

Maria WRZUSZCZAK, Volodymyr KHOMA
POLITECHNIKA OPOLSKA, INSTYTUT AUTOMATYKI I INFORMATYKI,
ul. Gen. Sosnkowskiego 31, 45-233 Opole

System komputerowy do badań wiroprądowych z zastosowaniem cyfrowego przetwornika impedancji

Dr inż. Maria WRZUSZCZAK

Uzyskała stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie naukowej elektronika. Pracuje jako adiunkt na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Jest autorką lub współautorką kilkudziesięciu publikacji naukowych. Zainteresowania naukowe to metrologia, cyfrowe układy pomiarowe oraz badania materiałów metodą prądów wirowych.



e-mail: m.wruszczak@po.opole.pl

Prof. dr hab. inż. Volodymyr KHOMA

Jest profesorem nadzwyczajnym na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. W 1990 r. uzyskał stopień naukowy doktora nauk technicznych a w 2001 r. doktora habilitowanego. Dorobek naukowy obejmuje ponad sto trzydzieści publikacji i patentów z zakresu elektroniki cyfrowej i cyfrowego przetwarzania sygnałów w systemach pomiarowych.



e-mail: v.khoma@po.opole.pl

Streszczenie

Zwiększenie dokładności i funkcjonalności układów pomiarowych stosowanych w wyspecjalizowanych miernikach wiroprądowych, możliwe jest poprzez wykorzystanie coraz szerszego asortymentu układów scalonych analogowych, analogowo-cyfrowych oraz zastosowanie cyfrowej techniki przetwarzania sygnałów. Poniżej przedstawiony został komputerowy system pomiarowy przystosowany do współpracy z czujnikiem wiroprądowym transformatorowym z wykorzystaniem układu AD5933, mikrokontrolera oraz zastosowaniem techniki DDS.

Słowa kluczowe: pomiary wiroprądowe, technika DDS, pomiary impedancji.

Eddy current test system with digital impedance converter

Abstract

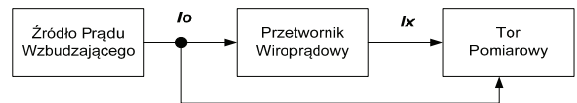
The paper deals with a problem, how to decrease the measurement uncertainty and shorten the time response of the eddy current test system with a transform transducer. This transducer output signal is complex. Its amplitude and phase or real and imaginary part contain information about the measurand. An IC AD5933 from Analog Devices and two analog to digital converters were used for digital measurements of the eddy current transducer output impedance. The current in the eddy current transducer excitation coil should be sinusoidal. A sinusoidal source is realized through a Direct Digital Synthesis (DDS). AD5933 output registers deliver digital signals to DAC inputs for synthesis of the sin and cos function. The eddy current transducer output signal is processed by Hanning window and Discrete Fourier Transform (DFT). The ATmega micro-controller with the application program controls the mode and operation of the AD 5933 with the eddy current transducer and performs acquisition of the complex measurement signal to its flash memory via I2C interface. Then the RS 232C link to a PC provides transfer of the measurand data for further processing and visualisation.

Keywords: eddy current measurements, DDS, impedance measurements.

1. Koncepcja digitalizacji wiroprądowego układu pomiarowego

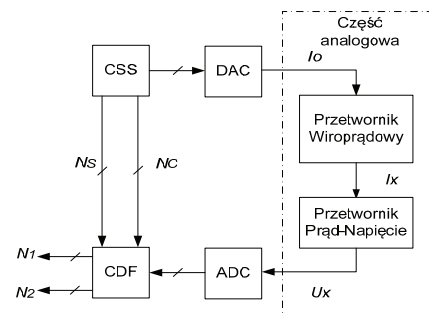
Badania wiroprądowe różnych obiektów wykonuje się w szerokim zakresie częstotliwości od kilku Hz do ponad 100 MHz [1]. Najczęściej stosuje się parametryczne i transformatorowe przetworniki wiroprądowe [2]. Sygnał z wyjścia przetwornika wiroprądowego I_x jest sygnałem sinusoidalnym, o innej amplitudzie i fazie niż prąd wzbudzenia. Zostaje on doprowadzony do toru pomiarowego, gdzie dokonuje się jego rozkładu na części rzeczywistą $X_1 = \text{Re}(I_x)$ i urojoną $X_2 = \text{Im}(I_x)$. Na rys. 1 przedstawiono uproszczony schemat układu pomiarowego, zawierający źródło sinusoidalnego prądu wzbudającego I_0 , przetwornik wiroprądowy oraz tor przetwarzania sygnału pomiarowego, w skrócie tor pomiarowy.

