



АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПЛОСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

БОГАЧ Н.В., НИКИШЕНКО А.Н.

Анализируется распределение магнитного поля в пространстве, индуцированного плоской катушкой определенной формы. Рассматриваются три вида плоских катушек: кольцевая, подковообразная, в форме спирали Архимеда (спиральная).

Введение

Для создания переменных пульсирующих и импульсных магнитных полей в медицине (магнитотерапия) и радиотехнике широко используются индукторы в виде соленоидов, цилиндрических и нецилиндрических коротких катушек, электромагнитов с сердечниками различной конфигурации, выполненными из различных материалов. Описание и исследование распределения магнитных полей данных индукторов освещено в научной литературе [1]. Но кроме перечисленных видов катушек в технике широко используются плоские катушки. Описание и исследование магнитных полей, порождаемых данным видом индукторов, не встречается в литературе из-за сложности расчета и многообразия форм катушек этого типа. Для решения данной проблемы было разработано программное обеспечение, позволяющее рассчитывать распределение магнитных полей в ближней зоне плоских катушек произвольной формы [2]. Цель работы — провести расчет и анализ магнитных полей наиболее распространенных видов плоских катушек, применяемых в радио- и медицинской аппаратуре.

1. Материалы исследования

Любой источник магнитного поля обладает разными полюсами (N — северный, S — южный), имеет

замкнутые силовые линии (принято направление от северного к южному полюсу). У источников переменного магнитного поля полюса меняются периодически в соответствии с изменением направления тока. Магнитное поле индуктора характеризуется вектором магнитной индукции B , вектором напряженности магнитного поля H , градиентом магнитной индукции $\text{grad}B$ [1].

Модель плоской катушки создается в программной среде MATLAB. Входные параметры модели — плоский излучающий элемент, параметры тока в катушке, область расчета, выходные — карты распределения векторов магнитной индукции в узлах сетки заданной области расчета. Для проверки правильности созданной модели проведен ряд экспериментов, которые подтвердили достоверность результатов моделирования [3]. При моделировании во всех катушках задавался ток амплитудой 10 А. Вектор магнитной индукции B представлен матрицей, элементами которой являются три составляющие (X -, Y -, Z -составляющие) индукции магнитного поля с привязкой к трехмерной системе координат. Точка начала координат, внешний вид и расположение катушек в системе отсчета указаны на рис. 1.

Исходя из габаритных размеров катушек и принятого диаметра провода, рассчитана индуктивность плоских катушек. Индуктивность кольцевой катушки с радиусом r и диаметром провода d рассчитывается согласно формуле (1); индуктивность подковообразной катушки с длиной параллельных концов l , радиусом кривизны r и диаметром провода d рассчитывается по формуле (2); индуктивность спиральной катушки с числом витков ω , внутренним радиусом каркаса r , расстоянием между витками h и диаметром провода d рассчитывается согласно формуле (3) [4]:

$$L = \mu_0 \int_0^\pi \frac{(r + d/2)r \cos \phi \cdot d\phi}{\sqrt{(r + d/2)^2 + r^2 - 2r(r + d/2)\cos \phi}}; \quad (1)$$

$$L = \mu_0 \left(\frac{1}{\pi} \ln \frac{4r}{d} + \int_0^{\pi/2} \frac{(r + d/2)r \cos \phi \cdot d\phi}{\sqrt{(r + d/2)^2 + r^2 - 2r(r + d/2)\cos \phi}} \right); \quad (2)$$

