

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНАРНЫХ СИСТЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Р. О. Мазманян, И. П. Кондратенко

Институт электродинамики НАН Украины

просп. Победы, 56, г. Киев, 03680, Украина. E-mail: mazmanian@ied.org.ua, dep7ied@ukr.net

Представлены пространственные спектры данных сканирования поверхностей многополюсных планарных систем с постоянными магнитами. Показаны возможности и пути использования гармонических моделей для исследования свойств и сравнительной оценки планарных систем с помощью многомерного преобразования Фурье. Получены математические модели для различных видов полюсов планарной системы, в том числе с нарушением пространственного и параметрического распределения магнитной индукции. Полученные результаты предполагается использовать в биологических экспериментах с ферромагнитными жидкостями.

Ключевые слова: магниты, планарные системы, пространственный спектр.

ПРОСТОРОВІ СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНАРНИХ СИСТЕМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Р. О. Мазманян, І. П. Кондратенко

Інститут електродинаміки НАН України

просп. Перемоги, 56, м. Київ, 03680, Україна. E-mail: mazmanian@ied.org.ua, dep7ied@ukr.net

Наведено просторові спектри даних сканування поверхонь багатополісних планарних систем з постійними магнітами. Показано можливості й шляхи використання гармонічних моделей для дослідження властивостей і порівняльної оцінки планарних систем за допомогою багатовимірної перетворення Фур'є. Отримано математичні моделі для різних видів полюсів планарної системи, у тому числі з порушенням просторового та параметричного розподілу магнітної індукції. Отримані результати передбачається використовувати у біологічних експериментах з феромагнітними рідинами.

Ключові слова: магніти, планарні системи, просторовий спектр.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Устойчивый интерес к магнитным свойствам наноматериалов, своеобразие которых вызвано повышенной долей «поверхностных» атомов относительно их числа в наночастице, распространяется и на область биомедицинских исследований. В природе магнитные наночастицы встречаются во многих биологических объектах. Например, наночастицы оксидов железа в магнитных бактериях *magnetotactic spirillum* играют важную функциональную роль ориентации бактерий в магнитном поле Земли [1].

Уникальные возможности для исследований и практических применений открываются с использованием управляемого внедрения наночастиц в отдельные клетки или биологические системы. Таким путем можно корректировать кровоток в венах и капиллярах, питающих злокачественные образования, или вызывать локальную гипертермию этих образований через поглощение магнитными наночастицами энергии внешнего электромагнитного поля.

Для определения магнитных свойств наночастиц, управления их перемещением и форезом в биологической системе находят применение планарные магнитные системы с постоянными магнитами на основе редкоземельных материалов, создающие неоднородные плоскопараллельные магнитные поля.

В качестве характеристики самой системы как источника магнитного поля с распределенными параметрами при ее разработке и экспериментальных исследованиях может быть использовано значение магнитной индукции. Детальную информацию о свойствах системы получают сканированием [2], т.е. измерением индукции поля рассеяния в разных точках на рабочей поверхности системы или вблизи нее [3]. Об-

работка результатов измерения магнитной индукции, привязанных к двумерному пространству рабочей поверхности, выполняется с целью определения обобщенных характеристик, необходимых для сравнительной оценки качества систем по топографии их магнитного поля.

Для создания одномерных и двумерных периодических пространственных распределений магнитной индукции были разработаны и изготовлены системы с постоянными магнитами из материалов NdFeB [4]. Система с одномерной периодичностью (рис. 1), предназначенная для сепарации магнитных частиц, образована набором постоянных магнитов призматической формы, разделенных немагнитными вставками.

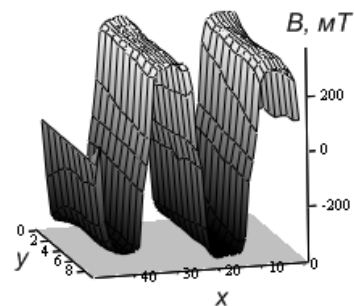


Рисунок 1 – Распределение магнитной индукции системы с одномерной периодичностью

Для исследования фармакокинетики наночастиц в образцах феррожидкости использовались системы с двумерной периодичностью магнитного поля (рис. 2), в которых постоянные магниты цилиндрической

форми располагались в узлах сетки с заданным шагом.