Ze względu na naturę zjawiska fizycznego, czujnik (przetwornik) wiroprądowy powinien pozostać układem analogowym, ponieważ prądy wirowe powstają w badanym obiekcie (materiale przewodzącym) w wyniku zjawiska indukcji elektromagnetycznej wywołanego prądem wzbudającym [3]. Natomiast digitalizacja źródła sygnału wzbudającego oraz toru pomiarowego obecnie jest nie tylko możliwa ale i zalecana [4, 5].



Rys. 1. Uproszczony schemat układu pomiarowego do badań wiroprądowych
Fig. 1. Simplified block diagram of the measurement system for eddy current testing

Instotę przetwarzania sygnałów pomiarowych przedstawiono na schemacie blokowym cyfrowego miernika wiroprądowego (rys. 2).



Rys. 2. Schemat blokowy cyfrowego miernika wiroprądowego
Fig. 2. Block diagram of the digital eddy current gauge

Prąd wzbudający I_0 jest wytwarzany przez przetwornik cyfrowo-analogowy DAC na podstawie napływających kodów $N(i)$ z cyfrowego syntezyzatora sygnałów harmonicznych oznaczmy go CSS. Pod wpływem tego sinusoidalnie zmiennego prądu I_0 powstają prądy wirowe w materiale obiektu badanego, a w konsekwencji następuje zmiana prądu i napięcia w cewce pomiarowej przetwornika (osłabienie pola elektromagnetycznego zgodnie z regułą Lenza). Wartość skuteczna prądu płynącego w cewce pomiarowej zależy od wartości pierwotnego pola wytwarzanego przez prąd wzbudający oraz własności elektromagnetycznych obiektu badanego. Przyjmijmy, że

$$I_x = H_x I_0, \quad (1)$$

gdzie: H_x – transmitancja przetwornika wiroprądowego będąca funkcją mierzonego parametru x , na przykład grubości płyty metalowej lub konduktywności materiału.

Na wejście przetwornika analogowo-cyfrowego ADC podawany jest sygnał pomiarowy w postaci napięcia U_x , uzyskanego w odpowiednio dobranym przetworniku prądu na napięcie (PPN)

$$U_x = R_{RB} I_x, \quad (2)$$

gdzie R_{RB} współczynnik przekształcania układu PPN.

Napięcie U_x zostaje próbkowane z częstotliwością f_s i w postaci kwantowanych próbek doprowadzane do cyfrowego detektora fazoczułego (CDF). Wejścia referencyjne detektora są sterowane poprzez wartości cyfrowe - kody N_s i N_c reprezentujące funkcje sinus i cosinus

$$N_s(n) = \sin\left(\frac{2\pi f_0 n}{N}\right); \quad N_c(n) = \cos\left(\frac{2\pi f_0 n}{N}\right), \quad (3)$$

gdzie: n oraz N odpowiednio numer próbki i liczba próbek w okresie $T_0 = 1/f_0$ syntezowanych sygnałów.

Algorytm pracy detektora można opisać za pomocą wzorów [6]:

$$N_1 = \frac{a}{N} \sum_{n=0}^{N-1} M_x(n) \times N_s(n) = \frac{a}{2} \operatorname{Re}(H_x) \quad (4)$$

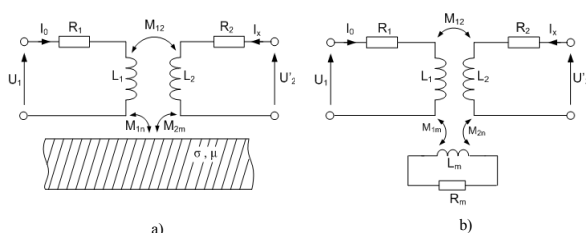
$$N_2 = \frac{a}{N} \sum_{n=0}^{N-1} M_x(n) \times N_c(n) = \frac{a}{2} \operatorname{Im}(H_x)$$

gdzie: a – współczynnik przekształcania toru pomiarowego.

