

ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 621.317

DOI: 10.20535/1810-0546.2016.2.66026

Г.А. Богдан, А.Г. Протасов

Национальный технический университет Украины “КПИ”, Киев, Украина

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКРЕТНОГО ОРТОГОНАЛЬНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

Background. The article is devoted to the problem of accuracy increasing for physical-mechanical characteristics definition of powdered materials at the stage of their manufacture using ultrasonic testing.

Objective. The realization of the phase method of time interval measurement in a system of ultrasonic testing of powdered materials in order to increase accuracy of definition their physical-mechanical characteristics is done.

Methods. It was proposed to use digital orthogonal method for definition of the phase shift between signals to reach the aim. Computing simulation in Matlab system for definition of the signals phase shift and estimation of its inaccuracy of measurements was carried out.

Results. As the result of this investigation it was defined the optimal parameters of the principal element of a measuring system for the phase shift – ADC which was the main source of errors and essentially influenced the measurement accuracy.

Conclusions. Experimental investigations on well known materials indicated effectiveness of application of the digital orthogonal method which allowed defining the velocity of ultrasound propagation in a solid medium with accuracy less than 1 %.

Keywords: phase shift; digital orthogonal method.

Введение

Одним из современных направлений развития порошковой металлургической промышленности является создание порошковых конструкционных материалов с заданными физико-механическими характеристиками (ФМХ) [1–3]. Внутренняя структура и свойства таких материалов напрямую зависят от комбинации выбранных технологических режимов при их изготовлении. Поэтому актуальной задачей является разработка оперативных систем контроля, которые позволяли бы производить оценку изменения ФМХ в объеме изделия на любой стадии изготовления с высокой точностью, а также оценивать эффективность выбранных технологических режимов [4, 5].

При построении таких систем используют различные методы контроля, однако предпочтение отдается тем, которые позволяют оценить большее количество ФМХ материалов и обладают простотой реализации [6]. На сегодня ультразвуковые методы контроля являются наиболее эффективными для решения поставленных задач. Они базируются на корреляционных или аналитических зависимостях между параметрами акустической волны и искомыми характеристиками диагностируемых материалов. Известно, что скорость распространения ультразвуковой волны непосредственно зависит от внутренней структуры материала, которая в

свою очередь является следствием выбранных технологических режимов его изготовления [6, 7]. Исходя из этого, к точности измерения скорости распространения ультразвука в порошковых конструкционных материалах (ПКМ) предъявляют высокие требования [7]. При реализации ультразвуковых методов контроля основной проблемой сегодня остается точность измерения величин, участвующих в определении скорости распространения ультразвуковой волны, а именно – геометрических размеров и времени [7]. Современные микрометрические инструменты позволяют производить измерения геометрических размеров с точностью до 0,01 мм. Отсюда, чтобы получить высокую точность измерения скорости прохождения ультразвуковой волны в изделии, например с погрешностью в 1 %, необходимо обеспечить погрешность измерения временного интервала менее 1 % [6]. Такую точность могут обеспечить фазовые методы измерения временного интервала. Таким образом, актуальной задачей является создание ультразвуковых систем контроля характеристик ПКМ, основанных на измерении скорости распространения механических колебаний в материале.

Постановка задачи

Целью данной статьи является рассмотрение ультразвуковой системы контроля порошковых материалов, позволяющей определять

ФМХ с высокой точностью. Для реализации данной цели предлагается исследовать возможность применения фазового метода измерения временного интервала, а именно дискретного ортогонального метода.

Использование дискретного ортогонального метода для измерения временного интервала

Измерение временного интервала при ультразвуковом контроле, как правило, сводится к определению фазового сдвига (ФС) между сигналами. Учитывая, что порошковые материалы в своей структуре неоднородны из-за наличия фазовых включений различных размеров и пористости, а это является источником шумов, то для определения фазового сдвига между зондирующим и отраженным сигналами предлагается использовать дискретный ортогональный метод. Данный метод позволяет создавать помехоустойчивые фазоизмерительные системы, работающие в широком спектральном диапазоне сигнал—шум и обеспечивающие минимальную погрешность измерения при воздействии флуктуационных помех [9]. Кроме того, упомянутый метод может быть использован при определении фазового сдвига радиоимпульсных сигналов.

