

Konrad PRZYGODA, Tomasz POŹNIAK, Damian KACPERSKI

KATEDRA MIKROELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMATYCZNYCH, POLITECHNIKA ŁÓDZKA,
Wólczajska 221/223, 90-924 Łódź

Oparta o układy Spartan 6 wielokanałowa karta pomiarowo-sterująca w systemach sterowania piezoelektrycznych elementów wykonawczych

Dr inż. Konrad PRZYGODA

Otrzymał tytuł dr inż. w dziedzinie elektronika w Katedrze Mikroelektroniki i Technik Informatycznych, Politechniki Łódzkiej w 2011 r. Brał czynny udział w 6 i 7 ramowym projekcie CARE oraz EuCard. Obecnie jest on odpowiedzialny za projekt, instalacje oraz testy systemu sterowania piezoelektrycznych elementów wykonawczych dla eksperymentu XFEL. Dziedziną jego zainteresowań są układy programowalne oraz ich wykorzystanie do sterowania oraz monitorowania elementów piezoelektrycznych.

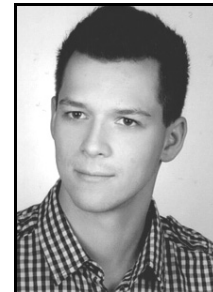
e-mail: kprzygod@dmcs.pl



Inż. Damian KACPERSKI

Otrzymał tytuł inż. w dziedzinie elektronika na Politechnice Łódzkiej w 2012 r. Bierze czynny udział w pracach związanych z projektem systemu sterowania piezoelektrycznych elementów wykonawczych dla akceleratora XFEL. Dziedziną jego zainteresowań jest programowanie wysoko i niskopoziomowe jak i kodowanie w językach opisu sprzętu.

e-mail: damian.kacperski@desy.de



Dr inż. Tomasz POŹNIAK

Otrzymał tytuł dr inż. w dziedzinie elektronika na Politechnice Łódzkiej w 1982 r. Brał czynny udział w projektach: ESPRIT-BARMINT, THERMINIC, TEMPUS, 6 oraz 7 ramowym projekcie CARE oraz EuCard. Obecnie uczestniczy w projekcie wzmacniaczy mocy do sterowania piezoelektrycznych elementów wykonawczych dla akceleratora XFEL. Dziedziną jego zainteresowań są układy elektroniki przemysłowej, przekształtniki elektroniczne oraz impulsowe układy mocy.

e-mail: pozniak@dmcs.pl



Streszczenie

Prezentowany system umożliwia jednoczesną kompensację 16 wnęk rezonansowych zaopatrzonych w podwójne piezoelektryczne elementy wykonawcze. Pracę urządzenia nadzoruje nowoczesny układ reprogramowalny rodziny Spartan 6, umożliwiający nie tylko równoległe przetwarzanie sygnałów cyfrowych, ale także wymianę informacji cyfrowych z wykorzystaniem szybkich interfejsów szeregowych. Artykuł przedstawia pierwsze wyniki testów działania systemu po zainstalowaniu go w hali eksperymentalnej.

Słowa kluczowe: piezoelektryczne elementy wykonawcze, system sterowania, wnęka rezonansowa.

Spartan 6 based multichannel measurement-control board for piezoelectric actuator control systems

Abstract

The system presented in the paper allows simultaneous compensation of 16 resonant cavities equipped with double piezoelectric actuators, as depicted in Fig. 1. The device operation is assured by Spartan 6 FPGA equipped with digital signal processing units and fast serial links. The analog part of the system is based on a matrix of power amplifiers that allows driving the piezo elements with voltages up to ± 70 V. Since the piezo elements can be also used as mechanical vibration sensors, multi-channel ADCs have been applied to provide fast data acquisition. The piezo actuator and sensor functionality can be exchanged remotely using switching relays. The input and output voltage as well as output current of the power amplifiers have been used for monitoring purpose. The piezo control system sends and receives data from the main signal processing unit (μ TCA). The usage of fast serial links enables data throughput up to 125 Mb/s. The paper presents the results of the system performance measurements after its installation in a cryomodule test bench (CMTB). During the tests the main functionality of the module has been checked, as shown in Tab. 1. The system has been also used for adaptive compensation of cavity detuning during RF pulse operation with accelerating field gradients up to 18 MV/m (see Fig. 7). The presented solution will be applied in the incoming X-Ray Free Electron Laser (XFEL) located at Deutsches Elektronen Synchrotron (DESY) in Hamburg.

