

Разработка измерительной системы для исследования магнитных характеристик прототипа септум квадруполья MSQ

Н.В. Кротов, Н.В. Милова, В.П. Попов, Н.Л. Смирнов, А.В. Тихов, Л.М. Ткаченко
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Введение

В рамках контракта между ИФВЭ и DESY были изготовлены и протестированы два прототипа квадрупольного септум магнита (MSQ), разработанные на основе полученного из DESY квадруполья (QC-магнит). MSQ-магнит состоит из половины QC-магнита и отражающей септум пластины, заменяющей вторую половину. По требованию заказчика магнитные измерения были проведены в три этапа: (а) — измерение целого QC-магнита для проверки измерительной системы; (б) — измерение половины QC-магнита с цельной “зеркальной” пластиной без зазора и паза; (в) — измерение MSQ-магнита. При этом измерения необходимо было проводить в рабочей области септум квадруполья (для проведения протонного пучка) и за септум пластиной, в вырезе пластины — для электронного пучка.

Целью исследования MSQ-магнита было определение его основных характеристик рабочего режима. Требование к качеству поля для интегральной неоднородности в рабочей области квадруполья составляет 5×10^{-4} . Требование к абсолютной точности измерения интегрального градиента — фокусирующей силы квадруполья в рабочей области — составляет 10^{-3} . Этот магнит должен работать также и в импульсном режиме с довольно высокой скоростью изменения градиента поля (порядка 85 Т/м·сек). При этом необходимо, чтобы требуемое качество поля в импульсном режиме сохранялось.

Для выполнения этой задачи была создана измерительная система, основанная на методе вращающихся рамок, как наиболее простом, надежном и обладающем требуемой точностью [1]. При некоторых изменениях она дает возможность исследовать динамические добавки магнитного поля в импульсном режиме.

1. Основные параметры измерительной системы

Измерительная система включает в себя индукционный датчик (ИД), привод, набор электронных блоков, разработанных специально для магнитных измерений, источники тока, математическое обеспечение контроля измерений и обработки данных, компьютерное и другое оборудование. Измерительный тракт представляет собой ИД, соединенный с приводом, усилитель-коммутатор и цифровой интегратор, управляемые программно. Структурная схема аппаратуры аналогична указанной в [2]. Кроме того, для измерения динамических добавок использовались блок управления током возбуждения и специально разработанный функциональный генератор для синхронизации интегратора по импульсу с источника тока. Вся головная измерительная электроника (усилитель — коммутатор, блок импульсного управления шаговым двигателем) располагалась в непосредственной близости от магнита, остальная электроника и компьютер были удалены на расстояние 15 м.

Непосредственно перед началом измерений были проведены оценки точностных характеристик измерительного тракта и выбраны оптимальные режимы измерений. Относительная точность аналогово-измерительного тракта ИД — усилитель составила 2.3×10^{-4} при стабильности 5×10^{-5} за цикл измерения. Оценивались также точностные параметры источ-

ника тока: относительная систематическая погрешность измерения тока и нестабильность тока на плато в течение цикла измерения не превышали 10^{-4} . Приведенные характеристики аппаратуры обеспечивают требуемую точность измерения поля [2].

2. Характеристики индукционных датчиков и процедура измерений

ИД является определяющим элементом измерительной системы. Координатная система была выбрана так, что оси вращения ИД совпадали с осью квадруполь с точностью до 1 мм для QC-магнита и смещены на 25 мм для QC с “зеркальной” пластиной и MSQ-магнитов. Начальный угол устанавливался стабильно с точностью 5 мрад.

Для измерений центрального G_0 и интегрального G_{int} поля QC-магнита был использован 1-метровый ИД, содержащий пару симметричных катушек. Он был откалиброван на опорном диполе и квадруполье, поэтому его абсолютная точность измерения градиента выше чем 10^{-3} . Для измерения гармоник он обеспечивает точность 10^{-4} . Случайная ошибка при уровне тока 100 А составляет $2 \div 3 \times 10^{-4}$ для градиента и менее чем 2×10^{-5} для гармоник, что подтверждает его стабильность и точность. К сожалению, этот ИД имеет внешний диаметр около 60 мм, и поэтому его нельзя использовать ни для MSQ-магнитов, ни для QC-магнита с “зеркальной” пластиной, где оси вращения смещены на 25 мм.

Поскольку 1-метровый ИД длиннее QC-магнита и ловит часть краевого поля, измерение центрального поля состоит из двух этапов. Для определения начала краевого поля мы просканировали краевую часть QC-магнита этим ИД. Центральный градиент можно получить, вычитая краевое поле из данных ИД в центральной области.

