

СПОСОБЫ КОРРЕКТИРОВКИ ПОЛЯ ДИПОЛЬНОГО МАГНИТА

© 2019 г. К. К. Рябченко^{а,*}, А. Ю. Пахомов^а,
Т. В. Рыбичкая^а, А. А. Старостенко^а

^а Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

*e-mail: kseny121195@mail.ru

Поступила в редакцию 21.04.2019 г.

После доработки 21.04.2019 г.

Принята к публикации 17.05.2019 г.

Проведена корректировка полей калибровочного дипольного магнита на стенде магнитных измерений ИЯФ СО РАН с помощью активной и пассивной коррекций, в результате чего однородность магнитного поля была улучшена с $1 \cdot 10^{-4}$ до уровня $1 \cdot 10^{-5}$.

DOI: 10.1134/S0032816219060132

ВВЕДЕНИЕ

На практике измеренные данные готового магнитного элемента оказываются отличными от расчетных значений. Основными причинами этого могут быть технологические неточности при изготовлении, изменчивость свойств материалов для различных составляющих магнита. Поэтому появляется необходимость в доработке готового магнитного элемента путем изменения размеров или формы его деталей либо добавления новых компонентов.

На стенде магнитных измерений экспериментального производства ИЯФ СО РАН находится постоянный калибровочный дипольный магнит (к.д.м.), однородность поля которого составляет $\sim 10^{-4}$ в рабочей области 50×150 мм.

В ИЯФ СО РАН изготавливаются магниты с высокой однородностью поля, например в дипольных магнитах CR FAIR относительное отличие интеграла поля от заданного не должно превышать величины 10^{-4} [1]. Чтобы измерения в таких магнитах проводились корректно, система магнитных измерений должна быть точно откалибрована, т.е. на стадии калибровки датчиков Холла однородность поля $\Delta V/V$ в к.д.м. должна быть не хуже $5 \cdot 10^{-5}$.

Для получения заданной точности в данной работе будут по отдельности рассмотрены два типа коррекции магнитного поля в межполюсном зазоре: активная в виде дополнительных плоских катушек, расположенных на полюсах магнита, и пассивная, представляющая собой дополнительные накладки на полюса.

Основной задачей к.д.м. является калибровка кареток с датчиками Холла [2], которые предназначены для проведения прецизионных магнитных измерений. Так как каретки изготавливают различной ширины, то чем шире и лучше область однородного поля к.д.м., тем точность калибровки датчиков Холла в каретке будет выше.

На рис. 1 показана схема к.д.м. Основными составляющими магнита являются катушки, железное ярмо и полюсы, формирующие магнитное поле. Ограничение максимальной величины магнитной индукции в зазоре между полюсами зависит от насыщения железа и значения тока в катушках магнита. По этой причине на полюсах были установлены накладки-концентраторы в форме прямоугольных параллелепипедов, что способствовало увеличению индукции магнитного поля

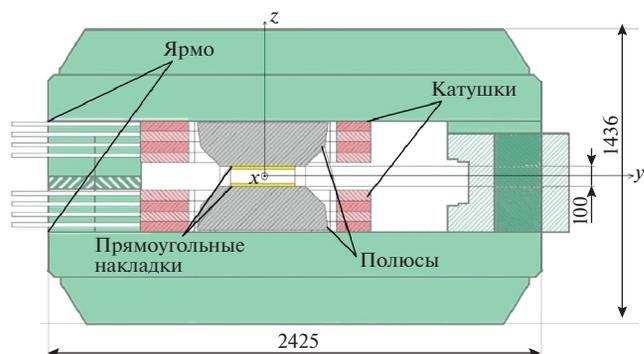


Рис. 1. Схема калибровочного дипольного магнита.

