

УДК 620.179.16

В. В. Муравьев, доктор технических наук, профессор*В. А. Стрижак*, кандидат технических наук, доцент*Р. Р. Хасанов*

ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ТЕНЗОМЕТРИИ И СТРУКТУРОСКОПИИ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ¹

В статье показаны особенности влияния конфигурации оборудования на производительность системы при разных параметрах эксперимента. Выявлены факторы, определяющие выбор конфигурации оборудования в зависимости от требований объекта контроля и величины накладных расчетных расходов. Произведен анализ бюджета затрат при работе аппаратно-программного комплекса для акустической тензометрии и структуроскопии металлоизделий.

Ключевые слова: программное обеспечение, аппаратный комплекс, регистрация ультразвуковых сигналов.

Введение

Методы неразрушающего контроля и структуроскопии получили дополнительный импульс развития с появлением универсальных доступных, высокопроизводительных компьютеров и средств регистрации в виде готовых плат АЦП. Аппаратно-программные комплексы на базе универсальных решений обладают хорошей масштабируемостью и широкой функциональностью. Для ряда задач неразрушающего контроля и структуроскопии, основанных на точном измерении временных интервалов, построение аппаратно-программного комплекса стало возможным лишь с появлением бесконтактных электромагнитно-акустических (ЭМА) преобразователей с возможностью возбуждения и приема нескольких частот упругих колебаний и любых типов волн, в том числе поперечных с горизонтальной поляризацией, которые практически невозможно возбудить и принять контактным способом. Задача акустической тензометрии для линейных напряжений [1–3] решается по результатам регистрации разности времени прихода двух ортогонально плоскополяризованных сигналов. Результатом измерений является рассчитываемый уровень остаточных напряжений в объекте контроля σ по формуле:

$$\sigma = D \left(\frac{t_1 t_{02}}{t_2 t_{01}} - 1 \right),$$

где D – акустоупругий коэффициент исследуемого материала; t_1 и t_2 – значения временных задержек сдвиговых волн, двух ортогонально плоскополяризованных сигналов; t_{01} и t_{02} – соответствующие временные задержки при отсутствии остаточных напряжений (свидетельствуют об анизотропии материала).

Аппаратно-программный комплекс

Для целей акустической тензометрии и структуроскопии массивных металлических объектов разработан аппаратно-программный комплекс [4, 5], в котором измерения производятся по результатам регистрации разности времени прихода двух ортогонально плоскополяризованных сигналов. Датчик излучения-приема сигналов состоит из системы намагничивания и двух взаимно перпендикулярных

проводников приемно-излучающей катушки возбуждения, расположенных в зазоре между системой намагничивания и объектом контроля (патент № 127931). Импульсный ток в приемно-излучающей катушке, в приложенном магнитном поле, под действием силы Лоренца возбуждает в объекте контроля акустическую волну. Акустический сигнал распространяется перпендикулярно поверхности вглубь объекта контроля. Отраженный от противоположной стороны объекта контроля сигнал принимается приемно-излучающей катушкой и поступает в систему регистрации комплекса.

Особенностью датчика является использование системы намагничивания на основе Ш-образного магнитопровода с катушкой, работающего в режиме циклического намагничивания (1 такт рабочий, 3 такта холостых) [6]. Циклический режим работы позволил увеличить напряженность магнитного поля в зазоре и уменьшить массогабаритные параметры датчика (патент № 134658). Приемно-излучающий преобразователь реализует электромагнитно-акустический (ЭМА) принцип действия, который имеет существенные достоинства:

- возможность контроля через воздушный зазор без применения контактных жидкостей (в том числе в условиях высоких температур);
- отсутствие износа ЭМА-преобразователей;
- независимость получаемых результатов от перекосов преобразователей относительно поверхности объекта контроля и от наличия на поверхности изделия мешающих факторов (ржавчины, окалины, краски, загрязнений);
- возможность возбуждения и приема нескольких частот упругих колебаний любых типов волн, в том числе поперечных с горизонтальной поляризацией, которые практически невозможно возбудить и принять контактным способом.