В общем случае измерение ФС дискретным ортогональным методом сводится к поиску максимума корреляционного интеграла

$$a(\varphi) = \int_0^{T_c} s(t)s_0(t, \varphi)dt$$

путем разложения контролируемого сигнала $s(t)$ по двум ортогональным составляющим опорного сигнала $U \sin w_0 t$ и $U \cos w_0 t$:

$$\begin{aligned} \int_0^{T_c} s(t)U \cos(w_0 t + \varphi)dt &= \\ U \cos \varphi \int_0^{T_c} s(t) \cos w_0 t dt - \\ -U \sin \varphi \int_0^{T_c} s(t) \sin w_0 t dt &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Из уравнения (1) вычисляем фазу сигнала по формуле

$$\varphi = \arctg \frac{a_s}{a_c},$$

где

$$a_c = \int_0^{T_c} s(t)U \cos w_0 t dt; \quad a_s = \int_0^{T_c} s(t)U \sin w_0 t dt;$$

$$\varphi \in \left(-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right).$$

Ограничение использования дискретного ортогонального метода для определения ФС сигналов было связано со сложностью аппаратной реализации оптимальных алгоритмов, которые содержат большое количество арифметических операций, а также с возможностями существовавшей элементной базы электронной аппаратуры [9]. Современное развитие микроэлектроники позволяет сегодня решить некоторые задачи, что ранее было невозможно. Точность измерения ФС такими системами зависит от ряда факторов: точности определения интервала ортогональности, обеспечения кратности объема выборки периода сигнала, отсеивания грубых погрешностей, возникающих из-за зашумленности сигнала, частоты дискретизации и уровней квантования аналого-цифрового преобразователя (АЦП) [10].

Для оценки влияния данных параметров на погрешность измерения ФС было проведено компьютерное моделирование в системе Matlab.

Результаты компьютерного моделирования

В процессе компьютерного моделирования были выполнены следующие процедуры:

- 1) формирование зондирующего сигнала $u_1(t)$ с заданными параметрами;
- 2) формирование измеряемого сигнала $u_2(t)$, смещенного относительно зондирующего на угол φ ;
- 3) формирование выборки синусной и косинусной составляющих опорного сигнала, ортогональных зондирующему импульсу: $u_s[j]$, $u_c[j]$, $j \in \overline{1, M_{ад}}$;
- 4) формирование выборок зондирующего и измеренного сигналов $u_1[j]$ и $u_2[j]$, $j \in \overline{1, M}$;
- 5) задание разрядности и частоты дискретизации АЦП;
- 6) обеспечение кратности объема выборки периоду сигнала;
- 7) определение фазовых характеристик сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$;
- 8) определение разницы ФС сигналов;
- 9) оценка погрешности измерения ФС.

Моделирование проводилось для сигналов частотой 2,5 и 0,5 МГц. Частота дискретизации АЦП изменялась в пределах от 50 до 150 МГц, а его разрядность — от 8 до 16. Исследования проводились на одном периоде сигнала, количество выборок на период выбиралось кратным частоте дискретизации АЦП. Соотношение сигнал—помеха варьировалось от 1 до 10. Ре-

зультаты компьютерного моделирования для случая фазового сдвига $\varphi = 90^\circ$ представлены на рис. 1.

