

Краевой конкурс учебно-исследовательских и проектных работ учащихся  
«Прикладные вопросы математики»

Прикладные вопросы математики

**Исследование магнитного поля соленоида  
с помощью вейвлет-анализа**

Короткова Валентина Сергеевна,  
Кайгородов Игорь Олегович,  
МОУ «Лицей №1» г. Перми, 11 кл.  
Герцен Татьяна Анатольевна,  
к. х. н., доцент ПНИПУ

## ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ.

Одним из величайших прорывов в естествознании XIX века стала серия открытий, позволивших установить неразрывную связь между двумя, казалось бы, не связанными между собой природными феноменами — электричеством и магнетизмом, — которые на поверку оказались просто двумя сторонами одной медали. Одним из первых фрагментов «пазла», который предстояло собрать ученым, стало осознание того, что движущиеся электрические заряды (то есть электрический ток) могут порождать магнитное поле.

Это открытие сделал датский ученый Ханс Кристиан Эрстед. Магнитное поле, создаваемое током, текущим по проводнику, впервые было обнаружено им в 1820 году. Его опыт заключался в наблюдении за магнитной стрелкой, расположенной вблизи проводника, при пропускании тока которая поворачивается на некоторый угол. При размыкании цепи стрелка возвращается в исходное положение.

Опыт Эрстеда позволил сделать вывод о существовании магнитного поля в пространстве, окружающем проводник с током. Это открытие представил в количественной форме в этом же году французский ученый Андре-Мари Ампер. Он установил, что два проводника, расположенные параллельно друг другу, испытывают взаимное притяжение при пропускании через них электрического тока в одном направлении и отталкиваются, если токи имеют противоположные направления. Сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током, называется силой Ампера. Обобщением этой работы стал закон Био—Савара (его еще называют «закон Био—Савара—Лапласа»), содержащий окончательную формулировку соотношения между электрическими токами и магнитными полями, которые они производят.

Жан Батист Био, яркий и смелый ученый, был профессором физики в Сорбонне и действительным членом французской Академии наук. Сразу после открытия Эрстеда вместе со своим коллегой Феликсом Саваром он принялся за изучение взаимосвязи между электрическим током и магнитными полями.

В отличие от Ампера, изучавшего магнитные поля опосредованно, путем измерения силы взаимодействия между парами проводников с током, Био и Савар предприняли прямые измерения магнитных полей, используя для этого множество легких магнитных стрелок компасов. Смысл их закона проще всего понять, если представить себе, что проводник с током разбит на крошечные отрезки — так называемые элементы тока (такой подход предложил ученым их старший коллега Пьер Симон Лаплас (1749–1827), стоявший у истоков дифференциального и интегрального исчисления, который затем и обобщил полученные результаты.

На каждом из этих крошечных отрезков кривизной проводника можно пренебречь — их можно рассматривать как отрезки прямой. Так вот, согласно закону Био—Савара, магнитное поле  $B$  на расстоянии  $r$  от такого элемента тока пропорционально

$$\frac{I dl}{r^2}$$

где  $I$  — сила тока, а  $dl$  — длина элемента тока.

Закон Био—Савара является наиболее полным формальным обобщением взаимосвязи между электрическим током и магнитным полем. Это значит, что можно взять проводник с током сколь угодно сложной и асимметричной конфигурации и разбить его на элементы тока. Каждый элемент вносит свой вклад в магнитное поле в рассчитываемой точке. Сделав эти расчеты, мы можем затем просуммировать вклад от каждого элемента проводника и найти общее магнитное поле. Таким образом, закон Ампера является частным случаем закона Био—Савара для случая линейного проводника.

Закон Био—Савара предсказывает также направление получающегося магнитного поля. Это направление можно определить с помощью так называемого правила правой руки. Правило гласит: если вытянутый указательный палец правой руки показывает направление электрического тока в элементе тока, а средний палец направлен на точку, в которой вы вычисляете магнитное поле, то выставленный под прямым углом к двум другим пальцам большой палец укажет направление магнитного поля.

#### МАГНИТНОЕ ПОЛЕ.

Впервые термин «магнитное поле» был введен в 1845 г. английским физиком М. Фарадеем. Известное ещё с давних времён, магнитное поле и его свойства до сих пор остаются весьма загадочным явлением окружающего мира. Потенциал применения магнитного поля просто огромен, и общая теория взаимодействий вносит новый импульс в использование скрытой энергии, которая таится в магнетизме.

Магнитное поле, силовое поле, действующее на движущиеся электрические заряды и на тела, обладающие магнитным моментом, независимо от состояния их движения. Магнитное поле правильнее было бы называть электродинамическим, так как оно возникает только при движении заряженных частиц, и действует только на движущиеся заряды.

Источниками макроскопического магнитного поля являются намагниченные тела, проводники с током и движущиеся электрически заряженные тела. Природа этих источников едина: магнитное поле возникает в результате движения заряженных

микрочастиц (электронов, протонов, ионов), а также благодаря наличию у микрочастиц собственного (спинового) магнитного момента.

Неоднородное магнитное поле обычно возникает вблизи кромок полюсов постоянного магнита, вдоль которых расположен нагретый проводник или чувствительный элемент.

В неоднородном магнитном поле траектория частицы, обладающей магнитным моментом, искривляется по градиенту или против него в зависимости от ориентации магнитного момента.

В неоднородном магнитном поле атомы с собственными магнитными моментами не только прецессируют около направления внешнего поля, но и отклоняются от первоначального направления движения.

Основной характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции  $\mathbf{B}$ , который определяет: силу, действующую в данной точке поля на движущийся электрический заряд; действие магнитного поля на тела, имеющие магнитный момент, а также другие свойства магнитного поля.

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ. ЗАДАЧИ.

Цель работы является исследование неоднородного магнитного поля на оси соленоида. Работа заключается в нахождении мест изменения магнитной индукции.

Для этого мы устанавливаем факт неоднородности магнитного поля с помощью Фурье анализа. И если поле действительно является неоднородным, то по средствам вейвлет-преобразований находим места изменения поля.

