

# Динамические потери в железном ярме сверхпроводящих магнитов УНК

И.В. Богданов, П.А. Щербаков  
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

## Введение

Одним из основных источников тепловыделений в СП-магнитах являются гистерезисные и вихревые потери в обмотке и ферромагнитном экране. Гистерезисные потери состоят из потерь на перемагничивание в сверхпроводящих жилах и потерь в материале железного экрана. Экспериментально разделить эти две составляющие в магнитах практически невозможно. На практике это делалось следующим образом: измерялись гистерезисные потери в одном магните без железного ярма и с ярмом. Распределение магнитного поля в обмотке в этих случаях существенно отличается, но может быть рассчитано.

По известным моделям [7] определяются гистерезисные потери в обмотке без железного экрана и сравниваются с измеренными. Удовлетворительное совпадение результатов позволяет предсказывать потери в обмотке магнита с железным экраном. Разница между суммарными гистерезисными потерями, определенными экспериментально и рассчитанными в обмотке, приписывается потерям в ферромагнитном экране. С другой стороны, зная распределение магнитной индукции в ярме и свойства материала, можно рассчитать тепловыделения в экране.

В работах [8] и [9] приводятся результаты измерений и расчетов потерь на переменном токе в моделях СП-диполей для SSC. Гистерезисные потери в двухполярных циклах превышают потери в однополярных более чем в два раза, что не может быть объяснено потерями в сверхпроводнике. Результат можно объяснить, с нашей точки зрения, именно многократным увеличением потерь в экране в двухполярных циклах, как будет показано ниже.

В этой работе приводятся результаты измерений магнитных свойств материала ярма при 4,2 К и результаты расчета гистерезисных тепловыделений в ферромагнитном экране СП-диполей УНК в однополярном и двухполярном режимах.

## 1. Материал ферромагнитного ярма

Холодный экран моделей СП-диполей УНК изготавливался из низкоуглеродистой электротехнической листовой стали марки 2081 толщиной 2 и 3 мм. Сталь имеет следующий химический состав ( в весовых %):

$$C < 0.01; Si < 0.05; S < 0.01; Mn < 0.2; P < 0.015; Al < 0.1; Cr < 0.01.$$

Минимальное количество углерода обеспечивает после оптимального для данного производства заключительного отжига минимальную коэрцитивную силу, а небольшое количество кремния и других элементов обеспечивает максимальную намагниченность насыщения  $M_{нас}$  и ее приемлемый разброс. Свойства стали толщиной 3 мм частично представлены в работе [4].

## 2. Методики измерений и образцы

Для снятия коммутационных кривых электротехнической стали при температурах 300; 77; 4,2 К используется аппаратура, аналогичная описанной в работах [1] и [2], и образцы в

виде колец прямоугольного сечения, на которые наматывались измерительная и намагничивающая обмотки. Намагничивающая обмотка запитывается от двухполярного стабилизированного источника тока. Частота треугольных циклов изменения тока составляет 0,005–1 Гц. Максимальная напряжённость магнитного поля, достигаемая в материале, составляет 25–50 кА/м в зависимости от количества витков. Сигнал с измерительной обмотки после интегрирования пропорционален магнитной индукции. Из полученных гистерезисных петель определяются точки коммутационной кривой  $B_{max}(H_{max})$ , величина тепловых потерь при перемагничивании  $W$ , остаточная намагниченность  $M_r$  и коэрцитивная сила  $H_c$ . Для определения статических характеристик снимается частотная зависимость этих величин вплоть до частоты 0,005 Гц.

Намагниченность насыщения  $M_s$  определялась с помощью аппаратуры, описанной в работе [3].

### 3. Магнитные свойства электротехнической стали

Основными характеристиками магнитомягких материалов, к которым относится электротехническая сталь, являются максимальная проницаемость, определяемая из коммутационной кривой  $B(H)$ , коэрцитивная сила  $H_c$ , остаточная намагниченность  $M_r$ , намагниченность насыщения  $M_s$ , а также тепловыделения при определенных индукциях и частотах.

Коммутационная кривая электротехнической стали 2081 толщиной 2 мм при комнатной температуре представлена на рис.1. Максимальная проницаемость превышает 3000, коэрцитивная сила составляет 140 А/м, а остаточная намагниченность — 1,0 Тл. Намагниченность насыщения, измеренная при температуре 4,2 К, равна 2,18 Тл.

