



Pomiar położenia kąтового i uderów z wykorzystaniem przetworników A/C delta-sigma wbudowanych w układ programowalny FPGA

TOMASZ RADOMSKI, RYSZARD PEŁKA

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Telekomunikacji,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodę pomiaru położenia kąтового i przeciążeń z wykorzystaniem przetworników A/C wbudowanych w układ programowalny FPGA. Budowa przetworników oparta jest na modulacji delta-sigma. Zaprezentowano technikę pomiaru położenia kąтового w trzech wymiarach oraz sposoby kalibracji. Opisano implementację układu pomiarowego z wykorzystaniem czujników MMA 7260 (*Freescal*) oraz ADXL278 (*Analog Devices*). Przedstawiono również wyniki badań eksperymentalnych, które wykonano przy użyciu modułu pomiarowego, wykonanego w układzie programowalnym Virtex-4 (*Xilinx*) oraz oprogramowania użytkowego zaprojektowanego w języku C++.

Słowa kluczowe: pomiar kąta, pomiar uderów, przetwarzanie sygnałów analogowych, modulacja delta-sigma, FPGA, przetwornik analogowo-cyfrowy

Symbole UKD: 621.38

1. Wstęp

System pomiarowy przedstawiony w artykule opracowano w związku z dynamicznym powiększaniem się zakresu aplikacyjnego przetworników przeciążeń. O ile dotychczas pomiary tego rodzaju były wykorzystywane głównie w kontrolerach poduszek powietrznych pojazdów i w miernikach wibracji, obecnie stosuje się je w coraz szerszej gamie urządzeń elektronicznych, w tym również w mobilnych urządzeniach osobistych [7, 9], np. w telefonach komórkowych i komputerach przenośnych.

Stosując cyfrowe przetworniki A/C i C/A typu delta-sigma konstruktor ma możliwość wbudowania ich w układy programowalne. Pozwala to na zintegrowanie

niemal kompletnego systemu pomiarowego w jednym układzie. Ponadto, w zależności od aplikacji, w układzie programowalnym można umieścić również układy przetwarzania sygnałów, co odciąża moduł obliczeniowy urządzenia, np. procesor DSP lub mikrokontroler.

2. Pomiar uderów (przebiegów) i położenia kąowego w trzech wymiarach

Pomiar przebiegów jest realizowany przez czujniki przebiegów — akcelerometry. Mierzą one siłę ciężenia ziemskiego (przebieg statyczny) i chwilową wartość przebiegu działającą na czujnik (przebieg dynamiczny). Rozwój technologii MEMS [1] (ang. *micro-electro-mechanical systems*) umożliwił budowę kompaktowych półprzewodnikowych czujników przebiegów o wielu osiach pomiarowych i różnych zakresach pomiarowych (od 1 g do kilku tysięcy g). Technika pomiaru i technologie wykonania są zróżnicowane. Najpopularniejsze są czujniki mierzące przebieg na podstawie zmiany pojemności wewnętrznego kondensatora. Oprócz układu pomiarowego akcelerometry zawierają dodatkowo między innymi układ przeliczający i korekcyjny. Większość akcelerometrów ma wyjście analogowe. Dostępne są również czujniki z wbudowanymi układami przetwarzania sygnału na wielkość cyfrową i układami interfejsów, np. SPI. Czujniki takie są jednak mniej elastyczne w wykorzystaniu i kilkakrotnie droższe od analogowych.

TABELA 1

Charakterystyka wybranych przetworników przebiegu

Nazwa układu i producent	Liczba osi	Zakres pomiarowy [g]	Czułość [mV/g]	Dokładność czułości [%]	Napięcie pracy [V]	Nieliniowość [%]
MXR9500 MEMSIC	3	+/-1,5	500	+/-2	od 2,7 do 3,6	0,5
MXR9150 MEMSIC	3	+/-5	150	+/-2	od 2,7 do 3,6	0,5
MXR2010A-MEMSIC	2	+/-35	10	+/-3	od 2,7 do 5,25	1
ADXL330 Analog Devices	3	+/-3	300	+/-10	od 1,8 do 3,6	0,3
ADXL278 Analog Devices	2	+/-35/50/70	55/38/27	+/-5	od 4,75 do 5,25	0,2
MMA7260 Freescale	3	+/-1,5/2/4/6	800	+/-5	od 2,2 do 3,6	1