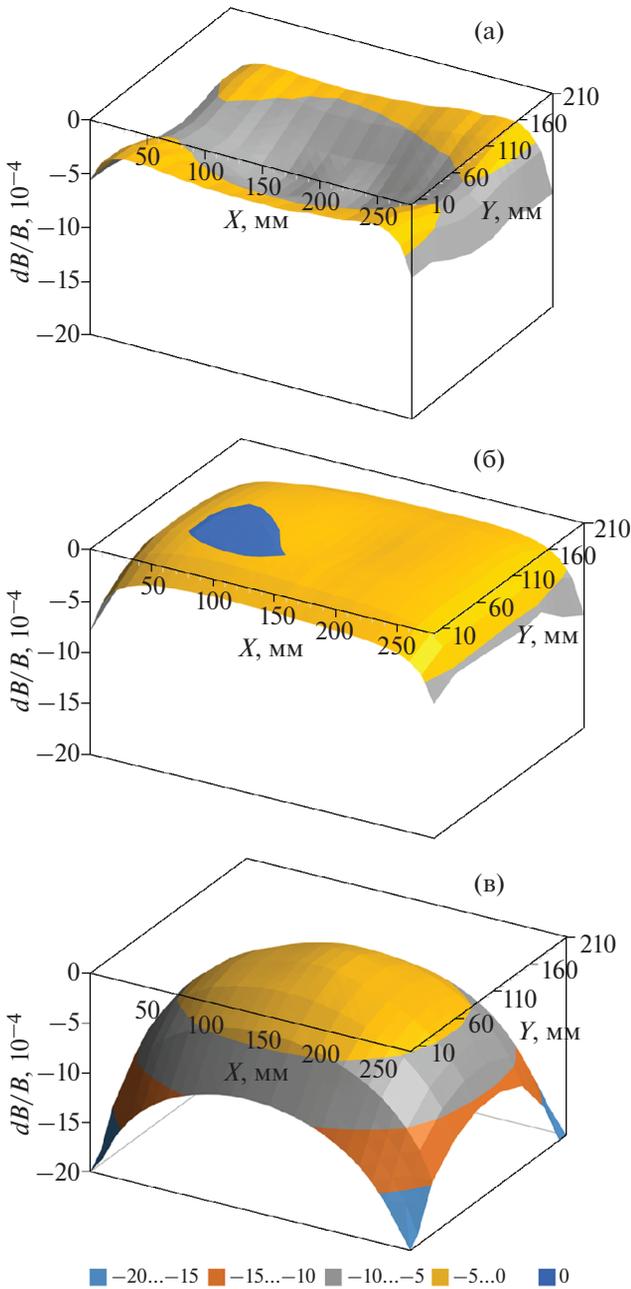


Рис. 2. Полные картины однородности полей калибровочного магнита при $B = 5$ кГс (а), 10 кГс (б), 15 кГс (в).

с 9 до 15 кГс при одном и том же значении тока в катушках $I = 750$ А.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ К.Д.М.

Для проведения измерений магнитной индукции к.д.м. использовалась каретка с 8 датчиками я.м.р. (я.м.р. — ядерный магнитный резонанс), расположенными на расстоянии 30 мм друг от друга, которая передвигалась вдоль оси X в медленной плоскости межполюсного зазора.

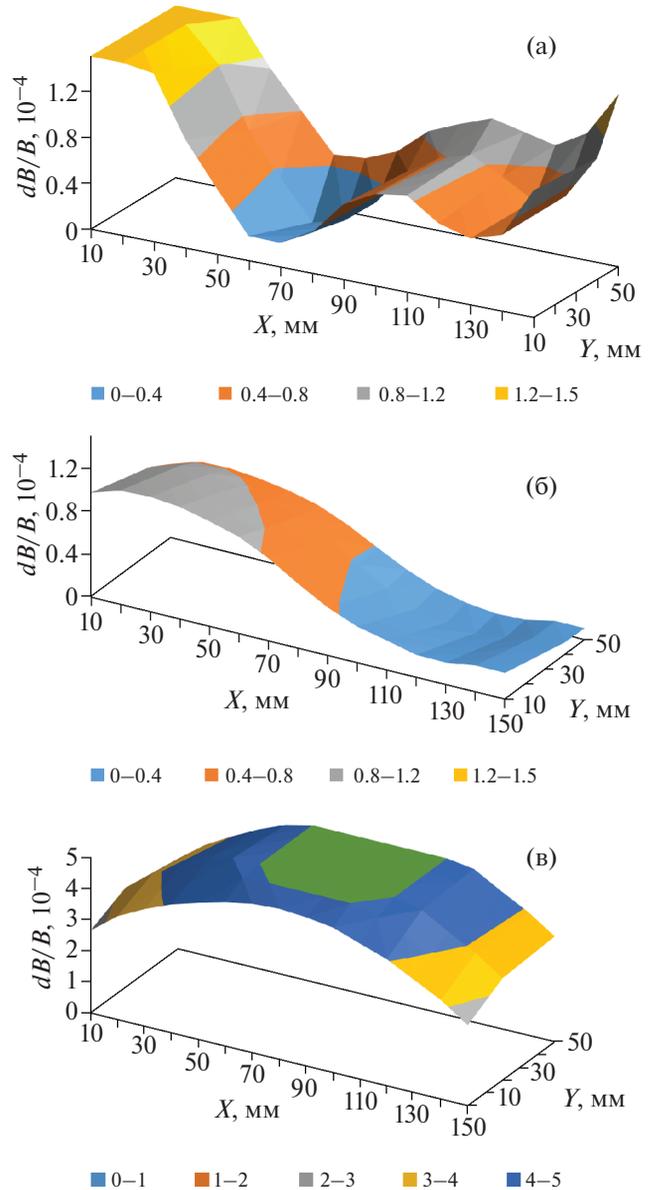


Рис. 3. Картины однородности полей калибровочного магнита в рабочей области при $B = 5$ кГс (а), 10 кГс (б), 15 кГс (в).

