

О НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ НА БАЗЕ НАСОСА МАГНИТНОГО ПОТОКА

В.А.Рахубовский

*Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”,
г.Харьков 61108, ул. Академическая, 1, Украина, тел. 40-44-48*

Приведены основные характеристики элементов и результаты экспериментальных исследований в различных режимах работы сверхпроводящего источника питания на базе насоса магнитного потока с тепловыми ключами.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время запитка током сверхпроводящего соленоида осуществляется от источника постоянного тока, работающего при комнатной температуре. Использование при этом сильноточных $10^2 \dots 10^4$ А тоководов в “холодную зону” приводит к дополнительным тепловыделениям в жидкий гелий и соответственно к дополнительному расходу этого хладагента и мощности рефрижератора [1]. Иногда тоководы можно удалить из “холодной зоны” после введения в соленоид требуемого тока. Однако прежде, чем это сделать, необходимо соединить концы обмоток соленоида сверхпроводящей перемычкой. В подобной ситуации говорят, что соленоид работает в режиме “замороженного потока”. Если сопротивление контактов в соединительных цепях мало, ток будет циркулировать в соленоиде в течение длительного времени без подвода энергии извне. Известны сверхпроводящие источники питания (СИП), которые могут быть размещены непосредственно в “холодной зоне” рядом с соленоидом. К ним относятся: трансформаторы импульсного действия, топологические генераторы, насосы магнитного потока [2-4]. Это позволяет исключить необходимость использования массивных сильноточных тоководов. Перспективным направлением является также разработка комбинированной системы питания, когда быстрый ввод тока в соленоид производится с помощью источника, расположенного при комнатной температуре, а регулирование и стабилизация требуемого уровня тока осуществляется с помощью СИП [5]. В состав СИП входят: насос магнитного потока (НМП), узел управления и контроля, блок внешних источников питания. НМП – это сверхпроводящий выпрямитель, в схеме которого для увеличения входного тока используется сверхпроводящий трансформатор, работающий в режиме короткого замыкания. Ток вторичной цепи трансформатора перекачивается двумя ключами [6] в сверхпроводящий нагрузочный соленоид (СНС), используя многоцикловый режим работы. Таким образом, СИП на базе НМП позволяет накачивать в СНС ток порциями. При достижении заданной величины тока СИП выключается и начинает выполнять функцию сверхпроводящей перемычки, шунтирующей СНС

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ НМП

Был изготовлен СИП, содержащий НМП, собранный по однополупериодной схеме выпрямителя и работающий в резистивном режиме [7]. Основными элементами НМП являются: сверхпроводящий входной трансформатор (СПТ) и два тепловых сверхпроводящих ключа [5,8]. СПТ соленоидальный, однофазный, без магнитного сердечника. Характеристики элементов НМП приведены в табл. 1.

Первичная обмотка сверхпроводящего трансформатора выполнена: СПТ1-2 из сплава 60Т; СПТ3 из сплава СС2. Вторичная обмотка выполнена: СПТ1 из проволоки диаметром 1,2 мм из сплава NbTiZr; СПТ2 из шины 3х1 мм из сплава НТ50; СПТ3 из ленты Nb₃Sn толщиной 0,06 мм и шириной 10 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Были проведены экспериментальные исследования работы СИП в режиме накачки тока в СНС с нулевого уровня до требуемого значения. Исследования проводились в жидком гелии при T=4,2 К. Результаты исследований приведены в табл.2. Как видно из табл.2, СИП позволяет производить запитку током СНС в довольно широком диапазоне изменения параметров управляющих токовых импульсов и величины индуктивности СНС. Исследования показали наличие сопротивления контактов в НМП, СНС и соединительных цепях. Величина этих сопротивлений находится в диапазоне $3,4 \cdot 10^{-8} \dots 2 \cdot 10^{-7}$ Ом при токах через контакты 150...400 А. Это приводит к уменьшению со временем тока в СНС. Экспериментальная зависимость тока в СНС от времени заведения, поддержания, затухания и накачки приведены на рисунке.

Уменьшение тока (кривая 3) вызвано включением в цепь СНС активного сопротивления величиной $\sim 1,3 \cdot 10^{-4}$ Ом. При уменьшении тока на допустимую величину включается СИП и производится подкачка тока (кривая 4). При достижении требуемого значения тока СИП выключается и ток в СНС поддерживается в режиме “замороженного потока”.

Таблица 1

Характеристики элементов НМП

		НМП-1	НМП-2	НМП-3			НМП-1	НМП-2	НМП-3
D ₁	мм	44	42	50	L ₁	Гн	0,02	0,2	0,24
D ₂	мм	24	9	12	M	Гн	7,4·10 ⁻⁵	1,2·10 ⁻⁴	3·10 ⁻⁴
l	мм	22	54	58	L ₂	Гн	8,6·10 ⁻⁷	2·10 ⁻⁷	5·10 ⁻⁷
W ₁		1490	7050	8015	tn	с	0,9	0,5	0,1
W ₂		2	2	3	R	Ом	0,1	0,03	1,5·10 ⁻³
D ₁	мм	0,35	0,36	0,37					

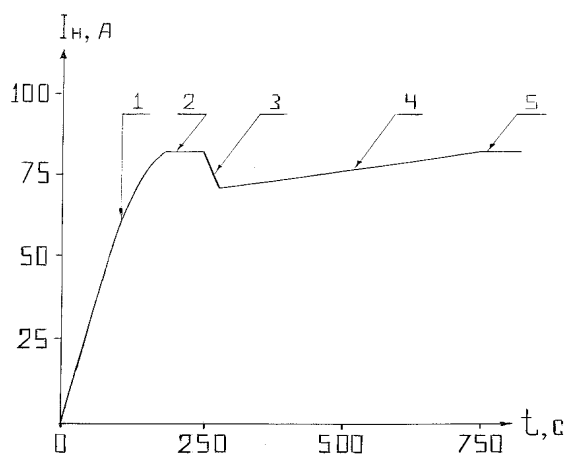
D₁, D₂ – наружный и внутренний диаметр катушки СПТ, соответственно; l – длина намотки; W₁, W₂ – число витков первичной и вторичной обмотки; d₁ – диаметр провода первичной обмотки; L₁ – индуктивность первичной обмотки; M – взаимная индуктивность между первичной и вторичной обмотками СПТ; L₂ – полная индуктивность вторичной цепи СПТ; tn – время переключения ключа из сверхпроводящего состояния в нормальное и обратно; R – активное сопротивление вентиля ключа.

