



European Coordination for Accelerator Research and Development

PUBLICATION

Instytut Systemów Elektronicznych w projektach CARE i EuCARD (ISE WUT in CARE and EuCARD Projects)

Romaniuk, Ryszard (Warsaw U. of Tech.)

02 September 2012

Elektronika

The research leading to these results has received funding from the European Commission under the FP7 Research Infrastructures project EuCARD, grant agreement no. 227579.

This work is part of EuCARD Work Package 2: **DCO: Dissemination, Communication & Outreach.**

The electronic version of this EuCARD Publication is available via the EuCARD web site <<http://cern.ch/eucard>> or on the CERN Document Server at the following URL : <<http://cdsweb.cern.ch/record/1234922>>

Institute of Electronic Systems in CARE and EuCARD Projects Accelerator Research, Development and Applications in Europe

Prof. dr hab inż Ryszard S.Romaniuk
Warsaw University of Technology

Abstract

There are described coordinating actions of the accelerator science in Europe in 2003-2009. The actions embrace basic science, as well as development and applications. The accelerator research was not coordinated in Europe at a global scale but was rather concentrated in a few centers owning large infrastructure. These centers include: CERN, DESY, GSI, INFO, LAL, PSI etc. Such coordinating actions enable a lot of positive processes including new possibilities for research centers in this country. It is much easier for them to extend, deepen or even start from the beginning their adventure with the accelerator technology. There are described two European framework projects CARE and EuCARD on accelerator technology, their extent and the participation of ISE WUT in them.

Key words:

Accelerator science, accelerator technology, synchrotron, free electron laser, elementary particles, electronic and photonic systems, European framework programs

Instytut Systemów Elektronicznych w projektach CARE i EuCARD
Badania i Zastosowania Akceleratorów w Europie

prof. dr hab. inż. Ryszard Romaniuk
Instytut Systemów Elektronicznych, Politechnika Warszawska

Streszczenie

Opisano działania koordynacyjne badań naukowych, od podstawowych po wdrożeniowe, w dziedzinie techniki akceleratorowej na terenie Europy w latach 2003-2009. Badania te nie były specjalnie skoordynowane w Europie i raczej skupiały się wokół kilku ośrodków dysponujących dużą infrastrukturą badawczą, takich jak CERN, DESY, GSI, INFN, LAL, PSI, itp. Dzięki tym akcjom koordynacyjnym wiele badawczych ośrodków krajowych mogło znacznie łatwiej pogłębić i rozszerzyć lub wręcz rozpocząć swoją przygodę naukowo-techniczną z techniką akceleratorową. Opisano Europejskie programy ramowe techniki akceleratorowej CARE i EuCARD, ich zakres prac, oraz udział w nich ISE PW.

Słowa kluczowe:

Technika akceleratorowa, synchrotron, laser na swobodnych elektronach, cząstki elementarne, systemy elektroniczne i fotoniczne, ramowe programy Europejskie

PREPRINT

Paper submitted to Elektronika Journal by Association of Polish Electrical Engineers
Elektronika 50, 8 (2009) pp.157-162

Instytut Systemów Elektronicznych w projektach CARE i EuCARD Badania i Zastosowania Akceleratorów w Europie

prof. nzw. dr hab. inż. Ryszard Romaniuk
Instytut Systemów Elektronicznych, Politechnika Warszawska

Technika akceleratorowa jest jedną z tych dziedzin nauki i techniki, która wymaga projektowania, budowy i następnie eksploatacji, przez pewien okres czasu, wielkiej infrastruktury technicznej. Ten okres, który jest czasem efektywnego życia badawczego wielkiego akceleratora, wynosi ok. 20-25 lat. Być może w przyszłości, wraz ze zwiększeniem tempa rozwoju, ten okres może ulec skróceniu. Akceleratory mniejsze, o zaawansowanej konstrukcji, do zastosowań medycznych i technicznych, powstają jako konsekwencja i produkt równoległej prac nad wielkimi akceleratorami badawczymi. Wielkość infrastruktury badawczej jest narzucana przez coraz większe wymagania dotyczące energii i intensywności wiązki akceleratorowej. Największe akceleratory badawcze, ze względu na bardzo wysokie koszty budowy i eksploatacji, są nieliczne i mogą powstawać, prawie wyłącznie, jako rezultat szerokiej współpracy międzynarodowej. Technologie (mechanika, chemia, elektronika, fotonika, inżynieria materiałowa, itp.) tworzone na użytek największych akceleratorów są bardzo szybko transferowane do przemysłu (energetyka, atomistyka, geologia i górnictwo, medycyna, bezpieczeństwo, ochrona środowiska, itp.). Chcąc mieć źródłowy dostęp do tych technologii konieczne jest uczestnictwo zespołów badawczych z kraju w wielkich eksperymentach badawczych (i organizowanych wokół nich konsorcjach naukowo-przemysłowych): akceleratorowych, ale nie tylko, także jądrowych, energetycznych, laserowych, kosmicznych, i astronomicznych, itp. Czy to uczestnictwo obecnie jest zadowalające, trudno powiedzieć, mogłoby być zapewne znacznie, tzn. wielokrotnie większe.