W tabeli 1 przedstawiono charakterystykę najbardziej interesujących i najpopularniejszych akcelerometrów o małym zakresie pomiarowym, które są odpowiednie do pomiaru położenia kąowego oraz o średnim zakresie pomiarowym, które są stosowane do pomiaru przeciążeń. W ostatnich dwóch wierszach z wyróżnionym tłem podano parametry przetworników wykorzystanych do budowy modułu pomiarowego opisanego w niniejszej pracy.

Rozwój technologii wytwarzania czujników przyspieszenia jest najbardziej widoczny w zakresie dokładnych czujników trzyosiowych o małym zakresie pomiarowym. W opisywanym systemie jako czujnik przeciążeń wykorzystano miniaturowy akcelerometr trzyosiowy firmy Freescale MMA7260Q [2]. Układ ten ma trzy czujniki przyspieszenia o ortogonalnych względem siebie osiach pomiarowych. Dodatkowo struktura wewnętrzna ma układ kondycjonowania sygnału, filtr dolnoprzepustowy oraz układ kompensacji zmian temperatury otoczenia.

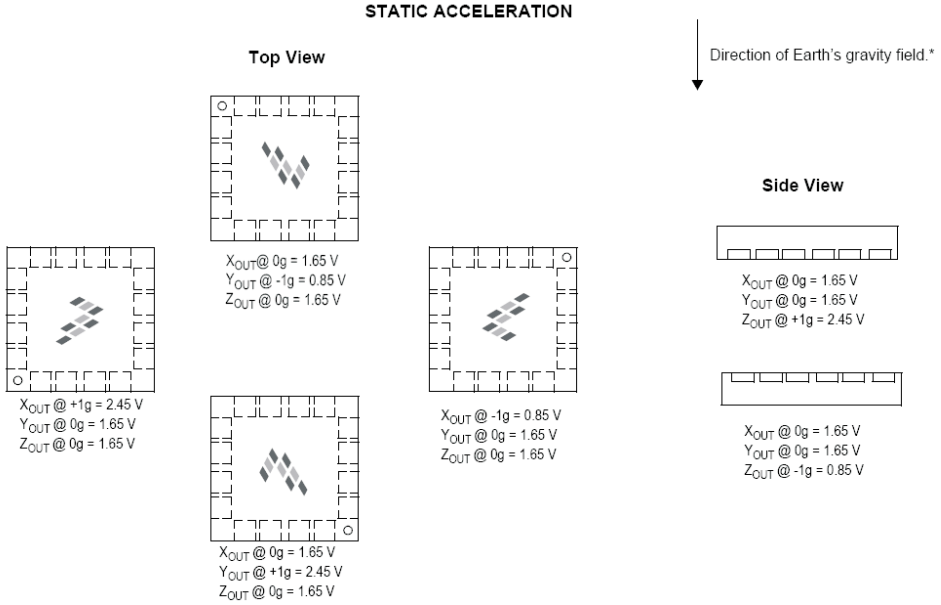
Za pomocą czujników trzyosiowych, mierzących przyspieszenie statyczne, można określić z zależności matematycznych położenie kąowe układu w przestrzeni. Duża czułość wynosząca 800 mV/g i fakt, że akcelerometr może mierzyć przyspieszenie statyczne, pozwala na wykorzystanie układu jako czujnika położenia kąowego względem powierzchni Ziemi [3, 4, 5, 6]. Niskie napięcie zasilania i pobór prądu umożliwiają wykorzystanie układu w urządzeniach przenośnych, zasilanych bateryjnie.

