

УДК 004+53.04

И.А. Громько

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков

ПЛОСКАЯ СПИРАЛЬНАЯ КАТУШКА В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕМЕНТА НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИБОРОВ

В статье раскрыта физическая сущность нового физического эффекта. В известных конструкциях плоских катушек (проводников с током) обнаружена полная компенсация магнитного поля с образованием «нулевой зоны», которую целесообразно использовать при разработке радиоизмерительных приборов.

Ключевые слова: магнитное поле, датчики Холла, приборостроение.

Введение

Общеизвестно, что вокруг проводника с электрическим током возникает магнитное поле, которое описывается силовыми линиями.

Силовыми линиями магнитного поля называются линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции. Их свойства являются общими для любых векторных полей, а именно: они не пересекаются и не имеют изломов.

Наиболее наглядным примером визуализации силовых линий магнитного поля является их воздействие на мелкодисперсный порошок железа (рис. 1). На рисунке показаны силовые линии магнитного поля простейшей конструкции, состоящей из группы проводников с током. Эта конструкция, получившая название «соленоид», более ста лет применяется в качестве наглядного пособия для показа структуры силовых линий магнитного поля.

Магнитное поле, как электрическое, электромагнитное (совокупность магнитного и электрического) поля, является носителем, который позволяет в определенных условиях перемещать информацию в пространстве со скоростью, близкой к скорости распространения света в вакууме – 300000000 м/сек.

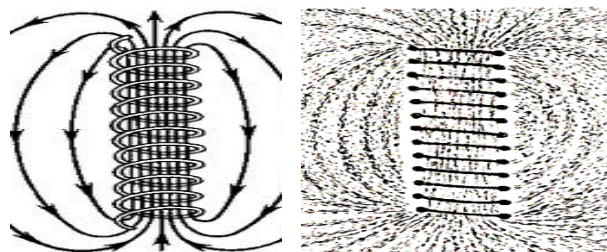


Рис. 1. Визуализация силовых линий магнитного поля (справа)

Принято считать, что если рассматривать конструкцию соленоида, в котором виток к витку первая и последующие обмотки наложены (намотаны) одна на другую вокруг его осевой линии, то силовые линии магнитного поля имеют вид, приведенный выше.

Если изготовить соленоид, применяя многорядную намотку проводника способом «виток к витку», то мы получим многорядный соленоид – катушку. Также, принято считать, что структура силовых линий магнитного поля в одной плоскости представляет собой набор концентрических окружностей, а в другой плоскости – математический символ «бесконечность». Такая структура образуется в результате суперпозиции магнитных полей от каждого отдельного проводника катушки с током (рис. 2).

Такой же вид имеют силовые линии магнитного поля соленоида, в котором первая и последующие спиральные обмотки виток к витку наложены (намотаны) одна на другую. При этом соленоид состоит как бы из набора плоских спиральных катушек.

9 января 1984 года такой способ укладки проводов (проводников с током) и двух плоских спиралей запатентовал Никола Тесла (патент № 512340) с целью уменьшения потерь энергии из-за процесса самоиндукции (рис. 3).