Двумерные данные, представленные графически, иллюстративны, но лишены обобщений, необходимых для целостной оценки магнитных систем. Помимо этого существует необходимость в наличии некоторой идеальной модели, которая могла бы быть использована и для исследований последствий возможных вариаций пространственных параметров системы, и в качестве образца для численной оценки качества реальных систем.

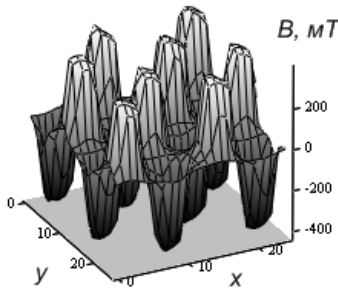


Рисунок 2 – Распределение магнитной индукции системы с двумерной периодичностью

Целью работы является создание гармонических моделей планарных магнитных систем с одномерной и двумерной периодичностями для исследования пространственных спектральных характеристик и сравнительной оценки их качества.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Известно, что сигналы в пространстве могут быть представлены многомерным преобразованием Фурье в виде комплексного спектра, т.е. элементарных гармонических сигналов – бесконечно продолжающихся пространственных волн [5].

Спектральные оценки, основанные на финитном преобразовании Фурье, имеют ряд особенностей, связанных со сдвигом частоты максимума вещественной части комплексного спектра гармонической составляющей, его ненулевым значением для всех других частот спектра и трансформацией δ -импульса идеального спектра с площадью, равной $1/2$, в участок с конечной высотой и шириной [6, 7].

В пространственных оценках комплексных спектров обоих типов планарных систем (рис. 3) заметна доминирующая роль основных гармонических составляющих, определяемых расположением магнитов.

По этой причине идеальная модель распределения индукции на поверхности планарной системы с двумерной периодичностью (рис. 4,а) в первом приближении должна содержать эту гармоническую составляющую

$$B(x, y) = B_{\max} \sin(\omega_x x) \sin(\omega_y y), \quad (1)$$

где x, y – прямоугольные координаты точки поверхности планарной системы; ω_x, ω_y – круговые частоты гармонических составляющих пространственных волн.

Модуль спектра модели (рис 4,б) отличается отмеченными выше особенностями спектрального оценивания посредством финитного преобразования Фурье.

Дальнейшее уточнение гармонической модели и ее тестирование связано с выявлением зависимости пространственных спектров от изменения распределения индукции отдельных полюсов системы или их смещения в двумерном пространстве с сохранением непрерывности распределения индукции по каждому направлению осей прямоугольных координат системы.

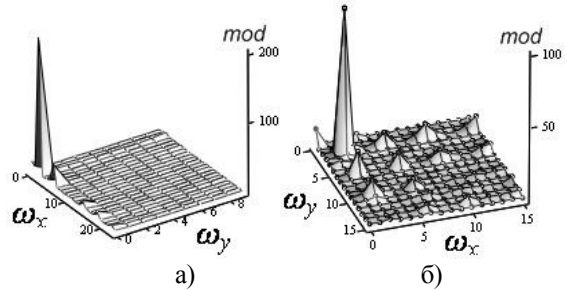


Рисунок 3 – Модули комплексных спектров: а) – для системы с одномерной периодичностью; б) – для системы с двумерной периодичностью

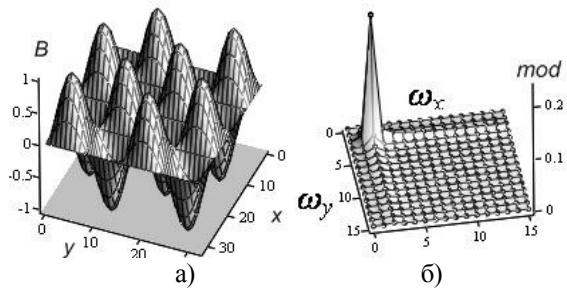


Рисунок 4 – Гармоническая модель планарной системы с двумерной периодичностью: а) – распределение магнитной индукции; б) – модуль комплексного спектра

Гибкость и простота построения и настройки модели планарной многополюсной магнитной системы позволят не только оценить ее качество, но и исследовать с помощью вычислительных экспериментов свойства систем различных конфигураций и размеров.

