

УДК 621.317.39
DOI: 10.31891/2219-9365-2019-64-7

МАЩЕНКО В. А.
Одеська державна академія технічного регулювання та якості

АНАЛОГОВО-ЦИФРОВИЙ ІНТЕРФЕЙС ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ АМПЛІТУДИ ТА ЧАСУ ПРОХОДЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СИГНАЛУ

В роботі представлено аналогово-цифровий інтерфейс для вимірювання часу проходження та амплітуди ультразвукового сигналу приладової системи для імерсійних вимірювань швидкості поширення ультразвукових хвиль.

Вимірювальний канал аналогово-цифрового інтерфейсу має паралельну структуру і реалізований на основі операційних підсилювачів та швидкодіючих компараторів. Роботою швидкодіючих компараторів керує однокристальний мікроконтролер Atmega48. Крім цього на однокристальний мікроконтролер покладено формування зонduючого ультразвукового імпульсу, виявлення прийнятого сигналу, вимірювання амплітуди першого і головного максимумів відгуку на зонduючий імпульс, визначення часу їх проходження та передачу даних в персональний комп'ютер для подальшої обробки.

Виявлення сигналу та обробку корисного сигналу проводять у часовому вікні із затримкою від початку зондування до заданої межі, величина якої вибирається виходячи із частоти збудження ультразвукових коливань та довжини акустичного тракту проходження сигналу від випромінювача до приймача. Для вимірювання амплітуди, за алгоритмом порозрядного наближення, використовується швидкодіючий компаратор та внутрішній восьми розрядний генератор широтно-імпульсної модуляції однокристального мікроконтролера.

Реалізація алгоритму вимірювань, з використанням апаратних можливостей однокристального мікроконтролера та аналогової частини вимірювального каналу, дає можливість позбутися від суб'єктивних похибок при візуальних визначеннях первинних параметрів та покращити метрологічні характеристики приладової системи для імерсійних вимірювань швидкості поширення ультразвукових хвиль.

Ключові слова: вимірювальний канал, ультразвуковий датчик, попередній підсилювач сигналу, компаратор, мікроконтролер.

MASHCHENKO V.
Odessa State Academy Technical Regulations and Quality

ANALOG-DIGITAL INTERFACE FOR MEASUREMENT OF THE AMPLITUDE AND TIME OF TRANSITION OF THE ULTRASONIC SIGNAL

The article presents an analog-to-digital interface for measuring the transition time and amplitude of the ultrasonic signal of the instrument system for immersion measurements of the speed of propagation of ultrasonic waves.

The analog-to-digital measuring channel has a parallel structure and is implemented on the basis of operational amplifiers and high-speed comparators. The operation of high-speed comparators is controlled by a single-crystal Atmega48 microcontroller. In addition, the single-crystal microcontroller is responsible for forming a probing ultrasound pulse, detecting the received signal and measuring the amplitude of the first and main maxima of the response to the probe pulse, determining the time of their transition and transferring data to a personal computer for further processing.

Detection and processing of the useful signal is carried out in a time window with a delay from the beginning of probing to a predetermined limit, the value of which is selected based on the frequency of excitation of ultrasonic vibrations and the length of the acoustic path of the signal from the radiator to the receiver. To measure the amplitude, using a bit-by-bit approximation algorithm, a high-speed comparator and an internal eight-bit pulse-width modulation unit of a single-crystal microcontroller are used.

The implementation of the measurement algorithm, using the hardware capabilities of a single-crystal microcontroller and the analog part of the measuring channel, makes it possible to get rid of the subjective errors in the visual determination of the primary parameters and to improve the metrological characteristics of the instrument system for immersion measurements of the velocity of propagation ultrasonic waves.

Keywords: measuring channel, ultrasonic sensor, pre-amplifier, comparator, microcontroller.

Постановка проблеми. Найбільш інформативним параметром, що дозволяє визначити механічні характеристики матеріалу як твердого тіла (коефіцієнт Пуассона, модуль Юнга, модуль зсуву, модуль об'ємної деформації), є швидкість поширення ультразвукових (УЗ) коливань різного типу, зокрема поздовжніх і поперечних [1].

