

Konrad PRZYGODA, Tomasz POŹNIAK

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

Układy Virtex i Spartan w systemach kompensacji sił Lorentza w akceleratorach**Dr inż. Konrad PRZYGODA**

Otrzymał tytuł dr inż. w dziedzinie elektronika w Katedrze Mikroelektroniki i Technik Informatycznych, Politechniki Łódzkiej w 2011 r. Od 2008 członek towarzystwa IEEE. K. Przygoda brał czynny udział w 6 ramowym projekcie CARE. Obecnie uczestniczy w 7 ramowym projekcie EuCard oraz w 2 grantach badawczych TESLA/XFEL. Dziedziną jego zainteresowań są układy programowalne oraz ich wykorzystanie do sterowania oraz monitorowania elementów piezoelektrycznych.



e-mail: kprzygoda@dmc.pl

Dr inż. Tomasz POŹNIAK

Otrzymał tytuł dr inż. w dziedzinie elektronika na Politechnice Łódzkiej w 1982 r. T. Poźniak brał czynny udział w projektach ESPRIT-BARMINT, THERMINIC, TEMPUS, 6 ramowym projekcie CARE. Obecnie uczestniczy w 7 ramowym projekcie EuCard oraz w granie badawczym TESLA/XFEL. Dziedziną jego zainteresowań są układy elektroniki przemysłowej, przekształtniki elektroniczne oraz impulsowe układy mocy.



e-mail: pozniak@dmc.pl

Streszczenie

Artykuł opisuje system sterujący czterdziestoma torami kompensującymi w akceleratorze FLASH. System zbudowano w oparciu o układy z rodziny Virtex i Spartan firmy Xilinx. W układach reprogramowalnych zaimplementowano niezbędne algorytmy sterowania. System kompensacji został wykorzystany do wspierania wybranych eksperymentów wysokich energii. Przedstawione wyniki pokazują poprawność przyjętych rozwiązań. Uzyskane rezultaty pozwoliły na obniżenie mocy dostarczanej do akceleratora rzędu 0,5 MW.

Słowa kluczowe: Virtex, Spartan, system kompensacji, odstrojenie siłami Lorentza.

Virtex and Spartan based Lorentz force compensation systems in accelerators**Abstract**

During pulse operation of a linear accelerator (LINAC), cavities are Lorentz force detuned from its main resonance frequency of 1.3 GHz. The detuned cavities need more radio frequency (RF) control efforts to achieve the desired Free Electron Laser (FEL) parameters. Fast frequency tuners based on piezoelectric elements are commonly used for compensation of cavity detuning. The piezo control system specification and its prototype design are presented in RUC 2008 [2]. The achieved results allow designing a completely new system dedicated for a FLASH accelerator (see Fig. 1). The system digital part was designed with use of FPGA devices of Virtex and Spartan families. The control algorithms were implemented inside FPGA (Fig. 4). Correction signals generated by the digital system are converted by DAC units and next used to drive piezoelectric actuators with dedicated power amplifiers. This paper presents the Lorentz force detuning compensation system used to control forty cavities equipped with fast frequency tuners for the Deutsches Elektronen Synchrotron (DESY) FLASH accelerator. The obtained results show the correctness of the chosen solutions. The applied compensation allow decreasing RF control power of 0.5 MW together with significant increase in the accelerating field gradient (Fig. 6).

Keywords: Virtex, Spartan, compensation system, Lorentz force detuning.

1. Wstęp

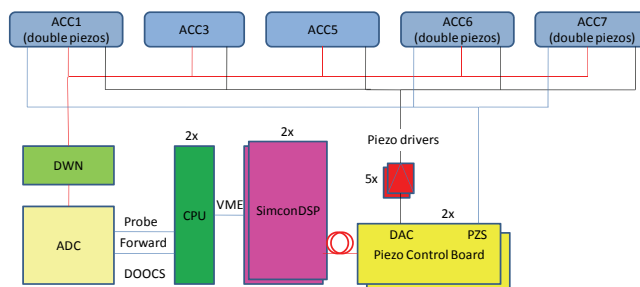
Uzyskanie spójnego promieniowania rentgenowskiego wymaga bardzo wysokiej energii, możliwej do uzyskania poprzez przyspieszanie cząstek elementarnych w akceleratorach. W ośrodku badawczym DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron) w Hamburgu pracuje laser FLASH (Free Electron Laser in Hamburg), pozwalający na generowanie koherentnego promieniowania z zakresu głębokiego ultrafioletu oraz miękkiego promieniowania rentgenowskiego.