## МЕТОДЫ.

Анализ Фурье позволяет любую волну сложной формы представить в виде суммы простых волн

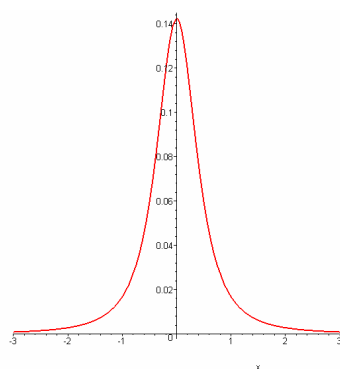


Рис. 1

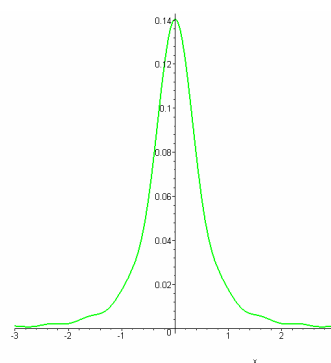


Рис. 2

Так как Фурье анализ - это метод представления функции суммой гармоник — синусоид и косинусоид, то мы можем выяснить, является ли функция сложной исходя от противного. Каждую волну сложной формы можно представить определенным количеством синусоид и косинусоид, просуммировав которые мы получим данную волну. Если волну разбить на меньшее число простых функций, то мы получим при суммировании их другую функцию. На рис.1 изображена исходная функция, на рис.2 изображена эта же функция после разложение на простые волны с меньшим числом.

Вейвлет-преобразование сигналов является не менее общим по областям своих применений, чем классическое преобразование Фурье. Принцип ортогонального разложения по компактным волнам состоит в возможности независимого анализа функции на разных масштабах ее изменения.

Базовая идея вейвлетов: аппроксимировать сложную функцию взвешенной суммой простых функций, каждая из которых, в свою очередь, получается из одной функции-прототипа. Эта функция-прототип выполняет роль строительного блока, а искомая аппроксимация получается комбинированием одинаковых по структуре блоков. При этом, если "хорошая" аппроксимация получается при использовании небольшого числа блоков, то тем

самым достигается значительное уплотнение информации. В качестве таких блоков Фурье анализ использует синусоиды с различными периодами. Однако основным недостатком Фурье-преобразования является его "глобальная" чувствительность к "локальным" скачкам и пикам функции. Поэтому для нахождения конкретного места изменения функции мы будем использовать вейвлет-преобразования.

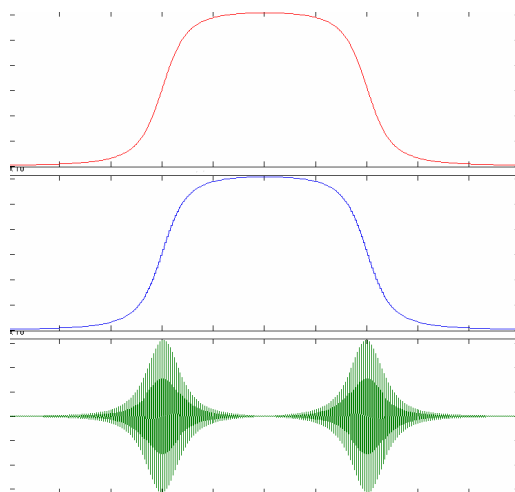


Рис. 3

На рис. 3 изображена функция и ее вейвлет- преобразование.

## АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА.

Для начала получим расчетную формулу для соленоида.

Соленоид - цилиндрическая катушка, состоящая из большого числа намотанных вплотную друг к другу витков проводника. При пропускании через соленоид электрического тока внутри и вне соленоида возникает магнитное поле. Если шаг винтовой линии мал по сравнению с радиусом витка, то магнитное поле соленоида можно рассматривать как результат сложения полей, создаваемых круговыми токами, расположенными рядом и имеющими общую ось.

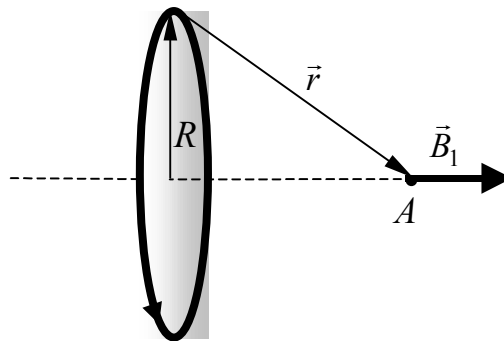


Рис. 3

Величина индукции магнитного поля в некоторой точке  $A$  на оси кругового тока  $i$  радиуса  $R$  (рис. 3) определяется выражением

$$B_1 = \frac{\mu_0 i R^2}{2 r^3}, \quad (1)$$

где  $\mu_0$  - магнитная постоянная,  $r$  - модуль вектора  $\vec{r}$ , определяющего положение точки  $A$ .

Это выражение можно получить, воспользовавшись законом Био-Савара и принципом суперпозиции.

Рассмотрим Магнитное поле на оси кругового тока.

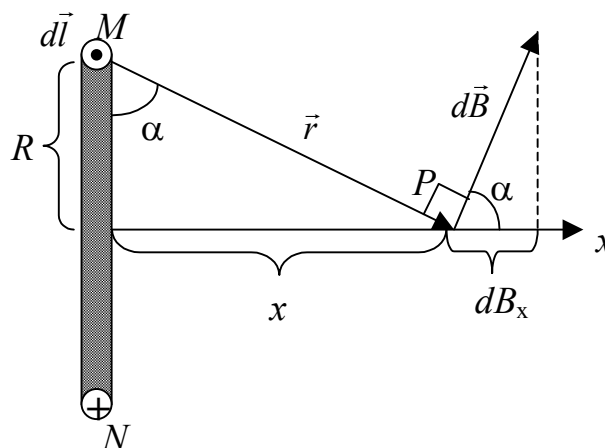


Рис. 4.

На рис. 4 показан круговой виток с током в разрезе. В сечении провода  $M$  ток  $i$  течет из плоскости чертежа "на нас", в сечении  $N$  ток втекает в плоскость чертежа.

