

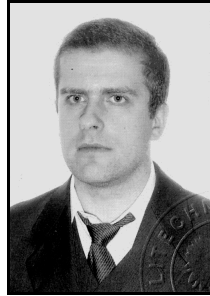
Konrad PRZYGODA, Tomasz POŹNIAK

POLITECHNIKA ŁÓDZKA, KATEDRA MIKROELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMATYCZNYCH

## Oparty o cyfrowe układy reprogramowalne i analogowe wzmacniacze mocy system kompensacji odkształceń wnęk nadprzewodzących w akceleratorach liniowych

Mgr inż. Konrad PRZYGODA

Doktorant w Katedrze Mikroelektroniki i Techniki Informatycznych Politechniki Łódzkiej. Specjalność: Systemy mikroprocesorowe i układy programowalne. Dziedziny aktywności zawodowej: projektowanie i programowanie systemów mikroprocesorowych z wykorzystaniem mikrokontrolerów rodziny Freescale, projektowanie systemów sterowania w językach opisu sprzętu z wykorzystaniem dedykowanych układów programowalnych FPGA.



e-mail: kprzygod@dmc.pl

Dr inż. Tomasz POŹNIAK

Adiunkt w Katedrze Mikroelektroniki i Techniki Informatycznych Politechniki Łódzkiej. Specjalność: przyrządy półprzewodnikowe, układy elektroniczne. Dziedziny aktywności zawodowej: miernictwo półprzewodnikowych przyrządów mocy i badania zjawisk dynamicznych w strukturach półprzewodnikowych przyrządów mocy, modelowanie, projektowanie i badanie układów impulsowych mocy oraz układów Smart Power.



e-mail: pozniak@dmc.pl

### Streszczenie

Podczas pracy impulsowej akceleratora, komory nadprzewodzące ulegają odkształceniom. Do ich kompensacji stosowane są piezoelektryczne elementy wykonawcze sterowane przez wzmacniacze mocy. Jest to część analogowa systemu. Do części cyfrowej zalicza się kontroler oparty o reprogramowalne układy cyfrowe. Wzmacniacze mocy wzmacniają sygnał korekcyjny do poziomu umożliwiającego wystawienie elementów wykonawczych, zaś kontroler wylicza odpowiedź wnęk na ten sygnał. Wszystkie bloki obliczeniowe zostały zoptymalizowane pod względem zajętości zasobów układu reprogramowalnego. Artykuł przedstawia wyniki testów opisywanego systemu w środowisku akceleratora liniowego FLASH.

**Słowa kluczowe:** układy reprogramowalne FPGA, przetwarzanie potokowe, wzmacniacz mocy, piezoelektryczne elementy wykonawcze, wnęka nadprzewodząca, odstrojenie wnęki, akcelerator liniowy.

### Compensation System Based on FPGA Devices and Analog Power Amplifiers for Correction of Superconducting Cavities' Deformations in Linacs

#### Abstract

The Superconducting (SC) cavities are deformed during the pulse operation of the linear accelerators. Power amplifiers together with piezoelectric actuators are used for the compensation purpose as an analog parts of the system. The digital part consists of dedicated control board - Simcon DSP based on FPGA device Virtex II Pro from Xilinx. The power amplifiers - Piezo Drivers are used to amplify the correction signal with the proper voltage levels allowing to drive the actuators. The cavities' response for compensation signal - detuning is calculated by digital controller. The computation blocks were optimized to meet available FPGA resources and latency of 10 ns. The detuning result will be applied for closed feedback operation of the controller. The paper presents the recent development of the system and performed tests in FLASH (Free Electron Laser in Hamburg) accelerator.

**Keywords:** FPGA, pipeline computation, power amplifier, piezoelectric actuators, superconducting cavity, cavity detuning, linear accelerator.

### 1. Wstęp

W ośrodku badawczym DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron) w Hamburgu projektowane są i budowane akceleratorzy przyspieszające cząstki do wysokich energii. Urządzenia te wykorzystują moduły z wnękami rezonansowymi do przyspieszania elektronów i pozytonów do energii rzędu TeV. Komory rezonansowe wykonane z czystego niobu w temperaturach bliskich zera bezwzględnego (2K), uzyskują właściwości nadprzewodzące.