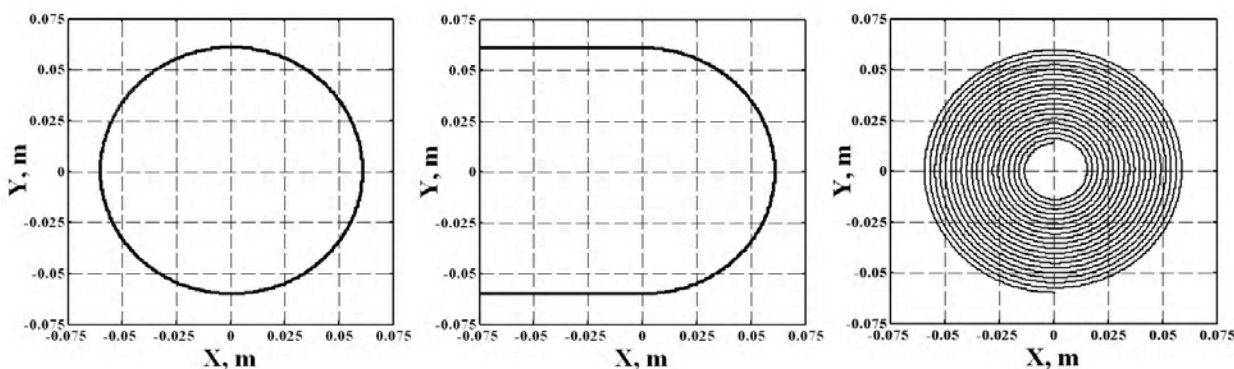


Рис. 1. Внешний вид плоских катушек (слева направо: кольцевая, подковообразная, спиральная)

$$L = \mu_0 \sum_{k=0}^{\omega-1} \sum_{m=0}^{\omega-1} \int_0^{\pi} \frac{(r+h \cdot k + h/2)(r+h \cdot m + (h-d)/2) \cos \phi \cdot d\phi}{\sqrt{(r+h \cdot k + h/2)^2 + (r+h \cdot m + (h-d)/2)^2 - 2(r+h \cdot k + h/2)(r+h \cdot m + (h-d)/2) \cos \phi}} \cdot \quad (3)$$

Индуктивность плоских катушек при заданных габаритных размерах

Параметр	Кольцевая катушка	Подковообразная катушка	Спиральная катушка
Внутренний радиус (r), мм	60	60	12,8
Диаметр провода (d), мм	2	2	2
Длина параллельных концов (l), мм	—	75	—
Число витков (ω)	—	—	19
Расстояние между витками (h), мм	—	—	0,2
Индуктивность (L), мкГн	0,016	0,095	21,1

2. Обсуждение результатов

Из рассматриваемых типов плоских катушек одновитковая кольцевая плоская катушка является наиболее простой и наиболее полно освещенной в литературе, поэтому приведем сокращенный обзор магнитного поля данной катушки.

Поле неравномерно и неоднородно. Первое, на что стоит обратить внимание – симметрия модуля магнитной индукции поля относительно оси вращения. Эта симметрия сохраняется для аксиальной Z-составляющей и для радиальной составляющей B_r , которая определяется согласно формуле (4). X- и Y- составляющие магнитного поля обладают зеркальной симметрией относительно геометрического центра катушки. На рис. 2 показаны зависимости X-, Z-составляющих и модуля индукции магнитного поля от координаты вдоль диаметра на высоте 5 мм. Модуль вектора магнитного поля имеет максимальное значение порядка 0,37 мТл в области, расположенной непосредственно над витком катушки. При удалении от витков во внешнюю область модуль вектора магнитной индукции спадает до значения в 0,1 мТл (составляет 27% от максимального) на расстоянии 1,5 см от витка, т.е. наблюдается резкий спад величины модуля магнитной индукции при удалении от витка.

