

### ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО ПРОВОДНИКОМ С ПЕРЕМЕННЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

*В статье рассмотрены магнитные поля диамагнетика, парамагнетика и ферромагнетиков. Дана классификация полей. Исследованы особенности аксиального магнитного поля ферромагнетиков.*

**Ключевые слова:** азимутальное магнитное поле, аксиальное магнитное поле, индукция, напряженность, индикаторная катушка.

*Антошко В.Я. Дослідження магнітного поля створюваного провідником із змінним електричним струмом. У статті розглянуті магнітні поля діамагнетика, парамагнетика і ферромагнетиків. Дана класифікація полів. Дослідженні особливості аксіального магнітного поля ферромагнетиків.*

**Ключові слова:** азимутальне магнітне поле, аксіальне магнітне поле, індукція, напруженість, індикаторна катушка.

*Antoshko V.YA. Scientific research of a magnetic field created by conductor with an alternating current. The article describes the magnetic fields of diamagnetic, paramagnetic and ferromagnetic. The classification of the fields is given. The properties of the axial magnetic field of the ferro-magnetic were investigated.*

**Keywords:** azimuth magnetic field, axial magnetic field, induction, tension, indicator reel.

**Постановка проблемы.** Исследование магнитных полей проводников с переменным электрическим током промышленной частоты с целью их классификации.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Известно, что вокруг проводника с током создается магнитное поле, окружающее проводник в виде замкнутых силовых линий. Вектор индукции  $\vec{B}$  магнитного поля и проводник с током расположены во взаимно перпендикулярных плоскостях. Математически индукция магнитного поля описывается законом Био-Савара-Лапласа [1].

В случае ферромагнетиков в отличие от диа-и парамагнетиков обнаружено наличие магнитного поля [2], которое направлено вдоль проводника с током, т.е. вектор индукции  $\vec{B}$  этого поля совпадает с осью проводника. В литературе, научных работах по данному вопросу нет никакой дополнительной информации.

Таким образом, проводники с электрическим током создают два вида различных магнитных полей. По этой причине возникает необходимость ввести для них и соответствующие названия.

Магнитное поле, которое описывается законом Био-Савара-Лапласа, условно назовем азимутальным магнитным полем. Магнитное поле, направленное вдоль оси проводника, является аксиальным (от латинского слова *axialis* – осевой).

**Цель статьи** - состоит в исследовании характерных особенностей аксиальных магнитных полей, создаваемых проводниками с переменным электрическим током, с целью практического использования этих зависимостей.

**Изложение основного материала.** Для исследования использовались цилиндрические магнетики (диамагнетик, парамагнетик, ферромагнетик) в виде проволоки длиной 0,25 м., диаметром 2мм. Азимутальные магнитные поля измерялись с помощью тороидальной индикаторной катушки, расположенной вокруг проводника. Аксиальные магнитные поля исследовались с помощью соленоида, намотанного на магнетик. Действующие значения Э.Д.С. индикаторных катушек и тока в магнетиках измерялись цифровым прибором Ф 4372.

Индукция магнитных полей вычислялась по формуле:

$$B = \frac{\varepsilon}{4,44 \cdot v \cdot N \cdot S}, \quad (1)$$

\* канд. техн. наук, доцент, Азовский морской институт Одесской национальной морской академии, г. Мариуполь

где  $\varepsilon$  - э.д.с. индикаторной катушки;  
 $\nu$  - частота переменного тока 50 гц.;  
 $N$  – число витков индикаторной катушки.

Для определения напряженности аксиального магнитного поля, создаваемого ферромагнетиком с электрическим током, каждое значение э.д.с. индикаторной катушки идентифицировалось с помощью внешнего переменного магнитного поля с заданной напряженностью. Для этого ферромагнетик обесточивался, а необходимая э.д.с. индикаторной катушки наводилась за счет внешнего магнитного поля, напряженность которого оценивалась по формуле:

$$H = n \cdot I, \quad (2)$$

где  $n$  - число витков, приходящееся на единицу длины катушки, создающей внешнее магнитное поле;

$I$  – переменный электрический ток.

