

Автоматизированный вычислительно-измерительный комплекс для многочастотной вихретоковой диагностики металлических материалов*

Я.И. Грачева¹, А.В. Егоров¹, В.В. Поляков^{1,2}, А.А. Дмитриев¹

¹ Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск, Россия)

Automated Computer-Measuring Complex for Multi-Frequency Eddy Current Diagnostics of Metallic Materials

J.I. Gracheva¹, A.V. Egorov¹, V.V. Polyakov^{1,2}, A.A. Dmitriev¹

¹Altai State University (Barnaul, Russia)

²Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS (Tomsk, Russia)

Повышение точности и надежности вихретоковой диагностики может быть достигнуто за счет автоматизации вихретоковых измерений. Одним из направлений такой автоматизации является применение виртуальных приборов, что обеспечивает более высокую адаптируемость вихретоковых измерений к изменяющимся условиям и режимам контроля, повышение быстродействия и производительности операций контроля. В настоящей работе описан вычислительно-измерительный комплекс многочастотной вихретоковой диагностики, включающий в себя виртуальные приборы, разработанные в среде графического программирования LabView. С помощью этих виртуальных приборов производилась обработка регистрируемых цифровых сигналов, далее осуществлялся расчет годографов системы «контролируемый объект — вихретоковый датчик» в заданном диапазоне частот. Построение экспериментальных годографов апробировано на примере образцов в виде медных пластин различной толщины с нанесенными диэлектрическими покрытиями. Описано и проанализировано влияние толщин материала и покрытия на вид и расположение линий годографа. Рассмотрена возможность разделения различных конкурирующих факторов, влияющих на результаты вихретоковой диагностики.

Ключевые слова: метод вихревых токов, диагностика материалов, автоматизация измерений, цифровая обработка сигналов.

DOI 10.14258/izvasu(2017)4-03

An automation of eddy current measurements can increase accuracy and reliability of eddy current diagnostics. The automation by using virtual instruments provides greater adaptability of eddy current measurements to changing conditions and control modes, and increases the speed and performance of control operations. In this paper, we present a computer-measuring complex for multi-frequency eddy current diagnostics that includes virtual instruments developed in LabView's graphical programming environment. Recorded digital signals are processed, and hodographs of the "controlled object – eddy current sensor" in a given frequency range are calculated with the help of these virtual devices. Experimental hodographs are produced for copper plate testing samples of various thicknesses with applied dielectric layer. The influence of material and dielectric layer thicknesses on the shape and arrangement of hodograph lines is described and analyzed. Distinguishability of various competing factors affecting the results of eddy current diagnostics is investigated.

Key words: eddy current method, material diagnostics, measurement automation, digital signal processing.

*Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-08-00914.

Введение. Эффективным методом неразрушающей диагностики конструкционных металлических материалов и изготовленных из них изделий является метод вихревых токов. Этот метод позволяет выявлять различные виды дефектов структуры и находить их местоположение и размеры, определять физические и геометрические характеристики контролируемых объектов [1–5]. Повышение точности вихретоковой диагностики, увеличение ее достоверности и надежности, расширение числа контролируемых свойств и характеристик может быть достигнуто за счет автоматизации вихретоковых измерений [6]. Перспективным направлением такой автоматизации является применение технологии виртуальных приборов [7, 8]. Это обеспечивает более высокую адаптируемость вихретоковых измерений к изменяющимся условиям и режимам контроля, гибкость измерительно-вычислительной системы. Наибольшей информативностью обладают многочастотные вихретоковые измерения, завершающиеся построением и анализом годографов системы «датчик — контролируемый образец». Последовательный перебор частот при таких измерениях требует увеличения числа отдельных измерений, существенных затрат времени, в связи с чем в еще большей степени возрастает важность автоматизации, обеспечивающей повышение быстродействия и производительности проводимых операций контроля. В настоящей работе рассматривается принцип работы автоматизированного комплекса, включающего в себя виртуальные приборы и позволяющего проводить построение экспериментальных годографов в широком диапазоне частот. На примере измерений для медных образцов с диэлектрическим покрытием рассматривается влияние на получаемые годографы различных факторов и возможность их разделения.