У імерсійному методі швидкість поширення ультразвуку визначається із порівняння результатів прямих вимірювань часу проходження зонduючого імпульсу (t) через імерсійну рідину при відсутності і наявності зразка матеріалу між випромінювачем і приймачем сигналів [2, 3]. Визначення часових інтервалів проходження УЗ-імпульсу можливе за допомогою аналогових або цифрових осцилографів за мітками часу. Проте зняття первинних параметрів і внесення їх до персонального комп'ютера (ПК) для подальших розрахунків може супроводжуватися певним похибками пов'язаними із суб'єктивним фактором.

Крім цього, зважаючи на невизначеність моменту появи УЗ-сигналу на приймачі та малу його тривалість, вимірювання амплітуди практично виключає можливість використання стандартних аналого-цифрових перетворювачів (АЦП).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В аналогових вимірювальних схемах останніх поколінь, поряд з традиційним представленням аналогових величин, застосовують поєднання аналогових форм обробки інформації із цифровими, що передбачає перехід до гібридних схем обробки інформації [4].

В роботі [5] запропонована концепція побудови вимірювальної системи або приладу або їх складових частин (сенсорів, вимірювальних каналів і т. п.) виключно із виконання вимог технічного завдання з позиції системного підходу із використанням максимального числа стандартизованих блоків і елементів. Монографія [6] присвячена теоретичним і прикладним аспектам створення аналого-цифрових систем обробки сигналів. Коло питань проектування аналого-цифрових каналів вводу/виводу інформації у контрольно-керованих мікропроцесорних системах розглянуто в роботі [7].

В роботі [8] запропоновано алгоритм визначення часу проходження ультразвукового сигналу за допомогою швидкодіючого АЦП. Ідея вимірювання полягає в обчисленні моменту переходу сигналу через нуль.

Узагальнюючи запропоновані підходи до побудови аналогово-цифрових систем та алгоритми визначення часових інтервалів можна говорити, що задача перетворення аналогового сигналу від периферійного датчика залишається актуальною і сьогодні. В такому випадку підвищення точності первинних вимірювань та відмова від ручного введення результатів у ПК можливі за рахунок використання сучасних однокристальних мікроконтролерів (ОМК).

При вимірюваннях амплітуди УЗ-сигналу доцільно використовувати врівноваження отриманого сигналу сталою напругою за допомогою компаратора із зовнішнім керуванням від ОМК.

На ОМК при таких вимірюваннях можуть бути покладені наступні задачі:

- формування зондуєчого УЗ-імпульсу;
- виявлення прийнятого сигналу та вимірювання його амплітуди;
- визначення часу проходження зондуєчого УЗ-імпульсу;
- передача отриманих даних в ПК для подальшої обробки.

Реалізувати алгоритм вимірювань в такому випадку неможливо без відповідного аналогово-цифрового інтерфейсу (АЦІ).

Формулювання мети дослідження. Метою роботи було розробити аналогово-цифровий інтерфейс для приладової системи, алгоритм його роботи, із врахування особливостей отриманого сигналу від ультразвукового датчика, та забезпечити вивід результатів вимірювань і передачу даних у персональний комп'ютер (ПК) для подальшої обробки.

Виклад основного матеріалу. Аналогово-цифровий інтерфейс для вимірювань величини t та амплітуди УЗ-імпульсу (U) повинен враховувати технічні та конструктивні особливості відповідної приладової системи [9, 10]. Діапазон резонансних робочих частот випромінювачів та приймачів УЗ-сигналу для визначення швидкостей поширення ультразвукових хвиль лежить в межах 200–400 кГц, що вимагає використання продуктивного ОМК з частотою процесора не менше 20 МГц і розвинутою системою команд. При умові, що в ОМК команда (формально) виконуються за один такт процесора, час (Δt) рівний, відповідно, 50 нс визначатиме апаратну складову похибок часових інтервалів.

Процесора ОМК повинен мати 8-ми бітну шину даних і вбудований асинхронний інтерфейс UART для передачі результатів вимірювань відповідних величини у ПК через RS-232C. Для вимірювання часу проходження сигналу в ОМК необхідний зовнішній вхід запиту переривання з вибором варіантів спрацьовування за фронтом чи спадом сигналу, а також внутрішній таймер-лічильник.

