

8. Бахвалов, Н.С. Численные методы. Часть.1. – / Н.С. Бахвалов. - М.: Наука. 1973 – 632 с.
9. Денисенко, В. ПИД-регуляторы. Принципы построения и модификации// В. Денисенко. - Современные технологии автоматизации. 2006.- №4.- С. 66-74.

*К.т.н., с.н.с. Гуляев П.В., аспирант Гафаров М.Р., д.т.н., с.н.с. Шелковников Е.Ю., к.ф.-м.н., с.н.с. Тюриков А.В., к.т.н., с.н.с. Осипов Н.И. – (8888)99-!!!-!!!, Институт прикладной механики УрО РАН, г. Ижевск*

УДК 620.179.14.05:681.586:004.387

## ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ АППАРАТНОЙ ЧАСТИ ВИРТУАЛИЗИРОВАННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ В МЕТОДЕ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

С.Ф. Дмитриев, Д.Н. Лященко, А.В. Новоженев, А.В. Ишков

В статье рассмотрены особенности реализации аппаратной части измерительных программно-аппаратных комплексов, реализующих метод вихревых токов. Приводятся результаты решения задачи отклика вихретокового преобразователя, оптимизированные конструкции сверхминиатюрных датчиков, вариант решения задачи совместимости специализированного ПО виртуализированных приборов с произвольной звуковой картой ПК для случая измерения электропроводности материалов.

**Ключевые слова:** виртуализированный измерительный прибор, метод вихревых токов, сверхминиатюрный вихретоковый преобразователь, аппаратная кривая, электропроводность.

Концепция виртуализированных измерительных приборов (ВИП) - современных измерительных программно-аппаратных (ПА) комплексов базируется на максимальной виртуализации функций измерительного устройства, не связанных с непосредственным получением информации от контролируемого объекта и среды [1]. Ее практическое воплощение стало возможным с появлением современных высокопроизводительных ЭВМ, позволяющих основной алгоритм работы прибора, в части первичной обработки сигнала, его преобразовании, сравнении со стандартом, накоплении результатов последовательных измерений и их статистическую обработку, вывод полученных результатов и управление функциями измерителя, реализовать в виде специальной компьютерной программы, написанной на языке высокого уровня [2].

У ВИП всегда открытой остается задача получения цифрового сигнала от первичного датчика для его последующей обработки специализированной компьютерной программой - виртуальным прибором, однако для многих прикладных задач оказываются достаточными возможности встроенных практически в любую ЭВМ АЦП/ЦАП - звуковых карт.

Необходимыми и достаточными условиями такого применения звуковых карт являются низкие мощности, развиваемые в цепи первичного измерительного преобразова-

теля - датчика, и ограниченный звуковым, диапазон используемых частот.

Соблюдение этих условий позволяет реализовывать большую гамму измерительных устройств, находящих применение для неразрушающего контроля различных параметров объектов и окружающей среды [3].

В задачах неразрушающего контроля особое место отводится методу вихревых токов (МВТ). МВТ базируется на возбуждении в контролируемом объекте или среде под воздействием переменного магнитного поля, создаваемого вихретоковым преобразователем (ВТП), вихревых токов и одновременной регистрации ВТП вторичного поля. Величина вторичного поля сложным образом зависит от параметров контролируемого объекта и если должным образом выстроить математическую модель отклика преобразователя на поле вихревых токов, то становится возможным определять раздельно более десятка параметров исследуемого объекта [3, 4].

Задача отклика первичного преобразователя в МВТ является не только математической, сводящейся к отысканию решения соответствующего уравнения для векторного потенциала в случае определенного значения обобщенного параметра, учитывающего свойства объекта, но и физической и инженерной - связанной с установлением оптимальных условий измерений и конструкции самого датчика, а при создании ВИП к ней

### РАЗДЕЛ III. НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

добавляется еще и задача сопряжения специализированного программного обеспечения (ПО) ВП с произвольной звуковой картой ПК.

**Целью настоящей работы** являлись: расчет напряжения, вносимого вихревыми токами в измерительную обмотку ВТП, оптимизация его характеристик и учет переменных характеристик преобразовательного тракта различных звуковых карт, используемых при реализации аппаратной части ВИП МВТ.

#### Постановка задачи

Ранее нами была подведена теоретическая основа для расчета напряжения в измерительной обмотке ВТП, вносимого вихревыми токами, возникающими в неферромагнитном проводящем полупространстве при наведении над ним возбуждающей обмотки ВТП с известными характеристиками [5].