Na rysunku 1 przedstawiono wartości napięć wyjściowych dla każdej z osi akcelerometru przy jego różnych ustawieniach względem powierzchni Ziemi. Dla ustawienia, w którym oś pomiarowa jest równoległa do powierzchni Ziemi, poziom sygnału na wyjściu pomiarowym jest równy połowie napięcia zasilania, natomiast dla napięcia zasilania równego 3,3 V jest to wartość równa 1,65 V. Położenie osi pomiarowej akcelerometru względem Ziemi decyduje nie tylko o wartości przyspieszenia statycznego, ale też o znaku. Jeśli kierunek osi pomiarowej akcelerometru i siły grawitacji Ziemi są zgodne, to zmierzona wartość jest dodatnia i odwrotnie, jeśli osie te są przeciwnie skierowane, to wartość na wyjściu pomiarowym akcelerometru jest ujemna.

Obliczanie wartości kąowych na podstawie zmierzonych wartości napięć może odbywać się według następującej zależności między wartością napięcia, a wartością kąową:

$$\theta = \arcsin \left(\frac{V_{OUT} - V_{OFFSET}}{\Delta V} \right) \quad (1)$$

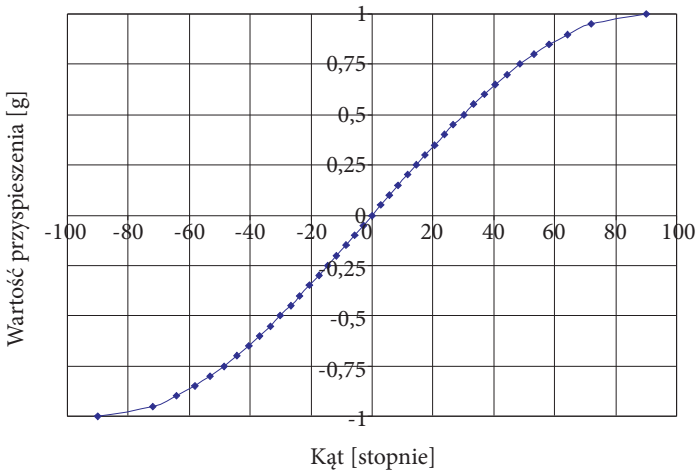
gdzie: V_{OUT} oznacza napięcie wyjściowe akcelerometru, V_{OFFSET} oznacza wartość zmierzoną przez akcelerometr dla przyspieszenia 0 g, $\Delta V/\Delta g$ oznacza czułość akcelerometru, a θ jest kątem osi akcelerometru względem płaszczyzny Ziemi.



* When positioned as shown, the Earth's gravity will result in a positive 1g output.

Rys. 1. Pomiar statycznego przyspieszenia za pomocą akcelerometru MMA7260 [8]

W rzeczywistości czułość akcelerometru nie jest liniowa [5, 6] i jej charakter zbliża się do funkcji sinusoidalnej. Dlatego wykorzystanie zależności (1) do pomiaru kąta wiąże się z dużym błędem, aczkolwiek można za jej pomocą jednoznacznie określić kąty z przedziału od 0° do 180°. Na rysunku 2 przedstawiono wykres za-



Rys. 2. Zależność wartości kąta θ od wartości przyspieszenia

leżności (1) dla wartości kąta od -90° do $+90^\circ$. Z rysunku jednoznacznie wynika, że największą czułość i liniowość można uzyskać dla małych wartości kąta.

Dla zakresu od 0° do 360° konieczne staje się wykorzystanie dodatkowej ortogonalnej osi pomiarowej. Kąt oblicza się z funkcji arcus tangens. Do określenia kąta potrzebna jest także znajomość znaków przyspieszeń [6]. Ponadto wykorzystanie dwóch osi umożliwia wzajemną kompensację zmian czułości.

Do dokładnych pomiarów trzech kątów wymagane jest użycie trzech osi pomiarowych. Określenie kąta w trzech wymiarach wymaga użycia trzech funkcji arcus tangens według następujących zależności:

$$\begin{aligned} \rho &= \arctan\left(\frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}}\right), & \phi &= \arctan\left(\frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}}\right), \\ \theta &= \arctan\left(\frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}{A_z}\right), \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie: A_x, A_y, A_z oznaczają wartości przyspieszenia odpowiednio dla osi X, Y, Z , ρ to kąt pomiędzy osią X a powierzchnią Ziemi, ϕ to kąt pomiędzy osią Y a powierzchnią Ziemi, natomiast θ to kąt pomiędzy osią Z a prostą prostopadłą do powierzchni Ziemi.

