

ФОРМИРОВАНИЕ ОДНОРОДНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В МАЛОГАБАРИТНЫХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМАХ

В. А. Коробов, В. Н. Линева

Задача создания магнитных полей высокой однородности 10^{-4} — 10^{-5} [1] и вплоть до 10^{-9} [2] остается актуальной. Это обусловлено не только тем, что требования к создаваемым магнитным системам (МС) все более повышаются, но и тем, что традиционные методы формирования однородных магнитных полей (криволинейный профиль межполюсного зазора и шиммирование [1, 2]) становятся зачастую малоэффективными. Кроме этого, получаемые на основе данных методов рекомендации относятся, как правило, к конкретным конфигурациям МС.

В данной работе рассмотрено формирование магнитного поля с однородностью порядка $2 \cdot 10^{-5}$ в осесимметричном электромагните бронзового типа (рис. 1) для малогабаритного спектрометра ЭПР. Особенность задачи заключается в том, что при малых габаритных размерах электромагнита (длина 148 мм, диаметр 160 мм) необходимо обеспечить требуемую однородность в относительно большой рабочей области размерами $\varnothing 20.4$ мм² при величине магнитной индукции в центре зазора 0.05—0.7 Тл. Это означает, что ставится цель достижения в малогабаритных МС характеристик, доступных в настоящее время лишь в стационарных лабораторных МС. Размеры межполюсного зазора должны лежать в пределах: длина 8—14 мм, диаметр 60—70 мм. Из технологических соображений и условий эксплуатации нельзя использовать криволинейный профиль зазора и шиммирующие элементы. Сформулированные требования делают поставленную задачу весьма трудной.

Как показывает наш опыт, получение однородных магнитных полей 10^{-4} — 10^{-5} и, вероятно, до 10^{-6} не обязательно требует отмеченных выше традиционных методов, обычно

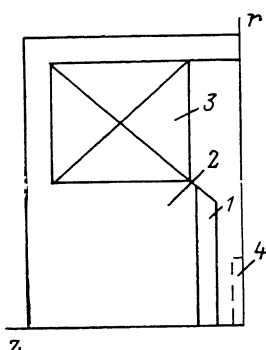


Рис. 1. Сечение элемента симметрии электромагнита.

1 — полюсной наконечник, 2 — полюс, 3 — намагничивающая катушка, 4 — рабочая область.

значительно усложняющих конструкцию МС. Однако в этом случае необходим последовательный учет таких обычно игнорируемых факторов [1, 2], как конфигурация всей МС и распределение намагненности ферромагнитных элементов МС. В такой постановке решение задачи неизбежно приводит к полной системе уравнений магнитостатики, позволяющих самосогласованно находить как конфигурацию магнитного поля, так и распределение намагненности ферромагнитных элементов МС.

Выполненный нами вычислительный эксперимент базируется на интегральном методе решения уравнений магнитостатики [3], который, на наш взгляд, наиболее адекватен задаче получения однородных магнитных полей. Отметим, что создание малогабаритного электромагнита с указанными выше характеристиками посредством физического моделирования практически невозможно из-за большого числа параметров.

Напряженность магнитного поля H удовлетворяет интегральному уравнению

$$H = \frac{1}{4\pi} \left[\int_V \frac{(\nabla M)}{r^3} r dV - \int_S \frac{(nM)}{r^2} r dS \right] + H^b, \quad (1)$$

где $r = r_P - r_Q$ — радиус-вектор, соединяющий точку наблюдения Q с текущей точкой интегрирования P ; V , S — объем и поверхность всех ферромагнитных элементов; n — внешняя нормаль к S ; H^b — напряженность магнитного поля, создаваемая катушками с током; M — намагниченность.

Уравнения связи вектора индукции B и векторов H , M

$$B = \mu_0 (H + M), \quad B = \mu_0 \mu (H) H, \quad (2)$$

где μ_0 , μ — абсолютная и относительная магнитная проницаемость.

