

# АППАРАТНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ВИРТУАЛИЗИРОВАННЫХ ПРИБОРОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

**С. Ф. Дмитриев, А. В. Ишков**

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова  
г. Барнаул

Представлены результаты расчетов и оптимизации конструкции первичного преобразователя - сверхминиатюрного вихретокового преобразователя (СМВТП), особенности его прямого подключения к входу/выходу стандартного звукового адаптера ЭВМ, особенности калибровки измерительного тракта и реализации аппаратной функции, а также типовой архитектуры виртуализированных приборов, реализующих один из методов неразрушающего контроля - метод вихревых токов, на примере оригинального измерителя электропроводности неферромагнитных материалов ИЭНМ-20М.

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 це-

пи первичного измерительного преобразователя - 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 ВП к ней добавляется еще и задача сопряжения специализированного программного обеспечения (ПО) ВП с произвольной звуковой картой ПК.

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВТП

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].

**АППАРАТНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ВИРТУАЛИЗИРОВАННЫХ ПРИБОРОВ  
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

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:

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

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

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

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:

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

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

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

Расчёты проводились при следующих параметрах датчика:  $\mu_{max} = 5 \times 10^2$  Гн/м,  $\sigma = 22,5 \times 10^6$  См/м,  $f = 3 \times 10^3$  Гц, сила тока в обмотке датчика  $J_{mo} = 30$  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 отражен-

ного поля, до объекта  $h_2 = 0 \div 0,2 \times 10^{-3}$  м, их результаты представлены в таблице 1.

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.

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

$h_1, \text{ м}$	0,0001	0,0002	0,0002	0,0001
$h_2, \text{ м}$	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001
$\beta_0$	0,2993	0,4088	0,4088	0,2993
$\xi = \frac{h_1 + h_2}{D_3}$	0,73	0,71	0,54	0,48
$\operatorname{Re}_{\varphi 1}(\lambda) \times 10^4$	100	160	160	100
$\operatorname{Im}_{\varphi 1}(\lambda) \times 10^4$	2	6	2	2
$U_0, \text{ В}$	0,536	11,08	6,57	11,08
$\operatorname{Re}(U_{en}) \times 10^2$	1,25	2,12	0,353	2,68
$\operatorname{Im}(U_{en}) \times 10^4$	2,5	0,794	1,35	2,68

### ОСОБЕННОСТИ АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ВИП

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 сравнения с внутренним эталоном (рисунок 2).

Первый тип конструкции СВМТП 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 посторон-

ними переменными магнитными полями, но в нем может быть осуществлен режим абсолютной калибровки.

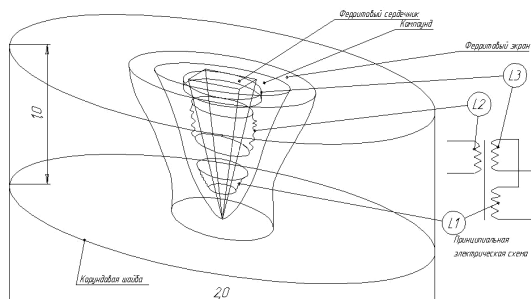


Рисунок 1 – Схема конструкции СМВТП для прямых измерений

Он может с успехом применяться для вихреговой 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.

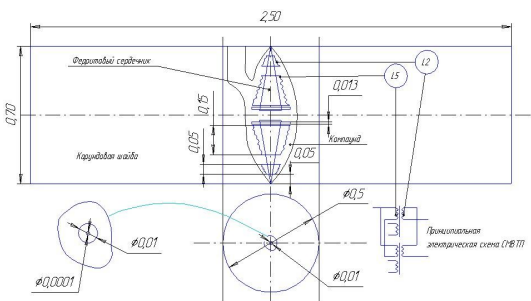


Рисунок 2 – Эскизный чертеж СМВТП для измерений в режиме самосравнения

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 ма-

лодиссипативный 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 °С, а сами датчики с системой их распайки помещаются в пластмассовый корпус держателя.