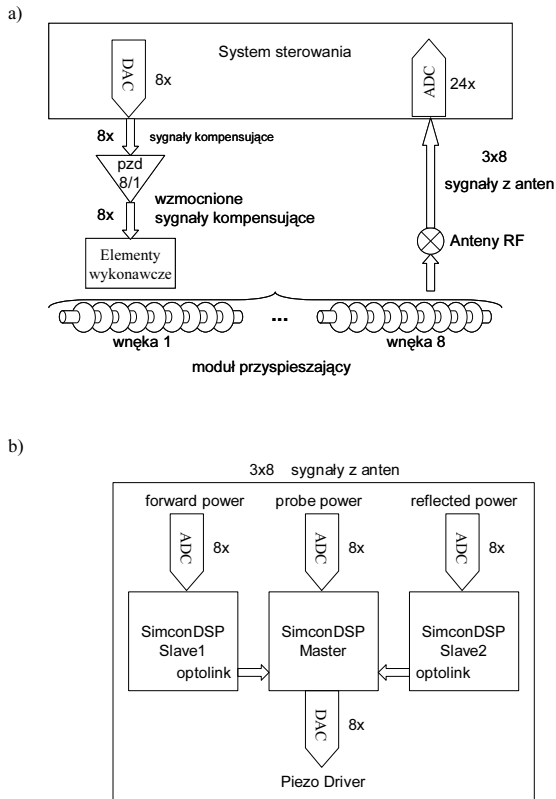
Wnęki przystosowane są do pracy z falami elektromagnetycznymi o częstotliwości 1,3 GHz. Podczas pracy impulsowej akceleratora, komory ulegają odkształceniom, co jest równoznaczne z odstrojeniem ich od rezonansu oraz wzrostem tłumienia i znacznymi stratami w systemie. Podstawowymi źródłami odkształceń są siły Lorentza oraz zakłócenia z zewnątrz. Pierwsze z nich są powtarzalne i powodują odstrojenie o setki Hz. Drugie z nich są nieprzewidywalne i przypadkowe, odstrajając wnęki o kilkadziesiąt Hz. Zmiana długości wnęki o kilka nanometrów powoduje odstrojenie jej o kilkaset Hz. Podstawowymi elementami, systemu do kompensacji odkształceń wnęk rezonansowych, są zamontowane wewnątrz modułu przyspieszającego piezoelektryczne elementy wykonawcze. W akceleratorze liniowym FLASH znajduje się 6 modułów przyspieszających (ACC). Każdy moduł składa się z 8 wnęk nadprzewodzących. Jednak tylko moduły ACC 3, 5 i 6 zostały wyposażone w elementy wykonawcze. Aby skompensować cały moduł, zostały zaprojektowane i wykonane 8-kanałowe wzmacniacze mocy. Do wyliczenia odstrojenia wnęk nadprzewodzących oraz wygenerowania sygnału kompensującego o odpowiednim kształcie, zastosowane zostały układy reprogramowalne, będące integralną częścią płyty prototypowej kontrolera Simcon DSP. W artykule zostały opisane podstawowe jednostki funkcjonalne systemu kompensującego wraz z algorytmami sterującymi oraz wyniki testów i badań przeprowadzonych w środowisku akceleratora.

### 2. System kompensacji odkształceń wnęk rezonansowych

System kompensacji odkształceń wnęk rezonansowych składa się z dwóch części: cyfrowej i analogowej (rys. 1a) [1]. Część cyfrową stanowi kontroler oparty o reprogramowalny układ cyfrowy Virtex II Pro firmy Xilinx. Układ programowalny jest używany do wyliczenia odstrojenia wnęki oraz wygenerowania odpowiedniego sygnału kompensującego. Płyta kontrolera wyposażona jest w szybkie przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe. Służą one do pomiaru napięć odczytanych z anten wysokich częstotliwości oraz do sterowania częścią analogową systemu. Wynik odstrojenia pozwala oszacować czy kompensacja w danym kroku powinna się zakończyć, czy potrzebna jest dalsza korekcja sygnału kompensującego.