Zamiast obliczania wartości kątów za pomocą zależności (1) lub (2) można wykorzystać tablicę wartości (*look-up table*), za pomocą której możliwe jest dokładne przeliczenie wartości napięcia na kąt. Wartości zmierzone przez przetworniki są dekodowane wówczas za pomocą tablicy zapisanej w pamięci wewnętrznej BRAM [5]. Wielkość tablicy uzależniona jest od wymaganej dokładności i rozdzielczości przetwornika A/C. W przypadku korzystania z zależności (2) metoda ta z uwagi na duże wymagania odnośnie pamięci nie nadaje się do zastosowania.

Pomiary przy użyciu czujników przyspieszenia są obarczone wieloma błędami. Charakterystyczny jest w tym przypadku błąd orientacji osi pomiarowych względem obudowy układu. Sposób montażu elementu do płyty PCB również powoduje dodatkowy błąd.

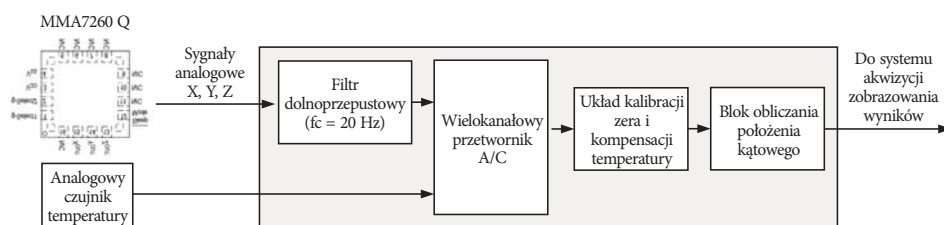
Układy MMA7260Q charakteryzują się szumem RMS zmierzonym w pasmie od 0,1 Hz do 1 kHz równym $350 \mu\text{g} \sqrt{\text{Hz}}$. Stosując ograniczenie pasma sygnału wyjściowego z czujnika filtrem dolnoprzepustowym RC o pasmie 20 Hz można zmniejszyć wpływ tego szumu.

Aby zapewnić odpowiednią dokładność pomiarów dla każdego egzemplarza akcelerometru jest konieczna kalibracja błędu offsetu, ponieważ czujniki tego typu cechują się relatywnie dużym rozrzutem parametrów [10]. W opisywanej aplikacji kalibracja może odbywać się ręcznie, po naciśnięciu stosownego przycisku. Po

ułożeniu płyty w odpowiednim położeniu (oś pomiarowa musi być równoległa do powierzchni Ziemi) i wciśnięciu przycisku pomiaru następuje pomiar wartości kąta i zapamiętanie zmierzonej wartości. Po kalibracji w rejestrach kalibracyjnych znajdują się wartości, będące błędami offsetu dla każdej z osi oraz wartości poprawek dla zerowego przyspieszenia. Układ kalibracji offsetu został skonstruowany tak, aby sam rozpoznawał, która oś jest kalibrowana na podstawie aktualnych wartości na wyjściach czujnika X, Y i Z.

Błąd offsetu zmienia się również w funkcji temperatury. Zmienność wartości tego błędu (współczynnik temperaturowy offsetu) dla układu MMA7260 wynosi nawet $5,8 \text{ mg}/^\circ\text{C}$. W celu jego wyeliminowania zastosowano analogowy czujnik temperatury. Na podstawie wartości aktualnej temperatury wykonywana jest kalibracja temperaturowa offsetu. Zgodnie z dokumentacją producenta czujnika założono, że offset jest liniowy w funkcji temperatury.

Na rysunku 3 przedstawiono schemat blokowy toru pomiaru położenia kąтового.



