

УДК 620.179.147

*С. Ф. Дмитриев, А. В. Ишков, В. Н. Маликов, А. М. Сагалаков***Исследование неоднородных материалов
методом вихревых токов****S. F. Dmitriev, A. V. Ishkov, V. N. Malikov, A. M. Sagalakov***Analysis of Heterogeneous Materials by Eddy Current Method**

Представлены электрофизические методы исследования электропроводящих материалов с помощью разработанного сверхминиатюрного вихретокового датчика трансформаторного типа, позволяющие с высокой точностью определять локальные значения электропроводности и напряженности магнитного поля.

Ключевые слова: электропроводность, токовихревой контроль, магнитное поле.

Разработанный метод измерений позволяет с помощью виртуализированного измерителя-трансформера решать универсальные задачи по получению, преобразованию и визуализации различной измерительной информации одним датчиком, интегрированным в составе специализированного программно-аппаратного комплекса. В частности, данным методом можно исследовать дефекты и неоднородности материалов.

Датчик позволяет определить напряженность магнитного поля для магнитно-твердых и магнитно-мягких материалов, а также значение электропроводности для материалов, не обладающих магнитными свойствами.

В Алтайском государственном университете авторами статьи была разработана методика измерений и создан трансформаторный накладной токовихревой преобразователь, на основе которого был изготовлен измеритель электропроводности неферромагнитных материалов ИЭНМ-2 (см., например: [1]). Данный прибор включает в себя семь блоков. Блок МВТ (использующий метод вихревых токов) формирует вносимое напряжение. Блок электродинамическая вычислительная машина (ЭКВМ) служит вычислительным и управляющим устройством ИЭНМ-2. Для выбора и ввода необходимой программы вычислений используется блок буфера-программатора БП. Аналого-цифровой преобразователь (блок АЦП) применяется для коммутации аналогового сигнала от блока МВТ и цифрового преобразования аналогового сигнала, который подается на ЭКВМ, а также для формирования сигналов неготовности МВТ. Устройство согласования регулирует МВТ и АЦП по напряжению. Далее напряжение преобразуется на амплитудном детекторе в постоянное и поступает на вход АЦП. Алгоритм работы блока АЦП ос-

The electro-physical research methods for investigating current-conducting materials are described here. With the help of the eddy-current diminutive transducer -transformer a scientist can measure the electro-conductivity and the intensity of the magnetic field rather accurately.

Key words: electric conductivity, eddy-current testing, magnetic field.

нован на методике последовательного счета. При этом входное измеряемое напряжение уравнивается суммой эталонов напряжения. Момент равенства входного и суммы эталонов напряжений определяется с помощью сравнивающего устройства.

В результате проведенного усовершенствования и оптимизации, сконструированный прибор включает в себя только токовихревой преобразователь (ВТП), подключаемый к персональному компьютеру (ПК) посредством звуковой платы. Токовихревой преобразователь служит для преобразования измеряемой характеристики вещества (электропроводности или напряженности постоянного магнитного поля) в электрический сигнал. Преобразователь ВТП содержит возбуждающую и измерительную обмотку. Такая конструкция может быть использована для измерения напряженности постоянного магнитного поля и электропроводности неферромагнитных материалов с высокой точностью.

Принцип работы датчика основан на создаваемом в датчике переменном магнитном поле, локализуемом на объекте контроля при помощи ферритового сердечника пирамидальной формы. Форма сердечника обусловлена необходимостью локализации магнитного потока от возбуждающей (генераторной) катушки. Для материала сердечника в данной модели использовался среднечастотный малодиссипативный феррит 2000 НМЗ, выбранный по величине максимальной начальной магнитной проницаемости $\mu_{max} = 5 \times 10^2$ Гн/м. Снаружи датчик заключен в диэлектрическую корундовую шайбу, которая предохраняет сердечник от механического контакта с объектом контроля.

Под действием переменного магнитного поля тока, подаваемого на генераторную обмотку дат-

* Работа выполнена при финансовой поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (контракт 14.740.11.0355).