Akcelerator liniowy FLASH pracuje impulsowo. Pole przyspieszające o częstotliwości 1,3 GHz jest dostarczane do wnęk rezonansowych, pracujących w temperaturze 2 K, okresowo z częstotliwością powtarzania do 10 Hz [1]. Wskutek tego powstają siły

Lorentza odkształcające wnęki, co powoduje ich odstrojenie od rezonansu, wzrost strat oraz spadek efektywności przyspieszania.

2. System kompensacji

W Katedrze Mikroelektroniki i Technik Informatycznych w Łodzi opracowano na użytek ośrodka DESY, system kompensacji odstrojenia wnęk rezonansowych. Koncepcja systemu i jego prototyp dla jednego modułu przyspieszającego prezentowane były na konferencji RUC w 2008 roku [2]. Wyniki i wnioski z badań prototypu pozwoliły opracować nowy i kompletny system kompensacji dla całego akceleratora FLASH. System zbudowano w oparciu o układy z rodziny Virtex i Spartan firmy Xilinx. W układach reprogramowalnych zaimplementowano niezbędne, opracowane przez autorów algorytmy sterowania. Schemat blokowy systemu pokazano na rys. 1.



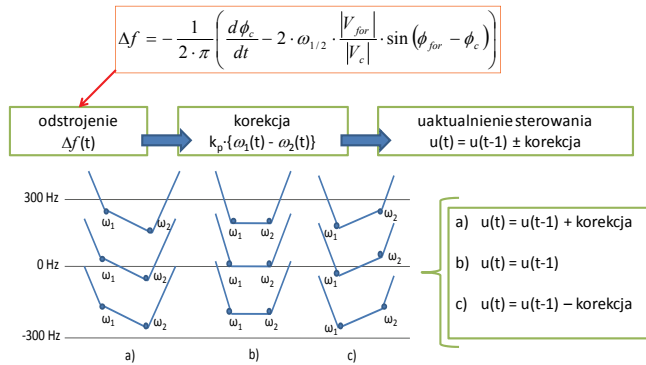
Rys. 1. Schemat blokowy systemu kompensacji odstrojenia dla FLASH
Fig. 1. Block diagram of the compensation system for FLASH

System kompensacji odstrojenia dla akceleratora FLASH składa się z konwerterów częstotliwości (blok DWN), przetworników A/C (blok ADC), komputera przemysłowego (blok CPU), sterowników pola w.c.z. (blok SimconDSP), kart sterująco-czytających (blok Piezo Control Board), 8-kanałowych wzmacniaczy mocy (blok Piezo drivers). Sygnały odczytywane z anten pola w.c.z. (Probe, Forward) są konwertowane do częstotliwości pośredniej, a następnie zamieniane na postać cyfrową z wykorzystaniem przetworników A/C dostępnych na płycie SimconDSP. Sygnały w postaci cyfrowej wykorzystywane są do wyliczenia odstrojenia w poszczególnych wnękach w obrębie danego modułu przyspieszającego. Na podstawie odstrojenia, obliczany jest odpowiedni sygnał korekcji. Sygnał korekcji jest następnie przesyłany do karty sterująco-czytającej w celu dokonania jego konwersji do postaci analogowej za pomocą przetworników C/A. Sygnały kompensacyjne są wzmacniane do odpowiedniego poziomu napięć z wykorzystaniem 8-kanałowych wzmacniaczy mocy, które sterują piezoelektrycznymi elementami wykonawczymi. System umożliwia także pomiar napięć odczytywanych z elementów piezoelektrycz-