Obecnie system jest w fazie rozwojowej. Do testowania poszczególnych jednostek systemu wykorzystywane są różne konfiguracje prototypowych płyt kontrolera Simcon DSP. Do wystawiania 8-kanałowego wzmacniacza używana jest płyta Simcon DSP w wersji z ośmioma przetwornikami cyfrowo-analogowymi, zaś do wyliczenia odstrojenia z 8 wnęk trzy płyty Simcon DSP komunikujące się ze sobą z wykorzystaniem transmisji światłowodowej. Taka konfiguracja zapewnia

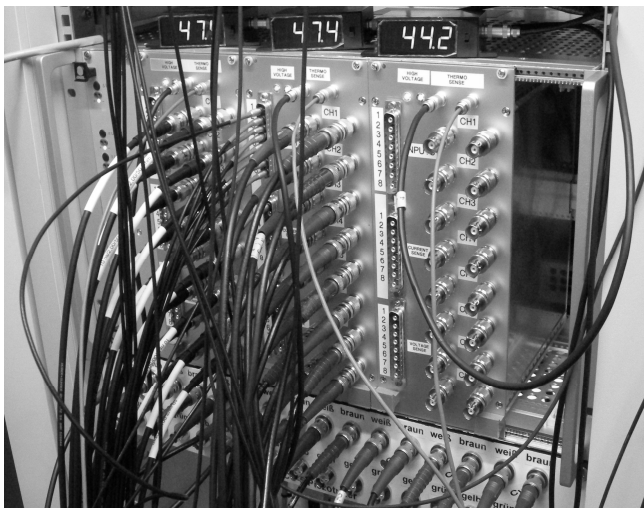
możliwość odczytywania 24 sygnałów z ośmiu wnęk, po 3 na każdą wnękę (rys. 1b) [1]. W przyszłości karty pomiarowo-sterujące wyposażone będą w 32 kanały przetworników cyfrowo-analogowych i analogowo-cyfrowych. Pozwoli to zmniejszyć liczbę kart potrzebnych do ostatecznej instalacji projektowanego systemu.



Rys. 1. Schemat blokowy systemu kompensacji odkształceń komór nadprzewodzących (a), schemat blokowy części cyfrowej systemu kompensującego (b)

Fig. 1. Block diagram of compensation system for correction of SC cavities' deformations (a), block diagram of digital part of compensation system (b)

Do części analogowej systemu zaliczają się 8-kanałowe wzmacniacze mocy - Piezo Driver, sterujące piezoelektrycznymi elementami wykonawczymi (rys. 2).

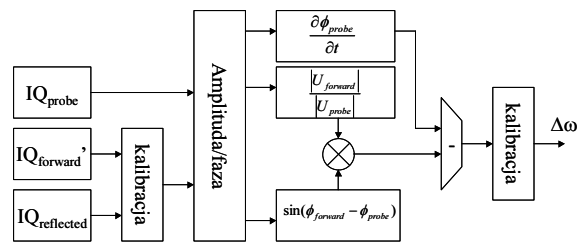


Rys. 2. Kasetka z trzema 8-kanałowymi wzmacniaczami mocy  
Fig. 2. Crate with three 8-channels power amplifiers

Składają się one ze wzmacniaczy mocy PB51 firmy APEX, sterowanych przez wzmacniacze operacyjne OP177 firmy Analog Devices [2, 3]. Jednostki Piezo Driver wyposażone są w zabezpieczenia nadnapięciowe obwodów wejściowych, wyjściowych oraz zasilania. Maksymalne napięcie wejściowe to  $\pm 1V$ , maksymalne napięcie zasilające to  $\pm 130V$ , zaś maksymalne napięcie na wyjściu każdego z kanałów to  $\pm 100V$ . Wzmocnienie całego toru wzmacniacza zostało ustawione na 100V/V. Ponadto istnieje możliwość monitorowania temperatury pracy wzmacniaczy z wykorzystaniem analogowych i cyfrowych termometrów firmy National Semiconductors.