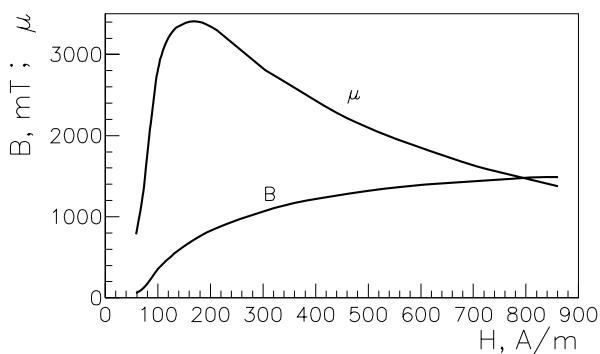


Рис. 1: Зависимость магнитной индукции и проницаемости от напряженности магнитного поля.

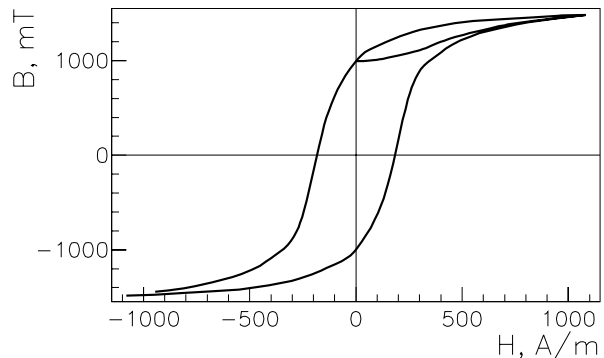


Рис. 2: Симметричная и однополярная петли гистерезиса.

На рис.2 показаны симметричная и однополярная гистерезисные петли, из которых определяются характеристики материала. Площади петель пропорциональны суммарным тепловыделениям. Частотные зависимости тепловыделений для ряда амплитуд в симметричных циклах представлены на рис.3. Из этих зависимостей определялись гистерезисные потери в единице объема или веса.

На рис.4. представлены зависимости гистерезисных тепловыделений в однополярных и двухполярных циклах от максимальной магнитной индукции в материале при температуре 4,2 К. Видно, что потери в двухполярных циклах многократно превышают потери в однополярных. При индукциях, больших 1,8 Тл, потери в однополярных циклах заметно насыщаются.

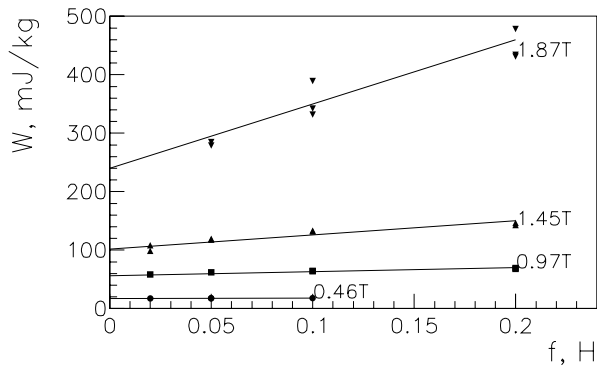


Рис. 3: Частотные зависимости удельных тепловыделений.

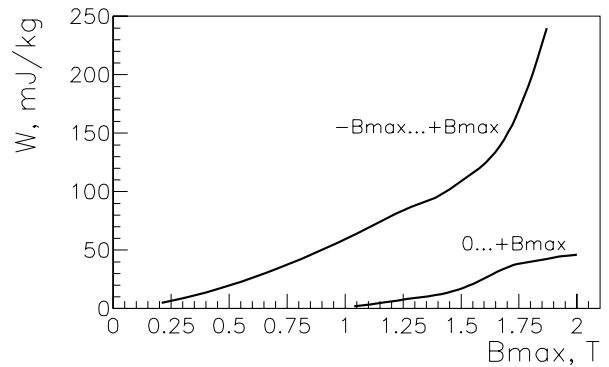


Рис. 4: Зависимости удельных тепловыделений в симметричных и однополярных циклах.