Напомним, что такой расчет связан с решением уравнения Максвелла, с граничными условиями, зависящими как от структуры рассматриваемых моделей среды, так и от конструкции датчика.

Так, при нависании витка с током над проводящей средой в плоскости, параллельной границе раздела, уравнения Максвелла принимают вид:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J}_{\text{ст}}; \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t, \quad (1)$$

где  $\vec{H}$  и  $\vec{E}$  – векторы напряженности соответственно магнитного и электрического полей;  $\vec{B}$  – вектор магнитной индукции;  $\vec{J}_{\text{ст}}$  – вектор плотности полного тока.

Уравнения Максвелла можно свести к уравнению Гельмгольца для векторного потенциала  $\vec{A}$  [6], определяемого выражением  $\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A}$ , которое, если ток в витке изменяется по гармоническому закону с круговой частотой  $\omega$ , приводится к неоднородному уравнению Гельмгольца.

$$\nabla^2 \vec{A} + k^2 \vec{A} = -\mu_a \vec{J}_{\text{стоп}}, \quad (2)$$

где  $k^2 = -j\omega\mu_a\sigma$ ;  $j = \sqrt{-1}$ ;  $\sigma$  – удельная электропроводимость;  $\mu$  – магнитная проницаемость;  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Уравнение (2) в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \rho \frac{\partial A}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \left( \frac{1}{\rho} - k^2 \right) A = -\mu\mu_0 j_{\text{ст}} \quad (3)$$

Уравнение (3) решается, например, методом интегрального преобразования Фурье-Бесселя с ядром в виде функции Бесселя первого рода первого порядка [7].

Нами были проведены расчеты напряжений, вносимых в измерительную обмотку ВТП, для малых  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $h$ ,  $x$ , несущественности магнитных потерь и определяющем влиянии гистерезисных потерь с  $\operatorname{tg} \delta$  в магнитопроводе датчика.

Расчеты проводились при следующих параметрах датчика:  $\mu_{\text{тах}} = 5 \times 10^2$  Гн/м,  $\sigma = 22,5 \times 10^6$  См/м,  $f = 3 \times 10^3$  Гц, сила тока в обмотке датчика  $J_{\text{то}} = 30$  мА, число витков измерительной обмотки  $W_1 = 20$ , число витков токовой обмотки  $W_2 = 400$ , средний радиус измерительной обмотки  $R_1 = 0,5 \cdot 10^{-4}$  м, средний радиус токовой обмотки  $R_2 = 1,3 \cdot 10^{-4}$  м, расстояние от датчика до поверхности  $h_1 = 0 \div 0,2 \times 10^{-3}$  м, расстояние от эквивалентного витка, заменяющего возбуждающую обмотку трансформаторного датчика отраженного поля, до объекта  $h_2 = 0 \div 0,2 \times 10^{-3}$  м, их результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчетов напряжения, вносимого в измерительную обмотку ВТП

|                                                 |        |        |        |        |
|-------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| $h_1$ , м                                       | 0,0001 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0001 |
| $h_2$ , м                                       | 0,0002 | 0,0002 | 0,0001 | 0,0001 |
| $\beta_0$                                       | 0,2993 | 0,4088 | 0,4088 | 0,2993 |
| $\xi = \frac{h_1 + h_2}{D_s}$                   | 0,73   | 0,71   | 0,54   | 0,48   |
| $\operatorname{Re} \phi_1(\lambda) \times 10^4$ | 100    | 160    | 160    | 100    |
| $\operatorname{Im} \phi_1(\lambda) \times 10^4$ | 2      | 6      | 2      | 2      |
| $U_0$ , В                                       | 0,536  | 11,08  | 6,57   | 11,08  |
| $\operatorname{Re}(U_{\text{вн}}) \times 10^2$  | 1,25   | 2,12   | 0,353  | 2,68   |
| $\operatorname{Im}(U_{\text{вн}}) \times 10^4$  | 2,5    | 0,794  | 1,35   | 2,68   |

Анализ проведенных расчетов и зависимостей импеданса от действительной части вносимого напряжения в измерительную обмотку ВТП для случая неферромагнитного материала показали, что с заданными параметрами датчика можно уверенно фиксировать измерительные сигналы, используя маломощные тракты звуковых адаптеров большинства современных ПК. Соответствующий годограф для низких значений обобщенного параметра нелинейно зависит от параметров нависания ВТП над объектом и может быть использован (после аппроксимации) в качестве приборной функции в ВИП, использующих указанные датчики.

## ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ АППАРАТНОЙ ЧАСТИ ВИРТУАЛИЗИРОВАННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ В МЕТОДЕ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

### Конструкции первичных измерительных преобразователей

Для реализации аппаратной части ВИП МВТ нами было разработано два типа первичных ВТП, с характеристиками, позволяющими непосредственно подключать их к аналоговому входу/выходу звукового адаптера ПК: первый тип датчика выполнен по схеме дифференциального ВТП с тремя катушками, одна из которых является калибровочной, а другие – возбуждающей и измерительной (рисунок 1); второй тип датчика, представляет собой дифференциальный вихретоковый преобразователь, работающий в режиме самосравнения или внутреннего эталона (рисунок 2).

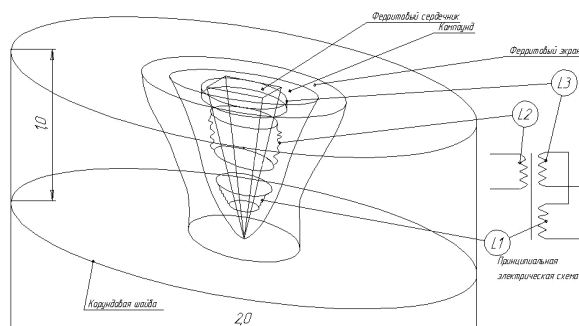


Рисунок 1 - Схема конструкции СМВТП для прямых измерений

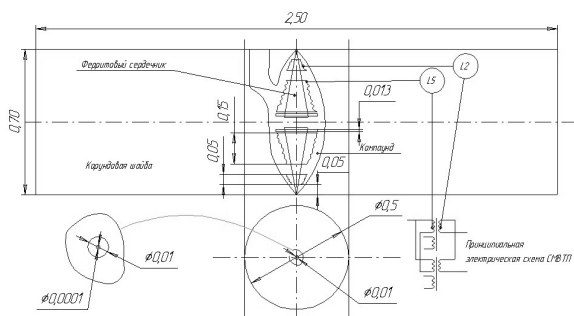


Рисунок 2 - Эскизный чертеж СМВТП для измерений в режиме самосравнения

Учитывая особенности конструкции и малый размер разработанных датчиков, они могут быть отнесены к сверхминиатюрным вихретоковым преобразователям (СМВТП) накладного типа. Первый тип конструкции СМВТП позволяет проводить прямые измерения различных характеристик материалов, связанных с напряжением, вносимым в измерительную обмотку ВТП, с относительной погрешностью до 5 %, требует использования дополнительной защиты от возможных наводок посторонними переменными магнитными полями, но в нем может быть осуществлен режим абсолютной калибровки. Он может с

успехом применяться для вихретоковой толщинометрии в составе разработанного нами прибора ВВТ-2М.

Вторая конструкция СМВТП обеспечивает его работу в режиме самосравнения, однако конструктивно датчик изготовлен по принципу сравнения со стандартным образцом, т.е. рабочий и образцовый ВТП не связаны индуктивно и имеют независимые измерительные и возбуждающие обмотки. Такая конструкция СМВТП обеспечивает измерение характеристик материалов с относительной погрешностью уже до 0,1-0,5 %, защищает рабочий ВТП от внешних наводок и позволяет использовать его для комплектования измерителя электропроводности неферромагнитных материалов ИЭНМ-20М.

Дифференциальное включение катушек и фокусировка возбуждающего поля сердечником позволяет датчикам обоих типов проводить высокочувствительные локальные исследования проводящих материалов на площади 50 – 80 мкм<sup>2</sup>.

В качестве материала сердечников СМВТП использовался среднечастотный малодиссипативный феррит, выбранный из ферритов марки 2000 НМ3 по величине максимальной начальной магнитной проницаемости. Была разработана и технология изготовления сигнальных и генераторных катушек с использованием оригинальной оснастки для микроминиатюрных намоточных работ. Катушки СМВТП пропитаны эпоксидным компаундом и обеспечивают устойчивую работу датчиков при температурах до 200 оС, а сами датчики с системой их распайки помещаются в пластмассовый корпус держателя.

### Аппаратная часть приборов

Для реализации виртуализированного измерительного прибора МВТ выбранный тип СМВТП подключается непосредственно к разъемам звукового адаптера ПК, а запуск специализированного ПО обеспечивает конфигурирование и работу соответствующего ПА-комплекса.

Таким образом, любой ПА-комплекс ВИП МВТ условно состоит из трех основных частей: вихретокового преобразователя (СМВТП); звуковой карты (используемой как АЦП/ЦАП) и специализированного ПО, объединенного с другими устройствами и программами в архитектуре персонального компьютера.