Необхідними параметрами та конструктивними особливостями для реалізації алгоритму вимірювань t та U володіє ОМК з архітектурою RISK типу ATmega48 [11].

На рис. 1 представлена структурна схема вимірювального каналу аналогово-цифрового інтерфейсу для визначення часу проходження УЗ-імпульсу та його амплітуди.

Вхідний сигнал із ультразвукового датчика (УЗД) МА300D1–1 (рис. 2) через конденсатор C_1 подається на двоканальний попередній підсилювач (ПП) реалізований на основі операційних підсилювачів (ОУ) включених паралельно за наступною схемою (рис. 3).

Коефіцієнти підсилення каскадів ($K_{1,2}$) попередніх підсилювачів ПП1 і ПП2 визначаються за наступним співвідношенням:

$$K_{1(2)} = 1 + \frac{R_{2(4)}}{R_{3(5)}}, \quad (1)$$

і при відповідних номіналах резисторів R_2 – R_5 для нашої схеми рівні: $K_1 = 20$; $K_2 = 10$.

Виявлення корисного сигналу від УЗД відбувається в умовах шумових завад зовнішнім двоканальним швидкодіючим компаратором (К) (рис. 1, 3). Для цього сигнал обробляється у часовому вікні тривалістю ($t_{\text{time window}}$) із затримкою ($t_{\text{time window delay}}$) від початку зондування до заданої межі (рис. 4). Величина $t_{\text{time window delay}}$ вибирається виходячи із частоти збудження УЗ-коливань та конструктивних особливостей кювети приладової системи.

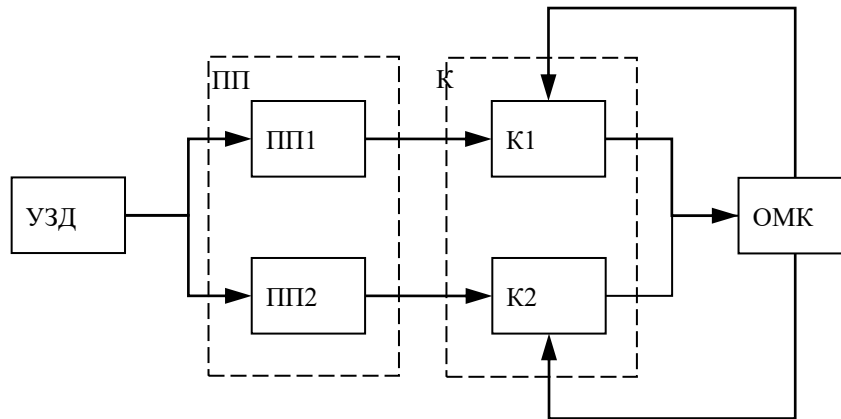


Рис. 1. Структурна схема вимірювального каналу:
 УЗД – ультразвуковий датчик; ПП – попередній підсилювач;
 К – компаратор; ОМК – однокристальний мікроконтролер