Главным же недостатком ЭМА-преобразователя является низкий коэффициент преобразования, определяемый как отношение амплитуды электрического эхоимпульса к амплитуде зарегистрированного акустического импульса.

В задачах тензометрии, структуроскопии и толщинометрии, требующих точного измерения времени

распространения упругих волн в объекте контроля (отклонение скорости не более 1 %), использование ЭМА-преобразователей выдвигает ряд дополнительных требований к информационно-измерительной системе аппаратно-программного комплекса. В то же время система обязана обладать высокой точностью определения времени пробега импульсов (при широкой полосе частот приемного тракта) в условиях случайных электромагнитных помех и малых амплитуд регистрируемых сигналов.

- Генерация ударных импульсов с длительностью не более 500 нс для возбуждения ЭМА-преобразователя на частотах $f = 1 \div 5$ МГц.

- Усиление по напряжению сигнала с ЭМА-преобразователя на 60–80 дБ в широкой полосе частот (не менее $3f$ по уровню –6 дБ).

- Высокоскоростная регистрация сигналов.

- Общая синхронизация системы с частотой питающей сети с целью исключения влияния сетевых (промышленных) помех.

- Подавление случайных промышленных помех методом усреднения по множеству реализаций.

- Программная обработка зарегистрированного сигнала с возможностью фильтрации, сохранения, загрузки из архива, совмещения двух сигналов при анализе на одной временной оси.

Структурная схема аппаратно-программного комплекса приведена на рис. 1. В качестве центрального узла аппаратно-программного комплекса применен типовой компьютер под управлением операционной системы Microsoft Windows. Все оригинальные узлы собраны в блоке УКП (усилитель, коммутатор, генератор, интерфейс управления, блок питания), внешний вид передней и задней панели которого изображены на рис. 2.

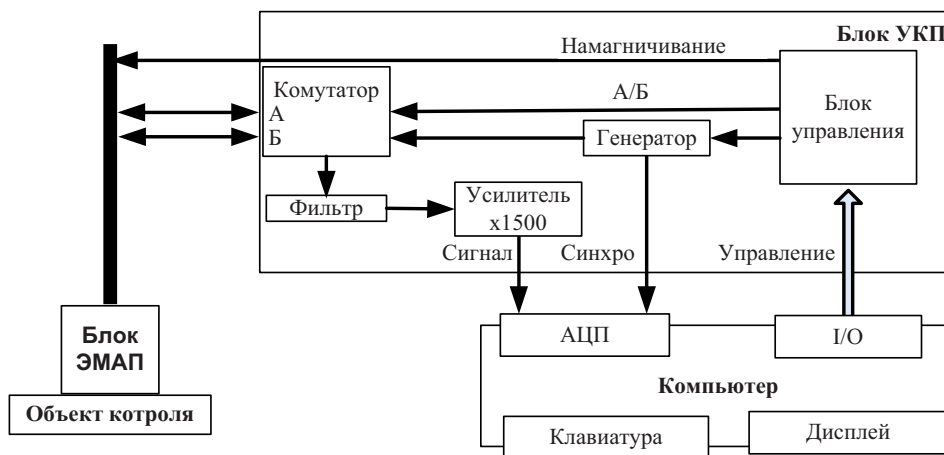


Рис. 1. Структурная схема аппаратно-программного комплекса



а



б

Рис. 2. Внешний вид передней (а) и задней панели (б) блока УКП: 1 – индикаторы включения питания и намагничивающего поля; 2 – кнопка ручного (внешнего) запуска на измерение; 3 – разъем датчика «Поле намагничивания»; 4, 5 – разъемы подключения приемно-излучающих катушек датчика; 6 – аналоговый выход сигнала на АЦП; 7 – цифровой разъем управления; 8 – выход импульса синхронизации; 9 – разъем и кнопка питания

Блок ЭМА-преобразователь подключен непосредственно к блоку УКП. Плата АЦП фирмы «Rudshel» подключена по системной шине PCI (USB) компьютера и работает в режиме Bus-Master. Регистрация данных производится с разрешением по амплитуде 8 бит во внутренний буфер объемом 2 МБ. Диапазоны шкал входного напряжения (± 5 В; $\pm 2,5$ В; ± 1 В; $\pm 0,5$ В) совместно с каналом усиления блока УКП позволяют регистрировать сигналы в нескольких динамических диапазонах. В качестве цифрового узла управления используется преобразователь Com=I/O [7].