чика, в измерительной обмотке наводится ЭДС, а ферритовый сердечник внутри катушки начинает колебаться с частотой, соответствующей частоте переменного тока. В случае, если объектом контроля является магнитотвердый материал, расположенный так, что силовые линии его магнитного поля направлены параллельно расположению сердечника, то объект контроля намагничивает ферритовый сердечник. Результирующее поле зависит от напряженности постоянного поля контролируемого объекта, и по измерению напряжения на измерительной обмотке мы можем судить о величине напряженности магнитного поля.

Если же объект не обладает магнитными свойствами или расположен так, что линии его магнитного поля проходят перпендикулярно датчику, то с помощью датчика-трансформера можно определить значение электрической проводимости объекта, используя токовихревый метод контроля. Электромагнитное поле генераторной обмотки возбуждает вихревые токи в электропроводящем объекте контроля. Плотность вихревых токов в объекте зависит от геометрических и электромагнитных параметров объекта, а также от взаимного расположения измерительного токовихревого преобразователя и объекта. Магнитное поле вихревых токов противоположно первичному магнитному полю генераторной обмотки, вследствие чего результирующее поле зависит от электромагнитных свойств контролируемого объекта и от расстояния между преобразователем и объектом, поскольку распределение плотности вихревых токов зависит от этих факторов. В измерительной обмотке преобразователя наводится ЭДС, которая и служит сигналом, передающим информацию об объекте в блок измерения [2].

В этом случае ЭДС измерительной обмотки уменьшается за счет противоположного магнитного поля, создаваемого вихревыми токами. Однако уменьшение ЭДС при этом не настолько значительно, как в случае с постоянным магнитным полем.

Как известно, в основе метода вихревых токов лежит зависимость интенсивности и распределения вихревых токов в объекте контроля от его геометрических, электромагнитных (и связанных с ними) параметров и от взаимного положения измерительного преобразователя и объекта контроля. Основным информативным параметром этого метода β_0 является обобщенной характеристикой исследуемого объекта, токовихревого датчика и частоты электромагнитного поля. Величина β_0 определяется по формуле

$$\beta_0 = D_3 \sqrt{\mu_0 \cdot \omega \cdot \sigma},$$

где $D_3 = D_1 + 1.5h$; D_1 — средний диаметр возбуждающей обмотки; h — расстояние от эквивалентного витка возбуждающей обмотки до объекта контроля;

ω — частота электромагнитного поля; μ_0 — магнитная постоянная; σ — электропроводность.

Актуальной задачей является разработка адекватной физической модели отклика токовихревых трансформаторных преобразователей накладного типа, чувствительной сразу ко многим переменным и позволяющей восстанавливать годографы напряжения, вносимого в его измерительную обмотку. В дальнейшем данные годографы могут быть применены для исследования неоднородности материалов.

Для получения зависимости отклика токовихревых трансформаторных преобразователей накладного типа от структурных параметров неферромагнитной проводящей среды используем решение уравнений Максвелла с граничными условиями, определяемыми рассматриваемой конфигурацией среды и конструкцией датчика.

В теории накладных ВТП наиболее общей является задача о распределении электромагнитного поля в многослойных средах, создаваемого круговым витком с переменным током. Будем считать, что виток радиуса R_1 расположен над многослойной средой в плоскости, параллельной границам раздела слоев. Считая, что ток в витке изменяется по гармоническому закону с круговой частотой ω , и используя результаты работы [3], запишем суммарную комплексную ЭДС для измерительной обмотки датчика в виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & -j \frac{\omega \mu_0}{4\pi} (34\eta - 10) W_1 W_2 \sqrt{R_1 R_2} \cdot \exp\left(-\frac{3c}{2R}\right) I - \\ & - j \frac{\omega \mu_0}{4\pi} (34\eta - 10) W_1 W_2 \sqrt{R_1 R_2} \cdot \\ & \cdot \exp\left(-\frac{3|h_1 + h_2|}{2R}\right) I \cdot \varphi_1(\lambda) \Big|_{\lambda = \frac{3}{2R}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\eta = \frac{R_2}{R_1}$, если $\frac{R_2}{R_1} \leq 1$ или $\eta = \frac{R_1}{R_2}$, если $\frac{R_1}{R_2} \leq 1$

