

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

На правах рукописи

БУРЕЙМА СЕЙБУ /Нигер/

АНАЛИЗ И ЭЛЕМЕНТЫ СИНТЕЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ  
СИСТЕМ ФЕРРОЭЛЕКТРИКОВ СО СТЕЖЕНЕВЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ

Специальность 05.09.05 – теоретическая электротехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

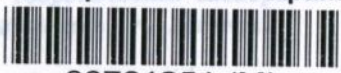
Киев - 1995

21.3.01

АВ 33.072

Диссертацией является рукопись.  
Работа выполнена на кафедре  
Всеукраинского государственного

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00761251 (M)

Научный руководитель - докт  
Яковенко Валерий Владимирович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Емец Григорий Петрович ;  
доктор технических наук  
Романович Станислав Семенович.

Ведущее предприятие - ПО "Лугансктепловоз" , г. Луганск, Мин-ва  
ж.д. транспорта.

Защита состоится "25" 10 1995 г., в 11 час., на  
заседании специализированного ученого совета Д 01.98.02 при  
Институте электродинамики НАН Украины /252680, г. Киев-57, просп.  
Победы, 56. Тел. 446-91-15/.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института электро-  
динамики НАН Украины.

Автореферат диссертации разослан "25" 09 1995 г.

Ученый секретарь  
специализированного ученого совета  
доктор технических наук

В.С. Федий

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Несмотря на значительный прогресс в области разработки новых гальванических элементов, феррозонды продолжают успешно конкурировать с последними, так как обладают такими преимуществами, как более низкий порог чувствительности, лучшая температурная стабильность, более высокая механическая прочность. Недостатки, присущие феррозондам, такие как сложная технология отжига сердечников, нестабильность магнитных характеристик сердечников при механических воздействиях, высокая стоимость сопутствующих электронных схем в настоящее время во многом ликвидированы за счет использования в качестве магнитных материалов для сердечников аморфных сплавов и прогресса в области схемотехники.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования феррозондов, результаты которых опубликованы, дают основание прийти к заключению о том, что основой теоретических построений является функциональная зависимость между индукцией и напряженностью магнитного поля в сердечниках, которая определяется с использованием понятия размагничивающего фактора. Сам размагничивающий фактор рассчитывается по полуэмпирическим формулам, которые имеют достаточную точность в весьма узком диапазоне геометрических размеров сердечника и которые не учитывают значительное изменение магнитной проницаемости материала сердечника в течении рабочего цикла феррозонда. Не учитываются также реальные геометрические размеры катушек возбуждения и катушек выходной обмотки. Вследствие этого при инженерном расчете не только возникают существенные погрешности, но и нет возможности решить вопрос оптимизации параметров сердечников и катушек с целью улучшить метрологические характеристики феррозонда в конкретных условиях измерений.

Таким образом, можно считать, что теоретические исследования феррозондов не являются законченными и возникает необходимость в исследованиях их электромагнитных систем, которые определяют метрологические характеристики всего измерительного тракта магнитометра.

Хорошие перспективы в деле приближения теоретических построений к реальным физическим процессам в электромагнитных системах феррозонда дает исследование магнитного поля в области сер-

дечника с учетом его геометрических и магнитных параметров, а также с учетом параметров его катушек. Результаты анализа поля в сердечниках послужат исходными данными для построения эквивалентной схемы и математической модели образования выходного сигнала феррозонда без самого понятия коэффициента размагничивания и дадут возможность оптимизировать управляемые параметры его электромагнитной системы.

Учитывая вышесказанное, можно считать, что решение задачи повышения эффективности одного из распространенных магниточувствительных элементов путем оптимизации его параметров является актуальной научно-технической задачей.

Объектом исследования является электромагнитная система феррозонда со стержневыми сердечниками прямоугольного и круглого сечений.

Целью и основными научными задачами работы является совершенствование методов анализа стержневых электромагнитных систем феррозондов, на основе которого путем оптимизации их параметров улучшаются метрологические характеристики рассматриваемого класса магнитометрических средств.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- адаптирование известных и создание новых математических моделей магнитного поля в сердечниках феррозондов с учетом нелинейных свойств их магнитных материалов;
- разработка методов численного и аналитического решения интегральных уравнений, являющихся моделью поля в сердечниках;
- анализ и синтез поля в сердечниках при различных значениях параметров сердечников и катушек при однородном и неоднородном измеряемых полях;
- экспериментальная проверка результатов, полученных теоретическим путем.