Po kilku latach szerszego uczestnictwa krajowego środowiska naukowo-technicznego w europejskich programach ramowych PR (EC-FP – European Commission Framework Programs), poszczególne grupy badawcze zgromadziły na tyle znaczne doświadczenie, że można spróbować dzielić się nieco głębszymi refleksjami na ten temat. Niektóre grupy w kraju uczestniczyły już w FP5, większość rozpoczęła działania w FP6, niektórzy kontynuują je w FP7 [1]. Uczestnictwo ośrodków krajowych było i jest na tyle liczne, że stworzono infrastrukturę ułatwiającą współpracę. Infrastruktura ta zawiera centralny (Krajowy Punkt Kontaktowy [2]) i regionalne ośrodki informacyjne [3] a także organizacje społeczne. Jedną z takich pożytecznych organizacji jest Krajowa Rada Koordynatorów Projektów Badawczych UE – KRAB [4]. Statut i misja KRAB zakłada realizację następujących zadań: wymiana doświadczeń z realizacji projektów, promocja dobrych praktyk profesjonalnego prowadzenia projektów, promocja polskiego uczestnictwa w PR UE, współpraca z administracją rządową i samorządową, rekomendacja zmian prawnych ułatwiających uczestnictwo w programach europejskich, edukacja, organizacja konferencji na temat programów Europejskich. Za podstawowe problemy do rozwiązania obecnie KRAB uważa: znaczną trudność w uzyskaniu grantu na projekt europejski dla wielu zespołów w kraju, duże dysproporcje między wynagrodzeniami wykonawców projektu w Polsce i w Europie Zachodniej, brak stabilnych rozwiązań prawnych dla prowadzonych projektów i brak profesjonalnej kadry managerskiej wspomagającej projekty w Polsce. Udział Polski w PR UE w połączeniu z udziałem w Programach Operacyjnych fundowanych ze środków UE (Kapitał Ludzki, Innowacyjna Gospodarka, Infrastruktura i Środowisko) jest jednak na tyle masywny, że szybkie zmiany, przełamujące znaczną inercję na wszystkich szczeblach – rządowych i u wykonawców są nieuniknione.

Udział w dużych projektach w ramach PR UE, a takimi są projekty infrastrukturalne dotyczące techniki akceleratorowej, wymaga spełnienia kilku, czasami niełatwych warunków,

szczególnie niełatwych dla uczelni: obecności krajowego zespołu badawczego w dostatecznie masywnym konsorcjum tematycznym podejmującym dany projekt, przedstawienia atrakcyjnej oferty badawczej na rzecz rozwoju infrastruktury (najczęściej ta infrastruktura jest poza krajem) – atrakcyjnej na tyle, że zostanie zaakceptowana przez konsorcjum i właściciela infrastruktury, oraz deklaracji znacznego udziału własnego – finansowego lub osobowego i rzeczowego. W niektórych przypadkach ten deklarowany udział może osiągać aż 2/3 wartości proponowanego do realizacji zadania, zaś typowo wynosi 1/2. Konieczność deklaracji tak wysokich kwot własnych utrudnia udział zespołów krajowych w większych przedsięwzięciach infrastrukturalnych, nawet mimo wsparcia przy pomocy grantu na projekt międzynarodowy współfinansowany. Projekty PR UE są realizowane obecnie w schemacie księgowania pełnych kosztów (poprzednio były księgowane jedynie koszty dodatkowe) co jest związane na uczelni (wobec braku systemów informatycznych typu FC-Full Costs) z prowadzeniem skomplikowanej wielowarstwowej dokumentacji. Spełnienie tych warunków i ich konsekwencje obciążają administracyjnie nie tylko, średnio przygotowaną, infrastrukturę uczelni, ale także merytorycznego kierownika projektu. Wydaje się, że niektóre osoby na uczelniach w kraju, znakomicie przygotowane do podjęcia trudu merytorycznego działania w FP UE, nie podejmuje go zakładając brak dostatecznego wsparcia administracyjnego ze strony uczelni.

Zespoły badawcze z kraju uczestniczą w kilku programach naukowych i dotyczących budowy lub rozwoju infrastruktury akceleratorowej i atomistycznej w Europie (np. E-XFEL, FAIR, ITER). Programy te są koordynowane na kilku poziomach, przez agencje rządowe największych krajów Europejskich, przez organizacje pozarządowe, wreszcie przez Komisję Europejską. Głównym koordynatorem na poziomie europejskim w tym zakresie tematycznym jest ESGARD [5] – Europejska Rada Infrastruktury Akceleratorowej i Badań. Pierwszym takim projektem o zasięgu ogólnoeuropejskim zainicjowanym przez ESGARD w 2003r. był CARE [6-8] – Coordinated Accelerator Research in Europe, realizowany z wielkim powodzeniem w ramach PR6 w latach 2004-2008. Kontynuacją tego projektu jest obecnie EuCARD [9-12] – European Coordination of Accelerator Research and Development, realizowany w ramach PR7 w latach 2009-2013. W projekcie EuCARD uczestniczą wszystkie europejskie ośrodki dysponujące infrastrukturą akceleratorową oraz wiele uczelni prowadzących badania akceleratorowe, w tym Politechnika Warszawska. Obszarem działania zespołów z ISE PW w ramach projektów CARE i EuCARD jest technika akceleratorów nadprzewodzących SRF (Superconducting Radio Frequency) [13-14]. Zespoły i osoby z ISE uczestniczą także w innych pokrewnych projektach akceleratorowych i astrofizyki promieniowania i cząstek elementarnych: poprzednio w ZEUS/HERA a obecnie w ALBA, CMS/LHC, SPS, FLASH, E-XFEL, ILC, PITZ, CBM, Chandrayaan, Pi-of-the-Sky, itp. Głównie są to magistranci i doktoranci pracujący pod nadzorem kadry uczelnianej.