1. Метод получения годографов. При проведении измерений был использован подход, заключающийся в возбуждении вихретоковым датчиком в контролируемом образце сигнала специальной формы, содержащего заданный набор частот, с последующим построением по регистрируемым параметрам экспериментальных годографов. Этот подход был описан и апробирован в работе [9], согласно которой для одновременного измерения параметров датчика на вход измерительной цепи подавался сигнал $u_1(t)$, полученный путем суперпозиции M гармонических сигналов с фиксированными частотами $\omega_1, \dots, \omega_M$:

$$u_1(t) = u_0 \sum_{m=1}^M \sin(\omega_m t)$$

(u_0 – нормировочный коэффициент, ограничивающий максимальное значение сигнала u_1). При измерениях применялся накладной параметрический датчик [10, 11], представлявший собой катушку индуктивности с сердечником. Временные развертки входного $u_1(t)$ и выходного $u_2(t)$ сигналов регистрировали синхронно с помощью аналого-цифровых преобразователей. Реактивное сопротивление датчика и его активное сопротивление на фиксированных частотах ω_m рассчитывалось по алгоритму, приведенному в [9, 11], для повышения точности расчетов применялись преобразования Уолша [12].

Обработка регистрируемых сигналов в вычислительно-измерительном комплексе и построение годографов проводились в среде графического программирования LabView компании National Instruments [7, 8]. Блок-схема разработанного виртуального прибора представлена на рисунке 1. Прибор обеспечивал применение дискретного преобразования Фурье к полученным массивам экспериментальных данных

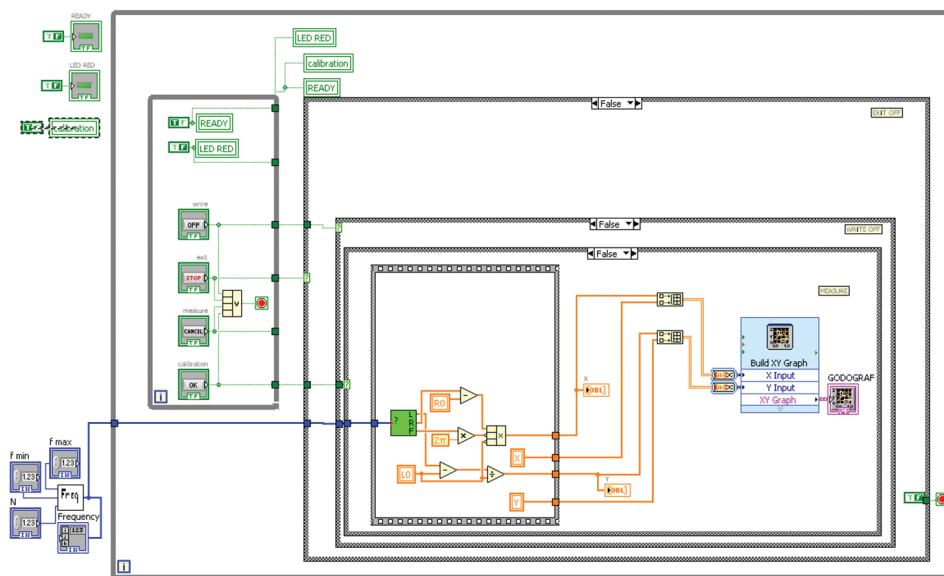


Рис. 1. Блок-схема виртуального прибора

и получение комплексных амплитуд гармоник входного и выходного сигналов. Использование необходимого интервала частот и расчет частот с неравномерным разбросом значений производился в подпрограмме, представленной на рисунке 2. Вывод данных осуществлялся в файл формата .txt. Функция сохранения результатов сбора данных позволяла производить вы-

борку результатов на этапе их обработки. Построение годографов проводилось по рассчитанным изменениям реактивного $\Delta X(\omega_m) = X(\omega_m) - X_0(\omega_m)$ и активного $\Delta R(\omega_m) = R(\omega_m) - R_0(\omega_m)$ сопротивлений датчика (здесь $X(\omega_m)$ и $R(\omega_m)$ – параметры датчика с образцом на частоте ω_m , $X_0(\omega_m)$ и $R_0(\omega_m)$ – параметры датчика без образца).