nych używanych jako czujniki drgań wnek rezonansowych. Do tego celu wykorzystywane są obwody kondycjonujące napięcia z czujników oraz przetworniki A/C umożliwiające dyskretyzację danych pomiarowych. Taka konfiguracja systemu umożliwia zarówno kompensację odstrojenia siłami Lorentza jak tłumienie drgań wnek rezonansowych, które może także modulować nieznacznie częstotliwość rezonansową samych wnek. Pracę systemu nadzoruje rozproszony, zorientowany obiektowo system sterowania podsystemami akceleratora FLASH (blok DOOCS). System ten wykorzystuje architekturę typu klient-serwer, umożliwiającą przesyłanie danych pomiędzy podsystemami sterującymi za pomocą interfejsu Ethernet. System kompensacji odstrojenia został podłączony do 40 wnek rezonansowych, pogrupowanych w 5 modułów przyspieszających, zaopatrzonych zarówno w podwójne jak pojedyncze elementy piezoelektryczne.

3. Algorytm sterowania

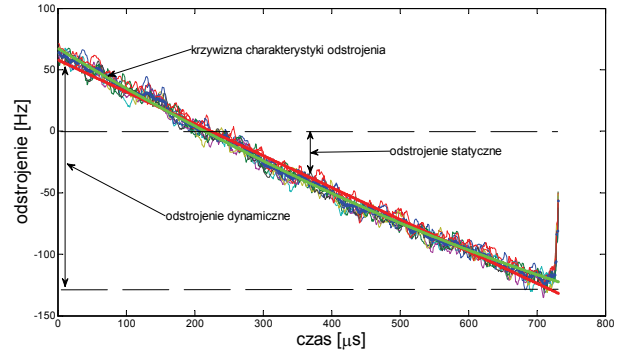
Algorytm sterowania systemu kompensacji składa się z trzech etapów. W pierwszym etapie obliczane jest odstrojenie wneki na podstawie równania różniczkowego jej modelu elektrycznego [2]. W drugim etapie obliczany jest sygnał korekcyjny umożliwiający kompensację wyznaczonego odstrojenia. W trzecim etapie następuje adaptacja sygnału kompensującego z poprzedniej iteracji. Algorytm obliczania korekcyjnego bazuje na zdolności kompensacyjnej elementu piezoelektrycznego, który wyraża się zależnością liniową pomiędzy skompensowanym odstrojeniem, a napięciem przyłożonym do elementu piezoelektrycznego [3]. Jako sposób korekcji przyjęto regulator proporcjonalny, o doświadczalnie wyznaczonych nastawach. Opracowany algorytm rozważa trzy przypadki, kiedy wneka: jest nieskompensowana (a), skompensowana (b) oraz prze kompensowana (c). Punkty ω_1 oraz ω_2 oznaczają czas przyspieszania wiązki elektronów, podczas którego odstrojenie powinno być bliskie 0 Hz. Schemat blokowy algorytmu pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Algorytm sterowania odstrojeniem wneki
Fig. 2. Cavity detuning control algorithm

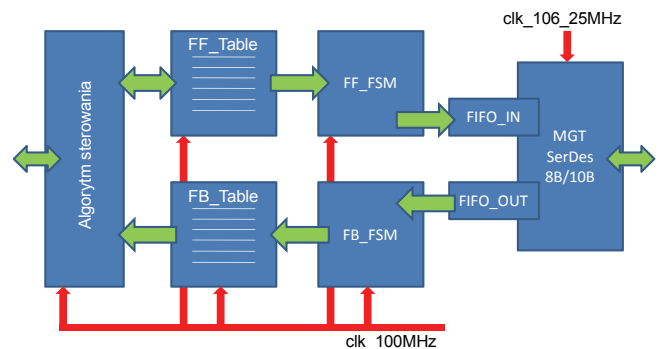
Podczas analizowania odstrojenia wneki, kontroler bierze pod uwagę następujące parametry: odstrojenie statyczne, dynamiczne oraz krzywiznę charakterystyki odstrojenia. Definicje wszystkich trzech parametrów w czasie przyspieszania wiązki elektronów pokazano na rys. 3.