Толщина объекта контроля до 200 мм и более совместно с возможностью использования нескольких отражений акустического сигнала при регистрации определяет значительный объем регистрируемых данных. В частности, при регистрации 20 отражений на объекте контроля толщиной 0,15 м при скорости ультразвуковой волны 3200 м/с измеряемое время составляет 1,875 мс, при этом объем зарегистрированных данных при частоте дискретизации 250 МГц составит 469 тыс. отсчетов для каждого канала регистрации. На данной частоте дискретизации современные устройства регистрации обеспечивают разрешение по амплитуде в 8 бит. Обработка полученных данных в формате с плавающей запятой (Real types Extended) требует резервирования 10 МБ данных на одно измерение без учета промежуточных и пересчетных массивов.

Программное обеспечение информационно-измерительной системы аппаратно-программного комплекса синхронизирует процесс регистрации с работой генератора зондирующих импульсов и производит первичную обработку зарегистрированных сигналов. Пользователь через оконный интерфейс программы управляет коэффициентами усиления платы АЦП и конфигурирует систему регистрации в соответствии с задачами эксперимента. Программное обеспечение под названием «Принц VII» имеет свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015662211.

В условиях низкого коэффициента преобразования ЭМА-преобразователя при широкой полосе пропускания усилителя (0,6...6 МГц по уровню – 6 дБ) в регистрируемом сигнале присутствует широкий спектр разнообразных электрических шумов и помех. С целью отстройки от влияния шумов и повышения разрешающей способности во временной области используются цифровая фильтрация и усреднение многократно зарегистрированного сигнала (от 1 до 32 шагов). Использование усреднения позволяет снизить уровень шумов в 4 раза.

Алгоритм работы программного обеспечения, обеспечивающего управление информационно-измерительной системой, состоит из следующих шагов:

1. На компьютере устанавливается канал регистрации А/Б.
2. Включается поле намагничивания, и фиксируется пауза на время перехода магнитной цепи в устойчивое состояние.
3. Выдается разрешение на запуск генератора зондирующего импульса. Генератор зондирующего импульса срабатывает при приходе импульса с бло-

ка питания синхронно с частотой питающей сети – 50 Гц.

4. Плата АЦП ожидает синхроимпульс с генератора, при появлении которого производится регистрация сигнала с учетом установленной шкалы входного напряжения и заданного временного интервала регистрации.

5. Если задана многократная регистрация данных, то п. 3, 4 повторяются заданное количество раз. При многократной регистрации данных результаты усредняются.

6. Выключается поле намагничивания.

7. Данные фильтруются, отображаются на экране ЭВМ и при необходимости записываются в файл.

Программное обеспечение стенда разработано на языке программирования Delphi. Окно программы (рис. 3) состоит из меню, рабочего окна с набором групп управляющих элементов («Режим работы», «Вид», «Запуск») и строки состояния. Действие программы аналогично работе электронного осциллографа. Программа позволяет управлять параметрами канала регистрации, синхронизироваться во времени с входящими сигналами, производить первичную обработку сигналов (фильтрацию, усреднение, удаление постоянной составляющей и т. д.).

Программное обеспечение предоставляет пользователю возможность подробно рассмотреть любой участок сигнала, измерить амплитуду и время для выбранной точки, измерить разницу амплитуд и расстояние по временной оси для двух выбранных точек, рассчитать коэффициент ослабления по двум выбранным точкам, рассчитать коэффициент корреляции, управлять параметрами регистрации и навигации по файлам.