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 измерительный ПА-комплекс ВИП МВТ условно состоит из трех основных частей: вихрегового 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.

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±5°С 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.

**АППАРАТНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ВИРТУАЛИЗИРОВАННЫХ ПРИБОРОВ  
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

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

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

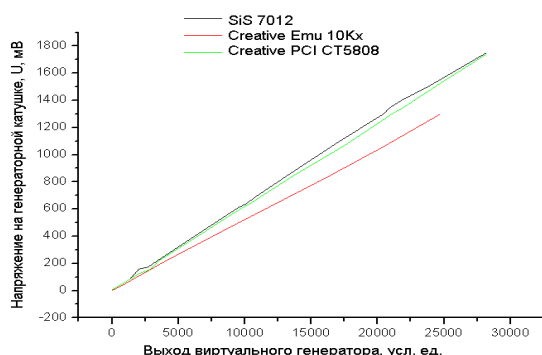


Рисунок 3 – Напряжение на генераторной катушке СВМТП в зависимости от сигнала генератора

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 СВМТП 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 еди-

ниц 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,
- соответствующая аппаратная кривая, параметры которых заносятся в ПО, в блок обработки и управления.

### РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОЙ ЧАСТИ ВИП

Схемы измерительных программно-аппаратных комплексов, подобных ВИП, уже сейчас реализуются, например, в среде разработки специализированного ПО LabView, либо приемами отдельной программной обработки data-файлов, содержащих измерительную информацию или параметры различных объектов стандартными средствами Windows [9]. Однако, необходимость постоянного обращения к оболочке среды разработки или ее библиотекам либо «ручного» копирования и обработки файлов с данными (при втором подходе) снижают скорость измерений, увеличивают систематическую и случайную погрешность измерений и сильно ограничивают возможности обработки измерительных сигналов встроенным в такие среды ПО. Кроме того, это лишь макеты (виртуальные приборы!), не способные самостоятельно запускаться на ПК при отсутствии на них предварительно установленной среды разработки, что существенно ограничивает их области применения, увеличивает стоимость и ставит в зависимость от лицензируемого программного обеспечения (ПО), их разработчиков.

Первый общий подход к разработке специализированного ПО для ВИП, заключается в использовании интерфейса низкого уровня. Низкий уровень позволяет приложениям получать доступ к буферам, содержащим воспроизводимые или записываемые звуковые данные, работать с внутренней структурой

файлов, содержащих звуковую информацию, а также использовать другие дополнительные возможности [10].

Для работы со звуковым адаптером в ОС Windows нет необходимости программировать на уровне портов ввода/вывода, прерываний и каналов прямого доступа. Весь необходимый интерфейс (высокого или низкого уровня) предоставляется приложению DLL-библиотекой `mmsystem.dll` [10, 11].

Для разработки специализированного ПО нами также используются два стандартных драйвера звукового устройства: драйвер для ввода звука (Waveform Input Driver) и драйвер для вывода звука (Waveform Output Driver). Эти драйверы поставляются вместе со звуковым адаптером, устанавливаются после установки ОС и позволяют Windows обмениваться со звуковыми устройствами wav-файлами, а при установке Codecs-ов и файлами других форматов. Таким образом, любое создаваемое под Windows ПО автоматически будет иметь полный контроль над процессом воспроизведения/записи, так как оно само должно подготовить блоки данных в оперативной памяти.

Второй общий подход к разработке специализированного ПО для ВИП, заключается в использовании микшерной подсистемы Windows для получения приложением возможности жесткого контроля параметров звукового устройства [10].

Стандартное микшерное приложение ОС Windows - `SndVol32` предоставляет собой унифицированный интерфейс пользователя с любым возможным микшерным устройством, при добавлении в систему нового устройства, имеющего драйвер микшера, оно также может управляться с помощью этого стандартного приложения.

Все необходимые константы, типы, структуры и прототипы функций микшерной подсистемы Windows определяются в файле `mmsystem.h`, который по умолчанию включается в компиляцию из общего файла `windows.h`, дополнительные константы определены в файле `mmreg.h`, а интерфейсные функции импортируются из библиотеки `winmm.lib` [10, 11].

