



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 97-86

ЛВМ

Л.С. Ширшов

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАГНИТЫ В УСКОРИТЕЛЯХ

Направлено в *ПТЭ*

E-mail: shirshov@mx.ihep.su

Протвино 1997

Аннотация

Ширшов Л.С. Сверхпроводящие магниты в ускорителях: Препринт ИФВЭ 97–86. – Протвино, 1997. – 19 с., 4 рис., 3 табл., библиогр.: 33.

Кратко рассмотрены основные варианты конструкции СП-диполей ускорительно-накопительных комплексов и приведены параметры больших СП-соленоидов детекторов заряженных частиц.

Abstract

Shirshov L.S. Superconducting Magnets for Accelerators.: IHEP Preprint 97–86. – Protvino, 1997. – p. 19, figs. 4, tables 3, refs.: 33.

This review contains a brief description of the constructions SC-dipoles of hadron accelerator/colliders and large SC-solenoids for particle detectors.

Введение

Последние тридцать лет специалисты физики высоких энергий инициировали разработку сверхпроводящих (СП) магнитов с целью увеличить энергию пучка и уменьшить размеры оборудования и затраты на сооружение и эксплуатацию новых установок. В настоящее время использование СП-магнитов дипольного типа в магнитной структуре протонных синхротронов на большие энергии стало общепринятым.

Рабочий режим синхротронов включает фазу ускорения заряженных частиц, в ходе которой магнитное поле меняется от небольшой величины $\sim 0,5$ Т (поля инжекции) до высоких значений ~ 5 Т (при выводе частиц на неподвижную мишень или накоплении частиц на магнитной дорожке для взаимодействия во встречном режиме). При изменении магнитного поля индуцируются вихревые токи в различных компонентах конструкции магнита, что приводит в результате к тепловыделениям в магните и повышает нагрузку на криогенную систему охлаждения. Динамические потери могут повысить температуру магнита выше критического значения и привести к переходу СП-обмотки в нормальное состояние.

Конструкция СП-кабеля обмоток дипольных магнитов определяется условиями работы магнитов: в режиме ускорения заряженных частиц магнитное поле синхронно растет с увеличением энергии. Проекты ранних ускорителей были рассчитаны на машины с фиксированной мишенью, в которых количество взаимодействий непосредственно определяется числом ускорительных циклов. Из-за высоких скоростей изменения магнитного поля основной проблемой в разработке СП-магнитов были динамические потери на вихревые токи.

Однако скоро перешли к коллайдерным машинам на встречных пучках, где были низкие скорости изменения магнитного поля, но необходимо было накапливать значительно большие токи пучка в процессе инжекции, что требовало малой намагниченности СП-обмотки, особенно при инжекции заряженных частиц, которая осуществляется при малых магнитных полях. Для уменьшения гистерезисных потерь и намагниченности обмоток магнитов в токонесущем элементе использует-

ся большое количество (свыше тысячи) достаточно тонких (диаметром ~ 5 мкм) СП-нитей.

СП-диполи занимают основную часть кольца ускорителя, и поэтому определяют, как правило, стиль выполнения всех остальных элементов магнитной структуры.

Дипольные СП-магниты

Имеется ряд принципиальных особенностей в требованиях к конструкции СП-магнитов для ускорителей в отличие от других традиционных областей использования СП-магнитов, например, больших СП-соленоидов для детекторов заряженных частиц. Эти отличия привели к тому, что конструирование таких магнитов стало особой областью техники и технологии, а также потребовало решения ряда специфических задач:

- Необходимо использовать очень высокую плотность тока в СП-материале, чтобы достигнуть высоких значений отклоняющего магнитного поля.
- Более сложные и неодинаковые условия воздействия электромагнитных сил на СП-обмотку и детали конструкции.
- Высокие требования к качеству магнитного поля в небольшой апертуре.
- Высокая степень воспроизводства магнитов и их надежности.

Данные требования приводят к тому, что разработка конструкции магнита является сложной и комплексной задачей. В частности, стремление повысить плотность тока в обмотке приводит к криогенной стабилизации СП-материала и, как следствие, к необходимости решать проблему защиты СП-обмотки от разрушения при переходе в нормальное состояние.

Большие подемоторные силы, действующие на сверхпроводник, требуют тщательно разработанной методики фиксирования СП-обмотки с помощью бандажа сложной конструкции, который накладывается и закрепляется с определенной нагрузкой под прессом.

Требования к качеству магнитного поля определяют высокую точность изготовления деталей конструкции и сложную технологию сборки магнита. Идентичность магнитов обязывает разработать технологию изготовления магнита, пригодную для использования в заводских условиях промышленного производства.

В обмотках магнитов необходимо предусмотреть защиту СП-обмотки от перехода в нормальное состояние и стабильность СП-материала к скачкам магнитного потока, поэтому СП-нити помещают в матрицу из меди, а для минимизации вихревых токов при изменении магнитного поля композитные проволоки твистированы (скручиваются). В табл.1 приведены основные параметры СП-магнитов дипольного типа крупных ускорительно-накопительных установок.

Существуют достаточно подробные обзоры по СП-магнитам для ускорителей, отметим последние [1,2]. По использованию сверхпроводимости в ускорительной технике проводились школы CERN в 1988 [3] и 1995 годах [4], где освещены

проблемы, возникающие при проектировании, изготовлении и использовании СП-магнитов.

Таблица 1. Параметры СП-диполей больших ускорителей.

№	Ускоритель	Макс. поле [Т]	Поле инжекц. [Т]	Ток обм. [кА]	Темп. [К]	Число диполей	Длина [м]	Аперт. [мм]
1	Tevatron(USA)	4,4	0,66	4,4	4,6	774	6,1	76
2	HERA (FRG)	4,68	0,23	5,03	4,5	422	8,8	75
3	RHIC (USA)	3,46	0,4	5,09	4,6	396	9,4	80
4	ISABELLE (USA)	5,0	0,4	4,25	4,6	744	4,75	80
5	УНК-II (Россия)	5,0	0,67	5.25	4,6	2176	5,77	80
6	SSC (USA)	6,79	0,68	6,5	4,35	3972	15,2	50
7	LHC (CERN)	8,36	0,58	11,5	1,9	1232	14,2	56

Кратко рассмотрим особенности конструкций СП-магнитов больших ускорительно-накопительных комплексов (рис.1). Впервые отклоняющие СП-магниты для ускорителя были применены во ФНАЛе (США), и созданная конструкция во многом определила последующие разработки. К основным достижениям конструкторов можно отнести плоский транспонированный СП-кабель, известный как *резерфордский* тип токнесущего элемента. Удачная конструкция бандажа позволяет жестко фиксировать двухслойную обмотку, намотанную плоским кабелем.