#### 4. Расчет гистерезисных тепловыделений в ярме

Поперечное сечение сверхпроводящего диполя УНК приведено во многих работах, например в [6]. Магнитный экран набирается из полуярм, изготовленных из электротехнической стали с помощью прецизионной штамповки. В моделях СП-диполей на разных этапах использовались стали различных марок толщиной от 1,5 до 3 мм. Вес одного метра экрана равен 580 кг. Расчет гистерезисных потерь в ярме заключается в численном интегрировании по объему удельных тепловыделений, зависящих от максимальной индукции в данном элементе объема. При этом для определенного тока в обмотке, соответствующего центральному полю в диполе  $B_0$  с помощью программы POISSON определялось распределение магнитной индукции по сечению ферромагнитного ярма. Далее по экспериментальным зависимостям удельных тепловыделений от магнитной индукции (рис.4), рассчитывались гистерезисные потери в однополярных и двухполярных циклах для определенных амплитуд центрального поля.

Результаты расчетов приведены на рис.5. Видно, что в полномасштабном шестиметровом магните расчетные гистерезисные потери в экране при температуре 4,2 К составляют 120 Дж в цикле 0 – 5 Тл – 0.

#### 5. Сравнение расчета с экспериментом

Гистерезисные потери в полномасштабных СП-диполях УНК составляют среднюю величину около 540 Дж в цикле 0 – 5 Тл – 0 [10]. Гистерезисные потери в сверхпроводящей обмотке, рассчитанные по методике, изложенной в работе [7], составляют 400 Дж в том же цикле. Таким образом, реальные потери в ярме могут составлять порядка 140 Дж, что близко к полученной в данной работе величине.

Ранее в работе [4] приводились оценки гистерезисных тепловыделений в ярме СП-диполей, превышающие приведенные в данной работе. Это связано с тем, что ранее использовались данные для материала с большей коэрцитивной силой, и распределение магнитной индукции по сечению ярма учитывалось с меньшей точностью.

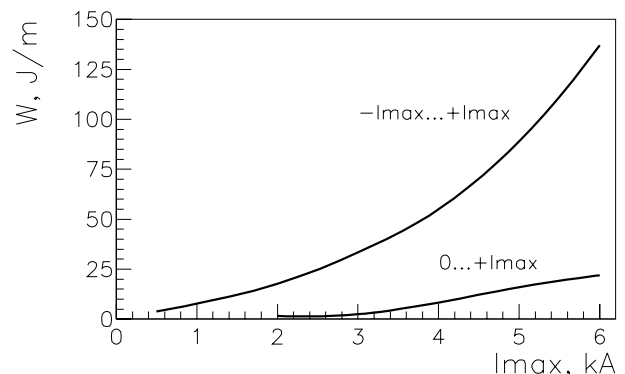


Рис. 5: Зависимости тепловыделений в магните от тока для однополярных и двухполярных режимов.

Следует также заметить, что в работах [8] и [9] предполагалось, что в однополярных циклах СП-диполей SSC гистерезисные потери в ярме пренебрежимо малы в то время, как для магнитов УНК полученное значение составляет существенную часть общих тепловыделений.

### Список литературы

- [1] Прийма М.В. и др. — Препринт ИФВЭ 87-59, Серпухов, 1987.
- [2] Антоничев Г.М. и др. — Препринт ИФВЭ 88-132, Серпухов, 1988.
- [3] Байдаков А.Н. и др. — Препринт ИФВЭ 89-59, Серпухов, 1989.
- [4] Байдаков А.Н. и др. Исследование магнитных свойств нержавеющей и электротехнической сталей при низких температурах для СП-магнитов УНК. — Препринт ИФВЭ 92-77, Протвино 1992.
- [5] Байдаков А.Н. и др. Исследование динамических потерь в моделях СП-диполей УНК с холодным магнитным экраном. Препринт ИФВЭ 89-26, Серпухов 1989.
- [6] Агеев А.И. и др. Исследование сверхпроводящего дипольного магнита УНК. Препринт ИФВЭ 89-187, Серпухов 1989.
- [7] Васильев В.А. и др. Измерение и расчет динамических потерь в импульсном дипольном магните. Препринт ИФВЭ 79-161, Серпухов 1979.
- [8] Jayakumar R. et al. AC Losses in SSC High Energy Booster Dipole Magnets. IEEE Trans. on Magnetics, Vol 28, No.1., January 1992, (MT-12), pp.148-151.
- [9] Lamm M.J. et al. Bipolar and Unipolar Tests of 1.5 m Model SSC Collider Dipole Magnets at Fermilab. Conf. Rec.1991 IEEE Particle Accelerator Conference (San-Francisco, may,91), 2191(1991).
- [10] Мызников К.П. и др. Анализ результатов изготовления и испытаний 16-ти СП-диполей УНК опытно-промышленной партии. Отчет ОУНК, Протвино, 1991.