

УДК 537.624:537.632

## СИСТЕМА, СОЗДАЮЩАЯ ВЫСОКООДНОРОДНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ МЕЖДУ ПОЛЮСАМИ ДВУХПОЛЮСНОГО МАГНИТА

© 2021 г. С. В. Герус<sup>1</sup>, \*, Э. Г. Локк<sup>1</sup>, А. Ю. Анненков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук, Фрязинский филиал, Фрязино, Россия

\*E-mail: [svg318@ire216.msk.su](mailto:svg318@ire216.msk.su)

Поступила в редакцию 21.06.2021 г.

После доработки 05.07.2021 г.

Принята к публикации 28.07.2021 г.

Разработана магнитная система, создающая стационарное высокооднородное магнитное поле в протяженной области между полюсами двухполюсного магнита. На основе расчетов распределения постоянного магнитного поля и последующих измерений показано, что использование в магните кольцевых наконечников с определенными параметрами позволяет значительно увеличить область пространства с высокой однородностью магнитного поля.

DOI: 10.31857/S0367676521110107

### 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 пленках, необходимо обеспечить существование однородного магнитного поля на достаточно большой поверхности ферритовой пленки, в плоскости которой выполняется зондирование СВЧ характеристик спиновой волны [1–3]. Поскольку ферритовые пленки 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 создается либо постоянным магнитом, изготовленным из высококоэрцитивных магнитных материалов, либо катушками электромагнита. Отметим, что, хотя системы электрических катушек могут создавать достаточно однородное магнитное поле [4–6], 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 усеченного конуса из магнитомягкого желе-

за позволяет лишь немного увеличить эту область, но не обеспечивает требуемой однородности поля в необходимом объеме. В данной работе предложен способ решения этой проблемы на основе современных 3D численных методов расчета 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  $\overline{H}_0$  порядка 1% от величины  $H_0$  на площади  $\sim 50$  на  $50$  мм<sup>2</sup>. Известно, что две соосные радиальные катушки Гельмгольца (см., например, [4, 5]), 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 еще наконечники в виде колец, то последние в значительной степени сконцентрируют магнитное поле, увеличивая его однородность между полюсами. Необходимо лишь рассчитать размеры и конфигурацию этих колец для конкретного двухполюсного магнита.

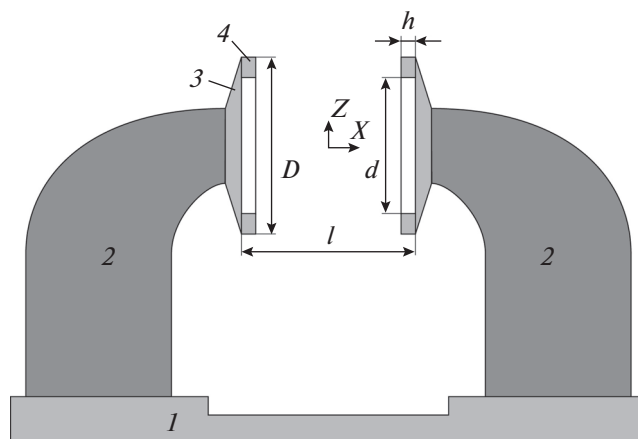
### МОДЕЛЬ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ, СОЗДАЮЩЕЙ СТАЦИОНАРНОЕ ВЫСОКООДНОРОДНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

На рис. 1 представлена модель магнита, использованная в расчетах. Она соответствует реальному магниту, входящему в состав экспериментальной установки по исследованию характери-

стик спиновых волн методом СВЧ зондирования. Также на рис. 1 изображены наконечники в виде колец, параметры которых предстояло рассчитать. При проведении расчетов 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  $\sim 2$  Т), а стационарные составляющие магнита  $2$  – из магнито жесткого материала, причем 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). Расчеты проводились численным методом на основе сеточного разбиения исследуемых областей, представленных на рис. 1. В процессе расчетов 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.