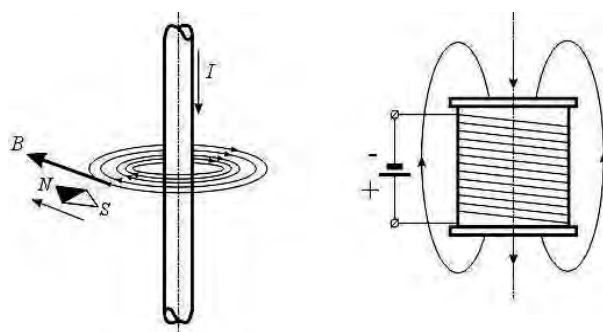


Рис. 2. Вид силовых линий магнитного поля проводника и катушки с током

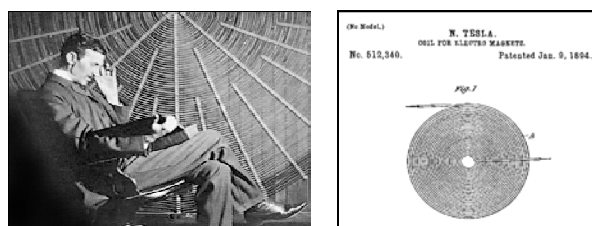


Рис. 3. Никола Тесла на фоне проводников плоской спиральной катушки

С использованием современных миниатюрных датчиков Холла был изучен реальный вид силовых линий магнитного поля конструкции [1–3]. Обнаружена аномалия в структуре силовых линий магнитного поля плоских спиральных катушек независимо от их диаметра и материала (Cu, Al), что позволяет говорить об обнаружении нового физического эффекта в виде образования нулевой зоны в структуре силовых линий магнитного поля соленоида. Результаты эксперимента опубликованы в Украине и за рубежом в научном сборнике трудов EURESCO [3]. Однако, данный эффект не используется в виду отсутствия информации у специалистов.

1. Расчетно-аналитические исследования

Рассмотрим отличие обнаруженной новой структуры силовых линий магнитного поля от общепринятого вида структуры (рис. 4), считающегося классическим. В качестве примера такая структура силовых линий магнитного поля опубликована в работах академика Владимира Федоровича Уткина – генерального конструктора КБ «Южное» (Украина), который досконально изучал труды Николы Тесла с целью их применения в области ракетно-космической техники [4]. Для наглядности покажем полный вид общеизвестной структуры силовых линий магнитного поля в соответствии с общепринятыми требованиями классической физики магнетизма (рис. 5).

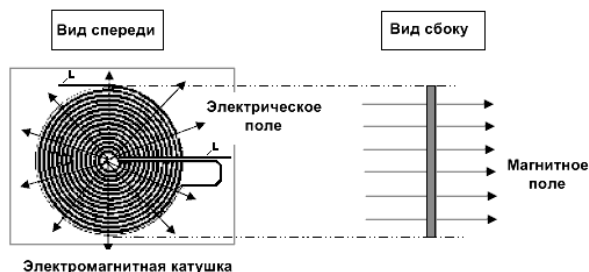


Рис. 4. Общепринятая структура силовых линий магнитного поля в зоне, примыкающей к виткам плоской спиральной катушки

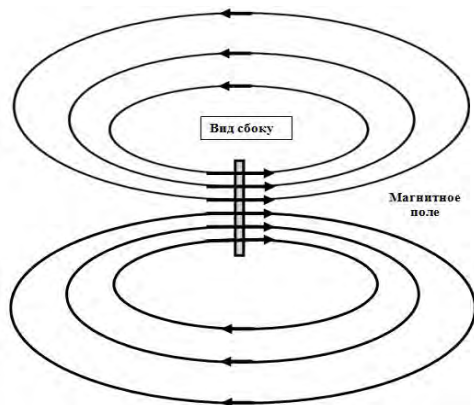


Рис. 5. Общепринятая структура силовых линий магнитного поля в ближней зоне (зоне витков) плоской спиральной катушки и за ее пределами

В результате получим вид силовых линий магнитного поля, который подобен виду, приведенному на рис. 1.

Ниже приведены результаты математического моделирования, метрологических замеров и классического эксперимента, подтверждающие наличие обнаруженного физического эффекта.

Типичные теоретические схемы расчетов токовых элементов [5–10] ограничены применимостью только к симметричным задачам и не позволяют получить аналитическое решение задач, относящихся к классу несимметричных. Это обстоятельство существенно ограничивает расчет напряженности магнитного поля вблизи проводников с током.

Предложенная методика основана на математическом и компьютерном моделировании параметров активных токовых элементов.