Вектор  $d\vec{B}$  - индукция магнитного поля, созданного в точке  $P$  элементом тока  $idl$  ( $dl$  - бесконечно малый элемент провода с током в сечении  $M$ ). Заметим, что в соответствии с законом Био-Савара векторы  $dl$ ,  $\vec{r}$  и  $d\vec{B}$  взаимно перпендикулярны и образуют правую тройку векторов. Вектор  $d\vec{B}$  изображен в "точке наблюдения", расположенной на расстоянии  $x$  от плоскости витка. От всех элементов тока будет образовываться конус векторов  $d\vec{B}$ . Легко понять, что результирующий вектор  $\vec{B}$  в точке наблюдения будет направлен вдоль оси  $x$ . Это означает, что для нахождения модуля вектора  $\vec{B}$  достаточно сложить проекции векторов  $d\vec{B}$  на ось  $x$ . Каждая такая проекция имеет вид

$$dB_x = dB \cos \alpha = \frac{\mu_0 idl r \sin 90^\circ}{4\pi r^3} \cos \alpha = \frac{\mu_0 idl}{4\pi r^2} \cos \alpha.$$

Интегрируя это выражение по всем  $dl$  (это дает  $2\pi R$ ) и учитывая, что  $\cos \alpha = R/r$  и  $r^2 = R^2 + x^2$ , получим

$$B_x = \frac{\mu_0 iR^2}{2 r^3} = \frac{\mu_0 iR^2}{2 (x^2 + R^2)^{3/2}}.$$

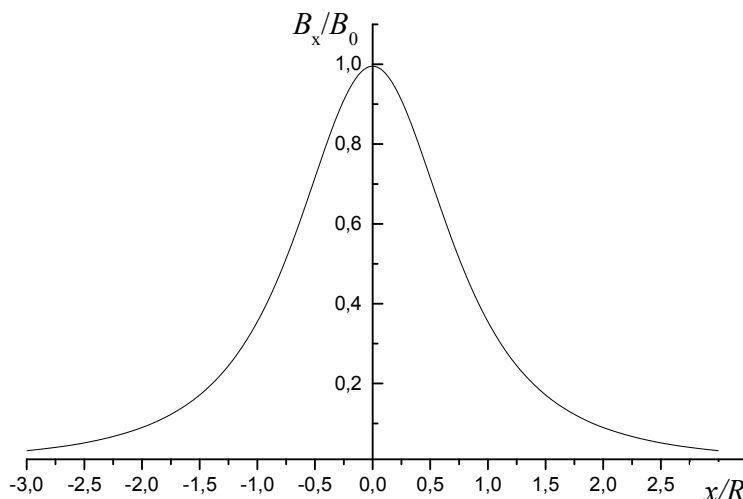


Рис. 5. Магнитное поле на оси кругового тока

Рассчитанный по этой формуле график зависимости  $B_x$  от  $x$  в относительных единицах приведен на рис. 5 ( $B_0 = \mu_0 i / 2R$  - магнитное поле в центре витка).



Если соленоид имеет длину  $l$  и содержит  $N$  витков, то малая часть соленоида длиной  $dl$  (рис. 6а) содержит  $(N/l)dl$  витков и может рассматриваться как круговой ток величиной  $di = i(N/l)dl$ . Учитывая, что

$$dl \sin \varphi = r d\varphi$$

(см. рис. 6б,  $d\varphi$  - бесконечно малое приращение угла  $\varphi$ ), получим для индукции магнитного поля в точке  $A$  на оси такого "элементарного" соленоида

$$dB = \frac{\mu_0}{2} \frac{R^2 n i d\varphi}{r^2 \sin \varphi},$$

где  $n = N/l$  - число витков, приходящихся на единицу длины соленоида. Так как  $R = r \sin \varphi$ , то

$$dB = \frac{\mu_0}{2} i n \sin \varphi d\varphi \quad (2)$$

Интегрируя выражение (2) в пределах от  $\varphi_1$  до  $\pi/2$  (рис. 6в), получим индукцию магнитного поля в точке  $A_1$ , лежащей на торце соленоида:

$$B = \frac{\mu_0 i n}{2} \cos \varphi_1 = \frac{\mu_0 i n}{2} \frac{l}{\sqrt{l^2 + R^2}}.$$

Поле в произвольной точке  $A$ , лежащей на оси соленоида внутри него, может быть вычислено как сумма магнитных полей, создаваемых соленоидами  $C_1$  и  $C_2$  (рис. 6в), а в точке  $A'$ , лежащей вне соленоида, магнитное поле равно разности полей, создаваемых соленоидами  $C_3$  и  $C_4$ .

В результате получим

$$B = \frac{\mu_0 n i}{2} \left[ \frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2 + R^2}} - \frac{x}{\sqrt{x^2 + R^2}} \right], \quad (3)$$

где  $x > 0$  вне соленоида и  $-l < x < 0$  внутри соленоида (рис. 6в).

Из выражения (3) следует, что в центре соленоида ( $x = -l/2$ ) индукция магнитного поля равна

$$B_0 = \frac{\mu_0 n i}{\sqrt{1 + (2R/l)^2}}. \quad (4)$$

В случае длинного соленоида ( $4R^2/l^2 \ll 1$ ) магнитное поле в его центральной части слабо зависит от  $x$  ( $B \approx \mu_0 n i$ ) и начинает заметно уменьшаться лишь на расстояниях  $(2...3)R$  от торцов соленоида. На торце длинного соленоида индукция магнитного поля становится равной  $\mu_0 n i / 2$ .

Формула (3) справедлива не только для постоянных  $i$  и  $B$ , но и для мгновенных значений изменяющихся во времени тока и магнитного поля, если только их изменения не происходят слишком

быстро (для квазистационарных токов). В частности, если ток через соленоид меняется по закону  $i = I_m \cos \omega t$ , то по такому же закону меняется и магнитное поле  $B = B_m \cos \omega t$ , причем амплитудные значения тока  $I_m$  и магнитного поля  $B_m$  на оси соленоида связаны формулой (3), в которой  $i = I_m$ ,  $B = B_m$ .