При выполнении расчетов использовалась декартова система координат, центр которой располагался посередине между полюсами магнита (рис. 1). Ниже для характеристики однородности магнитного поля будем использовать термин “протяженность однородной области поля”  $\Delta S$ , 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 расчеты показали, что оптимальной является прямоугольная в сечении форма кольца  $4$ , у которого внешний диаметр  $D$  равен большему диаметру наконечников  $3$ . Было установлено, что максимально протяженную область с однородным магнитным полем между полюсами можно получить за счет вариации внутреннего диаметра колец  $d$  и их толщины  $h$ . В частности, было найдено, что с увеличением толщины кольца  $h$  размер однородной области поля  $\overline{H_0}$  растет в направлениях осей  $Y$  и  $Z$  и уменьшается в направлении оси  $X$ . Обнаружилось также, что протяженность однородной области поля  $\Delta S$  зависит от внутреннего диаметра кольца  $d$  следующим образом: с увеличением величины  $d$  (разность  $D - d$  при этом уменьшается, так как величина  $D$  фиксирована), величина  $\Delta S$  вдоль осей  $Y$  и  $Z$  сначала увеличивается, проходит через максимум, а затем уменьшается, в то время как в направлении оси  $X$  эта протяженность изменяется противополож-



**Рис. 1.** Продольное сечение магнита.  $1$  – основание,  $2$  – элементы магнита из магнито жесткого материала,  $3$  – конические наконечники поля,  $4$  – кольцевые наконечники поля. Элементы  $1$ ,  $3$  и  $4$  выполнены из магнитомягкого железа. Ось  $Y$  системы координат направлена за рисунок.  $D = 180$  мм,  $d = 140$  мм,  $h = 15.5$  мм,  $l = 177$  мм.

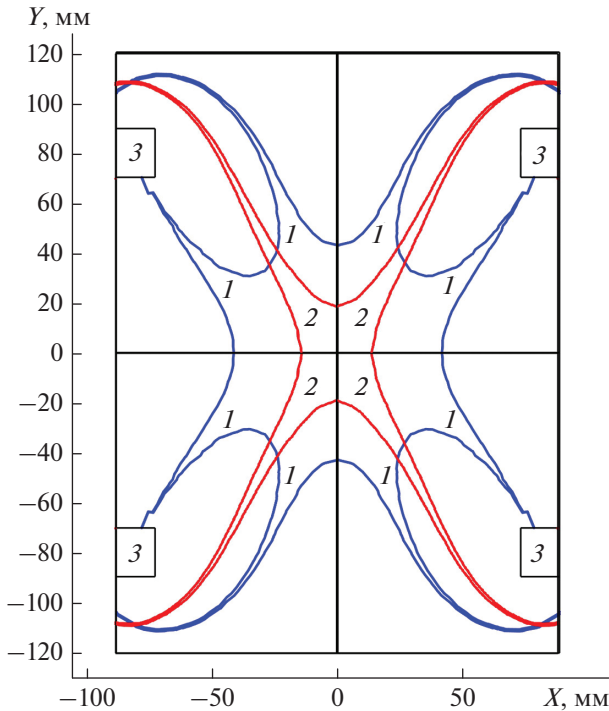
ным образом. На основе расчетов удалось подобрать оптимальные параметры колец  $d$  и  $h$ , при которых величина  $\Delta S$  между полюсами магнита была одинаковой вдоль всех трех осей  $X$ ,  $Y$ , и  $Z$ . Отметим, что все параметры магнитной системы подбирались таким образом, чтобы величина поля  $H_0$  внутри наиболее однородной области поля  $\overline{H_0}$ , расположенной между полюсами магнита, составляла  $H_0 = 500$  Э.

В результате кольцевые наконечники с рассчитанными оптимальными параметрами колец  $d$  и  $h$ , были изготовлены из магнитомягкого железа и включены в состав магнитной системы, представленной на рис. 1.