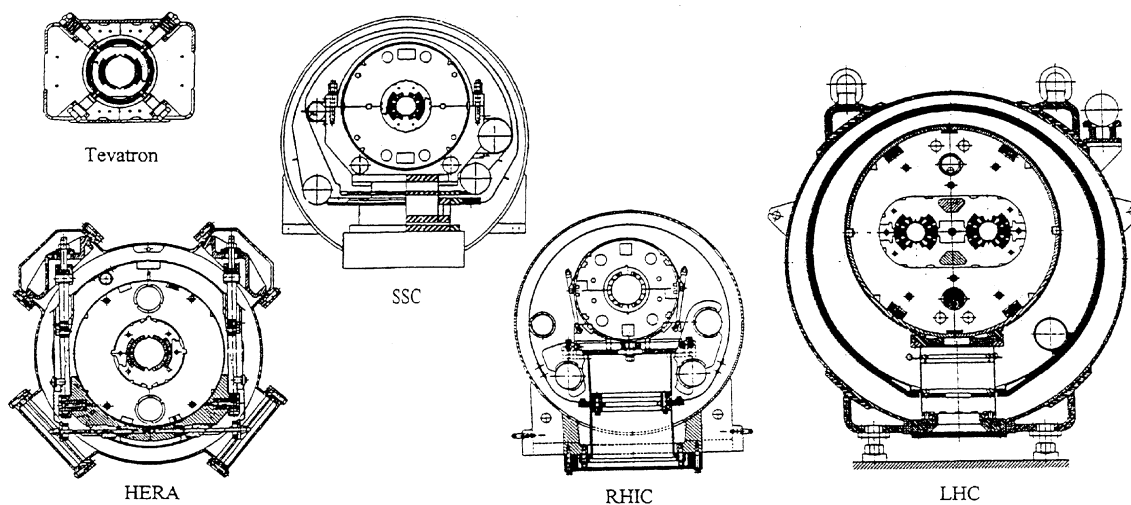


Рис. 1. Поперечное сечение СП-магнитов дипольного типа ускорительно-накопительных комплексов на высокие энергии.

Многие предложения, реализованные в СП-магнитах Тэватрона, привели к стилю, основная особенность которого в точной фиксации обмоток с помощью листов

сборного бандажа. Обжатие под прессом используется не только для сборки ламинированного теплого ярма, но также для сборки листов бандажа: половинки бандажа из листовой нержавеющей стали толщиной 1,5 мм фиксируют наружную поверхность катушек. Бандаж под гидравлическим прессом сжимается до начальных размеров и затем эти половинки скрепляются с помощью особых замков или сваркой. Такая процедура обеспечивает предварительную нагрузку на обмоточный блок, которая при охлаждении до гелиевых температур снижается за счет разных коэффициентов термоусадки обмоток и бандажа, но позволяет сохранить фиксацию обмоток.

ФНАЛ разработал оптимальную конструкцию СП-магнитов, что позволило организовать массовое производство магнитов в заводских условиях, но в то же время с сохранением точностей изготовления магнитов. Ярмо из железа при комнатной температуре позволило использовать компактный криостат, но привело к зависимости величины магнитного поля от расположения холодных СП-катушек относительно теплого ярма. Недостатком этой разработки стала сложная конструкция криостата и необходимость юстировки СП-обмотки относительно ярма, что усложняет эксплуатацию оборудования.

Для протонного кольца установки ГЕРА (HERA) была разработана конструкция СП-диполя с “холодным железом”, ярмо обратного магнита размещено внутри криостата [4]. Бандажи из алюминиевого сплава, используемые в магнитах, дают лучшую пару для поперечного соединения катушек. Железное ярмо, размещенное непосредственно за бандажом при низкой температуре, позволяет точно центрировать обмотки по отношению к экрану. Близкое расположение железа позволяет получить большее поле в апертуре, но в то же время насыщение железа приводит к ошибке в поле.

Данная (“холодная”) конструкция более жесткая и не требует специальных держателей, связанных с внешней средой при комнатной температуре, но криостат становится больше и тяжелее. Значительно увеличиваются затраты времени (и жидкого гелия) на охлаждение оборудования до криогенных температур. Эта конструкция позволяет легко решить проблему защиты магнитов с использованием “холодных” диодов, подключенных к выводам магнитов.

Трудности у создателей СП-магнитов установки ГЕРА возникли из-за ошибок при выборе параметров СП-кабеля, толстые СП-нити (диаметром свыше 10 мкм) привели к большой намагниченности и, как следствие, к плохому качеству магнитного поля. Это обстоятельство вынудило усложнять магнитную структуру дополнительными корректирующими магнитами.

Наиболее простая и экономичная конструкция магнитов RHIC вызвана тем, что СП-обмотка “арочного” типа имеет только один слой. Было отлажено промышленное производство магнитов в заводских условиях с производительностью один дипольный и два квадрупольных магнита с “холодным железом” за день [5]. Качество поля не намного хуже, чем у магнитов установки ГЕРА, и лучше, чем в Tevatron (где обмотки двухслойные). Железное ярмо используется для силовой поддержки бандажных обхватов. Впервые в RHIC удалось снизить затраты на

испытания, отказавшись от холодных измерений. Важным фактором в принятии такого решения было поведение магнитов при переходе в нормальное состояние и хорошая корреляция между теплыми и холодными измерениями на первых 33 магнитах [6].

Можно отметить, что впервые “холодное железо” для ярма СП-диполя было предложено в БНЛ (США) для проекта ISABELLE. Магнитопровод из низкоуглеродистой стали выполнял также роль бандажа, фиксирующего однослойную обмотку, состоящую из шести токовых блоков в каждой из двух половин. Число витков в блоках и их геометрия подобраны таким образом, что обеспечивается косинусоидальное распределение тока в обмотке. Для компенсации насыщения железа в больших магнитных полях были предусмотрены корректирующие обмотки, запитываемые от отдельного источника питания. При испытании моделей СП-диполей БНЛ с $NbTi$ -обмоткой длиной 4,5 м было достигнуто поле 4,9 Т при температуре 4,6 К.

В свое время разработка проекта SSC послужила причиной закрытия ISABELLE, ускорительно-накопительного протонного комплекса в Брукхэйвене, рассчитанного на получение в пересекающихся кольцах с периметром 2,64 км энергии 2x400 ГэВ. Дополнительной причиной прекращения финансирования стала и “задержка на старте”, связанная с проблемой создания конструкции СП-диполя, надежного в работе и технологичного в изготовлении.

В первоначальном варианте конструкции СП-диполя для ISABELLE технология сборки магнита была своеобразной: СП-обмотка охлаждалась в жидком азоте, а стальные кольца, исполняющие также роль бандажа, нагревались в печи, и затем осуществлялась горячая “посадка”. Процедура, которая выглядела достаточно эффективно, тем не менее была неэффективна и не избавляла от “тренировки” СП-обмоток в процессе ввода тока. Параллельно велась разработка конструкции СП-диполя в Fermilab, и успешный запуск Тэватрона в первую очередь объясняется удачной конструкцией отклоняющего СП-магнита.