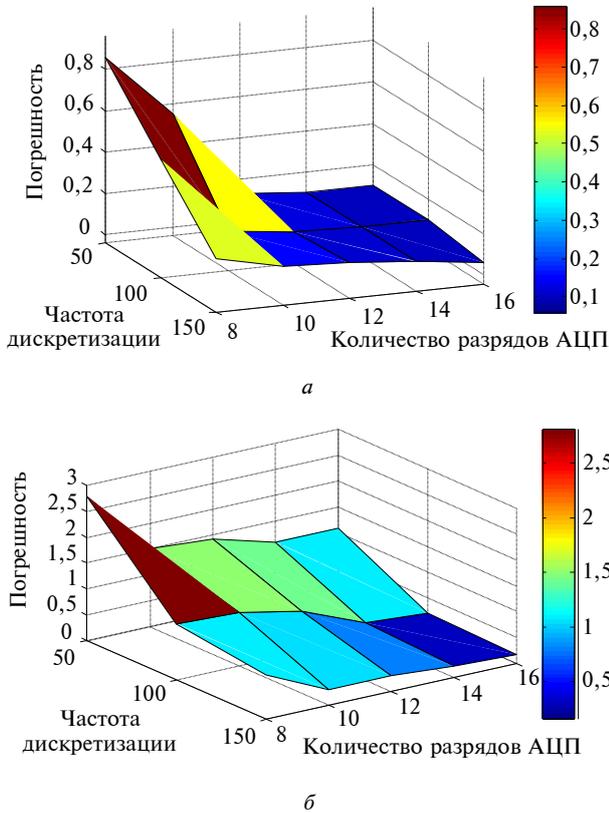


Рис. 1. Зависимость погрешности измерения ФС от параметров АЦП для $\varphi = 90^\circ$: а – $f = 0,5$ МГц, б – $f = 2,5$ МГц

Как видно из этого рисунка, при увеличении частоты дискретизации и разрядности АЦП погрешность измерения ФС уменьшается. Так, для 16-разрядного АЦП при частоте дискретизации 150 МГц погрешность составила 0,1 % для рабочей частоты сигнала 0,5 МГц. Для рабочей частоты сигнала 2,5 МГц эта погрешность увеличилась до 0,5 %. При работе на низких частотах использование 8-разрядного АЦП с частотой дискретизации 50 МГц позволяет осуществлять измерения ФС с погрешностью менее 1 %, в то время как при работе на частоте 2,5 МГц погрешность измерения составляет приблизительно 3 %.

Для выбора оптимальных параметров АЦП были также рассмотрены сигналы с ФС $\varphi = 10^\circ$ и $\varphi = 170^\circ$. Результаты этих исследований сведены в табл. 1 и 2.

Как видно из данных, приведенных в табл. 1 и 2, выбранный метод при работе на низких частотах позволяет производить измерение ФС с погрешностью менее 1 % даже при использовании 8-разрядного АЦП с частотой дискретизации 50 МГц. При работе на высоких частотах (которые используются при ультразвуковом контроле) для обеспечения инструментальной погрешности измерения необходимо выбирать как минимум 12-разрядное АЦП с частотой дискретизации 100 МГц.

Таблица 1. Значения абсолютной погрешности измерения (%) ФС для частоты сигнала 0,5 МГц

Количество разрядов АЦП	f_d АЦП, МГц								
	$\varphi = 10^\circ$			$\varphi = 90^\circ$			$\varphi = 170^\circ$		
	50	100	150	50	100	150	50	100	150
8	0,86	0,71	0,38	0,86	0,53	0,22	0,8	0,6	0,47
10	0,79	0,65	0,25	0,55	0,15	0,15	0,54	0,31	0,22
12	0,66	0,52	0,19	0,13	0,11	0,13	0,5	0,28	0,18
14	0,55	0,48	0,06	0,1	0,1	0,1	0,47	0,27	0,15
16	0,55	0,48	0,05	0,1	0,1	0,06	0,42	0,25	0,12

Таблица 2. Значения абсолютной погрешности измерения (%) ФС для частоты сигнала 2,5 МГц

Количество разрядов АЦП	f_d АЦП, МГц								
	$\varphi = 10^\circ$			$\varphi = 90^\circ$			$\varphi = 170^\circ$		
	50	100	150	50	100	150	50	100	150
8	2,45	1,98	0,99	2,81	1,09	0,86	2	1,22	0,99
10	1,67	1,57	0,73	1,5	1,04	0,31	1,66	0,91	0,47
12	1,04	1,02	0,54	1,41	0,79	0,3	1,07	0,37	0,22
14	1,04	0,62	0,35	1,09	0,3	0,21	1,05	0,32	0,12
16	0,89	0,6	0,2	1,08	0,2	0,16	0,26	0,33	0,11

Схемная реализация предложенного метода

Для реализации поставленной задачи, с учетом результатов компьютерного моделирования, предлагается система измерения ФС сигнала, которая реализует дискретный ортогональный метод. На рис. 2 представлена структурная схема предложенной системы.