Исследования ферромагнетиков проводились с использованием переменного электрического тока промышленной частоты. Ферромагнетик перед каждым измерением размагничивался.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что зависимость индукции азимутальных магнитных полей от силы переменного электрического тока является одинаковой как для диа –и парамагнетика, так и ферромагнетика и не зависит от их физических свойств в случае линейного проводника (табл.1). Значит, азимутальные магнитные поля магнетиков, как и вытекает из закона Био-Савара-Лапласа, зависят только от величины электрического переменного тока, а не от особенностей внутреннего строения вещества.

Таблица 1

Зависимость азимутальных магнитных полей магнетиков от величины переменного электрического тока

Сила перем. эл.тока в магнетиках $I, A$	Типы магнетиков		
	Cu	Al	Ст. 20
	Диамагнетик	Парамагнетик	Ферромагнетик
	Индукция азимутального магнитного поля $B, Tл$	Индукция азимутального магнитного поля $B, Tл$	Индукция азимутального магнитного поля $B, Tл$
1	$0,6 \cdot 10^{-4}$	$0,6 \cdot 10^{-4}$	$0,6 \cdot 10^{-4}$
2	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
3	$2,18 \cdot 10^{-4}$	$2,15 \cdot 10^{-4}$	$2,15 \cdot 10^{-4}$
4	$2,88 \cdot 10^{-4}$	$2,91 \cdot 10^{-4}$	$2,88 \cdot 10^{-4}$
5	$3,72 \cdot 10^{-4}$	$3,72 \cdot 10^{-4}$	$3,72 \cdot 10^{-4}$
6	$4,33 \cdot 10^{-4}$	$4,36 \cdot 10^{-4}$	$4,33 \cdot 10^{-4}$
7	$5,09 \cdot 10^{-4}$	$5,06 \cdot 10^{-4}$	$5,09 \cdot 10^{-4}$
8	$5,81 \cdot 10^{-4}$	$5,81 \cdot 10^{-4}$	$5,84 \cdot 10^{-4}$
9	$6,45 \cdot 10^{-4}$	$6,48 \cdot 10^{-4}$	$6,48 \cdot 10^{-4}$

Впервые установлено, что только ферромагнетики, через которые проходит переменный электрический ток, способны создавать аксиальные магнитные поля (Табл. 2), которые имеют ряд характерных особенностей. Они зависят от степени деформации ферромагнетика, от его остаточной намагниченности, от ориентации ферромагнетика относительно магнитного поля Земли и других факторов.

При расположении ферромагнетика поперек магнитного поля Земли индукция аксиального магнитного поля составит  $2 \cdot 10^{-3}$  Тл. Изменение ориентации ферромагнетика вдоль магнитного поля Земли увеличивает индукцию аксиального магнитного поля до  $2,2 \cdot 10^{-2}$  Тл. (Рис. 1).

Следует отметить, что чувствительность аксиальных магнитных полей ферромагнетиков превосходит чувствительность существующих устройств для измерения магнитных полей, ис-

пользующих продольное намагничивание ферромагнетика с помощью обмотки возбуждения [3].

Таблица 2  
 Зависимость аксиального магнитного поля ферромагнетика от величины переменного электрического тока

Сила перем. эл.тока в магнетиках I, А	Типы магнетиков		
	Сu	Al	Ст. 20
	Диамагнетик	Парамагнетик	Ферромагнетик
	Индукция азимутального магнитного поля В, Тл	Индукция азимутального магнитного поля В, Тл	Индукция азимутального магнитного поля В, Тл
1	0	0	$9,078 \cdot 10^{-4}$
2	0	0	$11,311 \cdot 10^{-4}$
3	0	0	$12,816 \cdot 10^{-4}$
4	0	0	$14,951 \cdot 10^{-4}$
5	0	0	$17,379 \cdot 10^{-4}$
6	0	0	$19,951 \cdot 10^{-4}$
7	0	0	$22,039 \cdot 10^{-4}$
8	0	0	$23,883 \cdot 10^{-4}$
9	0	0	$25,437 \cdot 10^{-4}$

