

УДК 620.179

<, <. FmjZv\ , доктор технических наук, профессор;

KljBzd , кандидат технических наук, доцент;

G. ;ZehZgh\ , аспирант

Ижевский государственный технический университет

К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ НАМАГНИЧИВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ*

IjklZgu jamevlZlu kjZgblevghh ZgZebaZiZjZfjh\ fZjblguo kbbkf gZ Za_ ih -
klhygguo fZjblh\ gZ hkg\ kieZZ NdFeB. Ijbbu jamevlZlu fhbjhZgby fZjblguo ihec .
IjhbaZ wdkijbglZevgZy ijhdZ lhjlbqkdbo jZkqlh\ .

Ключевые слова: магнитное поле, электромагнитно-акустический преобразователь, магнитная система, диаграмма направленности, магнитная индукция

Введение. Перспективным направлением повышения информативности и возможностей ультразвуковых методов неразрушающего контроля является использование бесконтактных электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей, обладающих рядом существенных преимуществ перед контактным методом с использованием пьезопреобразователей. К ним относятся:

- отсутствие необходимости применения контактных жидкостей;
- возможность контроля изделия без специальной подготовки поверхности;
- возможность возбуждения и приема любых типов волн, в том числе поперечных с горизонтальной поляризацией, а также вводимых по нормали к поверхности изделия;
- возможность контроля изделий резонансными методами, не допускающими механического демпфирования изделий преобразователями;
- отсутствие износа преобразователей;
- возможность контроля изделий при высоких температурах;
- возможность контроля при больших скоростях движения ЭМА преобразователей и изделия.

Несмотря на неоспоримые преимущества ЭМА метода и все возрастающий научный интерес к ЭМА преобразованию [1–3], внедрение указанных технологий в промышленности и на транспорте весьма ограничено. Главными ограничивающими факторами являются низкие коэффициенты преобразования и большие габариты конструкций, вызванные необходимостью применения мощных намагничивающих систем. Поэтому одним из направлений развития современных средств неразрушающего контроля и методов диагностики, основанных на применении ЭМА преобразования, является повышение эффективности ЭМА преобразователей и оптимизация массогабаритных размеров.

В работе представлены результаты расчета распределения магнитного поля и его величины для ряда конструкций систем намагничивания ЭМА преобразователей. Рассмотрена возможность повышения коэффициентов преобразования за счет увеличения магнитной индукции системы.

© Муравьев В. В., Стрижак В. А., Балобанов Е. Н., 2011

* Работа выполнена при поддержке аналитической ведомственной целевой программы Министерства образования и науки Российской Федерации «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 годы)» (регистрационный номер 2.1.2/12069).

Принцип действия и конструкции ЭМА преобразователей. ЭМА преобразование включает излучение акустических волн за счет преобразования энергии электромагнитных колебаний в энергию упругих колебаний и прием акустических волн за счет обратного преобразования. В качестве источника электромагнитных колебаний используются различной формы индуктивные преобразователи.

ЭМА способ излучения и приема акустических волн основан на трех эффектах взаимодействия электромагнитного поля с изделием: магнитострикции, магнитного и электродинамического взаимодействия [4]. Эффект магнитострикции проявляется в деформации элементарных объемов ферромагнитного изделия под действием магнитного поля. Магнитное взаимодействие проявляется во взаимном притяжении и отталкивании ферромагнитного материала и проводника (катушки) с переменным электрическим током. Электродинамическое взаимодействие состоит в возбуждении в электропроводном материале вихревых токов, которые, взаимодействуя с постоянным магнитным полем, вызывают колебания носителей электрического заряда в кристаллической решетке металла.

Излучение акустических волн за счет электродинамического механизма основано на взаимодействии вихревых токов i_v длиной участка dl с индукцией поля подмагничивания B_0 , приводящем к появлению силы Ампера F_A :

$$F_A = i_v [dl \cdot B_0]. \quad (1)$$

Упругие силы возникают в приповерхностном слое объекта, определяемом глубиной скин-слоя δ :

$$\delta = \sqrt{2/\omega\mu_0\mu\sigma}, \quad (2)$$

где ω – круговая частота колебаний [1/с]; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [Гн/м]; μ – относительная магнитная проницаемость; σ – электропроводность [См/м].