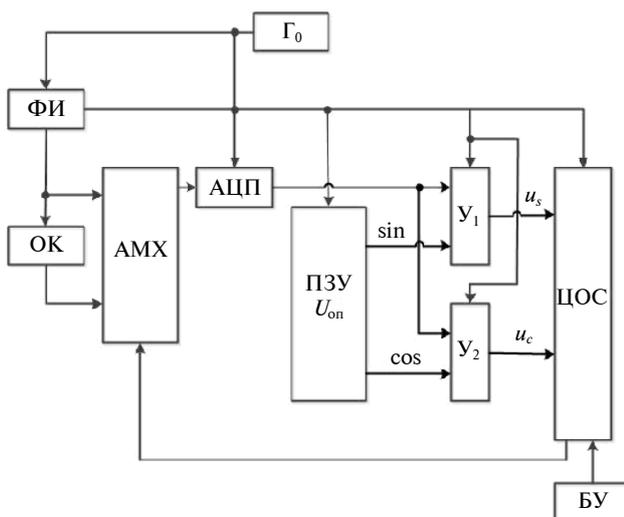


Рис. 2. Структурная схема измерителя фазового сдвига: ФИ – формирователь радиоимпульсов; АМХ – аналоговый мультиплексор АЦП; ОК – объект контроля; Γ_0 – высокостабильный генератор сигналов частоты дискретизации; ПЗУ – постоянное запоминающее устройство; Y_1, Y_2 – умножители цифровых сигналов; ЦОС – блок цифровой обработки сигналов; БУ – блок управления

Система работает следующим образом. По сигналу с генератора частоты дискретизации АЦП формируется излучаемый радиосигнал, который имеет вид

$$u_1(t) = U_1 \cos(2\pi ft + \varphi_1). \quad (2)$$

После прохождения объекта контроля он приобретает вид

$$u_2(t) = U_2 \cos(2\pi ft + \varphi_2), \quad (3)$$

где U_1, U_2 – амплитуды сигналов; f – частота (период $T = f^{-1}$), $f \in [f_n, f_b]$; f_n, f_b – границы частотного диапазона; t – время наблюдения; φ_1, φ_2 – начальные ФС, $\varphi_1, \varphi_2 \in [0, 2\pi]$.

Сигналы, которые выражены формулами (2) и (3) по очереди, через блок АМХ поступают на АЦП, который формирует выборки следующих сигналов:

$$u_1[j] = \{u_1(jT_d), j \in \overline{1, M}\},$$

$$u_2[j] = \{u_2(jT_d), j \in \overline{1, M}\},$$

где $M = T_c F_d$ – объем выборки, зависящий от разрядности АЦП; F_d – частота дискретизации сигнала.

Коды сигнала с АЦП синхронно с синусной и косинусной составляющими опорного сигнала (предварительно записанными в ПЗУ)

$$u_s[j] = \sin(jT_d), u_c[j] = \cos(jT_d), j \in \overline{1, M_{ад}},$$

поступают на умножители цифровых сигналов. В блоке цифровой обработки сигналов осуществляется вычисление фаз сигналов, а время прохождения сигнала в объекте вычисляют по формуле

$$\tau_\varphi = \frac{\Delta\varphi}{\omega_0}, \quad (4)$$

где $\Delta\varphi$ – ФС между сигналами; ω_0 – частота опорного сигнала.

Синхронизация работы АЦП, формирователя радиоимпульсных сигналов и формирователя опорных ортогональных сигналов от одного генератора сигналов дискретизации АЦП позволила обеспечить кратность объема выборки периоду сигнала и ортогональность сигналов.

Погрешность системы измерения ФС определяется разрядностью и частотой дискретизации АЦП и уменьшается с повышением данных параметров.

Обсуждение результатов экспериментального исследования

Задачей проведенного экспериментального исследования было определить точность измерения скорости распространения ультразвуковой волны в контрольном образце при использовании дискретного ортогонального метода определения фазового сдвига с 12-разрядным АЦП с частотой дискретизации 100 МГц. Для проверки эффективности предложенного метода контроля в качестве объекта исследования были выбраны образцы материалов с известными характеристиками (скоростью распространения ультразвука).