Keywords: piezoelectric actuators, control system, resonant cavity.

1. Wstęp

Podczas pracy impulsowej bądź ciągłej akceleratora cząstek elementarnych jego struktury przyspieszające mogą ulegać zniekształceniom powodowanym głównie przez siły Lorentza oddziaływujące na cząstki w silnym polu elektrycznym, ale również wszelkiego rodzaju zakłócenia mogące pochodzić z otoczenia zewnętrznego.

Do kompensacji odstrojenia wnęk rezonansowych wykorzystywane są piezoelektryczne elementy wykonawcze wraz z cyfrowo-analogowymi kartami pomiarowo-sterującymi [1]. W Katedrze Mikroelektroniki i Technik Informatycznych w Łodzi opracowano na użytek ośrodka DESY kompletny system kompensacji dla akceleratora FLASH (Free Electron Laser in Hamburg). Obecnie trwają prace badawcze nad wdrożeniem wielokanałowej karty pomiarowo-sterującej, będącej integralną częścią systemu sterowania piezo elementów dla przyszłego akceleratora XFEL.

2. Wymagania dla systemu pomiarowo-sterującego

Projektowany system powinien spełniać następujące wymagania ogólne:

- praca synchroniczna, wyzwalana przez zewnętrzny sygnał zegarowy,
- 16 torów pomiarowo-sterujących (z możliwością zamiany torów czujnik / element wykonawczy),
- komunikacja ze środowiskiem zewnętrznym z wykorzystaniem interfejsu szeregowego o prędkości do 125 Mb/s.

Obwód sterowania piezoelektrycznych elementów wykonawczych powinien posiadać następujące parametry:

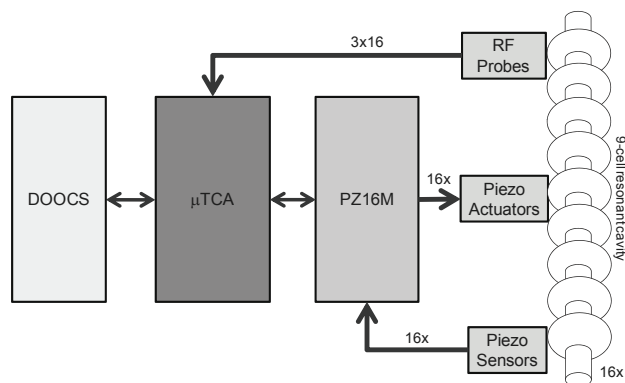
- praca z obciążeniem pojemnościowym; $2 \div 5 \mu\text{F}$,
- amplituda napięcia sygnału wyjściowego; ± 70 V,
- pasmo (3 dB) przy wysterowaniu nominalną amplitudą i przy nominalnym obciążeniu; $(\text{DC}) \div 1$ kHz
- poziom przesłuchu pomiędzy torami sterującymi; -60 dB,
- obwód mocy powinien posiadać zabezpieczenia zarówno nadnapięciowe (± 120 V) jak i nadprądowe (1.5 A).

Obwód pomiarowy piezo elementu użytego jako czujnik drgań mechanicznych komór rezonansowych powinien posiadać takie parametry jak:

- impedancja wejściowa; $Z_{in} \geq 4$ k Ω ,
- zakres napięcia wejściowego; ± 5 V,
- pasmo (3 dB) dla sygnału mierzonego; $(\text{DC}) \div 1$ kHz,
- częstotliwość próbkowania toru pomiarowego; 20 kHz,
- poziom przesłuchów pomiędzy torami pomiarowymi; -60 dB.