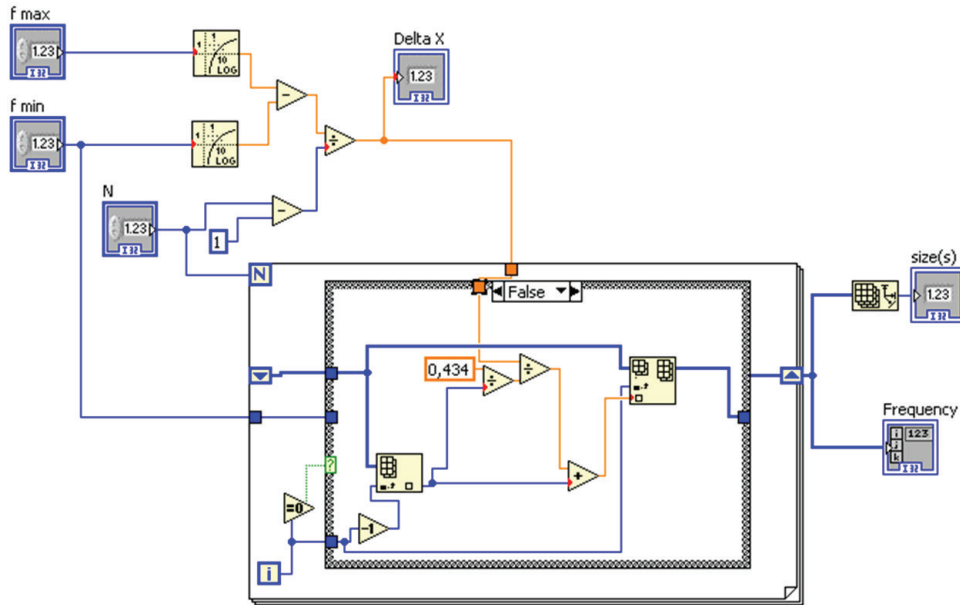


Рис. 2. Виртуальный подприбор расчета частотного диапазона

Преимущество разработанного виртуального прибора заключается в возможности проведения экспресс-контроля, позволяющего за короткое время провести параллельные вычисления необходимых параметров, получение и графическое представление экспериментальных годографов системы «датчик – контролируемый образец».

2. Экспериментальные годографы для материалов на основе меди. В качестве материалов для испытаний были использованы плоские пластины различной толщины, вырезанные из листов меди, с диэлектрическими покрытиями также разной толщины. Выбор такого объекта контроля был обусловлен отсутствием влияния магнитных свойств, слабой чувствительностью электрических характеристик к возможным примесям и предшествующей термообработке, а также широкой распространенностью меди в качестве электротехнического материала. Толщины образцов h изменялись в интервале от 1.8 мм до 22 мм. Величина этого интервала была выбрана таким образом, чтобы можно было явно учесть влияние скин-слоя, который составляет в меди ~ 7 мм при частоте 100 Гц и ~ 2 мм при частоте 1 кГц. Диэлектрические покрытия моделировались помещением между датчиком и поверхностью образцов слоев непроводящего материала с известной толщиной, что обеспечивало

надежное определение их геометрических характеристик. Толщина диэлектрического слоя s изменялась в диапазоне от 0.2 до 0.6 мм. При проведении экспериментов частоты изменялись в диапазоне от 100 Гц до 10 кГц.

Типичные экспериментальные годографы, полученные при измерениях, приведены на рисунке 3 для двух различных значений толщины диэлектрического слоя и четырех значений толщины пластины. Как видно из рисунка 3, влияние величины s на положение линий годографа при фиксированной толщине h проявляется в расхождении этих линий по оси $\Delta X / X_0$. Отмеченное расхождение наиболее отчетливо наблюдается для нижних участков годографов, описывающих область высоких частот. Это связано с тем, что при высоких частотах ω глубина скин-слоя, пропорциональная $\omega^{-1/2}$, уменьшается. Как следствие, при этих частотах влияние диэлектрического слоя, т.е. расстояния от проводящей поверхности до датчика, на параметры датчика увеличивается. Из рисунка 3 также следует, что влияние толщины образца при фиксированном значении s проявляется в изменении формы линии годографа. Такое изменение наиболее существенно при малых толщинах, при увеличении h линии годографов сближаются и при дальнейшем росте толщины на-

чинают накладываться друг на друга, расхождение сохраняется только на верхних участках линий, отвечающих низким частотам. Это поведение годографов связано с тем, что для значений h , меньших глубины скин-слоя или сопоставимых с ней, влияние толщины оказывается существенным, в случае же

толщин, значительно превышающих глубину скин-слоя, различия в значениях h проявляются слабее [12]. Отметим, что данное обстоятельство накладывает естественное ограничение на возможности контроля толщины металлических образцов с помощью вихретоковых измерений.