Образцы были выполнены из органического стекла и стали марки 40 в форме прямоугольного параллелепипеда длиной $a = 10$ мм, высотой $h = 5$ мм. Контроль проводился по

длине образца на перпендикулярных гранях по трем точкам в каждом направлении (рис. 3).

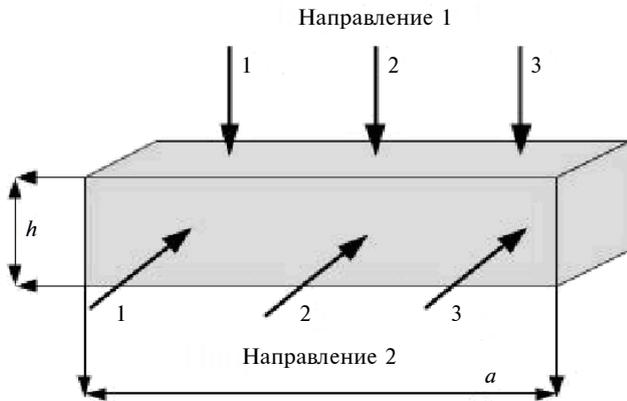


Рис. 3. Схема контроля образца

Частота ультразвукового зондирующего сигнала составляла 2,5 МГц. Скорость распространения ультразвуковой волны в образце при использовании метода прохождения определялась по формуле

$$C = \frac{h}{t - t_0},$$

где h – толщина изделия в точке измерения (определялась с помощью микрометра); t – время прохождения ультразвукового импульса вдоль базы измерения (рассчитывалось по формуле (4) с использованием измеренного ФС); t_0 – систематическая временная поправка.

В каждой точке контроля измерение проводилось 20 раз с последующим усреднением полученных результатов. На рис. 4 представлены результаты проведенных эксперименталь-

ных исследований. Для органического стекла среднеквадратичное отклонение (СКО) скорости ультразвука составило 25 м/с, а максимальная погрешность измерения $\delta_{\max} = 0,8 \%$. Для стали СКО = 32 м/с, $\delta_{\max} = 0,7 \%$.

Как видно из представленных данных, предложенный метод позволяет обеспечить погрешность измерения менее 1 %.

Данный метод был использован для измерения скорости распространения ультразвуковой волны в высокопрочных порошковых материалах на основе вольфрама с добавлением кобальта WC-20Co и WC-40Co. Измерения производились по двум направлениям в трех точках, усредненные значения скорости для упомянутых материалов составили $C = 6140$ м/с и $C = 5664$ м/с соответственно.

Выводы

Создание порошковых конструкционных материалов с предварительно заданными физико-механическими характеристиками является сегодня приоритетным направлением развития порошковой металлургии. Актуальной задачей в этой области становится создание систем контроля, которые позволяли бы оценивать характеристики материалов в процессе изготовления. Одним из наиболее применяемых методов контроля является ультразвуковой метод, основанный на корреляционных или аналитических зависимостях между скоростью распространения ультразвуковой волны и искомыми характеристиками материалов. При реализации упомянутых методов контроля основной проблемой сегодня остается точность измерения величин, участвующих в определении

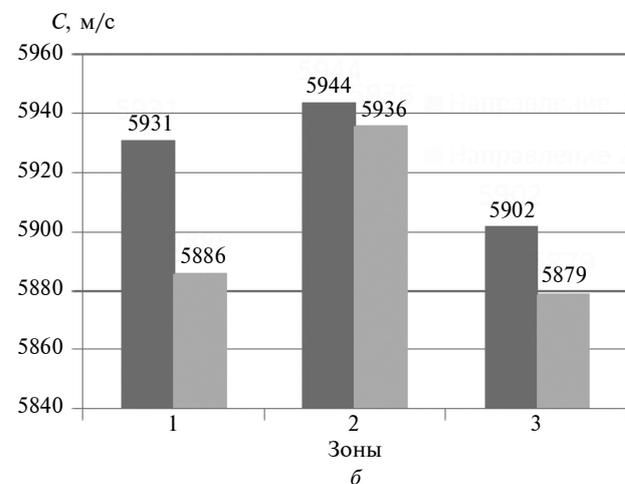
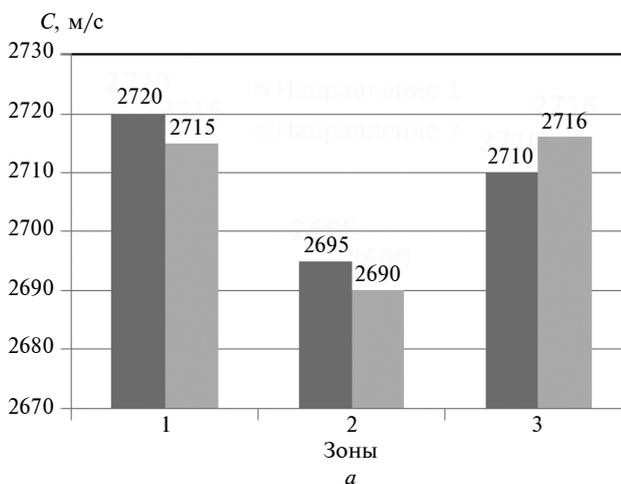