3. Karta pomiarowo-sterująca w systemach kompensacji piezoelektrycznych elementów wykonawczych

System sterowania piezoelektrycznych elementów wykonawczych składa się z karty pomiarowo-sterującej (PZ16M), systemu sterownia polem w. cz. (μ TCA) oraz komputera nadzorującego (DOOCS), jak pokazano na rys. 1.

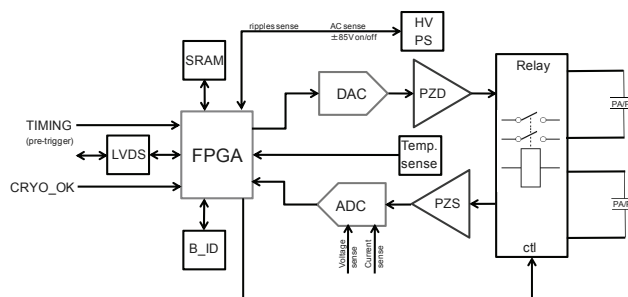


Rys. 1. Schemat blokowy systemu sterowania piezo elementami
Fig. 1. Block diagram of the control system for piezo elements

Karta pomiarowo-sterująca jest bezpośrednio podłączona do elementów piezoelektrycznych zamontowanych wewnątrz modułu przyspieszającego składającego się z 16 wnęk rezonansowych (9-cell resonant cavity). Umożliwia ona zarówno sterowanie piezo elementami wykonawczymi (Piezo Actuators) jak i odczyt napięć z czujników piezoelektrycznych (Piezo Sensors). System sterowania polem w. cz. jest odpowiedzialny za pomiar podstawowych parametrów pola przyspieszającego jak i pomiar odstrojenia wnęki od częstotliwości rezonansowej (sygnał błędny). Na podstawie pomierzonego sygnału błędny generowany jest odpowiedni sygnał korekcji, który jest następnie przesyłany do karty pomiarowo-sterującej [2].

Komputer nadzorujący jest odpowiedzialny za monitorowanie oraz ustawienia podstawowych parametrów konfiguracyjnych systemu kompensacji. Do tych celów wykorzystywana jest aplikacja typu klient-serwer. Panel operatorski – klient komunikuje się z serwerem DOOCS (Distributed Object Oriented Control System), który za pomocą dedykowanych sterowników urządzeń wysyła lub czyta dane ze sprzętu.

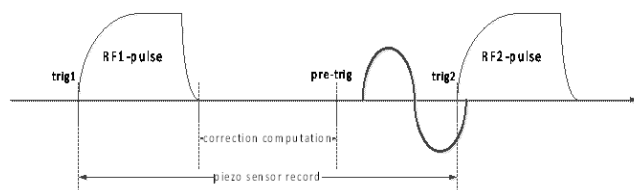
Karta pomiarowo-sterująca jest nadzorowana przez dedykowany układ FPGA z rodziny Spartan 6 firmy Xilinx. Układ reprogramowalny ma za główne zadanie odebrać dane cyfrowe z systemu μ TCA i przesłać je do przetwornika DAC w celu wystereowania odpowiednich torów korygujących zaopatrzonych we wzmacniacze mocy. Bardzo ważną funkcją układu FPGA jest także odesłanie danych pomierzonych z czujników piezoelektrycznych, po ich wcześniejszej zamianie na postać cyfrową z wykorzystaniem przetworników ADC. W celu zamiany jednego piezo elementu z drugim (dostępne są podwójne piezo elementy dla każdej wnęki rezonansowej), został zaprojektowany odpowiedni układ przełączający oparty o przekaźniki (Relay). Do dodatkowych funkcji układu FPGA należą: pomiar temperatury (Temp. sense), pomiar napięcia zasilania układów mocy (ripples sense, AC sense), pomiar napięć wejściowych, wyjściowych oraz prądu wyjściowego obwodu mocy (Voltage sense, Current sense). Karta pomiarowo-sterująca jest zaopatrzona także w indywidualny numer identyfikacyjny (B_ID) jak i w możliwość inteligentnej kontroli zasilania układów mocy ($\pm 85V$ on/off). Dodatkowo do karty doprowadzony jest sygnał bezpieczeństwa (CRYO_OK), który informuje czy moduł przyspieszający może być strojony przez piezo elementy. System jest zsynchronizowany z zewnętrznym zegarem systemowym (TIMING). Schemat blokowy karty pomiarowo-sterującej pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Schemat blokowy karty pomiarowo-sterującej piezo elementami
Fig. 2. Block diagram of the measurement-control board for piezo elements