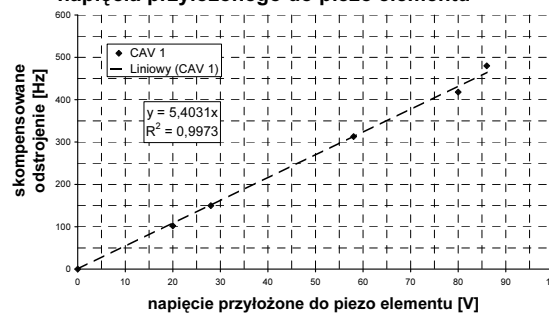
### 3. Algorytmy sterujące

Algorytmy sterujące podzielono na dwie główne części. Są to: algorytm do liczenia odstrojenia oraz algorytm do generacji sygnału kompensującego. Na podstawie informacji o odstrojeniu wnęki, generowany jest sygnał kompensujący o odpowiednim kształcie. Algorytm bazuje na modelu elektromechanicznym wnęki i jest liczony wg sieci jak na rysunku 3 [4]:

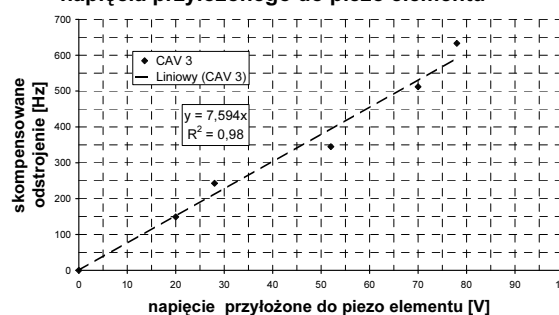


Rys. 3. Schemat blokowy algorytmu do wyliczenia odstrojenia wnęki  
Fig. 3. Block diagram of a cavity detuning computation algorithm

#### Zdolność kompensacyjna w zależności od napięcia przyłożonego do piezo elementu



#### Zdolność kompensacyjna w zależności od napięcia przyłożonego do piezo elementu

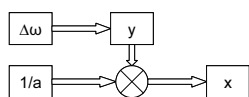


Rys. 4. Zdolność kompensacyjna w zależności od napięcia przyłożonego do piezo elementu

Fig. 4. Compensation ability vs. voltage applied to piezo element

Dane wejściowe algorytmu to napięcia odczytane z anten wysokich częstotliwości w postaci składowej synfazowej(I) i kwadraturowej(Q). Są one proporcjonalne do fali elektromagnetycznej docierającej do wnęki ( $U_{\text{forward}}$ ), pola we wnęcie ( $U_{\text{probe}}$ ) oraz fali odbitej od rezonatora ( $U_{\text{reflected}}$ ). W celu eliminacji składowej odbitej dokonywany jest na samym początku obliczeń proces kalibracji. Następnie wykonywane są obliczenia amplitudy i fazy poszczególnych pól z wykorzystaniem algorytmu CORDIC(Cordinate Rotation Digital Computer). Proces dzielenia numerycznego oraz wyliczania funkcji trygonometrycznej sinus zostały zrealizowane za pomocą interpolatorów liniowych. Końcowy wynik odstrojenia jest normalizowany względem połowy pasma przenoszenia wnęki ( $\omega_{1/2}$ ). Punktem wyjścia do opracowania algorytmu generacji sygnału kompensującego stała się analiza wyników pomiarów zdolności kompensacyjnej w zależności od napięcia przyłożonego do piezo elementu (rys. 4). Dokonano liniowej aproksymacji otrzymanych wyników.