Cyfrowe syntezy sygnałów oraz jednostki obliczeniowe produkowane są również jako układy scalone, i mogą być wykorzystane do realizacji omówionej powyżej struktury cyfrowego miernika wiroprowadowego. Do realizacji układu z rys. 2 można wykorzystać scalone przetworniki impedancji AD5933 lub AD5934 firmy Analog Devices [7, 8], w których realizowane są algorytmy nie tylko cyfrowego syntezy sygnałów, ale również cyfrowego detektora fazoczułego [1, 2]. Dalszą część projektu oparto o aplikację układu AD5933; omówiono w skrócie najważniejsze funkcje tego układu oraz przeprowadzono rozważania w celu jego adaptacji do pomiarów wiroprowadowych.

2. Budowa i model przetwornika wiroprowadowego

Przetworniki wiroprowadowe stanowią podstawową część urządzeń do badań wiroprowadowych. Jak było już wspomniane przetworniki wiroprowadowe z zasady muszą pozostać analogowe. Na rys. 3 przedstawiono przykładowy przetwornik dwucewkowy, zwany transformatorowym. Przyjęto oznaczenia: R_1, L_1 oraz R_2, L_2 - rezystancja i indukcyjność cewki wzbudzającej oraz pomiarowej, R_m, L_m - rezystancja i indukcyjność materiału, M_{1m}, M_{2m}, M_{12} - indukcyjności wzajemne, σ i μ - konduktywność i przenikalność magnetyczna materiału.



Rys. 3. Czujnik wiroprowadowy transformatorowy umieszczony nad materiałem przewodzącym. a) schemat, b) model elektryczny
Fig. 3. Transformer eddy current transducer located above the conducting material (a) and its electrical model (b)

Informacja o wielkości mierzonej, na przykład konduktywności materiału badanego, zawarta jest w sygnale różnicowym (napięciowym lub prądowym). Założmy, że wielkością wyjściową z przetwornika wiroprowadowego jest sygnał prądowy, czyli

$$\Delta I_x = I_x - I_{x0} \quad (5)$$

gdzie: I_x - zespolona wartość prądu płynącego cewce pomiarowej przetwornika, gdy przetwornik znajduje się nad materiałem badanym, I_{x0} - zespolona wartość prądu płynącego w cewce pomiarowej przetwornika, gdy przetwornik znajduje się z dala od materiału badanego (potocznie stosuje się określenie, że przetwornik znajduje się „w powietrzu” – in air). Wartość ta, zmierzona przed serią pomiarów i zapamiętana, stanowi odniesienie dla innych wyników pomiarów. Przyrządy wiroprowadowe wymagają skalowania na fizycznych wzorcach wielkości mierzonej [3, 10].

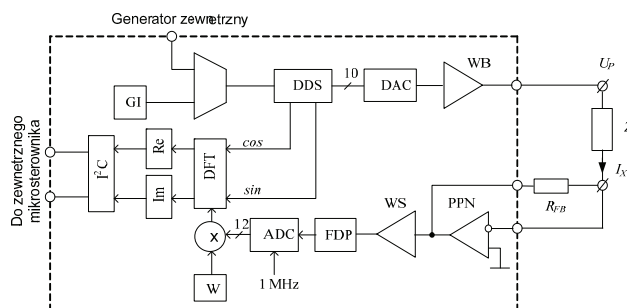
3. Przetwornik AD5933 - budowa i możliwości aplikacji

Układ AD5933 zwany cyfrowym przetwornikiem impedancji [7], można wykorzystać do współpracy z wiroprowadowym przetwornikiem pomiarowym. Układ ma możliwość uformowania napięcia sinusoidalnego o zadanej częstotliwości i podania go na wejście cewki wzbudzającej przetwornika wiroprowadowego. Sygnał z cewki pomiarowej, będący odpowiedzią przetwornika wiroprowadowego na napięcie wzbudzenia jest przetworzony przez przetwornik analogowo-cyfrowy i poddany dyskretniej transformacji Fouriera, osobno dla składowej rzeczywistej i urojonej. Moduł i argument impedancji mierzonej dla każdej częstotliwości sygnału pobudzenia jest wyliczany według wzorów

$$\operatorname{Mod}(Z) = \sqrt{\operatorname{Re}^2(Z) + \operatorname{Im}^2(Z)}, \quad \operatorname{Arg}(Z) = \arctg \frac{\operatorname{Im}(Z)}{\operatorname{Re}(Z)} \quad (6)$$

