

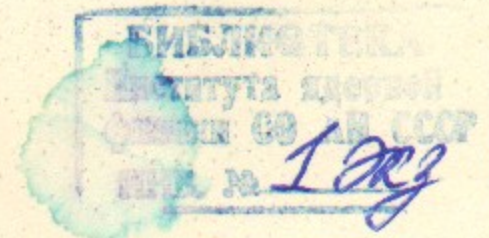


*A. 95
1997*

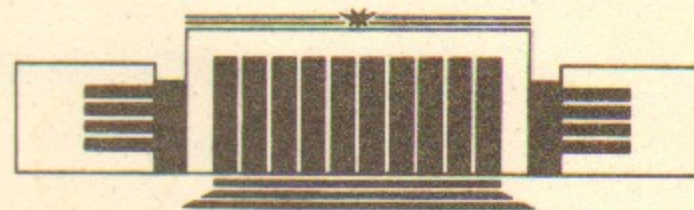
Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера

Р.Р. Ахметшин, Л.М. Барков, И.В. Журавков,
С.В. Карпов, В.С. Охупкин, А.А. Рубан,
В.П. Смахтин, И.Г. Снопков

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ
ДЛЯ ЗАПИТКИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ
ДЕТЕКТОРА КМД-2



ИЯФ 96-86



НОВОСИБИРСК

Сверхпроводящий преобразователь для запитки магнитной системы детектора КМД-2

*Р.Р. Ахметшин, Л.М. Барков, И.В. Журавков, С.В. Карпов,
В.С. Охалкин, А.А. Рубан, В.П. Смахтин, И.Г. Снопков*

ГНЦ РФ "Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН",
630090, Новосибирск, Россия

Аннотация

Представлены результаты разработки и эксплуатации сверхпроводящего статического преобразователя для запитки магнитной системы детектора КМД-2. Описаны магнитная система детектора, принцип действия преобразователя, конструкция его элементов, система контроля и управления, методы измерения параметров. Преобразователь эксплуатируется в составе магнитной системы с 1990 года. Он обеспечивает подъем магнитного поля до рабочей величины 10 кГс и его поддержание с точностью ± 1 Гс.

Superconducting rectifier fluxpump for CMD-2 detector magnetic system charging

*R.R. Akhmetshin, L.M. Barkov, I.V. Zhuravkov, S.V. Karpov,
V.S. Okhapkin, A.A. Ruban, V.P. Smakhtin, I.G. Snopkov*

*The Budker Institute of Nuclear Physics
630090, Novosibirsk, Russia*

Abstract

Design and operation of superconducting rectifier fluxpump for CMD-2 detector magnetic system are presented. The magnetic system, principles of fluxpump, fluxpump's parts, control system, parameters measurements methods are described. Fluxpump operates in the magnetic system since 1990. This device steps up the magnetic field to 10 kGs and keeps it constant during a long time with ± 1 Gs accuracy.

© ГНЦ РФ "Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН"

1 Введение

В настоящее время широко используются сверхпроводящие (СП) устройства, рабочие токи которых могут достигать десятков килоампер. Обычно питание СП магнитов осуществляется от выпрямителей, работающих при комнатной температуре. В этом случае источник присоединяется к нагрузке двумя токовводами из нормально проводящего материала. Один конец каждого токоввода при этом находится при комнатной температуре, а второй погружен в жидкий гелий. Если применяются токовводы, оптимизированные по теплопритоку в жидкий гелий, приток тепла в криостат по токовводам составляет около 1 Вт на 1 кА тока, протекающего по токовводам [1]. Подобные источники в ИЯФ применялись, например, для питания СП соленоида (магнитное поле 32 кГс при рабочем токе 270 А) на детекторе КМД-1 и для питания СП вигглера (поле 75 кГс при токе 150 А) на ВЭПП-3.

При работе СП устройств с килоамперными токами рационально использовать в качестве источника питания сверхпроводящие преобразователи (СПП), за рубежом называемые fluxpumps – насосы магнитного потока. Типы таких источников описаны в обзоре [2]. Наибольшее распространение из них получили статические СПП с одно- и двухполупериодными выпрямителями, в которых в качестве выпрямляющих элементов используются магнито- или термоуправляемые СП ключи. Подобные устройства описаны в работах [3 – 7]. Особенностью источников этого типа является то, что они не требуют наличия сильноточных вводов в криостат, поскольку силовая часть преобразователя, состоящая из СП трансформатора с выпрямителем, охлаждается

жидким гелием и может быть помещена в непосредственной близости от нагрузки, а питание трансформатора и управление ключами осуществляется сравнительно небольшими токами, обычно не превышающими 100 А. В качестве источника питания магнитной системы детектора КМД-2 [8] был выбран статический сверхпроводящий преобразователь, в котором синхронное выпрямление тока осуществляется с помощью термоуправляемых ключей. В данной работе дано краткое описание магнитной системы детектора КМД-2, описан СПП и конструкция его отдельных элементов, представлены результаты стендовых измерений его основных параметров, приведены основные характеристики СПП, полученные в процессе его длительной эксплуатации в составе магнитной системы детектора КМД-2.

2 Магнитная система детектора.

Магнитная система детектора КМД-2 показана на рис.1.

Она состоит из основного и двух компенсирующих СП соленоидов. Основной соленоид вместе с размещенной в нем дрейфовой камерой является магнитным спектрометром для определения импульсов вторичных частиц. Магнитные поля в обоих компенсирующих соленоидах направлены противоположно полю в основном соленоиде, а их величина подобрана таким образом, чтобы интеграл магнитного поля вдоль оси детектора был равен нулю. Это является необходимым условием работы накопителя и достигается тем, что суммарное количество ампервитков в компенсирующих соленоидах равно количеству ампервитков в основном соленоиде. Особенностью конструкции данного детектора является то, что внутри основного соленоида помещены дрейфовая камера, Z-камера и торцевой калориметр на кристаллах ВГО, а остальные системы находятся вне его. Такая конструкция позволяет значительно уменьшить размеры соленоида. Однако, в этом случае толщина обмотки соленоида должна быть как можно меньшей, так как обмотка находится перед цилиндрическим CsI-калориметром и, следовательно, ухудшает его энергетическое разрешение. В связи с этим в детекторе КМД-2 использовано оригинальное конструктивное решение, для основного соленоида показанное на рис.1. Два СП ниобий-титановых кабеля в медной матрице параллельно уложены в винтовую канавку, проточенную в цилиндрическом каркасе из нержавеющей стали, и припаяны к нему свинцово-оловянным припоем.