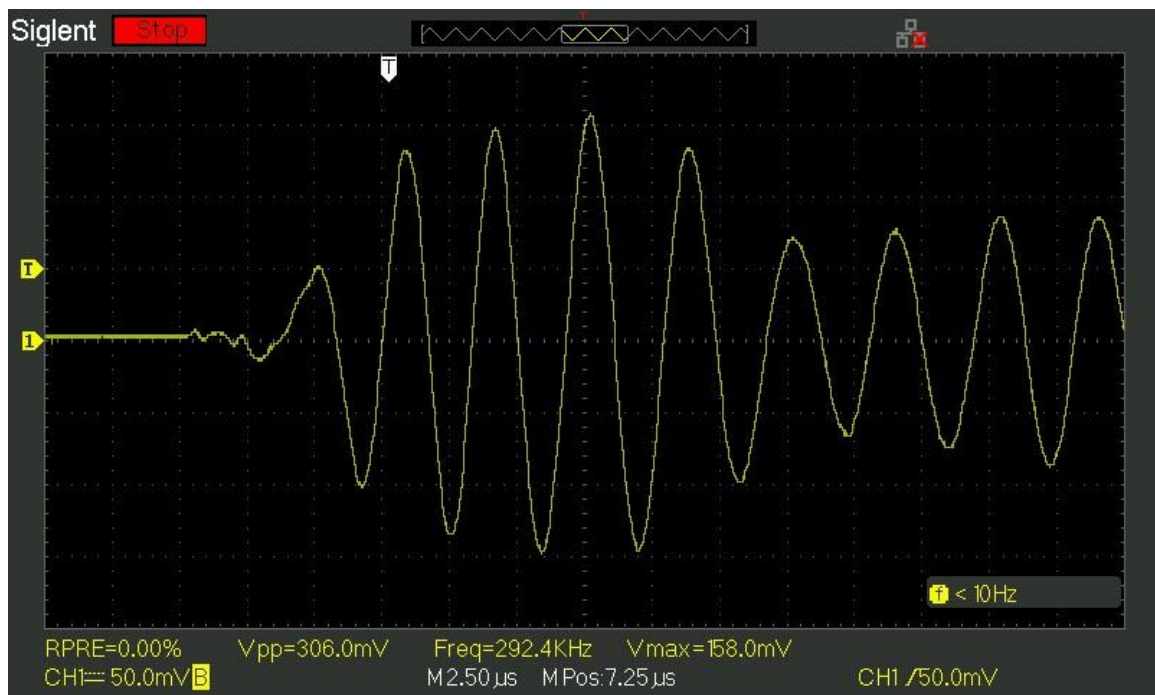


Рис. 2. Вхідний сигнал з УЗД-датчика на вході попереднього підсилювача

На інвертуючі входи каналів К1 і К2 компаратора К подають сигнали з ПП1 та ПП2, а на неінвертуючі – опорна напруга з ОМК, що перевищує рівень шумів, через інтегруючі ланки R_6C_9 і R_7C_8 . Опорна напруга формується з використанням 8-розрядного генератора широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) ОМК. Значення опорної напруги, яка відповідає шумовому порозу отриманого сигналу з УЗД, визначено в процесі тестування роботи схеми АЦП і рівне 10 відносним одиницям, що не перевищує 4 % від величини максимального розмаху корисного сигналу.

На першому етапі виявлення сигналу ОМК працює з каналом ПП1 і К1. Про відсутність сигналу на вході К1 свідчить переповнення лічильника таймера ОМК. В такому випадку на пристрій індикації (LCD дисплей) приладової системи виводиться відповідне повідомлення, а на ПК передається відповідний код. Якщо на інвертованому вході К1 компаратора виявлено сигнал, то проводиться вимірювання амплітуди відгуку першого максимуму (U_1) за алгоритмом порозрядного наближення. При цьому ознакою недобору коду є виникнення переривання від компаратора, а ознакою перебору – переповнення таймера при очікуванні сигналу. Якщо величина U_1 більша за 255 відносних одиниць, то ОМК починає працювати з каналом ПП2 і К2 за аналогічним алгоритмом. Якщо ж і далі має місце перевищення межі діапазону, то формується відповідне повідомлення на LCD дисплей і у ПК.