Эти требования можно реализовать в моделях планарных систем, представляющих собой объединение элементарных моделей однотипных или разнотипных полюсов. В качестве примера рассмотрим построение моделей полюсов, предназначенных для синтеза целостной модели планарной системы или, например, замещения отдельных полюсов рассмотренной выше гармонической модели системы.

Основой ряда моделей полюсов является простейшая из них, гармоническая, реализующая, как и модель системы, выражение (1) для $0 \leq \omega_x \leq \pi$ и $0 \leq \omega_y \leq \pi$. Модель, предназначенная для синтеза двумерной матрицы данных в целом или замещения в готовой матрице отдельных данных, принадлежащих замещаемым полюсам, должна иметь одинаковую с

остальными элементами размерность. Построение модели полюса описывается следующим выражением:

$$B_{j,i} = B_m^p \sin(\delta\omega_x i) \sin(\delta\omega_y j), \quad (2)$$

где B_m^p – амплитудное значение магнитной индукции полюса, $\delta\omega_x = \delta\omega_y = \pi / N_p$, $N_{px} = N_{py} = N_p$ – число столбцов и строк в матрице данных полюса, $i = 0 \dots N_p - 1$, $j = 0 \dots N_p - 1$.

На рис. 5 показано распределение индукции на поверхности гармонической модели положительного полюса для $B_m^p = 1$ и $N_p = 8$.

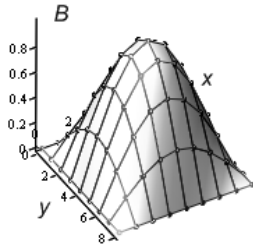


Рисунок 5 – Гармоническая модель полюса системы

Смещение полюса гармонической модели в одном из направлений реализуется «частотной модуляцией» – изменением круговой частоты в пределах полуволны. Смещенный полюс должен сопрягаться на границах модели с соседними полюсами противоположного знака, поэтому начальный угол синусоиды в смещаемом направлении равен $3\pi/2$. Этот угол соответствует экстремальному значению единичной индукции предыдущего полюса с отрицательной полярностью. Определим параметры «модулирующего сигнала» для синусоиды с единичной амплитудой и угловой частотой $\omega = 2\pi / N_S$, где N_S – число отсчетов в смещаемом направлении.

Положительное или отрицательное смещение $\Delta\phi$ точки максимума синусоиды в угловых единицах используем для вычисления сдвига максимума в единицах отсчетов $\Delta_{\max} = N \cdot \Delta\phi / 2\pi$. Тогда номер отсчета смещенного максимума определится суммой

$$n_{\max} = N_S / 2 + N_S \cdot \Delta\phi / 2\pi = N_S \cdot (\pi + \Delta\phi) / 2\pi.$$

Сопряжение в этой точке потребует выполнения равенства

$$\sin\left[n_{\max} \cdot (\omega - \Delta_a \omega) + \frac{3}{2}\pi\right] = 1. \quad (3)$$

Откуда получим выражение для определения приращения скорости на начальном участке

$$\frac{3}{2}\pi \dots \frac{5}{2}\pi + \Delta\phi$$

$$\Delta_a = \frac{\pi + \omega \cdot n_{\max}}{n_{\max}}.$$

Для участка, следующего за точкой экстремума, аргумент смещаемой синусоиды изменяется в диапазоне $\frac{5}{2}\pi + \Delta\phi \dots \frac{7}{2}\pi$. Условие сопряжения в конечной точке диапазона, соответствующей экстремальному

значению единичной индукции последующего полюса, требует выполнения равенства

$$\sin\left[n_{\max}(\omega - \Delta_b) + \frac{3}{2}\pi + (N_S - n_{\max})(\omega + \Delta_b)\right] = -1, \quad (4)$$

из которого и определяется приращение угловой скорости на этом участке:

$$\Delta_b = \frac{N_S \omega - n_{\max} \Delta_a \omega}{N_S - n_{\max}}.$$

Значения исходной и смещенной синусоид в точках отсчета определяются из выражений (1), (3), (4):

$$B_i^p = \sin\left(\omega i + \frac{3}{2}\pi\right), \quad i = 0 \dots N_S;$$

$$B_i^{Sp} = \sin\left[i(\omega - \Delta_a \omega) + \frac{3}{2}\pi\right], \quad i = 0 \dots n_{\max}; \quad (5)$$

$$B_i^{Sp} = \sin\left[n_{\max}(\omega - \Delta_b) + \frac{3}{2}\pi + (i - n_{\max})(\omega + \Delta_b)\right],$$

$$i = n_{\max} + 1 \dots N_S.$$

На рис. 6 представлены графики несмещенной и смещенной синусоид, а также их разностные значения, вычисленные для $N_S = 16$.