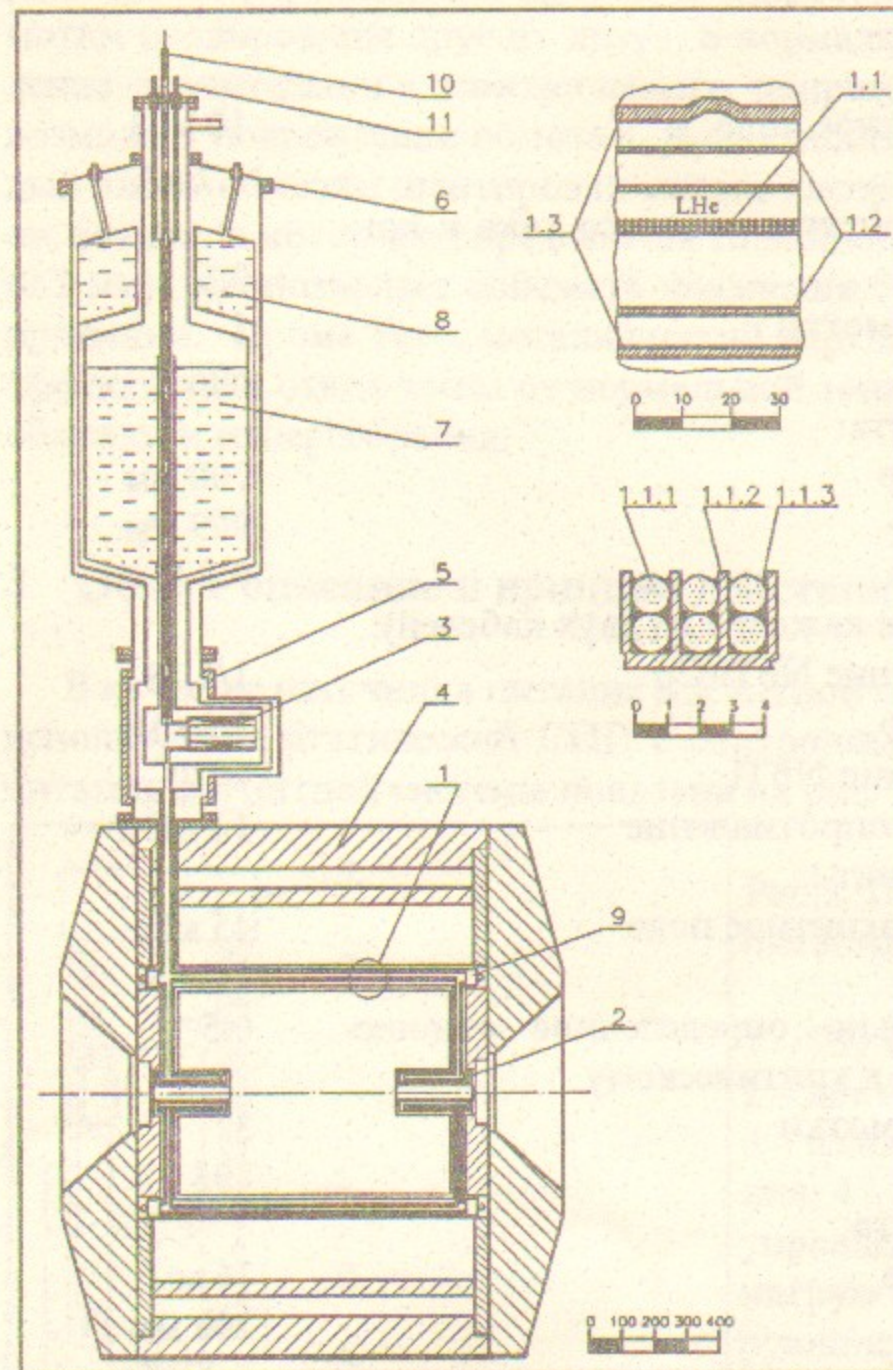


Рис.1. Магнитная система КМД-2.

- 1 – основной магнит;
- 1.1 – основной соленоид;
- 1.1.1 – СП провод;
- 1.1.2 – нержавеющий каркас;
- 1.1.3 – припой;
- 1.2 – алюминиевые азотные экраны;
- 1.3 – внешняя теплая оболочка вакуумного объема;
- 2 – компенсирующие соленоиды;
- 3 – СП преобразователь;
- 4 – ярмо;
- 5 – объем, в который помещен СПП;
- 6 – криостат;
- 7 – объем с жидким гелием;
- 8 – объем с жидким азотом;
- 9 – каналы для охлаждения экранов жидким азотом;
- 10 – трубка для заливки жидкого гелия;
- 11 – токовводы.

СП обмотка охлаждается жидким гелием, находящимся между ней и цилиндрической стенкой из нержавеющей стали. Охлаждаемый жидким гелием объем расположен между двумя алюминиевыми экранами, охлаждаемыми жидким азотом. Вся эта конструкция помещена в вакуумный объем, оболочка которого имеет комнатную температуру. Суммарная толщина обмотки, азотных экранов и оболочки внешнего вакуумного объема составляет примерно 0.38 рад. единиц.

Параметры магнитной системы приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры магнитной системы.

Основной магнит :		
Рабочее магнитное поле		10 кГс
Рабочий ток		1.2 кА
Расчетное отношение рабочего тока к критическому		0.5
Число слоев обмотки		1
Число витков		606
Размеры магнита:		
диаметр		700 мм
длина		909 мм
Индуктивность		0.2 Гн
Проводник (для каждого из двух кабелей):		
отношение NbTi/Cu		1/1.38
диаметр		1.2 мм
число жил NbTi		2970
Межвитковое сопротивление		14 нОм
Компенсирующий магнит :		
Критическое магнитное поле		45 кГс
Рабочий ток		1.2 кА
Экспериментально определенное отношение рабочего тока к критическому		0.5
Число слоев обмотки		3
Число витков		303
Размеры магнита:		
диаметр		76 мм
длина		200 мм
Индуктивность		1.3 мГн
Проводник:		
отношение NbTi/Cu		1/1
диаметр		1.5 мм
число жил NbTi		210
Межвитковое сопротивление		240 нОм

Паянная конструкция позволяет защитить обмотку от повреждения в случае ее перехода в нормальное состояние (срыва сверхпроводимости). При срыве в обмотке, появляется зона с нормальной проводимостью, в которой выделяется тепло. Если обмотка изготовлена обыч-

ным способом, когда СП провод изолирован от каркаса, и витки обмотки изолированы друг от друга, в нормальной зоне возможно появление значительного электрического напряжения, в результате чего возможно повреждение обмотки. В соленоидах детектора КМД-2 каждый виток обмотки шунтирован малым распределенным сопротивлением, величина которого определяется толщиной стенок между канавками (0.3 мм), что позволяет избежать появления больших межвитковых напряжений. Кроме того, металлический каркас позволяет осуществлять эффективный отвод тепла от нормальной зоны, не допуская перегрева обмотки и ее перегорания.