I — ток на возбуждающей обмотке трансформатора; μ_0 — магнитная постоянная; j — мнимая единица; ω — частота тока; W_1, W_2 — число витков измерительной и возбуждающей обмоток датчика; R_1, R_2 — радиусы измерительной и возбуждающей обмоток трансформатора; R — наибольшее из R_1, R_2 ; h_1 и h_2 — расстояния от возбуждающей и измерительной обмоток до поверхности объекта контроля; $c = |h_1 - h_2|$; $\varphi_1(\lambda)$ — комплексная функция, определяемая из граничных условий:

$$\varphi_1(\lambda) = \frac{x - \sqrt{x^2 + j\beta^2}}{x + \sqrt{x^2 + j\beta^2}}, \quad x = \lambda R_2, \quad \lambda = \frac{3}{D_3},$$

β — обобщенный параметр исследуемого объекта.

Первая часть выражения (1) дает выражение для начальной ЭДС датчика ε_0 при отсутствии проводящей среды, вторая часть (1) — наводимую ЭДС вихревыми токами проводящей среды.

Диаметр контура максимальной плотности вихревых токов определяется формулой

$$D_y = D_1 + 1.5 \cdot h_1,$$

где D_1 — диаметр возбуждающей обмотки; h_1 — расстояние от возбуждающей обмотки до объекта контроля.

Тогда для значений вносимых напряжений получим:

$$U_{BH} = j \cdot U_0' \cdot \exp(-3\xi) \cdot (\operatorname{Re} \varphi_1(\lambda) + j \cdot \operatorname{Im} \varphi_1(\lambda)),$$

где $\xi = \frac{h_1 + h_2}{D \varepsilon}.$

Учитывая влияние сердечника в датчике, возрастающие величины магнитной индукции, а также несущественность магнитных потерь типа Иордана и определяющее влияние гистерезисных потерь, получим

$$U_0' = 1.7 \cdot 10^{-6} \omega(m' - 0.3) \sqrt{D_1 D_2 W_1 W_2 \mu} \cdot I_{to} \sqrt{\frac{W - W_t V}{W}},$$

где $m' = 0,38$, μ — начальная магнитная проницаемость; D_1, D_2 — диаметры возбуждающей и измерительной обмоток датчика; I_{to} — сила тока возбуждающей обмотки; W_t — величина энергии, диссипируемой в 1 см феррита за 1 с; V — объем сердечника; W — мощность источника, питающего токовую обмотку.

Вносимые напряжения будут иметь вид:

$$\operatorname{Re}(U_{BH}) = U_0' \cdot \exp(-3\xi) \cdot \operatorname{Im}(\varphi_1(\lambda));$$

$$\operatorname{Im}(U_{BH}) = U_0' \cdot \exp(-3\xi) \cdot \operatorname{Re}(\varphi_1(\lambda)). \quad [4]$$

С учетом полученных соотношений были построены годографы, иллюстрирующие влияние различных параметров среды и датчика на значения вносимых напряжений (рис. 1–2).