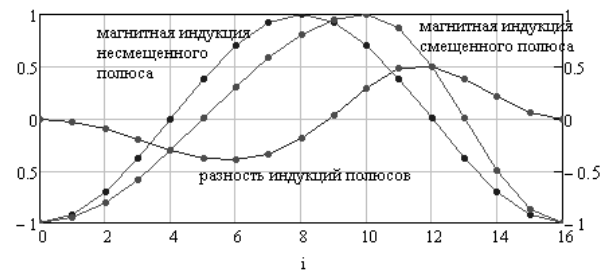


Рисунок 6 – «Частотная модуляция» синусоидального сигнала

Заменяя в уравнении (1) один или оба множителя синусоидами B_i^p и синусоидами со смещенным максимумом B_i^{Sp} из (5), получим в дополнение к модели полюса, представленного на рис. 5, еще три другие. Первые две модели (рис. 7,а и 7,б) имеют смещенный максимум по одной координате, тогда как третья из них смещена по обеим координатам (рис. 7,в). Модели с отрицательным полюсом получаются простым инвертированием моделей для положительных полюсов.

Пространственные модификации гармонической модели полюса дополним моделями с коррекцией закона распределения магнитной индукции. Построчное рассмотрение сканированных данных (рис. 2) показывает наличие уплощенных областей экстремальных значений индукций, вызванных конечными размерами постоянных магнитов планарной системы. Гармоническая модель полюса легко адаптируется к передаче этой особенности реальной системы введением порогового ограничения экстремальных значений положительной и отрицательной магнитной индукции (рис. 8,а).

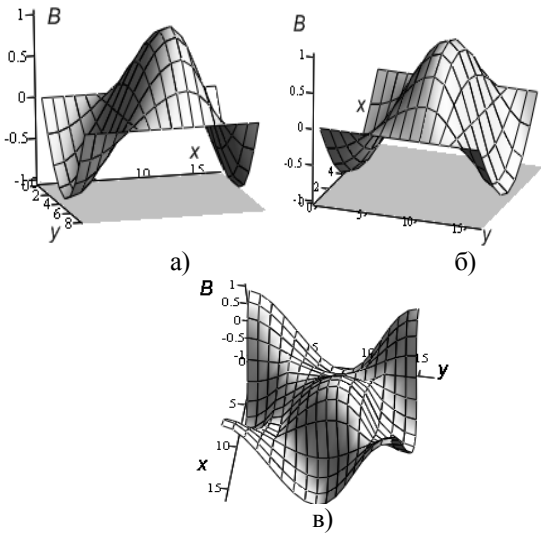


Рисунок 7 – Модели смещенных полюсов:
а) – в направлении оси X ; б) – в направлении оси Y ;
в) – смещение по осям XU

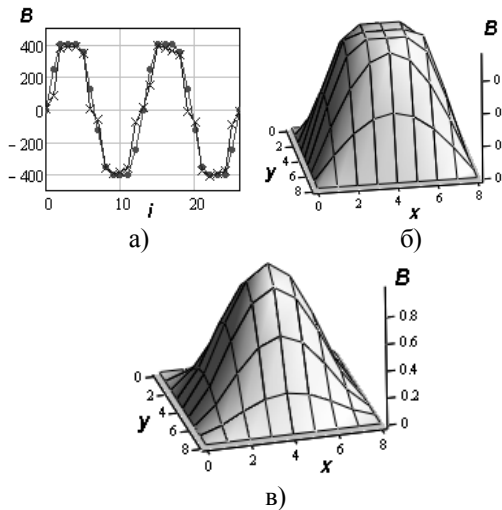


Рисунок 8 – Нелинейные модели полюсов:
а) – ограничение амплитуды магнитной индукции;
б) – моделирование межполюсных «ступенек»

Выбором порога ограничения можно приблизить модель к отображению свойств реального полюса с требуемой точностью. На рис. 8,б показана модель полюса с порогом ограничения индукции $B_{lim} = 0,75$.