Рост разрешающей способности по времени при использовании дальних отражений иллюстрируют элементы эхограммы, совмещенные на одной временной оси и развернутые в районе 2-го (рис. 4, а) и 10-го донных отражений (рис. 4, б). По мере увеличения номера донного отражения возрастает разница во времени прихода фронта импульса ($t_2 = 0,03$ мкс [0,2 мм], $t_{10} = 0,16$ мкс [1,0 мм]). Использование поздних импульсов для определения временной разницы между ними кратно увеличивает разрешающую способность по временной оси.

К сожалению, простые методы определения разности прихода импульсов (по переходу через ноль, разности положений максимумов и т. д.) не являются достаточно надежными ввиду искажения импульсов в процессе их распространения и отражения. Повышение повторяемости определения временного интервала удалось достичь за счет использования функции корреляции. Достигнутая точность соответствует разрешающей способности устройства регистрации по временной оси (250 МГц для АЦП – RudShel ЛА-н4USB). Для увеличения разрешающей способности системы во временной области используется метод линейной интерполяции, при котором промежутки между измеренными соседними отсчетами заполняются промежуточными значениями, имитирующими кратную, более высокую частоту регистрации (до 2000 МГц).

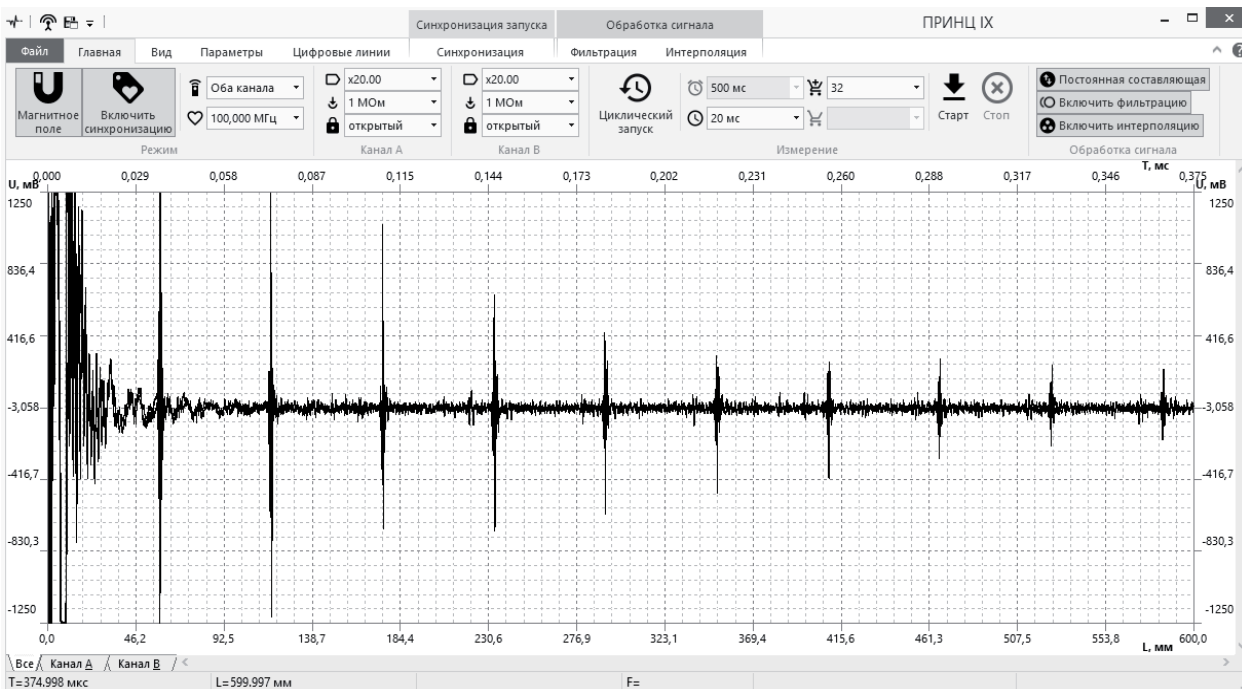


Рис. 3. Интерфейс программы регистрации с многократно отраженными донными сигналами