Для численного решения уравнений (1), (2) необходимо выполнять дискретизацию геометрической конфигурации МС на множество элементарных объемов [3]. Примем для вектора

М кусочно-постоянную аппроксимацию по элементарным объемам. В результате уравнения (1), (2) сводятся к системе нелинейных алгебраических уравнений

$$\mathbf{H} = \mathbf{A}\mathbf{M} + \mathbf{H}^b, \quad \mathbf{M} = f(\mathbf{H}), \quad (3)$$

где \mathbf{H} , \mathbf{M} , \mathbf{H}^b — соответствующие многомерные векторы; \mathbf{A} — квадратная матрица коэффициентов; f — магнитная характеристика ферромагнитного материала. Получение системы уравнений (3) и ее численное решение детально изложено в [3].

Оптимизация предварительно выбранной конфигурации электромагнита проводилась на основе разработанного нами комплекса программ MAGNET, позволяющего варьировать как геометрические, так и другие параметры МС. Расчет конфигурации МС при фиксированных параметрах выполнялся программой LOMAN-FV [3], модифицированной нами для расчета полей высокой однородности. Подробности подготовки и проведения соответствующего вычислительного эксперимента будут опубликованы отдельно.

Основными выходными данными вычислительного эксперимента были зависимости конфигурации магнитного поля в рабочей области и распределения намагниченности ферромагнитных элементов от параметров геометрической конфигурации электромагнита.

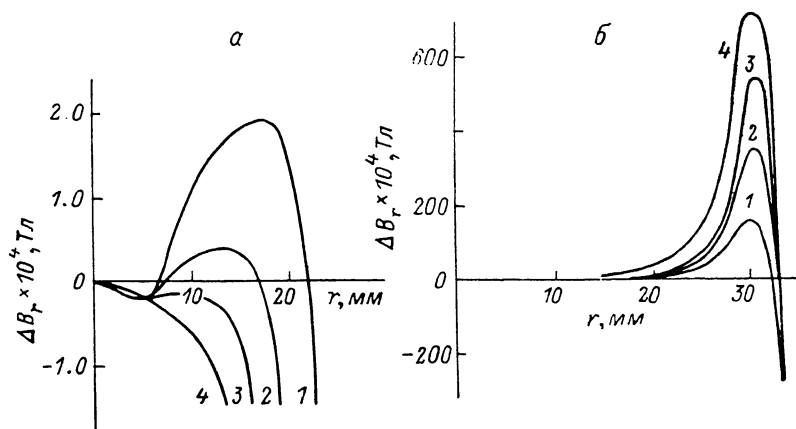


Рис. 2. Неоднородность магнитного поля в межполюсном зазоре конусной формы в радиальном направлении в плоскостях по центру зазора (а) и на расстоянии 1 мм от полюсного наконечника (б).

Длина зазора, мм: 1 — 8, 2 — 10, 3 — 12, 4 — 14; диаметр зазора 60 мм.

На рис. 2 приведена рассчитанная конфигурация магнитного поля в межполюсном зазоре конусной формы при различных длинах зазора и значении поля в центре зазора $B_0 = 0.38$ Тл. Как показал численный расчет, наибольшая однородность магнитного поля в рабочей области достигается при длине зазора 12 мм и диаметре зазора 60 мм.

Отметим следующие особенности полученного распределения магнитного поля: 1) вблизи края полюсных наконечников формируются «всплески» индукции магнитного поля, амплитуда которых зависит от длины зазора (рис. 2, б); 2) распределение магнитного поля в центральной плоскости зазора меняется от выпуклого до вогнутого в зависимости от длины зазора (рис. 2, а).

Однако наглядное объяснение характера распределения магнитного поля как результата наложения двух эффектов — естественного краевого спада индукции магнитного поля и «всплесков» индукции на краях наконечника — является, на наш взгляд, неполным. Оно не учитывает такой существенный фактор как характер намагниченности объемов полюсов и полюсных наконечников. Для выяснения более глубоких причин формирования однородности магнитного поля в рабочей области нами были выполнены расчеты МС той же конфигурации, но с цилиндрическими полюсными наконечниками. Оказалось, что, хотя и в этом случае наблюдаются «всплески» индукции магнитного поля с амплитудой до 0.1 Тл, величина и размер области однородности магнитного поля существенно меньше ($\varnothing 20 \cdot 4$ мм² для конусных наконечников и $\varnothing 5 \cdot 2$ мм² для цилиндрических), причем коррекции однородности магнитного поля не происходит при любых соотношениях диаметра и длины зазора. Такое поведение можно объяснить только исходя из особенностей намагниченности полюсов и полюсных наконечников.