Еще одно уточнение модели, связанное с изменением закона распределения индукции, сопряжено с имитацией ступенек при переходе в межполюсных промежутках системы через нулевое значение (рис. 8,в). Замещение сомножителей в (2) синусоидами со степенями, отличными от 1, приближенно воспроизводит ступеньки перехода через нуль (рис. 8,в).

Влияние отклонений параметров отдельных полюсов на спектральные характеристики планарной системы с постоянными магнитами удобно определять сравнением таких систем с идеальной гармонической моделью, описываемой уравнением (1). В этом случае спектральные характеристики результата разностного

сравнения распределений магнитной индукции в двумерных пространствах будут иметь обобщающий характер. Начнем эти сравнения для случаев смещения одного или более полюсов системы.

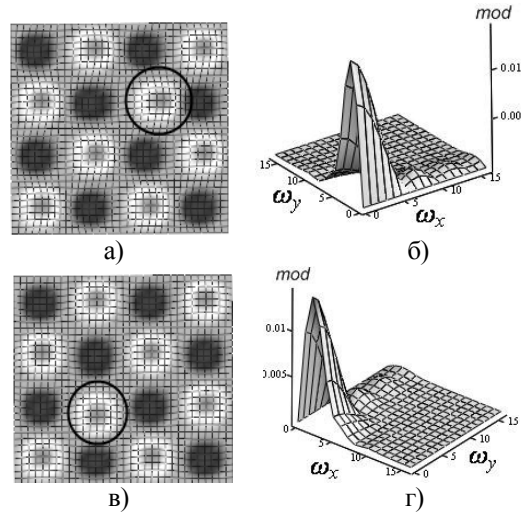


Рисунок 9 – Смещенный полюс в планарной системе: а) – смещение по оси X ; б) – модуль спектра со смещенным по оси X полюсом;
в) – смещение по оси Y ; г) – модуль спектра со смещенным по оси Y полюсом

Смещение одного полюса по оси X (рис. 9,а) приводит к появлению ненулевых значений модуля частотной характеристики разностного сравнения для $\omega_x = 0$ (рис. 9,б). Подобная картина наблюдается и при смещении полюса по направлению оси Y (рис. 9,в) – для нулевой пространственной частоты ω_y значения модуля комплексного спектра разностного сравнения также не равны нулю (рис. 9,г).

Одновременное смещение полюса в направлении обеих координат (рис. 10,а) приводит к совмещению рассмотренных односторонних смещений с ненулевыми значениями модуля спектра разности распределения индукции для нулевых значений круговых пространственных частот (рис. 10,б).

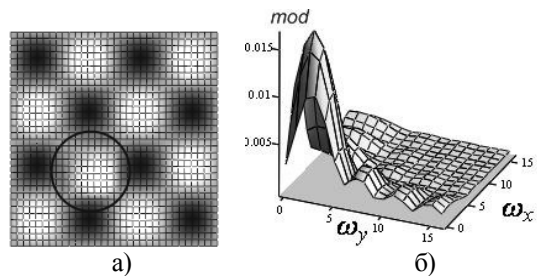


Рисунок 10 – Смещенный по осям XU полюс планарной системы: а) – пространственное распределение магнитной индукции; б) – модуль пространственного спектра

В сравнении с гармонической моделью значение модуля комплексного спектра планарной системы с пороговым ограничением значений магнитной индукции (рис. 11,а) имеет меньшее значение для основной частоты (рис. 11,б).

Кроме того, нелинейный характер распределения магнитной индукции на поверхности системы вызывает появление нечетных гармоник в спектре этой модели (рис. 11,б), что согласуется с экспериментальными данными (рис. 3,б).

Другая нелинейность в виде полюса с имитацией ступенек в межполюсных промежутках, введенная в систему (рис. 12,а), также оказывает влияние на модуль спектра разностной оценки такой системы (рис. 12,б).

