

Расчёт параметров и формы наконечников для создания высокооднородного магнитного поля между полюсами двухполюсного магнита

С.В. Герус, Э.Г. Локк, А.Ю. Анненков

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (Фрязинский филиал)

Аннотация: рассчитаны параметры и форма наконечников для создания высокооднородного магнитного поля в протяжённой пространственной области между полюсами двухполюсного магнита. На основе расчётов 3-D распределения постоянного магнитного поля и последующих измерений показано, что использование в магните кольцевых наконечников с определёнными параметрами позволяет значительно увеличить область пространства с высокой однородностью магнитного поля.

Ключевые слова: двухполюсный магнит, кольцевой наконечник, высокооднородное магнитное поле

1. Введение

Как известно, постоянное однородное магнитное поле необходимо для решения многих прикладных и экспериментальных задач. Так, при исследовании дифракции спиновых волн, распространяющихся в намагниченных ферритовых плёнках, необходимо обеспечить существование однородного магнитного поля на достаточно большой поверхности ферритовой плёнки, в плоскости которой выполняется зондирование СВЧ характеристик спиновой волны [1, 2]. Поскольку ферритовые плёнки имеют вид круглого диска диаметром около 70 мм, то при выполнении экспериментов необходимо, чтобы весь образец находился в постоянном, однородном магнитном поле.

На практике однородное магнитное поле создаётся либо постоянным магнитом, изготовленным из высококоэрцитивных магнитных материалов, либо катушками электромагнита. Отметим, что, хотя системы электрических катушек могут создавать достаточно однородное магнитное поле [3 - 5], в то же время наличие в них омических потерь приводит к нежелательному нагреву катушек, и к нестабильности созданного поля. Использование же постоянных магнитов позволяет создать достаточно стабильное магнитное поле, хотя применяемые на практике подковообразные магниты, несмотря на свои большие размеры, создают однородное магнитное поле в пределах очень малой области между полюсами магнита. Оснащение полюсов магнита наконечниками в виде усечённого конуса из магнитомягкого железа позволяет лишь немного увеличить эту область, но не обеспечивает требуемой однородности поля в необходимом объёме. В данной работе предложен способ решения этой проблемы на основе современных 3-D численных методов расчёта магнитных полей.

Одним из способов решения данной проблемы является использование в двухполюсном магните наконечников такой формы, которая позволит получить между его полюсами однородность касательного магнитного поля H_0 порядка 0.1% от величины H_0 на площади ~ 50 на 50 мм². Известно, что две соосные радиальные катушки Гельмгольца (см., например, [3, 4]), расположенные на расстоянии среднего радиуса друг от друга, создают внутри себя достаточно большую область однородного магнитного поля. Таким образом, если к коническим наконечникам двухполюсного магнита добавить ещё *наконечники в виде колец*, то последние, аналогично катушкам Гельмгольца, в значительной степени сконцентрируют магнитное поле, увеличивая

его однородность между полюсами. Необходимо лишь рассчитать размеры и конфигурацию этих колец для конкретного двухполюсного магнита.

2. Модель магнитной системы, создающей высокооднородное магнитное поле

На рис. 1 представлена модель магнита, использованная в расчётах. Она соответствует реальному магниту, входящему в состав экспериментальной установки по исследованию характеристик СВ методом СВЧ зондирования. Также на рис. 1 изображены *наконечники в виде колец*, параметры которых предстояло рассчитать. При проведении расчётов предполагалось, что основание магнита *1*, имеющее прямоугольную форму, конические наконечники *3* и кольцевые наконечники *4* выполнены из магнитомягкого железа (при изменении намагничивающего поля от 0 до 350 кА/м магнитная проницаемость меняется от 1200 до 5, индукция насыщения равна ~ 2 Т), а стационарные составляющие магнита *2* – из магнитожёсткого материала, причём считалось, что последние условно разбиты на слои с различными параметрами, варьирование которых позволит аппроксимировать параметры реального магнита, такие как величина и направление намагниченности (намагниченность насыщения лежала в диапазоне от 300 до 450 кА/м). Расчёты проводились численным методом на основе сеточного разбиения исследуемых областей, представленных на рис. 1. В процессе расчётов необходимо было установить распределение стационарного магнитного поля внутри и вне магнита и исследовать, как параметры *кольцевых наконечников* (их толщина, наружный и внутренний диаметры, а также изменение формы колец на коническую) влияют на однородность магнитного поля между полюсами.