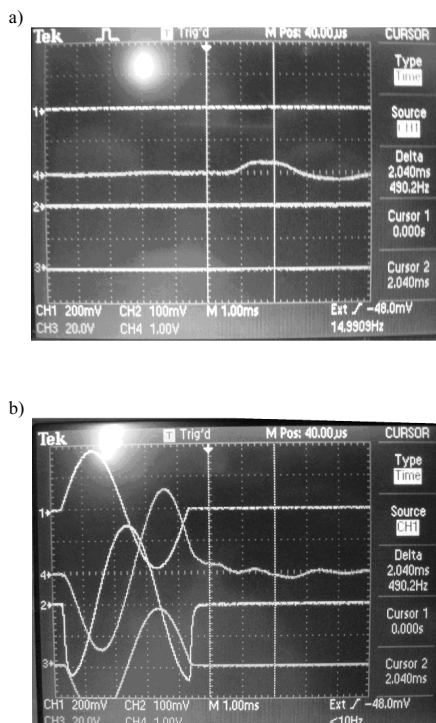
Na tej podstawie można wyliczyć amplitudę sygnału kompensującego. Poglądowy schemat blokowy algorytmu pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Algorytm korekcji sygnału kompensującego na podstawie wyliczonego odstrojenia

Fig. 5. The algorithm of automatic correction of compensation signal using detuning information

Podstawowy kształt sygnału kompensującego jest aproksymowany wartościami funkcji sinus. Funkcja ta najbardziej odpowiada kształtem drganiom mechanicznym wnęki odczytanym przy użyciu piezoelektrycznych czujników drgań (rys. 6a).



Rys. 6. Odpowiedź wnęki bez (a) i z sygnałem kompensującym – przebieg nr 4 (b)

Fig. 6. Cavity response without (a) and with compensation signal – curve nr 4 (b)

Podanie sygnału o takim kształcie i danej amplitudzie w przeciwfazie do drgań wnęki, daje najbardziej efektywną kompensację (rys. 6b). Drugim z parametrów sygnału kompensującego jest jego wyprzedzenie w stosunku do

pojawienia się pola we wnęcie. Czas ten wyznaczono na podstawie przeprowadzonych pomiarów częstotliwości drgań mechanicznych wnęki, mieszczących się w przedziale częstotliwości od 250 Hz do 300 Hz.

#### 4. Implementacja w sprzęcie

Algorytmy sterujące zostały zaimplementowane w układzie programowalnym Virtex II Pro - XC2VP50 firmy Xilinx. Układ ten charakteryzuje się następującą architekturą: posiada 18-bitowe mnożarkę, 1024-elementowe bloki pamięci, wbudowane moduły transmisji optycznej. Wszystkie operacje arytmetyczne są wykonywane z użyciem słów 18-bitowych zapisywanych w kodzie uzupełnień do 2 ( $U_2$ ). Wyniki obliczeń są zapisywane do wewnętrznych bloków pamięci. Tak zapisane dane mogą być następnie analizowane z użyciem dedykowanych interfejsów komunikacyjnych.

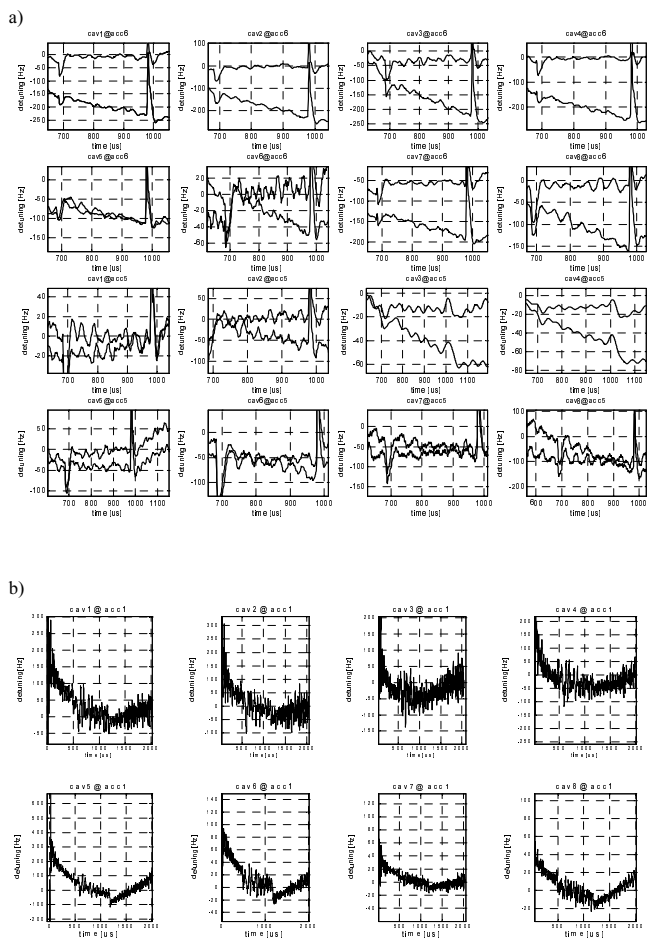
Podstawą implementacyjną algorytmów jest przetwarzanie potokowe danych. Próbkę są wpuszczane do potoku obliczeniowego z użyciem multiplekserów. Po zakończeniu danego ciągu obliczeniowego są demultipleksowane w celu np. zapamiętania we wbudowanych pamięciach RAM. Bloki rozpoczynające potok, zostały zoptymalizowane w ten sposób, że generują sygnał ważności danych w potoku przez tyle cykli zegarowych ile jest kanałów wejściowych. Dzięki temu uniknięto konieczności używania liczników zliczających ilość kanałów wejściowych w każdym z etapów obliczeniowych. Podstawową zaletą takiego rozwiązania jest minimalizacja wykorzystywanych przez algorytm zasobów układu programowalnego. Jednostka obliczeniowa, zaimplementowana w sposób potokowy, zmniejsza n-krotnie zużycie zasobów w porównaniu ze strukturą równoległą. Z czego n oznacza ilość kanałów wejściowych użytego multipleksera.