3 Общее описание и принцип действия источника питания.

В качестве источника питания магнитной системы детектора КМД-2 используется статический СПП с синхронным выпрямителем. Схема питания магнитной системы показана на рис. 2.

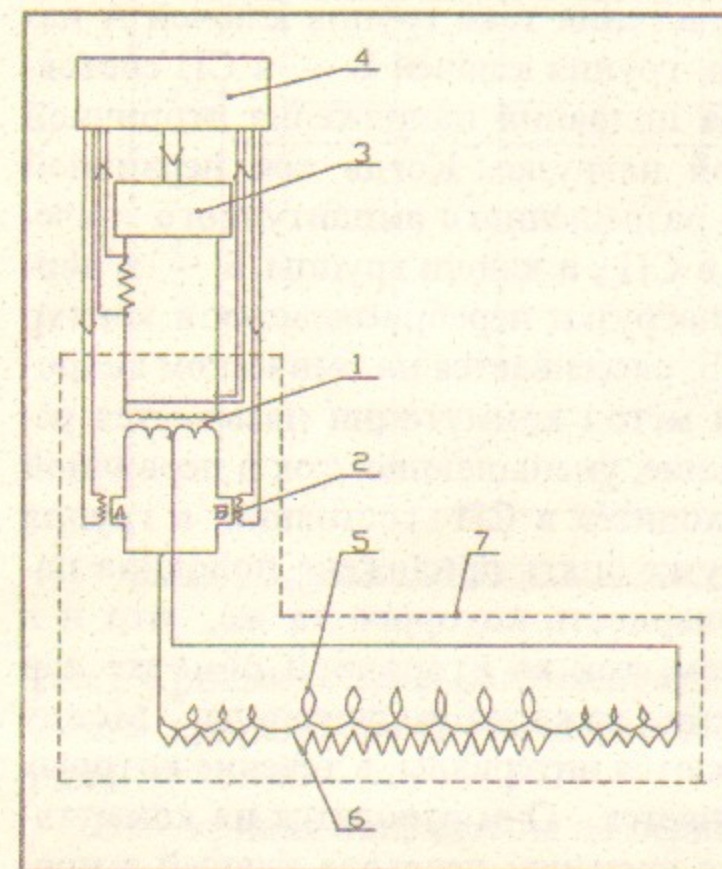


Рис.2. Принципиальная схема питания магнитной системы.

1 - СП трансформатор;
2 - две группы СП ключей;
3 - слаботочный источник питания;
4 - система контроля и управления;
5 - индуктивная нагрузка (основной и компенсирующие соленоиды, включенные последовательно);
6 - шунтирующее сопротивление (нержавеющие каркасы соленоидов);
7 - криостат.

СПП может работать в трех режимах: в режиме подъема, в режиме поддержания и в режиме вывода магнитного поля. В режиме запитки он используется для поднятия поля в нагрузку до необходимой величины, а

в режиме поддержания – для компенсации потерь энергии при работе с короткозамкнутой нагрузкой (в режиме “замороженного потока”).

Охлаждаемый жидким гелием трансформатор с ключами во вторичной обмотке выполнен как двухполупериодный выпрямитель с отводом от средней точки вторичной обмотки. Коммутация тока во вторичной обмотке осуществляется СП ключами (криотронами). Первичная обмотка устройства питается от слаботоочного источника питания на ток 40 А, работающего при комнатной температуре. Вторичные сильноточные обмотки трансформатора индуктивно связаны с первичной обмоткой. Переключение криотронов синхронизировано с работой слаботоочного источника, что и позволяет выпрямлять ток во вторичной обмотке. Управление ключами осуществляется с помощью нагревателей. При подогреве ключа он переходит в нормальное состояние (размыкается). Если ключ не подогреть, он находится в сверхпроводящем состоянии (замкнут).

При запитке СП нагрузки сверхпроводящим преобразователем, его ключи попеременно находятся то в сверхпроводящем, то в нормальном состоянии. Например, во время нарастания тока группа ключей А находится в нормальном состоянии, а группа ключей Б – в СП состоянии. В течение этого полупериода половина напряжения вторичной обмотки приложена к индуктивной нагрузке. Когда ток первичной обмотки достигает максимального разрешенного амплитудного значения, ключи группы А переводятся в СП, а ключи группы Б – в нормальное состояние. При этом ток нагрузки перебрасывается в контур А, а энергия, запасенная в контуре Б, рассеивается на омическом сопротивлении ключей группы Б. Такой метод коммутации называется резистивным. Далее подается напряжение, уменьшающее ток в первичной обмотке. Т.к. группа ключей А находится в СП состоянии, а группа ключей Б – в нормальном, к нагрузке опять приложена половина напряжения вторичной обмотки, полярность которого та же, что и в первом полупериоде. Таким образом, ток во вторичной обмотке и в нагрузке линейно нарастает в течение каждого полупериода. Между промежутками нарастания тока имеются интервалы, в течение которых ток во вторичной обмотке не изменяется. Они отводятся на коммутацию. Их длительность определяется временем перехода ключей в нормальное и СП состояние и временем перетекания тока из одной половины вторичной обмотки в другую при коммутации.

В режиме поддержания поля напряжение на первичной обмотке много меньше, чем в режиме ввода. Оно подобрано таким образом, чтобы

вводимая энергия была равна энергии, рассеиваемой на сопротивлении контактов.

На рис.3 показаны кривые напряжений на первичной обмотке и нагревателях, а также кривые токов первичной обмотки и нагрузки.