Основные проблемы у разработчиков СП-диполей ISABELLE были связаны с тем, что работа в области, близкой к насыщению стали, приводит к необходимости учета нелинейности характеристик магнитного материала. Если внутренний диаметр магнитного экрана близок к внешнему диаметру СП-катушки, то часть железа насыщается и может искажать поле. Близкое размещение ярма к СП-обмотке и требование к получению в апертуре магнитного поля с индукцией до 5 Т затруднили получение в диполях ISABELLE требуемого качества поля. Однако опыт, полученный при разработке данной конструкции, не пропал даром и пригодился при создании СП-диполей RHIC, рассчитанных на получение магнитного поля меньшей величины.

Будем надеяться, что опыт создателей магнитов УНК также пригодится в будущем. В первоначальном варианте проекта УНК [7] предполагалось использовать в конструкции дипольного магнита два магнитных ярма. Железный экран, размещенный внутри криостата, должен был играть роль бандажа и вносить вклад в магнитное поле примерно на 1 Т. Теплое ярмо было предназначено для экра-

нирования от поля рассеяния магнита. В процессе моделирования конструкции СП-диполя был изготовлен ряд магнитов с теплым ярмом и многослойными обмотками оболочечного типа на основе $NbTi$ -материала, подобные магнитам FNAL. В окончательном варианте за основу конструкции дипольного СП-магнита УНК выбрана двухслойная обмотка оболочечного типа с холодным магнитным ярмом, показанная на рис.2.

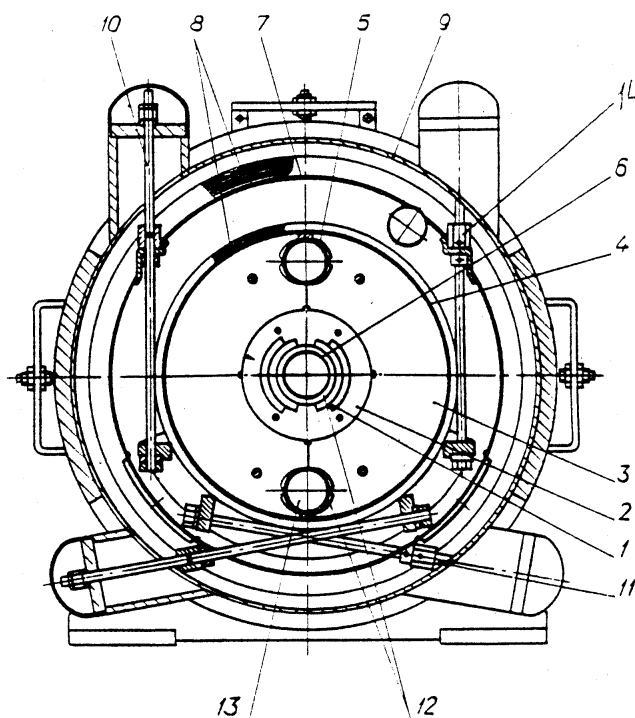


Рис. 2. Поперечное сечение СП-диполя УНК. 1 – обмотка, изготовленная на основе $NbTi$ -кабеля; 2 – бандаж из пластин нержавеющей стали толщиной 1,5 мм; 3 – стальное ярмо обратного потока; 4 – гелиевый объем; 5 – трубопровод двухфазного гелия; 6 – пучковая труба; 7 – азотный экран; 8 – многослойная суперизоляция; 9 – вакуумная полость; 10 – подвес; 11 – горизонтальная растяжка; 12 – однофазный гелий; 13 – двухфазный гелий; 14 – фиксатор.

Стальной экран, который располагается на бандаже, дает вклад в величину магнитного поля около 25%, что позволяет снизить расход СП-материала. В качестве токнесущего элемента принят кабель резерфордовского типа, изготовленный скруткой 19 проволок, содержащих ниобий-титановые нити с критической плотностью тока не менее $2,3 \times 10^5$ А/см² (в поле 5 Т, при 4,2 К). В целях оптимального заполнения обмотки поперечное сечение СП-кабеля выбрано в форме трапеции. Геометрические размеры кабеля должны быть выдержаны с точностью не хуже чем ± 30 мкм по ширине и ± 5 мкм по толщине для получения требуемого качества магнитного поля в апертуре.

Механические характеристики обмотки влияют на “тренировку” СП-обмотки, а также имеют важное значение для обеспечения стабильности магнитных характеристик в рабочем цикле нарастания тока. Предварительное сжатие обмотки до оптимальных значений давления (850 кГ/см^2 — наружный слой и 1000 кГ/см^2 — внутренний) осуществляется под прессом, а для фиксации нагрузки используются воротники из нержавеющей стали.

Отклонения в размерах СП-обмотки определяются в основном точностью изготовления воротников, которая составляет $\pm 10 \text{ мкм}$. Жесткость воротников определяет геометрию обмоточного блока после сборки и стабильность характеристик в рабочем цикле. Форма воротника определяется штампом, а точность изготовления зависит от механизма штамповки и допусков на штамп. Основная проблема состоит в износе штампа, который надо перешлифовать после изготовления определенного числа пластин и проводить контрольные проверки на соответствие воротников техническим условиям.

Следующая проблема относится к изоляции пластин, что необходимо для исключения потерь на вихревые токи при работе в динамическом режиме. Изоляция должна быть радиационно стойкой, тонкой (около 10 мкм) и высокоомной. Оксидное покрытие листов нержавеющей стали путем окисления поверхности воротников удовлетворяет требованиям по сопротивлению, толщине и прочности изоляционного слоя. Корпусная изоляция обмотки от банджа содержит пять слоев полиимидной пленки общей толщиной $0,5 \text{ мм}$ и рассчитана на перенапряжение до 5 кВ при переходе СП-магнита в нормальное состояние.

Изоляционное покрытие СП-кабеля обеспечивает электрическую изоляцию витков обмотки и склеивание витков при спекании обмотки. Для изоляции СП-кабеля используются два слоя полиимидной пленки толщиной 20 мкм и слой стеклотенты со связующим толщиной 100 мкм . Поверх каптоновой пленки наматывается пропитанная эпоксидным компаундом стеклотента шириной 10 мм с зазором 1 мм , обеспечивающая склеивание витков обмоточного блока. СП-обмотка спекается при температуре 450 К в течение 5 часов, а затем накладывается бандаж.

Величина поперечного сопротивления между проволоками кабеля (которое зависит от предварительной нагрузки на обмотку) определяет электрическую стабильность и уровень вихревых потерь. Для минимизации величины динамических потерь следует использовать СП-кабель с максимальным поперечным сопротивлением для снижения величины вихревых токов, протекающих между проволоками при изменении магнитного поля.

С другой стороны, для обеспечения электрической стабильности кабеля необходимо иметь достаточно низкое сопротивление между проволоками, обеспечивающее возможность перераспределения транспортного тока. В целях одновременного выполнения этих противоречивых требований выбран СП-кабель типа “зебра” с чередующимися лужеными и оксидированными проволоками (покрытие на основе сплава $\text{Sn} + 5\% \text{ Ag}$).