Zastosowania techniki akceleratorowej

Możliwości bardzo szerokich zastosowań techniki akceleratorowej są obecnie konsekwencją prowadzonych w tym zakresie w Europie (TESLA, HERA, LHC) i na świecie (ILC, CEBAF, SLAC, SNS, KEK) od kilku dziesięcioleci badań podstawowych i technicznych. Wybrane ośrodki europejskiej infrastruktury akceleratorowej zebrano w tabeli 1. Badania te, w zakresie wysokich energii, koncentrują się dzisiaj na kilku głównych kierunkach: odtworzenie początkowych warunków ‘Wielkiego Wybuchu’ (BB); poszukiwanie zjawisk bardzo rzadkich; obserwacja wszechświata; gromadzenie wielkich zbiorów danych umożliwiających przeprowadzanie złożonych i statystycznie wiarygodnych analiz. Cztery rodzaje, znacznej pod względem kosztów, skomplikowania technicznego i rozmiarów, infrastruktury akceleratorowej są potrzebne do realizacji tych celów. Obejmują one: akceleratory o dużych energiach i intensywnościach wiązek, detektory akceleratorowe,

systemy zarządzania i przetwarzania gigantycznych, ponad zetta-bajtowych (10^{21}), zbiorów danych, dużą infrastrukturę towarzyszącą, np. podziemną. Rozwój każdego z tych rodzajów infrastruktury akceleratorowej przekłada się obecnie, prawie bezpośrednio, na zastosowania przemysłowe, z których natychmiast może korzystać całe społeczeństwo (medycyna, bezpieczna energetyka jądrowa, nowe materiały, techniki informacyjne i sieć Internet, w przyszłości zagospodarowanie Księżyca, sąsiednich planet i przestrzeni kosmicznej, itp.).

Tabela 1 Europejska infrastruktura akceleratorowa (wybrane obiekty)		
Table 1 European accelerator infrastructures		
Laboratorium	Akcelerator	Opis
ALBA Barcelona	ALBA	Synchrotronowe źródło światła
BESSY Berlin	BESSY	Synchrotronowe źródło światła
CCLRC – RAL Didcot	ISIS, MICE	Kompleks akceleratorowy: miony i neutrony
CERN Genewa	LHC Detektory CLIC SLHC	Protonowy kompleks akceleratorowy, Wiązka neutrinowa, Akcelerator jonowy, Liniak elektronowy dwuwiązkowy, Laboratorium SRF
DESY Hamburg	FLASH, PITZ, E-XFEL, TESLA	Nadprzewodzący liniak elektronowy, Iniektory elektronowe, FEL, Synchrotron,
FZ Rossendorf	ELBE	Liniowy akcelerator elektronowy
GSI Darmstadt	SIS, ESR, FAIR, UNILAC	Kompleks akceleratorowy dla ciężkich jonów, Laboratorium testów wiązek,
INFN Frascati	SPARC DAFNE	FEL, Źródło synchrotronowe
LAL IN2P3 Orsay	PHIL	Iniektor elektronowy, Synchrotron Europejski,

W obszarze badań podstawowych infrastruktura akceleratorowa jest używana do szukania odpowiedzi na następujące pytania dotyczące energii: czy istnieją inne prawa fizyki, co to jest czarna energia, czy istnieją inne wymiary, czy wszystkie siły pochodzą od jednej, oraz cząstek: dlaczego jest tyle rodzajów cząstek elementarnych, czym jest czarna masa i jak można ją generować w warunkach laboratoryjnych, jaka jest natura neutrin, a także wszechświata: jak powstał, co stało się z antymaterią? Akceleratory badawcze dla fizyki wielkich energii (FWE) rozwijają się w kierunku większych energii wiązki, większych intensywności wiązki i mniejszych wymiarów wiązki. Rozwój techniki akceleratorowej wymaga dostępu do stanowisk testowych: wiązek akceleratorowych, magnesów o wielkich natężeniach pola, nadprzewodzących akceleratorowych wnęk rezonansowych. Rozwój największych akceleratorów dla FWE spowodował powstanie innych rodzin akceleratorów badawczych dla nowych generacji źródeł światła o najwyższych intensywnościach [15-16] oraz źródeł neutronów i mionów, także neutrin [17], a następnie akceleratorów medycznych do terapii nowotworów i przemysłowych do implantacji jonów i inżynierii materiałowej, spawania i cięcia wiązką elektronową, produkcji radioizotopów, testowania nieniszczącego i bezpieczeństwa. Niektóre urządzenia akceleratorowe odpowiedniej mocy są wykorzystywane dodatkowo do procesów transmutacji energetycznych odpadów reaktorowych. W tabeli 2 zebrano szacunkowe dane dotyczące światowego rynku akceleratorów przemysłowych w roku 2009.