Рис. 4. Результаты измерения скорости распространения ультразвука: а – в органическом стекле, б – в стали марки 40; ■ – направление 1; ▒ – направление 2

скорости распространения ультразвука. Для решения данной проблемы предлагается использовать систему, реализующую дискретный ортогональный метод измерения временного интервала. Проведенное компьютерное моделирование позволило определить оптимальные параметры основного элемента системы – АЦП, который является главным источником погрешности и существенно влияет на точность измерения. Экспериментальные исследования на ма-

териалах с известными характеристиками показали возможность определения скорости распространения ультразвука в твердой среде с погрешностью менее 1 %.

К перспективным исследованиям в данном направлении можно отнести исследование возможности применения других параметров ультразвуковой волны для определения характеристик порошковых материалов.

Список литературы

1. Гращенко Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 231–242.
2. Автоматизована система вимірювань фазових характеристик періодичних сигналів на базі технології Labview // В.П. Бабак, В.В. Дегтярьов, Ю.В. Куц, Л.М. Щербак // *Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы*. – 2004. – № 1. – С. 61–68.
3. *Campbell F.C. Structural Composite Materials*. – Ohio: ASM International, 2010. – 612 p.
4. *Banerjee S. and Shah B.K. Characterization of industrial materials* / G. Sridhar, S. Ghosh, Chowdhary, N.G. Goswami, Eds. // *Material Characterization Techniques – Principals and Applications*. – 1999. – P. 1–15.
5. *Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов*. – Новосибирск: Наука, 1996. – 184 с.
6. *Использование ультразвука при отработке технологии получения порошкового материала* / Ю.Г. Безымянный, Г.А. Богдан, А.Н. Колесников и др. // *КОНСОНАНС-2011. Акустический симпозиум*. – 2011. – С. 28–33.
7. *Об ультразвуковом контроле неоднородности механических свойств горячекатаной стали* / И.М. Полетика, Н.А. Егорова, О.В. Куликова и др. // *Журнал технической физики*. – 2001. – 71, вып. 3. – С. 37–40.
8. *Галаган Р.М., Богдан Г.А. Анализ погрешностей измерения скорости распространения ультразвуковой волны в многофазных порошковых материалах. Часть 1: Влияние субъективной погрешности* // *Вісник НТУУ "КПІ". Сер. Приладобудування*. – 2015. – № 49 (1). – С. 53–60.
9. *Чмых М.К. Цифровая фазометрия*. – М.: Радио и связь, 1993. – 184 с.
10. *Smith S.W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. – 2nd ed. – California Technical Publishing, 1999. – Available: <http://www.dspguide.com> or <http6://www.analog.com>