При программной реализации предлагаемой модели внимание было сконцентрировано на плоской катушке в виде спирали Архимеда. Никола Тесла отметил, что такая конструкция катушки увеличивает КПД и уменьшает габариты устройств [11].

В общем случае магнитное поле проводника с током произвольной конфигурации (например, катушки) может быть получено известным методом суперпозиции полей элементарных линейных участков, составляющих данный проводник.

2. Основная часть

2.1 Дискретизационная математическая модель

Объект исследования, структура магнитного поля плоской катушки выполненной в виде спирали, может быть представлена суперпозицией полей концентрических *отдельных дискретных витков*, диаметр которых изменяется в соответствии с шагом спирали. В свою очередь, виток состоит из бесконечно малых отдельных *прямолинейных участков*. При этом магнитное поле каждого витка вычисляется как суперпозиция полей составляющих его дискретных участков (ДУ), а точность результатов моделирования пропорциональна их количеству.

Численное решение построенной таким образом математической модели позволяет получить значение индукции магнитного поля сложной конфигурации проводников в любой точке пространства [12]. Практическая реализация разработанной модели для плоской катушки включает такие этапы.

А. Вычисление магнитной индукции поля ДУ в любой точке пространства (ТП) по закону Био – Савара – Лапласа:

$$\Delta \mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left(\frac{\Delta \mathbf{L} \times \mathbf{r}}{r^3} \right), \quad (1)$$

где $\Delta \mathbf{L} = (\Delta L_x; \Delta L_y; \Delta L_z)$ – дискретный участок; $\mathbf{r} = (r_x; r_y; r_z)$ – исследуемая точка.

Если векторное произведение $\Delta \mathbf{L} \times \mathbf{r}$ обозначить через вспомогательный вектор \mathbf{k} ($\mathbf{k} = \Delta \mathbf{L} \times \mathbf{r}$), то, согласно рис. 6, с учетом формул (2), следует выражения (3) и (4):

$$\begin{aligned} \Delta L_x &= \Delta L \cos \alpha; \\ \Delta L_y &= \Delta L \sin \alpha \cos \gamma; \\ \Delta L_z &= \Delta L \sin \alpha \sin \gamma; \end{aligned} \quad (2)$$

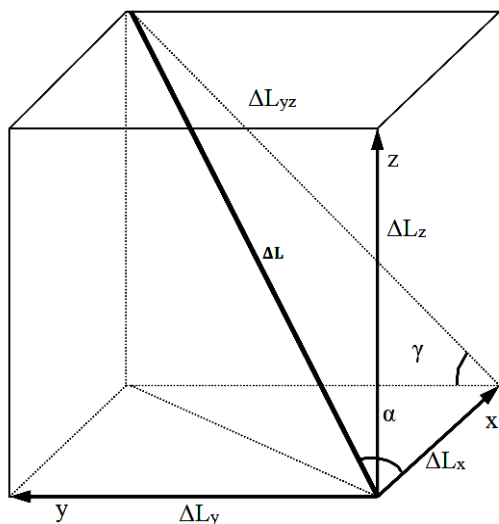


Рис. 6. Определение ориентации ДУ

$$\begin{aligned} |\mathbf{k}| &= |\Delta \mathbf{L} \times \mathbf{r}| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}; \\ k_x &= \begin{vmatrix} \Delta L_y & \Delta L_z \\ r_y & r_z \end{vmatrix} = \Delta L_y r_z - r_y \Delta L_z; \\ k_y &= \begin{vmatrix} \Delta L_z & \Delta L_x \\ r_z & r_x \end{vmatrix} = \Delta L_z r_x - r_z \Delta L_x; \\ k_z &= \begin{vmatrix} \Delta L_x & \Delta L_y \\ r_x & r_y \end{vmatrix} = \Delta L_x r_y - r_x \Delta L_y; \\ |\mathbf{r}| &= \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2}; \\ r_x &= x_i - x; \\ r_y &= y_i - y; \\ r_z &= z_i - z, \end{aligned} \quad (3)$$

где (x_i, y_i, z_i) – координаты ДУ; (x, y, z) – координаты произвольной точки пространства.