На рис.1а показана зависимость передаточной функции от тока $G_0(I)/I$ и сравнение её с данными DESY для одного уровня тока. С другой стороны, 1-метровый ИД не захватывает все краевые поля, поэтому интегральное поле было получено суммированием результатов измерений с двух сторон магнита. Точность совпадения краев катушек в середине квадрупольа составляет доли миллиметра. Передаточная функция $G_{int}(I)/I$ показана на рис.1б.

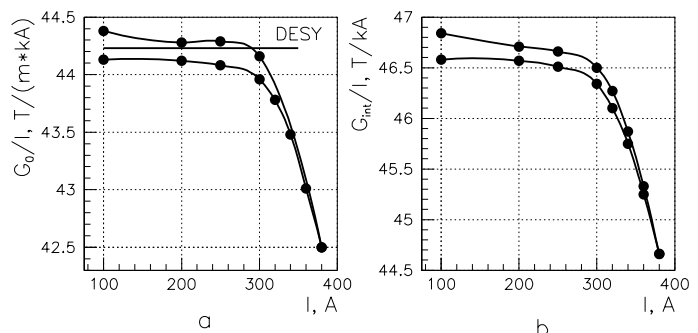


Рис. 1: Передаточные функции QC-магнита: градиента поля (а) и интеграла градиента поля (б).

Для QC-магнита с “зеркальной” пластиной был использован интегральный ИД, длиной 1.34 м и состоящий из двух катушек. Его случайное отклонение при измерении гармоник $3 \div 4 \times 10^{-5}$, но хуже при измерении градиента — доли процента. Однако он имеет очень важные качества: он компенсирует квадрупольную составляющую поля с коэффициентом компенсации порядка 400, а также дипольную составляющую — с коэффициентом порядка 200. Это и дает возможность его использовать для измерений со смещенными осями вращения, где присутствуют обе компоненты поля.

Для MSQ-магнита был создан 0.5-метровый ИД, обладающий точностью 1-метрового ИД и возможностями компенсации 1.34-метрового ИД. Особенностью данного ИД является его асимметрия относительно оси вращения, что увеличивает область захвата измерительной рамкой. ИД вращался наполоборота плюс некоторый угол, необходимый для разгона привода. Ось вращения датчика находится в медианной плоскости магнита и отстоит от пластины на 17 мм. Диаметр захвата измерительной рамкой 35 мм с точностью 0.02 мм.

3. Измерение динамических добавок

Процедура измерения динамических добавок потребовала развития имеющихся методик, оборудования и программного обеспечения [3]. Особенностью данного типа магнита является наличие элементов магнитопровода, изготовленного из шихтованной стали, и септум пластины, изготовленной из цельного куска листовой стали. Очевидно, что при такой асимметрии магнита динамические характеристики MSQ квадруполья имеют выраженную асимметрию. Амплитуда индуцированного вихревыми токами поля пропорциональна скорости изменения внешнего поля: $\Delta B_{dyn}(t) \sim -K dB(t)/dt$.

Цель измерений заключается в определении коэффициента “К”, постоянной времени затухания вихревых токов и формы динамической составляющей поля. Процедура измерения заключалась в том, что магнит запитывался трапецеидальным током, при выходе на плато которого запускался интегратор. Считывание сигнала с интегратора производилось по логарифмическому закону: $1 \div 10$ мкс, $10 \div 100$ мкс, $0.1 \div 1$ с, для каждого углового положения индукционного датчика. На рис.2 показаны зависимости динамических добавок от времени к прямым B_n и косым A_n нелинейностям интеграла поля. Суммарный вклад динамических добавок составил 1.72×10^{-4} .

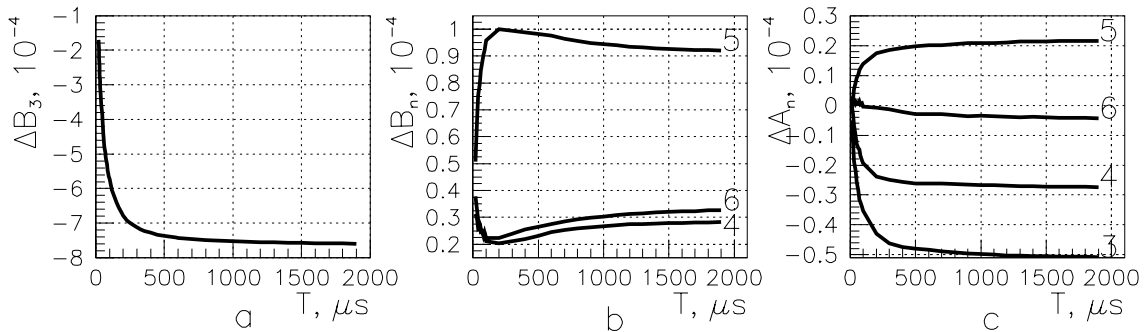


Рис. 2: Динамические добавки к нелинейностям интеграла поля: ΔB_3 (a); $\Delta B_n, n = 4, 5, 6$ (b) и $\Delta A_n, n = 3, 4, 5, 6$ (c).