W strukturze układu AD5933 (rys. 4) można wyodrębnić trzy główne bloki funkcjonalne:

- blok cyfrowej syntezy harmoniczných sygnałów o zadanej częstotliwości, składający się z generatora impulsów (GI), syntezy sygnałów ortogonalnych pracującego w oparciu o bezpośrednią syntezy cyfrową (Direct Digital Synthesis - DDS), przetwornika cyfrowo-analogowego (Digital to Analog Converter - DAC) i sterowanego kodowo wzmacniacza buforowego (WB);
- kanał pomiarowy stanowiący szeregowe połączenie przetwornika «prąd - napięcie» (PPN), wzmacniacza skalującego (WS) z filtrem dolnoprzepustowym (FDP) oraz przetwornika analogowo - cyfrowego (Analog to Digital Converter ADC);
- jednostkę obliczeniową na bazie procesora sygnałowego realizującego algorytm dyskretniej transformaty Fouriera (Discrete Fourier Transform DFT) na danych uzyskanych z ADC, ważonych według funkcji okna Hanninga.



Rys. 4. Budowa przetwornika AD5933 z zewnętrzną impedancją Z
Fig. 4. Functional block diagram of AD5933 with external impedance Z

Przetwornik AD5933 jest wyposażony w szeregowy interfejs I²C w celu przesyłania wyników przetwarzania zawartych w rejestrach składowych rzeczywistej i urojonej do urządzenia zewnętrznego oraz odbioru parametrów systemowych niezbędnych dla przeprowadzenia procesu pomiarowego.

Synteza ortogonalnych sygnałów cyfrowych przetwornika AD5933 pracuje na zasadzie bezpośredniej syntezy cyfrowej. Wykorzystywanie 27-bitowego akumulatora fazy zapewnia syntezę sygnałów \sin i \cos z możliwością nastawy częstotliwości z dużą rozdzielczością (mniejszą niż 0,1 Hz). Użytkownik ma możliwość dokonywania liniowej zmiany częstotliwości sygnałów cyfrowych (przemiatanie, ang. *sweep*), zadając poprzez interfejs szeregowy takie parametry jak częstotliwość początkowa, krok zmiany częstotliwości i ilość punktów w przedziale przemiatania. Praca syntezy jest synchronizowana poprzez impulsy generatora wbudowanego lub zewnętrznego. Przy częstotliwości impulsów generatora około 16 MHz układ zapewnia syntezę sygnałów ortogonalnych w zakresie od 1 Hz do 100 kHz.

Formowanie napięcia wzbudzenia dokonuje się za pomocą przetwornika cyfrowo-analogowego w oparciu o sygnały cyfrowe syntezy w wymiennym zakresie częstotliwości. Ponadto istnieje możliwość wyboru amplitudy napięcia wzbudzenia o wartościach 2 V; 1 V; 0,4 V i 0,2 V. Należy podkreślić, że wskutek wykorzystania jednobiegunowego źródła zasilania układu AD5933, napięcie pobudzenia zawiera składową stałą.

Pod wpływem napięcia pobudzenia U_p (rys.4) przez badaną impedancję Z płynie prąd

$$I = U_p / Z \quad (7)$$

niosący informację o parametrach impedancji, ale dla wygody pomiaru, dokonuje się jego przetwarzania na napięcie. Przetwornik «prąd-napięcie» można zrealizować na bazie wbudowanego w układ scalony wzmacniacza operacyjnego. Transmitematyczny przetwornik «prąd-napięcie» określa się poprzez wartość rezystancji zewnętrznego rezystora sprzężenia zwrotnego R_{FB} . Napięcie wyjściowe przetwornika przy założeniu idealnych parametrów wzmacniacza operacyjnego ma postać

$$U = -R_{FB} I = -U_p R_{FB} / Z \quad (8)$$

Poprzez wybór rezystora R_{FB} oraz sterowanego kodowo wzmocnienia wzmacniacza skalującego WS o wartości 1 lub 5, można zapewnić pracę przetwornika analogowo - cyfrowego w całym zakresie przetwarzania. Filtr dolnoprzepustowy stosowany jest w celu zapobiegania nakładania się widma sygnału podczas jego próbkowania z szybkością 1 miliona próbek na sekundę. Przetwornik analogowo-cyfrowy jest 12-bitowy.