Б. Вычисление магнитного поля витка.

Для этого необходим последовательный расчет влияния всех участков с учетом их пространственного местонахождения и линейных размеров проекций участков.

Для упрощения вычисления виток размещается в одной из плоскостей пространства (плоскости x-y) (рис. 7).

Тогда проекции ДУ определяются таким образом:

$$\begin{aligned} \Delta L_{x_i} &= \Delta L \cdot \sin \alpha; & x_i &= R \cdot \cos \beta; \\ \Delta L_{y_i} &= \Delta L \cdot \cos \alpha; & y_i &= R \cdot \sin \beta; \\ \Delta L_{z_i} &= 0; & z_i &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где $i = 1 \dots N$; $\beta = 0 \dots 360^\circ$ с шагом $2\pi/N$; $\Delta L = 2\pi R/N$; N – количество участков витка (определяет точность расчетов); R – радиус витка.

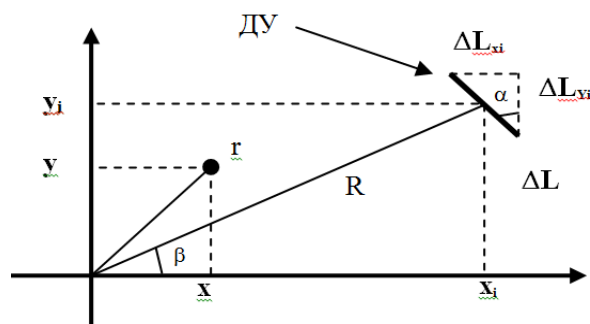


Рис. 7. Прямолинейный дискретный участок

Результатом этих действий является значение магнитной индукции – B_R , созданной всеми участками витка.

В. Вычисление общей магнитной индукции в ТП:

Осуществляется по принципу суперпозиции индукции витков, создающих спираль:

$$B_{\text{полн}} = B_{R1} + B_{R2} + \dots + B_{R_{m-1}} + B_{R_m}, \quad (6)$$

где R_m – радиус внешнего витка (кольца) спирали.

Определение магнитной индукции спирали проводится в такой последовательности (рис. 8):

Разработанный алгоритм может быть реализован на персональном компьютере в любой среде разработки приложений. Сравнительные результаты вычислений и экспериментальных исследований (измерений) приведены ниже.

Целью экспериментальных исследований являлось подтверждение результатов математического и компьютерного моделирования путем измерений и визуализация структуры магнитного поля с помощью общеизвестного классического метода.

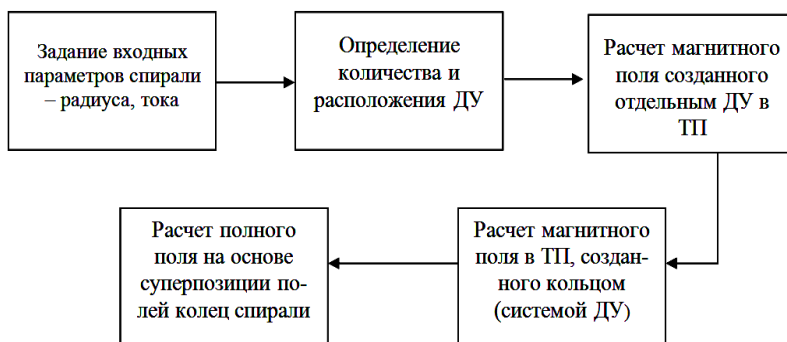


Рис. 8. Последовательность вычисления $B_{\text{полн}}$

В ходе проведенных экспериментов была получена информация о конфигурации магнитного поля в ближней зоне традиционных простых магнитных генераторов кольцевой конструкции и более сложных спиральных конструкций, применяемых в спецтехнике.