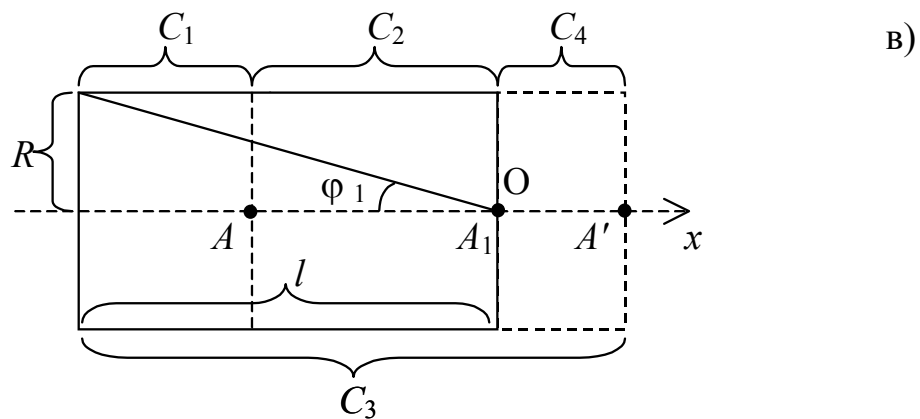
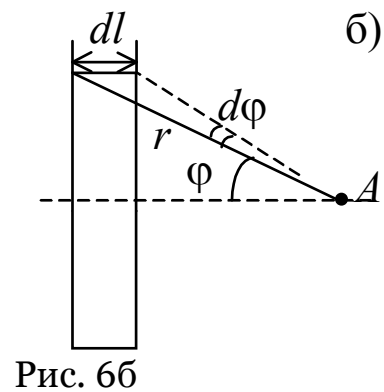
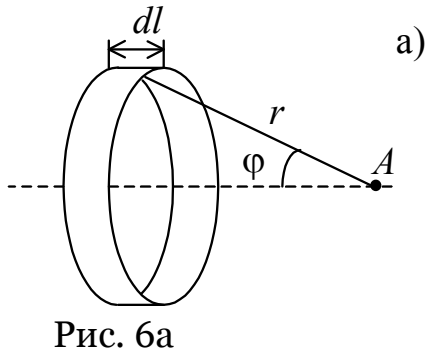


Рис. 6в

Зная расчетную формулу для соленоида можно преступить к е анализу. Разберем формулу

$$B = \frac{\mu_0 n i}{2} \left[ \frac{l+x}{\sqrt{(l+x)^2 + R^2}} - \frac{x}{\sqrt{x^2 + R^2}} \right], \quad (3)$$

по Фурье анализу (см. приложение №1.1). Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что данная функция состоит из 42 гармоник т.е. она является сложной функцией.

Применим вейвлет-преобразования к этой же формуле (см. приложение № 2.1). И проанализирую результаты и сравнивая их с результатами физического эксперимента (см. приложение № 3)

можно сделать вывод: по вейвлет-преобразованиям можно найти точное место изменения функции.

Вейвлет-анализ обеспечивает 2-мерную развертку одномерного сигнала, при которой время (координата) и масштаб (частота) рассматриваются как независимые переменные. Это позволяет анализировать временной (пространственный) ряд одновременно во временной (пространственной) и в частотной областях. Вейвлет-анализ называют «микроскопом», поскольку он позволяет исследовать каждый масштаб с необходимой и достаточной для него разрешающей способностью. Вейвлет-анализ имеет такие характерные, как обнаружение в сигнале скачков и точек разрыва. Поэтому основные приложения вейвлет-анализа заключаются в локализации особых точек и проведения частотно-временного (пространственного) анализа сигналов.

Быстрые изменения исходных данных порождают в спектре составляющие с высокой частотой. А медленные – с низкой. Поэтому, если в нем амплитуда составляющих быстро убывает с увеличением частоты, то исходная функция является плавной, а если в спектре присутствуют высокочастотные составляющие с большой амплитудой, то исходная функция будет содержать резкие колебания.

#### АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДИПОЛЯ

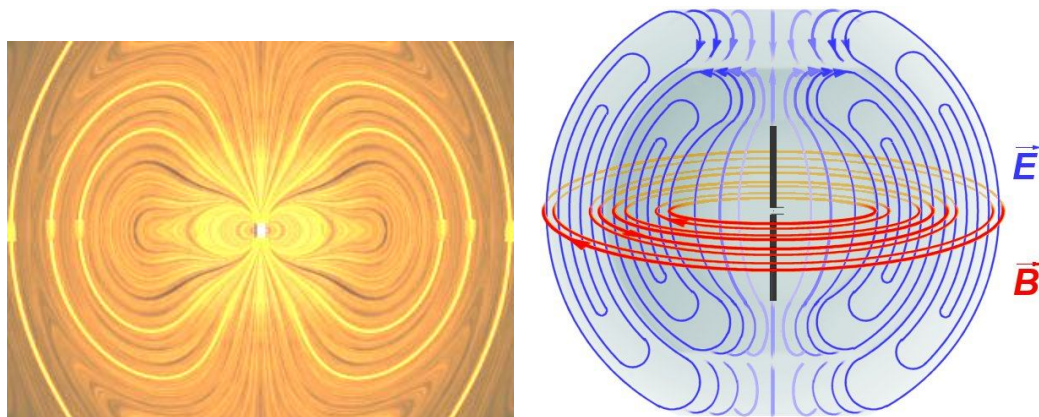


Рис. 7

На рисунке 7 показаны линии  $E$  и  $B$  поля диполя.

Получить расчетную формулу магнитной индукции для диполя можно аналогичным способом, как и для соленоида, опираясь на закон Био-Саварв-Лапласа.

$$B = \pi\mu_0 I R^2 \left[ \frac{1}{\sqrt{((x+L)^2 + R^2)^3}} - \frac{1}{\sqrt{((x-L)^2 + R^2)^3}} \right], \quad (5)$$

где  $x$  – расстояние по оси  $x$ ,  $R$  – расстояние от оси  $x$  до точки  $P$ ,  $2L$  – расстояние между «магнитными зарядами» и  $I$  – сила тока.

К этому уравнению применим те же преобразования, что и для соленоида.

Результатом Фурье анализа стал факт неоднородности функции (см. приложение № 1.2), что говорит о возможности реализации вейвлет-преобразований.

Вейвлет-преобразования делают удобными наблюдения за изменениями индукции диполя, так как она очень мала и померить физически (например, как мы мерили индукцию соленоида) очень трудно.

#### ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

Данные исследования могут быть полезными во многих областях применения.

Одним из примеров реализации нашего исследование служит выявление «неполадок» в линии электропередач.

## БИБЛИОГРАФИЯ

1. Левкович-Маслюк Л. А. Дайджест вейвлет-анализа. //Компьютерра.- 1998.- №8 (236).- С.37-39
2. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения //Успехи физических наук. – 1998.-№ 11.- С. 1145-1170.
3. Мякишев Г.Я., Синяков А.З. Физика (Электродинамика; Колебания). Дрофа: М. 2001.
4. Общая физика. Часть3. Электричество и магнетизм. Лаборат. практикум. Изд-во ПГТУ: Пермь. 2001.