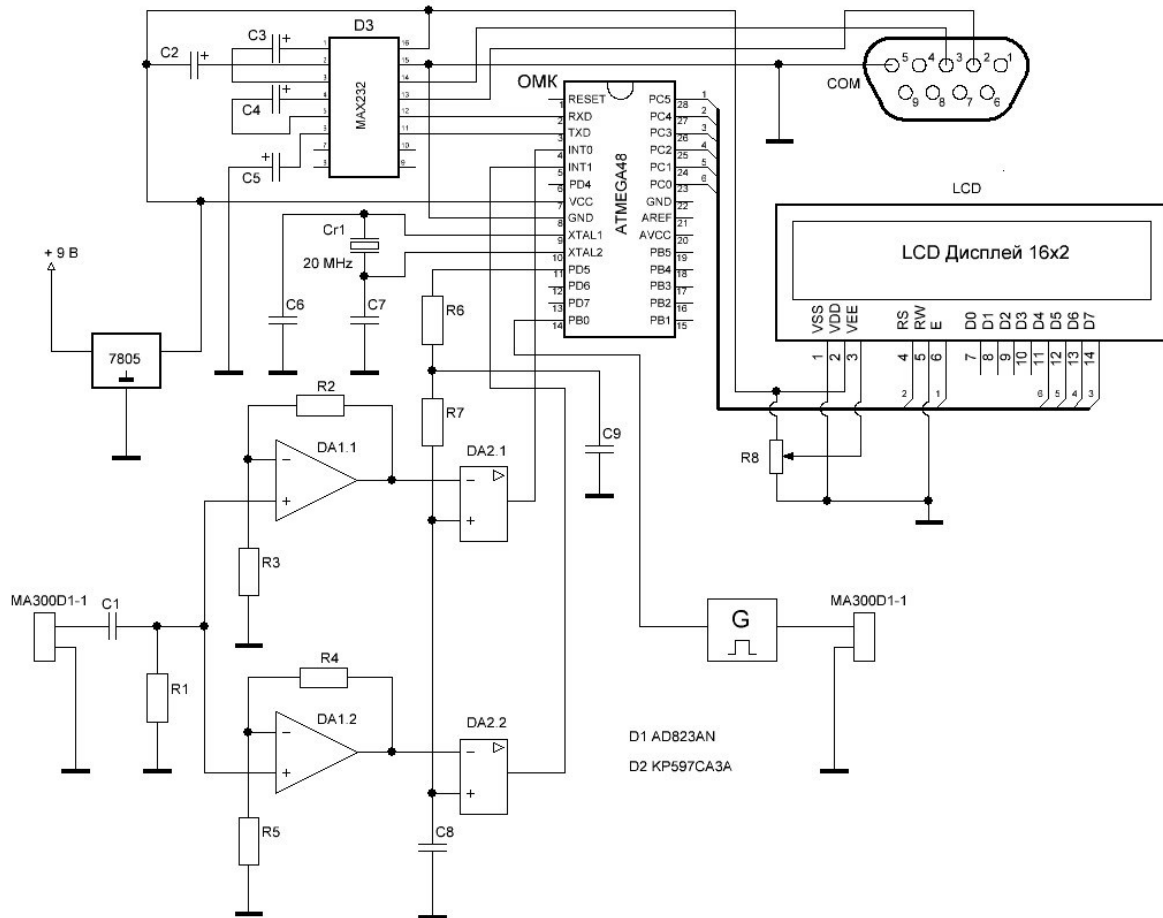


Рис. 3. Принципова схема аналогово-цифрового інтерфейсу

По завершенні вимірювання амплітуди U_1 виводиться відповідне повідомлення на LCD дисплей приладової системи та формуються данні для передачі у ПК, а рівень напруги на неінвертуючому вході компаратора зменшуємо у два рази. При відносному значенні амплітуди ШІМ, що відповідає $U_1/2$, проводимо вимірювання часу до зростання (t_{\uparrow}) та спаду сигналу (t_{\downarrow}) від початку відкриття часового вікна (рис. 4).

Значення t_1 для першого максимуму відгуку визначається за наступним співвідношенням:

$$t_1 = t_{\text{time window delay}} + \frac{t_{\uparrow} + t_{\downarrow}}{2}. \quad (2)$$

На LCD дисплей приладової систем виводиться значення $\frac{t_{\uparrow} + t_{\downarrow}}{2}$, а у ПК передається t_1 , при цьому також виконується переключення типу динамічного запиту переривання від компаратора.

На наступному етапі алгоритму вимірювань виконується пошук i -тої амплітуди головного максимуму (U_i) у відгуку УЗ-сигналу шляхом поступового підняття рівня напруги на одному із входів компаратора до відсутності запитів переривань. Одночасно фіксується час від початку відкриття часового вікна до приходу головного максимуму (t_{\max}), що викликав переривання.

Величина

$$t_i = t_{\text{time window delay}} + t_{\max} \quad (3)$$

приймається за час проходження УЗ-імпульсу з максимальною амплітудою відгуку.

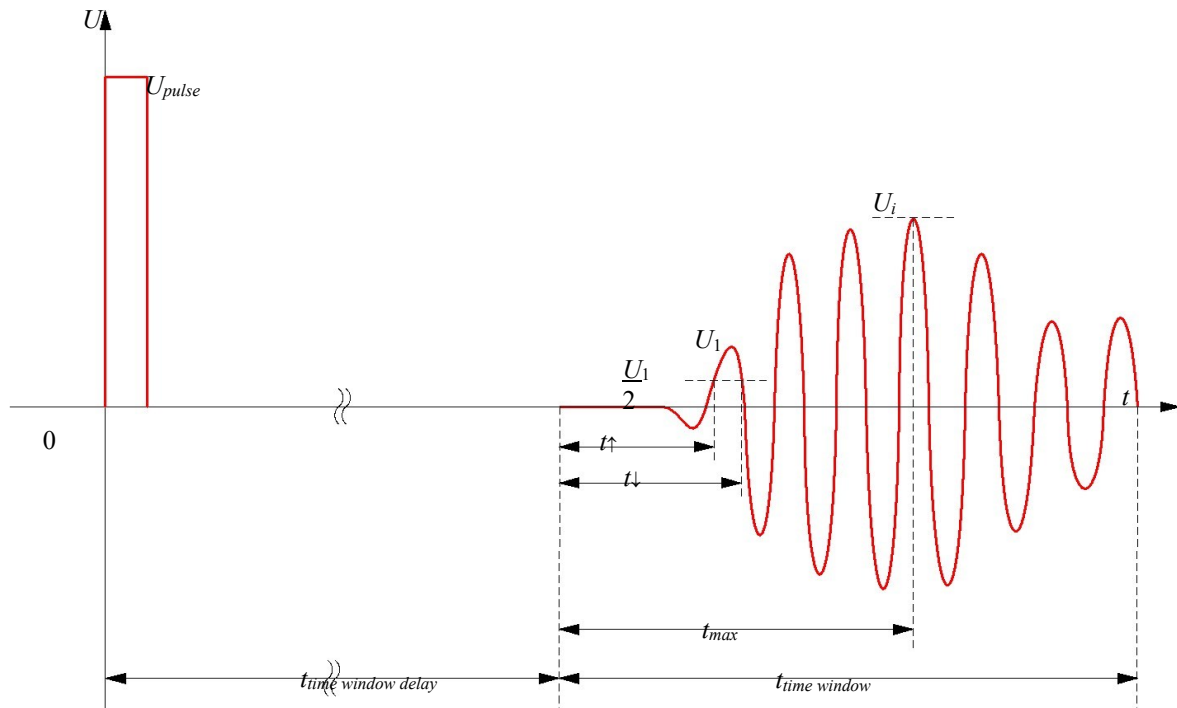


Рис. 4. Схема визначення часових інтервалів проходження УЗ-імпульсу у часовому вікні

Величини U_i та t_{max} виводяться на LCD дисплей приладової систем, а в ПК передаються значення U_i та t_i для подальших розрахунків.

Для визначення часових інтервалів в ОМК використовуються перші вісім розрядів 16-розрядного таймера-лічильника.

Амплітуда УЗ-імпульсу зондування задається програмно у ОМК з використанням відповідного апаратного забезпечення. Для однополярного живлення випромінювача МА300D1–1 передбачено два каскади формування імпульсу: один забезпечує отримання заданої тривалості наростання напруги та її значення, а другий формує її спад. Необхідне значення U_{pulse} для збудження випромінювача МА300D1–1 формується у блоці G схеми АЦП приладової системи по команді з ОМК (рис. 2).

Висновки. 1. Для виявлення сигналу та обробки корисного сигналу від ультразвукового датчика розроблено паралельну структуру вимірювального каналу аналогово-цифрового інтерфейсу приладової системи для імерсійних вимірювань швидкостей поширення ультразвукових хвиль.

2. Виявлення корисного сигналу відгуку запропоновано проводити у визначеному вікні часові розміри та положення якого, відносно ультразвукового імпульсу, вибирають в залежності від технічних та конструктивних особливостей приладової системи.

3. Розроблено алгоритм роботи аналогово-цифрового інтерфейсу приладової системи для вимірювання часу та амплітуд проходження першого та головного максимумів відгуку на зондуючий ультразвуковий імпульс.

4. Показана можливість спільної роботи аналогової та цифрової складових інтерфейсу з використанням апаратних можливостей однокристального мікроконтролера для вимірювання амплітуди та часу проходження імпульсу ультразвукового сигналу.