Методы исследований включают метод интегральных уравнений, примененный для расчета поля в нелинейной ферромагнитной среде, синтез поля, основанный на решении интегральных уравнений Фредгольма I-го рода. Проводились численные эксперименты по разработанным автором алгоритмам. Использовались для построения математической модели образования выходного сигнала феррозонда нелинейные дифференциальные уравнения. Проведены экспериментальные исследования на натурных образцах феррозондов и тонких стержней.

Научная новизна.

- разработаны математические модели на основе интегральных уравнений для расчета магнитного поля в электромагнитных системах феррозондов с учетом нелинейных характеристик ферромагнитных материалов;

- разработана и научно обоснована методика расчета электромагнитных систем феррозондов и их функций преобразования с использованием интегральных параметров поля в ферромагнитных сердечниках;

- предложена методика синтеза параметров катушки возбуждения феррозонда, основанная на численном решении уравнения Фредгольма I-го рода.

Теоретическая и практическая ценность. Разработан пакет прикладных программ для расчета функций преобразования феррозондов и для оптимизации параметров их электромагнитных систем. Результаты работы позволили укрепить методическую базу расчета и проектирования электромагнитных систем феррозондов.

Конкретный личный вклад диссертанта в разработку новых научных результатов, которые выносятся на защиту:

- концепция расчета электромагнитной системы феррозонда без использования понятия коэффициента размагничивания;

- математические модели для расчета магнитного поля в тонких стержнях с учетом нелинейных характеристик ферромагнитных материалов;

- результаты исследований магнитного поля в стержнях феррозондов;

- методика расчета функции преобразования феррозонда с использованием данных об интегральных параметрах поля в сердечниках;

- методика синтеза катушки возбуждения феррозонда.

Реализация результатов работы. Результаты работы использованы при создании технических средств контроля параметров движения украинского трамвая, выпускаемого ПО "Дугансктепловоз".

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на научных конференциях Восточноукраинского государственного университета за период 1993-95 г.г.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 3 статьи и тезисы научно-технической конференции.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 73 наи-

менований и приложения. Изложена на 112 страницах, из них 96 страниц машинописного текста, 32 рисунка на 16 страницах, список литературы на 7 страницах, приложение.

## II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дан анализ существующих в настоящее время методов анализа электромагнитных систем феррозондов со стержневыми сердечниками. Показано, что одним из основных параметров, определяющих функцию преобразования феррозонда является магнитная проницаемость сердечника, которая, в свою очередь, определяется коэффициентом размагничивания сердечника. Приведены существующие теоретические методы расчета коэффициентов размагничивания сердечников круглого и прямоугольного сечений. Показано, что существующие методы дают даже в достаточно узком диапазоне геометрических параметров сердечников погрешность 8%. Существенным фактором, влияющим на точность расчета коэффициента размагничивания, является величина намагниченности в сердечнике, которая в результате перемагничивания сердечника изменяет свое значение, что в настоящее время в расчетах феррозондов не учитывается. Кроме того, расчет коэффициента размагничивания ведется для центрального сечения сердечника, в то время как обмотки феррозонда занимают определенный участок сердечника, что также вызывает погрешность при расчете функции преобразования феррозонда. Вопрос влияния параметров катушек на характеристики феррозонда не рассматривался с теоретических позиций, в некоторых литературных источниках даны лишь практические рекомендации о расположении обмоток на сердечнике.

Вышеперечисленные проблемы, возникающие при расчете феррозондов невозможно решить, сохраняя в виде основного параметра сердечников коэффициент размагничивания, так как в этом случае неизбежны значительные погрешности. В настоящей работе предлагается новый подход к расчету электромагнитной системы феррозонда, который основан на расчете магнитного поля в сердечнике при различных временных интервалах формирования выходного сигнала. Естественно, что это требует значительных затрат на расчет, поэтому предусматривается упрощение алгоритма расчета и получение аналитических зависимостей для определения параметров поля в сердечниках феррозондов. В главе также приведен критический анализ и обзор методов расчета магнитных полей в нелинейных ферромагнитных средах. Результаты анализа показали, что наиболее приемлемым для расчета

поля в электромагнитных системах феррозондов является метод интегральных уравнений. Характерным для метода интегральных уравнений является существование большого многообразия отличающихся по свойствам решений форм записи интегральных уравнений. Поэтому поиски экономичных математических моделей и построение эффективных вычислительных алгоритмов решения интегральных уравнений весьма актуальны. Как показал анализ существующих публикаций по методу интегральных уравнений, его применение наиболее продуктивно для расчетов трехмерных полей.