#### ЗАВИСИМОСТИ ВЫСОКООДНОРОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОТ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ

На рис. 2 и 3 представлены результаты расчетов и экспериментальных измерений величины магнитного поля  $H_0$  вдоль осей координат для оптимальных значений  $d$  и  $h$ , указанных в подписи к рис. 1.

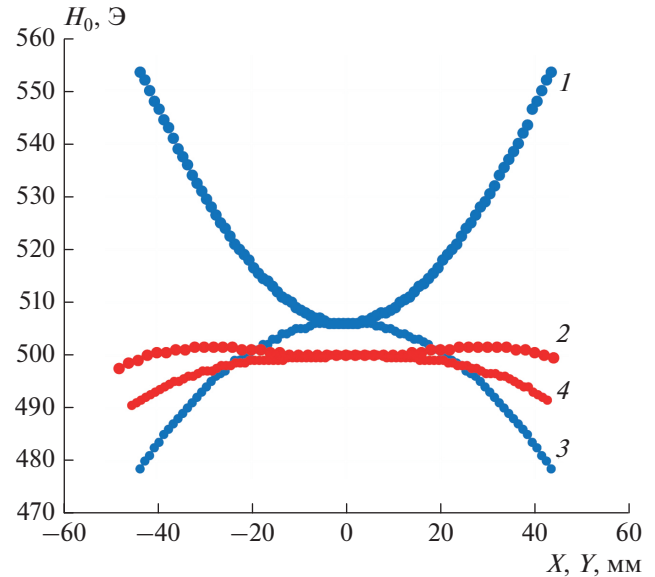
На рис. 2 приведены расчетные линии уровня поля  $H_0$ , ограничивающие в плоскости  $XY$  область, внутри которой величина магнитного поля  $H_0$  лежит в интервале значений  $495 \text{ Э} < H_0 < 505 \text{ Э}$  (т.е. величина  $H_0$  меняется в пределах  $\pm 1\%$  от значения 500 Э). Для магнитной системы, оснащенной кольцевыми наконечниками эти линии описывают кривые  $1$ , а для магнитной системы без кольцевых наконечников – кривые  $2$ . Сравнение



**Рис. 2.** Линии уровня магнитного поля  $H_0$ , ограничивающие в плоскости  $XY$  область, внутри которой величина  $H_0$  изменяется в пределах в пределах  $\pm 1\%$  от значения  $500 \text{ Э}$ : 1 (синие линии) и 2 (красные линии) – соответственно, для магнита с кольцевыми наконечниками и без них. Показаны также сечения кольцевых наконечников плоскостью  $XY$  (прямоугольники 3).

кривых 1 и 2 на рис. 2 позволяет понять, как под влиянием кольцевых наконечников изменяются линии уровня магнитного поля  $H_0$  между полюсами магнита. Так, в отсутствие кольцевых наконечников линии поля  $H_0$ , соответствующие значениям  $H_0 = 500 \text{ Э} \pm 1\%$ , проходят в непосредственной близости от начала декартовой системы координат – точки ( $X = 0, Y = 0, Z = 0$ ) (см. кривые 2 на рис. 2). При наличии кольцевых наконечников линии поля  $H_0$  данного уровня располагаются намного дальше от этой точки (см. кривые 1 на рис. 2), ограничивая намного более протяженную область пространства, внутри которой величина  $H_0$  изменяется в пределах  $\pm 5 \text{ Э}$  от значения  $H_0(X = 0, Y = 0, Z = 0) = 500 \text{ Э}$ , причем внутри этой области линии напряженности вектора  $\vec{H}_0$  почти параллельны оси  $X$  (на рисунках изменение линий напряженности вектора  $\vec{H}_0$  не представлено).

Для подтверждения рассчитанных выше характеристик однородности поля были выполнены измерения величины  $H_0$  вдоль осей декартовой системы координат при наличии и при отсутствии в магнитной системе кольцевых наконечников с оптимальными параметрами (рис. 3).



**Рис. 3.** Зависимости  $H_0(X)$ , измеренные при отсутствии и при наличии кольцевых наконечников (кривые 1 и 2, соответственно) и аналогичные зависимости  $H_0(Y)$  (кривые 3 и 4, соответственно).