2.2 Практические исследования: измерения, эксперимент

Для изучения конфигурации магнитного поля была применена измерительная установка, схема которой показана на рис. 9.

Установка позволяет сканировать датчиком Холла магнитное поле катушки в выбранной плоскости. При этом возможно измерение как нормальной, так и тангенциальной составляющих магнитного поля.

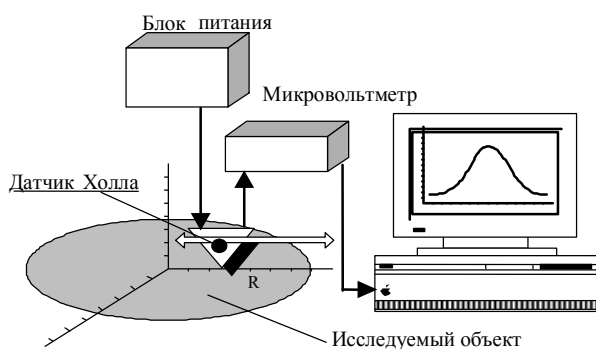


Рис. 9. Схема установки для изучения конфигурации магнитного поля

Измерительным элементом является плоский датчик Холла ДХК-0,5А размером 2х2х0,5 мм с анизотропной чувствительностью порядка величины магнитного поля Земли ($H \sim 30 \text{ А/м}$).

Результаты измерений, полученные с помощью ДХК-0,5А, перепроверены с помощью чувствительных быстродействующих экспериментальных единичных экземпляров датчиков Холла ПДХ, выбранных из опытной партии случайным образом и любезно предоставленных ранее автору коллективом ученых Российской Академии Наук.

Параметры датчика приведены в табл. 1.

Измерения состояли из трех этапов:

1) тарирование установки в магнитном поле линейного тока. При этом контролировалось соответствие результатов измерений вектора напряженности магнитного поля (по величине и ориентации)

расчетным значениям, которые для линейного тока общеизвестны;

2) получение зависимости нормальной компоненты магнитного поля от координаты $H(R)$ для круглого витка (окружности) с током радиусом 85 мм;

3) сканирование поверхности спирали датчиком Холла для измерения зависимости нормальной компоненты магнитного поля от координаты $H(R)$ (рис. 10).

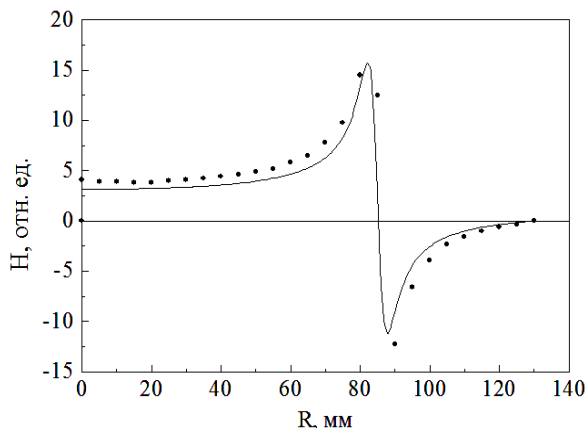


Рис. 10. Расчетная и измеренная зависимости вектора магнитной индукции по мере удаления от центра витка

На рис. 10 приведены измеренная (показано точками) и расчетная (показано линией) зависимости нормальной компоненты магнитного поля кругового витка с током. Здесь нулевая координата оси абсцисс – центр витка.

Наблюдается увеличение значения вектора магнитной индукции по мере удаления от центра витка. При выходе за пределы витка радиусом 85 мм магнитное поле меняет направление и при удалении от проводника ослабевает. Отметим, что эта зависимость несимметрична относительно радиуса витка, поскольку внутри витка магнитное поле однородно по направлению, тогда как вне витка возникает противодействие магнитных полей от различных его дискретных участков.

Как видно из рисунка, полученные расчетная и измеренная зависимости принципиально идентичны. Незначительные отклонения наблюдаемых пиковых значений обусловлены конечными размерами датчика Холла, вследствие чего эмпирическая зависимость выглядит более гладкой.