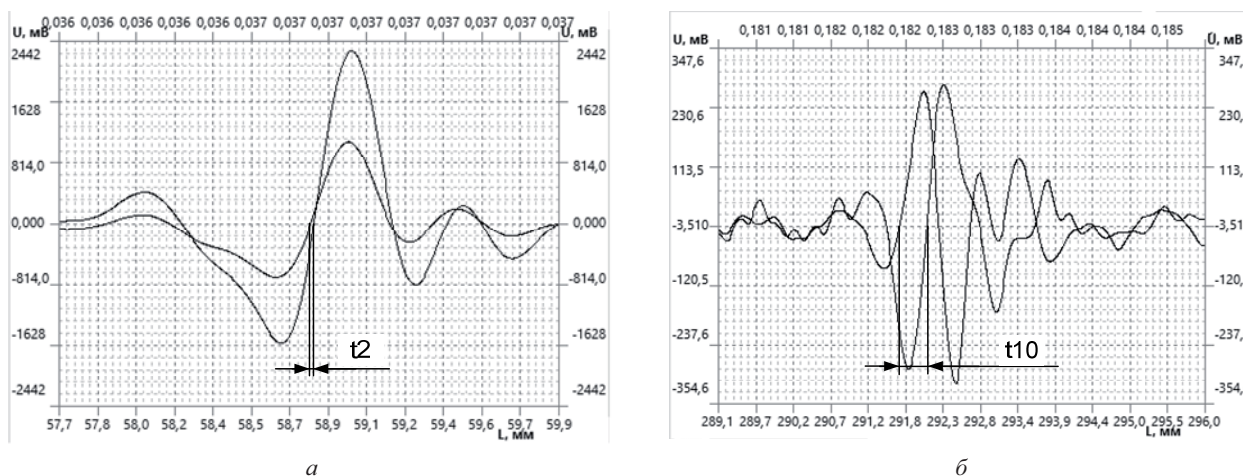


Рис. 4. Осциллограммы сигнала, развернутые в районе 2-го донного отражения (а) и 10-го донного отражения (б)

Необходимость использования расчетных элементов (фильтрация, интерполяция, корреляция и т. д.) существенно нагружает процессор аппаратного комплекса. Для учета влияния параметров эксперимента на требования к компьютерной системе ап-

паратно-программный комплекс опробован в различных конфигурациях компьютера. Результаты представлены в таблице. Время вывода информации на экран не учитывается.

Конфигурация компьютеров и результаты измерения

Параметры компьютера	№ 1. Мобильный, панельный			№ 2. Стационарный, бюджетный			№ 3. Стационарный, профессиональный		
Операционная система	Win 8 – 32			Win 7 – 32			Win 7 – 64		
Тип процессора	Intel Atom D2500			Intel P G2120 3.1GHz			Intel I-5 3470 3.2GHz		
Тип АЦП	RudShel ЛА-н10М8-100			RudShel ЛА-н4USB			RudShel ЛА-н 10М8-100		
Частота дискретизации АЦП (Интерполяции)	100 МГц (500 МГц)			125 МГц (500 МГц)			100 МГц (500 МГц)		
Глубина прозвучивания, мм	500	1000	2000	500	1000	2000	500	1000	2000
Время регистрации, с	0,968	0,975	0,976	1,46	1,60	1,85	0,905	0,909	0,910
Время расчета, с	1,970	3,745	7,905	0,22	0,41	0,77	0,168	0,317	0,621