При приближении к центру катушки модуль вектора магнитной индукции также уменьшается и достигает минимального значения 0,1 мТл в центре катушки. Данное распределение можно наблюдать на рис. 3. Изменение индукции магнитного поля в центре катушки вдоль Z-координаты (вдоль оси симметрии) совпадает с аналитическим описанием согласно формуле (5), где z — расстояние от плоскости кольца до точки, в которой происходит измерение, R — радиус катушки:

$$B_r = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}; \quad (4)$$

$$B = \frac{1}{\mu \cdot \mu_0} \frac{I \cdot R^2}{2(R^2 + z^2)^{3/2}}. \quad (5)$$

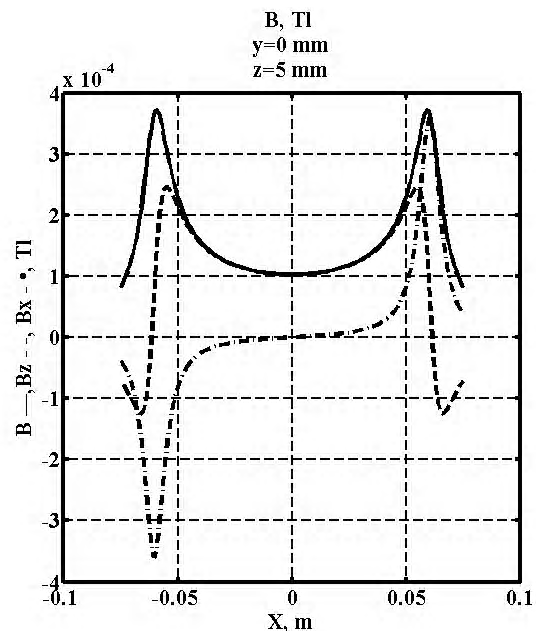


Рис. 2. Модуль, Z-, X- составляющие индукции магнитного поля кольцевой плоской одновитковой катушки с током на высоте 5 мм над плоскостью катушки

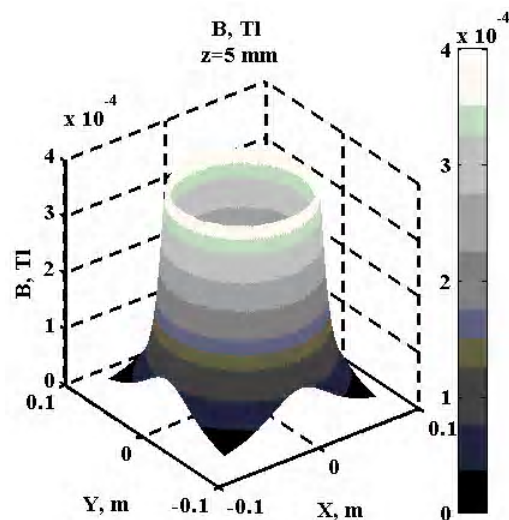


Рис. 3. Модуль магнитного поля кольцевой плоской одновитковой катушки с током на высоте 5 мм над ее плоскостью

Перейдем к следующему виду излучающей катушки – подковообразному индуктору. Катушка представляет собой два параллельных проводника с током. Изгиб, которым соединяются два параллельных участка, является сектором окружности с диаметром, равным расстоянию между параллельными участками. Нами рассматривается участок катушки с изгибом (диаметр 12 см) и частью параллельных проводников протяженностью 7,5 см. Данный участок катушки является наиболее информативным с точки

зрения анализа вида генерируемого ею магнитного поля. Это связано с тем, что поле остальной части катушки будет совпадать с полем на границе рассмотрения. Как дальше будет показано, при расстоянии от центра изгиба, большем радиуса изгиба, искажение в магнитном поле параллельных проводников, вызванное участком с изгибом, уже не наблюдается.

Индукция магнитного поля в области изгиба по характеру распределения мало чем отличается от индукции магнитного поля кругового витка, рассмотренного выше. При удалении от этой области можно наблюдать магнитное поле, вызванное лишь параллельными проводниками с разнонаправленными токами. Данное магнитное поле имеет ярко выраженные максимумы индукции вблизи проводников с током, при удалении от проводника на 10 мм модуль индукции уменьшается в 4 раза, к тому же это не зависит от направления удаления, индукция магнитного поля спадает как при удалении от катушки, так и при приближении к центру (равноудаленной от обоих проводников точке).