В главе формулируется цель диссертационной работы и определяются задачи, которые необходимо решить для достижения цели.

Вторая глава посвящена построению математических моделей магнитного поля в сердечниках феррозонда. Одна из моделей предназначена для численного расчета поля и строится при следующих допущениях: вихревые токи в сердечнике равны нулю; векторы  $\vec{M}$ ,  $\vec{H}$ ,  $\vec{B}$  - коллинейарны; обмотки катушек заменяются слоями тока; объем сердечника разбивается на элементарные объемы (ЭО); в каждом ЭО полагается  $M = const$ .

При этих допущениях напряженность поля в точке наблюдения  $i$ , созданная намагниченностью  $N$  ЭО, равна:

$$H_i = -\frac{1}{4\pi} \text{grad}_i \left[ \sum_{j=1}^N \int_{S_j} \frac{\vec{M}_j \cdot \vec{r}_{ij}}{|\vec{r}_{ij}|^3} dS_j \right], \quad (1)$$

где  $\vec{M}_j$  - намагниченность  $j$ -го ЭО;  $dS_j$  - поверхность ЭО;  $i, j$  - точки наблюдения и источника поля;  $\vec{r}_{ij}$ ,  $\vec{r}_{ij}$  - векторы в точках наблюдения и источников;  $N$  - количество ЭО, на которое разбивается область, занятая ферромагнитным материалом.

Зависимость (1) позволяет получить систему нелинейных алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} \vec{H}_i &= [C_{ji}] \vec{M}_j + \vec{H}_{ei} + \vec{H}_{uzm,i}; \\ M_j &= M(H_j); \quad i = 1, \overline{N}; \quad j = 1, \overline{N}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $[C_{ji}]$  - симметричная матрица, составленная из коэффициентов, которые определяются в аналитической форме путем интегрирования;  $\vec{H}_{ei}$  - вектор напряженности поля, создаваемого катушкой возбуждения;  $\vec{H}_{uzm,i}$  - вектор напряженности измеряемого поля. Уравнение (2) записывается как в прямоугольной системе координат для сердечников прямоугольного сечения, так и в цилиндрической системе координат для сердечников круглого сечения. За-

зависимость  $M(H_j)$  аппроксимировалась следующей зависимостью:

$$M(H) = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_s \cdot H}{H + \frac{B_s}{\mu_0 \mu_{\text{max}}}} - H. \quad (3)$$

Вторая математическая модель разработана автором в допущении о том, что в тонких стержнях вектор индукции поля в стержне имеет одну составляющую, совпадающую по направлению с осью сердечника. На границе "поверхность сердечника-воздух" соблюдается условие равенства касательных составляющих напряженности поля, что позволяет записать для касательной составляющей вектора индукции (индекс касательной составляющей в дальнейшем опущен):

$$B = D \cdot \sigma$$

здесь  $\sigma$  - поверхностная плотность тока;  $D = \frac{\mu_0 \cdot H}{H - H}$ .

Индукция в сердечниках представляется в виде:

$$B = B_0 + B_{\text{св}},$$

здесь  $B_0$  - индукция поля возбуждения и измеряемого поля;  $B_{\text{св}}$  - индукция связанного тока.

В результате получается интегральное уравнение:

$$\sigma_i = \frac{B_0}{D} + \lambda \int_{-l}^l \sigma_j k(i, j) \cdot dl_j, \quad (4)$$

где  $\lambda = \frac{\mu_0}{4\pi D}$ ;  $k(i, j)$  - ядро уравнения, вид которого зависит от геометрических параметров сердечника.

Интегральное уравнение решается методом последовательного приближения. Решением (4) есть функция

$$B = B_0 + \lambda \frac{B_0}{1 - \lambda R(l)}, \quad (5)$$

здесь  $R(l)$  - функция, зависящая от геометрических параметров сердечника.

Использование двух математических моделей позволяет установить допустимую область использования аналитической зависимости (5), которая зависит от соотношения между длиной и площадью сечения сердечника.

На основе разработанной модели магнитного поля в сердечнике осуществляется синтез катушки возбуждения, который основывается на решении интегрального уравнения Фредгольма I-го рода:

$$B_c(y) = \int_{-b_2}^{b_2} F_{ji}(y_j, y) \cdot \delta(y_j) dy; \quad \begin{matrix} -b_1 \leq y_j \leq b_1; \\ -b_2 \leq y \leq b_2. \end{matrix}$$

где  $B_c(y)$  - индукция синтезируемого поля;  $\delta(y_j) = i_e \cdot \Delta w_e$  - функция распределения плотности тока обмотки возбуждения;  $2B_1$  - длина катушки возбуждения;  $2B_2$  - длина выходной катушки.

$$F_{ji}(y_j, y) = K(y_j, y_i) \left[ 1 + \frac{\mu_0}{4\pi D - \mu_0 R(y_j)} \cdot R(y_j) \right],$$

где  $K(y_j, y_i)$  - функция, зависящая от геометрических параметров катушки возбуждения.

Значение магнитной проницаемости выбирается равным проницаемости насыщения сердечника.

Задача синтеза сформулирована как задача определения числа витков в элементарных участках обмотки возбуждения, обеспечивающих необходимую величину индукции на участке оси сердечника. Синтез поля достигается выполнением следующего условия:

$$\|B_s - B_c(y)\| = \sqrt{\int_{-B_2}^{B_2} [B_s - B_c(y)]^2 dy} < \varepsilon,$$

здесь  $\varepsilon$  - заданная погрешность синтеза;  $B_s$  - индукция насыщения.

Для предотвращения осциллирования решения интегрального уравнения Фредгольма I-го рода, относящегося к числу некорректно поставленных задач, используется метод регуляризации Тихонова.

Третья глава посвящена численному моделированию полей в электромагнитных системах феррозондов. Для численного решения нелинейного интегрального уравнения разработан алгоритм, который заключается в следующей процедуре расчета. После представления области сердечника в виде ЭО рассчитываются коэффициенты матрицы системы нелинейных алгебраических уравнений, к которой редуцируется интегральное уравнение. Предварительно задается начальное значение величины намагниченности в каждой  $i$ -ой ЭО. Рассчитывается массив значений вектора напряженности размагничивающего поля  $\vec{H}_{pi}$ . Для ускорения итерационного процесса решения системы нелинейных уравнений значение вектора намагниченности  $\vec{M}_{oi}$  определяется по существующим приближенным формулам, направление вектора  $\vec{M}_{oi}$  в каждой ЭО имеет одинаковое с направлением оси сердечника феррозонда. Первоначально заданные значения вектора намагниченности  $\vec{M}_{oi}$  дают возможность рассчитать коэффициенты матриц нелинейных алгебраических уравнений и определить напряженность размагничивающего поля  $\vec{H}_{pi}$  на первом шаге итерации. Итерационное решение системы уравнений осуществляется по следующей формуле:

$$\bar{M}_i^{(k+1)} = \bar{M}_i^{(k)} + \alpha [\bar{H}_{\delta i} + \bar{H}_{изм. i} + \bar{H}_{P_i}^{(k)} - \bar{H}_i^{(k)}(M_i^{(k)})], \quad (6)$$

здесь  $\bar{H}_i^{(k)}(\beta)$  - напряженность поля в сердечнике при намагниченности  $M_i^{(k)}$ ;  $\alpha$  - коэффициент, величина которого подбирается экспериментально ( $\alpha = 1,5-2$ );  $\bar{H}_{\delta i}$  - напряженность поля возбуждения феррозонда;  $\bar{H}_{изм. i}$  - напряженность измеряемого поля.

Процесс итерационного расчета заканчивается при выполнении условия

$$|M_i^{(k+1)} - M_i^{(k)}| \leq M_i^{(k)} \cdot \varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  - заданная малая величина.

Каждый цикл итераций проводится для всех 30 сердечника.

Направление вектора  $\bar{H}_i^{(k)}(M_i^{(k)})$  совпадает с направлением вектора (рис. 1):

$$\bar{H}_i^{(k)} = \bar{H}_{\delta i} + \bar{H}_{изм. i} - \bar{H}_{P_i}^{(k)}.$$

При расчете величина  $\varepsilon$  задавалась равной  $\varepsilon = 10^{-5}$ .

В результате численных расчетов были определены зависимости  $V_y(y)$ ,  $M_y(y)$ ,  $H_{py}(y)$ , где  $y$  - координата, совпадающая по направлению с осью сердечника феррозонда. Установлено, что эти зависимости в большей мере зависят от параметров катушки тока возбуждения феррозонда. Поэтому для катушек, у которых длина меньше длины сердечника, теряет смысл такой параметр, как коэффициент размагничивания, поскольку он становится зависимым от отношения длины катушки и сердечника. Значения максимальной величины магнитной проницаемости и индукции насыщения также сколько-нибудь существенно не влияют на распределение поля по длине сердечника. Данные, полученные при анализе распределения полей векторов  $\bar{M}$  и  $\bar{H}_p$  по длине сердечника, приводят к выводу о том, что методом уменьшения погрешности при расчете функции преобразования феррозонда является использование в расчете функции преобразования непосредственной зависимости  $V_y(y)$ . Численными экспериментами также установлено, что продольная составляющая вектора индукции составляет в среднем по длине сердечника 90-95% от модуля вектора индукции при значениях  $\frac{r_2}{s} > 40-50$ . При меньших значениях  $\beta$  вес составляющих вектора индукции, не совпадающих с осью сердечника, возрастает, что вызывает необходимость использовать для расчета поля в сердечнике уравнение (2), а не (4). Для оценки корректности моделей поля в сердечнике рассчитывается коэффициент размагничивания сердечников и результаты сравниваются с данными, полученными другими исследователями. Эти данные приведены в таб-

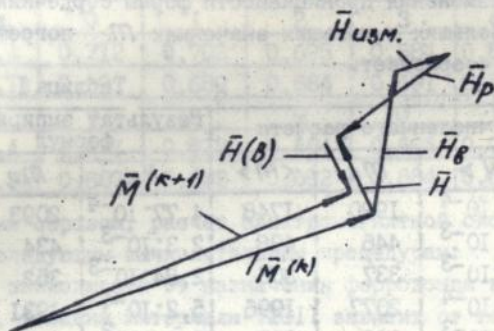


Рис. 1. К алгоритму решения нелинейного интегрального уравнения



Рис. 2. Электрическая принципиальная схема феррозонда

лице I. Из таблицы видно, что хорошее совпадение данных наблюдается в диапазоне изменения проницаемости формы сердечника  $400 \leq m \leq 700$ ; при больших и меньших значениях  $m$  погрешность эмпирических формул возрастает.

Таблица I

#	Результат численного расчета				Результат эмпирических формул		
	$N_4$	$\langle N \rangle$	$m_4$	$\langle m \rangle$	$N_4$	$m_4$	Погреш. %
3	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$5,72 \cdot 10^{-4}$	1920	1748	$4,77 \cdot 10^{-4}$	2093	+9
5	$2,24 \cdot 10^{-3}$	$2,45 \cdot 10^{-3}$	446	408	$2,3 \cdot 10^{-3}$	434	-3
15	$2,96 \cdot 10^{-3}$	$3,27 \cdot 10^{-3}$	337	306	$2,84 \cdot 10^{-3}$	352	+4,5
16	$4,81 \cdot 10^{-4}$	$5,01 \cdot 10^{-4}$	2077	1996	$5,2 \cdot 10^{-4}$	1931	-7
25	$4,52 \cdot 10^{-3}$	$5,13 \cdot 10^{-3}$	221	195	$5,1 \cdot 10^{-3}$	196	-11
26	$1,62 \cdot 10^{-3}$	$1,67 \cdot 10^{-3}$	618	598	$1,55 \cdot 10^{-3}$	643	+4

Предложена методика расчета функции преобразования феррозонда с использованием усредненных по длине сердечника значений индукции. Согласно принципиальной электрической схеме феррозонда уравнение электрического баланса за малый промежуток времени имеет вид (рис. 2):

$$\Delta \Psi_{2a}(N_1 + N_2 + N_{u3}) + \Delta \Psi_{1b}(N_1 - N_2 - N_{u3}) + q_1 N_1 \Delta t k = e \Delta t k; \quad (7)$$

$$\Delta \Psi_{2a}(N_1 + N_2 + N_{u3}) - \Delta \Psi_{1b}(N_1 - N_2 - N_{u3}) + q_2 N_2 \Delta t k = 0,$$

где обозначено  $\Delta \Psi_{1a}$ ,  $\Delta \Psi_{1b}$  - приращения потокоцеплений в обмотке возбуждения за промежуток времени  $\Delta t k$ ;  $\Delta \Psi_{2a}$ ,  $\Delta \Psi_{2b}$  - потокоцепление в выходной обмотке феррозонда за тот же промежуток времени.

$$q_1 = r_1^2 \frac{B_1}{\omega_1}; \quad q_2 = r_2^2 \frac{B_2}{\omega_2}.$$

Система уравнений (7) осуществляется итерационным методом.

Оптимизация параметров катушки возбуждения осуществляется путем синтеза ее обмотки. Оптимальными параметрами катушки возбуждения считаются параметры, обеспечивающие насыщение участка сердечника, на котором расположена катушка возбуждения.

В таблице 2 приведены результаты синтеза в виде таблицы функции  $B(y)$ , при этом магнитная система полуэлемента феррозонда имела следующие параметры:  $2B_1 = 4$  мм;  $2B_2 = 3$  мм;  $B_3 = 0,685$  Тл.

Как видно из табл. 2, погрешность синтеза не превышает 1%. Распределение плотности витков неравномерное, количество витков возрастает к концам катушки и уменьшается к ее центру.

Таблица 2

№ точки	0	1	2	3	4	5	6
$i \cdot \omega$ , А	0,712	0,703	0,695	0,684	0,673	0,671	0,669
$B(y)$ , Тл	0,691	0,689	0,684	0,691	0,682	0,687	0,691
№ точки	7	8	9	10	11	12	
$i \cdot \omega$ , А	0,671	0,673	0,684	0,695	0,703	0,712	
$B(y)$ , Тл	0,687	0,682	0,692	0,684	0,683	0,691	

Таким образом, расчет электромагнитной системы феррозонда сводится к следующим вычислительным процедурам:

- в зависимости от назначения феррозонда выбирается его длина ( $2B1$ ), толщина материала ( $2C1$ ) зависит от технологии изготовления аморфного сплава и не превышает  $0,025$  мм;
- для однородного поля рассчитывается максимально возможное значение момента сердечника, который определяет его ширину ( $2A1$ );
- осуществляется синтез обмотки возбуждения и определяется функция среднего по длине катушки потокосцепления  $\langle \Psi(H) \rangle$ ;
- производится расчет выходного сигнала феррозонда и определяется его функция преобразования.

По разработанной методике рассчитаны следующие параметры электромагнитной системы феррозонда:  $2A = 2$  мм;  $2B = 6$  мм;  $2C = 0,025$  мм;  $2B1 = 4$  мм;  $2B2 = 3$  мм;  $\omega_1 = 204$ ;  $\omega_2 = 100$ ;  $2A1 = 4$  мм;  $2A2 = 5$  мм;  $2C1 = 2$  мм;  $2C2 = 3$  мм; данные о распределении по длине сердечника витков катушки возбуждения приведены в табл. 3.3;  $r_1 = 6$  Ом;  $r_2 = 100$  Ом;  $H_{uz,0} = 20$  А/м;  $U_{m_2} = 0,4$  В.

В четвертой главе работы приведены результаты экспериментальной проверки результатов теоретических исследований. Экспериментальная установка для определения распределения индукции по длине стержня состояла из соленоида для намагничивания, который подключался к регулируемому источнику тока. Индукция в образцах определялась баллистическим методом. Напряженность поля у поверхности стержня измерялась миниатюрным датчиком Холла. Перемещение датчика Холла вдоль стержня осуществлялось устройством, которое обеспечивало шаг смещения  $0,05$  мм. Максимальная погрешность эксперимента не превышала  $7\%$ . На экспериментальной установке определялись зависимости  $B(y)$ ,  $H(y)$ , с помощью которых рассчитывались функции  $M(y)$ ,  $H_p(y)$ .

В соленоиде экспериментальной установки определялась функция преобразования феррозонда. Погрешность магнитометрического канала феррозонда проверялась на тарировочной установке, кото-

раля имела погрешность, установленную метрологической экспертизой 1,5%. Производилось экранирование внешних магнитных полей до уровня  $H = 0,07$  А/м. Экспериментально установлено, что основная погрешность магнитометрического канала не превышала 2,7%.

Результаты измерений коэффициента размагничивания в центральной части сердечника иллюстрируются данными, приведенными в табл. 3.

Таблица 3

Номер образца	3	5	15
Расчитанный $\mathcal{M}_H$	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$2,242 \cdot 10^{-3}$	$2,98 \cdot 10^{-3}$
Экспериментальный $\mathcal{M}_H$	$4,95 \cdot 10^{-4}$	$2,31 \cdot 10^{-3}$	$3,05 \cdot 10^{-3}$
Номер образца	16	25	26
Расчитанный $\mathcal{M}_H$	$4,85 \cdot 10^{-4}$	$4,52 \cdot 10^{-3}$	$1,62 \cdot 10^{-3}$
Экспериментальный $\mathcal{M}_H$	$4,69 \cdot 10^{-4}$	$4,67 \cdot 10^{-3}$	$1,71 \cdot 10^{-3}$

Результаты сравнения расчетов с данными экспериментов свидетельствуют о хорошем совпадении соответствующих величин. Степень достоверности результатов численных расчетов устанавливалась также путем сравнения данных расчета и эксперимента с данными, полученными экспериментальным путем другими исследователями для цилиндрических сердечников. Экспериментально определялась индукция по длине оси стержня. Целью эксперимента являлось подтверждение теоретических предпосылок о влиянии параметров катушки на распределение индукции по длине сердечников. Для этой цели были изготовлены сердечники прямоугольного сечения, которые имели следующие размеры:  $32 \times 80 \times 1,2$  мм,  $32 \times 40 \times 1,2$  мм,  $12 \times 30 \times 1,2$  мм,  $12 \times 15 \times 1,2$  мм. Катушка баллистического гальванометра имела ширину 5 мм и имела возможность перемещаться вдоль сердечника. Сравнение экспериментальных данных с данными, полученными теоретическим путем, показывает, что их наибольшее отклонение составляет 3%. Установлено, что длина катушки значительно влияет на распределение индукции по оси сердечника для катушек с равномерной плотностью тока. Катушки плотность тока которых определялась путем синтеза, имеют более высокое среднее значение индукции на участке расположения катушки. При одинаковом значении токов в катушках, в синтезированной катушке увеличение среднего значения индукции составило 15-20%.

Экспериментально определялась функция преобразования рассчитанного в 3-ей главе феррозонда. Обмотка феррозонда возбуждалась прямоугольными импульсами длительностью 5 мкс и периодом следования 100 мкс. Амплитуда импульсов возбуждения регулировалась в пределах 5-15 В. Выходное напряжение феррозонда подавалось на пиковый детектор, а с выхода детектора на цифровой вольтметр. После статистической обработки эксперимента установлено, что расхождение теоретических и экспериментальных данных при определении функции преобразования феррозонда по амплитуде не превышает 4,5%, в то время, когда существующие методики расчета других авторов дают погрешность до 25%, что говорит о преимуществе предложенной в настоящей работе методике анализа электромагнитной системы феррозонда.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе получены следующие основные результаты.

1. Предложена методика расчета магнитного поля в нелинейной среде стержней прямоугольного и круглого сечений на основе нелинейных интегральных уравнений.

2. Разработан итерационный способ решения нелинейных уравнений, заключающийся в пошаговой коррекции составляющих вектора намагниченности до соответствия величин, характеризующих магнитное поле, магнитным параметрам материала.

3. Предложена математическая модель, позволяющая получить аналитическую зависимость для магнитной индукции в стержнях прямоугольного и круглого сечений от напряженности поля обмоток, основанная на линейных интегральных уравнениях.

4. Произведен анализ магнитного поля в сердечниках феррозондов, результаты которого позволяют, не прибегая к таким понятиям, как коэффициент размагничивания и магнитная проницаемость сердечника, создавать математическую модель.

5. На основе идей Стадника И.П. разработана методика синтеза обмотки возбуждения феррозонда, отличие которой от известных заключается в том, что синтезируется индукция не в воздушном пространстве, а в ферромагнитном конечном сердечнике с постоянным значением магнитной проницаемости. Синтез позволяет улучшить метрологические характеристики феррозонда.

6. Разработана и реализована в виде численного алгоритма математическая модель образования выходного сигнала феррозонда.

7. Проведенные экспериментальные исследования магнитных полей в стержневых ферромагнитных сердечниках и процесса образования выходного сигнала в феррозондах позволили сделать заключение о корректности теоретических посылок.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. С.А.Кабар, С.М.Бурейма, А.Н.Шевченко. К расчету полей дефектов осей колесных пар вагонов: Республиканский межведомственный научно-технический сборник. - Киев, 1995. - С. 149-153.

2. С.М.Бурейма, В.В.Яковенко. Расчет функции преобразования феррозондов при различных способах возбуждения: Республиканский межведомственный научно-технический сборник. - Киев (в печати).

3. С.М.Бурейма. Экспериментальные исследования магнитного поля в ферромагнитных стержнях: Республиканский межведомственный научно-технический сборник. - Киев (в печати).

4. С.М.Бурейма. Численный расчет магнитного поля в тонких ферромагнитных стержнях / Тез. докл. XII конференции профес.-преп. состава Восточноукраинского гос.университета. - Луганск, 1994.

Личный вклад. В работах, опубликованных в соавторстве, диссертанту принадлежит в 1,2 - разработка математической модели.

Соискатель

Бурейма Селбу



Bureime Seibu. The Analysis and elements of synthesis electromagnetics systems flux-gate with core pivotal. Presents in PhD (Doctorate) dissertation on the specialization 05.09.05-Electrotechnical Theory. The institute of Electrodynamics of the National Academy of Science UKRAINE - Kiev - 1995.

In the thesis, based on integral equations and developed numerical methods of analysis of core pivotal of the flux-gate, during the use of nonlinear magnetic characteristics of materials. The counted parameters rectangular and circled core, determined geometric sizes of excitation core and optimization functional characteristics of the flux-gate in studying the fields of their usage. The undertaken experimental research of the parameters of the electromagnetic systems of the flux-gate, confirming theoretical calculations. The given recommendations are used the flux-gate to measure speed of terrestrial transport.

Бурейма Сейбу. Аналіз та елементи синтезу електромагнітних систем ферозондів зі стержньовими сердечниками.

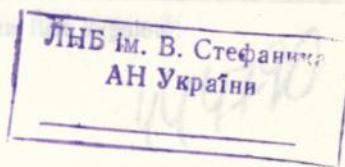
Дисертація, у вигляді рукопису, на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.05 - теоретична електротехніка, Інститут електродинаміки НАН України, Київ, 1995.

В роботі, на основі інтегральних рівнянь, розвинуті чисельні методи аналізу стержньових ферозондів при використанні нелінійних магнітних матеріалів. Розраховано параметри прямокутних та круглих сердечників, визначено геометричні розміри котушок збудження та оптимізовано функціональні характеристики ферозондів в розглянутій області, де вони прикладаються. Проведено експериментальні дослідження параметрів електромагнітної системи ферозонда, які підтвердили теоретичні розрахунки. Подано рекомендації щодо використання ферозондів як датчиків швидкості наземного транспорту.

Ключові слова:

математична модель, ферозонд, магнітне поле, інтегральні рівняння, синтез, аналіз, намагніченість, котушка збудження, розмагнічування, функція перетворення.

Бесплатно





270.88.8A )

Подписано к печати 1. 09. 1995 г. Формат 60x84/16  
Бумага офсетная. Усл.-печ. лист. 1,0 Уч.-изд. лист 1,0  
Тираж 100. Заказ 361. Бесплатно.

---

Полиграф. уч-к Института электродинамики НАН Украины.  
252057, Киев-57, проспект Победы, 56

444790

AB 33.072  
**AB 33.072**

Подписано в Москве 4. 03. 1935 г. Спирит 00287/10  
Исполн. специалист. Вал. Вал. Ковч. 1.0. 34-год. Моск. 1.0.  
Телефон 100. Адрес 361. Б. Мещин.

Получено 14-м Исполнителем в экстренном порядке 14.03.1935 г.  
1935 г. Моск.-57, ул. Мясницкая, 100

00287/10