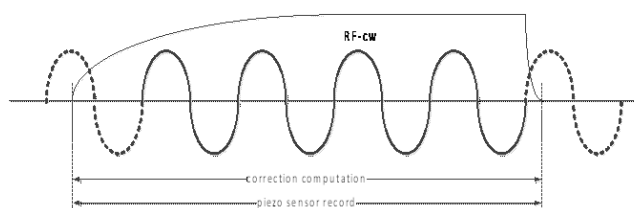
4. Implementacja sterownika sprzętowego

Sterownik sprzętowy ma za zadanie odczytać sygnał błędny w czasie trwania impulsu pola w.cz. (RF-pulse), a następnie wygenerować i przesłać dane korygujące do karty pomiarowo-sterującej (correction computation). Dla pracy impulsowej sygnał korekcji powinien zostać wygenerowany przed pojawieniem się kolejnego impulsu pola w. cz. o czasie trwania około 2 ms (odstęp pomiędzy sygnałem trig1 a trig2 wynosi 100 ms), tzn. po pojawieniu się sygnału – pre-trig, który jest generowany 17 ms przed pojawieniem się kolejnego sygnału synchronizacji trig2 (rys. 3).



Rys. 3. Przebiegi czasowe sterownika piezo dla pracy impulsowej akceleratora
Fig. 3. Timing diagrams of the piezo control system for pulse operation of the accelerator

Dla pracy ciągłej akceleratora korekcja powinna przebiegać przez cały czas trwania impulsu pola przyspieszającego (RF-cw) o regulowanym wypełnieniu D mieszczącym się w zakresie od 20 do 100%, co odpowiada długościom impulsów od 0,1 do 1 sekundy. Pracę ciągłą sterownika schematycznie pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Przebiegi czasowe sterownika piezo dla pracy ciągłej akceleratora
Fig. 4. Timing diagrams of the piezo control system for continuous wave operations of the accelerator

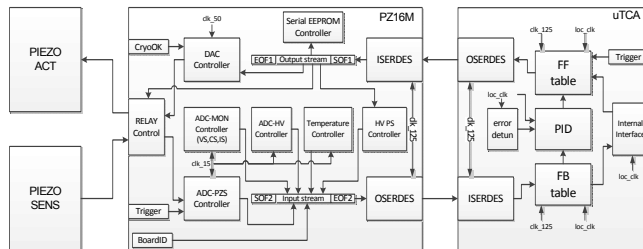
Dla obu trybów pracy powinien być dostępny odczyt napięć z czujników piezoelektrycznych (piezo sensor record).

Zaimplementowany sterownik sprzętowy został podzielony na dwie zasadnicze części: PZ16M oraz μ TCA. Poszczególne bloki jak i sposób przepływu danych pokazano na rys. 5. Bardzo ważnym elementem systemu kompensacji jest sterownik zaimplementowany z wykorzystaniem płyty μ TCA [3]. Składa on się z następujących modułów:

- error detun (blok obliczający sygnał błędny),
- FF table (tablica sterowania w przód),
- FB table (tablica sprzężenia zwrotnego),
- PID (człon proporcjonalno-całkująco-różniczkujący).