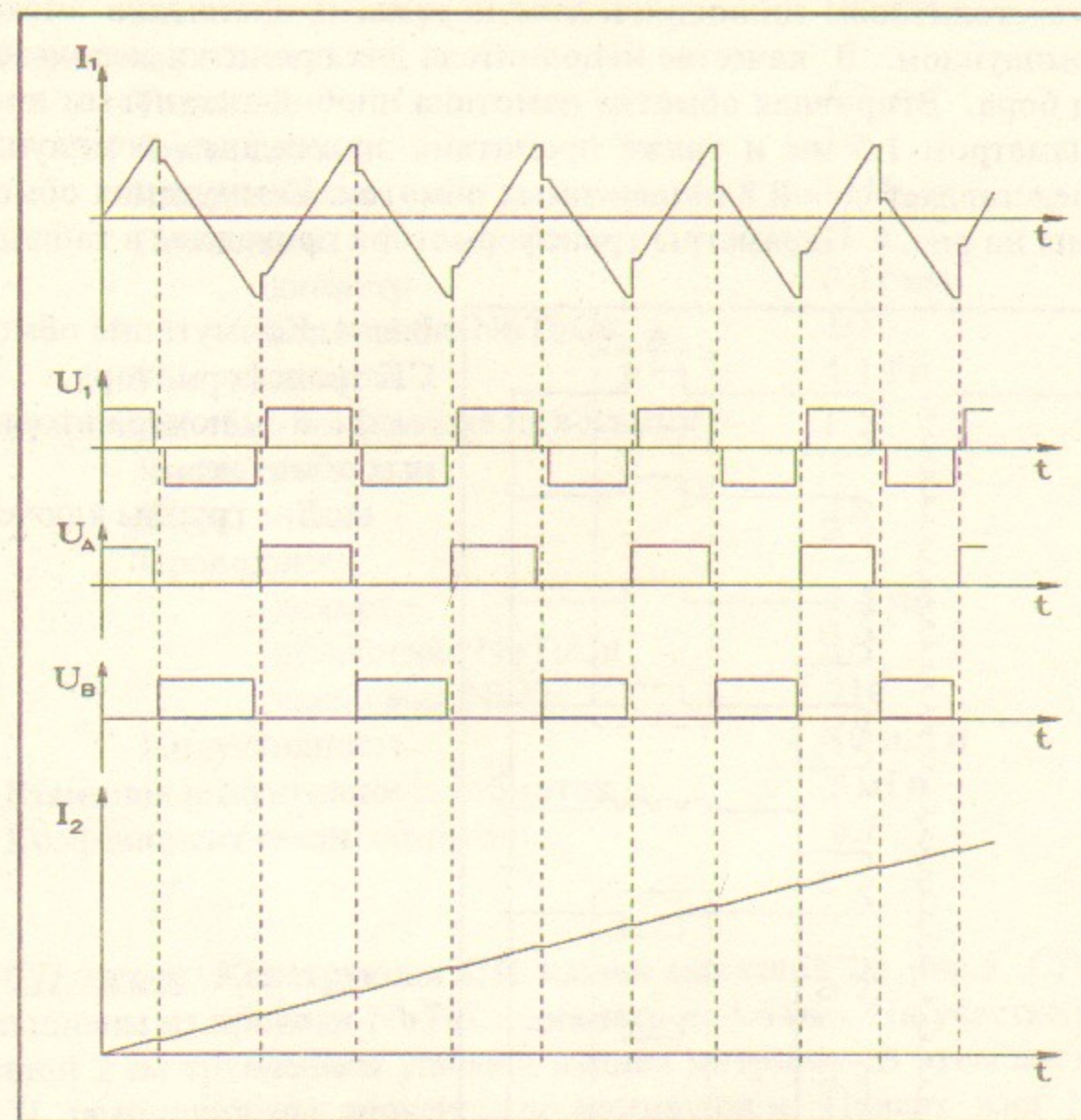


Рис.3 Кривые токов и напряжений.

I_1 – кривая тока первичной обмотки в режиме подъема магнитного поля;

U_1 – кривая напряжения на первичной обмотке трансформатора;

U_A и U_B – кривые напряжений на нагревателях ключей групп А и Б соответственно;

I_2 – кривая тока в нагрузке.

4 Конструкция отдельных элементов СПП.

Трансформатор. Первичная обмотка намотана ниобий-титановым проводом в медной матрице диаметром 0.37 мм в лаковой изоляции на стеклотекстолитовом цилиндрическом каркасе и пропитана эпоксидным компаундом. В качестве наполнителя для пропитки использован нитрид бора. Вторичная обмотка намотана ниобий-титановым проводом диаметром 1.5 мм и также пропитана эпоксидным компаундом. Она представляет собой 8 независимых обмоток. Коммутация обмоток показана на рис. 4. Параметры трансформатора приведены в таблице 2.