## Приложение №1.1

Для реализации Фурье анализа используем математический пакет MAPLE.

$$fp := \frac{m0 Ni \left( \frac{l-x}{\sqrt{l^2 - 2lx + x^2 + R^2}} + \frac{l+x}{\sqrt{l^2 + 2lx + x^2 + R^2}} \right)}{2}$$

Получить первые  $n$  членов ряда Фурье можно с помощью следующей процедуры:

```
fourierseries := proc (f, x, x1, x2, n)
local k, l, a, b, s;
    l := 1/2*x2 - 1/2*x1;
    a[0] := 1/l*int(f, x = x1 .. x2);
    a[k] := 1/l*int(f*cos(k*pi*x/l), x = x1 .. x2);
    b[k] := 1/l*int(f*sin(k*pi*x/l), x = x1 .. x2);
    s := 1/2*a[0] + sum(a[k]*cos(k*pi*x/l) + b[k]*sin(k*pi*x/l), k = 1 .. n)
end proc
```

Порядок обращения к этой процедуре такой: `fourierseries(f,x,x1,x2,n)`, где  $f$  – имя функции, разложение которой требуется найти, где  $x$  – имя независимой переменной, где  $x1, x2$  – интервал разложения, где  $n$  – число членов ряда.

```
f2:=fp:x1:=-12:x2:=12:
fr:=fourierseries(f2,x,x1,x2,20);
plot(fp,x=-12..12,color=red,thickness=2,linestyle=1);
plot([fr,fp],x=-12..12,color=[green,red], thickness=[4,2],
linestyle=[10,1]);
```

```
fr := 0.0009692191510+ 0.001890861205cos(0.2617993878x)
+ 0.001792259887cos(0.5235987758x) + 0.001674255016cos(0.7853981635x)
+ 0.001547528793cos(1.047197551x) + 0.001419824754cos(1.308996939x)
+ 0.001294844724cos(1.570796327x) + 0.001175424672cos(1.832595715x)
+ 0.001062802297cos(2.094395103x) + 0.0009579166733cos(2.356194490x)
+ 0.0008609411100cos(2.617993878x) + 0.0007719761793cos(2.879793266x)
+ 0.0006907252726cos(3.141592654x) + 0.0006169183294cos(3.403392041x)
+ 0.0005500719536cos(3.665191431x) + 0.0004897718420cos(3.926990818x)
+ 0.0004354876369cos(4.188790204x) + 0.0003867730780cos(4.450589594x)
+ 0.0003431187224cos(4.712388981x) + 0.0003041006019cos(4.974188368x)
+ 0.0002692604477 cos(5.235987758 x)
```

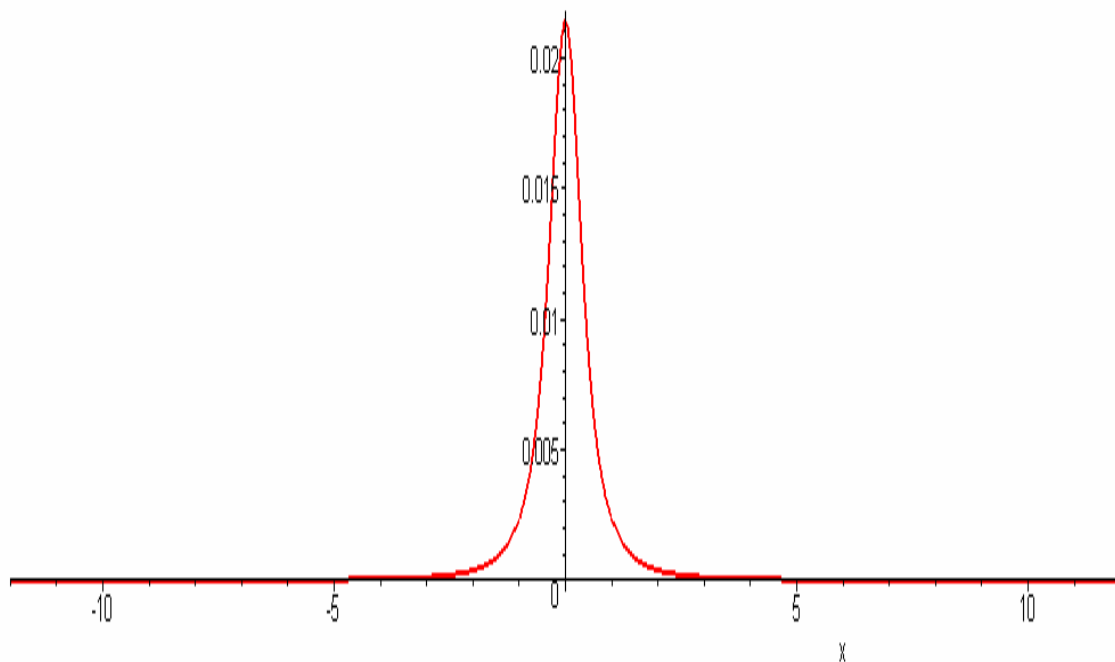


рис. 8. График исходной функции.

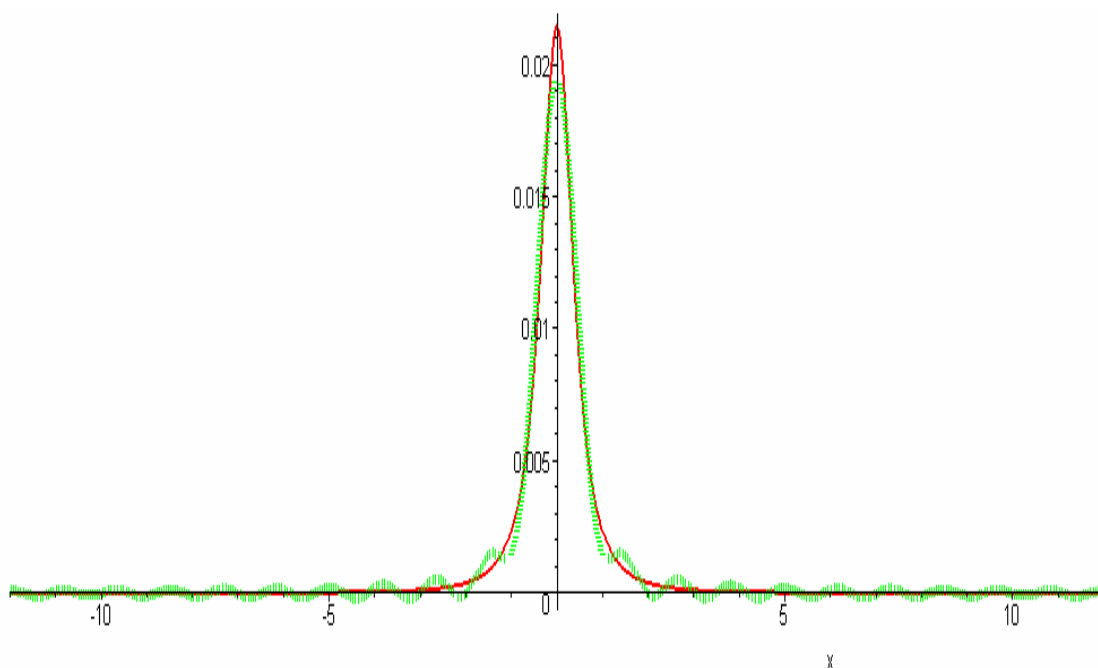


рис.9 .Графики исходной функции и ее фурье преобразование.