Средняя мощность динамических потерь в обмотке СП-диполя УНК составляет в ускорительном режиме $0,6 \text{ Вт/м}$. В случае возникновения нормальной зоны

в СП-обмотке следует принимать специальные меры для раннего обнаружения и перевода с помощью нагревателя всей обмотки с целью равномерного тепловыделения. Быстрый вывод запасенной энергии из магнита за время < 1 сек необходим для того, чтобы разогрев СП-кабеля не превысил 300 К.

Важными элементами конструкции являются вакуумная камера и бандаж, изготавливаемые из нержавеющей стали, магнитный экран из электротехнической стали, корпусная электроизоляция и изоляционное покрытие СП-кабеля, обладающие высокой радиационной стойкостью, электрической и механической прочностью. При выборе конструкционных материалов необходимо учитывать специфические условия работы СП-магнитов ускорителя (криогенные температуры, высокие магнитные поля и значительные механические напряжения, интенсивное радиационное облучение).

Наибольшей стойкостью к воздействию ионизирующего облучения обладают эпоксидные стеклопластики и полиимид (каптон), на порядок более низкую стойкость имеет лавсан и еще на три порядка ниже — фторопласт. Электрическая прочность каптона составляет 200 В/мм, а эпоксидного стеклопластика — 15 кВ/мм.

Для воротников бандажа выбрана нержавеющая сталь толщиной 2 мм марки 05X20H15AG6, а вакуумной камеры ионопровода — марки 03X20H16AG6. Магнитная восприимчивость этих типов нержавеющей стали составляет не более $6,5 \times 10^{-3}$ в магнитном поле до 5 Т при температуре 4,2 К. Магнитный экран изготовлен из листов электротехнической стали толщиной 3 мм марки 2081. Коэрцитивная сила и индукция насыщения при 4,2 К составляют соответственно 2,1 Э и 2,19 Т.

В рамках отработки технологии промышленного производства СП-магнитов УНК изготовлена серия из 23 диполей, которая прошла тестовые испытания при температуре 4,4 К [8]. Достаточно подробное описание проблем создания СП-диполей УНК приведено, чтобы показать проблемы, возникающие при разработке магнитов. Подобный во многих аспектах магнитам УНК закрытый проект “суперколлайдера” SSC использовал реализованную на установке ГЕРА конструкцию СП-диполя, содержащего “холодное железо” в качестве магнитного экрана.

Разработки магнитов УНК и SSC в целом повторяют концепцию, заложенную при разработке магнитной структуры установки ГЕРА. Эти проекты (УНК и SSC) не содержали принципиальной новизны в конструкциях магнитов и в итоге оказались “замороженными”.

В данный момент вопрос выбора конструкции СП-магнитов протонного кольца актуален для разработчиков проекта ЛНС. Основу идеи, заложенной при проектировании, составляет предложение “два в одном”, которое заключается в использовании общего криостата, единого “холодного железа” и бандажа для двух СП-магнитов, размещенных вблизи. Данное предложение вызвано необходимостью сократить затраты на создание двух СП-дорожек и вписаться в габариты существующего тоннеля LEP.

Предложение по созданию ЛНС было сформулировано Джоном Адамсом (*J.B.Adams*) в 1976 году, и работа над проектом началась осенью 1983 г. после одобрения LEP. Джон Адамс был конструктором протонного синхротрона (PS) ЦЕРН

и впоследствии создал суперпротонный синхротрон (SPS) с энергией 450 ГэВ. Целью его соратников стало создание СП-магнита с максимально возможным полем для получения в тоннеле LEP максимальной энергии. После первых попыток изготовления магнитов на основе Nb_3Sn из-за хрупкости этого материала было решено, что охлаждение $NbTi$ до 1,9 К — более экономично и реализуемо.

В первоначальном варианте проекта LHC [9] планировалось достигнуть в СП-диполях магнитное поле 10 Т, что позволило бы получить в системе центра масс энергию 15,4 и 1,3 ТэВ для встречных пучков (pp) и (pe) соответственно. Сейчас требования к магнитному полю снизились до уровня 8,4 Т, а вопрос промышленного производства магнитов не рассматривается в связи с отсутствием проработанного варианта дипольного магнита.

Состояние дел весной 1997 г. по разработке СП-магнитов LHC изложено в работе [10]. Изготовлены и испытаны модели СП-магнитов длиной 1 м, четыре модели СП-диполей длиной 10 м и два прототипа длиной 14,2 м, изготовленных промышленным способом. Проведено испытание стандартной ячейки, содержащей три диполя и квадруполь, моделирующей поведение участка магнитной структуры.

Тестовые испытания проведены при циклировании магнитного поля от уровня инжекции - 0,6 Т до номинального значения 8,4 Т, причем работа велась в непрерывном режиме и суммарное число циклов изменения поля 2100 соответствовало работе магнитов в течение 10 лет режима работы ускорительно-накопительного варианта.

Следует отметить, что за последние годы происходит изменение первоначальных планов создания оборудования, например в работе [11], предполагалось, что начало массового производства СП-магнитов в промышленных масштабах произойдет в 1997 г.

Основной недостаток конструкции СП-диполя в большом объеме “холодной массы” — при полном весе криостата около 31 т около 25 т приходится на часть конструкции (в основном ярма магнитопровода), расположенной в низкотемпературной зоне. Полный вес “железа” магнитной структуры, распределенной по длине 26,7 км и охлаждаемой до температуры сверхтекучего гелия, составляет около тридцати тысяч тонн [11].

Для охлаждения кольца LHC предполагается использовать криогенные мощности, созданные для LEP2. Охлаждение СП-резонаторов LEP2, расположенных по периметру кольца на участках с полной длиной 2 км, потребовало создания 4 криогенных станций, каждая с 12 кВт на уровне температуры 4,5 К [12]. Для охлаждения LEP2 используется 9,6 т He , а для LHC потребуется на порядок большая величина запасов гелия (93,5 т). Для охлаждения до температуры сверхтекучего гелия СП-магнитов LHC, занимающих 24-км часть кольца, потребуется криогенное оборудование, рассчитанное на получение 150 кВт на уровне 4,5 К [12].

Можно отметить, что при сегодняшнем развитии криогенной техники для получения 1 Вт на уровне температуры жидкого гелия следует затратить по меньшей мере 200 Вт на уровне комнатных температур, а отвод 1 Вт на уровне сверхтекучего гелия требует затрат на тепле ~ 500 Вт. Дополнительные мощности энергопита-

ния необходимы для запитки СП-магнитов. Характеристики сверхтекучего гелия как охладителя СП-магнитов кольца ЛНС рассмотрены в [13].

В работе [14] проведено численное моделирование активного экранирования СП-магнита с помощью дополнительной СП-обмотки. Аналитически исследована возможность полной экранировки и показано, что дополнительная обмотка позволяет существенно уменьшить вес магнита и его стоимость, а также избавиться от проблем, связанных с насыщением железа в больших полях. Холодное железное ярмо составляет около 80% веса магнита, что увеличивает его стоимость и время захлаживания. СП-магниты с активным экраном имеют вес в 5 раз меньший на единицу длины, их размеры становятся в два раза меньше по сравнению с СП-магнитами, использующими стальное ярмо.