Odstrojenie statyczne wneki jest kompensowane za pomocą stałowej stałej napięcia przyłożonego do elementu piezoelektrycznego (sterowanie DC). Odstrojenie dynamiczne jest kompensowane z wykorzystaniem składowej zmiennej napięcia przyłożonego do elementu wykonawczego (sterowania AC). Krzywizna charakterystyki odstrojenia (zamodelowana równaniem kwadratowym) jest kompensowana za pomocą odpowiedniego wyprzedzenia sygnału korygującego w stosunku do pojawienia się pulsu pola w.c.z. odstrajającego wnekę.



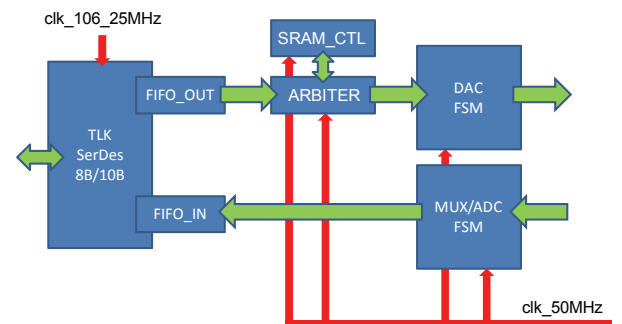
Rys. 3. Definicja parametrów odstrojenia używanych do kompensacji
Fig. 3. Cavity detuning parameters used for compensation

Algorytm sterujący został zaimplementowany w języku opisu sprzętu VHDL z wykorzystaniem układu FPGA Virtex II Pro firmy Xilinx dostępnego na płycie SimconDSP. Zajętość sprzętowa sterownika nie przekracza 50 % użytego układu xc2vp50. Do komunikacji sterownika z kartą sterująco-czytającą wykorzystano wbudowany układ do transmisji szeregowej MGT, umożliwiający przesyłanie danych z prędkością 3,125 Gb/s. Schemat blokowy zaimplementowanego sterownika pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Schemat blokowy zaimplementowanego sterownika
Fig. 4. Block diagram of the implemented controller

Do obsługi karty sterująco-czytającej wykorzystano układ FPGA Spartan 2 firmy Xilinx. Układ FPGA użyty do sterowania wielokanałowych przetworników C/A oraz A/C. Zajętość sprzętowa jednostki zarządzającej pracą przetworników została wykorzystana w 80% użytego układu xc2s200. Do obsługi komunikacji karty sterująco-czytającej z płytą SimconDSP wykorzystano zewnętrzny układ do transmisji szeregowej z serii TLK2501 firmy Texas Instruments, umożliwiający przesyłanie danych z prędkością 2,5 Gb/s. Schemat blokowy jednostki nadzorującej pracę karty sterująco-czytającej wraz z przepływem sygnałów przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Schemat blokowy sterownika karty sterująco-czytającej
Fig. 5. Block diagram of the driving-sensing card controller

Płytę SimconDSP oraz kartę sterująco-czytającą połączono kablem optycznym w celu wyeliminowania wpływu długości okablowania na błędy transmisji. Dodatkowo opracowany protokół transmisji danych wyposażono w kontrolę długości ramki danych. Kiedy długość odebranej ramki danych jest poprawna przetwornik C/A jest sterowany odpowiednim sygnałem korygującym. Kiedy długość odebranej ramki jest niezgodna (uszkodzenie kabla optycznego lub jego odłączenie) wyłączane jest sterowanie piezoelektrycznym elementem wykonawczym.

4. Wyniki badań

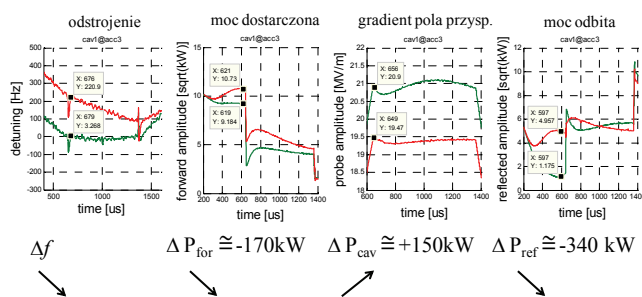
System kompensacji odstrojenia rezonansowych wnęk nadprzewodzących dla akceleratora FLASH został wykorzystany podczas eksperymentów przyspieszania wysoko-gradientowej i wysoko-prądowej wiązki elektronów tzw. „testy 9 mA”, które odbyły się w ośrodku DESY na przełomie 2010 oraz 2011 roku. Podczas testów dokonano kompensacji odstrojenia dla wszystkich 5 modułów przyspieszających zaopatrzonych w szybkie stroiki piezoelektryczne. Wyniki kompensacji dla poszczególnych wnęk zgromadzono w tab. 1.