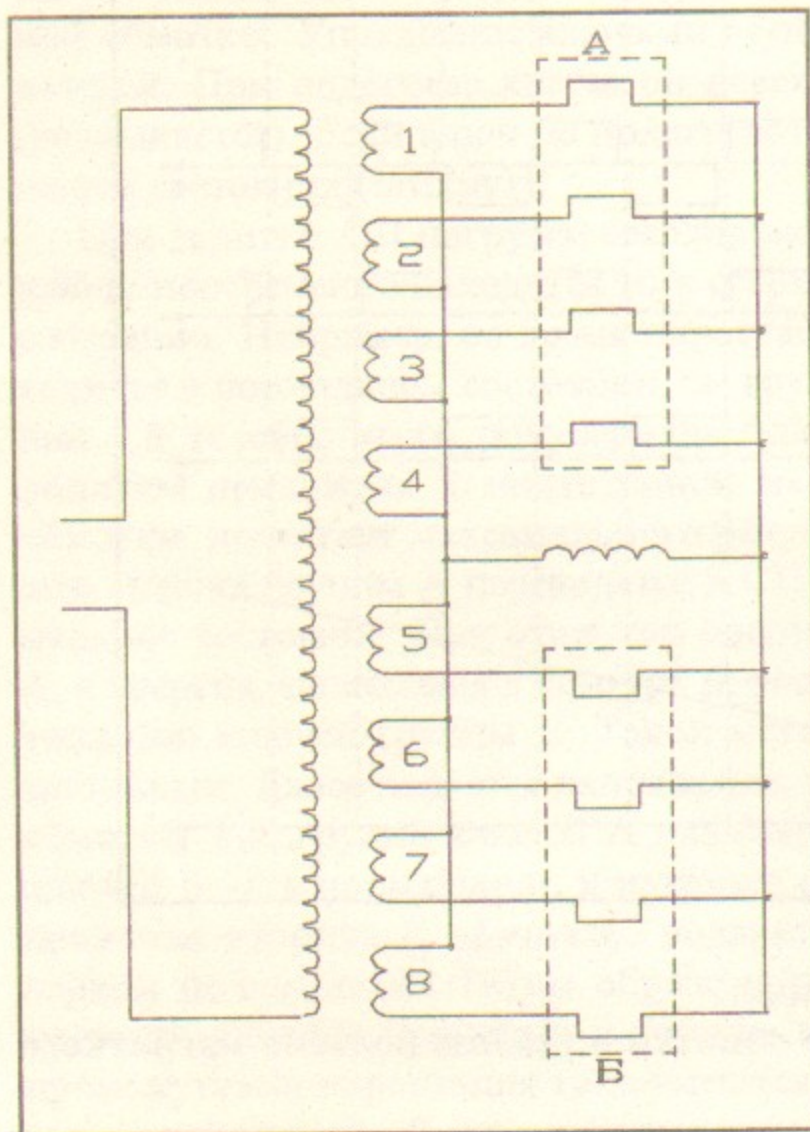


Рис. 4. Коммутация обмоток СП трансформатора.

1 – 8 – номера вторичных обмоток;

А, Б – группы ключей.

Таблица 2. Параметры СП трансформатора.

Размеры каркаса:

длина	202 мм
внешний диаметр	105 мм

Первичная обмотка:

Толщина	4.2 мм
Число слоев	10
Число витков	5116

Проводник:

диаметр	0.37 мм
отношение NbTi/Cu	1/1
Индуктивность	1.1 Гн

Вторичная обмотка (каждая из восьми):

Число слоев	1
Число витков	15

Проводник:

диаметр	1.5 мм
отношение NbTi/Cu	1/1
число жил NbTi	210

Индуктивность 10 мкГн

Взаимная индуктивность обмоток 3 мГн

Коэффициент связи обмоток 0.7

СП ключи. Конструкция СП ключа показана на рис.5. СП ключи выполнены из провода NbTi/Cu диаметром 1.5 мм. На участке провода длиной 2 см травлением удалена медная матрица. В этом месте жилы NbTi замоноличены эпоксидным компаундом. Поверх жил NbTi на участке провода длиной 1.5 см константановой проволокой диаметром 0.15 мм намотан нагреватель. Ключ теплоизолирован рубашкой из стекловолоконной нити, пропитанной эпоксидным компаундом. Сопротивление такого ключа в нормальном состоянии составляет около 20 мОм. Для увеличения критического тока в каждую вторичную обмотку впаяно параллельно по два ключа. Каждая пара ключей закреплена на стеклотекстолитовой колодке. На этой же колодке расположены контактные площадки нагревателей.

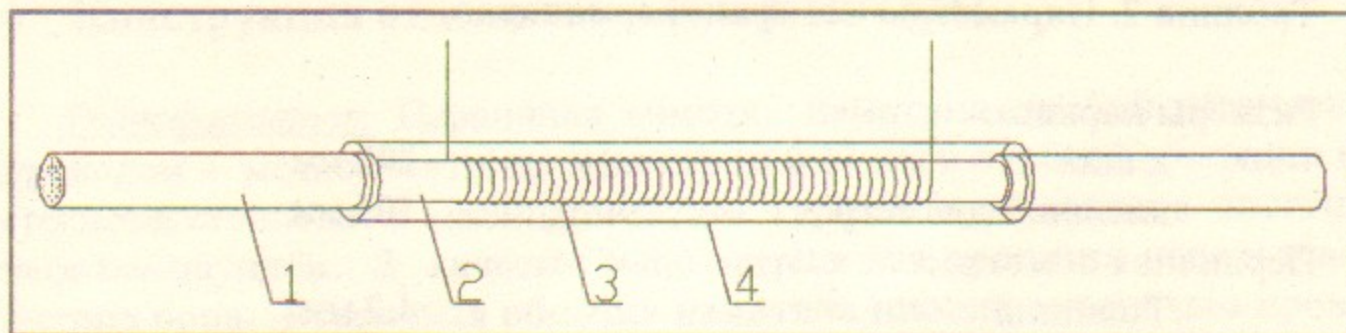


Рис. 5. Сверхпроводящий тепловой ключ.

- 1 – СП провод NbTi/Cu;
- 2 – участок провода с удаленной медной матрицей;
- 3 – константановый нагреватель;
- 4 – теплоизолирующая рубашка.

Электрические выводы. Выводы питания первичной обмотки сделаны из провода NbTi/Cu диаметром 1.5 мм для обеспечения их механической прочности. Они расположены на одном из торцов трансформатора. На этом же торце размещены сильноточные выводы вторичной обмотки и колодка с припаянными к ней проводами нагревателей ключей. Сильноточные выводы вторичной обмотки изготовлены из шины, полученной спайкой трех проводов NbTi/Cu диаметром 1.5 мм. Шина припаяна к медным ламелям, закрепленным винтами на фланце. Это обеспечивает необходимую жесткость конструкции. Все пайки производились припоем ПОС-60.

5 Защита трансформатора.

При запитке индуктивной СП нагрузки в результате различных причин может происходить срыв вторичной обмотки трансформатора или самой нагрузки. В этом случае вся энергия, запасенная в нагрузке, выделяется в виде тепла. Если не предпринимать специальных мер по отводу этой энергии, то в результате разогрева нагрузки и вторичной обмотки СП трансформатора может произойти локальное выгорание материала нагрузки или вторичной обмотки. Особенно уязвимыми являются СП ключи, так как в нормальном состоянии они имеют значительное сопротивление. Для защиты нагрузки и источника питания в СП системах обычно используют шунт, изготовленный из материала с нормальной проводимостью, присоединяемый параллельно запитываемой нагрузке.

В случае срыва энергия, запасенная в нагрузке, выделяется на сопротивлении шунта. При этом напряжение на СП ключах, равное напряжению на шунте, не должно превышать величины, при которой тепло, выделяемое в ключах, находящихся в нормальном состоянии, равно теплу, отводимому от них в жидкий гелий за счет теплообмена. Это необходимо для предотвращения повреждения ключей, которое может произойти вследствие их разогрева.

В магнитной системе детектора КМД-2, как описывалось выше, в качестве сопротивления, шунтирующего соленоиды, используются их нержавеющей каркасы. Они же играют и роль защитного шунта для трансформатора, что является еще одним немаловажным достоинством обмоток паянной конструкции. Расчетным и экспериментальным путем определено, что наибольшее допустимое напряжение на СП ключе составляет 0.1 В, соответственно подобрано и шунтирующее сопротивление.