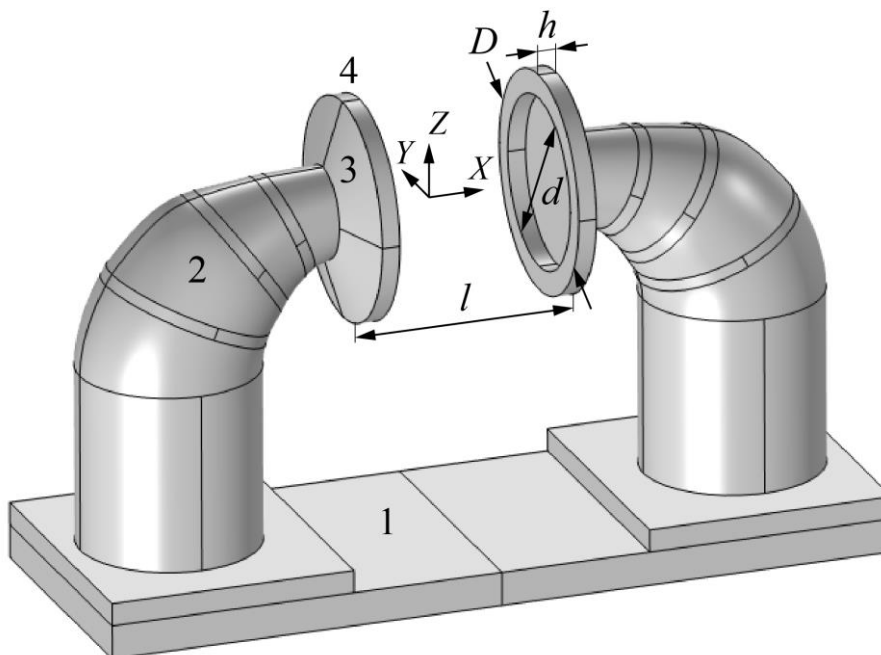


Рисунок 1. Модель магнитной системы, создающей стационарное высокооднородное магнитное поле: *1* – основание, *2* – составляющие подковообразного магнита из магнитожёсткого железа, *3* – конические наконечники с большим и меньшим диаметрами $D = 180$ мм и 74.7 мм и толщиной 16.2 мм, *4* – кольцевые наконечники с диаметром колец $D = 180$ мм, $d = 140$ мм и толщиной $h = 15.5$ мм. Расстояние между наконечниками *3* составляло $l = 177$ мм. Габаритные размеры магнитной системы равны $644 \times 390 \times 230$ мм.

При выполнении расчётов использовалась декартова система координат, центр

которой располагался посередине между полюсами магнита (рис. 1). Ниже для характеристики однородности магнитного поля будем использовать термин «протяжённость однородной области поля» ΔS , под которым будем понимать размеры пространственной области, внутри которой максимальное изменение величины поля H_0 не превышает 1% от среднего значения H_0 в этой области.

Выполненные расчёты показали, что оптимальной является прямоугольная в сечении форма кольца 4, у которого внешний диаметр D равен большему диаметру наконечников 3. Было установлено, что максимально протяжённую область с однородным магнитным полем между полюсами можно получить за счёт вариации внутреннего диаметра колец d и их толщины h . В частности, было найдено, что с увеличением толщины кольца h размер однородной области поля H_0 растёт в направлениях осей Y и Z и уменьшается в направлении оси X . Обнаружилось также, что протяжённость однородной области поля ΔS зависит от внутреннего диаметра кольца d следующим образом: с увеличением величины d (разность $D - d$ при этом уменьшается, так как величина D фиксирована), величина ΔS вдоль осей Y и Z сначала увеличивается, проходит через максимум, а затем уменьшается, в то время как в направлении оси X эта протяжённость изменяется противоположным образом. На основе расчётов удалось подобрать такие параметры колец d и h , при которых величина ΔS между полюсами магнита была одинаковой вдоль всех трёх осей X , Y , и Z . На рис. 2 и 3 приведены результаты расчётов и экспериментальных измерений распределения магнитного поля вдоль осей X и Y для оптимальных значений d и h , указанных в подписи к рис.1. Все параметры магнита подбирались таким образом, чтобы величина поля H_0 внутри наиболее однородной области поля H_0 , расположенной между полюсами магнита, составляла $H_0 = 500$ Э.

На рис. 2 приведены результаты расчётов и экспериментальных измерений распределения магнитного поля вдоль осей X и Y для оптимальных значений d и h . На рис.2а показано, как меняются рассчитанные зависимости поля $H_0(Y, X=0, Z=0)$ при наличии и при отсутствии кольцевых наконечников 4. Как видно, в обоих случаях вблизи точки $Y=0$ поле имеет максимальное значение, спадая с увеличением абсолютных значений Y . При отсутствии кольцевых наконечников 4 зависимость $H_0(Y)$ напоминает параболу, причём протяжённость однородной области поля ΔS вблизи точки $Y=0$ очень мала, порядка нескольких миллиметров (кривая 1). Наличие колец значительно повышает протяжённость этой области, центр которой по-прежнему локализован вблизи точки $Y=0$ (кривая 2). Отметим, что зависимости $H_0(Z, X=0, Y=0)$ практически идентичны приведённым на рис. 2 зависимостям $H_0(Y)$, отличаясь лишь небольшой асимметрией ~ 1 Э, обусловленной геометрией магнита.