Література

1. Физическая акустика / Под ред. У. Мезон. Т. I. – М.: Мир, 1966. – 592 с.
2. Ginzl E. Determining Approximate Acoustic Properties of Materials / E. Ginzl, B. Turnbull // e-Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – N. 12. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.ndt.net/article/ndtnet/2016/17_Ginzl.pdf.
3. Franko E. E. Measurement of Elastic Properties of Materials by the Ultrasonic Through-Transmission Technique / E. E. Franko, J. M. Meza, F. Buiocchi // Dyna. – 2011. – N. 168. – P. 59–64.
4. Шевчук В. П. Расчет динамических погрешностей интеллектуальных измерительных систем / В. П. Шевчук. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 288 с.
5. Кондратов В. Т. Разработка концепции построения и архитектуры измерительных систем и приборов для экспресс-диагностики состояния физических и биологических объектов / В. Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. – 2014. – Т. 217. – № 5. – С. 149–166.
6. Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов / Под ред. У. Кестера. – М.: Техносфера, 2010. – 328 с.
7. Шишов О. В. Аналого-цифровые каналы микропроцессорных систем управления / О. В. Шишов. – Москва-Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 211 с.

8. Дослідження характеристик матеріалів для ультразвукової термометрії / Т. Залуцька, Я. Луцик, Я. Сколоздра, Б. Михалик // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2008. – № 68. – С. 155–158.
9. Мащенко В. А. Експериментальна установка для вимірювання пружних параметрів гірських порід / В. А. Мащенко, О. О. Панчук, І. О. Садовенко, М. А. Бордюк // Вісник інженерної академії України. – 2012. – Вип. 3–4. – С. 60–64.
10. Мащенко В. А. Конструктивно-технічні параметри приладової системи для іммерсійного методу вимірювання швидкостей ультразвукових хвиль // В. А. Мащенко, В. П. Квасніков // Вісник Інженерної академії наук. – 2018. – Вип. 3. – С. 158–162.
11. Евстифеев А. В. Микроконтроллеры AVR семейства Mega. Руководство пользователя / А. В. Евстифеев. – М.: ДМК Пресс, Додэка, 2015. – 588 с.

References

1. Physical Acoustics / Ed W. Mason. T. I. Moscow, Mir, 1966. 592 p.
2. Ginzel E., Turnbull B. Determining Approximate Acoustic Properties of Materials. e-Journal of Nondestructive Testing. 2016. no. 12. Available at: https://www.ndt.net/article/ndtnet/2016/17_Ginzel.pdf (Accessed 26 January 2020)
3. Franko E.E. Meza J.M., Buiocchi F. Measurement of Elastic Properties of Materials by the Ultrasonic Through-Transmission Technique. Dyna. 2011. no. 168. pp. 59–64.
4. Shuvchuk V.P. Calculation of dynamic errors of intelligent measuring systems. Moscow, Physmatlite, 2008. 288 p.
5. Kondratov V.T. Working out of concept of construction and architecture measuring system and devices for express diagnostics of the condition physical and biological objects. Herald of Khmelnytskyi national university. 2014 (217). iss. 5. pp. 149–166.
6. Mixed-signal and DSP design techniques / Ed .W. Kester. Published by Newnes/Elsevier, 2002. 368 p.
7. Shyshov O.V. Analog-digital channels of microprocessor control systems. Moscow-Berlin, Direct-Media, 2015. 211 p.
8. Zalutska T., Lutsyk Y., Skolozdra Y., Mykhalyk B. Measuring Engineering and Metrology. 2008. no. 68. pp. 155–158.
9. Mashchenko V.A. Panchuk O.O., Sadovenko I.O., Borduk M.A. Experimental device for measuring the elastic parameters of rocks. Bulletin of Engineering Academy of Ukraine. 2012. iss. 3–4. pp. 60–64.
10. Mashchenko V.A., Kvasnikov V.P. Construction and technical parameters of the device system for the immersion method of measurement of ultrasonic waves velocities. Bulletin of Engineering Academy of Ukraine. 2018. iss. 3. pp. 158–162.
11. Evstifeev A.V. Microcontrollers AVR family Mega. User Guide. Moscow, DMK Press, Dodeka, 2015. 588 p.

Рецензія/Peer review : 18.09.2019

Надрукована/Printed : 03.01.2020