Tablice sterowania w przód są wykorzystywane podczas pracy impulsowej akceleratora. Na podstawie procedury skanującej, gdzie nagrywane jest zarówno wymuszenie jak i odpowiedź systemu na to wymuszenie, generowana jest odpowiednia tablica

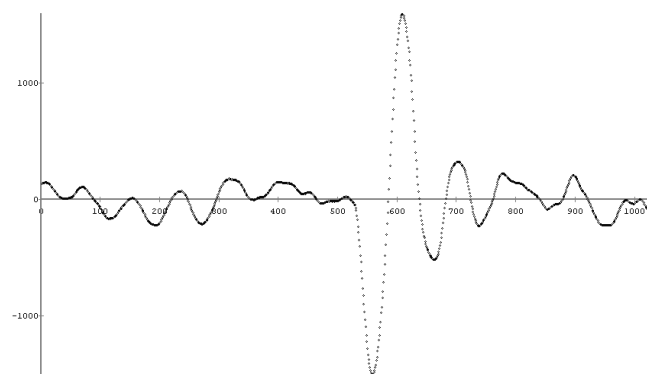
sterująca. Tablica ta jest następnie wykorzystywana do wygenerowania odpowiedniego wymuszenia korygującego. Zaprezentowana metoda adaptacyjna generuje nowy sygnał korekcyjny co 100 ms. Tablice sprzężenia zwrotnego są używane zarówno do monitorowania napięć z czujników piezoelektrycznych jak i do sterowania w pętli sprzężenia zwrotnego przy pracy ciągłej akceleratora, gdzie wykorzystano regulator proporcjonalno-całkujący (PI) (po wstępnej analizie zrezygnowano z członu różniczkującego). Sygnał błędny w tym trybie pracy jest wyliczany na podstawie różnicy faz napięcia przyłożonego do wnęki (napięcie to jest proporcjonalne do mocy dostarczonej do rezonatora ze źródła generatora - klistronu), a napięcia zaindukowanego wewnątrz wnęki (napięcie to jest proporcjonalne do natężenia pola przyspieszającego). Uchyb regulacji wyliczany jest z częstotliwością około 4,5 MHz. Jednak samo pasmo regulacji zostało znacznie obniżone do poziomu z zakresu (20-60) kHz, tak aby wnęka była w stanie zareagować na wymuszenie przyłożone do elementu piezoelektrycznego. Integralną częścią sterownika są także bloki komunikacyjne. Dla interfejsu szeregowego są to: ISERDES oraz OSERDES, dla interfejsu PCIe jest to Internal Interface.



Rys. 5. Schemat blokowy sterownika piezo elementów
Fig. 5. Block diagram of the piezo element driver

5. Wyniki badań

Opisany system kompensacji odstrojenia komór rezonansowych został zainstalowany w hali eksperymentalnej CMTB oraz przetestowany podczas pracy impulsowej akceleratora testowego. W celu weryfikacji poprawnej pracy systemu wszystkie jego kanały wysterowano sygnałem o amplitudzie 10 V. Podczas pracy systemu dokonano pomiarów: napięć z piezo elementów użytych jako czujniki drgań (Rys. 6), napięć zasilających oraz temperatury wzmacniaczy mocy ($T_0 \sim 23^\circ\text{C}$).



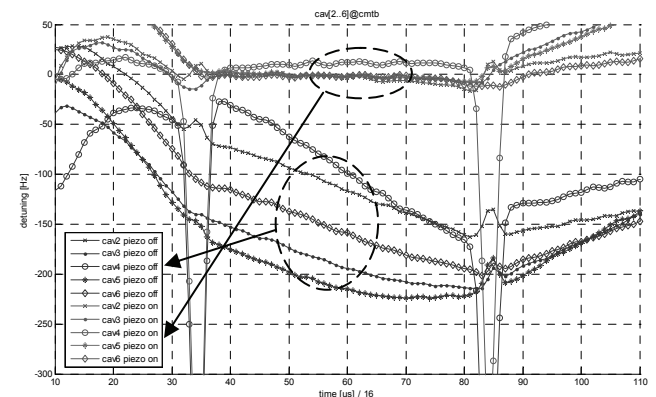
Rys. 6. Odczyt napięcia z czujnika piezoelektrycznego dla wnęki #1 (oś pionowa wyrażona w jednostkach cyfrowych 16 bitowego przetwornika ADC, oś pozioma wyrażona w próbkach, częstotliwość próbkowania ustawiono na 20 kHz)
Fig. 6. Piezo sensor readout for cavity #1 (vertical axis means amplitude in discrete units of 16 bits ADC, horizontal axis means samples, sampling frequency set to 20 kHz)