Таблица 1

Параметры датчика Холла из опытной партии ПДХ

Напряжение питания – $V_{п}, \text{ В}$	Ток канала ПДХ – $I_{к}, \text{ мкА}$	Напряжение на затворах ПДХ – $V_{з}, \text{ В}$	Остаточное напряжение Холла – $V_{о}, \text{ мВ}$	Напряжение Холла – $V_{х}, \text{ мВ}$	Темпер. окруж. среды – $T^{\circ}, \text{ C}$
9	280	9	2,8	48,3	24,4
5	96	5	2,9	29	24,4
3	37	3	3	18,1	24,4
1,5	10,8	1,5	3,1	9,5	24,4

Данные результаты доказывают верность предложенного и использованного алгоритма расчета и возможность его применения для анализа других конфигураций (токовых конструкций), составным элементом которых является виток.

Автор провел исследование различных плоских спиралей. В частности, были исследованы медные и алюминиевые спирали разных размеров, выполненные из проводов различного диаметра.

На рис. 11 приведены результаты для спирали: медный провод диаметром 0,4 мм, шаг спирали – 0,45 мм, внешний радиус – 235 мм.

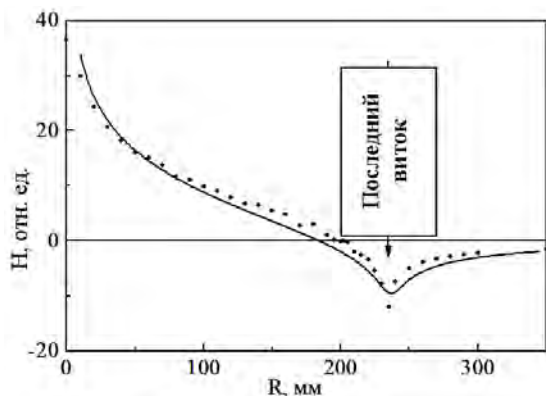


Рис. 11. Измеренная (точки) и теоретическая (линия) конфигурации магнитного поля плоской спирали

Особый интерес вызывает результат измерения и теоретическая конфигурация (нормальной компоненты) магнитного поля для спиралевидного проводника с током. Области значений магнитного поля относительно нулевой линии соответствуют противоположным (!) направлениям вектора его напряженности.

В пределах поверхности спирали обнаружена зона с нулевой напряженностью магнитного поля. Таким образом, конфигурация магнитного поля в ближней зоне спирали не является тривиальной. На поверхности спирали теоретически предсказан и практически обнаружен участок с нулевой напряженностью, относительная координата которого стабильна и составляет около $0,87 R$. Это значение является определенной константой, неизменной для различных радиусов и материалов спирали [3].

Согласно принципу суперпозиции полей и разработанному алгоритму расчета этот неожиданный результат может быть объяснимым, но он не является очевидным и может быть представлен как новый физический эффект.

Эксперименты с «ферромагнитным» запылением наглядно подтверждают наличие у поверхности спирали кругового участка, где напряженность нормальная к поверхности составляющей магнитного поля равна нулю («нулевая зона») (рис. 12). Ближе к краю спирали и вне ее плоскости уровень напряженности уменьшается до малых значений.

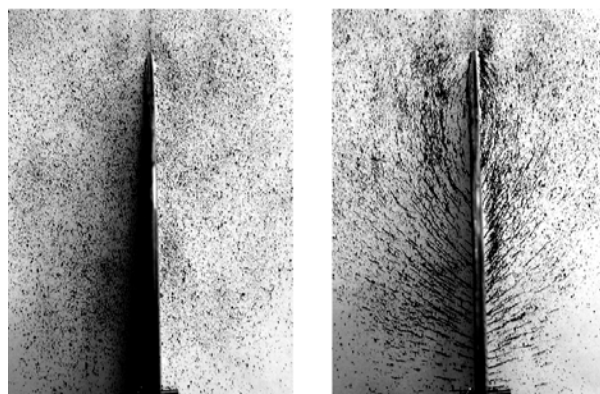


Рис. 12. Положение ферромагнитных опилок при отсутствии (слева) и наличии тока (справа) в проводнике плоской спирали

Несмотря на то, что магнитные свойства ферромагнитной пыли (мелких железных опилок) влияют на конфигурацию магнитного поля, наличие нулевой зоны не подлежит сомнению (рис. 13).