Два дипольных СП-магнита с обмотками активного экрана были разработаны и испытаны в КЕК. Эти магниты рассматриваются как кандидаты сепарирующего диполя, предназначенного для места встреч электрон-позитронного коллайдера В-фабрики КЕК [15]. Основная СП-обмотка генерирует магнитное поле 1.6 Т в апертуре диаметром 11.4 см, в то время как экранирующая СП-обмотка, размещенная поверх основной, запитывается током противоположного направления и создает поле 0,9 Т. Эти безжелезные магниты рассчитаны на номинальное значение поля 0,7 Т, уровень внешнего поля “утечки” составляет 5 мТ на диаметре 40 см, что составляет приемлемый уровень.

Мультипольные компоненты поля в апертуре выше чем ожидалось. Для коротких моделей (в данном случае эффективная магнитная длина составляет ~ 40 см) СП-магнитов активного экранирования большую роль играют концы катушек, и становится очень важной точность установки (фиксации) проводника.

Для создания таких небольших магнитных полей (менее 1 Т) возможно использовать обычные железные магниты, но их применение приводит к большому объему материала в районе взаимодействия пучков, а также затрудняет точное регулирование поля из-за гистерезиса стали. СП-магниты с активной экранирующей обмоткой позволяют легко регулировать величину поля с требуемой точностью и уменьшают объем материала, что снижает фон от взаимодействия заряженных частиц с веществом в районе встреч пучков.

Как видно из приведенных конструкций СП-диполей, основные способы экранирования магнитных полей следующие. Это использование ферромагнитных экранов, когда объем, содержащий источник поля, окружается одной или несколькими железными оболочками, находящимися в криостате или вне его. Другой способ заключается в компенсации магнитных полей с помощью дополнительных обмоток, размещенных таким образом, что генерируемое ими поле направлено противоположно полю рассеяния.

Понятно стремление разработчиков СП-магнитов достичь максимальных значений магнитного поля, существует много расчетов высокополевых магнитов, например в работе [16] рассматриваются варианты создания СП-диполей для ускорителей в интервале 15-20 Т. В Беркли группа высокополевых магнитов разрабатывает комбинированный дипольный магнит из двух слоев. Внутренний обмоточный блок

изготавливается на основе Nb_3Sn , а внешняя обмотка на основе $NbTi$ [17]. В апертуре диаметром 50 мм планируется получить магнитное поле 9 Т при температуре 1,7 К.

На 1997 г. в Техаском университете намечены испытания Nb_3Sn -дипольного магнита, рассчитанного на поле 16 Т [18]. Прототип дипольного магнита длиной 1 м на основе интерметаллического соединения Nb_3Sn испытан в Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) [19]. После “тренировки” магнита, которая составляла 40 переходов СП-обмотки в нормальное состояние, в 5-см апертуре было достигнуто магнитное поле 13,5 Т при температуре 1,8 К.

Как отмечено в [20], это достижение перекрывает рекорд в 11,03 Т, установленный в 1995 г. на метровой модели СП-диполя с апертурой 50 мм, изготовленной Twente University (Netherlands) и испытанной в ЦЕРНе. Обмотка диполя LBNL подвергалась отжигу при температуре 950 К в течение 10 дней, в процессе которой ультратонкие нити Nb химически взаимодействовали с оловом. Такая методика изготовления магнита вызвана хрупкостью Nb_3Sn после отжига. Большим преимуществом $NbTi$ является пластичность при операциях экструзии и намотки катушек.

В работе [21] рассмотрены варианты СП-магнитов для мюонного коллайдера, проект которого обсуждается в настоящее время. Сейчас параметры ЛНС определены, и в стадии обсуждения ускорительно-накопительных установок на высокие энергии находятся два проекта: мюонный коллайдер [22] и VLNS [23]. Последний проект рассчитан на использование протяженного кольца (длиной ~ 1000 км) с отклоняющими магнитами, создающими поля менее 2 Т.

В качестве прототипа такого магнита рассматриваются СП-магниты нуклотрона (рис. 3) [24]. Дипольные магниты нуклотрона типа “конной рамы” создают магнитное поле ~ 2 Т, которое формируется в основном холодным ярмом. Плоская СП-обмотка служит для намагничивания ярма, прямоугольная форма которого определила название “оконная рама”. В данном случае не требуется особой формы полюсов и почти во всем пространстве между обмотками поле достаточно хорошее, однако топография магнитного поля зависит от расположения обмоток.

Магнитная система нуклотрона, имеющего периметр ~ 252 м, включает 96 дипольных магнитов длиной 1,5 м. Использование трубчатого СП-кабеля упрощает конструкцию криостата и облегчает доступ к магнитной системе ускорителя. Полная охлаждаемая масса составила 80 тонн. Магнитная система с “холодным” железным ярмом и трубчатыми СП-обмотками охлаждается потоком двухфазного гелия. Все 160 магнитов нуклотрона запитаны параллельно от системы криогенного обеспечения, которая содержит три ожижителя гелия полной холодопроизводительностью 4,8 кВт при 4,5 К. Можно отметить, что это на порядок меньшая величина по сравнению с мощностью криогенной системы LEP2.

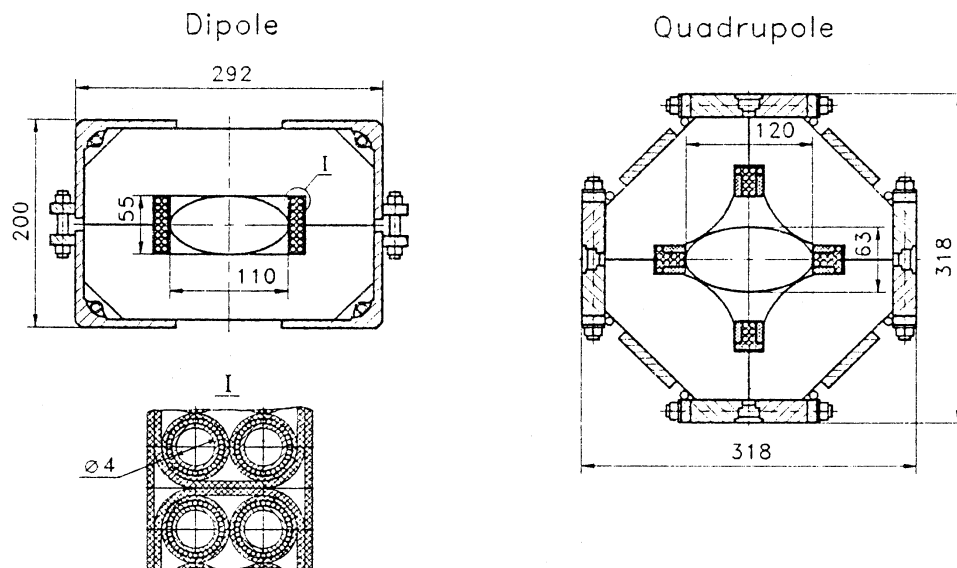


Рис. 3. Поперечное сечение дипольных и квадрупольных СП-магнитов “Нуклотрона” (ОИЯИ).