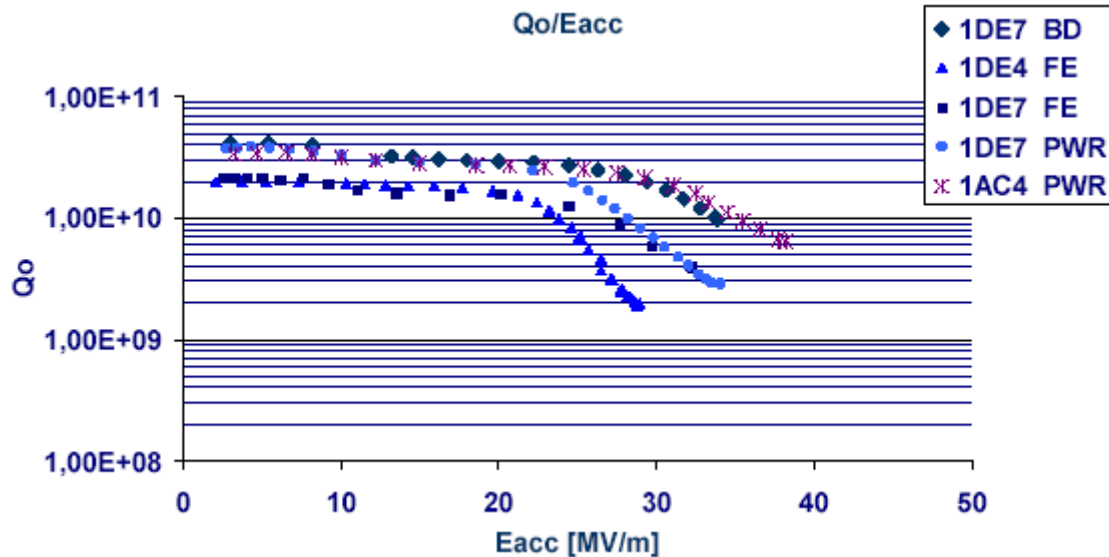
Tabela 2 Przemysłowy rynek akceleratorów (przewidywania na 2009) w [szt] i [M€] Table 2 Industrial market for accelerators (predictions for 2009) in [pcs.] and [M€]				
Zastosowanie	Ilość pracujących systemów [szt.]	Ilość systemów sprzedanych w ostatnim roku [szt.]	Całkowita wartość sprzedaży [M€]	Zakres cen pojedynczego systemu [M€]
Terapia	> 10 000	> 600	> 2000	2,0 – 5,0
Implantacja Jonów	>12 000	500	> 1500	1,0 – 3,0
Cięcie i spawanie wiązką elektronową	> 5 000	> 100	> 200	0,5 – 2,5
Napromienniki e i X	> 2 000	> 100	> 150	0,2 – 5,0
Produkcja radioizotopów i PET	> 650	> 50	> 100	1,0 – 3,0
Testy nie destrukcyjne i systemy bezpieczeństwa	> 1 000	> 200	>100	0,3 – 2,0
Analiza wiązek jonowych i AMS	> 250	> 30	> 30	0,4 – 1,5
Generatory neutronów	> 1 100	> 50	> 30	0,1 -3,0
Transmutacja izotopów, transmutacja odpadów reaktorowych (energetyka jądrowa)	> 100			Podobnie do produkcji radioizotopów
FEL	pojedyncze			b. wysoki
Inne	> 1 000			Relat.niewielki
Razem (plus inne zastosowania przemysłowe)	> 35 000	> 2 000	> 5 000	0,1 – 5,0
Badawcze: Akcelerator Energy Recovery Akcelerator I-FEL Plazmowo-laserowe	pojedyncze			Bardzo wysoki

Projekty CARE i EuCARD

Projekt CARE obejmował następujące tzw. wspólne działania badawcze: SRF [13] – nadprzewodząca technika RF, PHIN [18] – iniektory fotonowe, HIPPI [19] – iniektory protonowe, NED [20] – magnesy o wielkich natężeniach pola z Nb₃Sn, oraz sieci naukowe: ELAN [21] – Sieć elektronowych akceleratorów liniowych, BENE [22] – wiązki dla eksperymentów neutrinowych, HHH [23] – wiązki hadronowe o dużych energiach i natężeniach. W wyniku realizacji projektu CARE uzyskano znaczny postęp technologiczny w zakresie: jakości produkcji akceleratorowych wnek nadprzewodzących o dużym natężeniu pola – rys.1, sterowania i tuningu wnek, diagnostyki i sterowania wiązek, parametrów sprzęgaczy i magnesów dużej mocy, konstrukcji iniektorów, przygotowania powierzchni i poprawy jakości materiałów akceleratorowych, itp. Pionierski projekt CARE zainicjował i współdziałał z szeregiem innych inicjatyw i wspólnych działań europejskich w zakresie techniki akceleratorowej: EuroTeV [24], EuroLEAP [25], EURISOL [26], CLIC [27], SLHC-PP [28].

Projekt EuCARD [9] obejmuje następujące wspólne działania badawcze: HFM – magnesy o wielkich natężeniach pola, ColMat – kolimatory i materiały, NCL – ciepłe akceleratory liniowe, SRF – nadprzewodząca technika RF, ANAC – nowe koncepcja akceleratorów, oraz sieci naukowe i dostęp do infrastruktury akceleratorowej: NEU2012 [29] – Europejska sieć neutrinowa, AccNet – Europejska sieć akceleratorowa, HiRadMat – dostęp

badawczy do wiązek protonowych i jonowych w SPS CERN, MICE [30]– dostęp badawczy do wiązek mionowych i neutronowych w RAL [31]. Sieć akceleratorowa (i neutrinowa) oraz dobra organizacja ułatwionego, ponadnarodowego dostępu do wiązek stanowią rodzaj kręgosłupa projektu badawczego. Bez znacznych ułatwień dostępu do istniejących wiązek dla szerokiej społeczności naukowo technicznej, międzynarodowej, europejskiej w tym naszej krajowej, trudno byłoby uzasadnić realizację tak kosztownych projektów. Czy z tego ułatwionego dostępu skorzystamy?



Rys.1. Charakterystyka dobroci nieobciążonej nadprzewodzącej akceleratorowej niobowej wnęki rezonansowej, jedno-celkowej, najwyższej jakości, rodzaju TESLA dla $f=1,3\text{GHz}$. Obróbka: quasi-monokrystaliczna powierzchnia, polerowanie elektryczne, mycie suchym lodem [6].

Fig.1. Unloaded Q characteristics for single-cell superconducting niobium resonant cavities, of TESLA type, for $f=1,3\text{GHz}$. Surface processing: quasi-single crystal surface (large grain), electro polishing, dry-ice cleaning, [6].

Udział ISE w projektach CARE i EuCARD

Udział zespołów z ISE w programie CARE dotyczył realizacji kilku zadań w zakresie projektu, wykonania, pomiarów i aplikacji zaawansowanych systemów elektronicznych i fotonicznych dla techniki akceleratorowej we współpracy z gościnnym gospodarzem infrastruktury akceleratorowej DESY oraz chętnymi do współdziałania instytucjami krajowymi IPJ-Świerk, Politechniką Łódzką, Politechniką Wrocławską, Instytutem Fizyki Doświadczalnej UW, oraz IFJ-Kraków.