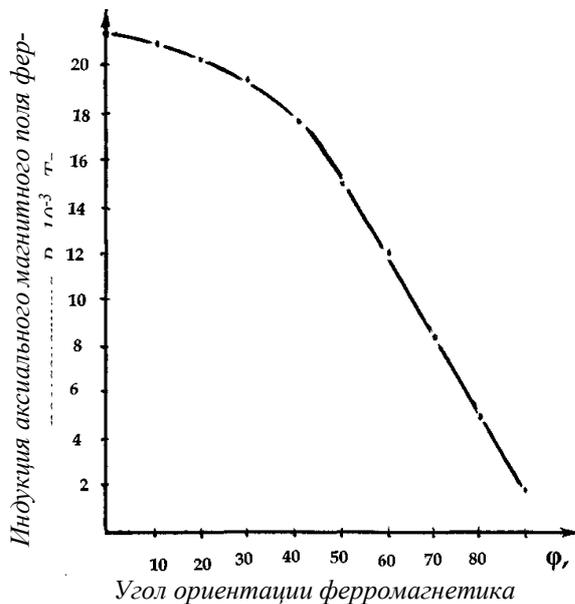


Рис.1 – Зависимость индукции аксиального магнитного поля ферромагнетика от его ориентации относительно магнитного поля Земли



Рис.2 - Зависимость напряженности аксиального магнитного поля ферромагнетика от величины переменного электрического тока

При этом, в силу отмеченных особенностей, устройства для получения аксиальных магнитных полей отличаются достаточной простотой.

Для оценки аксиальных магнитных полей ферромагнетиков, кроме индукции магнитного поля необходимо знать и напряженность  $H$ , т.е. параметр, характеризующий магнитное поле макротоков.

Полученная зависимость напряженности  $H$  аксиального магнитного поля от величины переменного электрического тока в ферромагнетике имеет характерный вид с выраженной точ-

кой перегиба при значении тока 0,7А (Рис. 2).

Эта зависимость может быть описана следующими математическими выражениями. В интервале значений электрического переменного тока от 0 до 0,7А зависимость описывается выражением:

$$H_1 = a \cdot I, \quad (3)$$

где  $a$  - некоторая постоянная величина.

Для токов в интервале от 0,7А до 6,6А эмпирическая зависимость напряженности аксиального магнитного поля принимает вид:

$$H_2 = b + c \cdot I \quad (4)$$

Для данного ферромагнетика (сталь 20,  $\varnothing 2$  мм) постоянные величины имеют следующие значения:

$$a = 3,271 \frac{1}{\text{м}}; \quad b = 1,75 \frac{\text{А}}{\text{м}}; \quad c = 0,933 \frac{1}{\text{м}}$$

Характерным оказалось и влияние внешнего постоянного магнитного поля на индукцию аксиального магнитного поля ферромагнетика. В начале процесса индукция переменного аксиального поля резко возрастает с увеличением напряженности постоянного внешнего магнитного поля, а, достигнув некоторого максимального значения, начинает постепенно уменьшаться, примерно, до первоначального уровня. Дальнейшее увеличение напряженности постоянного магнитного поля приводит к постепенному незначительному увеличению индукции аксиально-переменного магнитного поля ферромагнетика (Рис. 3).