References

1. D.V. Grashhenkov and L.V. Chursova, "Strategy of composition and functional materials development", *Aviacionnye Materialy i Tehnologii*, no. 5, pp. 231–242, 2012 (in Russian).
2. V.P. Babak *et al.*, "Automatic system for measurement of periodic signal characteristics based on Labview technology", *Avtomatika. Avtomatizacija. Jelektrotehneskie Kompleksy i Sistemy*, no. 1, pp. 61–68, 2004 (in Ukrainian).
3. F.C. Campbell, *Structural Composite Materials*. Ohio: ASM International, 2010.
4. S. Banerjee and B.K. Shah, "Characterization of Industrial Materials", in *Material Characterization Techniques – Principals and Applications*, G. Sridhar *et al.*, eds., 1999, pp. 1–15.
5. V.V. Murav'ev *et al.*, *Acoustic Speed and Steels and Alloys Structure*. Novosibirsk, Russian Federation: Nauka, 1996, 184 p. (in Russian).
6. Ju.G. Bezymjannyj *et al.*, "Ultrasound usage at working-off technology for powdered material receiving", in *Proc. KONSONANS-2011. Acoustical Symp.*, 2011, pp. 28–33 (in Russian).
7. I.M. Poletika *et al.*, "About ultrasonic check of imperfections of hot-rolled steel mechanical properties", *Zhurnal Tehnicheskoj Fiziki*, vol. 71, iss. 3, pp. 37–40, 2001 (in Russian).
8. R.M. Galagan and G.A. Bohdan, "Errors analysis at velocimetry of ultrasonic wave spreading in multiphase powdered materials. Part 1: Influence of a subjective error", *Visnik NTUU KPI. Ser. Priladobuduvannja*, no. 49 (1), pp. 53–60, 2015 (in Russian).
9. M.K. Chmyh, *Digital Phasometry*. Moscow, Russian Federation: Radio i Svjaz', 1993 (in Russian).
10. W.S. Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, 2nd ed. California Technical Publishing, 1999. Available: <http://www.dspguide.com> or <http6://www.analog.com>

Г.А. Богдан, А.Г. Протасов

ЗАСТОСУВАННЯ ДИСКРЕТНОГО ОРТОГОНАЛЬНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ФАЗИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ УЛЬТРАЗВУКОВИМ МЕТОДОМ

Проблематика. Стаття присвячена проблемі підвищення точності визначення фізико-механічних характеристик порошкових матеріалів на стадії їх виготовлення при використанні ультразвукового методу контролю.

Мета дослідження. Реалізація фазового методу вимірювання часового інтервалу в системі ультразвукового контролю порошкових матеріалів з метою підвищення точності визначення їх фізико-механічних характеристик.

Методика реалізації. Для досягнення мети дослідження було запропоновано використати дискретний ортогональний метод визначення фазового зсуву між сигналами. Проводились комп'ютерне моделювання у системі Matlab для визначення різниці фазового зсуву сигналів і оцінка похибки його вимірювання.

Результати дослідження. Визначено оптимальні параметри основного елемента системи вимірювання фазового зсуву – аналого-цифрового перетворювача, який є головним джерелом похибки й істотно впливає на точність вимірювання.

Висновки. Експериментальні дослідження на матеріалах з відомими характеристиками показали ефективність застосування дискретного ортогонального методу, який дав можливість визначити швидкість поширення ультразвуку в твердому середовищі з похибкою менше 1 %.

Ключові слова: фазовий зсув; дискретний ортогональний метод.

Г.А. Богдан, А.Г. Протасов

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКРЕТНОГО ОРТОГОНАЛЬНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ФАЗЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

Проблематика. Статья посвящена проблеме повышения точности определения физико-механических характеристик порошковых материалов на стадии их изготовления при использовании ультразвукового метода контроля.

Цель исследования. Реализация фазового метода измерения временного интервала в системе ультразвукового контроля порошковых материалов с целью повышения точности определения их физико-механических характеристик.

Методика реализации. Для достижения цели исследования было предложено использовать дискретный ортогональный метод определения фазового сдвига между сигналами. Проводились компьютерное моделирование в системе Matlab для определения разницы фазового сдвига сигналов и оценка погрешности его измерения.

Результаты исследования. Определены оптимальные параметры основного элемента системы измерения фазового сдвига – аналого-цифрового преобразователя, который является главным источником погрешности и существенно влияет на точность измерения.

Выводы. Экспериментальные исследования на материалах с известными характеристиками показали эффективность применения дискретного ортогонального метода, который позволил определить скорость распространения ультразвука в твердой среде с погрешностью менее 1 %.

Ключевые слова: фазовый сдвиг; дискретный ортогональный метод.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
04 березня 2015 року