Prowadzono badania nad modelowaniem oraz pomiary zjawisk degradacji elektroniki VLSI, w szczególności modułów pamięci i układów FPGA, w środowiskach o wysokim poziomie promieniowania jonizującego. Skonstruowano zestaw laboratoryjny do testowania rodzaju błędów występujących pod wpływem wysokoenergetycznego promieniowania elektromagnetycznego oraz korpuskularnego w systemie zarządzanym przez układ FPGA. Testowano metody mitygacji polegające na wprowadzeniu do systemu redundancji sprzętowej oraz algorytmicznej. Środowisko szkodliwe w tunelu akceleratora to głównie wysokoenergetyczne promieniowanie elektromagnetyczne i relatywnie niewielkie wtórne promieniowanie cząsteczkowe, np. neutronowe. Najbardziej czułe na promieniowanie neutronowe są pamięci SRAM i tranzystory FET. W tunelu akceleratora FLASH zainstalowano zdalny system monitorowania poziomu promieniowania i jego wpływu na system elektroniczny bazujący na układzie FPGA. System zintegrowano z serwerem DOOCS co pozwala na nadzór on-line nad pomiarem promieniowania i kumulacją zjawisk

szkodliwych w elektronice związanych ze wzrostem dawki całkowitej. Przeprowadzono szereg pomiarów napromieniowania elektroniki w akceleratorze Linac 2 w DESY.

Prowadzono badania zjawisk szumowych w mieszaczu częstotliwości 250 kHz stosowanym w analogowo – cyfrowej pętli sprzężenia zwrotnego sterowania wnęką rezonansową akceleratora Tesla. Badania wykazały poziom szumów o ok. dwa rzędy wielkości większy niż wynikałoby to ze specyfikacji kluczowych elementów zastosowanych do budowy urządzenia. Przyczyny zidentyfikowano jako zewnętrzne źródła szumów oraz błędy w projekcie mieszacza. Środowisko elektromagnetyczne pracy mieszacza jest wysoce zaszumione poprzez obecność w pobliżu zasilaczy dużej mocy, klistronów, modulatorów, falowodów, okablowania, elektroniki cyfrowej, itp. Dokonano klasyfikacji źródeł szumowych pod względem ich wpływu na elektronikę analogową. Zaproponowano nowe rozwiązanie niskoszumnego mieszacza down-konwertera o częstotliwości pośredniej 81MHz. Zmierzono liniowość urządzenia dla nowej wartości IF na poziomie 10^{-3} . Oceniono wymagania jakościowe dla sterowania sumą wektorową sygnałów z wielu wnęk rezonansowych. Rozważano możliwość wykonania całego układu down-konwertera w wersji zintegrowanej jednoukładowej.

Wykonano kilka modeli płyt systemowych w układzie matka – córka zawierających np. osiem kanałów ADC, cztery kanały DAC, układy FPGA i DSP oraz kilka kanałów gigabitowych łączy optycznych. Zmierzony poziom szumów pracującego systemu cyfrowego był rzędu 1-4 mV rms i musiał być obniżony w następnych generacjach realizacji projektu. Opracowano oprogramowanie sterujące dla płyt systemowych obejmujące software i firmware. System testowano w różnych warunkach pracy laboratoryjnych i eksploatacyjnych dostępnych wokół infrastruktury akceleratorowej. W szczególności, zdalne testy aparatury elektronicznej, oprogramowania i algorytmów przeprowadzono w specjalizowanych stanowiskach Chechia (jedno-wnękowy termostat poziomy) oraz MTS (w pełni wyposażony kriogeniczny moduł ośmio-wnękowy bez działła elektronowego).

Zaprojektowano, wykonano i prowadzono testy klimatyczne oraz testy eksploatacyjne światłowodowego, stabilnego systemu dystrybucji częstotliwości. Konieczność aplikacji takiego systemu wynika ze znacznych rozmiarów aparatury akceleratorowej, rzędu setek metrów a nawet kilometrów i rozłożenia aparatury sterującej, pomiarowej i bezpieczeństwa w różnych odległych od siebie lokalizacjach wokół obiektów infrastrukturalnych. Prowadzono pomiary interferometryczne z zastosowaniem optycznego przesuwника fazy. Wprowadzono metody obniżenia szumu fazowego generatora wzorcowego. Konieczna do uzyskania stabilność fazy wynosiła początkowo poniżej 1ps dla odległości kilku km. Następnie uzyskano stabilność odpowiednio 100 fs i 1 ps dla czasów analizy 100 ms i 1000s.

Prowadzono prace nad oprogramowaniem do sterowania akceleratorowymi wnękami rezonansowymi pojedynczą i wieloma jednocześnie. Optymalizowano algorytm sterowania oparty na mechaniczno – elektrycznym modelu wnęki zapisanym w środowisku MatLab. Opracowano oprogramowanie zarządzające pracą i komunikacją systemu. Do komunikacji z operatorem systemu przygotowano panele interfejsu użytkownika pracujące w wirtualnym środowisku sterowania używanym w DESY – DOOCS. Testowano także współpracę systemu kontrolno pomiarowego wnęk akceleratorowych z popularnym wirtualnym środowiskiem kontrolnym EPICS, oraz z klasycznym środowiskiem web – poprzez przeglądarkę.