Сплошной линией изображен график функции, пунктирной(жирной) – график  $n$ -частичных сумм ряда Фурье. Видно, что чем больше слагаемых ряда удерживать, тем ближе расположен график суммы ряда к графику самой функции. Это доказывает, что исходная функция является сложной.

#### Приложение № 1.2

Для реализации Фурье анализа используем математический пакет MAPLE.

```

B := m0 π R2 i  $\left( \frac{1}{(x^2 + 2 x L + L^2 + R^2)^{(3/2)}} - \frac{1}{(x^2 - 2 x L + L^2 + R^2)^{(3/2)}} \right)$ 
fourierseries := proc (f, x, x1, x2, n)
local k, l, a, b, s;
    l := 1/2×x2 - 1/2×x1;
    a[0] := 1/l×int(f, x = x1 .. x2);
    a[k] := 1/l×int(f×cos(k×π×x/l), x = x1 .. x2);
    b[k] := 1/l×int(f×sin(k×π×x/l), x = x1 .. x2);
    s := 1/2×a[0] + sum(a[k]×cos(k×π×x/l) + b[k]×sin(k×π×x/l), k = 1 .. n)
end proc

plot (B, x=-3..3, color=red, thickness=2, linestyle=1);

    f2:=B:x1:=-12:x2:=12: fr:=fourierseries(f2,x,x1,x2,33);
plot ([fr,B], x=-13..13, color=[green,red], thickness=[4,2],
linestyle=[10,1]);

fr := -0.01478519854sin(5.759586531x) - 0.007406796913sin(7.853981635x)
- 0.009742105783sin(7.068583472x) - 0.02333485705sin(3.926990818x)
- 0.01715987363sin(5.235987758x) - 0.01958661731sin(1.047197551x)
- 0.006738973704sin(8.115781022x) - 0.005981379412sin(0.2617993878x)
- 0.01133956747sin(0.5235987758x) - 0.02628834731sin(3.141592654x)
- 0.02246657389sin(1.308996939x) - 0.02731157466sin(2.356194490x)
- 0.008906530341sin(7.330382858x) - 0.02090902937sin(4.450589594x)
- 0.01259881632sin(6.283185308x) - 0.02692096491sin(2.879793266x)
- 0.005554793413sin(8.639379798x) - 0.02444765705sin(3.665191431x)
- 0.01366593663sin(6.021385921x) - 0.02459168771sin(1.570796327x)
- 0.02544756500sin(3.403392041x) - 0.01965277832sin(4.712388981x)
- 0.01063562752sin(6.806784085x) - 0.02605045879sin(1.832595715x)
- 0.008128977488sin(7.592182248x) - 0.01589088287sin(0.7853981635x)
- 0.02728354419sin(2.617993878x) - 0.01158848933sin(6.544984695x)
- 0.02214431612sin(4.188790204x) - 0.006122175526sin(8.377580412x)
- 0.01839806305sin(4.974188368x) - 0.01595275875sin(5.497787144x)
- 0.02692675764sin(2.094395103x)

```



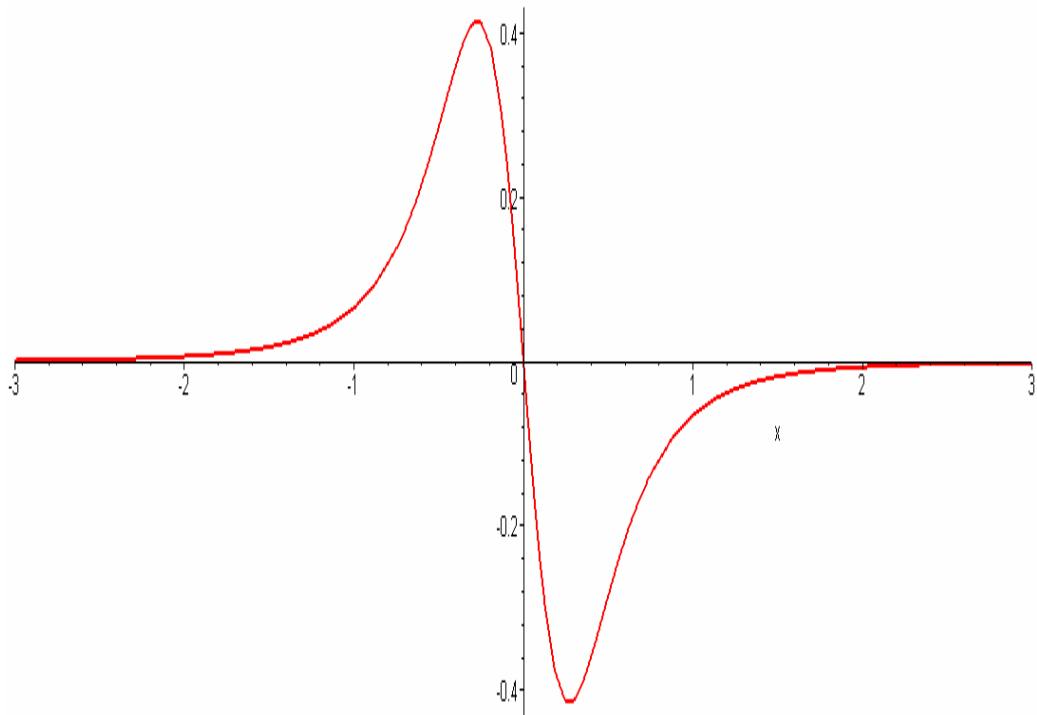


рис. 10. График исходной функции.