Дальнейшую работу аппаратной части ВИП рассмотрим на примере измерения электропроводности прибором ИЭНМ-20М.

### РАЗДЕЛ III. НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В случае взаимодействия СМВТП с объектом происходит изменение уровня и характеристик входного сигнала АЦП, как по отношению к нулевому сигналу, так и по отношению к сигналу на выходе ЦАП. Для расчета величины измеряемого параметра, например, электрической проводимости, необходимо установить соответствие между уровнем сигнала на приемной катушке и измеряемым параметром.

Одним из вариантов установления этого соответствия служит аппаратная кривая, для построения которой нами был использован набор контрольных образцов имеющих заранее известную электропроводность. Удельная электрическая проводимость использованных образцов была определена при помощи двойного моста Уитстона при температуре  $20 \pm 5^\circ \text{C}$  с погрешностью не более 1%.

Однако, при конструировании программно-аппаратных комплексов, существенной проблемой является совместимость ПО и нестандартизированных АЦП/ЦАП, которая связана с несовпадением характеристик аналоговых усилительных и преобразующих сигнал компонент.

Так, например, на рис. 3 представлена зависимость уровня напряжения на генераторной катушке СМВТП от условных единиц виртуального генератора для трех различных звуковых карт.

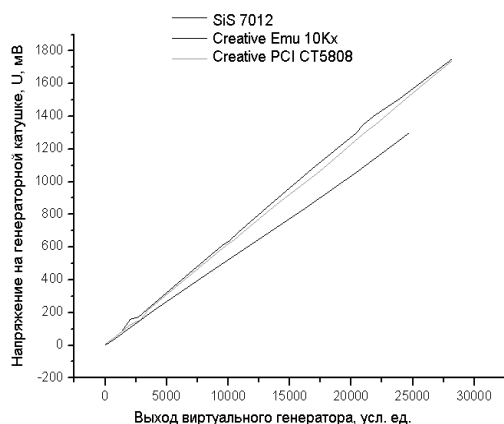


Рисунок 3 - Напряжение на генераторной катушке СМВТП в зависимости от сигнала генератора

Аналогичные различия обнаруживаются и для зависимости между условными единицами сигнала на выходе АЦП и уровнем напряжения на приемной катушке.

Для решения этой проблемы совместимости может быть использована некая эталонная, стандартная звуковая карта и зависимость между уровнем напряжения на при-

емной катушке и условными единицами сигнала на выходе ее АЦП, для которой определяется соответствующий коэффициент наклона  $k$  - чувствительность.

Затем проводится аппроксимация зависимости измеряемого параметра подходящей функцией, например, электропроводность неферромагнитных образцов от сигнала АЦП эталонной карты, которая в МВТ может аппроксимироваться полиномом третьей степени [8]:

$$\sigma = a(y - y_0)^3 + b(y - y_0)^2 + c(y - y_0) + d, \quad (4)$$

где  $\sigma$  - значение электропроводности объекта контроля, МСм/м;  $y$  - условные единицы сигнала на выходе АЦП звуковой карты;  $y_0$  - условные единицы шумового сигнала на выходе АЦП звуковой карты;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  - коэффициенты аппроксимации.

Тогда для остальных звуковых карт устанавливается соответствие между уровнем напряжения на приемной катушке СМВТП и условными единицами сигнала на выходе АЦП, которые затем приводятся к показаниям эталона по формуле:  $y_1 = (k_1/k_2)y_2$ , где  $y_1$  - приведенное значение условных единиц эталонной карты;  $y_2$  - количество условных единиц текущей карты;  $k_1$  - коэффициент наклона для эталонной карты;  $k_2$  - коэффициент наклона для текущей карты.

После чего, значение электрической проводимости, измеренное по уровню сигнала с любой произвольной звуковой карты, можно рассчитывать по формуле (5):

$$\sigma = (a(y - y_0)^3 + b(y - y_0)^2 + c(y - y_0) + d) \times \frac{k_1}{k_2} \quad (5).$$

В ходе предварительной калибровки прибора определяется вид функциональной зависимости между контролируемым параметром объекта и сигналом на входе эталонной АЦП, набор коэффициентов чувствительности для различных звуковых карт и эталонной АЦП/ЦАП, а также соответствующая аппаратная кривая, параметры которых заносятся в ПО, в блок обработки и управления.

#### Заключение

С использованием полученных результатов и реализуемой нами концепции виртуализированных измерительных приборов [1], нами был разработан программно аппаратный комплекс для измерения электропроводности неферромагнитных материалов - ИЭНМ-20М.

