

Сверхпроводящий дипольный магнит с повышенной передаточной функцией

Л.М. Васильев, В.И. Гридасов, С.С. Козуб, К.П. Мызников,
П.И. Слабодчиков, В.В. Сытник, Л.М. Ткаченко, С.В. Трофимов
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Введение

В проекте “Ускорение поляризованных протонов в Теватроне” [1] предлагается заменить в регулярной части магнитной структуры небольшое количество поворотных магнитов с полем 4,4 Тл на систему “сибирских змеек”. Для сохранения интегральной величины угла поворота необходимо в этом случае заменить часть диполей с полем 4,4 Тл на диполи с более высоким полем. Из практических соображений для таких магнитов было выбрано поле 6 Тл в центре апертуры при величинах номинального тока, скорости нарастания и спада тока таких же, как в Теватроне (4400 А и 220 А/с соответственно).

На основе конструкции СП–диполей УНК [2] и при использовании существующего технологического оборудования в ИФВЭ была разработана и изготовлена модель СП–диполя, удовлетворяющая поставленным требованиям. В настоящем докладе представлены описание конструкции и результаты испытаний модели СП–диполя в погружном режиме охлаждения.

Конструкция модели СП–диполя

Основные параметры СП–магнитов Теватрона, УНК [1, 2], а также требуемые параметры проектируемой модели диполя приведены в табл.1.

Таблица 1:

Параметры магнита	Теватрон	УНК	Требуемые
Номинальное поле, Тл	4.4	5.11	6.0
Номинальный ток, кА	4.4	5.25	4.4
Скорость нарастания тока, А/с	220	120	220
Рабочая температура, К	4.6	4.6	4.6
Внутренний диаметр обмотки, мм	76.2	80	>76.2
Передаточная функция B/I , Тл/кА	1.0	0.98	1.364
Скорость изменения поля, Тл/с	0.28	0.11	0.28

При расчете и проектировании модели СП–диполя особое внимание было уделено тому, чтобы при изготовлении модели максимально использовать оборудование и оснастку, использовавшиеся при изготовлении СП–диполей УНК.

Обмотка модели состоит из двух слоев, причем ряд геометрических параметров сохранены такими же, как и для СП–диполей УНК. В частности, были фиксированы внутренний радиус и толщина слоев, толщина медианных и межвитковых прокладок, геометрические размеры магнитопровода. Для достижения необходимой величины передаточной функции увеличено число витков в слоях за счет уменьшения

толщины витка. Были проанализированы несколько вариантов поперечного сечения обмотки с отличающейся толщиной витков. При этом подавление основных нелинейностей магнитного поля в апертуре производилось оптимизацией положения межвитковых прокладок и наружных углов слоев.

В результате проведенных расчетов была выбрана геометрия поперечного сечения, представленная на рис.1. Там же представлена лобовая часть (вид сверху). В скобках приведены для сравнения угловые размеры элементов обмотки магнитов УНК.