Дополнительным подтверждением справедливости высказанных предположений о процессах, формирующих конфигурацию магнитного поля в зазоре, является отсутствие пропорциональности между амплитудой «всплесков» индукции и степенью корректирующего их воздействия на конфигурацию магнитного поля в зазоре.

На рис. 3, 4 представлено распределение аксиальной M_z и радиальной M_r составляющих намагниченности (для полюсов конической и цилиндрической форм). В рассматриваемом диапазоне полей отсутствует насыщение материала полюсов и полюсных наконечников.

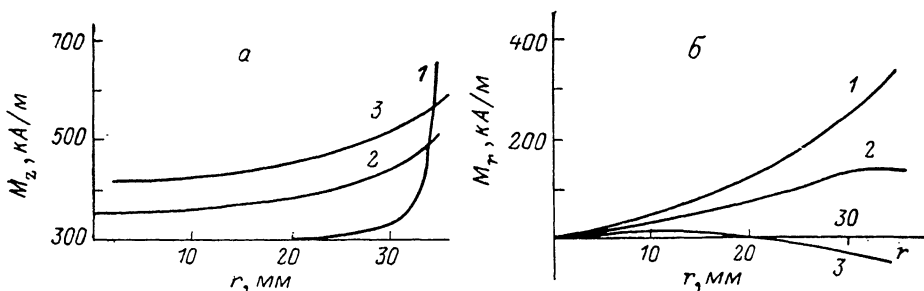


Рис. 3. Распределение намагниченности в объеме полюсов и полюсных наконечников цилиндрической формы.

Длина зазора 12 мм, диаметр 70 мм. 1 — вблизи лицевой поверхности наконечника, 2 — в плоскости на расстоянии 10 мм от зазора, 3 — в плоскости на расстоянии 50 мм от зазора.

Для обоих случаев в промежуточном слое полюсов, находящемся в центральном сечении намагничивающих катушек, аксиальная составляющая имеет приблизительно одинаковое распределение (кривые 3 на рис. 3, а, 4, а).

Изменение конфигурации, размеров и местоположения намагничивающих катушек, как показали дополнительные расчеты, практически не сказывается на однородности магнитного поля в зазоре.

К принципиальным моментам следует отнести сохранение характера распределения аксиальной компоненты намагниченности (нарастание ее величины) по мере приближения

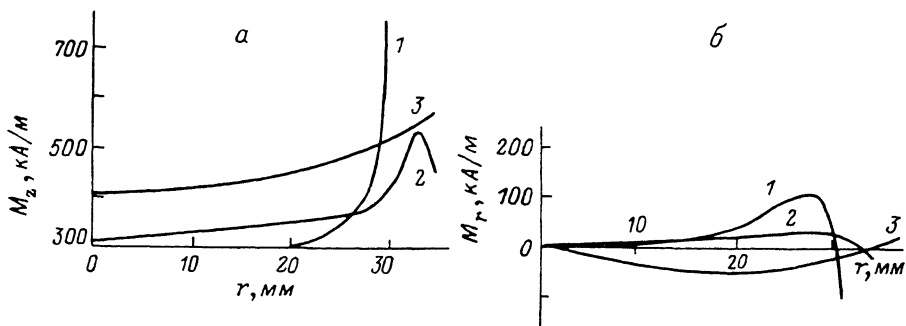


Рис. 4. Распределение намагниченности в объеме полюсов и полюсных наконечников конусной формы.

Длина зазора 12 мм, диаметр — 60 мм. 1, 2, 3 — то же, что и на рис. 3.

к зазору (ср. ход кривых 1, 2, 3 на рис. 3, а и 4, а). По-видимому, из-за малой длины (46 мм) полюс оказывает слабое выравнивающее воздействие на распределение магнитного потока. В конструкциях стационарных электромагнитов полюс по крайней мере на порядок длиннее, что и приводит к выравниванию магнитного потока вдоль полюса.