Opracowano algorytm sterowania bazujący na identyfikacji obiektu i pełnej zamkniętej pętli. Przeprowadzono udane eksperymenty zdalnego sterowania wnęki zamontowanej w stanowisku MTS w DESY z systemu VME z PW. Zaproponowano system auto-kalibracji wielokanałowej podczas sterowania sumy wektorowej. Moduł z ośmioma wnękami jest sterowany wówczas w rodzaju z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego (FB) wspomagana adaptacyjnym sterowaniem bezpośrednim (FF). Kontroler FPGA wykonuje procedurę zgodnie z ustawieniami w tabelach sterowania: Feed-Forward, Set-Point,

Corrector-Unit. Nieliniowości i zaburzenia deterministyczne są kompensowane przez tabelę FF dla otwartej pętli. Korekcja z zamkniętą pętlą (strojenie) dla modu FB jest dokonywana przez moduł zespolonego wzmocnienia Complex Gain bloku korekcyjnego. Układ zawiera także moduł linearyzacji klustronu. Wzmocnienie z pętli wyniosło ok. 300 podczas sterowania modułu ACC1 akceleratora FLASH. Adaptacyjny algorytm sterowania został zastosowany dla rodzajów pracy FB i FF, zgodnie z identyfikacją procesu. Zastosowana metoda sterowania modułu wnęk jest użyteczna dla powtarzalnych deterministycznych warunków pracy akceleratora, co zostało potwierdzone eksperymentalnie. Osiągnięto następujące parametry stabilizacji pola wnęki: względna dokładność amplitudy – 10^{-4} , dokładność fazy ok. $2 \cdot 10^{-4}$ rad.

Opracowano nowe algorytmy sterowania dla wnęk rezonansowych i działa elektronowego wykorzystujące możliwości nowego systemu elektronicznego trzeciej generacji SIMCON. W systemie sterowania mocy promieniowanej działa elektronowego, które pracuje bez pomiaru wartości pola we wnęcie, uzyskano początkowo stabilność fazy lepszą niż 1° i amplitudy 1%. Używając systemu SIMCON (łącznie sprzęt i oprogramowanie) stabilizowano pracę działa elektronowego akceleratora FLASH dla rodzaju pracy FEL typu SASE. Dla impulsu o długości nie przekraczającej $100\mu\text{s}$ wystarczające jest sterowanie działa typu PI. Dłuższe impulsy RF oraz ciągi impulsów wymagają dodatkowo sterowania typu AFF (adaptacyjnego sterownia bezpośredniego). Także system SIMCON trzeciej generacji zastosowano do sterowania działa elektronowego. Opracowano oprogramowanie sterujące dla działa elektronowego w VHDL implementowane w układzie FPGA. Opracowano serwer DOOCS. Uzyskano dobrą stabilność amplitudy i fazy sygnału.

Uczestniczono w testach jakości sterowania liniakiem nadprzewodzącym poprzez wprowadzanie rozrzutu gradientu pola. Wyniki pomiarów wskazują, że poprzez dopasowanie dobroci obciążonej Q, fazy sygnału wejściowego i przy ustalonej wartości odstrojenia wnęk w czasie impulsu, można tolerować rozrzut gradientu rzędu 5%. W układzie z dowolnie programowalnym, niestacjonarnym, zmiennym w czasie impulsu RF dużej mocy, odstrojeniem indywidualnej wnęki, rozrzut gradientu może być całkowicie skompensowany. Wówczas każda wnęka pracuje ze swoją maksymalną wartością gradientu pola. Ograniczenia w zakresie dostępnej mocy, w zakresie przestrajania dobroci obciążonej Q, fazy fali padającej i odstrojenia wnęki nakładają graniczny warunek rozrzutu gradientu na $\pm 20\%$. Kilka procent wartości gradientu średniego jest traconych z powodu rezonansów mechanicznych wnęk.

Wybrana do realizacji architektura indywidualnej pętli systemu sterowania LLRF posiada znaczny wpływ na jego koszty. Taka pętla jest replikowana setki razy. Cały czas podczas realizacji projektu rozważano możliwości redukcji kosztu budowanego systemu. Istnieje co najmniej kilka możliwości w tym względzie. Ograniczeniem bezwzględny redukcji kosztów jest znaczne zawężenie funkcjonalności budowanego systemu, nieakceptowane przez operatorów. Jedną ze ścieżek redukcji kosztów prowadzi przez układową integrację funkcjonalną. Down-konwertery częstotliwości mogą być integrowane z układami ADC oraz wstępnym przetwarzaniem danych w lokalnym układzie FPGA, gdzie obliczana jest częściowa wartość sumy wektorowej. Taki wejściowy układ przetwarzania sygnału z wnęki może być umieszczony w pobliżu indywidualnych krio-modułów, jako tzw. RF patch panel. Układ ten jest następnie podłączony z resztą systemu przy pomocy gigabitowych łączy optycznych. Ta architektura eliminuje bardzo kosztowne połączenia przy pomocy stabilizowanych temperaturowo kabli RF wysokiej jakości.

Inne potencjalne metody obniżenia kosztów systemu LLRF to: automatyzacja procedur sterowania w jak najszerszym zakresie poprzez zastosowanie maszyn stanu i bazy danych wiedzy o systemie; zastosowanie standardów przemysłowych w jak najszerszym zakresie; redukcja liczby transmitowanych oddzielnie sygnałów; jak najgłębsza cyfryzacja i multipleksacja sygnałów; a także opracowanie systemu we własnym zakresie. Jedną z opcji

rozwojowych systemu, odnoszącą się do potencjalnej redukcji kosztów w przyszłości i wzrostu niezawodności, jest zastąpienie obecnie najszerzej stosowanego standardu przemysłowego szafy elektroniki VME standardem przyszłościowym, i już obecnie wprowadzanym szeroko w telekomunikacji, ATCA (lub jego wersją μ TCA).