Эксперимент проводился с использованием стандартного образца СО-2 по высоте 59 мм, используемого для настройки чувствительности ультразвуковых дефектоскопов и преобразователей к ним. В настройках программы задана глубина прозвучивания образца в 500, 1000 и 2000 мм. В информационной системе аппаратно-программного комплекса присутствуют обязательные задержки, учтенные в строке «Время регистрации» – время установления намагничивающего поля (0,4 с) и время переключения каналов регистрации (0,4 с). Остальные настройки системы постоянны. Из таблицы видно существенное влияние типа интерфейса платы АЦП (PCI/USB) на длительность регистрации сигналов. Компьютер № 2 имеет плату АЦП с USB-интерфейсом и затрачивает в 1,5 раза больше времени, чем панельный компьютер № 1 с крайне слабым процессором. Глубина прозвучивания при наличии быстрого интерфейса передачи данных от АЦП в компьютер не оказывает существенного влияния на время регистрации сигнала. Производительность процессора оказывает существенное влияние на время расчетов: время компьютера № 1 и компьютеров № 2, 3 отличается на порядок. Программа не имеет оптимизации к количеству ядер процессора. В связи с совпадением частоты работы процессоров компьютеров № 2 и 3 время расчетов на них практически совпало.

По результатам измерений, в зависимости от требований конечного потребителя, на базе аппаратно-программного комплекса возможна разработка приборов с разной производительностью, решающих не только задачу регистрации и отображения сигнала, но и позволяющих адаптироваться к условиям проведения измерений с выбором анализируемого участка и автоматического расчета разности времен приходящих импульсов, по которым рассчитываются остаточные напряжения в конструкциях.

Выводы

Разработанный для целей акустической тензометрии и структуроскопии массивных металлических объектов аппаратно-программный комплекс позволяет реализовать эхоимпульсный поляризационно-временной метод измерения скорости распространения

двух поперечных волн взаимно-перпендикулярных поляризаций с инструментальной погрешностью измерений временных интервалов менее 0,5 нс.

Разработанный аппаратно-программный комплекс обеспечивает возможность эффективного возбуждения ЭМА-преобразователя зондирующим импульсом; широкополосного усиления ЭМА-сигналов при значительном коэффициенте усиления; цифровой регистрации по двум синхронным каналам. Программное обеспечение адаптировано к возможностям проведения измерений параметров регистрируемых сигналов (амплитуда и время для выбранной точки, расстояние по амплитудной и временной осям для двух выбранных точек, коэффициентов корреляции).

Библиографические ссылки

1. Акустическая тензометрия и структуроскопия железнодорожных колес : монография / В. В. Муравьев, О.В. Муравьева, В. А. Стрижак, Л. В. Волкова, Е. Н. Балобанов ; отв. ред. В. В. Муравьев. – Ижевск, 2014.
2. Контроль остаточных напряжений в ободьях цельнокатаных вагонных колес методом акустоупругости / В. В. Муравьев, В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Е. Н. Балобанов // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2014. – № 3 (39). – С. 42–45.
3. Муравьев В. В., Волкова Л. В. Оценка величины натяга бандажей локомотивных колес методом акустоупругости // Дефектоскопия. – 2013. – № 9. – С. 40–46.
4. Муравьев В. В., Стрижак В. А., Балобанов Е. Н. К расчету параметров системы намагничивания электромагнитно-акустического преобразователя // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1. – С. 197–205.
5. Информационно-измерительная система возбуждения, приема, регистрации и обработки сигналов электромагнитно-акустических преобразователей / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, С. А. Обухов, А. Б. Ефремов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1. – С. 243–250.
6. Муравьев В. В., Стрижак В. А., Балобанов Е. Н. К расчету параметров системы намагничивания электромагнитно-акустического преобразователя // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1. – С. 197–205.
7. Информационно-измерительная система возбуждения, приема, регистрации и обработки сигналов электромагнитно-акустических преобразователей / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, С. А. Обухов, А. Б. Ефремов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1. – С. 243–250.

V. V. Muraviev, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU
V. A. Strizhak, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU
R. R. Hassanov, Kalashnikov ISTU

Features of the software for the hardware-based system of acoustic tensometry and structural inspection of metal products

The paper presents the features of the influence of equipment configuration on the system productivity at different experiment parameters. Factors defining the choice of equipment configuration depending on requirements to the tested object and rated overhead costs are revealed. The expenses budget for the maintenance of hardware and software system of acoustic tensometry and structural inspection of metal products is analysed.

Keywords: software, hardware-based complex, ultrasonic signal recording.

Получено: 19.04.16