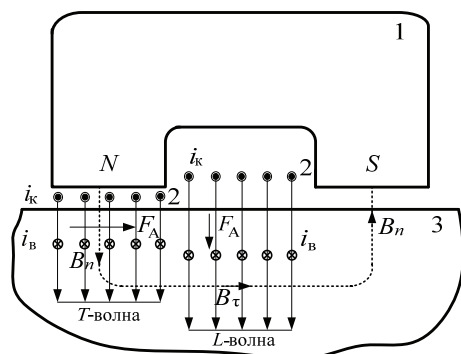
Прием акустических волн за счет электродинамического механизма обусловлен электромагнитными полями, порождаемыми вихревыми токами, возникающими в приповерхностном слое объекта, колеблющегося со скоростью V в поле подмагничивания с индукцией B_0 , что, в свою очередь, приводит к возникновению в индукторе ЭДС индукции ε_i :

$$\varepsilon_i = (V \cdot B_0)dl. \quad (3)$$

Отметим, что для ферромагнитных материалов в возбуждении ультразвуковых волн участвует как электродинамический, так и магнитострикционный механизм. При этом в области больших полей подмагничивания электродинамический механизм является преобладающим [1]. Излучение и прием поперечных волн по нормали к поверхности ввода осуществляется за счет электродинамического механизма [5].

Из соотношений (1) и (3) следует, что эффективность работы ЭМА преобразователей в совмещенном режиме (излучение – прием) пропорциональна квадрату величины поля подмагничивания B_0 . Поэтому разработка магнитных систем, позволяющих создавать существенные магнитные поля, является важной технической задачей.

На рис. 1 представлена схема ЭМА возбуждения поперечных и продольных ультразвуковых волн за счет электродинамического механизма. Преимущественное возбуждение продольных и поперечных волн определяется взаимной ориентацией поля подмагничивания с индукцией B_0 и вихревого тока i_v .

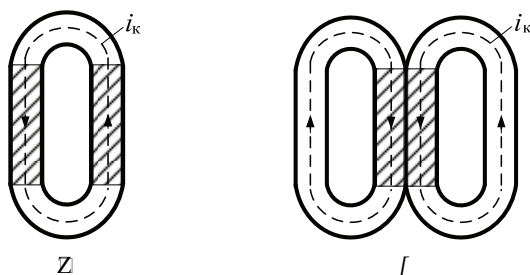


1bк1. Возбуждение поперечных T и продольных L волн ЭМА преобразователем:
1 – магнитная система; 2 – индуктор; 3 – объект контроля

Особенный интерес представляет случай излучения поперечных волн, обладающих рядом преимуществ по сравнению с продольными волнами. Наиболее существенными являются: меньшая длина волны при одинаковой частоте колебаний, следовательно, большая чувствительность к дефектам, меньший акустический импеданс, лучшая разрешающая способность, меньшая протяженность мертвой зоны при контроле. В случае возбуждения поперечных волн по нормали к поверхности индуктор располагается в воздушном зазоре под полюсами магнитной системы, т. е. в области с максимальной величиной нормальной составляющей поля подмагничивания.

Можно выделить два основных элемента конструкции ЭМА преобразователя: 1) магнитная система, состоящая из магнита и магнитопровода и 2) индуктор (катушка индуктивности). Магнитная система формирует поле подмагничивания, в качестве источника которого могут использоваться постоянные магниты или электромагниты.

Как правило, индуктор представляет собой эллиптическую плоскую катушку, два наиболее распространенных варианта исполнения которой представлены на рис. 2. Геометрия индуктора напрямую определяет требования к конструкции системы подмагничивания. В случае двухэлементного индуктора (рис. 2, Z) ток в соседних элементах имеет противоположное направление, поэтому система подмагничивания должна быть двухполюсной. При одноэлементном варианте индуктора (рис. 2, I) ток в области апертуры ЭМА преобразователя является однонаправленным, поэтому система подмагничивания должна быть однополюсной.