Таблица 2

Результаты исследований

		1	2					3
I	А	2	2	2,5	2,5	1,9	1,7	3
I _y	А	0,1	0,045	0,04	0,04	0,045	0,04	0,13
f	Гц	0,4	0,4	0,7	0,7	0,4	0,7	2,5
τ _y	С	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,03
I _н	А	150	137	196	5	0,9	100	411
t	С	70	590	1,9·10 ³	17·10 ³	11·10 ³	20·10 ³	480
L _н	Гн	5,5·10 ⁻⁶	9·10 ⁻⁵	10 ⁻³	0,56	0,9	0,023	10 ⁻³
∂I _н / ∂t	А/с	4	0,13	0,2	3,6·10 ⁻⁴	8,2·10 ⁻⁵	6·10 ⁻³	0,85
R _k	Ом	3,4·10 ⁻⁸	2,5·10 ⁻⁷					2·10 ⁻⁷

1,2,3 – СИП, построенные на базе НМП 1-3, соответственно; I – величина тока в первичной обмотке СПТ; I_y – величина тока в нагревательной обмотке ключа; f – частота накачки; τ_y – длительность импульса тока в нагревательной обмотке ключа; I_н – величина тока в СНС; t – время накачки тока в СНС; L_н – индуктивность СНС; ∂I_н / ∂t – скорость нарастания тока в СНС на начальном участке; R_k – активное сопротивление контактов в НМП, соединительных цепях и СНС.



Зависимость тока в СНС от времени при различных режимах работы СИП для L_н = 0,023 Гн, где: 1 - ток первоначально заводится от внешнего источника до величины 82 А; 2 - ток поддерживается на уровне 82 А; 3 - ток уменьшается до величины 71 А; 4 - ток накачивается до величины 82 А; 5 - ток поддерживается на уровне 82 А. Накачка тока в СНС осуществляется при следующих параметрах управляющих токовых импульсов: f=2,2 Гц, I=2,1А, I_y=0,1А, τ_y=0,05 с

ВЫВОДЫ

СИП на базе НМП может быть использован для непосредственной запитки током секций сверхпроводящих соленоидов с индуктивностью $\leq 10^{-2}$ Гн и для поддержания тока, предварительно заведенного от внешнего источника, на заданном уровне в сверхпроводящих соленоидах с индуктивностью $\geq 10^{-2}$ Гн при работе в режиме “замороженного потока”.

ЛИТЕРАТУРА

1. La.L.Buyanov, A.B.Fradkov, J.Ja.Shebalin. Current leads for cryogenics devices // *Areview. Cryogenics*. 1975, v. 15, N 4, p. 193-200.
2. H.L.Laquer. An electrical flux pump for powering superconducting magnet coils // *Cryogenics*. 1963, v. 3, N 1, p. 27-30.
3. В.Б.Зенкевич, Е.Я.Казаковский, М.Г.Кремлев, В.В.Сычев, М.И.Федосов, В.Н.Шахтарин, П.П.Орлов. // *Сверхпроводники в судовой технике*. Ленинград: Судостроение, 1971, с. 208-228.
4. В.Е.Тонкаль, А.В.Новосельцев Ю.В.Скоба-рихин, С.В.Непогодьев. *Введение в теорию статических сверхпроводниковых преобразователей*. Киев: Наукова думка, 1990, 184 с.
5. V.A.Rakhybovskij. Compact superconducting power source constructed on base of the flux pump with heat switches // *Cryogenics*. 1992, v. 32, ICES, Supplement, p. 470-472.
6. L.J.Klundert, H.H.J.Kate. On fully superconducting rectifiers and flux pumps // *Cryogenics*. 1981, v. 21, N 3, p. 267-277.
7. С.Р.Бернард, Д.Л.Атертон. Анализ работы источников подкачки вентильного типа // *ПНИ*. 1977, т. 48, № 10, с. 3-8.
8. В.А.Рахубовский. Тепловой сверхпроводящий ключ с защитной оболочкой в вентильной цепи. // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: "Общая и ядерная физика"*. 1984, вып. 3(28), с.33-35.

ON SOME CHARACTERISTICS OF THE SUPERCONDUCTING POWER SUPPLY SOURCE BASED ON THE MAGNETIC FLUX PUMP

V.A.Rakhubovskij

NSC KIPT, 1 Akademicheskaya St. Kharkov, 61108, Ukraine, 40-44-48

The main characteristics of the elements and the results of the experimental investigations in different modes of operation of the superconducting power source based on the magnetic flux pump with the heat switches have been given.

ПРО ДЕЯКІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДПРОВІДНОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ НА БАЗІ НАСОСУ МАГНІТНОГО ПОТОКУ

В.А.Рахубовский

*Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут"
вул. Академічна, 1, Харків 61108, Україна. 40-44-48*

Приведені основні характеристики елементів і результати експериментальних досліджень у різних режимах роботи надпровідного джерела живлення на базі насоса магнітного потоку з тепловими ключами.