Informację o składowych rzeczywistej Re i urojonej Im mierzonego sygnału można otrzymać wykorzystując dyskretną transformację Fouriera. W przetworniku AD5933 wykorzystuje się tzw. jednopunktowy algorytm DFT, realizowany według wzoru

$$X(f) = Re + j Im = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \left[\cos\left(\frac{2\pi f_0 n}{N}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi f_0 n}{N}\right) \right], \quad (9)$$

gdzie przez $x(n)$ i $X(f)$ oznaczono próbki oraz gęstość widmową sygnału wyjściowego ADC dla częstotliwości f_0 sygnału wzbudzenia, natomiast $\cos\left(\frac{2\pi f_0 n}{N}\right)$ i $\sin\left(\frac{2\pi f_0 n}{N}\right)$ – wektory

sygnałów ortogonalnych wytwarzane poprzez cyfrowy syntezy sygnałów; n i N – odpowiednio numer próbki i ilość próbek w bloku ($N = 1024$).

Obliczanie DFT przewiduje, że w bloku mieści się całkowita liczba okresów sygnału wzbudzenia. Ponieważ interwał między próbkami wynosi 1 μ s, to długość bloku wynosi 1,024 ms. Jeśli okres sygnału wzbudzenia nie jest krotnością 1,024 ms, obserwuje

się tzw. przeciek widma, który jest źródłem dodatkowych błędów pomiaru. W technice cyfrowego przetwarzania sygnałów dla zmniejszenia efektu przecieku widma wykorzystuje się operację wygładzania oknem, która sprowadza się do przemnożenia próbek sygnału przez specjalną funkcję okna. W przetworniku AD5933 wykorzystuje się wygładzanie oknem Hanninga, opisane poprzez

$$W(n) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi f_0 n}{N}\right). \quad (10)$$

W celu otrzymania wyników przetwarzania składowych rzeczywistej i urojonej sygnału dokonuje się sumowania wszystkich 1024 zważonych funkcją okna iloczynów, dla każdej częstotliwości sygnału wzbudzenia. Wyniki reprezentujące część rzeczywistą i urojoną impedancji są przechowywane w dwóch 16-bitowych rejestrach przetwornika.

Funkcję przetwarzania przetwornika AD5933 można opisać w postaci ogólnej następującym wzorem

$$X(f) = Re + j Im = \frac{R_{FB}}{Z(f_0)} H_{CS} H_{KP} H_{JO} = \frac{R_{FB}}{Z(f_0)} H, \quad (11)$$

gdzie H_{CS} , H_{KP} , H_{JO} – odpowiednio funkcje przenoszenia przetwornika bloku syntezy cyfrowej, kanału pomiarowego i jednostki obliczeniowej.

Iloczyn $R_{FB} H$ jest uogólnionym współczynnikiem przetwarzania układu, a w przypadku idealnym wielkość H przyjmuje wartość 1. Ze wzoru (11) wynika, że wyniki przetwarzania związane są z impedancją zależnością odwrotną, czyli reprezentują admitancję, dlatego zrealizowane według wzoru (6) obliczenia nie wyrażają bezwzględnej wartości modułu i argumentu badanej impedancji. Otrzymane liczby należy odnieść do wyników pomiaru uzyskane na znanej impedancji. Taka procedura w istocie jest kalibrowaniem toru pomiarowego.

Podłączając na wejście przetwornika AD5933 zamiast badanej impedancji znany rezystor wzorcowy R_0 , otrzymuje się

$$X_0(f) = \frac{R_{FB}}{R_0} H_0, \quad (12)$$

Ze stosunku równań (11) i (12) otrzymuje się wynik pomiaru impedancji badanego obiektu

$$Z = R_0 \frac{X_0}{X} \frac{H}{H_0}. \quad (13)$$

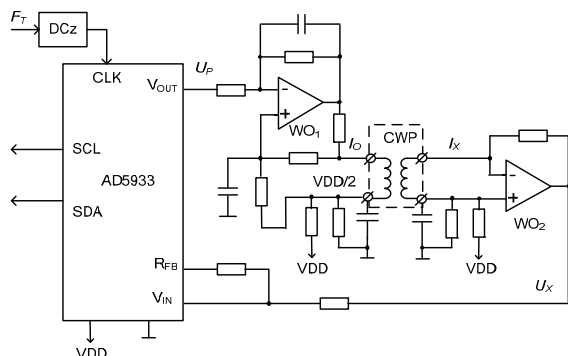
4. Adaptacja scalonego przetwornika impedancji AD5933 do pomiarów wirowych