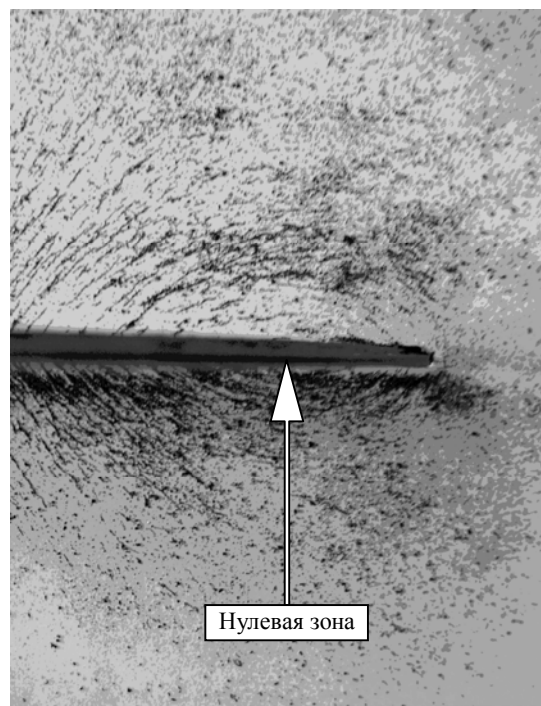


Рис. 13. Визуализация нулевой зоны на плоскости, перпендикулярной поверхности спирали с током

Важно отметить тот факт, что токи протекают по проводникам спирали в одном и том же направлении, и при этом вокруг витков, расположенных на расстоянии от центра спирали, превышающем $0,87$ радиуса, суперпозиция силовых линий магнитного поля приводит к развороту вектора напряженности на 180 градусов. Таково проявление магнитной аномалии.

В «нулевой зоне» полностью отсутствует напряженность магнитного поля. Здесь создаются условия, способствующие возникновению различных

вихревых магнитных процессов, связанных с суперпозицией магнитных полей системы проводников и магнитного поля внешней среды. Это требует проведения дальнейших исследований с целью практического применения нового физического эффекта.

Фактически, обнаружена явная дискретность магнитного поля, разделяемая нулевой зоной – витком с координатой 0,87 радиуса спирали, вблизи которого магнитное поле отсутствует.

Корректность результатов моделирования многократно подтверждена экспериментально.

Это явление меняет представление о катушке с током как о системе, которая, как ранее считалось, формирует однородное магнитное поле.

Распределение силовых линий магнитного поля приведено на рис. 14.

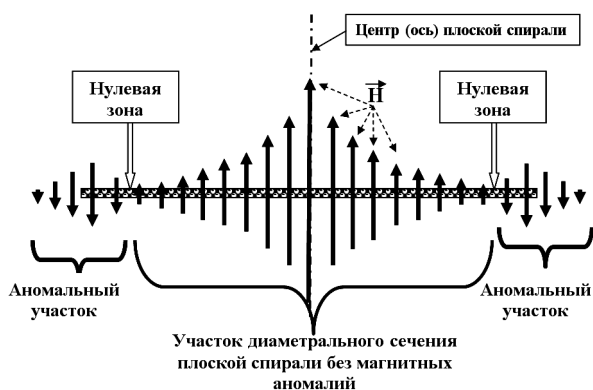


Рис. 14. Пример дискретной структуры магнитного поля в сечении плоской спирали с током

Выводы

Отличающееся от общепринятого распределение силовых линий магнитного поля, как физическое явление «полной компенсации нормальной составляющей магнитного поля в ближней зоне постоянного «спиралеподобного» тока», позволяет ввести понятие «КПД катушек с током» и говорить об оптимальном использовании энергии магнитного поля в таких конструкциях.