6 Управление работой СП преобразователя.

Функциональная схема системы управления и контроля показана на рис. 6.

Система управления. Управление работой СП преобразователя осуществляется блоком управления запиткой (БУЗ). БУЗ измеряет ток первичной обмотки трансформатора и, при достижении максимума амплитуды тока, осуществляет переключение ключей и изменение полярности напряжения, подаваемого на первичную обмотку. Величина этого напряжения определяется источником опорных напряжений (ИОН). Опорные напряжения могут грубо регулироваться потенциометром, точная регулировка осуществляется управляемым от VAX-3300 цифроаналоговым преобразователем, находящимся в крейте КАМАК системы быстрого контроля. Этот ЦАП имеет энергонезависимую память, которая способна хранить коды опорных напряжений в течение нескольких суток в случае отключения электроэнергии или сбоя ЭВМ. Фактическое напряжение на первичной обмотке поддерживается равным опорному с помощью усилителя с глубокой отрицательной обратной связью.

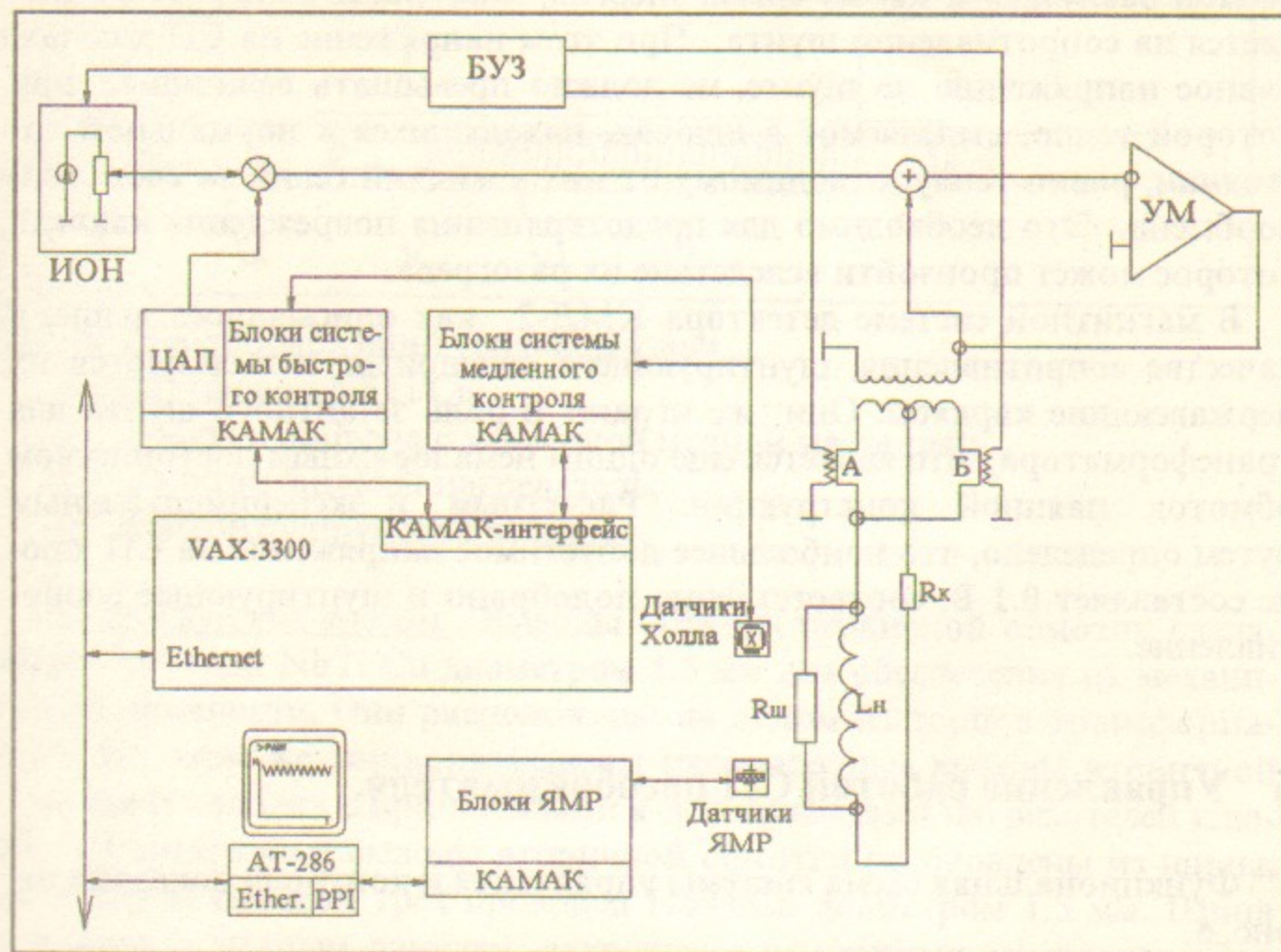


Рис. 6. Функциональная схема системы управления и контроля. БУЗ – блок управления запиткой; ИОН – источник опорных напряжений; УМ – усилитель мощности; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь с энергонезависимой памятью; А и Б – сверхпроводящие ключи; L_n – индуктивная нагрузка; $R_{ш}$ – шунтирующее сопротивление; R_k – сопротивление контактов.

Система контроля. При работе СПП производятся два вида контроля: медленный контроль в процессе нормальной работы магнитной системы и быстрый контроль в случае срыва сверхпроводимости и быстрого падения магнитного поля в основном соленоиде.

Медленный контроль является одной из функций системы контроля работы магнитной системы детектора и осуществляется с помощью VAX-3300.

При медленном контроле напряжение на первичной обмотке трансформатора и ток первичной обмотки измеряется через каждые 15 сек, показания датчиков Холла – через каждые 60 сек. Показания датчиков 1 раз в 30 минут заносятся в базу данных. Кривые тока и напряжения первичной обмотки и показания датчиков выводятся на ЦДР.

Для быстрого контроля используется специальная система на основе цифрового осциллографа. Система измеряет те же величины, которые измеряются при медленном контроле, а также напряжения подогрева ключей. Выборки производятся с интервалом в несколько миллисекунд с помощью восьмиканального коммутатора, их результаты оцифровываются АЦП-101SK и циклически записываются в буфер размером 4096 слов. При падении поля в основном магните ниже некоторого порогового значения запись прекращается, и содержимое буфера АЦП передается в VAX для записи в файл. Это позволяет получить кривые зависимостей измеряемых величин от времени в течение срыва.