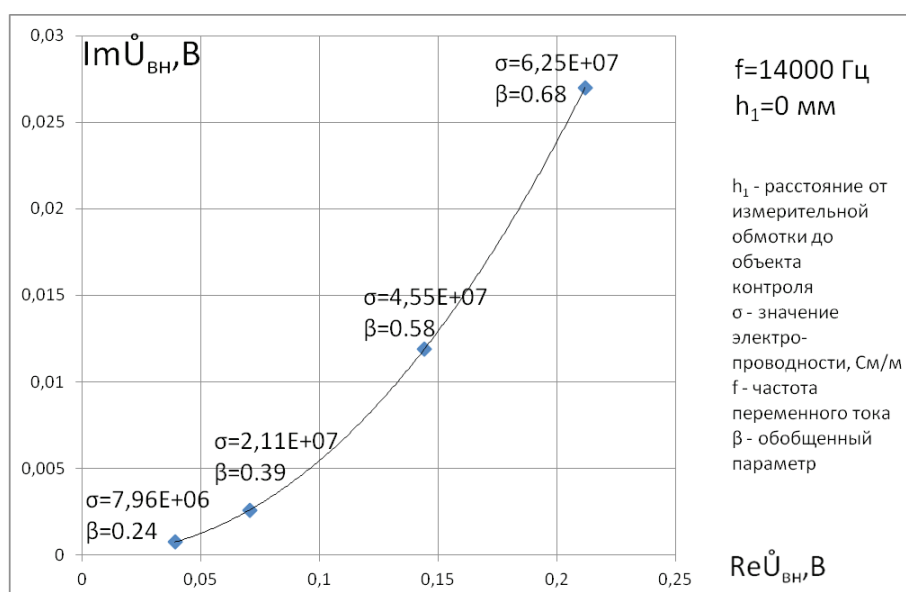


Рис. 1. Годограф напряжения, вносимого в измерительную обмотку при увеличении электропроводности

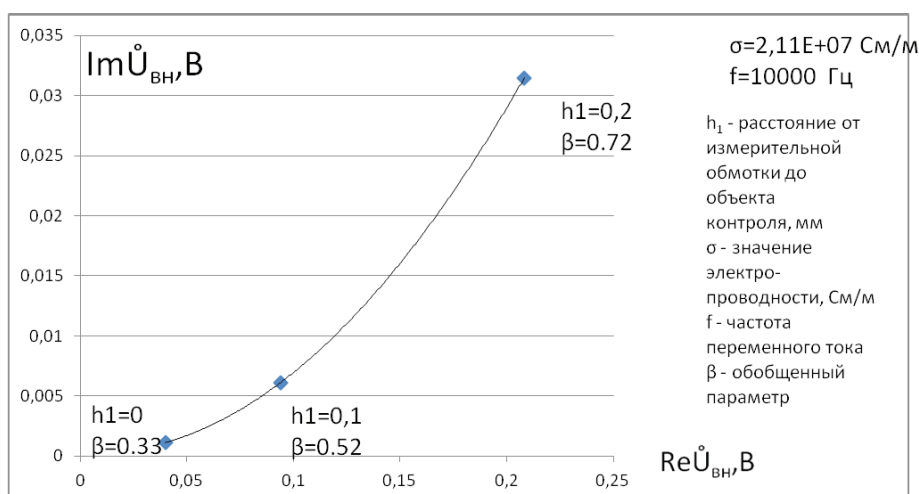


Рис. 2. Годограф напряжения, вносимого в измерительную обмотку при увеличении расстояния от измерительной обмотки до объекта контроля

Построенные годографы демонстрируют зависимость полного вносимого напряжения от различных параметров датчика и объекта контроля. На значение вносимого напряжения значительное влияние оказывает расстояние от измерительной катушки до полупространства, а также частота электромагнитного поля. Таким образом, данные годографы позволяют оптимизировать конструкцию датчика, выбрать наиболее эффективные параметры для конкретной измерительной задачи.

Одновременно были построены и годографы для электрической проводимости, которые можно использовать для определения электропроводимости при заданных параметрах датчика. По значению

локальной проводимости можно судить о характере и распределении неоднородностей в материалах. Ниже приведена структурная схема используемого устройства (рис. 3).

Устройство измерения состоит из трех основных частей:

- токовихревой преобразователь (ВТП);
- звуковая карта ПК;
- программное обеспечение (ПО).

Программное обеспечение можно также условно разделить на три блока:

- виртуальный генератор;
- блок обработки и управления;
- индикатор.