На рис. 4 показаны зависимости X- и Z-составляющих индукции магнитного поля подковообразной катушки. При сравнении уровней магнитной индукции круговой и подковообразной катушки видим, что индукция магнитного поля кругового витка незначительно превосходит по модулю магнитную индукцию подковообразной катушки в центре и практически повторяет ее в местах прохождения проводников. Это объясняется аналогичными параметрами проводников и тока в катушках. Магнитное поле этих катушек (кольцевой и подковообразной) вблизи проводников определяется в основном параметрами проводов, в остальной области — уже взаимным расположением проводников. Именно этим и вызвано совпадение магнитных полей катушек вблизи проводов и их различием при отдалении от проводников.

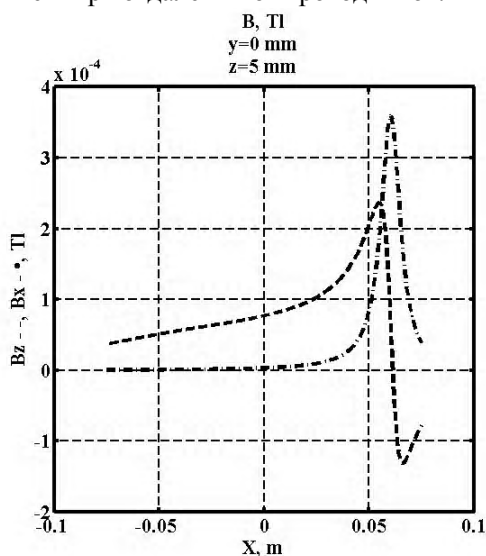


Рис. 4. График сравнения X- и Z- составляющих индукции магнитного поля вдоль диаметра подковообразной катушки с током на высоте 5 мм

На рис. 5 представлено распределение модуля магнитной индукции подковообразной катушки по плоскости, поднятой на 5 мм над плоскостью катушки. На рис. 6 показано изменение модуля магнитного поля вдоль Y на расстоянии от 60 до -60 мм с шагом 20 мм по X и на высоте 5 мм над плоскостью катушки. Видно, что после удаления от центральной точки участка изгиба изменение модуля магнитного поля практически не происходит, а незначительное уменьшение связано с окончанием проводников, а не влиянием участка изгиба. Это подтверждается графиком на рис. 4: параллельные участки проводника расположены вдоль оси OX, следовательно, они не порождают X-составляющую индукции магнитного поля. Таким образом, по отсутствию B_x в диапазоне от -75 до -20 мм на графике можно судить об отсутствии искажений, вызванных участком с изгибом. Таким образом, рассмотрение данной части подковообразной катушки позволяет оценить поля как участка с изгибом, так и участка с параллельными проводниками.

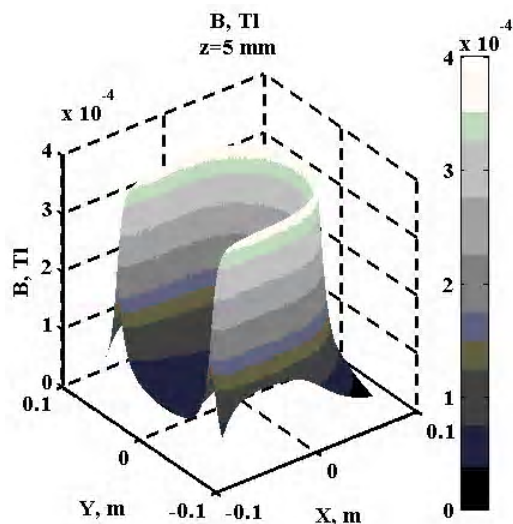


Рис. 5. Распределение модуля магнитной индукции подковообразной катушки с током вдоль плоскости, поднятой на 5 мм над плоскостью катушки

Рассмотрим результаты моделирования индукции магнитного поля спиральной катушки. Первое, на что стоит обратить внимание, — симметрия индукции магнитного поля относительно оси катушки (незначительные отклонения связаны с наличием начального и конечного витка катушки).