4. Математическое обеспечение

Разработанное программное обеспечение реализовано на объектно-ориентированном языке C++, где объектами управления являются элементы программы, виртуальные устройства и элементы памяти. Для достижения гибкого интерактивного управления физическими устройствами был создан интерпретатор командных строк, состоящий из синтаксического анализатора, построителя управляющего дерева и исполняющего процессора. Синтаксический анализатор реализован в виде конечного автомата, который генерирует директивы построителю дерева из входного символьного потока. Построитель создает объекты управления и связывает их в управляющее дерево, определяющее алгоритм работы исполняющего процессора. Привязка виртуальных устройств к измерительной аппаратуре выполняется посредством драйверов устройств, где операторы-функции соответствующего объекта производят конечную трансляцию с языка интерпретатора на язык 'NAF' КАМАК-контроллера. Это дает возможность создания гибкого алгоритма процедуры измерений, его коррекции и изменения в процессе отработки оптимального режима.

Комплекс разработанных программ снабжен удобным интерфейсом пользователя, объединяющим все действия по тестированию аппаратуры, управлению датчиками, измерению и визуализации данных, математической обработке данных и их графической интерпретации.

Изготовленная септум-пластина имела воздушный зазор в области выреза. Расчеты показали, что зависимость максимальной величины рассеянного магнитного поля B_{max} (в Гс) в области электронного пучка от ширины зазора Δl (в мм) описывается формулой [4] $B_{max} = 11.8 + 70.2\sqrt{\Delta l}$.

Измерение поля в вырезе пластины проводилось датчиком Холла (ДХ). Для уменьшения искажения поля зазор между пластинами закрывался защитной прокладкой толщиной d (рис.3). Применение специальных математических методов для калибровки ДХ по ЯМР-магнитометру существенно улучшает точностные характеристики измерительного тракта ДХ. При калибровке динамический диапазон по полю обеспечивался использованием нескольких сменных датчиков ЯМР, что приводило к погрешности установки ДХ как по полю, так и по углу. При расчетах учитывалось отклонение оси чувствительности ДХ от реального поля и его смещение на каждом интервале калибровки по ЯМР. Вычисление оптимального калибровочного полинома не выше 10-ой степени, минимизирующего разность данных ДХ и ЯМР, позволило получить поле с точностью 2×10^{-4} .

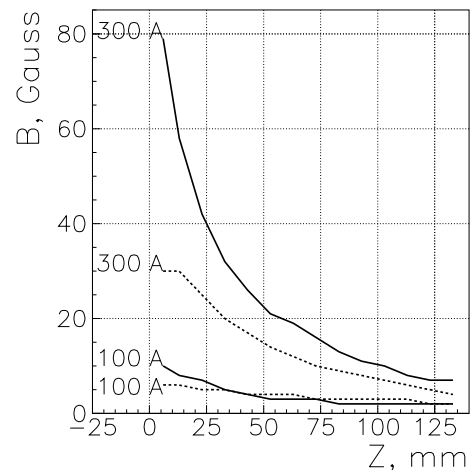


Рис. 3: Распределение поля в вырезе пластины при 100 и 300 А. Сплошная линия соответствует $d = 3 \text{ mm}$, пунктирная — $d = 3 + 5 \text{ mm}$.

Заключение

Созданная измерительная система, состоящая из магнитометрической аппаратуры, механического устройства перемещения датчиков, методов математической обработки данных и контроля за процессом измерений обеспечивает требуемую точность и стабильность измерений квазистационарного магнитного поля и его динамических добавок в импульсном режиме. Сопровождающее программное обеспечение характеризуется легкостью настройки на аппаратную конфигурацию, гибкостью аппарата управления, дружественным интерфейсом пользователя.

Список литературы

- [1] Курнаев О.В. и др. Разработка и измерение квадрупольных магнитов для TESLA. — В сб.: XV совещание по ускорителям заряженных частиц. — Протвино, ИФВЭ, 1996.
- [2] Смирнов Н.Л. Методики магнитных измерений СП-диполей УНК: Препринт ИФВЭ 91-178, Протвино, 1991.
- [3] Герцев К.Ф. и др. Измерение динамических добавок к магнитному полю в моделях СП-диполей УНК: Препринт ИФВЭ 87-143, Протвино, 1987.
- [4] Parker B., Smirnov N.L., Tkachenko L.M. Development of Septum Quadrupole Prototype for DESY Upgrading Luminosity: IHEP Preprint 98-55, Protvino, 1998.