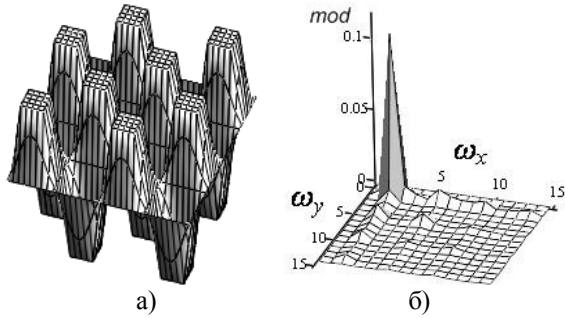


Рисунок 11 – Модель полюса с ограничением амплитудных значений магнитной индукции: а) – пространственное распределение магнитной индукции; б) – модуль пространственного спектра

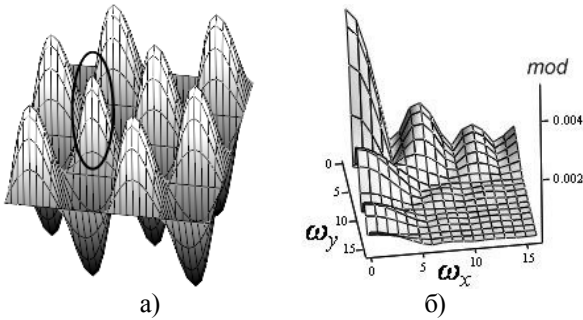


Рисунок 12 – Моделирование планарной системы с имитацией переходных ступенек в распределении магнитной индукции: а) – пространственное распределение магнитной индукции с замещенным полюсом; б) – модуль пространственного спектра

В завершение рассмотрения сравнительных спектральных характеристик планарных систем с нарушениями пространственного и параметрического распределения магнитной индукции покажем проявление в спектральной области смещения уже двух полюсов по одной из осей координат. Одинаковым значениям смещений по оси X (рис. 13,а) соответствуют и одинаковые значения двух максимумов модуля комплексного спектра для $\omega_x = 0$ (рис. 13,б).

В качестве примера рассмотрим влияние на модуль комплексного спектра планарной системы нарушения пространственного распределения индукции за счет смещения одного из полюсов системы. Модель смещенного полюса в этом случае также использует «частотную модуляцию» в пределах изменения фазового угла $3\pi/2 \dots 5\pi/2$. Равномерное смещение всего полюса в направлении оси X реализуется одинаковым

распределением магнитной индукции в этом направлении для всех значений Y .

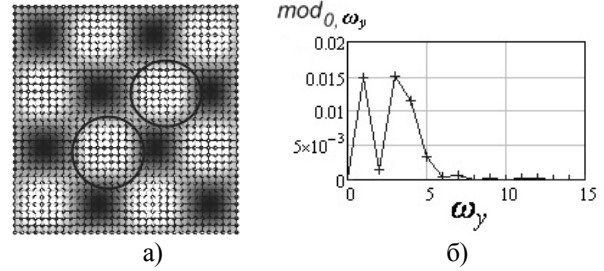


Рисунок 13 – Смещение двух положительных полюсов по оси X : а) – пространственное распределение магнитной индукции; б) – модуль пространственного спектра для $\omega_x = 0$

Модели полюсов, подобные уже рассмотренным, были реализованы и для планарных магнитных систем с одномерной периодичностью (рис. 1). Здесь более заметную роль играет ограничение наибольших положительных и отрицательных значений магнитной индукции, что было учтено в гармонической модели, представленной на рис. 14,а. Модуль комплексного спектра модели (рис. 14,б) содержит выраженные составляющие нечетных гармоник, что также согласуется с результатами обработки сканированных данных (рис. 3,а).

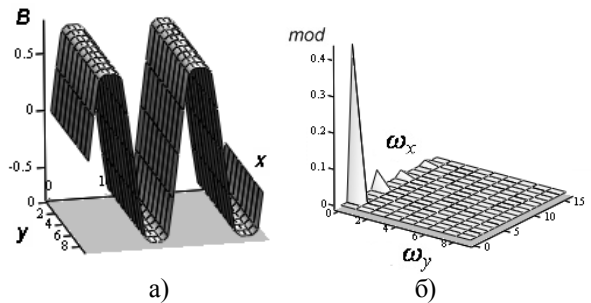


Рисунок 14 – Гармоническая модель одномерной планарной системы с ограничением амплитудных значений магнитной индукции: а) – пространственное распределение магнитной индукции; б) – модуль пространственного спектра

Моделирование неравномерного смещения по оси X по сути является моделированием поворота полюса вокруг некоторой точки и может быть реализовано введением зависимости приращений угловой скорости «частотной модуляции» от координаты, в которой – в других случаях – не проявляется двумерность, т.е. от координаты Y в рассматриваемом примере. Здесь мы ограничимся рассмотрением простого смещения полюса в планарной системе с одномерной периодичностью пространственного распределения магнитной индукции.