Поле обладает явной симметрией относительно точки (0,0) — центра катушки. К тому же вектор B_r (радиальная составляющая, определенная формулой (4)), имеет переход через нулевое значение в центре катушки. Таким образом, данный вектор минимален на удалении от центра, затем его значение увеличивается по мере приближения к центру, на расстоянии среднего радиуса катушки (половина суммы внутреннего и внешнего радиусов) от центра он достигает максимума и затем спадает до нуля при приближении к центру. Распределение модуля магнитной индукции плоской спиральной катушки с током на плоскости, поднятой на 5 мм над плоскостью катушки, показано на рис. 7.

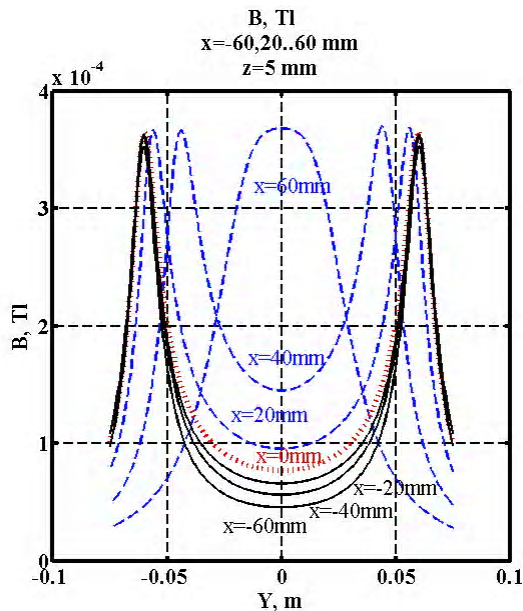


Рис. 6. Семейство зависимостей модуля индукции магнитного поля подковообразной катушки с током от координаты X на высоте 5 мм, при различном выборе X

Также следует отметить, что в любом сечении вдоль диаметра плоскостью, перпендикулярной к плоскости катушки составляющая поля вдоль сечения будет максимальной, а составляющая, совпадающая с нормалью к плоскости сечения (поперечная), — минимальна (значение индукции магнитного поля на два порядка ниже продольной составляющей). Для дальнейшей оценки магнитного поля будет достаточно рассматривать только две составляющие индукции вдоль подобного сечения (при сечении плоскостью X0Z это будут X- и Z- составляющие индукции магнитного поля). На рис. 8 приведены распределения модуля, Z-, X- составляющих вдоль диаметра спиральной катушки.

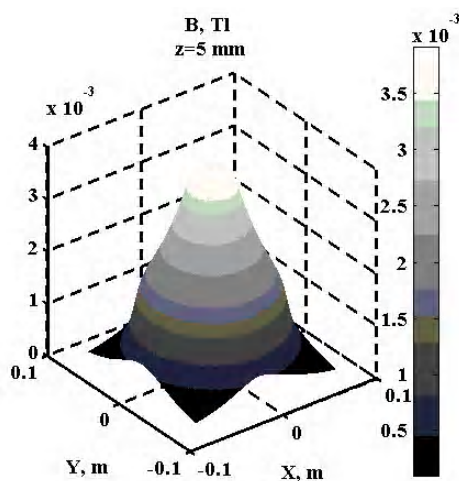


Рис. 7. Распределение модуля магнитной индукции плоской спиральной катушки с током на плоскости, поднятой на 5 мм над плоскостью катушки