Niewątpliwą zaletą struktury potokowej jest także ilość cykli zegarowych potrzebnych do ukończenia danego algorytmu, która dla pojedynczego kanału wejściowego wynosi tyle samo co dla struktury równoległej. Jednak czas obliczeń dla wszystkich kanałów wejściowych jest n-krotnie dłuższy, w porównaniu ze strukturą równoległą. W algorytmie do liczenia odstrojenia wnęk rezonansowych, próbki z przetworników są odczytywane co 1  $\mu$ s. Ukończenie całego algorytmu wymaga 44 cykli zegarowych. Przy zegarze systemowym 50 MHz, daje to zapas 6 cykli zegarowych przed pojawieniem się nowej próbki. Algorytmy liczące odstrojenie wnęk przetestowano także przy częstotliwościach 75 MHz oraz 100 MHz. Daje to odpowiednio 29 i 54 cykle zegarowe rezerwy do wykorzystania na inne algorytmy sterujące np. liczenie poprawki sygnału kompensującego. Szybkość wykonywanych obliczeń pociąga za sobą konieczność użycia specjalnych metod implementacyjnych wbudowanych struktur liczących takich, jak mnożarka, sumator, element odejmujący. Bardziej skomplikowane operacje arytmetyczne powinny być podzielone na dwa i więcej cykli.

#### 5. Wyniki pomiarów

Badania systemu kompensacji odkształceń komór rezonansowych zostały przeprowadzone w środowisku akceleratora FLASH. Jako obiekty badań służyły moduły przyspieszające rentgenowskiego lasera FLASH, ACC 5 i ACC 6. Pierwszy z nich jest wyposażony w pojedyncze elementy wykonawcze firmy NOLIAAC, zaś drugi w podwójne firmy PI. W takiej konfiguracji jeden z elementów może służyć do kompensacji odstrojenia, zaś drugi do monitorowania odpowiedzi wnęki na przyłożony sygnał kompensujący. Gradient pola we wnęcie został ustawiony na 25 MV/m dla modułu 6 oraz 19 MV/m dla modułu 5. Fala elektromagnetyczna o częstotliwości 1,3 GHz dostarczana była do wnęki rezonansowej w postaci paczek o czasie trwania 300  $\mu$ s, powtarzanych z częstotliwością 5 Hz.

Wynik kompensacji odkształceń dla komór rezonansowych modułów 5 i 6 został przedstawiony na rys. 7a. Pomiary odstrojenia wyliczanego w układzie FPGA obrazuje rysunek 7b.



Rys. 7. Wyniki kompensacji odstrojenia dla modułów ACC 6 i 5 w akceleratorze FLASH (a), odstrojenie obliczone w układzie FPGA dla wnęk modułu ACC 1 (b)

Fig. 7. Detuning compensation results for modules ACC 6 and 5 in FLASH accelerator (a), online detuning computation results for module ACC 1 performed in FPGA (b).