Analiza cech przetwornika wirowego (rys.3) oraz przetwornika impedancji AD5933 wykazała następujące problemy niekompatybilności współpracy tych układów:

- w przetworniku wirowym wejście i wyjście są prądowymi, natomiast układ AD5933 ma wyjście napięciowe, a wejście prądowe;
- wyjście napięciowe układu AD5933 zawiera składową stałą, a niedopuszczalne jest podanie sygnału ze składową stałą na cewkę wzbudzającą czujnika wirowego;
- częstotliwość graniczna dolna przetwornika AD5933 wynosi 1 kHz, natomiast czasami do badań wirowych potrzebne są niższe częstotliwości.

Wymienione ograniczenia mogą być wyeliminowane poprzez rozbudowę zewnętrzną, analogowej części układu (rys. 5). Czujnik wirowy (oznaczony CWP) jest zasilany przez przetwornik

napięcie – prąd w układzie Howlanda zbudowanym na wzmacniaczu operacyjnym WO_1 . Układ Howlanda sterowany jest syntezowanym napięciem U_p zawierającym składową stałą. W celu jej eliminacji na wejście nieodwracające WO_1 podano dodatni potencjał o wartości $V_{DD}/2$ z rezystancyjnego dzielnika napięcia.



Rys. 5. Schemat połączenia zmodyfikowanego przetwornika wiroprowadowego z układem AD5933

Fig. 5. Eddy current transducer CWP connected with AD5933

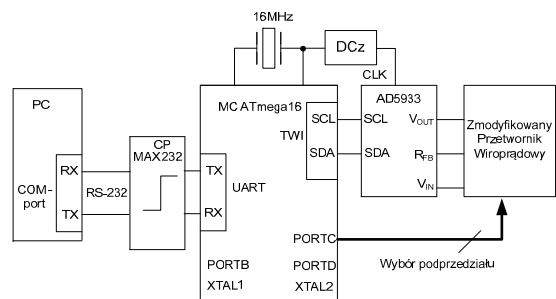
Na wzmacniaczu operacyjnym WO_2 został zbudowany przetwornik prąd-napięcie. Składowa stała prądu I_0 jest wyeliminowana poprzez podłączenie cewki wzbudzającej przetwornika wiroprowadowego do rezystancyjnego dzielnika napięcia.

W związku z jednobiegunowym zasilaniem układu AD5933, wyjściowe napięcie przetwornika pomiarowego U_x będzie zawierać składową stałą o wartości $V_{DD}/2$. Ponieważ w cewce pomiarowej prąd I_x nie powinien zawierać składowej stałej, wejście nieodwracające WO_2 jest podłączone przez rezystancyjny dzielnik napięcia, na który podano napięcie stałe V_{DD} .

Wzmacniacze WO_1 oraz WO_2 zrealizowano na bazie układu AD8532 [9]. W celu uzyskania żądanej częstotliwości prądu wzbudzenia, częstotliwość generatora wewnętrznego może zostać podzielona w odpowiednim stosunku przez dzielnik częstotliwości DCZ.

5. Struktura i działanie systemu komputerowego do badań wiroprowadowych

Przetwornik scalony AD 5933 może być wykorzystany dla budowy komputerowego systemu do badań wiroprowadowych. Schemat blokowy tego systemu podano na rys. 6.



Rys. 6. Komputerowy system do badań wiroprowadowych
Fig. 6. Computer eddy current test system

W skład komputerowego systemu do badań wiroprowadowych wchodzi dodatkowo 8-bitowy mikrokontroler ATmega16 firmy Atmel, zapewniający współpracę z komputerem osobistym (PC) poprzez interfejs RS-232, sterowanie scalonym przetwornikiem AD5933 oraz przełącznikami elektronicznymi wyboru podzakresu przetwornika wiroprowadowego, a także dokonuje obliczenia wyników pomiaru.