Pomiary przeprowadzono dla położenia przełączników w pozycji sterowania górnego rzędu piezo elementów, a następnie w pozycji sterowania dolnego rzędu, po przełączeniu przełączników z pozycji zero w pozycje jeden (tab. 1).

Tab. 1. Wyniki pomiarów parametrów karty PZ16M
Tab. 1. Measurement results of PZ16M module

Stan przełącznika	U_{we}	U_{wy}	I_{wy}	Temp.	V_{cc}	V_{ss}
Pozycja 0	1,0 V	10,1 V	0,1 A	24,3 °C	85,2 V	-85,6 V
Pozycja 1	1,0 V	10,2 V	0,1 A	24,1 °C	85,1 V	-85,9 V

Kolejnym etapem testów systemu kompensacji było wysterowanie poszczególnych wnęk polem w. cz. o częstotliwości powtarzania impulsów do 10 Hz. Sterownik pola w. cz. został nastawiony na wartość 100 MV, co odpowiadało gradientowi pola elektrycznego ~ 18 MV na każdy metr długości pięciu dostępnych komór rezonansowych. Eksperyment przeprowadzono dwukrotnie. Raz gdy sterownik piezoelementów był wyłączony, a następnie włączony w tryb pracy adaptacyjnej jak pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Pomiar odstrojenia dla wnęk #2-6 (na osi pionowej odstrojenie w Hz, na osi poziomej czas w μs)
Fig. 7. Detuning measurements for cavities #2-6 (on vertical axis is detuning in Hz, on horizontal axis is time in μs)

6. Wnioski

Zaprezentowany system kompensacji składający się z dedykowanej karty pomiarowo-sterującej został zaprojektowany, zainstalowany i przetestowany w hali eksperymentalnej CMTB. Podczas kilku godzinnych testów zweryfikowano poprawność działania poszczególnych elementów systemu. Dla 5 dostępnych wnęk rezonansowych dokonano jednoczesnego strojenia adaptacyjnego, umożliwiającego redukcję odstrojenia od kilkudziesięciu Hz do poziomu nieprzekraczającego kilkunastu Hz. Zaprezentowane rozwiązanie będzie użyte do sterowania piezo elementów w akceleratorze XFEL, którego uruchomienie w ośrodku DESY planowane jest na rok 2013.

Praca finansowana jest ze środków projektu EuCARD FP7 grant agreement no. 227579.

7. Literatura

- [1] Cargano R., Branlard J., Chase B., Edwards H., Orris D., Pischnalnikov Y., Makulski A., Reid J., Schappert W.: First Fermilab Results of SRF Cavity Lorentz Force Detuning Compensation Using a Piezo Tuner. Materiały konferencyjne, konferencja SRF, 2007, s. 259-263.
- [2] Przygoda K., Poźniak T.: Układy Virtex i Spartan w systemach kompensacji sił Lorentza w akceleratorach. Pomiary Automatyka Kontrola, nr 8, 2011, s. 917-919.
- [3] Makowski D., Jabłoński G., Mielczarek A., Napieralski A., Prędko P., Perek P., Jeżyński T., Ludwig F., Schlarb H.: μTCA -based Controller. Materiały konferencyjne, konferencja MIXDES, 2011, s. 165-170.

otrzymano / received: 02.04.2012

przyjęto do druku / accepted: 01.06.2012

artykuł recenzowany / revised paper