Заманчивой представляется перспектива использовать высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) для обмоток магнитов, но технологические трудности и высокая цена осложняют их использование в настоящее время. В обзоре [25] рассматривается возможность применения ВТСП-материалов в магнитах ускорителей. В настоящее время ВТСП-материалы используются как тоководы для снижения теплопритоков в низкотемпературную зону, а как обмотки в реальных магнитах не используются из-за хрупкости. Поэтому рассмотрим имеющийся низкотемпературный СП-материал как основу для создания магнитов.

Конструкция СП-кабеля

Технология изготовления многоволоконного ниобий-титанового провода и основные параметры традиционных СП-материалов достаточно подробно описаны, например в [26].

Разработанный для ускорительных магнитов композит, как правило, представляет сложную конструкцию: проволока (диаметром ~ 1 мм), содержит свыше 10^4 скрученных жил NbTi, окруженных барьером и размещенных в медной матрице. Единичная проволока способна нести ток 500 А в поле 5 Т (при 4,2 К), а так как магниты для ускорителей рассчитываются на ток обмотки 5-10 кА, то применяется кабель, полученный скруткой проволок с последующей формовкой и нанесением изоляции.

Практически во всех дипольных СП-магнитах используется кабель резерфордовского типа: несколько проволок (от 19 до 36) скручиваются и затем формуются

в виде плоского двухслойного кабеля. Транспонирование проволок в кабеле применяется для того, чтобы уменьшить вихревые токи и обеспечить равномерное распределение токов. В табл. 2 приведены некоторые параметры СП-кабеля, используемого в обмотках диполей больших ускорителей.

Таблица 2. Параметры NbTi-кабеля для ускорителей.

№	Ускоритель	Диаметр нити [мкм]	Ширина кабеля [мм]	Шаг скрутки [мм]	Покрытие проволок
1	Tevatron(USA)	6	7,8	66	”зебра”
2	HERA (FRG)	14-16	10	95	<i>AgSn</i>
3	RHIC (USA)	6	9,7	73	<i>Cu</i>
4	ISABELLE (USA)	10	17	110	<i>AgSn</i>
5	УНК-II (Россия)	6	8,5	62	“зебра”
6	SSC (USA)	6	12,3	79	<i>Cu</i>
7	LHC (CERN)	7	15	115	не решено

Тонкие СП-нити и низкая намагниченность обмотки необходимы при формировании магнитного поля, особенно при инжекции заряженных частиц, осуществляемой при низком уровне магнитного поля. Для этих целей предпочтительней иметь СП-нити диаметром 5-10 мкм, которые можно экономно производить в фабричных условиях без разрушения и дефектов по длине. СП-нити меньшего размера могут приводить к связи волокон через медную матрицу из-за близости расположения. В поле 6 Т NbTi-нити толщиной 6 мкм способны нести ток около 50 мА и композитная проволока, содержащая от 5 до 10 тысяч таких нитей, обладает токнесущей способностью в 500 А.

Параметры СП-кабеля определяются характеристиками проволоки, и в процессе изготовления проводника следует руководствоваться следующими требованиями. Критическое поле и температура зависят от химического состава материала, поэтому в процессе изготовления необходимо контролировать стехиометрический состав сплава. Критический ток определяется микроструктурой материала (размерами и распределением центров пиннинга) и зависит от промежуточных отжигов и механической нагрузки в процессе волочения проволоки.

Для криогенной стабилизации СП-жилы размещаются в медной матрице, что снижает конструктивную плотность тока в магните. Для предотвращения скачков потока в сверхпроводнике, диаметр СП-жил должен быть менее 50 микрон, а для уменьшения гистерезисных потерь и искажения магнитного поля за счет намагниченности диаметр СП-жил должен находиться в интервале 5-10 микрон. С целью уменьшения вихревых потерь жилы должны скручиваться (типичный шаг скрутки составляет 25 мм).

Успех в создании СП-кабеля для дипольных магнитов позволил использовать этот материал для обмоток детекторов, которые кратко рассмотрим ниже.

СП-соленоиды для детекторов больших ускорителей со встречными пучками

Для детектирования и анализа заряженных частиц, рожденных при столкновении встречных пучков, необходимы магнитные поля в большом объеме. Детекторы заряженных частиц обычно размещают в магнитном поле, чтобы по кривизне треков получить сведения об импульсе и заряде частиц. Одним из первых детекторных СП-магнитов для встречных пучков был Pluto, созданный в 1972 г. Магнит был расположен в одной из точек пересечения пучков $e^+ - e^-$ накопителя DESY. Проводник обмотки на основе $NbTi$ полностью стабилизирован медью (радиационная толщина обмотки $\chi = 4 \chi_0$).

Для уменьшения фона, возникающего при взаимодействии частиц с деталями конструкции, на магните ISR, созданном в 1976 г. (CERN), матрица СП-шины была выполнена из алюминия высокой чистоты. Вакуумный кожух обечайки гелиевого сосуда был изготовлен из сплавов алюминия. За счет таких мер радиационная толщина обмотки χ составила $1,1 \chi_0$.

CELLO стал первым СП-соленоидом, разработанным *H. Desportes* с коллегами в Сакле специально для коллайдеров. Он дал начало новой технологии изготовления “тонких” соленоидальных СП-магнитов, основные параметры которых приведены в табл.3. Первое поколение “тонких” СП-соленоидов (CELLO, CLEO, TPS) содержало внутренний каркас из алюминиевого сплава. Затем СП-обмотки стали наматывать на временную оправку, которая удалялась из конструкции после намотки, что позволяло уменьшить массу материала в рабочей области.

Для соленоидов с большим диаметром апертуры была разработана технология “внутренней намотки” с помощью специального оборудования: намоточное устройство располагается внутри цилиндрического суппорта и укладывает СП-кабель на внутреннюю поверхность бандажа с гарантированным усилием. После укладки СП-обмотки производится полимеризация эпоксидной изоляции. Первым “тонким” соленоидом, изготовленным по такой технологии стал TOPAZ и последующие соленоиды третьего поколения (ALEPH, DELPHI и CLEO-II). Применение “внутренней намотки” делает возможным изготовление соленоидов диаметром до 10 м, длиной до 20 м.