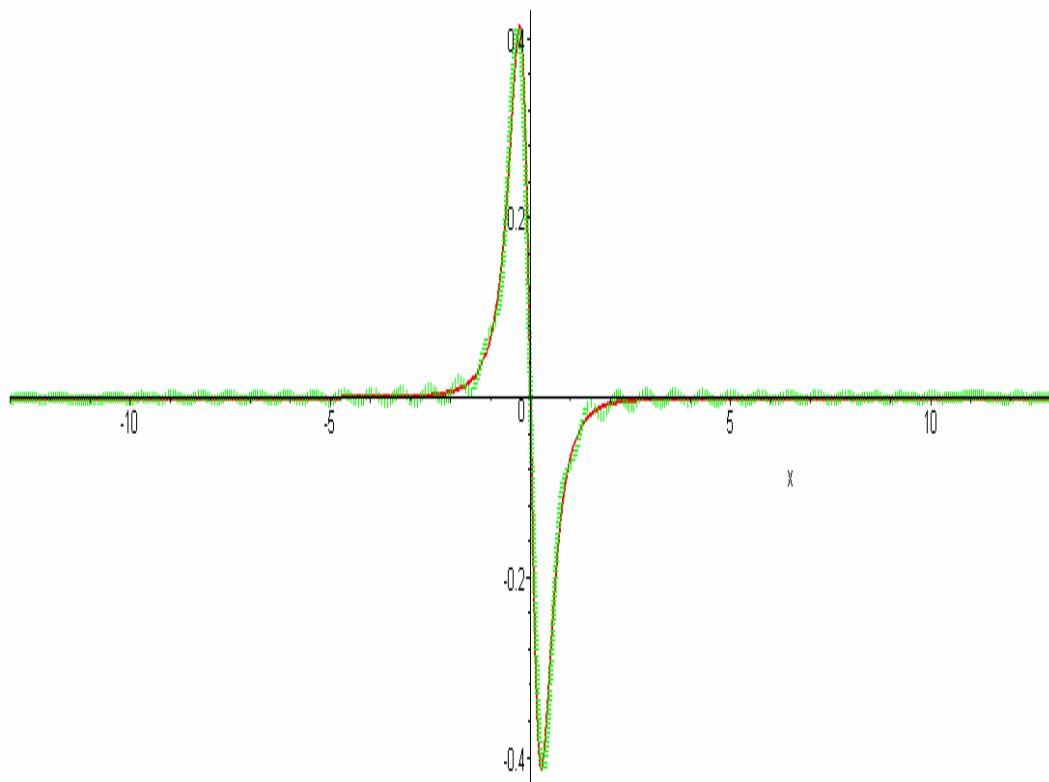


рис. 11. Графики исходной функции и ее Фурье преобразование.

Сплошной линией изображен график функции, пунктирной(жирной) – график  $n$ -частичных сумм ряда Фурье. Видно, что после Фурье преобразования функция изменилась следовательно она является сложной.

Приложение № 2.1

Построение вейвлет-преобразования мы выполнили в математическом пакете MADCAD Wavelet Toolbox. Для нашей функции мы применили вейвлет МНАТ «шляпа».

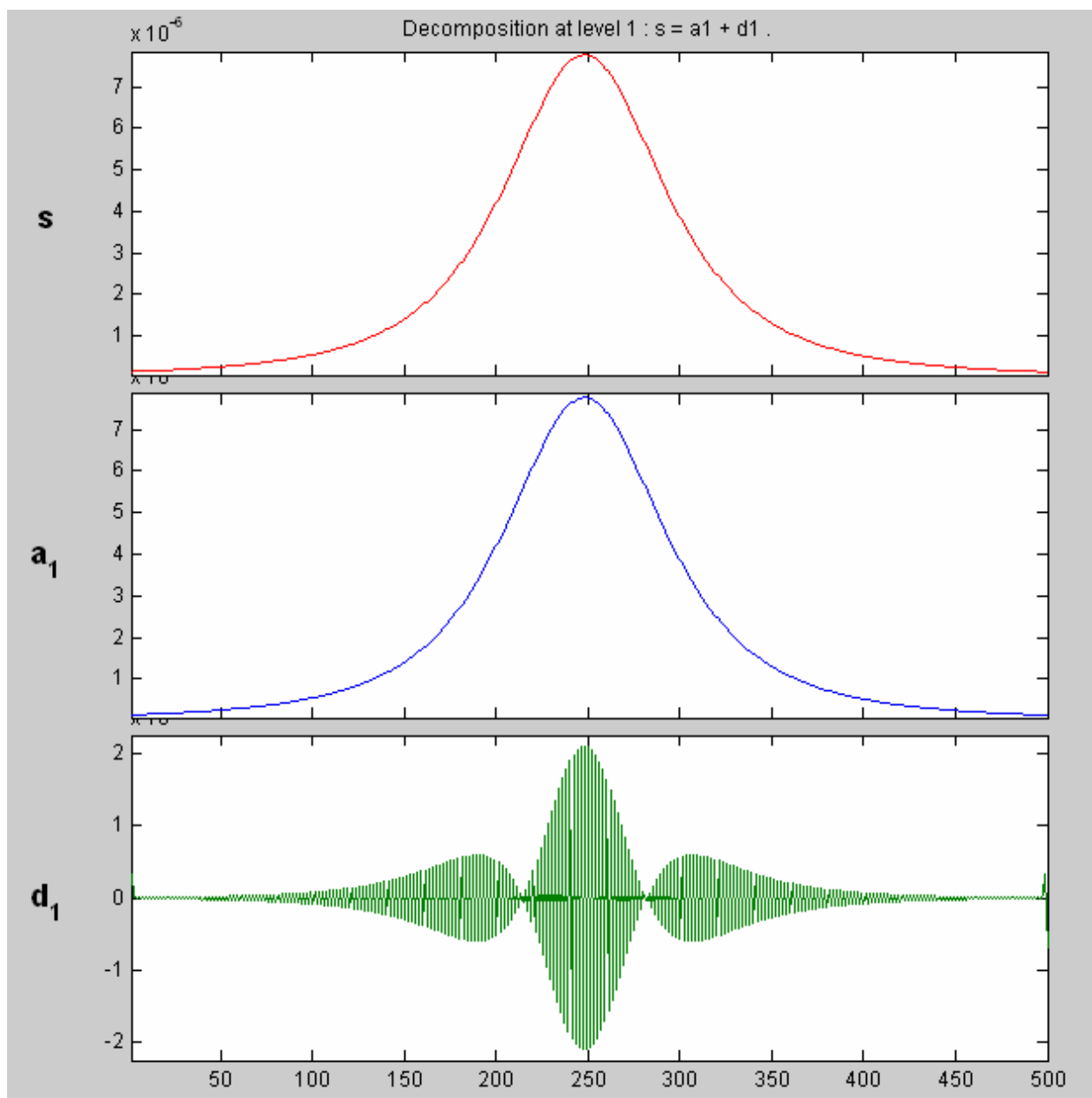


Рис.12

На рисунке 12 график  $s$  – исходный,  $d_1$ - его вейвлет образ. Изменение индукции соленоида можно разбить на 3 «этапа»: внутри катушки, на концах катушки и вне катушки (по ее оси). На графике  $d_1$  отчетливо просматриваются все эти «этапы». Разберем их подробнее.

