

# Измерение параметров прототипа дипольного магнита МЕВ (SSC)

В.Г. Заручейский, В.И. Спирков, А.Н. Шалунов, З.Н. Шарифуллин  
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Г.Л. Мамаев

Московский радио-технический институт, Москва, Россия

В работе приводятся результаты испытаний прототипа дипольного магнита МЕВ (SSC) различными методиками измерений: ядерного магнитного резонанса, преобразователями Холла, натянутых струн и вращающихся катушек. Дается краткое описание методик и оценка ошибок измерений.

## Введение

В соответствии с контрактом N211/1-93 с МРТИ испытания прототипа диполя МЕВ (длина магнита по железу 6.45 м, зазор 50.8 мм, радиус кривизны 371 м) были проведены по обширной программе, включающей все известные методики испытаний. А именно: метод ядерного магнитного резонанса (измерение индукции поля от тока, изменение поля вдоль осевой линии магнита), метод преобразователей Холла (измерение карты основного и рассеянного полей), метод натянутых струн (измерение отклоняющей силы магнита и неоднородности поля как функции тока), метод вращающихся катушек (измерения гармонического состава поля).

## 1. Метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР)

Использованный магнитометр ЯМР работал на принципе измерения поглощения высокочастотной мощности спиновой системой [1]. В качестве спин-детектора использована схема с источником тока. Диапазон измеряемых полей 0.1–1.9 Тл, рабочее вещество резина, количество съемных датчиков 5, точность измерений относительная  $5 \times 10^{-6}$ , абсолютная  $10^{-5}$ , соотношение сигнал-шум не менее 5 во всем диапазоне измерений, длина кабеля 25 м. Измерительный датчик перемещался в зазоре магнита вдоль осевой линии на специальной тележке.

На рис.1 приведены зависимость основного поля и передаточной функции магнита от тока, измеренные в четырех точках вдоль его оси. Разброс значений передаточной функции соответствует продольной неоднородности поля около 0.2%, что подтверждается измерениями зависимости основного поля от продольной координаты. Такие результаты при токе возбуждения 450 А (усредненное по всем измерениям поле  $B=0.18$  Тл) приведены на рис.2.

## 2. Измерения отклоняющей силы магнита

Измерения отклоняющей силы магнита были проведены методом перемещения в медианной плоскости одной натянутой проволоки (струны) на расстояние, измеренное с высокой точностью. Абсолютная точность измерений при этом определяется точностью измерения величины перемещения и точностью калибровки интегратора.

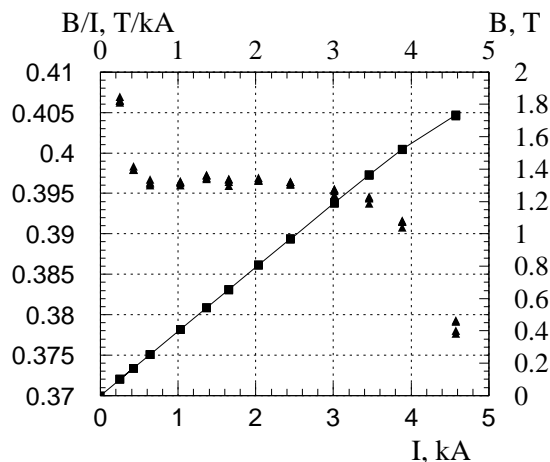


Рис. 1: Зависимость передаточной функции (1) и центрального поля (2) от тока питания.

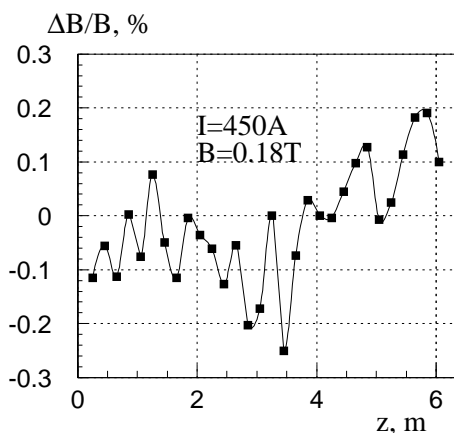


Рис. 2: Зависимость центрального поля от продольной координаты.

При радиусе нормализации поля 25.4 мм диапазон перемещений был выбран равным 20 мм. Величина перемещения измерялась преобразователями накопительного типа LID-300, аттестованными по интерферометру фирмы HEWLETT-PACKARD в институте ВНИ измерения, г. Москва. Точность измерения в диапазоне температур 20-30°C составила 1.6 мкм, что соответствует ошибке 0,008%. В основу работы интегратора заложен принцип преобразования напряжения в частоту с дальнейшим пересчетом числа импульсов на счетчике. Чувствительность интегратора составила  $(16.375 \pm 0.001)$  мкВ·сек, а точность измерений определилась температурной стабильностью интегратора и в диапазоне 20-30°C составила  $\pm 0.01\%$ . Неточность измерений, связанная с неоднородностью поля, легко учитывается, если предварительно измерить основную (секступольную) нелинейность.