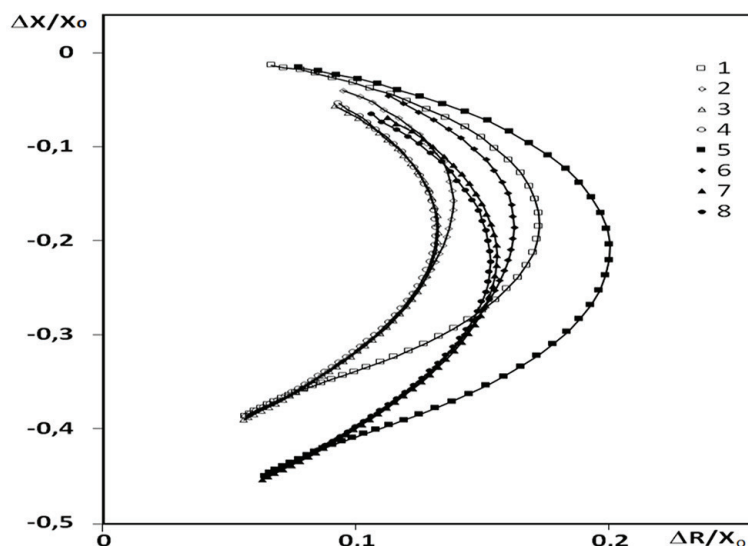


Рис. 3. Экспериментальные годографы для медных образцов с диэлектрическим покрытием. Толщина образца h при $s = 0.6$ mm: 1 — 1.87 mm, 2 — 5.59 mm, 3 — 19.5 mm, 4 — 21.3 mm; при $s = 0.2$ mm: 5 — 1.87 mm, 6 — 5.59 mm, 7 — 19.5 mm, 8 — 21.3 mm

Заключение. Описанный нами автоматизированный измерительно-вычислительный комплекс, использующий технологию виртуальных приборов, обеспечил надежное построение вихретокового годографа для контролируемого объекта при проведении одного испытания с сигналом специальной формы. На примере медных образцов с нанесенными

диэлектрическими покрытиями показаны возможности и преимущества разработанного алгоритма автоматизации вихретоковых измерений. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности рассмотренного метода автоматизации и реализующего его комплекса в системах неразрушающей вихретоковой диагностики материалов и изделий.

Библиографический список

1. Поляков В.В., Егоров А.В. Зависимость электропроводности пористых металлов от структуры // Теплофизика и аэромеханика. — 1994. — Т. 1, №2.
2. Дорофеев А.Л., Ершов Р.Е. Физические основы электромагнитной структуроскопии. — М., 1990.
3. Крайний В.И., Будагин О.Н., Троицкий-Марков Т.Е. Повышение надежности обнаружения дефектов сложных конструкций с помощью комплексирования информации многопараметрового неразрушающего контроля // Дефектоскопия. — 2012. — №2.
4. Zenglu Song, Tsutomu Yamada, Hideki Shitara, Yasushi Takemura. Detection of Damage and Crack in Railhead by Using Eddy Current Testing // Journal of Electromagnetic Analysis and Applications. — 2011. — №3.
5. Баштанников Л.А., Бондаренко В.И., Себко В.П., Тюпа В.И. Определение электромагнитных характеристик материала сплошных цилиндрических изделий // Дефектоскопия. — 1980. — №8.
6. Lingqi Li; Tsukada K.; Hanasaki K.; Zheng Liu. Fusion of multi-frequency eddy current signals-by using wavelet analysis method // Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion. — 2002. — Vol. 1.
7. Бутырин П.А. Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7. — М., 2005.
8. LabVIEW для всех / Джеффри Тревис ; пер. с англ. Н.А. Клушин. — М., 2005.

9. Егоров А.В., Поляков В.В., Лепендин А.А., Грачева Я.И. Применение сигналов специальной формы в многочастотных вихрековых измерениях // Автометрия. — 2017. — Т. 53, №3.

10. Соболев В.С., Шкарлет Ю.М. Накладные и экранные датчики. — Новосибирск, 1967.

11. Егоров А.В., Поляков В.В., Пирогов А.А., Колубаев Е.А. Многочастотная вихрековая дефектоскопия алюминиевых сплавов // Известия Алтайского гос. ун-та. — 2014. — № 1/2. DOI:10.14258/izvasu(2014)1.2-30.

12. Залманзон Л.А. Преобразования Фурье, Уолша, Хара и их применение в управлении, связи и других областях. — М., 1989.