Тестирование программно-аппаратного комплекса на эталонных образцах показало, что абсолютное значение среднего взвешенного для основной погрешности измерения

## ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ И СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СИММЕТРИЧНЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ

электропроводности, полученное в серии 5 опытов, не превысило 0,8 МСм/м.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев, С.Ф. Научные исследования: информация, анализ, прогноз: монография. – Кн. 28. // С.Ф. Дмитриев, А.В. Ишков, Д.Н. Лященко, А.В. Новоженков. – Воронеж: ВГПУ, 2010. С. 580-592.
2. Ишков, А.В. Современная концепция сопряжения измерительных приборов с ЭВМ. // А.В. Ишков, С.Ф. Дмитриев. – Измерение, контроль, информатизация: Материалы восьмой междунар. научн.-техн. конф. –Барнаул: АлтГТУ, 2007. С. 3-6.
3. Дмитриев, С.Ф. Виртуализированные приборы, использующие метод вихревых токов, для контроля параметров различных объектов и окружающей среды./ С.Ф. Дмитриев, С.Г. Панов, А.В. Ишков. // - Ползуновский альманах. № 2. 2008. С. 15-20.
4. Герасимов, В.Г. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий./

- В.Г. Герасимов, В.В. Ключев, В.Е. Шатерников. – М.: Изд-во Энергоатомиздат, 1983.
5. Сагалаков, А.М. Контроль и измерение. /А.М. Сагалаков, С.Ф. Дмитриев, Д.Ю. Тарусин, А.В. Ишков // Вестник ТГУ. – Бюлл. опер. научн. инф. № 64, март, 2006. С. 25-29.
  6. Гинзбург, В.Л. Электродинамика / В.Л.Гинзбург. – М.: Наука. 2004.
  7. Vernon S.N. // Mater. Eval. 1988. V.46. №12. P.1581-1587.
  8. Неразрушающий контроль материалов и изделий. / Под ред. Г.С. Самойловича. – М.: Машиностроение, 1976.

*К.т.н., доцент Дмитриев С.Ф., тел. (3852) 24-76-18, e-mail: [dmitrlm@mail.ru](mailto:dmitrlm@mail.ru), ст. преп., аспирант Лященко Д.Н., тел. (3852) 62-83-80, e-mail: [LDN-ray@yandex.ru](mailto:LDN-ray@yandex.ru), к.х.н., д.т.н., профессор Ишков А.В., e-mail: [olg168@rambler.ru](mailto:olg168@rambler.ru), - Алтайский государственный аграрный университет; инженер, аспирант Новоженков А.В., тел (3852) 48-57-14, - Алтайский государственный университет. г. Барнаул.*

УДК 621.317.7:621.372

## ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ И СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СИММЕТРИЧНЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ

А.С. Дюбов

Приведено описание прибора для оценки количественных и статистических характеристик внутренних неоднородностей симметричных кабелей связи. Работа прибора основана на импульсном методе и статистической обработке сигнала обратного потока неоднородной линии во временной области

**Ключевые слова:** кабель, неоднородность, волновое сопротивление, коэффициент отражения, импульсный метод, рефлектометр

Все симметричные кабели сетей доступа и структурированных кабельных систем (СКС) в той или иной мере неоднородны. Вследствие технологических процессов при производстве, прокладке и монтаже кабеля в нем имеются отклонения от идеальной конструкции. Это приводит к тому, что электрические параметры двухпроводных цепей (ДЦ) кабеля изменяются по его длине. В частности изменяется их волновое сопротивление. Изменение волнового сопротивления называют неоднородностью. Различают внутренние, концевые и стыковые неоднородности. [1]

Внутренними называют неоднородности вызванные отклонениями в конструкции кабеля. Их величина зависит от качества использованных при производстве заготовок, постоянства электрических характеристик

А.С. ДЮБОВ

диэлектрика, диаметра и формы проводников, их взаимного расположения, точности наложения изоляции проводников, точности выполнения шага скрутки.

Стыковыми называют неоднородности, возникающие в местах соединений кабелей.

Неоднородности в начале и конце ДЦ, вызванные несогласованностью входных сопротивлений аппаратуры или нагрузки с волновым сопротивлением ДЦ, называют концевыми.

В данной работе внимание уделено оценке внутренних неоднородностей ДЦ симметричных кабелей.

Неоднородности приводят к отражению сигнала, распространяющегося по ДЦ. При наличии нескольких неоднородностей происходит многократное отражение и образуется