7 Результаты стендовых испытаний СП преобразователя.

Испытания и отладка СПП проводились в испытательном криостате на 60 л жидкого гелия. Для этих целей была изготовлена СП нагрузка с индуктивностью 2.1 мкГн, рассчитанная на ток до 6 кА. Ниже приведены измеренные параметры преобразователя и краткое описание методики их определения.

Критические токи ключей. При испытаниях измерялись критические токи как отдельных ключей, так и различных их комбинаций. Для этого часть ключей, которая не испытывалась, постоянно поддерживалась в нормальном состоянии, а выпрямление тока осуществлялось испытываемыми ключами. Таким образом, вторичная цепь образовывалась из обмоток, в которых находились испытываемые ключи (например, из обмоток 2 и 3 – 7 и 8). Ток в нагрузке поднимался до тех пор, пока не происходил срыв одного из плеч вторичной цепи. Поскольку в обмотке наиболее слабым местом является ключ (в нем отсутствует стабилизирующая медная матрица), то этот ток и является критическим для данного ключа или группы ключей. Полученная зависимость критического тока от количества задействованных ключей приведена в таблице 3.

Таблица 3. Зависимость критического тока СП ключей от количества параллельно включенных ключей.

Число работающих ключей в каждом плече вторичной обмотки	Среднее значение критического тока, кА
1	2
2	3.8
3	4.9
4	5.4

Из таблицы видно, что критический ток нелинейно зависит от количества ключей. Причиной этого явления может быть неоднородность распределения тока между обмотками.

Необходимая минимальная мощность подогрева ключей. Мощности подогрева определялись для различных значений тока в нагрузке следующим образом: ток в нагрузке поднимали до некоторого значения, затем ключи в той половине вторичной обмотки, в которой протекал ток, начинали подогревать; ток подогрева увеличивали до тех пор, пока не наступал срыв. Минимальной необходимой мощностью подогрева является мощность нагревателя, при которой ключ переходит в нормальное состояние независимо от величины протекающего в нем тока. Средняя мощность подогрева одной пары ключей составляет 0.09 Вт

Сопротивления паяных контактов во вторичных обмотках. Для их определения ток в нагрузке поднимали до величины меньше критического тока испытываемой обмотки, после чего измеряли время, за которое этот ток уменьшался до некоторой величины при протекании только через испытываемую обмотку и нагрузку. По измеренному времени находили временную постоянную затухания тока в этой обмотке и по ней определяли величину сопротивления. Временные постоянные затухания тока для разных обмоток составили порядка $5 \cdot 10^4$ секунд; величины сопротивлений в обмотках $3 \cdot 10^{-8}$ Ом.

Критический ток вторичной обмотки трансформатора. Величина этого тока определялась для короткозамкнутой вторичной обмотки: все ключи находились в СП состоянии, на первичной обмотке поддерживалось постоянное напряжение. При этом ток во вторичной обмотке быстро нарастал, так как нагрузка оказывалась шунтированной СП

ключами. При достижении критической величины тока происходил срыв в одном из плеч вторичной обмотки, ток резко падал, а затем начинал расти со значительно меньшей скоростью, чем до срыва, т.к. во вторичную цепь включалась индуктивность нагрузки. Максимальная величина тока срыва, полученная таким образом, равна 6 кА.

8 Результаты эксплуатации СПП на КМД-2.

СП преобразователь был разработан в 1987 году. С 1990 года он эксплуатируется в составе магнитной системы детектора КМД-2. Он устойчиво работал в течение всего периода эксплуатации.

Поскольку критический ток вторичной обмотки значительно превышает рабочий ток магнитной системы, в преобразователе используется только 4 вторичные обмотки – по две в каждом плече. Остальные обмотки отсоединены от нагрузки. Это позволяет уменьшить выделение тепла в жидкий гелий за счет уменьшения числа работающих нагревателей.

На рис.7 показан типичный график магнитного поля от времени в течение сеанса работы детектора.

В режиме запитки магнитной системы до рабочей величины поля скорость его подъема установлена 6 кГс в сутки. Этот параметр определяется особенностями магнитной системы и не является предельным для преобразователя. В режиме поддержания долговременная стабильность поля обеспечивается специальной системой стабилизации магнитного поля. До 1995 года поддержание поля осуществлялось ручной регулировкой опорного напряжения источника питания первичной обмотки преобразователя с помощью потенциометра. При этом точность поддержания поля составляла ± 25 Гс. В весеннем заходе 1996 года была введена тонкая регулировка опорного напряжения, оно задавалось оператором в режиме ручного ввода кода напряжения в ЭВМ. В этом заходе точность поддержания поля составляла ± 5 Гс. Наконец, в летнем заходе 1996 года был запущен режим автоматического поддержания магнитного поля от ЭВМ в коридоре ± 1 Гс. В процессе эксплуатации в различных заходах было зафиксировано несколько сбойных ситуаций. В основном они были вызваны миганием электрической сети, а некоторые из них - сбоями в работе управляющей ЭВМ. В таких случаях работа источника прекращалась до подачи напряжения в сети и включения источника дежурным оператором. Ток нагрузки при этом

медленно затухал на сопротивлении контактов, но ни СП трансформатор, ни нагрузка не переходили в нормальное состояние.