Rys. 3. Schemat blokowy toru pomiaru położenia kąтового

Pomiar położenia kąowego w większości typowych aplikacjach wymaga czujnika o zakresie pomiarowym równym około $1,5 \text{ g}$ i o niskim poziomie szumów. Taki zakres pomiarowy jest jednak niewystarczający do pomiaru uderzeń. Aby mierzyć również udary, konieczny jest drugi czujnik. Do tego celu wybrano układ ADXL278 firmy Analog Devices. Jest to czujnik dwuosiowy o zakresie pomiarowym $\pm 35/50/70 \text{ g}$ (zakres zależy od wersji układu). Wybrano zakres pomiaru $\pm 35 \text{ g}$, dla którego czułość wynosi 55 mV/g . Wartość sygnału na wyjściu czujnika dla osi równoległej do powierzchni Ziemi dla napięcia zasilania równego 5 V wynosi $2,5 \text{ V}$.

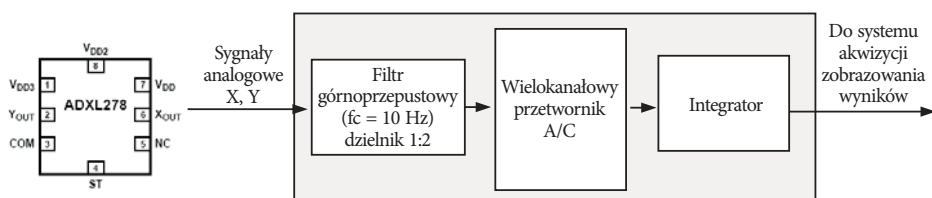
Struktura wewnętrzna układu ADXL278 jest w pełni różnicowa, co ma duże znaczenie dla odporności układu na zakłócenia. Według producenta taka technika zapewnia dziesięciokrotnie lepszą odporność na zakłócenia niż dla układów z unipolarnymi torami pomiarowymi.

Układ ADXL278 ma wbudowany filtr górnoprzepustowy o częstotliwości odcięcia 400 Hz . Dodatkowo zastosowano filtry górnoprzepustowe RC o częstotliwości odcięcia 10 Hz , co rozwiązuje problem kompensacji wartości spoczynkowej. Tak ukształtowane pasmo sygnału jest wystarczające do określenia uderzeń. Układ cha-

rakteryzuje się ponadto relatywnie niskim poziomem szumów równym $3 \text{ mg } \sqrt{\text{Hz}}$. w pasmie pomiarowym od 10 do 400 Hz.

Sygnał po zamianie na postać cyfrową podawany jest na integrator, który oblicza sumę z bezwzględnych wartości próbek sygnałów. W zależności od aplikacji należy odpowiednio dobrać liczbę próbek poddawanych integracji.

Tor pomiaru uderów jest przedstawiony na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat blokowy toru pomiaru uderów

Częstotliwość próbkowania sygnałów z przetworników zgodnie z kryterium Nyquista musi być dwa razy większa niż pasmo mierzonych sygnałów. W rozwanym przypadku jest to odpowiednio 40 i 800 Hz. Są to wielkości z łatwością osiągalne przez wbudowane przetworniki delta-sigma A/C.

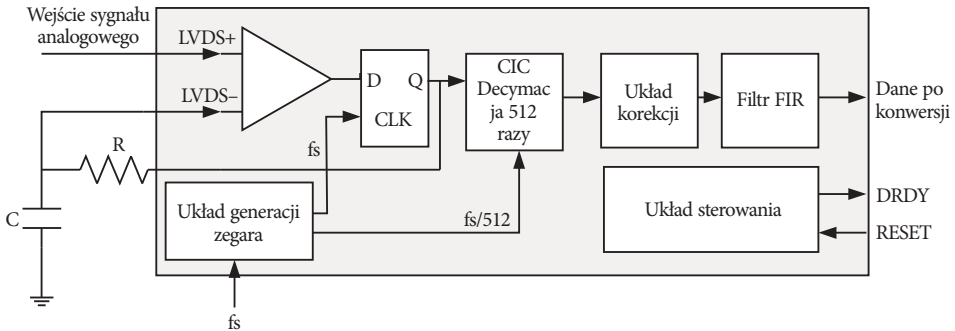
Czujnik MMA7260 został podłączony do wejść przetwornika bezpośrednio, natomiast do czujnika ADXL278 dołączono dzielnik napięcia 1:2. Bezpośrednie połączenie czujnika MMA720 z przetwornikiem jest możliwe ze względu na dopasowanie zakresu sygnałów wyjściowych czujnika i zakresu przetwarzania przetwornika.