Tab. 1. Wyniki kompensacji dla akceleratora FLASH
Tab. 1. Compensation results obtained for FLASH

Moduł	Odstrojenie [Hz]	Napięcie ster. [V]
kompensacja	wył/wł.	wył/wł.
ACC1 (śred.)	250,5/14,5	0,0/14,5
ACC3 (śred.)	167,3/11,4	0,0/18,3
ACC5 (śred.)	124,8/22,5	0,0/26,3
ACC6 (śred.)	102,3/5,6	0,0/34,5
ACC7 (śred.)	350,3/0,6	0,0/21,2

Podczas eksperymentu dokonano oceny efektywności systemu kompensacji, poprzez pomiar mocy dostarczonej, mocy odbitej oraz gradientu pola przyspieszającego. Wyniki pomiaru dla pojedynczej wnęki oraz podsumowanie dla całego modułu przyspieszającego pokazano na rys. 6.

Przy skompensowanym odstrojeniu dla wszystkich ośmiu wnęk w obrębie pojedynczego modułu przyspieszającego, dokonano redukcji wymaganej mocy dostarczonej, przy jednoczesnym wzroście mocy pola przyspieszającego, co się wiąże bezpośrednio ze znaczącą redukcją mocy odbitej.



Rys. 6. Efektywności systemu kompensacji

Fig. 6. Compensation system effectiveness

5. Wnioski

Zaprojektowany system kompensacji odstrojenia rezonansowych wnęk nadprzewodzących został użyty do sterowania 40 torów kompensujących dla akceleratora FLASH podczas wybranych eksperymentów wysokich energii. Odstrojenie w poszczególnych wnękach zostało skompensowane od wartości kilkuset do poziomu nie przekraczającego kilkunastu herców. Podczas kompensacji poziomy napięcie sterujących podawane na piezoelementy wykonawcze, nie przekroczyły kilkudziesięciu woltów. Przedstawione wyniki pokazują poprawność przyjętych rozwiązań. Uzyskane rezultaty pozwoliły na obniżenie mocy dostarczonej do akceleratora (oszacowanej dla 5 kompensowanych modułów przyspieszających) rzędu 0,5 MW przy jednoczesnym wzroście mocy pola przyspieszającego.

6. Literatura

- [1] Simrock S.: Lorentz Force Compensation of Pulsed SRF Cavities. Materiały konferencyjne, konferencja LINAC, 2002 r.
- [2] Oparty o cyfrowe układy reprogramowalne i analogowe wzmacniacze mocy system kompensacji odkształceń wnęk nadprzewodzących w akceleratorach liniowych. Pomiary Automatyka Kontrola, Szczecin, 2008 r.
- [3] Przygoda K.: Rozwój systemu sterowania szybkimi elementami strojącymi nadprzewodzące wnęki rezonansowe dla eksperymentów FLASH i XFEL. Rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, 2011 r.

otrzymano / received: 13.05.2011

przyjęto do druku / accepted: 04.07.2011

artykuł recenzowany

INFORMACJE

Wersja elektroniczna miesięcznika PAK Pomiary Automatyka Kontrola – Measurement Automation and Monitoring

Artykuły opublikowane w PAK po roku 1989 są dostępne w wersji elektronicznej m.in. w bazie artykułów PAK (www.pak.info.pl), w folderze „Archiwum numerów miesięcznika PAK”:

- pełne teksty artykułów starszych niż 3 lata oraz streszczenia artykułów najnowszych można pobrać bezpłatnie,
- pełne teksty artykułów najnowszych można otrzymać za opłatą (5 PLN +1,15 PLN VAT).