С использованием описанных выше подходов управления звуковым адаптером, его настройками и связи со стандартными библиотеками ОС Windows, нами был разработан универсальный wave-модуль ПО для ВИП, использующих встроенный звуковой адаптер ПК как АЦП/ЦАП (рисунок 4).

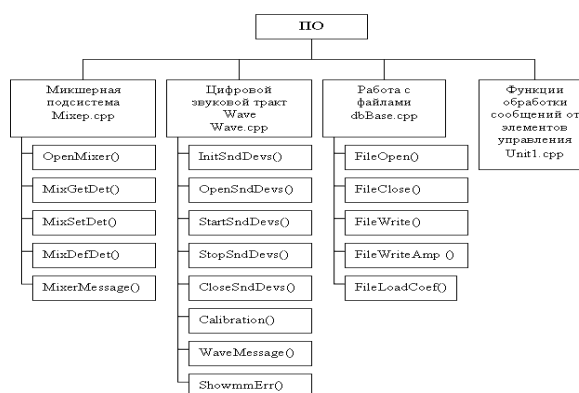


Рисунок 4 – Функциональная схема wave-блока универсального ПО для ВИП МВТ

Программное обеспечение для работы с wave-данными было разработано на языке высокого уровня C++ и протестировано на ОС MS Windows 95/98/2000/XP/Vista, имеет интерактивный оконный интерфейс, обеспечивает оцифровку измерительных сигналов звуковой частоты в режиме реального времени с последующей их передачей специализированному ПО ВИП.

Разработанный универсальный wave-модуль ПО можно условно разделить на четыре функциональных элемента: - управление микшерной подсистемой Windows (`Mixer.cpp`), - управление стандартным звуковым устройством Windows (`Wave.cpp`), - функции для работы с файлами (`dbBase.cpp`), - функции обработки сообщений элементов управления (`Unit1.cpp`).

Функции каждого из модулей ПО при работе могут, кроме того, вызывать встроенные функции среды разработки Borland C++ Builder v. 6.0, а так же API-функции [11].

Третий подход к реализации ПО ВИП основывается на модульном принципе его организации как ИП прямого действия, при последовательной обработке звуковых wave-данных в режиме реального времени. Тогда ВИП будет содержать следующие модули: - запуска программы; - запуска wave-блока; - инициализации и калибровки устройства; - запуска основного (измерительно-преобразовательного) цикла программы; и - блок завершения программы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев С.Ф., Ишков А.В., Лященко Д.Н., Новоженев А.В. // Научные исследования: информация, анализ, прогноз: монография. – Кн. 28. – Воронеж: ВГПУ, 2010. С. 580-592.
2. Ишков А.В., Дмитриев С.Ф. Современная концепция сопряжения измерительных приборов с

АППАРАТНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРВИЧНЫХ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ВИРТУАЛИЗИРОВАННЫХ ПРИБОРОВ  
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

- ЭВМ. // Измерение, контроль, информатизация: Материалы восьмой междунар. научн.-техн. конф. -Барнаул: АлтГТУ, 2007. С. 3-6.
3. Дмитриев С.Ф., Панов С.Г., Ишков А.В. // Ползуновский альманах. № 2. 2008. С. 15-20.
4. Герасимов В.Г., Ключев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. - М.: Изд-во Энергоатомиздат, 1983.
5. Сагалаков А.М., Дмитриев С.Ф., Тарусин Д.Ю., Ишков А.В. // Вестник ТГУ. - Бюлл. опер. научн. инф. № 64, март, 2006. С. 25-29.
6. Гинзбург В.Л. Электродинамика - 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.
9. Жарков Ф.П., Каратаев В.В., Никофоров В.Ф., и др. Использование виртуальных инструментов LabView. -М.: Радио и связь, 1999.
10. Гордеев О. Программирование звука в Windows. -М.: BHV, 2007.
11. Страуструп Б. Язык программирования C++. - СПб.: Невский Диалект, 1999.