3. Moduł przetwarzania sygnałów z czujników

Do konwersji sygnałów analogowych na postać cyfrową wykorzystano przetwornik A/C delta-sigma [11, 12] o strukturze przedstawionej na rysunku 5 [13, 14]. Pozostałe tory przetwornika są identyczne. Wykorzystano łącznie sześć przetworników.

Przetwornik wykorzystuje komparator wejścia typu LVDS układu programowalnego jako komparator analogowy przetwornika A/C. Jednobitowy strumień bitów z przerzutnika typu D zostaje podany na decymator, a następnie do układu korekcji, który koryguje charakterystykę filtru decymującego. Dodatkowy filtr FIR na wyjściu toru przetwarzania tłumi niepożądane sygnały.

W przypadku systemu pomiarowego z ośmiobitowym przetwornikiem A/C zakres czułości kątowej przeliczonej na 1 LSB leży w przedziale od $0,75^\circ$ do $1,32^\circ$ [6]. Zwiększenie rozdzielczości przetwornika do 10 bitów zwiększa czułość do zakresu



Rys. 5. Budowa przetwornika A/C pierwszego rzędu

od $0,171^\circ$ do $0,327^\circ$. Dla przetwornika dwunastobitowego otrzymujemy zakres od $0,05^\circ$ do $0,1^\circ$ i rozdzielczość w mg dla 1 LSB równą $1,007 \text{ mg/1LSB}$. Pojedynczy krok kwantyzacji dla przetwornika dwunastobitowego i zakresu przetwarzania $3,3 \text{ V}$ wynosi $0,8 \text{ mV}$.

Zastosowanie jeszcze większej rozdzielczości przetwornika w systemie o dużych zakłóceniach i szumach może nie przynieść znaczącego przyrostu rozdzielczości kątowej. Ponadto, mimo zwiększania rozdzielczości, rozbieżność zakresu czułości kątowej jest nadal szeroka.

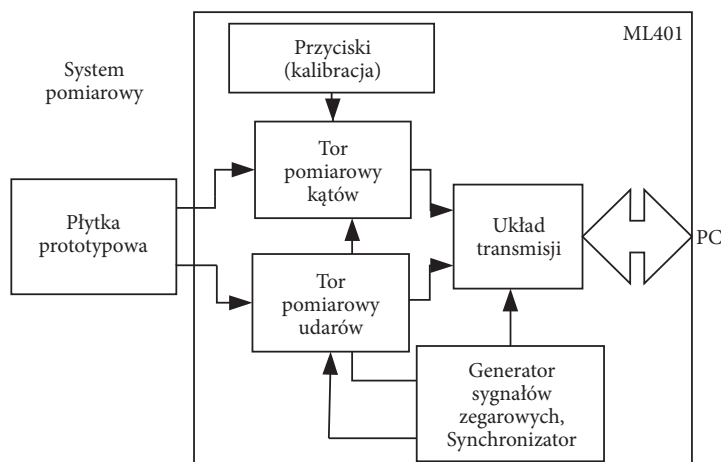
Częstotliwość pracy przetwornika ustalono na 1 MHz , biorąc pod uwagę częstotliwość wewnętrznego przetwornika równą 11 kHz dla układu MMA7260 i pasma przetwarzanych sygnałów analogowych. Zakładając maksymalne pasmo mierzonych sygnałów równe 400 Hz , współczynnik nadpróbkowania dla założonej częstotliwości próbkowania wynosi 1250 . Takie parametry pozwalają na osiągnięcie zakładanej rozdzielczości 12 bitów.

Ponieważ zastosowane czujniki są radiometryczne (ang. *radiometric*), tzn. czułość i wartość napięcia dla przeciążenia zerowego zależą liniowo od napięcia zasilania, korzystnie jest je zasilac z tego samego źródła co układ programowalny. W takim przypadku wahania napięcia referencyjnego przetwornika A/C i napięcia zasilania czujników przyspieszenia równoważą się.