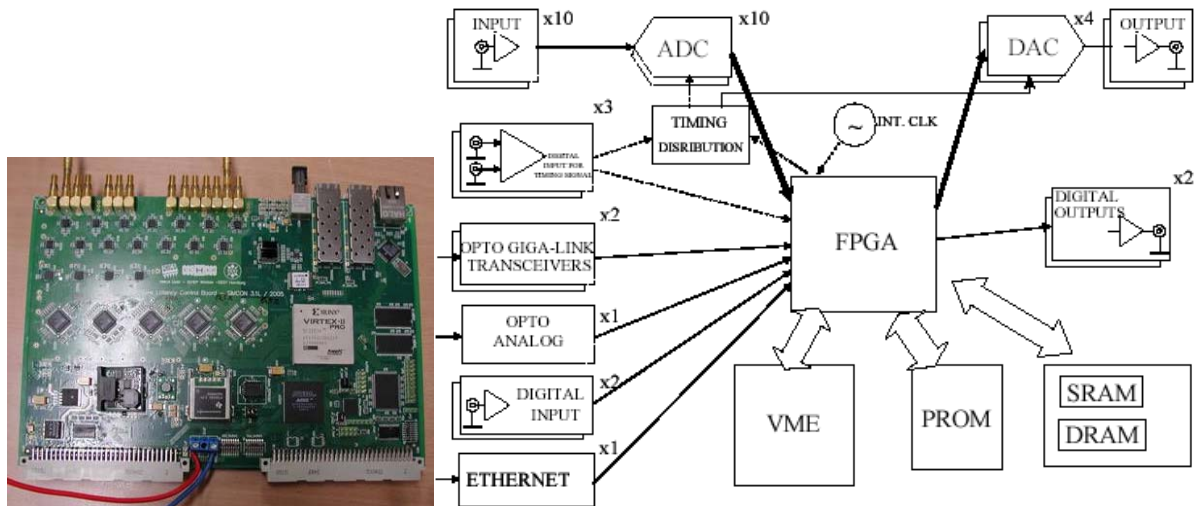
Istotnym elementem pracy nad złożonym systemem jest ocena jego niezawodności. Szacowano niezawodność pojedynczej stacji RF i następnie całego systemu sterowania LLRF. Przyjęto następujące założenia: MTBF dla pojedynczej szafy VME ok. 10^5 godzin, skład stacji to 10 szaf, system składa się z kilkudziesięciu stacji, kilka szaf w każdej stacji jest krytycznych dla działania systemu, system jest redundantny na poziomie sprzętu i metody sterowania z możliwością przełączania pomiędzy pracą z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego i sterowaniem deterministycznym wprost. Przy takich założeniach ocenia się, że jedno zatrzymanie systemu spowodowane awarią LLRF występuje rzadziej niż raz na rok.

Opracowano system LLRF trzeciej generacji o nazwie SIMCON, ver.3. bazujący na podwójnym układzie FPGA (logicznym i zadaniowym) z wbudowanymi blokami DSP. PCB o formacie VME 6U posiada 10 szerokopasmowych wejść analogowych 270 MHz, $\pm 1V$, dopasowane do 50Ω , 4 kanały DAC, kilka wejść/wyjść trygerowych, wejście zegara odniesienia o stabilności 0,3ps rms, oraz pamięci statyczną i dynamiczną, interfejsy gigalinków optycznych i wejście Ethernet. System był testowany na stanowisku Chechia oraz w akceleratorze TTF. Opracowano algorytmy w MatLabie oraz serwer DOOC dla płyty SIMCON 3. Opracowano firmware VHDL dla płyty SIMCON 3. Wyniki sterowania i pomiarów amplitudy i fazy dla ośmiu wnęk modułu ACC 1 akceleratora VUV-FEL, wykonanych przy pomocy systemu SIMCON 3, zostały przedstawione na rys. 3. Opracowano PCB koncentratora optycznego dla systemu SIMCON z ośmioma gigabitowymi linkami optycznymi oraz portem dla pamięci Flash. Koncentrator służy do wymiany danych pomiędzy innymi płytami Simcon oraz kontrolerem VME. Płyta była testowana jako kandydat na węzeł rozproszony, wielokanałowego systemu kontrolno-pomiarowego.

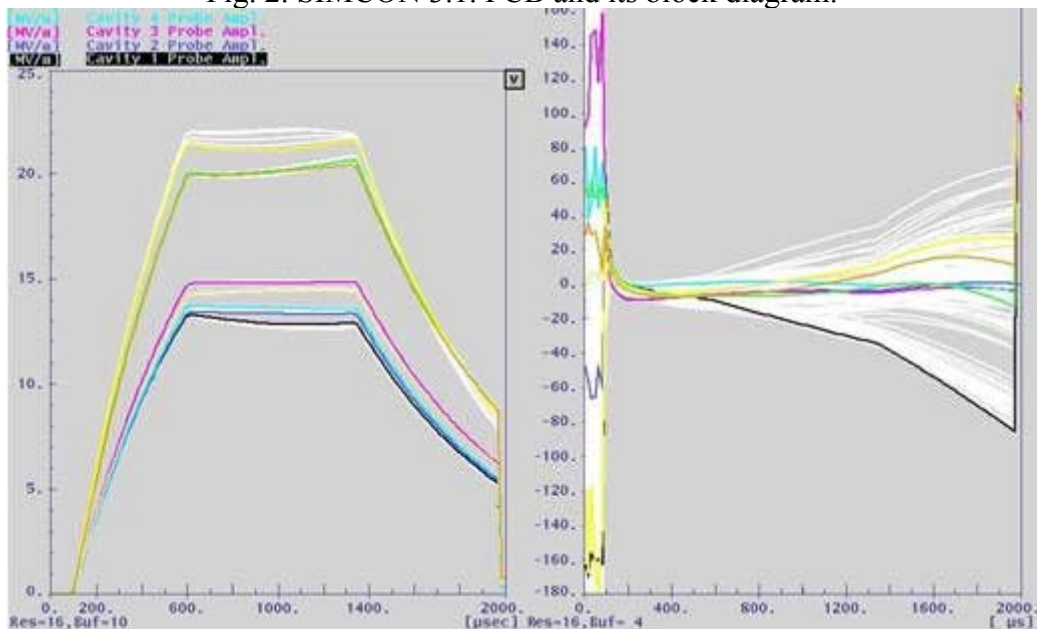
System LLRF sterowania akceleratorem podlega dalszemu intensywnemu rozwojowi. Ten rozwój jest obecnie kontynuowany w projekcie EuCARD w następujących kierunkach: optymalizacja oprogramowania i algorytmów sterowania, modularyzacja oprogramowania na części niskopoziomowe LLA oraz wysokopoziomowe HLA, wprowadzenie współpracy układów scalonych FPGA-DSP, przejście na standardową, inteligentną, telekomunikacyjną, systemową platformę ATCA wz wykorzystaniem funkcjonalności systemu zarządzania mocą IPMS.