С увеличением энергии пучков требуются все более крупные магниты для детекторов. Состояние работ по разработке СП-магнитов для детекторов рассмотрено в обзоре [27]. За последние годы технология изготовления СП-соленоидов была отработана настолько, что сейчас возможно промышленное производство таких магнитов. В качестве примера можно привести детектор Finuda, который разработан фирмой *Ansaldo* и содержит СП-соленоид, создающий магнитное поле в центре 1,1 Т с неоднородностью менее 5% в объеме 12 м^3 [28]. Двухслойная обмотка содержит 784 витка СП-кабеля длиной 1,8 км. Проводник $NbTi/Cu$ -кабеля резерфордовского типа запрессован в процессе экструзии в алюминиевую матрицу (чистота Al-99,996) размером $14,4 \times 6,03 \text{ мм}^3$. Соединение проводников осуществлено по способу, использованному ранее в конструкции соленоида ZEUS.

Таблица 3. Параметры “тонких” СП-соленоидов для детекторов.

Установка	Центр	Год пуска	Магн. поле [Т]	Диаметр аперт. [м]	Длина [м]	Запас. энергия [МДж]	Радиационная толщ. χ
CELLO	DESY	1978	1,5	1,5	3,42	7	0,5
CLEO	CORNELL	1981	1,5	1,92	3,15	9,4	0,75
TPS	SLAC	1983	1,5	2,0	3,4	10,9	0,75
CDF	FNAL	1984	1,5	2,86	5,07	30	0,86
TOPAZ	KEK	1984	1,2	2,72	5,4	19,5	0,70
VENUS	KEK	1985	0,75	3,4	5,64	12	0,52
CLEO II	CORNELL	1987	1,5	2,9	3,8	25	2,5
DELPHI	CERN	1987	1,2	5,2	7,4	109	4,0
H1	DESY	1994	1,2	5,2	5,75	120	1,2
ZEUS	DESY	1994	1,8	2,85	2,85	10,5	0,9

СП-катушка длиной 2,11 м и внутренним диаметром 2,92 м размещена внутри цилиндрического суппорта из Al-сплава с помощью специальной машины. Вес обмоток, суппорта и криостата составляет около 7,5 тонн (холодная масса — 4,7 т), а полный вес установки вместе с железным ярмом не более 300 т. Рабочий ток обмотки 2,8 кА, а запасенная энергия 7,9 МДж.

Можно отметить, что конструкция магнита Finuda “фабрики” DAΦNE изготовлена по традиционной технологии и вписывается в ряд “тонких” СП-соленоидов для экспериментов на встречных пучках [27].

Основные кольца установки DAΦNE оснащены магнитными элементами на 50%, и сейчас идет сборка оборудования, завершение которой запланировано на 1997 г. Криогенное оборудование, предназначенное для двух больших экспериментов, включает 4 сверхпроводящих соленоида и будет смонтировано летом 1997 г., что не ограничивает сроки испытания основного оборудования, которое может работать без СП-элементов.

Интересно сравнить два центра — Новосибирский ИЯФ и Фраскати, в котором сооружение идет по планам, но “цеха” Ф-фабрики изготовлены в других местах, и сборка машины напоминает складывание кубиков. Эксперименты в ИЯФ проводятся на собственных установках и детекторы создаются своими силами. Для запитки СП-соленоидов детектора КМД-2 используется СП-преобразователь, содержащий СП-трансформатор и тепловые СП-ключи (криотроны) [29]. Первичная обмотка СП-трансформатора запитывается током 40 А, что позволяет получить с помощью СП-преобразователя (насоса магнитного потока) номинальное значение тока магнитной системы 1,2 кА.

Оригинальна паяная конструкция магнита детектора КМД-2: два СП-кабеля ($NbTi$ в медной матрице) уложены в винтовую канавку, проточенную в каркасе из нержавеющей стали, и припаяны к нему мягким припоем. В данном случае припой шунтирует СП-кабель при переходе в нормальное состояние и тем самым

защищает обмотку от разрушения. Индуктивность однослойной обмотки основного СП-соленоида составляет 0.2 Гн, а компенсирующей обмотки — 1,3 мГн. Диаметр основной обмотки 70 см, длина ~ 91 см. Рабочее магнитное поле 1 Т, а радиационная толщина обмотки и криостата $\chi \sim 0,4 \chi_0$.

В настоящее время идет проектирование установок ALICE, ATLAS, CMS, LHC-B и FELIX, предназначенных для будущих экспериментов на LHC. Отметим, что коллаборация ATLAS [30] включает свыше 1600 участников из 148 институтов более чем 30 стран. Мюонный спектрометр ATLAS содержит три больших тороида, магнитное поле которых перпендикулярно траектории мюона. Каждый тороид содержит обмотки типа “racetrack”, изготовленные из СП-кабеля и расположенные симметрично относительно траектории пучка. Детектор CMS (*Compact Muon Solenoid*) [31] содержит большой СП-соленоид, который генерирует постоянное магнитное поле индукцией 4 Т на длине ~ 13 м в объеме радиусом около 3 м.

FELIX [32], [33] может стать первым детектором, готовым для работы в адронном коллайдере LHC. Для создания магнитного поля планируется использовать соленоид ALEPH, а для проводки пучка — СП-диполи с большой апертурой, разработанные в BNL для RHIC, и прототипы диполей УНК с “холодным железом”.

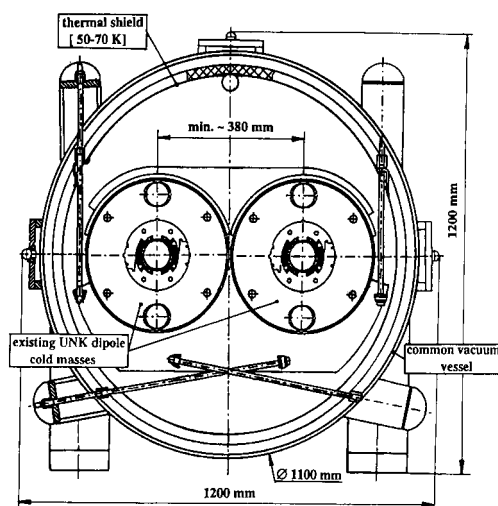


Рис. 4. СП-диполи УНК для проводки адронного пучка к установке FELIX.

Два СП-диполя УНК (рис. 4) планируется разместить в одном общем криостате таким образом, что минимальное расстояние между их центрами составит 38 см. Общим для двух магнитов будет криостат и тепловой экран на температурном уровне 50-70 К, но ярмо обратного потока будет индивидуальным в отличие от СП-диполей LHC (конструкция “два в одном”). Планируется, что BNL изготовит СП-диполи с апертурой 18 см, рассчитанные на поле 4.29 Т (для FELIX достаточно поле 3.62 Т).

Многоцелевая установка FELIX предназначена как для работы на LHC, так и для наблюдения за мюонами и нейтрино в космических лучах. С учетом имеющегося оборудования стоимость создания установки FELIX составит около 10% затрат на создание ATLAS или CMS [32]. Техническое предложение по созданию этой установки должно быть подготовлено в 1998 году.