Как видно по изменению поля  $H_0$  вдоль оси  $X$  (при  $Y = 0, Z = 0$ ), в отсутствие кольцевых наконечников 4 величина  $H_0$  принимает максимальные значения на внешней поверхности конических наконечников 3, а вблизи точки  $X = 0$  величина  $H_0$  минимальна (см. кривую 1 на рис. 3). 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 протяженная однородная область поля с незначительным изменением величины  $H_0$  на расстоянии порядка 90 мм (кривая 2), причем форму кривой 2 можно менять путем варьирования толщины колец  $h$ .

Зависимости поля  $H_0(Y, X = 0, Z = 0)$  при отсутствии и при наличии кольцевых наконечников описывают, соответственно, кривые 3 и 4 на рис. 3. Как видно, в обоих случаях вблизи точки  $Y = 0$  поле имеет максимальное значение, спадая с увеличением абсолютных значений  $Y$ . При отсутствии кольцевых наконечников зависимость  $H_0(Y)$  напоминает параболу, причем протяженность однородной области поля  $\Delta S$  вблизи точки  $Y = 0$  очень мала, порядка нескольких миллиметров (кривая 3). С появлением колец протяженность этой области значительно повышается, хотя ее центр по-прежнему оказывается локализован вблизи точки  $Y = 0$  (кривая 4).

Отметим, что зависимости  $H_0(Z, X = 0, Y = 0)$  практически идентичны приведенным на рис. 3 зависимостям  $H_0(Y)$ , отличаясь лишь небольшой

асимметрией  $\sim 1$  Э из-за соответствующей асимметрии используемого магнита.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, решена задача значительного увеличения области однородного поля между полюсами постоянного магнита. На основе современных численных методов рассчитаны и оптимизированы параметры и форма кольцеобразных наконечников двухполюсного магнита для получения в зазоре между его полюсами протяженной пространственной области величиной  $\Delta S$  с высокой однородностью стационарного магнитного поля. Показано, что в результате взаимодействия магнитного поля исходной магнитной системы и поля, создаваемого кольцевыми наконечниками, протяженность однородности поля  $\Delta S$  вдоль вектора  $\vec{H}_0$  (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 пленках.

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.* // EPL. 2018. V. 123. No. 4. Art. No. 44003.
2. *Annenkov A.Yu., Gerus S.V., Lock E.H.* // EPJ Web Conf. 2018. V. 185. Art. No. 02006.
3. *Анненков А.Ю., Герус С.В., Локк Э.Г.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 2. С. 181; *Annenkov A.Yu., Gerus S.V., Lock E.H.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 2. P. 141.
4. *Schill R.A., Karin H.* // Rev. Sci. Instrum. 2001. V. 72. No. 6. P. 2769.
5. [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%86%D0%B0\\_%D0%93%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BC%D0%B3%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%86%D0%B0](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%86%D0%B0_%D0%93%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BC%D0%B3%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%86%D0%B0).
6. *Баранова В.Е., Баранов П.Ф., Муравьев С.В., Учайкин С.В.* // Измерит. техн. 2015. № 5. С. 52; *Baranova V.E., Baranov P.F., Muravyov S.V., Uchaikin S.V.* // Meas. Tech. 2015. V. 58. No. 5. P. 550.

## Magnetic system creating a highly uniform magnetic field between the poles of bipolar magnet

S. V. Gerus<sup>a,\*</sup>, E. H. Lock<sup>a</sup>, A. Yu. Annenkov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences (Fryazino Branch), Fryazino, 141190 Russia*

\**e-mail: svg318@ire216.msk.su*

Magnetic system creating a stationary highly uniform magnetic field in an extended region between the poles of bipolar magnet has been developed. Based on the calculations of constant magnetic field distribution and subsequent measurements, it has been shown that the use of ring tips with certain parameters in a magnet can significantly increase the area of space with a high uniformity of magnetic field.