Дополнительные исследования позволяют применить новый физический эффект при разработке ряда принципиально новых измерительных прибо-

ров, и в том числе для совершенствования нанотехнологических процессов.

Эксперименты по дискретизации носителя информации – магнитного поля позволяют сосредоточить внимание конструкторов на новом эффекте.

Перспективным может оказаться использование «нулевой зоны» силовых линий магнитного поля плоских спиралевидных катушек при разработке конструкций магнитометров нового поколения. Так, применение нанотехнологий в данных конструкциях позволит их минимизировать и повысить устойчивость к внешним механическим нагрузкам.

Список литературы

1. Фролов А.В. Новые космические технологии / А.В. Фролов – Тула : ТулГУ, 2012. – 379 с.
2. Громыко И.А. Воздействие энергии магнитной составляющей поля на живую природу / И.А. Громыко, А.В. Мячиков, В.В. Носов // Вестник науки и техники. – 2002. – Вып. 6. – 54 с.
3. Gromyko I.A. Abstract «Magnetic field of spiral coil's near-field zone» / I.A. Gromyko, V.V. Toryanik // EURESCO Conferences 2003, AFID 28488, AFID 28494.
4. Уткин В.Ф. Теоретические основы теслатехники [Электронный ресурс] / В.Ф. Уткин. – Режим доступа к ресурсу : <http://tarielkapanadze.ru/kelly5-1.htm>.
5. Никольский В.В. Теория электромагнитного поля / В.В. Никольский. – М. : Высш. шк., 1964. – 364 с.
6. Кнопфель Г.С. Сверхсильные эмпирические магнитные поля / Г.С. Кнопфель. – М. : Мир, 1972. – 391 с.
7. Берклевский К.Е. Электричество и магнетизм. Т. 2. / К.Е. Берклевский. – М. : Наука, 1975. – 440 с.
8. Тозони О.В. Расчет трехмерных электромагнитных полей / О.В. Тозони, И.Д. Маергойз. – К. : Техника, 1974. – 352 с.
9. Бинс К. Анализ расчет электрических и магнитных полей / К. Бинс. – М. : Энергия, 1970. – 375 с.
10. Бэрк Г.Ю. Справочник по магнитным явлениям / Г.Ю. Бэрк. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 384 с.
11. Юрцев О.А. Спиральные антенны / О.А. Юрцев, А.В. Казарин, Н.М. Рунов. – М. : Сов. радио, 1974. – 223 с.
12. Гулд Х. Компьютерное моделирование в физике / Х. Гулд, Я. Тобочник. – М. : Мир, 1994. – 352 с.

Поступила в редколлегию 19.01.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.А. Можаяев, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

ПЛОСКА СПІРАЛЬНА КОТУШКА В ЯКОСТІ ЕЛЕМЕНТА НОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИБАДІВ

І.О. Громико

У статті розкрито фізична сутність нового фізичного ефекту. У відомих конструкціях плоских котушок (провідників зі струмом) виявлена повна компенсація магнітного поля з утворенням «нульової зони», яку доцільно використовувати при розробці радіовимірвальних приладів.

Ключові слова: магнітне поле, датчики Холла, приладобудування.

FLAT SPIRAL COIL AS PART OF THE NEW DESIGN OF MEASURING DEVICES

I.A. Gromyko

The article describes physical nature of a new physical effect. Full compensation of the magnetic field with forming a "zero zone", which is advisable be used in the development of radio measuring devices, was found in the known designs of flat coils (current-carrying conductors).

Keywords: magnetic field, Hall sensors, instrument engineering.