На рис. 15,а показано пространственное распределение магнитной индукции смещенного полюса с одномерной периодичностью.

Результат разностного сравнения гармонических моделей со смещенным и несмещенными полюсами представлен на рис 15,б, а модуль его комплексного спектра – на рис. 15,в.

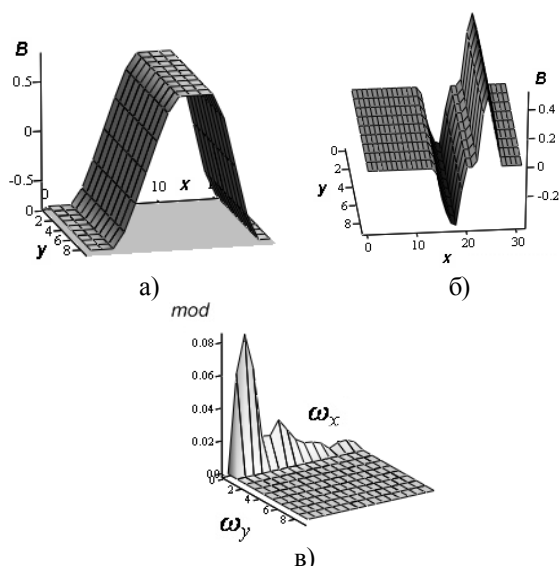


Рисунок 15 – Характеристики одномерной планарной системы со смещенным полюсом: а) – модель смещенного полюса с одномерной периодичностью; б) – разностное сравнение пространственного распределения планарных систем; в) – модуль пространственного спектра разностного сравнения

ВЫВОДЫ. 1. По результатам анализа сканированных данных планарных систем с постоянными магнитами, предназначенными для применения в биологических экспериментах с ферромагнитными жидкостями, предложено использование гармонических моделей систем с одномерной и двумерной периодичностью пространственного распределения магнитной индукции.

SPATIAL SPECTRAL CHARACTERISTICS OF THE PLANAR SYSTEMS WITH PERMANENT MAGNETS

R. Mazmanian, I. Kondratenko

Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine

prosp. Pobedy, 56, Kiev, 03680, Ukraine. E-mail: mazmanian@ied.org.ua, dep7ied@ukr.net

The spatial spectrums of surfaces scanning data of the multipolar planar systems with permanent magnets are presented. Possibilities and ways of harmonic models use for research of properties and a comparative estimation of planar systems by means of multidimensional Fourier transform are shown. Mathematical models for various modes of poles of planar system, including with disturbance of the space and parametric distribution of magnetic induction are drawn. The received results are supposed to use in biological experiments with ferromagnetic liquids.

Key words: magnets, planar systems, spatial spectrum.

REFERENCES

1. Frankel R.B., Blakemore R.P., Wolfe R.S. // *Science*. – 1979. – Iss. 203. – N 4387. – P. 1355.
2. Katys G.P. *The automatic scanning*. – M.: Mashinostroenie. – 1969. – 520 p. [in Russian]
3. Brajko V.V. *Galvanomagnetic converters in the measuring technics* / Under the editorship of S.G. Taranova. – M.: Energoatomizdat, 1984. – 360 p. [in Russian]
4. Strnat K.J. Modern Permanent Magnets for Applications in Electro-Technology // *Proceedings of the IEEE*. – 1990. – Iss. 78. – № 6. – P. 923.
5. Dajion D, Mersero R. *Digital processing of multi-dimensional signals* / Transl. from English. – M.: Mir, 1988. – 488 p. [in Russian]
6. Otnes P., Enocson L. *The applied analysis of time series. The basic methods*. – M.: Mir, 1982. – 428 p. [in Russian]
7. Marpl S.L. *The digital spectral analysis and its applications* / Transl. from English. – M.: Mir, 1990. – 584 p. [in Russian]

Стаття надійшла 22.02.2012.

Рекомендована до друку
д.т.н., проф. Бранспизом Ю.А.