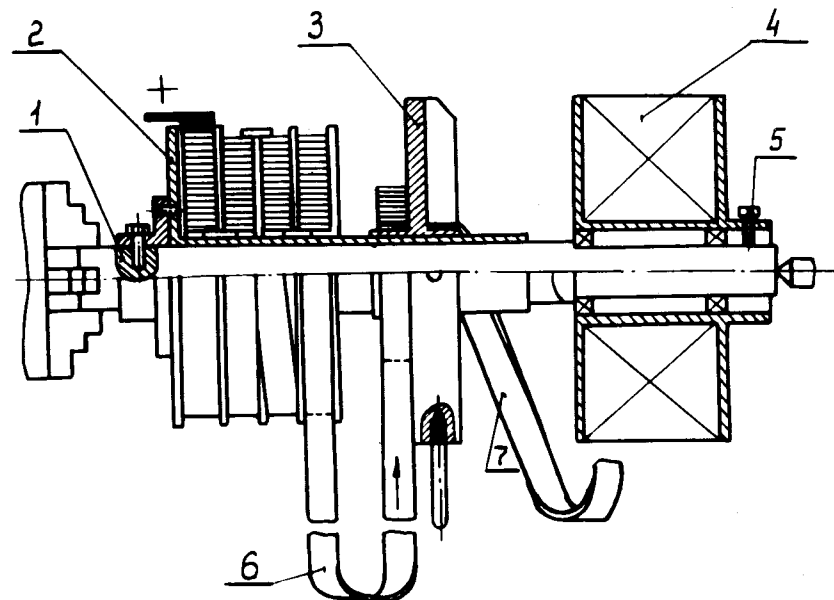


Рис. 2. Приспособление для намотки наружной секции соленоида. 1 - ведущий вал; 2 - каркас соленоида; 3 - планшайба; 4 - питающая катушка; 5 - стопорный винт; 6, 7 - ленточный сверхпроводник.

Намотку нечетных дисков осуществляют по следующей схеме:

1. Ленту 6 сматывают с питающей катушки 4 в количестве, необходимом для данного диска. Эту часть ленты располагают у станка.

2. На опорное кольцо планшайбы укладывают первый внутренний виток и далее часть ленты 7 через косой паз в планшайбе выводят к питающей катушке.

3. Вращением планшайбы навивают весь диск на опорное кольцо планшайбы. Питающая катушка 4 закреплена винтом 5 и вращается вместе с планшайбой.

4. Готовый диск сдвигают с опорного кольца планшайбы. Ослабление витков на каркасе компенсируют подтяжкой участка ленты 7.

Первоначально технология намотки отработана на ленте шириной 11,5 мм. Изготовлена катушка, техническая характеристика которой представлена в табл. 2. После завершения внешней секции они были испытаны вместе.

Таблица 2

Параметры опытного соленоида.

п/п	Наименование характеристики	
1.	Внутренний диаметр, мм	44
2.	Наружный диаметр, мм	98
3.	Длина обмотки, мм	168
4.	Ширина центральной щели, мм	18
5.	Число дисков	12
6.	Сечение ленты, мм <sup>2</sup>	11,5 x 1
7.	Материал сверхпроводника и норм. металла	ниобий - -50% циркония
8.	Количество сверхпроводящих проволок в ленте	20
9.	Критический ток в ленте, А	1610
10.	Собственное поле в центре, А/м	1,9 10 <sup>6</sup>
11.	Число витков в соленоиде	266
12.	Полная длина ленты, м	120

## ВЫВОДЫ

1. Предложен способ навивки дисковых обмоток сверхпроводящих соленоидов, позволяющий обойтись без контактных соединений между дисками.

2. Разработаны технология и устройство для осуществления способа.

3. Изготовлен по предложенному способу и успешно испытан лабораторный сверхпроводящий соленоид на 6 Т. Показано, что бесконтактные дисковые обмотки просты в изготовлении и надежны в эксплуатации, а проводник может быть повторно использован для изготовления соленоидов с другими параметрами.

## Литература

1. Л.С.Герасимов и др. Обмотки и изоляция силовых масляных трансформаторов. Трансформаторы. вып. 19, М.: Энергия, 1969.
2. A.D.Appleton et al. "Some Design Aspects of Large Superconducting Magnet" Proc. Intern. Conf. Magnet. Techn., Oxford (1967). pp. 553-559.

Рукопись поступила в издательский отдел  
3 июля 1975 года.