## 6. Wnioski

Testy systemu pokazały poprawną pracę w środowisku akceleratora zarówno układów programowalnych jak i wzmacniaczy mocy. W konfiguracji z dwoma 8-kanalowymi wzmacniaczami, możliwa była jednoczesna kompensacja odstrojenia 16 wnęk. Pomiar odstrojenia wykonane z wykorzystaniem układów programowalnych, dla 8 wnęk rezonansowych, pokazały poprawność działania zaimplementowanych algorytmów przy częstotliwościach zegara 75 MHz i 100 MHz. Daje to spory zapas czasowy dla pozostałych planowanych obliczeń. Po optymalizacji niektórych krytycznych elementów liczących uzyskano zajętość układu FPGA na poziomie 80%, co daje 20% rezerwy na pozostałe bloki np. do adaptacyjnej korekcji sygnału kompensującego.

## 7. Literatura

- [1] Przygoda K., Poźniak T.: Mechatronic System for Compensation of Superconducting Cavities' Deformations. Podstawowe Problemy Energoelektroniki Elektromechaniki i Mechatroniki, XII Sympozjum PPEE'2007, Wisła, 9-12 grudnia 2007, ISBN 978-83-922242-3-5, p. 237-240.
- [2] Poźniak T., Przygoda K.: Piezo Driver – wzmacniacz mocy do korekcji odkształceń komór rezonansowych w akceleratorach. Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym, VIII krajowa konferencja SENE 2007, Łódź, 21-23 listopada 2007, ISBN 978-83-912711-4-8, s. 385-389.
- [3] Poźniak T., Przygoda K.: 8-channels Piezo Driver – Power Amplifier for Correction of SC Cavities' Deformations in Linear Accelerators. Mikroelektronika i Informatyka, Zeszyty Naukowe Katedry Mikroelektroniki i Techniki Informatycznych Politechniki Łódzkiej, nr 7, Łódź 2007, ISBN 83-9222632-5-1, p. 133-138.
- [4] Przygoda K., Paparella R.: A Novel Approach for Hardware Implementation of a Detuning Compensation System for SC Cavities. 14th International MIXDES Conference, Ciechocinek, 21-23 czerwiec 2007, ISBN 83-922632-4-3, p. 105-109.

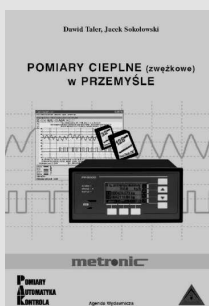
Artykuł recenzowany

## INFORMACJE

# Książki Wydawnictwa PAK



Książka „Komputerowa technika pomiarowa. Oprogramowanie wirtualnych przyrządów w LabVIEW”, autorstwa Dariusza Świsulskiego, stanowi kontynuację wydanej w 2002 roku książki „Komputerowa technika pomiarowa w przykładach”. Zasadniczą część książki zajmuje bardzo szczegółowy opis środowiska LabVIEW. Książka przeznaczona jest dla osób rozpoczynających pracę z oprogramowaniem LabVIEW, ale będzie również interesująca dla osób, które już wcześniej używały tego środowiska.



Książka „Pomiary cieplne (zwężkowe) w przemyśle” stanowi nową pozycję literaturową poświęconą pomiarom strumienia masy i ciepła płynów przepływających w przewodach przy użyciu zwęzek pomiarowych. Książka przeznaczona jest dla inżynierów i techników zajmujących się zagadnieniami cieplno-przepływowymi w przemyśle, energetyce i ogrzewnictwie. W książce omówiono przyrządy i układy do pomiarów zwęzkowych strumienia ciepła, produkowane przez firmę Metronic.

Zamówienia prosimy składać na adresy PAK:

Wydawnictwo PAK, 00-050 Warszawa, ul. Świętokrzyska 14A, tel./fax: 022 827 25 40

Redakcja PAK, 44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, p. 30b, tel./fax: 032 237 19 45, e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl