

ISSN 1995-0519



ВІСНИК

КРЕМЕНЧУЦЬКОГО
ДЕРЖАВНОГО
ПОЛІТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
імені Михайла
Остроградського

Випуск 5/2008 (52) Частина 1

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Кременчуцький державний політехнічний університет
імені Михайла Остроградського**

В І С Н И К

**Кременчуцького державного
політехнічного університету
імені Михайла Остроградського**

**№ 5/2008 (52)
частина 1**

- Природничі науки
- Гуманітарні науки
- Електромеханічні системи та автоматизація
- Електричні машини і апарати
- Енергетика та енергоресурсозбереження
- Діагностика в електромеханічних і енергетичних системах
- Інформаційні системи і моделювання
- Електронні апарати, комп'ютерна техніка і інформаційно-вимірювальні технології
- Нові технології в машинобудуванні
- Транспорт. Дорожні та будівельні машини
- Фізичні процеси гірничого виробництва
- Екологічна безпека
- Економічні та маркетингові дослідження виробничо-підприємницької діяльності
- Проблеми вищої школи
- Ювілейні дати
- Короткі повідомлення (листи до редакції)

Кременчук – 2008

ISSN 1995—0519

Відповідно до постанови президії ВАК України від 09.06.1999 року № 1-05/7 збірник пройшов реєстрацію і внесений до Переліку № 1 фахових видань, в якому можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук.

Друкується за рішенням Вченої ради Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського (протокол ВР № 7 від 22.05.2008 р.).
Свідоцтво про державну реєстрацію серії КВ № 12637–1521 ПР від 04.05.2007 р.

Збірник публікує статті, які містять нові теоретичні та практичні результати в галузях технічних, природничих та гуманітарних наук.

Редакційна рада:

Андрусенко О. М., д. т. н., проф.; Артамонов В. В., д. т. н., проф.; Воробйов В. В., д. т. н., проф.; Єлізаров О. І., д. ф. — м. н., проф.; Загірняк М. В., д. т. н., проф. (голова ради); Никифоров В. В., к. б. н., доц. (відповідальний секретар); Козловська Т. Ф., к. х. н. доц. (технічний редактор); Комір В. М., д. т. н., проф.; Луговой А. В., к. т. н., проф. (заступник голови); Маслов О. Г., д. т. н., проф.; Родькін Д. Й., д. т. н., проф.; Саленко О. Ф., д. т. н., проф.; Сінчук О. М., д. т. н., проф.; Сокур М. І., д. т. н., проф.; Солтус А. П., д. т. н., проф.; Хоменко М. М., д. е. н., проф.; Шмандій В. М., д. т. н., проф.; Юрко О. А., д. т. н., проф.

© Науково-дослідна частина, 2008 р.

ISSN 1995-0519

Адреса редакції: 39614, Кременчук, вул. Першотравнева, 20. Кременчуцький державний політехнічний університет імені Михайла Остроградського. МОВ, к. 3210.
Телефон: (05366) 3-62-17. E-mail: nich@polytech.poltava.ua

Зміст

ПРИРОДНИЧІ НАУКИ

DARK ENERGY: CURRENT STATUS OF THE PROBLEM <i>Petrash A.N., Roshchupkin S.N.</i>	7
TOPOLOGICAL DEFECTS IN COSMOLOGY <i>Petrash A.N., Roshchupkin S.N.</i>	10
МЕХАНИЗМ ТЕМПЕРАТУРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ НА КРИСТАЛЛАХ Tl_3VS_4 <i>Беляев Б.В.</i>	12
О СВЯЗИ РЕШЕНИЙ ОДНОМЕРНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОГО ВИДА <i>Бранспиз Ю.А., Каиштанов О.Ю.</i>	15
К РАСЧЕТУ МАГНИТНОГО ПОТОКА, ИНДУЦИРОВАННОГО ПОЛЕМ ДЕФЕКТА В СЕРДЕЧНИКАХ ФЕРРОЗОНДА <i>Букреев В.В., Корбан Н.П., Полтавцев А.Ю.</i>	18
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ГЕЛЬДЕРА ДЛЯ ПОИСКА ТРАНЗИЕНТОВ В ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛАХ <i>Вивденко Ю.Г., Махортова Н.В., Поляченко Е.Ю.</i>	22
МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ДІЛЯНКИ ПЕРВИННО-ЕМІСІЙНОГО КАТОДУ В МАГНЕТРОНАХ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ <i>Воловенко М.В.</i>	24
ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ПРИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВЗАЄМОДІЯХ ІЗ ВОДОЮ В ПЕРСПЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ ЇЇ ОЧИЩЕННЯ ТА ЗНЕЗАРАЖУВАННЯ <i>Воронкін О.С., Єгізарян О.Д.</i>	27
ПРОГРАМНИЙ СИНТЕЗ Й ПРОЕКТУВАННЯ ЛІНІЙ ПЕРЕДАЧ СМУЖКОВИХ ПЛАТ ТА МОНОЛІТНИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ У НВЧ ДІАПАЗОНІ <i>Воронкін О.С.</i>	32
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ И НЕОДНОРОДНОГО ХАРАКТЕРА НАМАГНИЧИВАЮЩИХ ПОЛЕЙ <i>Гальченко В.Я., Остапущенко Д.Л.</i>	36
ВОССТАНОВЛЕНИЕ АВИАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ <i>Дзюба В.Л., Корсунов К.А., Ашихмина Е.А.</i>	42
ВІЗУАЛІЗАЦІЯ МЕТОДОМ ХЕМОГРАФІЇ ПРОЦЕСІВ ОКИСЛЕННЯ КРЕМНІЮ В ЕЛЕКТРОЛІТІ <i>Єлізаров О.І., Журав В.В.</i>	46
ЭКСПОНЕНТА ТА СУТНІСТЬ ОПИСАНИХ НЕЮ ФІЗИЧНИХ ЯВИЩ <i>Єлізаров О.І., Сукачов О.В., Закатнов М.В.</i>	50
РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМОТРОНА С ПОМОЩЬЮ УРАВНЕНИЯ ЭЛЕНБААСА-ГЕЛЛЕРА <i>Калюжный Г.С., Кияшко К.Н., Мягченко Е.Ю., Чаленко А.В.</i>	55
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ КРОВООБРАЩЕНИЯ <i>Коваленко Е.В., Деркач Л.С., Петров Е.Г.</i>	58
О ГРАНИЦАХ КВАЗИСТАЦИОНАРНОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ НЕУСТАНОВИВШЕМСЯ ТЕЧЕНИИ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ <i>Коваленко А.А., Рисухин Л.И.</i>	61
СПЕКТРОМЕТР АЛЬФА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГАЗОРАЗРЯДНОГО ДЕТЕКТОРА <i>Креденцер С.В., Кудленко В.Г.</i>	63
ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ ШУМ ОКЕАНА И ПРОБЛЕМА РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРИНО <i>Кудленко В.Г.</i>	66

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОМОДИФИКАЦИИ ПОЛИМЕРОВ <i>Малков И.В., Бондарь Л.П., Сыровой Г.В.</i>	70
МОДЕРНИЗМ В НАУКЕ: НАНОТЕХНОЛОГИИ <i>Малков И.В., Макухин А.Г., Бондарь Л.П.</i>	72
СПЕКТРИ ФЛЮОРЕСЦЕНЦІЇ ЛАЗЕРНОГО БАРВНИКА В СИНТЕТИЧНИХ ОПАЛАХ ЗА УМОВ НИЗЬКОГО ДІЕЛЕКТРИЧНОГО КОНТРАСТУ <i>Моїсеєнко В.М., Гурзанія Т.Г., Дергачов М.П., Швець Т.В.</i>	74
МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНИХ ПОЛІВ У СИСТЕМАХ ЗІ СКЛАДНОЮ КОНФІГУРАЦІЄЮ ЕЛЕКТРОДІВ <i>Нікітенко О.М.</i>	77
ПРО ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НОСІЇВ ЗАРЯДУ У ВИСОКООМНИХ ШАРУВАТИХ ЙОДИДАХ КАДМІЮ <i>Рудка М.М.</i>	81
ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ АЛМАЗОПОДОБНЫХ СЛОЕВ НИТРИДА УГЛЕРОДА <i>Свиридов В.В., Радкевич Н.А., Шемченко Е.И., Вельченко А.А.</i>	85
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ОБЪЕМЕ ИМПУЛЬСНОЙ ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЫ МЕТОДОМ R-ФУНКЦИЙ <i>Сизова Н.Д., Скляр В.В., Погорелова О.О.</i>	89
О СТРУКТУРЕ НЕКЛАССИЧЕСКОЙ ПРИЧИННОСТИ (САМОДЕТЕРМИНАЦИИ), РЕАЛИЗУЕМОЙ МОЗГОМ ЧЕЛОВЕКА <i>Соловьев О.В.</i>	92
ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РЕАКЦІЙ ПЕРЕНОСУ ЕЛЕКТРОНА НА МІЖФАЗНІЙ МЕЖІ ЕЛЕКТРОД – ВОЛЬФРАМАТОВМІСНИЙ СОЛЬОВИЙ РОЗТОП <i>Соловійов В.В., Черненко Л.О.</i>	96
ПРОБЛЕМЫ ПРОФИЛЬНОГО ОБУЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НОВОЙ ЭКОНОМИКИ <i>Харченко Е.И., Чаленко А.В., Шиленкова Л.В.</i>	99
ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНТНОСТНОЙ МОДЕЛИ СПЕЦИАЛИСТА ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ «ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА» <i>Харченко Е.И., Чаленко А.В.</i>	101
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДОВОГО РАЗНООБРАЗИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КЛАССА МАГНИТНЫХ СЕПАРАТОРОВ <i>Шведчикова И.А.</i>	103
ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ І МОДЕЛЮВАННЯ	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРЕПОДАВАНИИ КУРСА ФИЗИКИ <i>Лапта С.И., Степанов В.П.</i>	107
ДИНАМИКА ПРОБНОЙ НУЛЬ-СТРУНЫ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ ЗАМКНУТОЙ НУЛЬ-СТРУНЫ ПОСТОЯННОГО РАДИУСА <i>Леяков А.П.</i>	112
НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ	
ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННОГО ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ НА ИЗЛУЧАТЕЛЬНУЮ РЕКОМБИНАЦИЮ В СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ СТРУКТУРАХ <i>Гаврилюк Ю.Н., Сукач Г.А.</i>	116
СТАТТІ ВНЕ СЕКЦІЙ	
О КЛАССИФИКАЦИИ СИСТЕМ ОТСЧЁТА В КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКЕ НЬЮТОНА-МАКСВЕЛЛА <i>Потехин А.Ф.</i>	118
<i>Правила оформлення статей до вісника</i>	125
<i>Список авторів</i>	127

УДК 620.179.14

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ И НЕОДНОРОДНОГО ХАРАКТЕРА НАМАГНИЧИВАЮЩИХ ПОЛЕЙ

Гальченко В.Я., д.т.н., проф., Остапущенко Д.Л., асп.

Луганский государственный медицинский университет

91045 г. Луганск, кв. 50-летия Оборона Луганска, 1

E-mail: galch@lsmu.edu.ua, OstapuschencoDmitriy@gala.net

На основі методу інтегральних рівнянь побудована модель процесу контролю ферромагнітного об'єкту магнітним методом. Ураховані особливості геометричної форми об'єкту контролю з дефектом, не лінійність магнітних властивостей матеріалу, а також неоднорідний характер полів, які створюються приладами намагнічування.

Ключові слова: математичне моделювання, магнітний контроль, дефект

At the article magnetic testing process modeling based on volume integration equation method is considered. In model geometric features of object with defect, nonlinear magnetic properties of material, non-uniformity of external field were taken into account.

Key words: mathematical modeling, magnetic testing, defect

Введение. В настоящее время математическое моделирование является одним из основных источников получения информации о различных физических и технологических процессах. Современное состояние вычислительной техники позволяет рассматривать в качестве объекта моделирования процессы существенной сложности с большим числом влияющих на их протекание факторов, получая при этом физически адекватные результаты. Одним из практически важных и сложных для моделирования процессов является процесс неразрушающего контроля изделий магнитным методом (НКММ). В НКММ информация о ферромагнитном объекте контроля извлекается на основании анализа конфигурации магнитного поля, являющегося результатом взаимодействия объекта с зондирующим полем, создаваемым намагничивающим устройством. Физически адекватная математическая модель в этом случае предполагает учет неоднородного характера полей намагничивающих устройств, сложной геометрической формы объекта контроля и нелинейности магнитных характеристик веществ. По своей природе задача моделирования процесса НКММ относится к прямым задачам магнитостатики. Однако ряд особенностей [1], обусловленных спецификой самого объекта моделирования, позволяют выделить эти задачи в отдельный класс, представляющий самостоятельный интерес.

Анализ предыдущих исследований. Анализ литературных источников, посвященных вопросу решения прямой задачи магнитостатики применительно к моделированию процесса НКММ [2-8] показал, что наиболее перспективным методом расчета является метод пространственных интегральных уравнений (ПриУ). Постановка прямой задачи магнитостатики в виде интегральных уравнений имеет ряд весомых преимуществ, особо значимых при исследовании процессов НКММ, по сравнению с постанов-

кой аналогичной задачи в виде уравнений в частных производных с последующим их решением конечно разностными или вариационными методами.

Постоянное внимание исследователей привлекают к себе задачи НКММ при наличии у объектов контроля дефектов сплошности. Аналитические модели, предложенные в [9-12], несмотря на попытки авторов учесть пространственный характер распределения магнитного поля от самого дефекта, пренебрегая формой объекта контроля, имеют высокий уровень абстракции и неприменимы для моделирования конкретных случаев контроля, возникающих на практике.

Цель работы. Моделирование процесса математического контроля ферромагнитных объектов.

Материалы и результаты исследований. Авторами настоящей статьи разработан программный комплекс для решения прямой задачи магнитостатики с использованием ПриУ [13,14], реализующий более универсальную по сравнению с описанными в [2-8] модель, который прошел тщательную верификацию на экспериментальных данных и задачах, имеющих аналитическое решение. Также разработаны технологии моделирования процессов НКММ с его использованием [15]. В данной статье на примере конкретного реального случая контроля производится анализ возможных трудностей, возникающих при моделировании, а также пути их преодоления.

В качестве примера выбран случай контроля объекта в виде трубчатого изделия с наружным диаметром 20 мм и толщиной стенки 2 мм изготовленного из стали 45. Схематический чертеж магнитной системы дефектоскопа приведен на рис. 1. Намагничивание производится двумя круговыми катушками прямоугольного поперечного сечения с одинаковым направлением намотки. В катушках протекает ток плотностью 10^5 A/m^2 , так что ток

намагничивания в одной секции составляет 60 А. Зона, в которой размещены средства регистрации информационного магнитного поля, на чертеже очерчена пунктирными линиями. У объекта контроля предполагается наличие дефекта сплошности в виде сквозной поперечной трещины, расположение и размеры которой показаны на чертеже.

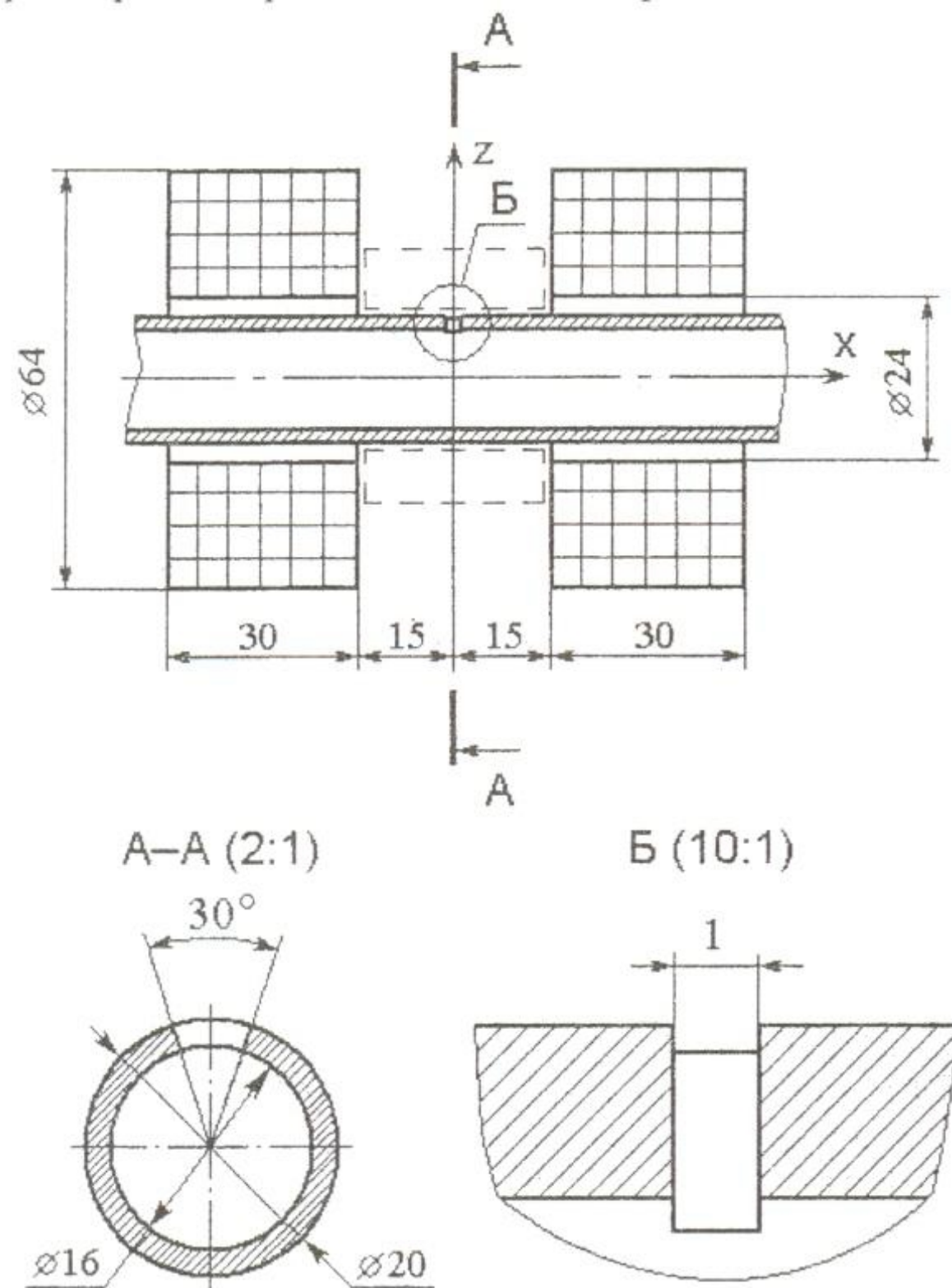


Рисунок 1 – Магнитная система дефектоскопа

Иногда намагничивание производится отдельным проводом с током, который наматывается на деталь, или пропусканием электрического тока по самой детали. Также в НКММ в качестве намагничивающих устройств часто выступают постоянные магниты, которые выполняются из магнитотвердых материалов с высокой коэрцитивной силой. При моделировании их намагниченность должна быть задана априори, а влиянием поля намагниченного объекта контроля на постоянный магнит можно пренебречь. В таком случае напряженность магнитного поля в точке Q от постоянного магнита может быть найдена по формуле [17]:

$$\vec{H}(Q) = \frac{1}{4\pi} \iiint_V \left(\frac{\vec{M}(P)}{r_{PQ}^3} - \frac{3(\vec{M}(P) \cdot \vec{r}_{PQ})\vec{r}_{PQ}}{r_{PQ}^5} \right) dV_P \quad (1)$$

где $\vec{M}(P)$ – намагниченность в точке P; $\vec{r}_{PQ} = \vec{r}_Q - \vec{r}_P$ – вектор, направленный из точки P в точку Q; интегрирование производится по объему постоянного магнита. Когда $div \vec{M} = 0$, что выполняется, например, при однородной намагниченности

объема, поле от постоянного магнита можно найти по формуле:

$$\vec{H}(Q) = \frac{1}{4\pi} \iint_{\partial V} \frac{(\vec{M}(P) \cdot \vec{n}_P) \vec{r}_{PQ}}{r_{PQ}^3} dS_P, \quad (2)$$

где интеграл вычисляется по поверхности постоянного магнита; \vec{n}_P – вектор внешней нормали.

Для вычисления напряженности магнитного поля проводников с током используют закон Био-Савара-Лапласа:

$$\vec{H}(Q) = \frac{1}{4\pi} \iiint_V \frac{\vec{j}(P) \times \vec{r}_{PQ}}{r_{PQ}^3} dV_P, \quad (3)$$

где интегрирование выполняется по объему катушки с током плотностью $\vec{j}(P)$.

Непосредственное вычисление напряженности поля по формулам (1-3) сложно из-за необходимости вычисления объемного или поверхностного интеграла, что аналитически затруднительно даже в случае простейших областей, а численно – приводит к значительному объему вычислений. Поэтому больше внимание привлекают к себе комбинированные методики. Постоянный магнит или катушку с током представляют в виде набора примитивов-элементов достаточно простой формы с простым законом распределения намагниченности или тока. Для таких примитивов интегралы в (1-3) должны легко сводиться к кратным, которые возможно вычислить аналитически, если не полностью, то хотя бы, удачно подобрав порядок интегрирования, удастся произвести вычисление нескольких внутренних интегралов. Для оставшихся невычисленными интегралов удобно применить алгоритмы численного интегрирования с адаптивным шагом [16], что позволяет значительно сэкономить время расчета.

Большое число примеров расчета полей, создаваемых различными катушками с током можно найти в [18]. Расчет круглой катушки с прямоугольным сечением также можно найти в [19]. Часто катушки удается разбить на сегменты в виде параллелепипеда или прямой призмы с однородной плотностью тока, расчет трехмерного поля которых приведен в [20]. Методика расчета поля прямоугольной катушки приведена в [21]. Формулы для поля сегмента в виде параллелепипеда с однородной намагниченностью или плотностью тока можно найти в [22]. При намагничивании объекта контроля электромагнитом расчет его поля может быть произведен методом ПРИУ в едином цикле с расчетом поля намагниченного объекта, но тогда наряду с характеристиками самого объекта для магнитопровода электромагнита должны быть также заданы соответствующие магнитные характеристики. Иногда для упрощения расчета удобно априори задаться характером намагниченности магнитопровода, и тогда расчет можно произвести по методикам, применяемым для постоянных магнитов.

Приведем результат расчета напряженности намагничивающего поля, создаваемого катушками в

объеме исследуемой магнитной системы, произведенный по методике, заимствованной в [18] (рис. 2, 3).

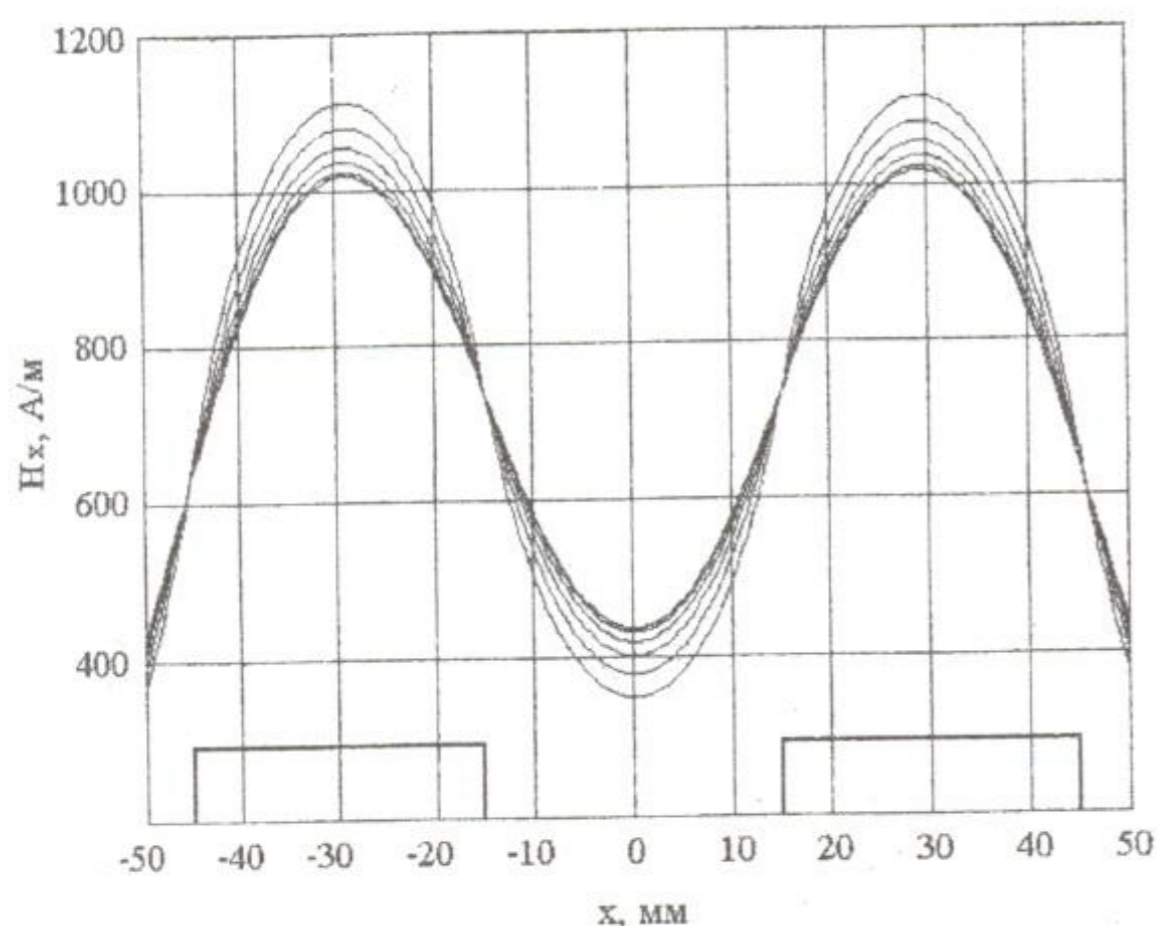


Рисунок 2 – Продольная составляющая намагничивающего поля

Расчет производился в точках, расположенных на отрезках прямых, параллельных оси магнитной системы и находящихся от нее на различных расстояниях ($y = 0, z = 1,0; 3,0, \dots, 11,0$ мм). При удалении от оси системы и приближении к поверхностям источников происходит увеличение абсолютной величины напряженности поля. На рис. 2,3 схематически отображается расположение катушек.

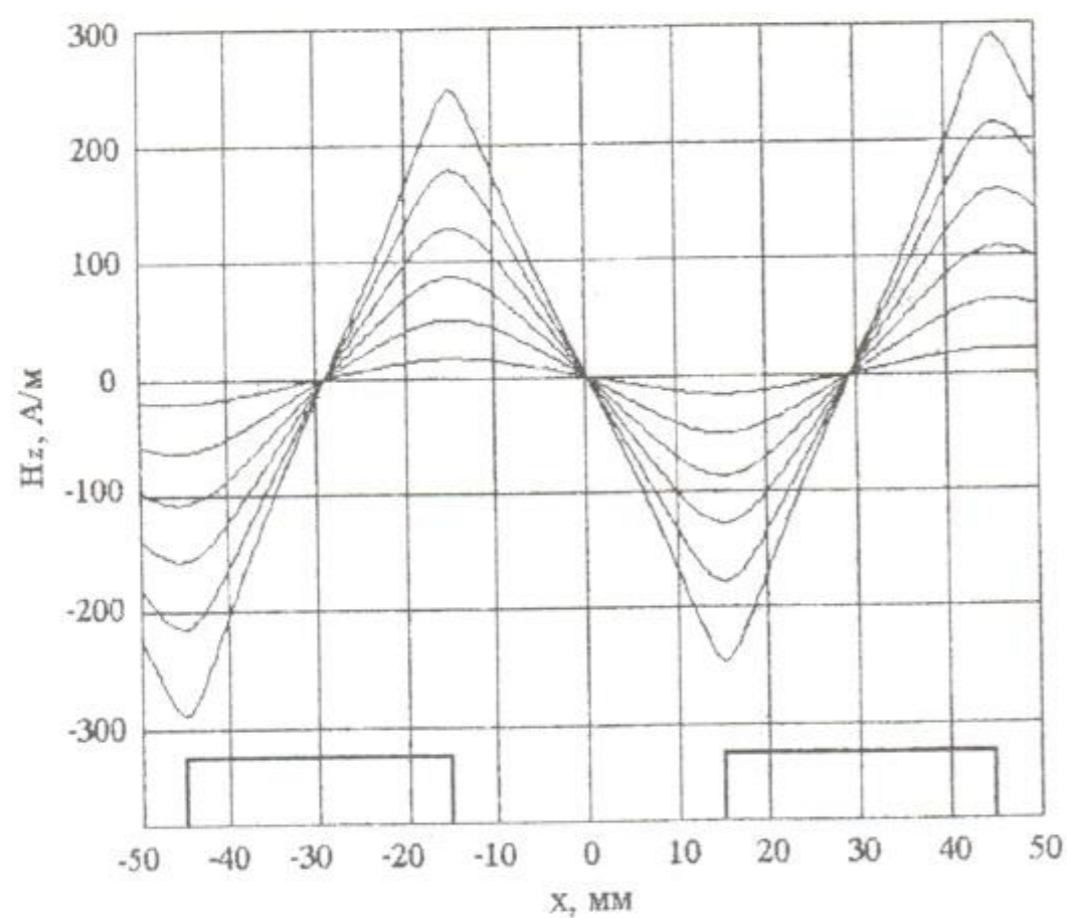


Рисунок 3 – Поперечная составляющая намагничивающего поля

НКММ подвергаются ферромагнитные объекты, имеющие ярко выраженные нелинейные магнитные свойства. Учет магнитного гистерезиса в задачах магнитостатики вызывает трудности принципиального характера из-за отсутствия информации о магнитной предыстории объекта. Поэтому предполагают, что объект изначально размагничен, а дальнейшее намагничивание производится по начальной кривой, либо магнитные свойства описываются центральной или основной кривой намагничивания. Однако возможен учет анизотропии [17] и неоднородности магнитных свойств.

Для приближенного описания магнитных характеристик ферромагнетиков в настоящее время существует большое число аналитических зависимостей [23-25]. Выбор в пользу той или иной из них диктуется в каждом конкретном случае перечнем доступных данных о магнитных свойствах вещества, а также формой их представления.

Одна из самых удобных зависимостей, предложенная в [24] -

$$M = A + B \left(\operatorname{arctg} \frac{H_{cs} + H}{H_0} - \operatorname{arctg} \frac{H_{cs} - H}{H_0} \right);$$

$$A = \chi_H \frac{H_{cs}^2 H}{H^2 + H_{cs}^2}; B = \frac{M_s}{\pi} \frac{H^2}{H^2 + \alpha H_{cs}^2};$$

$$H_0 = \frac{H_{cs}}{\operatorname{tg} \left(\frac{M_{rs} \pi}{M_s} \right)}; \alpha = \frac{M_s}{\pi} \frac{\operatorname{arctg} \left(2 \frac{H_{cs}}{H_0} \right)}{M_c - \chi_H \frac{H_{cs}}{2}},$$

предполагает наличие информации о значениях следующих величин: коэрцитивной силы – H_{cs} , намагниченности насыщения – M_s , остаточной намагниченности – M_{rs} , намагниченности по основной кривой намагничивания при напряженности намагничивающего поля равной коэрцитивной силе – M_c , начальной магнитной восприимчивости – χ_H . Значения этих параметров для стали 45 приведены в табл. 1.

Иногда магнитные характеристики задаются таблично, тогда для их интерполяции удобно использовать простые кубические сплайны [16] или нестандартные сплайны, составленные из дробно-линейных функций [26].

Таблица 1 – Параметры магнитной характеристики

$H_{cs},$ A/m	$M_s,$ A/m	$M_{rs},$ A/m	$M_c,$ A/m	χ_H
760	$1.72 \cdot 10^6$	$0.97 \cdot 10^6$	$0.48 \cdot 10^6$	89.0

При использовании метода ПриУ объем ферромагнитного тела представляется набором пересекающихся только по граничным точкам элементарных объемов – достаточно простых геометрических объектов малого размера, намагниченность которых можно считать постоянной. Наиболее удобным представляется использование для этих целей тетраэдров. Использование нерегулярного разбиения объекта на элементарные объемы позволяет локально повысить аппроксимационные свойства метода. Помимо мелких элементов объекта, искривленных участков его поверхности и зон с сильно неоднородным характером намагниченности, размер тетраэдров следует уменьшать и вблизи контрольных точек, определение напряженности поля в которых является целью расчета. Дискретный характер матема-

тической модели сказывается лишь в непосредственной близости от поверхности исследуемого объекта, и при некотором удалении теряет свою значимость. Существенное значение имеет тот факт, что поле создаваемое объектом является суперпозицией полей элементарных объемов, и при наличии некоторой погрешности в определении намагниченности отдельного элементарного объема она компенсируется при вычислении суммы по всем элементам разбиения. Это значительно снижает погрешность определения поля объекта даже тогда, когда за счет дискретности возникают локальные неточности при определении намагниченности достаточно малых элементарных объемов.

Дискретная модель участка, состоящая из 12 115 элементарных объемов, подвергнувшегося намагничиванию, приведена на рис. 4. Намагничивающее поле сильно неоднородно вблизи катушек намагничивания, а при удалении от них сравнительно быстро убывает. Поэтому размер элементарных объемов уменьшается в центральной части модели объекта, где ее дискретный характер может оказать влияние на результат расчета.

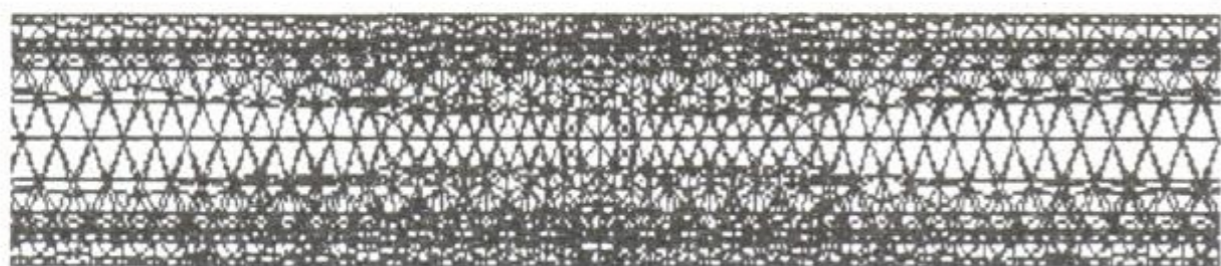


Рисунок 4 – Дискретная модель объекта контроля

Особое внимание следует уделять выбору размеров дискретных элементов вблизи дефекта. Дело в том, что в НКММ регистрация информационного магнитного поля, как правило, производится в непосредственной близости к поверхности объекта контроля. Поэтому следует, во избежание искажения результатов расчетов, применять дискретные модели с повышенными локальными аппроксимационными возможностями в окрестности дефекта (см. рис. 5).



Рисунбок 5 – Дискретизация вблизи дефекта

Метод ПриУ позволяет свести континуальные уравнения магнитостатики к нелинейному уравнению с конечным числом неизвестных вида [13, 14]

$$H = A \cdot F(H) + H_0 \quad (5)$$

где H_0 и H – вектора-столбцы, содержащие соответственно компоненты намагничивающего поля и поля внутри элементарных объемов; $F(H)$ – нелинейный оператор, учитывающий свойства ферромагнетиков; A – матрица, описывающая магнитное влияние элементарных объемов друг на друга. Для решения уравнения (5) в [13,14] применяется метод Ньютона. На основании теоремы Канторовича [27,28] можно утверждать, что этот итерационный процесс является сходящимся при выборе достаточно близкого к искомому решению начального приближения. Однако опыт применения метода Ньютона для решения уравнения (5) показал, что можно воспользоваться практически любым начальным приближением, однако его выбор может значительно повлиять на необходимое для решения задачи время. При проведении многократных расчетов для различных намагничивающих полей или магнитных характеристик, что необходимо, например, при выборе эффективных режимов намагничивания в НКММ [29], в качестве начального приближения целесообразно принимать решение задачи, полученное ранее на предыдущих этапах моделирования. При использовании для решения уравнения (5) метода Ньютона возникает необходимость решать систему линейных уравнений с плотно заполненными матрицами большого порядка, что требует привлечения специальных средств [30].

При моделировании процесса контроля изделия принималось допущение об однородности магнитных свойств материала. Магнитная характеристика по всему объему объекта, в том числе и вблизи дефекта, выражалась зависимостью (4), значение параметров которой приведены в табл. 1.

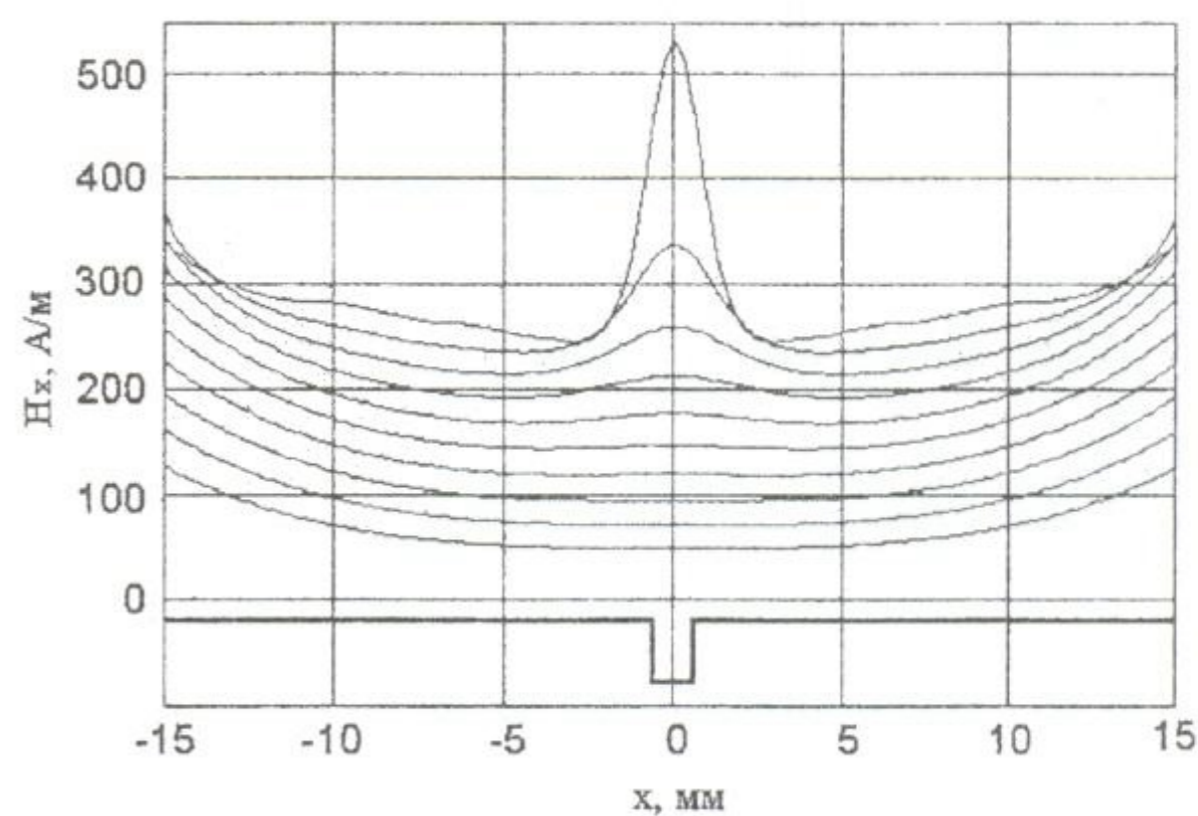


Рисунок 6 – Продольная составляющая напряженности поля в зоне контроля

Расчет поля, результат которого приводится на графиках рис. 6,7 производился в контрольных точках, расположенных на отрезках, находящихся на различном удалении от поверхности объекта ($y = 0$, $z = 11,0, 12,0, \dots, 20,0$ мм).

Для наглядности графики совмещены со схематическим изображением объекта контроля с дефектом.

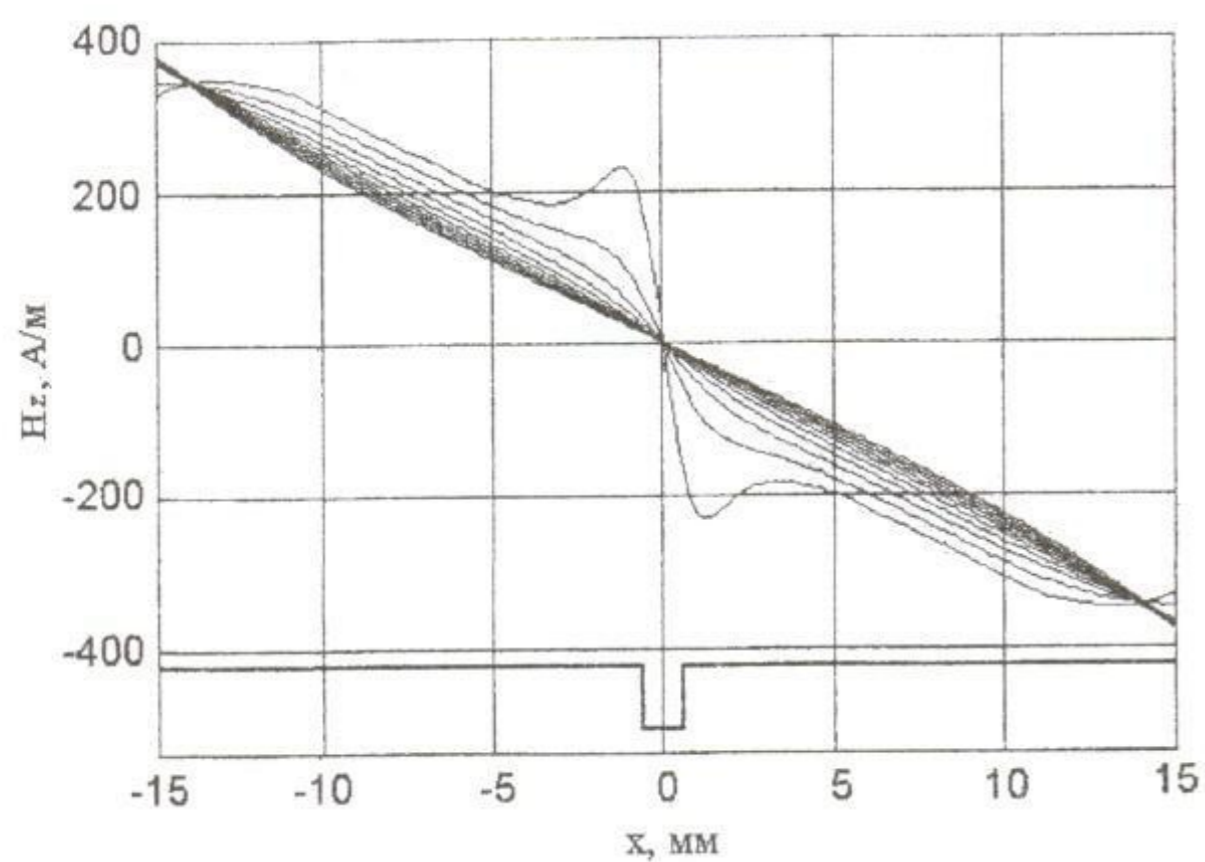


Рисунок 7 – Поперечная составляющая напряженности поля в зоне контроля

Вблизи дефекта, на расстоянии 1–2 мм от поверхности, отчетливо заметно вносимое им искажение поля.

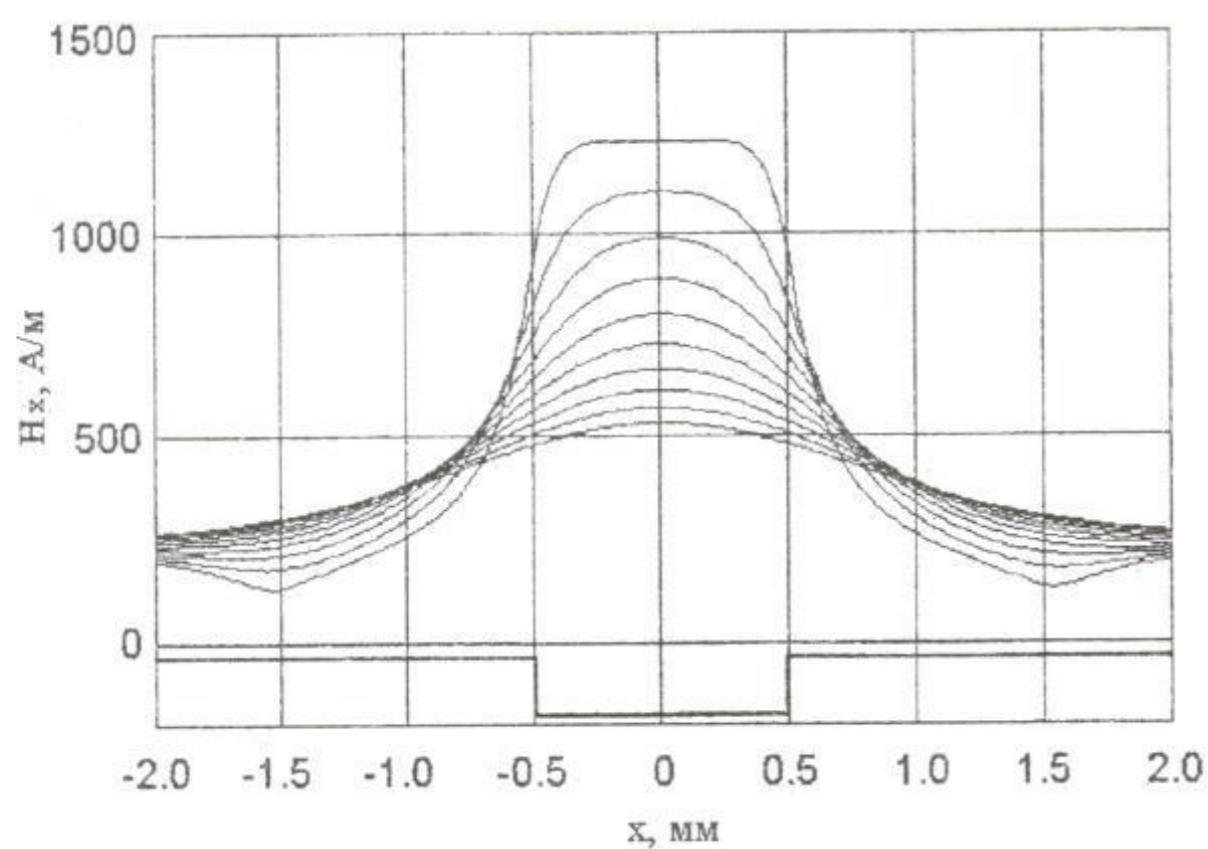


Рисунок 8 – Продольная составляющая напряженности поля в непосредственной близости от дефекта

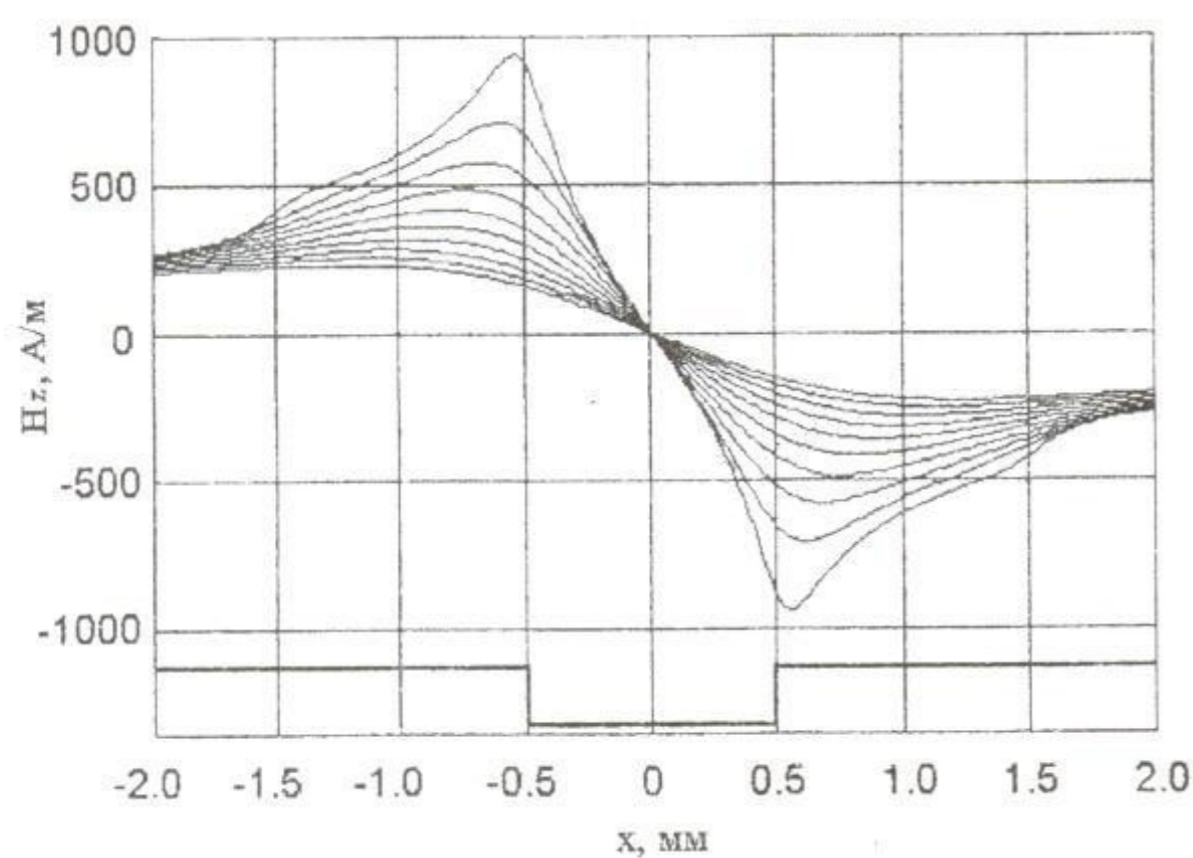


Рисунок 9 – Поперечная составляющая напряженности поля в непосредственной близости от дефекта

Для более детального изучения информационного поля в пространстве непосредственно около дефекта произведем его расчет в точках, находящихся на отрезках, удаленных на расстояния 0,1, 0,2, ..., 1,0 мм от поверхности ($y = 0$, $z = 10,1, 10,2, \dots, 11,0$ мм). Как видно из графиков, для распределения поля выполняются основные закономерности, следующие из моделей, описанных в [9-12] и позволяющих качественно исследовать поле дефекта. Предлагаемые численные технологии моделирования делают возможным получение количественных результатов.

Таким образом, предлагаемый подход позволяет получать исчерпывающую информацию о конфигурации магнитного поля в зоне контроля при использовании магнитного метода.

Выводы. Разработанное авторами программное обеспечение позволяет осуществить комплексный подход к задачам моделирования процесса магнитного контроля с учетом большого числа значимых факторов. Результаты моделирования могут быть использованы при разработке и настройке параметров соответствующего оборудования, исследования и совершенствования технологического процесса контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Остапушенко Д.Л. Об особенностях численного решения задач магнитного контроля объектов сложной геометрической формы // Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности: Тез. докл. 7-й Международной конференции. – М.: Машиностроение, 2008. – С. 146-147.
2. Филиппов Б.Н., Глухов В.М., Горкунов Э.С. Моделирование магнитных состояний в ферромагнитном стержне, намагниченном в проходном преобразователе // Дефектоскопия. – 1998. – № 7. – С. 50-59.
3. Глухов В.М., Филиппов Б.Н., Горкунов Э.С. Моделирование магнитных состояний в ферромагнитных стержнях с различной структурой, намагниченных в проходном преобразователе // Дефектоскопия. – 2000. – № 3. – С. 55-66.
4. Кременькова Н.В., Матюк В.Ф., Стрелюхин А.В. Расчет магнитного состояния полого ферромагнитного цилиндра в неоднородном поле проходного соленоида методом граничных интегральных уравнений. I. Методика расчета // Дефектоскопия. – 1999. – № 11. – С. 10-19.
5. Кременькова Н.В., Матюк В.Ф., Стрелюхин А.В., Кратько А.С., Гончаренко С.А. Расчет магнитного состояния полого ферромагнитного цилиндра в неоднородном поле проходного соленоида методом граничных интегральных уравнений. II. Расчет и сравнение с экспериментальными данными // Дефектоскопия. – 1999. – № 11. – С. 20-26.
6. Матюк В.Ф., Чурило В.Р., Стрелюхин А.В. Численное моделирование магнитного состояния ферромагнетика в неоднородном постоянном поле

- методом пространственных уравнений. I. Описание методики расчета // Дефектоскопия. – 2003. – № 8. – С. 71-84.
7. Матюк В.Ф., Чурило В.Р., Стрелюхин А.В. Численное моделирование магнитного состояния ферромагнетика в неоднородном постоянном поле методом пространственных уравнений. II. Ферромагнитный диск в поле накладного соленоида // Дефектоскопия. – 2003. – № 12. – С. 59-66.
8. Печенков А.Н. Численное моделирование обратной задачи магнитоэлектрической дефектоскопии // Дефектоскопия. – 2005. – № 11. – С. 25-30.
9. Щербинин В.Е., Пашагин А.И. Влияние протяженности дефекта на величину его магнитного поля // Дефектоскопия. – 1972. – № 4. – С. 74-82.
10. Загидулин Р.В. К расчету признаков классификации дефектов сплошности конечной протяженности в ферромагнитных изделиях // Дефектоскопия. – 1995. – № 10. – С. 50-58.
11. Загидулин Р.В., Мужичкий В.Ф. Трехмерная модель дефекта сплошности конечной протяженности в ферромагнитной пластине // Дефектоскопия. – 2002. – № 11. – С. 17-25.
12. Мужичкий В.Ф., Щербинин В.Е. Магнитное поле короткого дефекта типа прямоугольной щели // Дефектоскопия. – 2006. – № 2. – С. 58-63.
13. Остапущенко Д.Л., Гальченко В.Я. Программный комплекс анализа пространственной топографии статических магнитных полей объектов сложной геометрической формы с использованием метода пространственных интегральных уравнений // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2007. – № 4(110) Ч. 1. – С. 106-115.
14. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. – М.: Мир, 1980. – 280 с.
15. Коген-Далин В.В., Комаров Е.В. Расчет и испытание систем с постоянными магнитами. – М.: Энергия, 1977. – 248 с.
16. Алиевский Б.Л., Орлов В.Л. Расчет параметров магнитных полей осесимметричных катушек. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 112 с.
17. Печенков А.Н. Расчет трехмерного магнитного поля круглой катушки с прямоугольным сечением и постоянным током // Дефектоскопия. – 2006. – № 9. – С. 65-71.
18. Печенков А.Н. Аппроксимация сложных катушек с конечной толщиной для расчета трехмерных магнитных полей этих катушек // Дефектоскопия. – 2006. – № 10. – С. 27-32.
19. Станев И.В., Балтиев С.Н. Расчет магнитного поля прямоугольной катушки без сердечника // Проблемы теоретической электротехники. – М.: МЭИ, 1989. – С. 139-146.
20. Том Р., Тарр Дж. Магнитные системы МГД-генераторов и термоядерных установок. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 272 с.
21. Панасенков М.А. Электромагнитные расчеты устройств с нелинейными распределенными параметрами. – М.: Энергия, 1971. – 216 с.
22. Мельгуй М.А. Формулы для описания нелинейных и гистерезисных свойств ферромагнетиков // Дефектоскопия. – 1987. – № 11. – С. 3-10.
23. Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы. Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 188 с.
24. Кадочников А.И., Хан Е.Б., Лобанова Н.Б. Нестандартный сплайн для аппроксимации кривых намагничивания и перемагничивания // Дефектоскопия. – 1992. – № 11. – С. 75-81.
25. Ортега Дж., Рейнболт В. Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений со многими неизвестными. М.: Мир, 1975. – 560 с.
26. Треногин В.А. Функциональный анализ. – М.: Наука, 1980. – 496 с.
27. Гальченко В.Я., Остапущенко Д.Л. Выбор эффективных режимов намагничивания при контроле деталей магнитным методом // Приладобудування 2008: стан і перспективи: Тез. доп. 7-ї міжнародної НТК. – К.: ПБФ, НТУУ “КПІ”. – 2008. С. 265.

Стаття надійшла 30.09.2008 р.
Рекомендовано до друку д.ф.-м.н., проф.
Єлізаровим О.І.

Підписано до друку 10.10.2008р. Формат А4. Папір офсетний.
Умов.друк.аркушів 14,8. Наклад 300 прим. Друк ризопринтний. Зам.180/08.

Надруковано з готових оригіналів в друкарні ПП Щербатих О.В.
Кременчук, вул. 29 вересня, 11/19, тел. 79-63-38.