4. Implementacja systemu pomiarowego w układzie programowalnym

System pomiarowy zaimplementowano w układzie programowalnym Virtex-4 XC4VLX25-10 na płycie uruchomieniowej ML401. Układy akcelerometrów, czujnik temperatury oraz filtry RC zamontowano na dodatkowej płycie prototypowej dołączanej do płyty ML401 przez złącze kołkowe. Taka konfiguracja układu pomiarowego pozwoliła na implementację systemu w krótkim czasie.

System zaprojektowano w środowisku WebPack 8.1. Główne bloki funkcjonalne zakodowano w języku VHDL, natomiast pozostałe elementy dyskretnie opisano korzystając z biblioteki. Na rysunku 6 przedstawiono schemat blokowy kompletnego systemu pomiarowego.



Rys. 6. Schemat blokowy układu do pomiaru położenia kąтового i uderów

Układ transmisji przesyła dane pomiarowe do oprogramowania uruchomionego na komputerze PC. Wybrano transmisję szeregową RS-232 z uwagi na wystarczającą szybkość transmisji i łatwość implementacji tego interfejsu w układzie programowalnym.

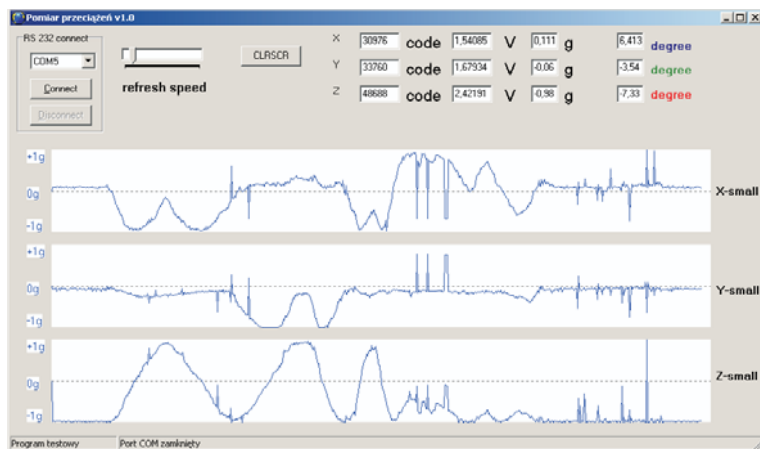
Układ generatora sygnałów zegarowych wykorzystuje zewnętrzny generator kwarcowy o częstotliwości 10 MHz i układ DCM do generacji sygnału zegarowego 1 MHz wykorzystywanego przez przetworniki A/C. Ponadto generuje on sygnały zegarowe dla układu transmisji.

Układ synchronizatora synchronizuje pracę i transfer danych przez układ transmisji.

Cały układ zajmuje mniej niż 10% zasobów logicznych układu Virtex-4 XC4VLX25-10, jeden układ zarządzania zegarem DCM (*Digital Clock Manager*), 6 komparatorów LVDS i 9 standardowych wejść/wyjść.

5. Badania eksperymentalne i podsumowanie

Odbiór danych i wyświetlenie informacji o położeniu wykonuje aplikacja napisana w środowisku Borland C++. Widok okna interfejsu graficznego aplikacji przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Widok okna interfejsu graficznego odbierającej dane z układu pomiarowego

Aplikacja umożliwia odczyt wartości kątów przesłanych przez płytę testową. Jednocześnie odczytane wartości przeciążeń dla układu MMA7260 są podawane w postaci przebiegu czasowego. Użytkownik ma możliwość wyboru szybkości odświeżania pomiarów, czyszczenia ekranu oraz wyboru numeru portu szeregowego COM, do którego podłączone jest urządzenie. W celach testowych do aplikacji dodano okna wyświetlające zmierzone wartości jako: kod cyfrowy, napięcie w woltach, wartość przeciążenia względem Ziemi, oraz wartości kątów w stopniach. Na rysunku 7 przedstawione są przebiegi czasowe przeciążeń uzyskane podczas obracania płytki testowej z układem akcelerometru. Na skutek dużej czułości akcelerometru w przebiegach czasowych widoczne są zakłócenia szpilkowe. Są to uderzenia zarejestrowane przez akcelerometr.