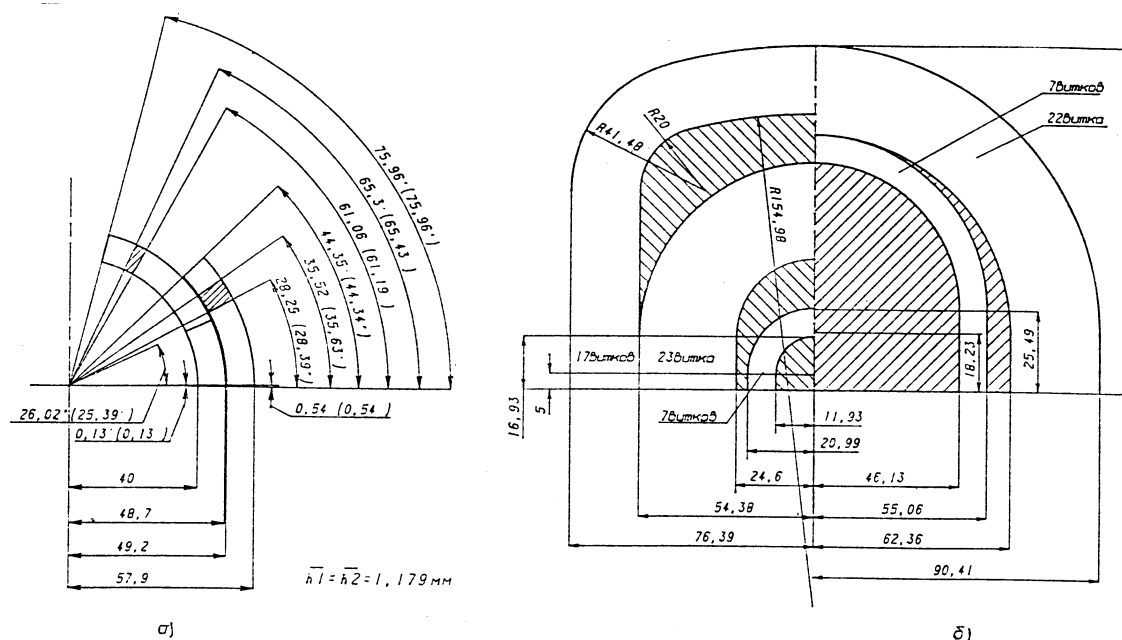


Рис. 1: Геометрия обмотки модели магнита ФНАЛ. (а) — поперечное сечение, (б) — лобовая часть (вид сверху).

Данным размерам и числам витков соответствует кабель трапецеидального сечения шириной 8,7 мм и толщиной по средней линии 1,179 мм (с учетом изоляции) для обоих слоев обмотки. Изоляция кабеля, как и в магнитах УНК, состоит из полиимидной пленки толщиной 0,02 мм, намотанной вполнахлеста, и стеклоленты номинальной толщины 0,1 мм, уложенной в разрядку с зазором 2 мм.

Указанным выше геометрическим размерам, а также близким к оптимальным значениям величины деформации СП-проволок и коэффициента упаковки, взятым из опыта изготовления кабеля для магнитов УНК, удовлетворяет кабель, изготовленный из 26 проволок диаметром 0,61 мм. Провод такого диаметра был изготовлен из провода УНК диаметром 0,85 мм дополнительной протяжкой. После протяжки опытной партии на нескольких образцах, взятых из разных партий исходного провода, были проведены измерения его токонесущей способности. Результаты измерений показали, что критическая плотность тока (средняя по всем образцам) после протяжки возросла на 15% в поле 6 Тл и на 30% — в поле 7 Тл.

Выбранная расчетная модель магнита удовлетворяет предъявленным требованиям по передаточной функции и качеству магнитного поля и имеет запас по критическому току около 20%. При этом конструкция обмоточных блоков модели магнита для

ФНАЛ и магнита УНК по существу одинаковы. Как видно из рис.1а, отличия в геометрических размерах малы, что позволило использовать для изготовления модели магнита для ФНАЛ технологические процессы и оснастку, разработанные для магнитов УНК, с небольшой доработкой приспособлений для транспортирования, формовки и измерения размеров кабеля.

Результаты испытаний модели

Модель СП-дипольного магнита для ФНАЛ была испытана в погружном режиме охлаждения при температуре 4,2 К. Результаты тренировки магнита представлены на рис.2а. В магните достигнут ток короткого образца СП-кабеля, но в результате длительной тренировки. Длительный характер тренировки объясняется недостаточной величиной прелоуда в обмотке из-за того, что размер кабеля при формовке получился несколько меньше номинального. К сожалению, мы не имели возможности изготовить еще одну модель и увеличить прелоуд до требуемой величины (около 1000 кг/см^2). Для этого достаточно слегка увеличить размер кабеля при его формовке, оставляя коэффициент упаковки в пределах его оптимального значения.