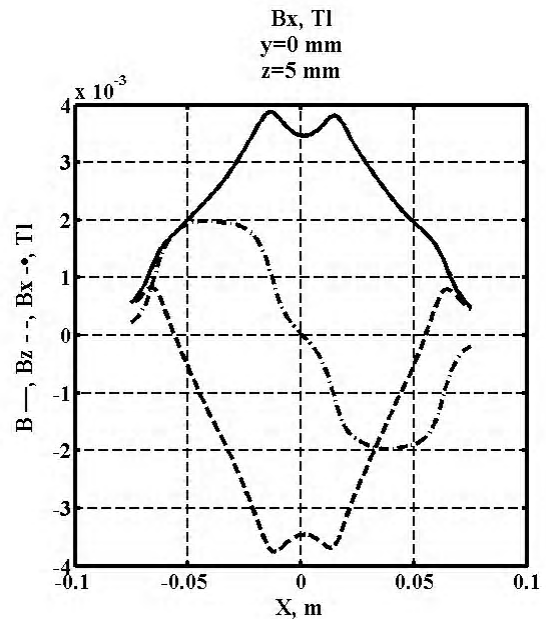


Рис. 8. Распределение X- и Z- составляющих и модуль магнитной индукции спиральной катушки с током вдоль диаметра на высоте 5 мм над плоскостью катушки

Рассмотрим магнитное поле вблизи катушки. На рис. 9 изображено магнитное поле в векторной форме вдоль линии ($Z=1\text{ mm}$, $Y=0$, $-75 < X < 75\text{ mm}$). Как видно из диаграммы, поле проходит сквозь катушку не только в центральном отверстии (большая часть), но и сквозь витки. Но направление векторов указывает, что полный поток магнитного поля можно оценить по потоку через площадь «круга», образованного внешним витком спирали. Это можно использовать для оценки потока магнитного поля на определенной высоте над источником излучения. Энергия магнитного поля определяется по формуле (6). Так как ток постоянен, отношение потоков соответствует отношению энергий (формула (7)). Полный магнитный поток катушки вычисляется согласно формуле (8). Пользуясь значением индуктивности спиральной катушки из таблицы, вычисляем полный поток магнитного поля катушки — $\Phi_{\text{full}} = 105,5\text{ мкВб}$. Значение магнитного потока на определенной высоте рассчитываем по формуле (9), где B_{zi} — табличные значения Z-составляющей, соответствующие определенной высоте, ΔS — элемент площади (равен квадрату точности расчетов n):

$$W = \frac{\Phi \cdot I}{2}; \quad (6)$$

$$\frac{W_z}{W_{\text{full}}} = \frac{\Phi_z}{\Phi_{\text{full}}}; \quad (7)$$

$$\Phi_{\text{full}} = I \cdot L; \quad (8)$$

$$\Phi = \int \vec{B} d\vec{S} = \Delta S \cdot \sum_i \vec{B}_i \cdot \vec{n} = \Delta S \cdot \sum_i B_{zi}; \quad (9)$$

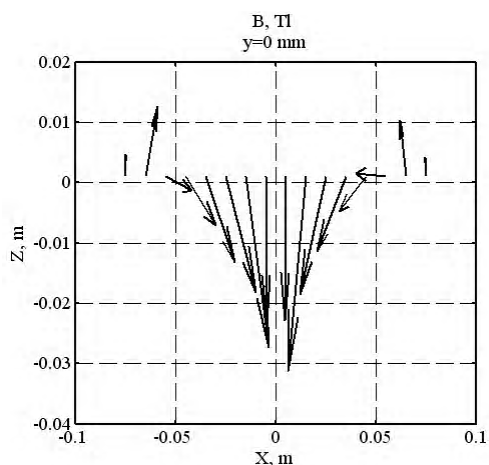


Рис. 9. Векторное отображение индукции магнитного поля спиральной катушки вдоль ее диаметра на высоте 1 мм над плоскостью катушки

Рассчитанное значение потока поля на высоте $Z=0.5$ мм составляет $\Phi_{0,5\text{мм}} = 10,2 \text{ мкВб}$, на высоте 75 мм — $\Phi_{75\text{мм}} = 1,5 \text{ мкВб}$. На рис. 10 приведена зависимость энергии потока поля через площадь круга с радиусом внешнего витка катушки от высоты Z , на которую поднят круг. Как видно из рисунка, энергия потока максимальна возле витков катушки. Это связано с тем, что большая часть силовых линий замыкается по общему контуру витков катушки, «опаивая» источник излучения. Следовательно, при использовании катушки данного типа в аппаратуре необходимо располагать рабочие элементы в ближней зоне от 0,5 до 5 мм над плоскостью витка, что соответствует отношению энергий 9,7 и 7,6%. В более близкой зоне размещать элементы не представляется возможным, так как необходимо нанести слой изоляции на катушку.