На рис. 2 представлена однородность магнитного поля $\Delta B/B$ при разных значениях индукции B магнитного поля.

Требуемая однородность поля ($5 \cdot 10^{-5}$) необходима в рабочей области размерами 50×150 мм, в которой размещается каретка с датчиками Холла. Распределение магнитных полей в необходимой области более подробно показан на рис. 3, откуда видно, что однородность поля в ней лежит в пределах от $1.21 \cdot 10^{-4}$ до $5.00 \cdot 10^{-4}$. Для удовлетворения требуемых параметров поля необходимо ввести дополнительную коррекцию.

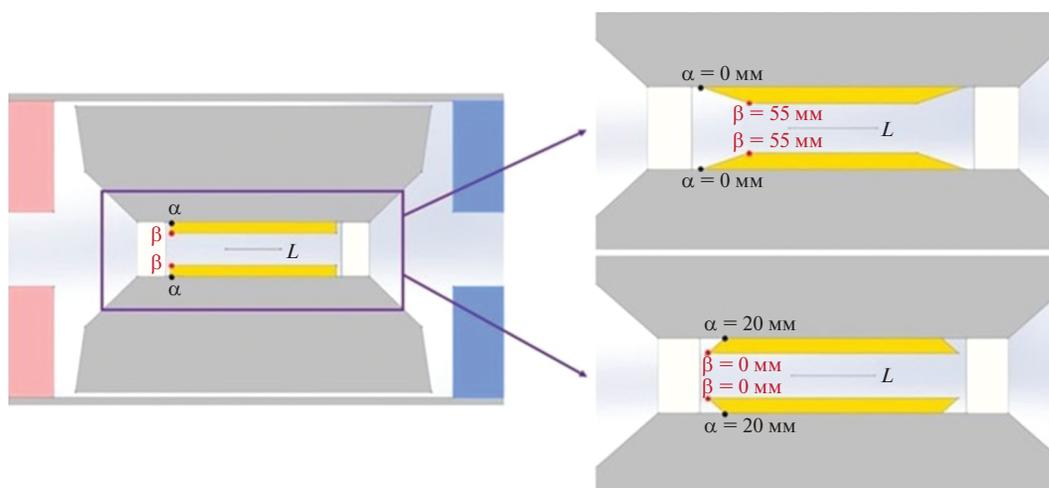


Рис. 4. Предельные варианты геометрии профиля накладок.

КОРРЕКЦИЯ ОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ КД.М.

Активная коррекция

Активная коррекция осуществлялась эллиптическими катушками, форма и размер которых выбирались на основе анализа картин измерений однородности поля к.д.м. (рис. 2). Катушки состояли из двух контуров: внутреннего и внешнего. Они размещались на полюсах в межполюсном зазоре к.д.м. Посредством независимого управления током в каждом из них подбиралась требуемая форма поля.

После установки активной коррекции и проведения серий измерений магнитных полей были получены следующие значения однородности полей в рабочей области: для 5 кГц — $7.01 \cdot 10^{-5}$, для

10 кГц — $7.89 \cdot 10^{-5}$, для 15 кГц — $5.11 \cdot 10^{-5}$. В результате однородность поля удалось улучшить в несколько раз, но этого недостаточно.

Пассивная коррекция

Пассивная коррекция осуществлялась за счет оптимизации профиля накладок, которые расположены на полюсах к.д.м. Основываясь на 2D-расчетах магнитного поля в программе ELCUT [3], была выбрана оптимальная форма накладок. На рис. 4 показаны предельные варианты геометрии профиля накладок. Максимальная ширина накладок была ограничена конструктивной особенностью магнита.

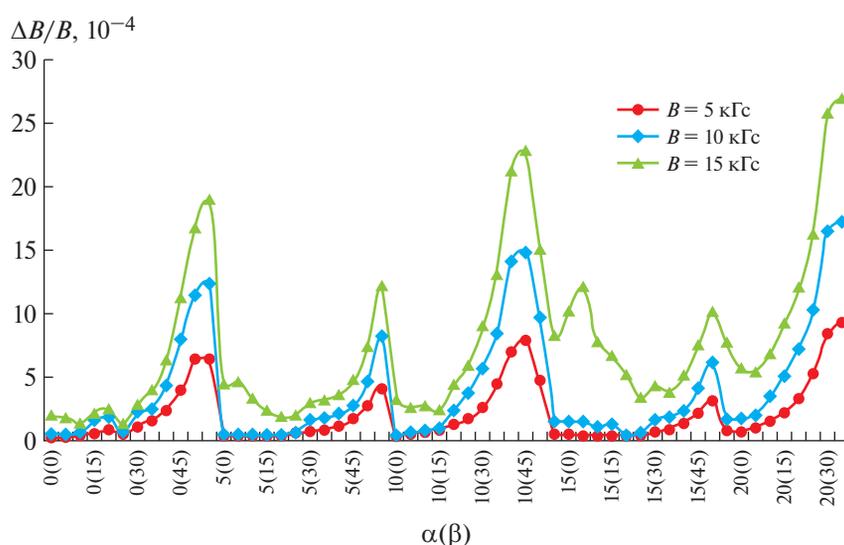


Рис. 5. Зависимость $\Delta B/B$ от геометрии накладок.

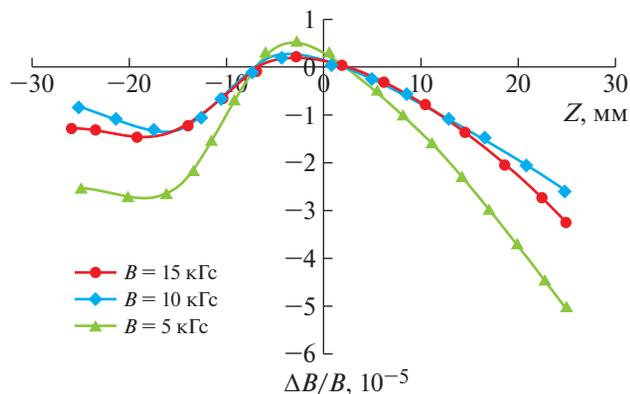


Рис. 6. Однородность поля вдоль оси Z .

Если поочередно менять расстояние между точками α и β с шагом, равным 5 мм, в диапазоне от 0 до 55 мм (сначала при фиксированной точке α , затем β) и при каждом изменении шага рассчитывать среднее значение поля на отрезке $L = 150$ мм, то из полученных данных можно определить оптимальную форму накладок.

На рис. 5 представлена зависимость однородности поля от геометрии накладок при индукции поля 5, 10 и 15 кГц. На оси X представлены возможные варианты конфигурации накладок для различных α и β .

Основываясь на полученных результатах, были изготовлены накладки с фаской 25 мм. После установки новых накладок на полюсы к.д.м. проведены измерения магнитных полей в межполюсном зазоре. В результате однородность поля в рабочей области для 5 кГц составила $5.15 \cdot 10^{-5}$, для 10 кГц – $2.54 \cdot 10^{-5}$, для 15 кГц – $3.87 \cdot 10^{-5}$.

Распределение поля вдоль Z относительно медианной плоскости представлено на рис. 6. Из графиков видно, что при расположении датчиков Холла и я.м.р. на расстоянии 10 мм от центра погрешность калибровки датчиков будет примерно равной $1 \cdot 10^{-5}$.

ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

Основной вклад в погрешность измерений картин магнитного поля вносит величина шума тока источника питания катушек, точность изме-

Таблица 1. Результаты измерений в рабочей области

B , кГц	$\Delta B/B$, 10^{-5}		
	Исходные измерения	Коррекция	
		Активная	Пассивная
5	12.10 ± 0.08	7.01 ± 0.08	5.15 ± 0.08
10	10.40 ± 0.11	7.89 ± 0.11	2.54 ± 0.11
15	50.00 ± 0.09	5.11 ± 0.09	3.87 ± 0.09

рений датчиков я.м.р., а также позиционирование и перемещение датчиков в межполюсном зазоре.

В качестве источника питания применялся источник стабилизированного тока реверсивный (максимальное напряжение 48 В, ток 2400 А), шум которого составляет $5 \cdot 10^{-5}$ А.

Погрешность измерения магнитного поля датчиками я.м.р. при относительном градиенте поля $< 10^{-4}$ см $^{-1}$ составляет менее 10^{-6} [2].

Перемещение датчиков в поле осуществлялось с помощью модуля линейного перемещения, точность перемещения которого составляет 10 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При помощи коррекций двух типов (активной и пассивной) была улучшена однородность поля калибровочного магнита в рабочем диапазоне полей от 5 до 15 кГц (табл. 1).

Предпочтение было отдано пассивной коррекции, при которой получен требуемый результат и при этом без дополнительных источников питания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shatunov P.Yu., Berkaev D.E., Kasaev A.S., Rogovsky Yu.A., Shvarts D.B., Anashin V.V., Bekhtenev E.A., Bryzgunov M.I., Gurov D.S., Kolmogorov V.V., Koop I.A., Krasnov A.A., Meshkov O.I., Rybitskaya T.V., Semenov A.M. et al.* // Proc. RuPac 2016. P. 86.
2. *Карнов Г.В.* ЯМР магнитометр. Препринт ИЯФ СО РАН. Новосибирск, 2013.
3. ELCUT 6.3. Руководство пользователя. СПб.: ООО "Тор", 2018.