Заключение

Разработка новых ускорителей основана на использовании явления сверхпроводимости как для формирования “магнитной дорожки” (отклоняющие и фокусирующие СП-магниты) и ускорения заряженных частиц (с помощью СП-резонаторов), так и для целей детектирования частиц. Применение СП-кабеля в обмотках крупных магнитов позволяет получить требуемое поле в большом объеме и снизить затраты на эксплуатацию. Целью рассмотрения состояния дел было выявить тенденции развития СП-магнитов для ускорителей и дать текущие параметры и контрольные цифры.

Список литературы

- [1] Perin R. Superconducting Magnets. *Preprint CERN AT/95-10 (MA) LHC Note 319* (Geneva, Switzerland, 1995)
- [2] Wilson M.N. Superconducting Magnets for Accelerators: a Review. *LHC Project Report 58* (Geneva, Switzerland, 1996)
- [3] Superconductivity in particle accelerators. *CERN 89-04* (Proceedings CAS CERN Accelerator School, Editor: S.Turner) (Geneva, 1989).
- [4] Superconductivity in particle accelerators. *CERN 96-03* (Proceedings CAS CERN Accelerator School, Editor: S.Turner)(Geneva, 1996).
- [5] Anerella M.D., Fisher D.H., Sheedy E. et al. In: *Proc. IEEE Transaction On Magnetism* (Ed. Ron B.Goldfarb). Vol.32, № 4, p.2059, July 1996.
- [6] Greene A., Anerella M.D., Cozzolino J. et al. – In: *Proc. IEEE Transaction On Magnetism* (Ed. Ron B.Goldfarb). Vol.32, № 4, p.2041, July 1996.
- [7] Адо Ю.М., Логунов А.А., Мязэ Э.А. и др. Ускорительно-накопительный комплекс на энергию 2 ТэВ. – В сб.: *Труды третьего Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т II. Изд-во “Наука”, 1973* (Отв. ред. А.А.Васильев), Москва, 1973, с.275.
- [8] Ageev A.I., Andreev N.I., Balbekov V.I. et al. Results on Testing Pilot Industrial Batch of SC Magnets for the UNK. In: *Proceeding of the Third European Particle*

- Accelerator Conference (EPAC 92)*. Vol.2 (Ed. H.Henke, H.Homeyer and Ch.Petit-Jean-Genaz) (IOP Publishing, UK-Bristol BSI 6NX Spinger Verlag, 1992), p.1411.
- [9] CERN, European Organisation for Nuclear Research.: The Large Hadron Collider, Conceptual Design, CERN 91-03, Geneva, 1991.
- [10] Perin R. State of the LHC Main Magnets. *Preprint CERN, LHC Project Report 108* (Geneva, Switzerland, 1997).
- [11] Bona M., Perin R., Vlogaert J. The LHC Magnet System and Its status of Development. *Preprint CERN AT/94-22 (MA) LHC Note 269* (Geneva, Switzerland, 1994).
- [12] Lebrun Ph. Helium Cryogenic Systems for the LEP2 and LHC Project at CERN. *Preprint CERN, LHC/96-05 (ACR)* (Geneva, Switzerland, 1996).
- [13] Lebrun Ph. Superfluid Helium as a Technical Coolant. *Preprint CERN, LHC Project Report 125* (Geneva, Switzerland, 1997).
- [14] Fedorov A.V., Shelaev I.A. Numerical optimization of actively screened SC-magnets coil geometries. *JNR Rapid Communications №6/80]-96* с.63 (Дубна, 1996).
- [15] Tsuchiya K., Ohuchi N., Kobayashi T.M. et al. Development and Test Result of the Prototype Active Shield Dipole Magnets for the KEK B-Factor. *IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 32, № 4, 1996*, p.2120.
- [16] Koski A. and Wipf S.L. Computation design Study for an Accelerator Dipole in the Range of 15-20 T. *IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 32, № 4, 1996*, p.2159.
- [17] Caspi S., Chow K. et al. Design and Construction of a Hybrid $-Nb_3Sn, NbTi$ -Dipole Magnet. *IEEE Trans. on Applied SC (ASC'96), Vol. 7, № 2, June 1997*, p.727.
- [18] Elliott T., Jasle A. et al. 16 Tesla Nb_3Sn -Dipole Development at Texas University *IEEE Trans. on Applied SC (ASC'96), Vol. 7, № 2, June 1997*, p.555.
- [19] Scanlan R et al. Physics Today, August 1997.
- [20] BERKELEY. New dipole record. CERN COURIER, Vol.37, № 8, October 1997, p.17.
- [21] Green M.A. et al. SC-Dipoles and Quadropoles for a 2 TeV Muon Collider. *IEEE Trans. on Applied SC (ASC'96), Vol. 7, № 2, June 1997*, p.743.
- [22] Neuffer D.V. Acceleration to Collisions for the $\mu^+\mu^-$ Collider *Preprint Fermilab-Conf-96/010*, Batavia, 1996.

- [23] Foster G.W. and Malamud E. Low-Cost Hadron Colliders at Fermilab. a Discussion Paper. *Preprint Fermilab-TM-1976*, Batavia, 1996.
- [24] Baldin a.M. et al. How a 100 TeV Synchrotron/Collider Based on the Nuclotron-Type Cryomagnetic System Would Look. *Preprint JINR E9-96-343* Dubna, 1996.
- [25] Hirabayashi H. Status of High Temperature Superconductor Development for Accelerator Magnets. *Preprint KEK-94-75* Japan, 1994.
- [26] Wilson M.N. Superconducting Magnets. *Clarendon Press. Oxford-1983*
- [27] Yamamoto A. and Makida Y. Advances in Thin Superconducting Solenoid Magnets for the Colliding-Beam Experiments. *Preprint KEK-96-137* Japan, 1996.
- [28] Losasso M., Penco, Fabbri F.L. et al. Design and status of construction of Finuda superconducting Aluminium stabilised detector. In: *Proc. IEEE Transaction On Magnetism* (Ed. Ron B.Goldfarb). Vol.32, № 4, p.2171, July 1996.
- [29] Ахметшин Р.Р., Барков Л.М., Журавков И.В. и др. Сверхпроводящий преобразователь для запитки магнитной системы детектора КМД-2. *Препринт ИЯФ, 96-86* Новосибирск, 1996.
- [30] The ATLAS Technical Proposal. CERN/LHCC/94-43, Geneva, 15 December 1994.
- [31] The Compact Muon Solenoid Technical Proposal. CERN/LHCC/94-38, Geneva, 15 December 1994.
- [32] FELIX A full acceptance detector at the LHC. Letter of Intent. CERN/LHCC 97-45, LHCC/110, Geneva, August 1997.
- [33] Around the Laboratories: CERN. Physics FELIX. CERN COURIER, Vol.37, № 8, October 1997, p.9.

Рукопись поступила 23 декабря 1997 г.

Л.С.Ширшов

Сверхпроводящие магниты в ускорителях.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Н.В.Ежела.

Подписано к печати 24.12.97. Формат $60 \times 84/8$.

Офсетная печать. Печ.л. 2,4. Уч.-изд.л. 1,8. Тираж 150. Заказ 19.

Индекс 3649. ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