Wstępne wyniki badań potwierdziły prawidłowość architektury systemu pomiarowego. Do pełniejszej oceny dokładności pomiarów konieczne jest zbudowanie specjalistycznego stanowiska pomiarowego.

Przedstawiona aplikacja wykorzystuje układ programowalny FPGA do implementacji przetworników A/C delta-sigma, przeliczenia zmierzonych wartości na miarę fizyczną i przesłania wyników do komputera PC. Tym samym uzyskano zintegrowany układ o niewielkim koszcie wykonania. Z uwagi na niewielką liczbę zajmowanych zasobów układ może być zaprojektowany jako pomocniczy układ pomiarowy w większym systemie.

Artykuł wpłynął do redakcji 14.07.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w październiku 2008 r.

LITERATURA

- [1] Strona internetowa poświęcona technologii MEMS, www.memx.com
- [2] Strona internetowa producenta czujników akcelerometrycznych, www.freescale.com
- [3] *Shock and Mute Pager Applications Using Accelerometers*, Freescale Semiconductor Technical Data, AN1612 Rev 4, 05, 2005.
- [4] *Impact Measurement Using Accelerometers*, Freescale Semiconductor Technical Data, AN1611 Rev 3, 10, 2004.
- [5] *Measuring Tilt with Low-g Accelerometers*, Freescale Semiconductor Technical Data, AN3107 Rev 0, 05, 2005.
- [6] *Tilt Sensing Using Linear Accelerometers*, Freescale Semiconductor Technical Data, AN3461 Rev 2, 06, 2007.
- [7] K. RÓŻANOWSKI, T. SONDEJ, T. RADOMSKI, Z. PIOTROWSKI, *Wielozadaniowy system monitorowania sygnałów fizjologicznych i środowiskowych*, Elektronika, nr 9, 2007, 85-91.
- [8] *±1.5g-6g Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer*, Freescale Semiconductor Technical Data Rev 1, 06, 2005.
- [9] K. EPSTEIN, J. O'LEARY, *Motion Sensing with Accelerometers — Present and Future*, ASEE2006 American Society for Engineering Education Conference, Menomonie, USA, 2006.
- [10] *Implementing Auto-Zero Calibration Technique for Accelerometers*, Freescale Semiconductor Technical Data, AN3447 Rev 0, 03, 2007.
- [11] S. R. NORSWORTHY, R. SCHREIER, G. C. TEMES, *Delta-Sigma Data Converters*, IEEE Press, 1997
- [12] J. C. CANDY, G. C. TEMES, *Oversampling delta-sigma data converters, Theory, design, and simulation*, IEEE, Wiley Interscience, 1992.
- [13] F. SOUSA, *Taking advantage of LVDS input buffers to implement sigma-delta A/D converters in FPGA*, Proc. of the Europ. Conf. on Cir. Theory and Design, Cracow, Poland, 2003, 217-220.
- [14] T. RADOMSKI, R. PEŁKA, *Precyzyjny, konfigurowalny przetwornik analogowo-cyfrowy implementowany w układzie FPGA*, Pomiary, Automatyka, Kontrola, nr 7, 2007, 9-11.

T. RADOMSKI, R. PEŁKA

Measurement of angular position and strokes using delta-sigma A/D converters embedded in FPGA device

Abstract. This paper presents a method for measurements of angular position and strokes using A/D converters embedded in a programmable FPGA device. The converters are based on a delta-sigma modulation principle. Technique for 3D measurement of angular position and appropriate calibration procedure is also described. Practical implementation of the measurement system that uses MMA 7260 (Freescale) and ADXL278 (Analogue Devices) sensors is presented. Results of experimental tests performed using Virtex-4 (Xilinx) programmable device and software application written in C++ are also included.

Keywords: angular position measurement, stroke measurement, analogue signal conversion, delta-sigma modulation, FPGA, A/D converter

Universal Decimal Classification: 531.74.083. 001.5