Основные эффекты наблюдаются в полюсном наконечнике, преимущественно вблизи перехода наконечник—зазор. Воздушный зазор из-за плохой проводимости оказывает определяющее влияние на распределение магнитного потока — в центральной части наконечника происходит выравнивание намагниченности в аксиальном направлении как в случае цилиндрических (рис. 3, а), так и конусных полюсных наконечников (рис. 4, а). Вблизи края полюсных наконечников наблюдаются «всплески» аксиальной компоненты намагниченности, причем в случае конусных наконечников их величина больше, что обусловлено концентрацией магнитного потока (ср. кривые 1 на рис. 3, а и 4, а).

Принципиальное отличие цилиндрической и конической форм полюсных наконечников проявляется в характере распределения радиальной компоненты намагниченности вблизи перехода наконечник—зазор. В цилиндрическом полюсном наконечнике радиальная компонента резко возрастает, начиная с центра наконечника (кривая 1 на рис. 3, б), что характеризует сильное рассеяние магнитного потока за пределы зазора и обуславливает неоднородность создаваемого магнитного поля. В конусном полюсном наконечнике при оптимальных размерах зазора она в радиусе 15 мм от центра имеет постоянное, близкое к нулю значение (рис. 4, б, кривая 1), что характеризует слабое рассеяние магнитного потока, это и обуславливает высокую однородность магнитного поля. На краю полюса радиальная компонента резко возрастает — проявляется краевое рассеяние магнитного потока.

Таким образом, конусные полюсные наконечники электромагнита выполняют роль не только концентратора магнитного потока для достижения требуемой величины магнитного поля, но и роль элемента коррекции неоднородности магнитного поля по центру зазора. Последняя функция реализуется только при определенных соотношениях длины и диаметра зазора.

Достижение высокой пространственной однородности магнитного поля, таким образом, связано с оптимизацией в броневой конструкции электромагнита не только размеров зазора, но также соотношения диаметров полюса и полюсного наконечника, и их длин. Полученные оптимальные соотношения размеров межполюсного зазора могут быть использованы при создании других конструкций МС при условии соблюдения полученных пропорций в отношении размеров основных частей МС.

В заключение сформулируем основные результаты работы.

1. На основе тщательного вычислительного эксперимента создан малогабаритный осесимметричный электромагнит простой броневой конструкции, создающий магнитное поле с однородностью $2 \cdot 10^{-5}$ в рабочей области с размерами $\varnothing 20 \cdot 4$ мм². Даны рекомендации по разработке МС такого типа.

2. Показана возможность достижения высокой однородности магнитного поля $\sim 10^{-5}$ без использования шимм и криволинейных конструктивных элементов.

3. Показано, что распределение намагниченности ферромагнитных элементов существенно в формировании однородных магнитных полей.

Список литературы

- [1] *Кашилгин В. С., Ламзин Е. А.* // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 4. С. 728—733.
- [2] *Лузвич А. А., Кременькова Н. В.* // Вестн. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. 1983. № 4. С. 102—104.
- [3] *Курбатов П. А., Аринчин С. А.* Численный расчет электромагнитных полей. М.: Энергоатомиздат. 1984. 168 с.

Белорусский государственный университет им. В. И. Ленина

Поступило в Редакцию
26 июля 1988 г.

ДИСКРЕТНЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СЕЛЕКТИРОВАННЫХ ПО МАССАМ ИОННЫХ ПУЧКОВ

А. Г. Зиновьев, А. А. Перов, А. П. Симонов

В настоящее время в исследовательских работах и для аналитических целей часто используются не одностадийные масс-спектрометрические приборы, а различные сочетания масс-спектрометров (МС) с энергоанализаторами (ЭА) [1]. Наиболее широко применяют промышленно выпускаемые приборы с комбинацией статических ЭА—МС или МС—ЭА. В последнее время интенсивно проводятся работы с использованием приборов с двумя масс-анализаторами, конструкция МС—МС с использованием метода столкновительной диссоциации ионов позволяет получать более детальную информацию о структуре сложных молекул [2]. Добавление в эту систему энергоанализатора в качестве третьей ступени, т. е. сочетание МС—