На рис. 2б представлено изменение поля H_0 вдоль оси X (при $Y=0, Z=0$). Как видно, в отсутствие кольцевых наконечников 4 максимальные значения величины H_0 достигаются на внешней поверхности конических наконечников 3, а вблизи точки $X = 0$ поле принимает минимальное значение (кривая 1). Наличие кольцевых наконечников радикально меняет эту зависимость так, что у поверхности конических наконечников 3 поле H_0 оказывается меньше, чем между полюсами магнита при $X = 0$, где формируется достаточно протяжённая однородная область поля с незначительным изменением величины H_0 на расстоянии порядка 90 мм (кривая 2), причём форму представленных кривых можно менять путём варьирования толщины колец h .

На рис. 2 приведены также результаты измерений, которые проведены на реальном магните, служившем прототипом при выполнении расчётов (жирные кривые 3 и 4). Небольшая разница в экспериментальных и расчётных зависимостях на рис. 2 связана с отсутствием точных данных о составляющих магнит материалах, а также о распределении его намагниченности.

На рис. 3 представлены расчётные распределения напряжённости магнитного поля

H_0 (чёрные линии со стрелками) и линии постоянного уровня магнитного поля (цветные линии) в плоскости $Z=0$ до и после установки колец.

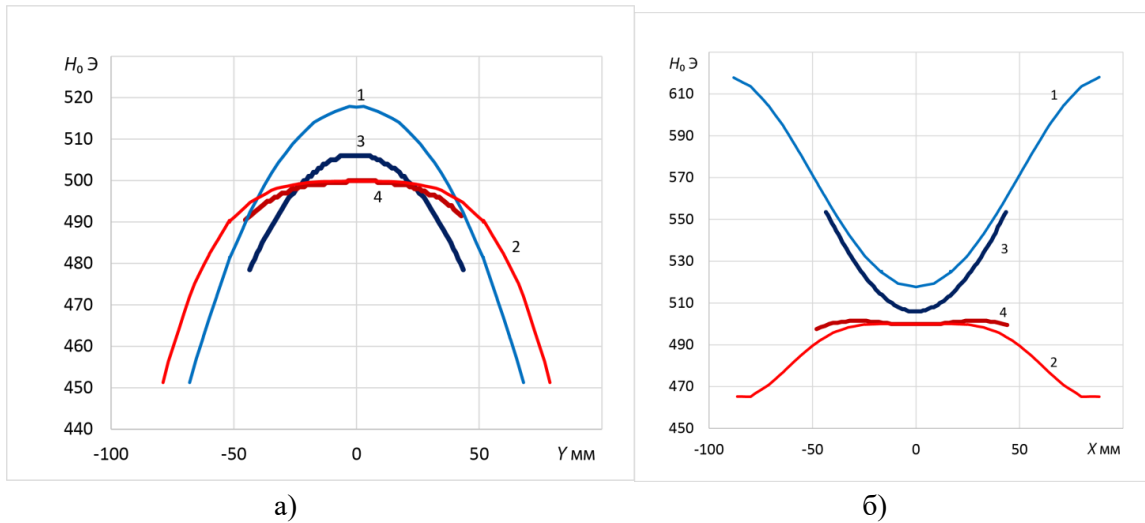


Рисунок 2. Расчётные (1 и 2) и измеренные (3 и 4) зависимости величины магнитного поля H_0 от координаты Y при $X=0, Z=0$ (а) и от координаты X при $Y=0, Z=0$ (б) при отсутствии (кривые 1 и 3) и при наличии (кривые 2 и 4) кольцевых наконечников с оптимальными параметрами.