Mikrokontroler prowadzi wymianę danych z PC poprzez wbudowany moduł USART (Universal Synchronous and Asynchronous Receiver and Transmitter) a ze scalonym przetwornikiem AD5933 - przez wbudowany, dwuprzewodowy interfejs TWI (Two Wire Interface), który jest odpowiednikiem interfejsu I²C. W sposób programowy, z komputera dokonuje się wyboru trybu pracy układu AD5933 i ustala parametry toru pomiarowego, takie jak: początkowa lokalizacja czujnika wiroprowadowego, krok, oraz liczba punktów skanowania powierzchni badanego obiektu po osiach x i y, częstotliwość i wartość skuteczna prądu wzbudzenia, współczynnik wzmocnienia wzmacniacza skalującego. Po odbiorze instrukcji mikrokontroler wpisuje je do rejestrów wewnętrznych układu AD5933. Następnie komputer dokonuje wizualizacji wyników pomiaru. Dla zapewnienia kompatybilności poziomów napięć MC i interfejsu RS-232 zastosowano układ konwersji poziomów (CP) MAX202CSE. Obecność rezystorów wewnętrznych podciągających na liniach SCL i SDA mikrokontrolera pozwala zrezygnować z podłączania rezystorów zewnętrznych, które są wymagane według standardu interfejsu I²C.

Rolę źródła impulsów taktujących mikrokontrolera i układ AD5933 pełni generator kwarcowy o częstotliwości 16 MHz. Duża pojemność wewnętrznej pamięci instrukcji i danych MC ATmega16 umożliwia wykorzystanie do jego programowania kompilatora języka C CodeVision AVR.

W pamięci flash mikrokontrolera są przechowywane wartości współczynników kalibracji toru pomiarowego, dokonanej przy wykorzystaniu specjalnych wzorców materiałowych do badań wiroprowadowych, które opisano w [3, 10, 11].

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono cyfrowy przetwornik składowych rzeczywistej i urojonej sygnałów pomiarowych w zastosowaniu do nieniszczącego badania materiałów metodą prądów wirowych. Algorytmy cyfrowego przetwarzania sygnałów pozwalają na poprawę parametrów metrologicznych przyrządu poprzez filtrację szumów oraz umożliwiają zastosowanie nowoczesnych metod sztucznej inteligencji do określania wartości wielkości mierzonej. Do syntezy sygnału wzbudzenia zastosowano technikę DDS. W realizacji praktycznej zastosowano specjalizowany układ scalony AD5933.

7. Literatura

- [1] Lewińska - Romicka A.: Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii. WNT, Warszawa 2001.
- [2] Buchma I., Wrzuszczak M., Ferczuk K.: Przetworniki wiroprowadowe parametryczne i transformatorowe do badań nieniszczących, Wiadomości Elektrotechniczne nr 3/2007, str. 22-24.
- [3] Wrzuszczak M., Wrzuszczak J.: Eddy current flaw detection with neural network applications, Measurement Vol. 38, (2005) pp. 132-136.
- [4] Khoma V., Wrzuszczak M.: Kompensacyjny miernik admitancji, Przegląd Elektrotechniczny nr 5/2008, str. 33-36.
- [5] Lyons R.G.: Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów, WKŁ Warszawa 2000.
- [6] Choma W., Wrzuszczak M.: Pomiary impedancji z wykorzystaniem szybkiego algorytmu równoważenia, Pomiary, Automatyka, Kontrola PAK nr 7/8 2006, str. 27-30.
- [7] AD 5933. 1 MSPS, 12 bit Impedance Converter, Network Analyzer, <http://www.analog.com>
- [8] AD 5934, 250 KSPS, 12 Bit Impedance Converter Network Analyzer. <http://www.analog.com>
- [9] AD 8532. Dual Single-Supply Amplifier, <http://www.analog.com>
- [10] Wrzuszczak M.: Wzorce konduktywności dla celów konduktometrii wiroprowadowej. Materiały XXVI Międzynarodowej Konferencji Metrologów MKM'94, t. 1, str. 321-328.
- [11] Wrzuszczak M.: Wytwarzanie wzorców wad w materiałach przewodzących dla celów diagnostyki wiroprowadowej. PAR nr.12 (2010), str. 53-56.