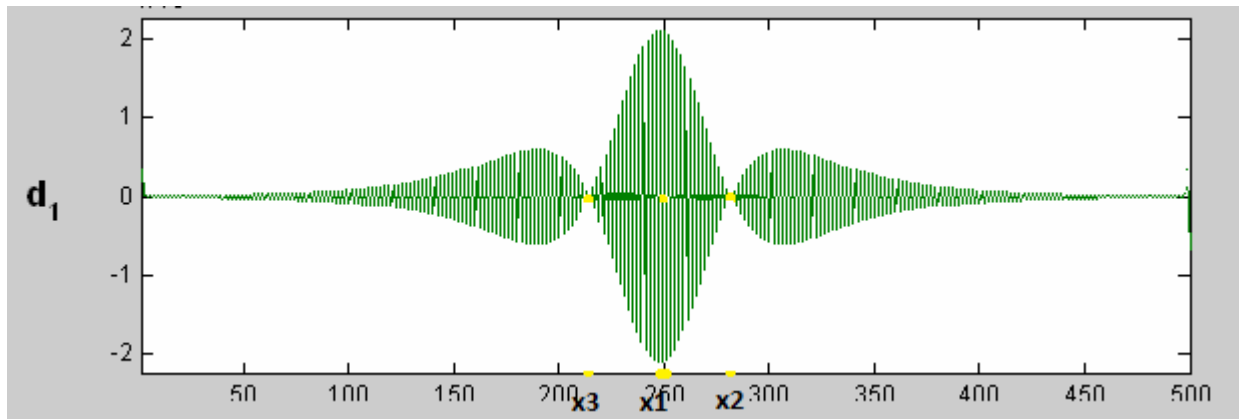


рис. 13

Точка  $x_1$  соответствует середине соленоида. В этой точке самые интенсивные показания индукции. Промежутки  $(x_3; x_1)$  и  $(x_1; x_2)$  показывают изменение индукции по мере приближения к концам соленоида. В точках  $x_2$  и  $x_3$  – соленоид «заканчивается». И  $(-\infty; x_3)$ ,  $(x_2; +\infty)$  – пространство по оси соленоида находящиеся за его пределами.

Благодаря вейвлет-преобразованию мы смогли выявить изменения индукции конкретно на каждом этапе.

#### Приложение 2.2

Построим контурный график (график изолиний) нашей функции, разложенной по вейвлет-базису.

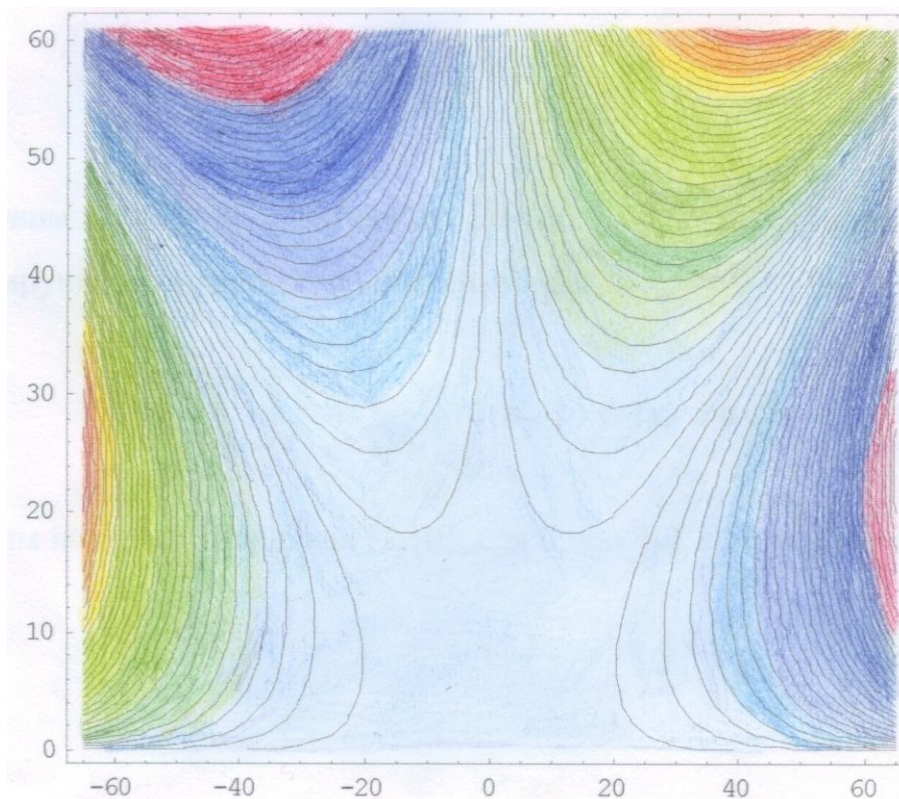


рис.14

На рисунке 14 изображено вейвлет-преобразование функции индукции магнитного поля. На графике вейвлет-преобразования можно увидеть некоторую закономерность: симметричность относительно нуля, есть четко выраженная площадка между двумя «пиками» (зеленый, желтый, красный цвета) и двумя «впадинами» (синий, фиолетовый цвета).

Построим вейвлет-образ.

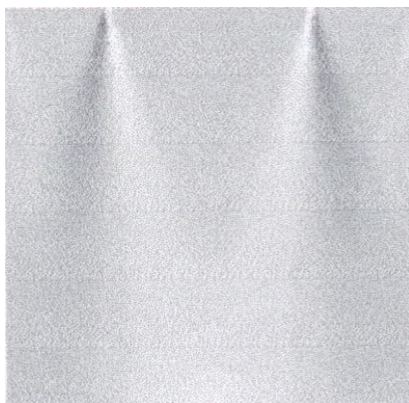


рис. 15

Глядя аналитически на полученные результаты можно говорить о правильности применения к диполю вейвлет-преобразований.