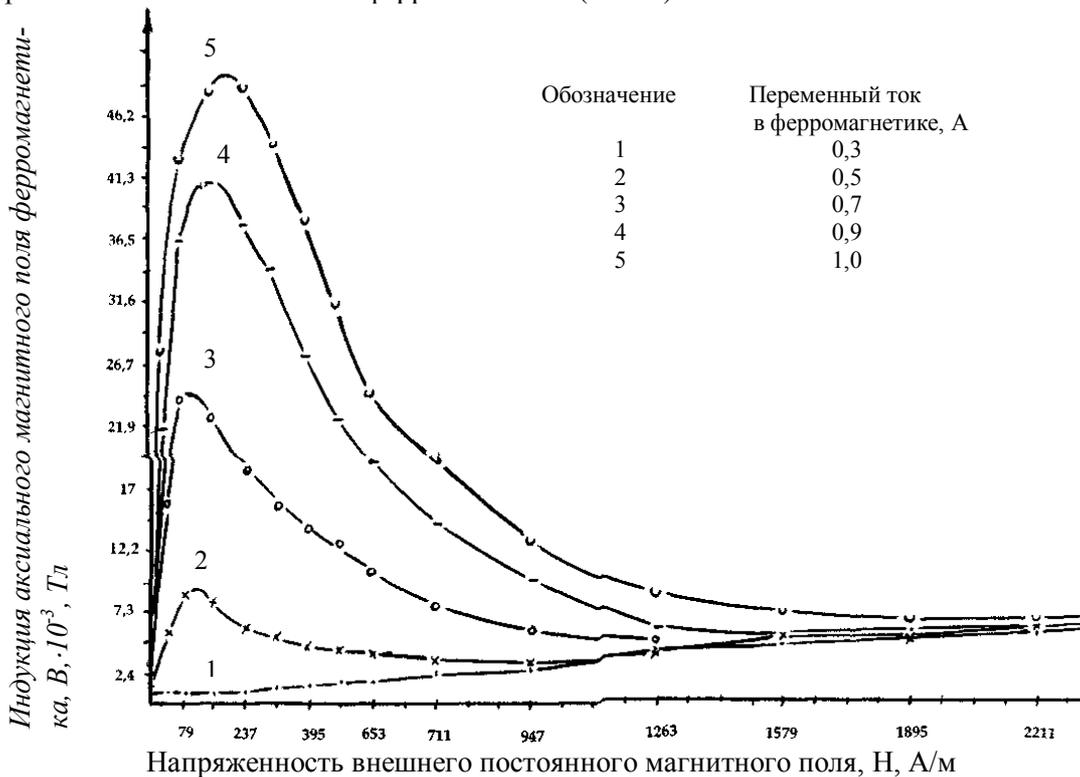


Рис.3 – Зависимость индукции аксиального магнитного поля ферромагнетика от напряженности внешнего постоянного магнитного поля

Следует отметить, что максимум этой зависимости, в интервале токов, проходящих через ферромагнетик от 0,4А до 0,7А, приходится на небольшой интервал напряженностей (75А/м ÷ 91А/м).

Изменение электрического тока в ферромагнетике от 0,8А ÷ 6,0А приводит к значительному увеличению напряженности внешнего магнитного поля, соответствующей максимальному значению индукции аксиального магнитного поля [зависимость  $B = f(H)$ ], от 157А/м до 711А/м (Табл. 3).

Изменение этой зависимости достаточно хорошо согласуется с зависимостью напряженности аксиального магнитного поля ферромагнетика от величины электрического тока в нем (Рис. 2).

Таблица 3

Зависимость напряженности внешнего постоянного магнитного поля соответствующей максимальному значению зависимости  $B = f(H)$ , от силы переменного электрического тока в ферромагнетике

Переменный ток в ферромагнетике I, А	Напряженность внешнего магнитного поля соответствующего максимальному значению зависимости $B = f(H)$ H, А/м
0,3	-
0,4	75
0,5	83
0,6	87
0,7	91
0,8	157
0,9	158
1,0	221
3,0	474
6,0	711

#### Выводы

1. Аксиальные магнитные поля присущи только ферромагнетикам.
2. Чувствительность аксиальных магнитных полей к внешним постоянным магнитным полям значительно превосходит чувствительность используемых электромагнитных систем.
3. Установлено, что аксиальные магнитные поля ферромагнетиков обусловлены несколькими факторами. Можно предположить, что ответственными за аксиальные поля являются как микро-токи, так и макро-токи под воздействием электромагнитных полей.
4. Полученные зависимости позволяют использовать аксиальные магнитные поля ферромагнетиков как элементы измерительных систем электрических сигналов.
5. Аксиальные магнитные поля могут быть использованы для дистанционного определения ориентации объектов относительно магнитного поля Земли, для исследования физических свойств ферромагнитных изделий.

#### Список использованных источников:

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики, - М., Высшая школа, - 1989, - с.235 – 243.
2. Пат. 47587, Україна, МПК G 01 R 33/00, Пристрій для вимірювання магнітного поля / В.Я. Антошко,-№ 09441; заявл.14.09.2009; опубл. 10.02.2010, Бюл. № 3.
3. К теории дифференциальных феррозондов с продольным возбуждением / Р.И.Янус и др, Труды института физики металлов, АН СССР, Свердловск Вып. 21, 1959 г., с.313 - 326

Рецензент: Ю.Л. Саенко  
 д-р техн. наук, профессор, ПГТУ

Статья поступила 21.04.2010