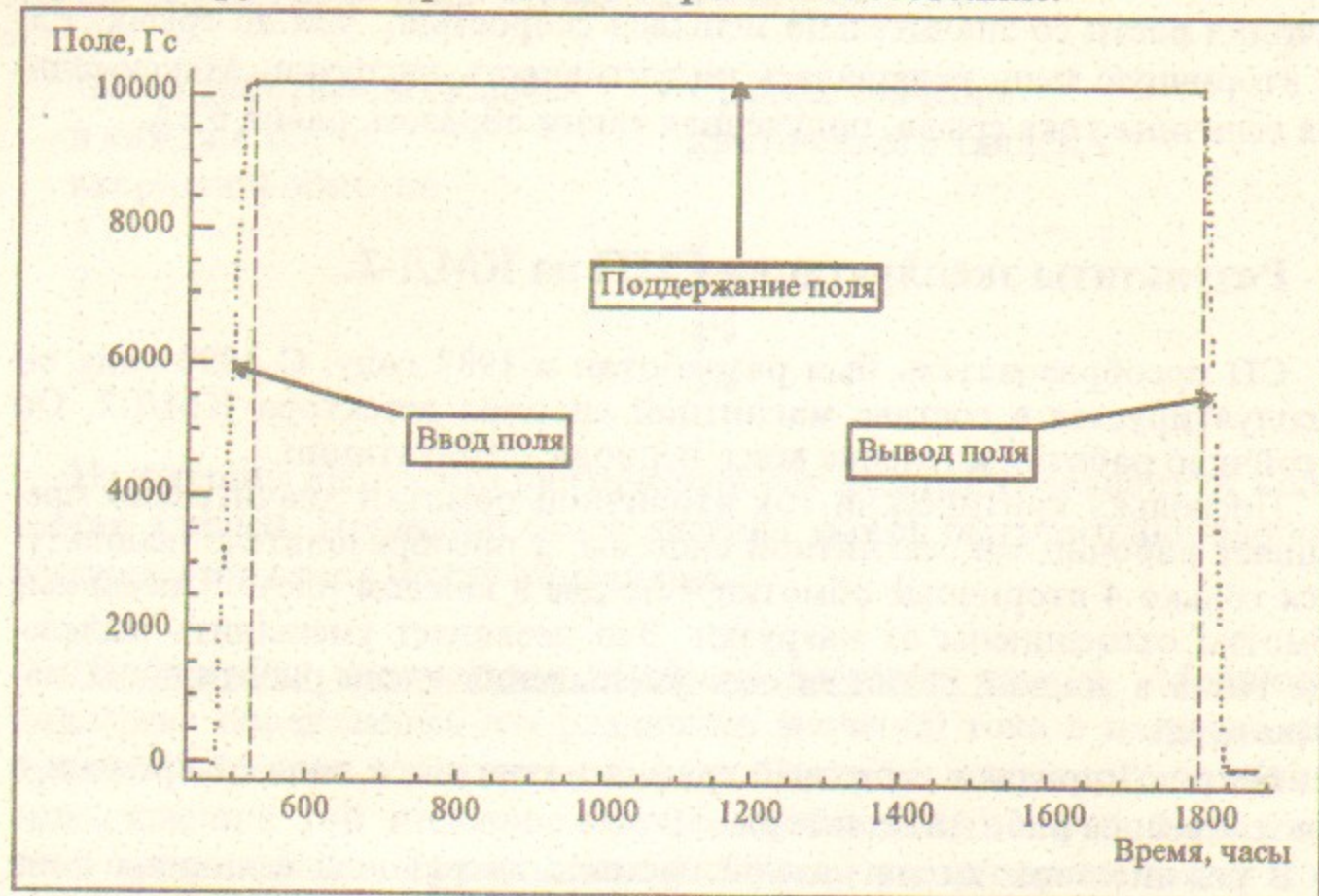


Рис. 7. График магнитного поля в основном соленоиде от времени в течение сеанса работы детектора (сеанс май-июль 1996 года).

С помощью системы быстрого контроля в процессе эксплуатации были определены:

Время перехода ключа в нормальное состояние при подогреве 100 мсек;

Время перетекания тока из одной половины обмотки трансформатора в другую при переключении ключей 120 мсек.

Эти величины определяют время резистивной коммутации и могут ограничивать быстродействие преобразователя. Поскольку в данном СПП длительность периода первичного тока в режиме ввода поля составляет около 20 секунд, а в режиме поддержания 4 минуты, эти времена не оказывают существенного влияния на время запитки.

Учитывая опыт работы данного СПП, планируется использование источника подобного типа для питания основного соленоида магнитной системы детектора КЕДР.

9 Заключение

В заключение авторы выражают благодарность Баштовому Н.С. за помощь в изготовлении СП трансформатора, Григорьеву Д.Н. за помощь в проведении стендовых испытаний, Логашенко И.Б. за работу над системой медленного контроля, а также всему коллективу детектора КМД-2, участвовавшему в эксплуатации детектора и СП источника питания.

10 Литература

1. Уилсон М. Сверхпроводящие магниты. Москва, "Мир", 1985.
2. Van de Klundert L.J.M., ten Kate H.H.J. On fully superconducting rectifiers and fluxpumps. A review. *Cryogenics* 21 (1981) p.195.
3. Ten Kate H.H.J., Bunk P.B., Britton R.B., van de Klundert L.J.M. High current and high power superconducting rectifiers. Part 1, *Cryogenics*, vol. 21, pp.195-206, 1981. Part 2, *Cryogenics*, vol. 21, pp. 276-277, 1981.
4. Homer G.J., Houzago P.J., Scott C.A., Wilson M.N. A thermally switched fluxpump. *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. MAG-11, no. 2, March 1975.
5. Ten Kate H.H.J., Bunk P.B., Steffens H.A., van de Klundert L.J.M. A thermally switched 9 kA superconducting rectifier fluxpump. *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. MAG-17, no. 5, September 1981.
6. Ten Kate H.H.J., Holtslag A.H.M., Knoblen J., Steffens H.A., van de Klundert L.J.M. Status report of the three phase 25 kA, 1.5 kW thermally switched superconducting rectifier. Transformer and switches. *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. MAG-19, no. 3, May 1983.

7. Игнатов В.Е., Кузьмин А.В., Скобарихин Ю.В. Экспериментальная модель сверхпроводящего преобразователя на ток 1000 А. *Электричество*, № 4, 1983.
8. L.M. Barkov, V.S. Okhapkin, S.G. Pivovarov, V.P. Smakhtin, I.G. Snopkov, I.V. Zhuravkov. The magnetic system of the CMD-2 detector. 5th International Conference on Instrumentation for Colliding Beam Physics. Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, USSR, March 15-21, 1990.

*R.R. Akhmetshin, L.M. Barkov, I.V. Zhuravkov,
S.V. Karpov, V.S. Okhapkin, A.A. Ruban,
V.P. Smakhtin, I.G. Snopkov*

**Сверхпроводящий преобразователь
для зарядки магнитной системы
детектора КМД-2**

*R.R. Akhmetshin, L.M. Barkov, I.V. Zhuravkov,
S.V. Karpov, V.S. Okhapkin, A.A. Ruban,
V.P. Smakhtin, I.G. Snopkov*

**Superconducting rectifier fluxpump
for CMD-2 detector magnetic system charging**

ИЯФ 96-86

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 4.12. 1996 г.

Сдано в набор 6.12.1996 г.

Подписано в печать 6.12.1996 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1.5 печ.л., 1.2 уч.-изд.л.

Тираж 200 экз. Бесплатно. Заказ № 86

Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротопринте ГНЦ РФ "ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН",
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.