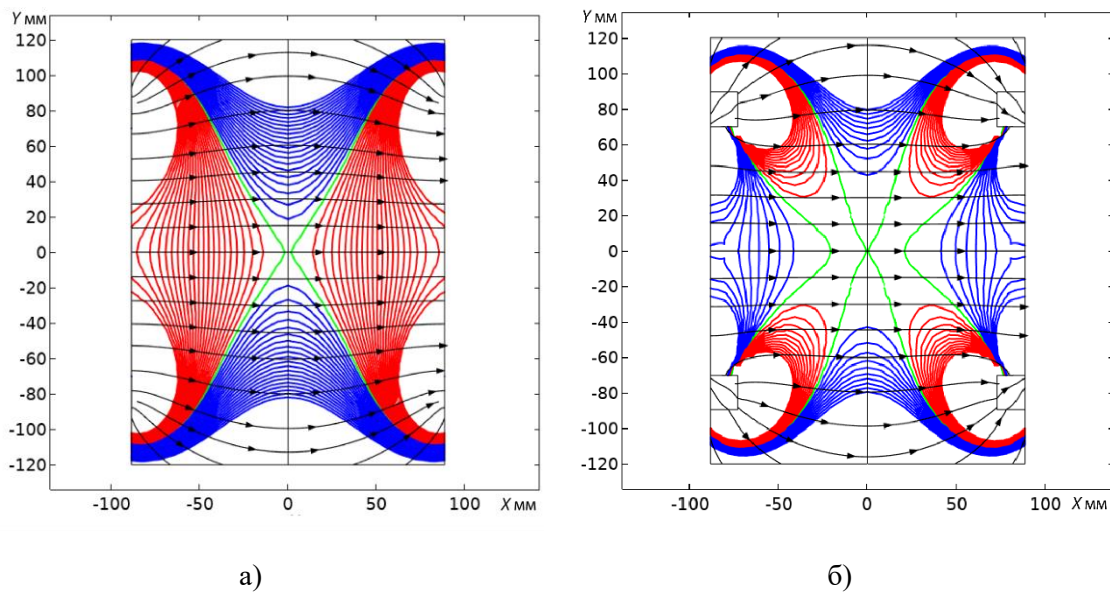


Рисунок 3. Распределения магнитного поля в области между полюсами магнита (плоскость $Z=0$), а) – без кольцевых наконечников, б) – с кольцевыми наконечниками, которые показаны чёрными прямоугольниками в углах диаграммы. Чёрные линии со стрелками – линии напряжённости магнитного поля H_0 , цветные линии – линии уровней постоянной величины поля H_0 . Зелёные линии соответствуют уровню $H_0=500$ Э, синие – уровням, у которых $H_0 < 500$ Э (при удалении от центра поле падает), красные – уровням, у которых $H_0 > 500$ Э (при удалении от центра поле растёт). Линии уровня рассчитаны с интервалом 5 Э.

Анализ этих распределений позволяет понять механизм изменения распределения поля между полюсами магнита, в результате появления кольцевых наконечников. В отсутствие колец (рис. 3а) области высоких значений поля находятся около конических наконечников в левой и правой частях представленных распределений. Под влиянием кольцевых наконечников (рис. 3б) происходит перераспределение

линий напряженности магнитного поля, так что области больших значений поля перемещаются от центра конических наконечников к кольцам (красные линии на рис. 3). В результате между полюсами магнита возникает большая область достаточно однородного магнитного поля, локализованная между красными и синими линиями в центре магнита. Изменение величины H_0 внутри указанной области от значения $H_0 (X=0, Y=0, Z=0) = 500$ Э составляет ± 5 Э, то есть $\pm 1\%$.

3. Заключение

Таким образом, решена задача значительного увеличения области однородного поля между полюсами постоянного магнита. На основе современных численных методов удалось рассчитать и оптимизировать параметры и форму кольцеобразных наконечников двухполюсного магнита для получения в зазоре между его полюсами протяжённой пространственной области величиной ΔS с высокой однородностью стационарного магнитного поля. Показано, что в результате взаимодействия магнитных полей, создаваемого кольцевыми наконечниками, и поля исходной магнитной системы протяжённость однородности поля ΔS вдоль вектора \mathbf{H}_0 (вдоль оси, соединяющей центры полюсов) увеличилась в 3 раза, а в перпендикулярном направлении – в 2.3 раза. Результаты работы могут быть использованы в тех областях науки и техники, где требуется создание достаточно однородного постоянного магнитного поля, в частности при исследовании распространения спиновых волн в ферритовых плёнках.

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках **государственного задания по теме № 0030-2019-0014** и при частичной финансовой поддержке **Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-07-00356)**.

Список литературы

1. Annenkov A.Yu., Gerus S.V., Lock E.H. Superdirectional beam of surface spin wave // EPL (EuroPhysics Letters) – 2018 – V. 123 – №4 - P.44003-p1 – 44003-p7.
2. Annenkov A.Yu., Gerus S.V., Lock E.H. Superdirected beam of the backward volume spin wave // EPJ Web of Conferences, 2018 – V. 185 – P. 02006-1 - 02006-3.
3. Schill R. A., Karin H. Characterizing and calibrating a large Helmholtz coil at low ac magnetic field levels with peak magnitudes below the earth's magnetic field // Rev. Sci. Instrum. 2001. V. 72. N. 6. P. 2769-2776.
4. [ru.wikipedia.org > wiki > Кольца Гельмгольца](http://ru.wikipedia.org/wiki/Кольца_Гельмгольца)
5. Баранова В.Е., Баранов П.Ф., Муравьев С.В., Учайкин С.В. Создание однородного магнитного поля с помощью системы аксиальных катушек для калибровки магнитометров // Измерительная техника. 2015. № 5. С. 52-56.