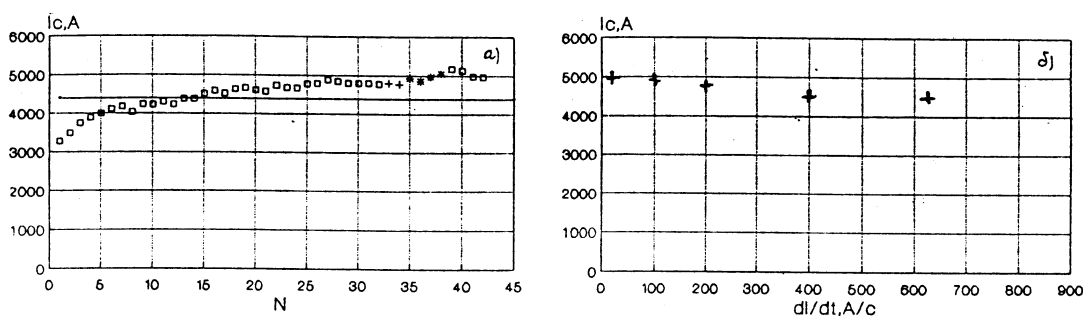


Рис. 2: Кривая тренировки (а) и скоростная характеристика модели (б).

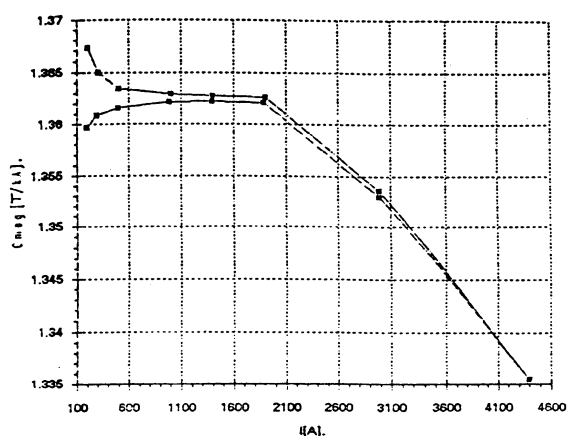


Рис. 3: Зависимость передаточной функции от тока.

Уменьшение передаточной функции при токе 4,4 кА составляет 2%, что согласуется с результатами расчета, учитывающего насыщение

Зависимость критического тока от скорости ввода тока в магнит представлена на рис.2б. Видно, что до скорости 600 А/с значение критического тока остается выше номинального тока магнита. Характеристика имеет пологий характер, что говорит о небольших динамических тепловыделениях и хорошем охлаждении магнита. Зависимость магнитного поля диполя от тока в обмотке (передаточная функция магнита, C_{mag}) измерялась с помощью датчика ядерного магнитного резонанса. Точность измерений 1×10^{-5} . Результаты измерения $C_{mag}(I)$ в центральном сечении

магнитного экрана. При токе около 1 кА была измерена величина магнитного поля вдоль оси диполя. Поле на оси диполя в пределах центральной части (± 190 мм) однородно с точностью 4×10^{-4} .

Измерение нелинейностей магнитного поля было проведено методом гармонического анализа. Измерительная катушка длиной 150 мм помещалась в центральной части диполя. Точность измерения нелинейностей до 6-го порядка включительно составляла 1×10^{-4} . Радиус нормализации 35 мм. Величина незаконных нелинейностей не превышает 5×10^{-4} . Законные нелинейности (b_{2k-1} , $k = 2, \dots, 5$) измерялись при токах 2 – 3 кА и с точностью 5×10^{-4} совпадают с расчетными значениями.

Заключение

Разработана конструкция и изготовлена модель СП–дипольного магнита для проекта ускорения поляризованных протонов ФНАЛ. Испытания этой модели показали, что заданные параметры (критический ток, скоростная характеристика, передаточная функция) достигнуты. Магнитное поле в апертуре отличается высокой однородностью. Длительность тренировки может быть значительно сокращена за счет увеличения прелоуда в СП–обмотке.

Полученные результаты говорят о том, что существующий в ИФВЭ СП–проводник, оборудование для производства СП–магнитов и стенды для их испытания позволяют изготовить СП–дипольный магнит с заданными параметрами для проекта ускорения поляризованных протонов ФНАЛ.

Список литературы

- [1] Progress Report "Acceleration of Polarized Protons to 1 TeV in the Fermilab Tevatron". SPIN Collaboration, August 1, 1994.
- [2] A.Ageev et al. "Results on Testing Pilot Industrial Batch of SC Magnets for the UNK". EPAC–92. — Berlin, 24–28 March, 1992, V.2, p.1411.