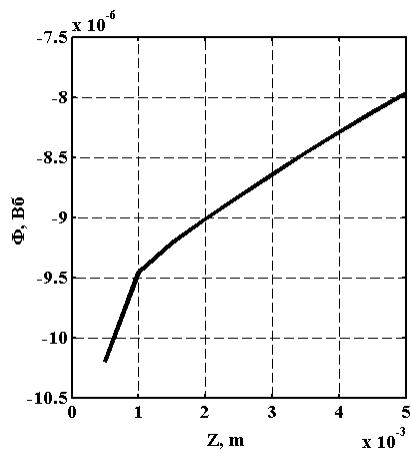


Рис. 10. Зависимость плотности магнитного потока, порождаемого спиральной катушкой, от высоты Z расположения круга, сквозь который измеряется поток

Видно, что вблизи поверхности катушки на расстоянии от поверхности от $Z = 5$ до $Z = 30$ мм модуль вектора индукции магнитного поля уменьшается в 2,5 раза. При дальнейшем удалении от $Z = 30$ до $Z = 60$

мм модуль уменьшается на 50%. Наблюдаемая зависимость близка к экспоненциальной для обеих составляющих индукции магнитного поля от высоты над плоскостью катушки.

Заключение

Научная новизна исследования определяется тем, что в нем изложены результаты расчета и анализа распределения магнитного поля плоских катушек различных типов. Приведены важные зависимости распределения магнитного поля наиболее распространенных плоских катушек. Произведен анализ зависимости энергии магнитного поля плоской спиральной катушки от высоты расположения рабочей плоскости.

Практическая значимость. Полученные данные можно использовать для поиска наиболее эффективной области воздействия магнитного поля на рабочие элементы. Также, применяя полученные результаты, можно провести оценку глубины проникновения магнитного потока и уровни наводимых токов в тканях организма человека при использовании данных типов индукторов в магнитотерапии.

Пути дальнейших исследований. Весьма перспективным в этом направлении представляется создание графического редактора, позволяющего создавать эскизы плоских индукторов для дальнейшего моделирования без использования математического представления геометрии индуктора, а также создание программного модуля для расчета магнитных полей нескольких плоских катушек с учетом их взаимного влияния.

Литература: 1. Беркутова А.М. Системы комплексной электромагнитотерапии. М.: Лаборатория базовых знаний, 2000. 376 с. 2. Никищенко А.Н., Богач Н.В., Васильев А.П. Распределение составляющих магнитного поля у поверхности плоской катушки // Актуальные вопросы теоретической и прикладной биофизики, физики и химии. БФФХ-2010 [В 2 т.] Т. 1. Общие вопросы физики и химии. Севастополь, 2010. С.129. 3. Никищенко А.Н., Богач Н.В. Разработка модели излучения плоской катушки // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникации РТ-2010. Севастополь, 2010. С. 362. 4. Немцов М.В. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности. М.: Энергоатомиздат, 1989. 192 с.

Поступила в редколлегию 22.08.2010

Рецензент: д-р биол. наук, вед. науч. сотр. Руднева И.И.

Богач Николай Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры электронной техники Севастопольского национального технического университета. Научные интересы: разработка модулей управления. Увлечения и хобби: художественная фотосъемка. Адрес: Украина, 99053, Севастополь, ул. Университетская, 33, тел. (0692) 435127.

Никищенко Алексей Николаевич, магистр кафедры электронной техники Севастопольского национального технического университета. Научные интересы: математическое моделирование физических процессов. Увлечения и хобби: пеший туризм, спорт. Адрес: Украина, 99053, Севастополь, ул. Университетская, 33.