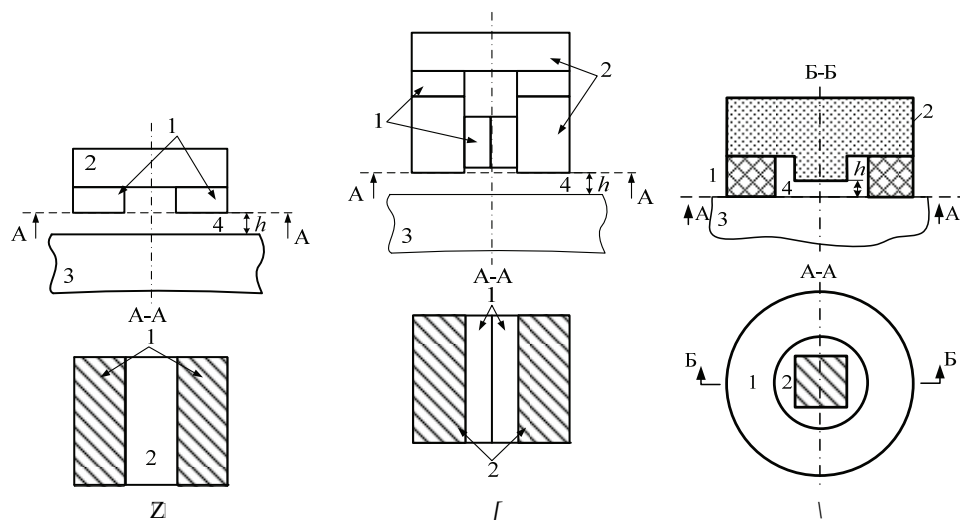


1bк2. Варианты исполнения индукторов (заштрихованная область – апертура ЭМА преобразователя): Z – двухэлементный индуктор; I – одноэлементный индуктор

Появление на рынке сверхсильных постоянных магнитов небольших размеров на основе сплава NdFeB обусловило возможность создания относительно компактных систем подмагничивания, позволяющих создавать магнитные поля в объекте контроля с остаточной индукцией 2 Тл и более.

Расчет магнитных систем. На рис. 3 представлены конструкции исследуемых систем подмагничивания: в виде П-образного магнитопровода (Z), П-образного магнитопровода с дополнительной магнитной цепью (I); кольцевого магнитопровода с концентратором (V).

Размеры апертуры ЭМА преобразователя и соответствующие им размеры полюсов системы подмагничивания, согласно отношению (1), определяют область действия объемных сил, формирующих акустическое поле ЭМА преобразователя. При сравнительном анализе результатов моделирования площадь апертуры (заштрихованная область на видах А-А рис. 3) исследуемых конструкций систем подмагничивания принимается одинаковой.



Вк . 3. Конструкции систем подмагничивания: П-образная (Z); П-образная с дополнительной магнитной цепью (I); кольцевая с концентратором (V) (1 – постоянный магнит из сплава NdFeB; 2 – магнитопровод; 3 – объект контроля; 4 – зазор для установки индуктора)

Для моделирования магнитных полей систем подмагничивания использован метод конечных элементов, алгоритм которого реализован в программно-вычислительном комплексе ELCUT 5.6 [6]. Данный программный продукт позволяет решать задачи о распределении физических полей на плоскости.

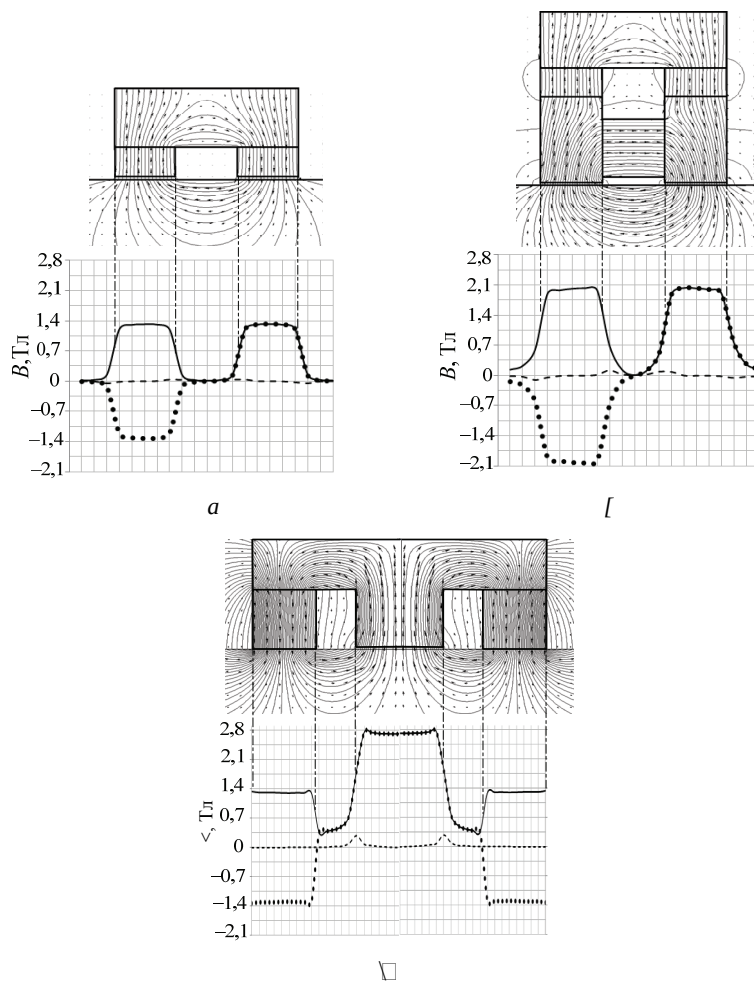
Основные магнитные характеристики системы подмагничивания и объекта контроля, используемые при моделировании, приведены в таблице. Используются также справочные кривые намагничивания соответствующих материалов [7].

Результаты моделирования магнитного поля для трех исследуемых систем подмагничивания и результаты расчета величины вектора магнитной индукции, а также его нормальной B_n и тангенциальной B_t составляющих вдоль поверхности объекта ($h = 0$) представлены на рис. 4. Стрелки показывают направление и амплитуду вектора магнитной индукции в любой точке пространства, при этом плотность ли-

ний свидетельствует о величине магнитного поля в данной области. Видно, что поле в области магнитных полюсов систем подмагничивания в основном определяется нормальной составляющей магнитной индукции B_n .

Параметры магнитной системы, используемые при расчете

Параметр	Значение
Величина воздушного зазора h между магнитным полюсом и объектом контроля, мм	0,5
Материал постоянных магнитов, сплав	NdFeB
Остаточная индукция постоянных магнитов, Тл	1,38
Материал магнитопровода, сталь	Ст.3
Материал объекта контроля, сталь	65Г



Вк . 4. Распределение магнитного поля B_0 (—) и его составляющих B_n (...), B_t (___) под магнитопроводом магнитной системы вдоль объекта контроля на границе воздух – сталь: Z – для конструкции на рис. 3, Z ; I – для конструкции на рис. 3, I ; $\backslash$ – для конструкции на рис. 3, $\backslash$

Поскольку нормальная составляющая обеспечивает создание поперечной волны, исследовалась возможность получения максимального значения нормальной составляющей вектора магнитной индукции в области под индуктором. Следует отметить, что величина магнитного поля ограничивается явлением насыщения материала объекта контроля. При разработке магнитной системы следует также учитывать ориентацию вектора магнитного поля по отношению к направлению тока в индукторе, определяющую преимущественное возбуждение поперечных поляризованных волн (полезный тип), а также возможность появления нежелательных продольных волн, снижающих достоверность контроля.

Минимальное значение магнитной индукции среди рассмотренных конструкций систем подмагничивания обеспечивает конструкция в виде П-образного магнитопровода ($B_n \approx 1,3$ Тл). Дополнительная магнитная цепь в конструкции рис. 3, б увеличивает поле на ~60 % (до значения $B_n \approx 2,1$ Тл). Максимальное поле наблюдается для конструкции с кольцеобразным магнитом рис. 3, в ($B_n \approx 2,8$ Тл), однако массогабаритные характеристики такой конструкции превышают предыдущие.

Тангенциальная составляющая B_t магнитной индукции в центре магнитного полюса имеет минимальное значение и возрастает при приближении к его краю. При размещении витков индуктора в области края магнитного полюса тангенциальная составляющая может приводить к возникновению нежелательных (продольных) типов волн. Для конструкции системы подмагничивания с кольцеобразным магнитом соотношение тангенциальной и нормальной составляющих поля вблизи края магнитного полюса наибольшее и составляет около 10 %, для конструкций в виде П-образного магнита и с дополнительной магнитной цепью $B_t/B_n \approx 5$ и 7 % соответственно.

Одним из основных параметров, определяющих эффективность работы ЭМА преобразователя, является оптимальная величина зазора между магнитопроводом и поверхностью объекта контроля, влияющая как на коэффициент преобразования, так и на равномерность распределения поля и на параметры акустического поля. На рис. 5 представлена кривая ослабления поля подмагничивания с увеличением величины зазора. Закон ослабления не зависит от конструкции системы подмагничивания и описывается обратно пропорциональной зависимостью от роста величины зазора.

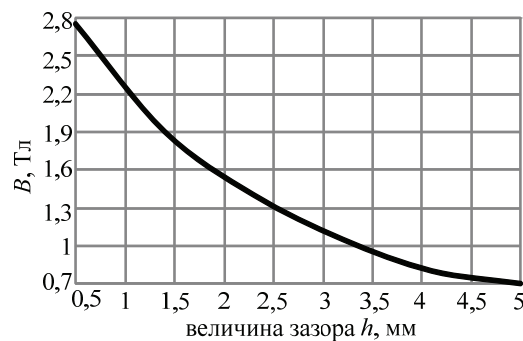


Рис. 5. Распределение магнитного поля B_0 на поверхности объекта контроля с увеличением зазора между магнитопроводом и объектом контроля для магнитной системы на рис. 3, в

Следует отметить, что форма и размеры апертуры ЭМА преобразователя, зависящие от распределения поля подмагничивания и вихревых токов в объекте контроля, определяют его диаграмму направленности. Ширина диаграммы направленности – один из важнейших параметров ультразвукового контроля, определяет чувствительность к размерам дефектов, фронтальную разрешающую способность и др.

На рис. 6 представлены рассчитанные диаграммы направленности ЭМА преобразователей с двух- и одноэлементным индуктором. Расчеты проведены для индукторов с размерами 5×25 мм (двухэлементный индуктор) и 10×25 мм (одноэлементный индуктор), на частоте 2,5 МГц в стали. Диаграмма направленности одноэлементного индуктора в плоскости излучения представляется в виде основного лепестка шириной менее 15° , в котором сосредоточено около 80 % всей излучаемой энергии. При этом уровень боковых лепестков достаточно мал. Диаграмма направленности двухэлементного индуктора представляется в виде совокупности основного и двух боковых лепестков, уровень которых соизмерим с уровнем центрального. Поэтому основная часть энергии сосредоточена в диапазоне углов $\pm 15^\circ$, при этом характер поля крайне неоднородный. Последнее может оказаться мешающим фактором при контроле деталей с ограниченными поперечными размерами или на многократных отражениях, когда эхо-сигналы от боковых лепестков могут накладываться на эхо-сигналы от основного лепестка и приводить к неоднозначной интерпретации результатов контроля.

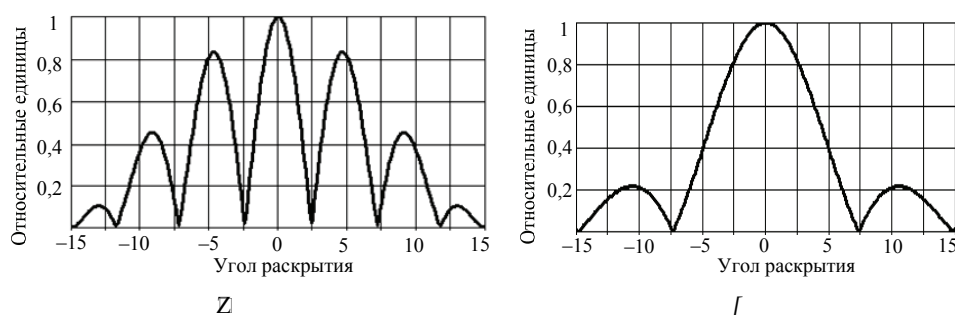


Рис. 6. Диаграмма направленности ЭМА преобразователей с двух- (Z) и одноэлементным (I) индуктором

Результаты экспериментов. Для экспериментального подтверждения результатов, полученных в ходе моделирования, разработаны, спроектированы и изготовлены ЭМА преобразователи с одно- и двухэлементными индукторами и двумя системами подмагничивания (П-образная с дополнительной магнитной цепью, кольцеобразная с концентратором).

Распределение магнитного поля в зазоре между ЭМА преобразователем и объектом контроля измерено экспериментально с использованием установки, блок-схема которой приведена на рис. 7. Установка состоит:

- из устройства микрометрического перемещения над поверхностью контролируемого образца первичного преобразователя миллитесламетра по трем координатам с точностью 0,1 мм;
- миллитесламетра Ф-4355 для измерения индукции (напряженности) магнитного поля с первичным преобразователем Холла.

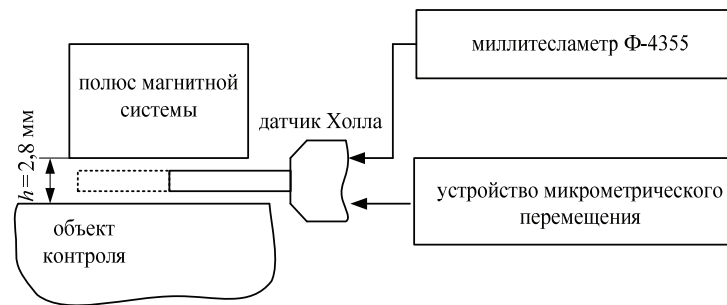


Рис. 7. Блок-схема экспериментальной установки

По результатам экспериментальных измерений и теоретических расчетов на рис. 8 построено распределение магнитной индукции в зазоре 2,8 мм. Как видно из рисунка, результаты экспериментального исследования разработанных ЭМА преобразователей удовлетворительно согласуются с результатами расчета магнитных полей численным методом.

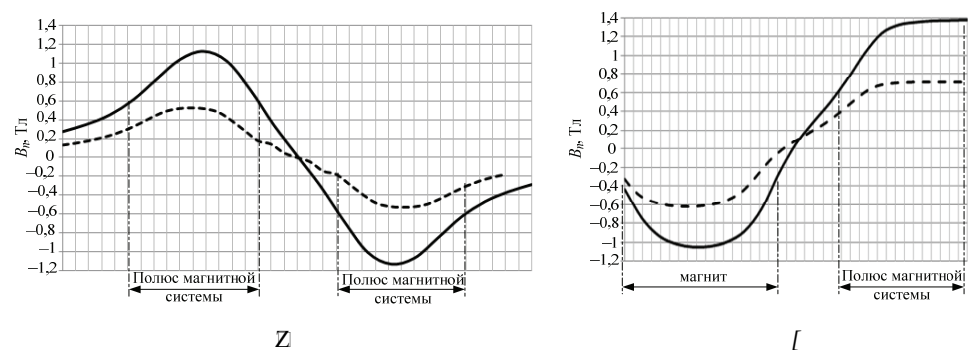


Рис. 8. Результаты численного расчета (—) распределения нормальной составляющей B_n магнитного поля и экспериментального исследования (---): Z – для конструкции на рис. 4, l – для половины конструкции рис. 4, l

Знание распределения магнитного поля в системе необходимо для корректного анализа акустических полей излучаемых ЭМА преобразователя и надежного их проектирования. Однако необходимо отметить, что полученные результаты при помощи ELCUT и подобных программных сред представляют собой лишь приближенное решение задачи с разной степенью достоверности, зависящей как от возможностей программного продукта, так и корректного использования того или иного пакета при составлении модели расчета.

Выводы. По результатам моделирования магнитных полей минимальную индукцию среди рассмотренных конструкций систем подмагничивания обеспечивает конструкция в виде П-образного магнитопровода ($B_n \approx 1,3$ Тл). Дополнительная магнитная цепь в этой конструкции увеличивает поле на ~60 % (до значения $B_n \approx 2,1$ Тл). Максимальная индукция наблюдается для конструкции с кольцеобразным магнитом ($B_n \approx 2,8$ Тл).

Для конструкции с кольцеобразным магнитом отношение тангенциальной и нормальной составляющих магнитного поля наибольшее и составляет около 10 %, для конструкции в виде П-образного магнита и с дополнительной магнитной цепью $B_t/\leq_n \approx 5$ и 7 % соответственно.

Увеличение зазора между магнитопроводом и поверхностью объекта контроля, например для кольцеобразного магнитопровода, от 0,5 до 2 мм приводит к уменьшению индукции с 2,8 до 1,5 Тл.

Диаграмма направленности одноэлементного индуктора представляется в виде основного лепестка шириной менее 15° . Двухэлементный индуктор в таком же диапазоне углов имеет дополнительные два боковых лепестка с уровнем, соизмеримым с основным.

Список литературы

1. $\text{m}[\text{gdh}] = . : ., \text{Dhjh}[\text{gbdhZ}] \quad H. <.$ Влияние химического состава и температуры металлов на эффективность электромагнито-акустического преобразования // Дефектоскопия. – 2009. – № 4. – С. 40–49.
2. $\text{m}[\text{gdh}] = . : ., \text{FmjZv} \quad < . <., \text{Dhjh}[\text{gbdhZ}] \quad H. <.$ Исследование напряженно-деформированного состояния ободьев цельнокатаных вагонных колес методом акустической тензометрии // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2009. – Т. 6, № 3. – С. 111–117.
3. $\text{Zb} \quad K. W., \text{Bevykh} \quad J. K.$ О возможности использования параметров ЭМАП для оценки предела упругости и остаточных деформаций ферромагнитных материалов // Дефектоскопия. – 2010. – № 1. – С. 83–89.
4. Электромагнитное возбуждение звука в металлах : моногр. / А. Н. Васильев, В. Д. Бучельников, С. Ю. Гуревич и др. – Челябинск ; М. : Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 339 с.
5. $\text{m}[\text{gdh}] = . : ., \text{G}[\text{pdZy}] \quad H. <.$ Динамические задачи теории упругости в приложении к проблемам акустического контроля и диагностики. – М. : Физматлит, 2004. – 136 с.
6. Руководство пользователя ELCUT. URL: <http://elcut.ru/demo/manual.pdf> (дата обращения: 19.04.11).
7. Неразрушающий контроль : справ. : в 8 т. / под ред. В. В. Клюева. – 2-е изд., перераб. и испр. – М. : Машиностроение, 20 – . – Т. 4, кн. 1 : Акустическая тензометрия. – М. : Машиностроение, 2003.

V. V. Muraviev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Izhevsk State Technical University
 V. A. Strizhak, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Izhevsk State Technical University
 E. N. Balobanov, Postgraduate Student, Izhevsk State Technical University

On Parameters Calculation of Electromagnetic-Acoustic Transducer Magnetic System

The comparative analysis results of magnetic systems parameters based on permanent NdFeB magnets are discussed. The research results of magnetic field are presented.

Keywords: magnetic field, electromagnetic-acoustic transducers, magnetic system, direction diagram, magnetic induction

Получено: 13.04.11