Продолжительность процесса измерений определялась временем полного затухания колебаний струны длиной 7 м и составила 25 секунд. Постоянное смещение тракта струна+интегратор определялось дополнительным интегрированием в состоянии полного покоя струны. Дисперсия измерений в диапазоне 0.6-10 Тл·м составила  $\pm 0.02\%$ . Суммарную погрешность измерений отклоняющей силы магнита можно оценить величиной  $\pm 0.03\%$ . Результаты измерений отклоняющей силы магнита в зависимости от тока возбуждения приведены на рис.3. Там же приведена зависимость отклоняющей силы, нормированной на ток магнита.

### 3. Измерения неоднородности поля в магните

Неоднородность поля в зазоре магнита определялась из результатов измерений карты поля в магните методом преобразователей Холла (ПХ). Использовались преобразователи типа ПХЭ 602.817В. Отличительной особенностью этих преобразователей является малая величина температурных коэффициентов ЭДС Холла ( $0.001\%/K$ ) и остаточного напряжения ( $0.03$  мкВ/К), что позволяет использовать их в диапазоне температур 20-40°C без термостабилизации при точности измерений поля 0.05%. Калибровка ПХ проведена по ЯМР в диапазоне от -2 до 2 Тл. Калибровочная кри-

вая фитировалась методом наименьших квадратов полиномом 11 порядка с точностью  $\pm 0.02\%$ .

На рис.4 приведены результаты измерений неоднородности поля в медианной плоскости магнита на расстоянии 190 мм от края магнита для трех значений тока. Эти результаты с точностью  $\pm 0.005\%$  согласуются с результатами измерений гармонического состава поля.

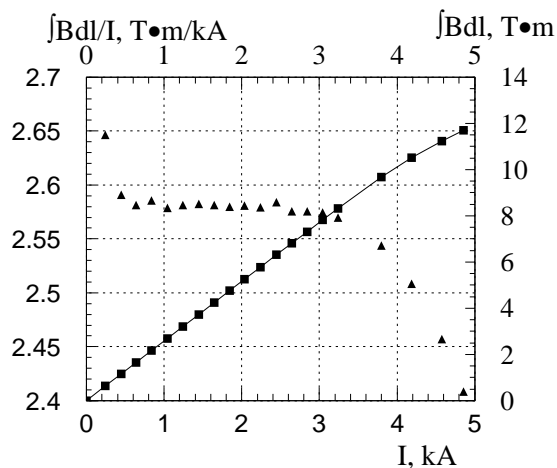


Рис. 3: Зависимость продольного интеграла поля (2) и его отношения к току (1) от тока питания.

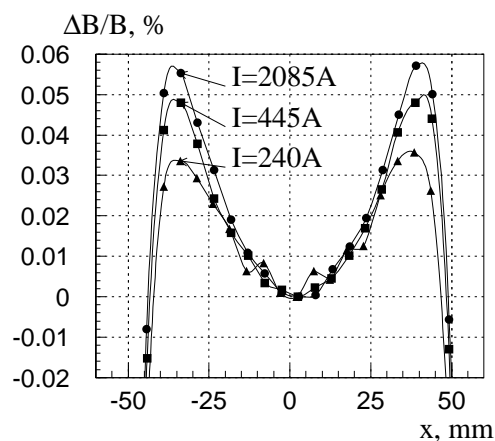


Рис. 4: Неоднородность центрального поля на глубине 190 мм.

#### 4. Гармонический состав поля

Измерения гармонического состава поля были проведены методом вращающихся катушек [2]. Использовались две короткие ( $300 \times 15 \text{ мм}^2$ ) радиальные катушки (т.е. настроенные на компоненту  $B_\varphi$ ), которые перемещались вдоль осевой линии магнита на специальной тележке, имеющей колеса по форме полюса магнита. Для фиксации направления движения тележка подпружинена к верхнему полюсу магнита в четырех точках через подшипники скольжения из фторопласта. Вращение измерительной катушки осуществлялось шаговым двигателем ШД-5 через редуктор с редукцией 128. Угол поворота измерялся 12-битным преобразователем угол-код. Вращение от редуктора к катушке передавалось с помощью штанг с гибкими сильфонными муфтами. Эти же штанги использовались для смещения катушки вдоль магнита на фиксированные расстояния. Всего использовалось пять штанг (три по 0.5 м и две по 1 м). Сигнал с катушек интегрировался интегратором, описанным выше. При встречном включении катушек измеренная степень компенсации дипольной компоненты составила величину 150. Дисперсия измерений амплитуд гармоник до 6-го порядка не превышала  $10^{-5}$ .

Результаты измерений секstupольной компоненты приведены в табл. 1. Там же для сравнения приведены результаты измерений, полученные во FNAL, для прототипа магнита длиной 5.757 м.

Таблица 1. Нормальная секступольная компонента ( $\times 10^{-4}$ ),  $R_0=25.4$  мм.

	240 A	450 A	2000 A	3000 A	4800 A	5000 A
ИФВЭ	1.7	2.36	2.72	2.44	-1.47	—
FNAL	2.1	2.19	2.14	—	—	-1.48

Авторы благодарны А.А.Гусаку и его сотрудникам за разработку и изготовление ряда прецизионных электронных блоков, обеспечивших проведение программы испытаний.

### Список литературы

- [1] K.Borer and G.Fremont. The Nuclear Magnetic Resonance magnetometer type 9298, CERN 77-19, 1977.
- [2] Proceeding of CERN Accelerator School. Magnetic Measurement and Alignment, CERN 92-05, 1992, p.249.