Rola i oczekiwania wobec projektu EuCARD

Projekt EuCARD należy do grupy związanej z budową Europejskiej dużej i wspólnej infrastruktury badawczej. Oczekiwania Komisji Europejskiej są, że ta infrastruktura będzie w pozytywnym sensie konkurencyjna wobec innych regionów, szczególnie Japonii i USA. Te ambitne założenia moderują nieco obecne warunki światowego kryzysu gospodarczego. Kryzys może wpłynąć na tempo realizacji największych projektów akceleratorowych wymagających agregacji finansowania z wielu różnych źródeł. Uczestnictwo w takim projekcie jak EuCARD jest znacznym wyzwaniem i jednocześnie szansą dla mniejszych grup badawczych, z krajów nie posiadających własnej dużej infrastruktury akceleratorowej. Jedną w tych szans jest przekroczenie krytycznego progu budowy własnej infrastruktury prowadzącej do znacznego rozszerzenia zastosowań przemysłowych nowych technologii.



Rys. 2. Płyta systemowa SIMCON 3.1. i jej schemat blokowy.
 Fig. 2. SIMCON 3.1. PCB and its block diagram.



Rys.3. Amplituda i faza sygnału w ośmiu wnęk modułu ACC 1 akceleratora VUV-FEL.
 Fig.3. Amplitude and phase in eight resonat cavities of ACC1 module of VUV-FEL accelerator.

Literatura

1. EC FP7 [http://cordis.europa.eu/fp7/home_en.html]
2. KPK [<http://www.kpk.gov.pl>]
3. UPK EPB PW [<http://www.pw.edu.pl/Uczelnia/Struktura-uczelni-Sklad-osobowy/Jednostki-organizacyjne-podlegle-Rektorowi/Centrum-Wspolpracy-Miedzynarodowej/Uczelniany-Punkt-Kontaktowy-Europejskich-Programow-Badawczych-UPK>]
4. KRAB [<http://www.if.pw.edu.pl/~krab>]
5. ESGARD [<http://esgard.lal.in2p3.fr/>]
6. CARE Project [<http://care.lal.in2p3.fr/>]
7. CARE 08 Annual Meeting [<http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=36153>]
8. CARE Publications [<http://care.lal.in2p3.fr/Publications>]
9. EuCARD [<https://eucard.web.cern.ch/EuCARD>]
10. EuCARD kick-off meeting, CERN, 05.12.2008, [<http://indico.cern.ch/sessionDisplay.py?sessionId=16&slotId=0&confId=36153#2008-12-05>]

11. EuCARD 1st Governing Board Meeting, CERN, 01.04.2009, (CERN NICE account login required) [<http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=54248>]
12. EuCARD 1st Steering Committee Meeting, 03.04.2009, (CERN NICE account login required) [<http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=55073>]
13. CARE JRA SRF DESY [<http://jra-srf.desy.de>]
14. EuCARD WP10 SRF Superconducting Radio Frequency kick-off Meeting, DESY, 24.03.2009, [<https://indico.desy.de/conferenceDisplay.py?confId=1879>]
15. FLASH [<http://flash.desy.de>] Free Electron Laser, Hamburg
16. Photon Science [http://hasylab.desy.de/facilities/flash/index_eng.html]
17. ISIS [<http://www.isis.rl.ac.uk>] European Spallation Neutron Source
18. PHIN [<http://www.infn.it/phn>] Photon Injectors
19. HIPPI [<http://mgt-hippi.web.cern.ch/mgt-hippi>] High Intensity Pulsed Proton Injectors
20. NED [<http://lt.tnw.utwente.nl/research/HCS/Projects/CARE-NED>] Next European Dipole
21. ELAN [<http://elan.desy.de>] Electron Linear Accelerator Network, Superconducting Linac Technology
22. BENE [<http://bene.web.cern.ch/bene>] Beams for European Neutrino Experiments
23. HHH [<http://care-hhh.web.cern.ch/care-hhh>] High Energy, High Intensity, Hadron Beams
24. EuroTeV [<http://www.eurotev.org>] European Design Study towards a Global TeV Linear Collider
25. EuroLEAP [<http://www.laser-electron-acceleration-plasma.eu>] European Laser Electron controlled Acceleration in Plasmas to GeV energy range
26. EURISOL [<http://www.ganil.fr/eurisol>] European Isotope Separation On-Line
27. CLIC [<http://clic-study.web.cern.ch/clic-study>] Compact Linear Collider
28. SLHC [<http://info-slhc-pp.web.cern.ch/info-slhc-pp>] Large Hadron Collider upgrade
29. NEU2012 [<http://bene.web.cern.ch/bene/NEU2012.htm>] Neutrino Beams for Europe in 2012
30. MICE [<http://mice.iit.edu>] Muon Ionization Cooling Experiment
31. RAL STFC [<http://www.scitech.ac.uk>] Rutherford Appleton Lab
32. ALBA [<http://www.cells.es>] Synchrotron Barcelona
33. CBM [<http://www.gsi.de/fair/experiments/CBM>] Compressed Barionic Matter
34. FAIR [<http://www.gsi.de/fair>] Antiproton and Ion Research
35. E-XFEL [<http://xfel.desy.de>] European X-Ray Laser