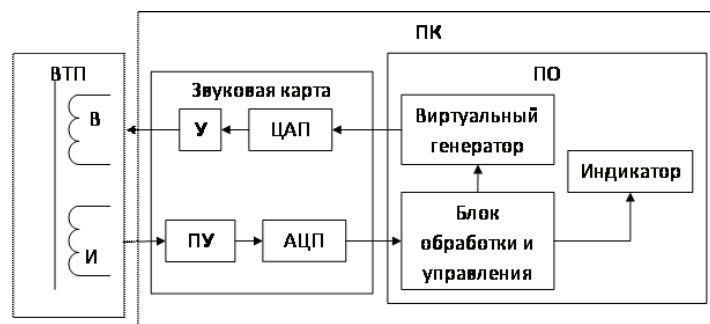


Рис. 3. Структурная схема устройства

Виртуальный генератор подает цифровой сигнал на вход ЦАП звуковой карты, где он преобразовывается в аналоговый. В свою очередь, аналоговый сигнал проходит усилитель мощности (У) и подается на возбуждающую обмотку (В) ВТП. Проходя по возбуждающей обмотке ВТП, синусоидальный сигнал создает электромагнитное поле, которое, в свою очередь, наводит ЭДС в измерительной обмотке (И) ВТП. Это напряжение поступает на микрофонный вход звуковой карты и после прохождения предусилителя (ПУ) поступает на вход АЦП звуковой карты. Аналоговый сигнал преобразовывается в цифровой и передается в блок обработки и управления ПО. Блок обработки и управления фиксирует уровень цифрового сигнала в условных единицах.

Этот уровень принимается за уровень нуля, соответствующего уровню напряжения на измерительной катушке без объекта контроля. При отсутствии объекта контроля индикатор показывает нуль, соответствующий нулевому значению электропроводности или же нулевому значению напряженности магнитного поля.

Определение величины электрической проводимости можно произвести, установив соответствие между значением фиксируемого сигнала на измерительной обмотке и значением электропроводности материала. Для установления этого соответствия может быть использована аппаратная кривая.

Для ее построения была проведена серия измерений величины электрической проводимости у этало-

нов с заранее известной электропроводностью. После этого уровень напряжения на измерительной обмотке, фиксируемый блоком управления в условных единицах, сопоставлялся каждому значению электропроводности. По полученным значениям проводилась аппроксимация, результатом которой и являлась аппаратная кривая. Используя построенную кривую, производится расчет величины локальной электрической проводимости материалов.

На любой звуковой карте измеренное значение величины электрической проводимости необходимо рассчитывать по следующей аппроксимационной формуле:

$$\sigma = (a(y - y_0)^3 + b(y - y_0)^2 + c(y - y_0) + d) \times \frac{k_1}{k_2},$$

где σ — значение электропроводности объекта контроля, МСм/м; y — количество условных единиц полученных с выхода АЦП, звуковой карты; y_0 — количество условных единиц, полученных с выхода АЦП звуковой карты, без объекта контроля; k_1 — коэффициент наклона прямой эталонной карты; k_2 — коэффициент наклона прямой текущей карты; a, b, c, d — коэффициенты аппроксимации.

Определение напряженности постоянного магнитного поля можно произвести аналогично определению значения электропроводности, сравнивая значения фиксируемого сигнала на измерительной обмотке с известным значением постоянного магнитного поля,

которое можно получить с помощью тангенс-гальванометра. Для этой цели датчик помещался в центр катушки тангенс-гальванометра. При подаче на витки катушки заданного постоянного тока в центре катушки возникало постоянное магнитное поле с известным значением напряженности. Тогда уровень напряжения на измерительной обмотке, фиксируемый блоком управления в условных единицах, можно со-

поставить с различными значениями напряженности поля и провести аппроксимацию, в соответствии с которой строится аппаратная кривая.

Таким образом, виртуальный датчик-трансформер позволяет реализовать широкий спектр приборных измерительных функций в одной компьютерной программе, не требующей установки на ПК дополнительных программных средств.

Библиографический список

1. Дмитриев С. Ф., Сагалаков А. М. Современные токовихревые дефектоскопы для мониторинга в автомобильной и электротехнической промышленности // Экспериментальные методы в физике структурно-неоднородных конденсированных сред. ЭМФ 2001. Композиционные и порошковые металлические материалы: тр. Второй Междунар. науч.-техн. конф. — Барнаул, 2001.
2. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. — М., 2003. — Т. 2.
3. Дмитриев С. Ф., Лященко Д. Н., Ишков А. В. Модель отклика вихретокового преобразователя для задач толщинометрии // Известия АлтГУ. — 2010. — № 1/2.
4. Сагалаков А. М., Дмитриев С. Ф., Тарусин Д. Ю., Ишков А. В. Расчет напряжения, вносимого в измерительную обмотку вихретокового преобразователя, в случае малого обобщенного параметра для одной модели композитной среды // Вестник Томского государственного университета: бюллетень оперативной научной информации. — 2006. — № 64.