



European Coordination for Accelerator Research and Development

PUBLICATION

Electronic system of the RPC Muon Trigger in CMS experiment at LHC accelerator (Elektroniczny system trygera mionowego RPC w eksperymencie CMS akceleratora LHC)

Bialkowska, H (Lodz, IPJ) *et al*

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 4: **AccNet: Accelerator Science Networks**.

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/1235127>>

H.Bialkowska, M.Bluj, K.Bunkowski, H.Czyrkowski, M.Cwiok, W.Dominik, K.Doroba, T.Frubes, R.Gokieli, M.Gorski, A.Kalinowski, M.Kazana, K.Kierzkowski, M.Konecki, J.Krolkowski, I.Kudla, K.Nawrocki, W.Okliniski, M.Pietrynski, K.Pozniak, Z.Salapa, M.Szleper, P.Traczyk, R.Romaniuk, G.Wrochna, W.Zabolotny, P.Zalewski

NCBJ Swierk, LLR EP Palaiseau, WF UW, ISE PW, CERN

Podstawowym celem badawczym Fizyki Wysokich Energii (FWE) jest poznawanie struktury materii i oddziaływań w niej zachodzących [1]. W wyniku przeprowadzanych eksperymentów dokonywana jest weryfikacja rozważań teoretycznych, a także wykonuje się coraz dokładniejsze pomiary znanych oddziaływań [2].

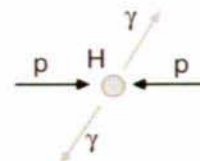
Przyjęcie modelu hadronów jako cząstek zbudowanych z hipotetycznych składników (kwarków u , d , s , c , b i t) oraz pasmo fundamentalnych odkryć w latach 70. i 80. (m.in. mezonu J/ψ , bozonów W^- , W^+ i Z^0) pozwoliły na skonstruowanie obecnie używanego tzw. Modelu Standardowego (MS). MS w spójny sposób wiąże ze sobą oddziaływania elektromagnetyczne, słabe i silne. Oddziaływania słabe i elektromagnetyczne są powiązane przez model Weinberga, Salama i Glashowa (WSG) jako zunifikowane przez teorię MS oddziaływanie elektroslabe (EW) [3]. Dzięki programom badawczym m.in. dla akceleratorów w CERN (Szwajcaria/Francja) [4], SLAC (USA) [5], FERMILAB (USA) [6] i DESY (Niemcy) [7] udało się dokładniej poznać strukturę hadronów i uzyskać zgodność z teorią EW na poziomie $10^{-3} \dots 10^{-5}$ [8]. Jak dotychczas MS nie pozwala na unifikację teorii oddziaływań silnych kwarków i gluonów z pozostałymi oddziaływaniami. Teorię tę nazwano chromodynamiką kwantową (QCD) z uwagi na liczbę kwantową zwaną kolorem, która odgrywa w niej rolę ładunku. QCD stanowi drugi po EW niezależny składnik MS. W stosunku do EW jest to teoria dużo słabiej rozwinięta, ponieważ przewidywania dotyczące procesów z udziałem kwarków muszą uwzględnić fakt uwięzienia koloru i powstawania hadronów z kwarków i gluonów w procesie zwanym „ubieraniem”, którego opis teoretyczny nie jest jeszcze kompletny [3].

Wyjaśnienie problemu masy cząstek stanowi obecnie najważniejszy cel badawczy FWE. Istota tego zagadnienia odnosi do eksperymentalnego potwierdzenia tzw. mechanizmu Higgsa [9], który poprzez zanurzenie cząstek MS w próżni Higgsa o odpowiednio dobranej kombinacji natężeń pól o minimalnej energii, spontanicznie łamie symetrię i nadaje cząstkom MS masy proporcjonalne do tzw. wartości próżniowej pól Higgsa. To z kolei zapewnia renormalizowalność teo-

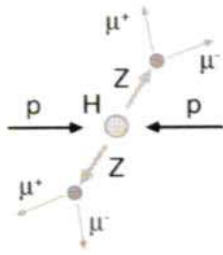
rii EW, a w praktyce doświadczalnej pozwala ustalić warunki wykrycia cząstek Higgsa. Doświadczalne zbadanie sektora Higgsa jest aktualnie planowane w eksperymentach w istniejącym akceleratorze Tevatron (FERMILAB, USA) [10] oraz nowopowstającym akceleratorze LHC (CERN, Szwajcaria/Francja) [11].

MS z dużą precyzją opisuje strukturę materii i jej oddziaływanie, jednak zawiera kilkadziesiąt wolnych parametrów dobranych arbitralnie oraz niewyjaśniony ostatecznie mechanizm Higgsa. W konsekwencji wymagane jest przeprowadzenie dalszych badań doświadczalnych w wyższych obszarach energii zderzeń, w celu znalezienia koniecznych rozszerzeń MS.

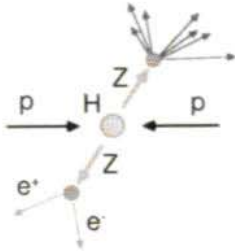
Na początku lat 90 ubiegłego wieku podjęto prace nad programem badawczym dla akceleratora Large Hadron Collider (LHC - Wielki Zderzacz Hadronów) [11, 12] w CERN (Genewa), który wyznaczy kierunek rozwoju fizyki cząstek w latach 2009 - 2015. Głównym celem programu jest próba zarejestrowania cząstki Higgsa w zakresie mas M_H do $1 \text{ TeV}/c^2$ oraz pomiar różnych kanałów rozpadu tych cząstek (rys. 1 - 3). W przypadku niepowodzenia teoretycy będą musieli opracować inne mechanizmy spontanicznego łamania symetrii i nadawania mas cząstkom. Planuje się poszukiwanie cząstek supersymetrycznych w obszarze mas do ok. $1 \text{ TeV}/c^2$, jako pomostu między MS, a teoriami wielkiej unifikacji (GUT) oraz poszukiwanie plazmy kwarkowo-gluonowej w oddziaływaniach ciężkich jonów [13].



Rys. 1. $80 < M_H < 140 \text{ GeV}/c^2$: rozpad cząstki Higgsa na dwa fotony
Fig. 1. Higgs particle decay into two photons

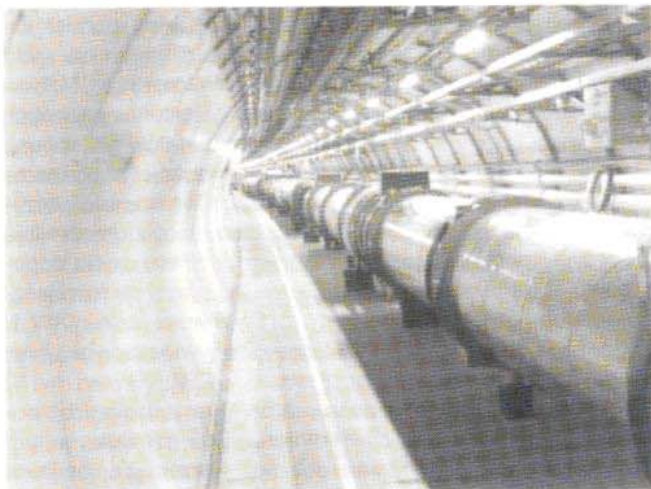


Rys. 2. $130 < M_H < 700 \text{ GeV}/c^2$: rozpad cząstki Higgsa na cztery leptony
Fig. 2. Higgs particle decay into four leptons

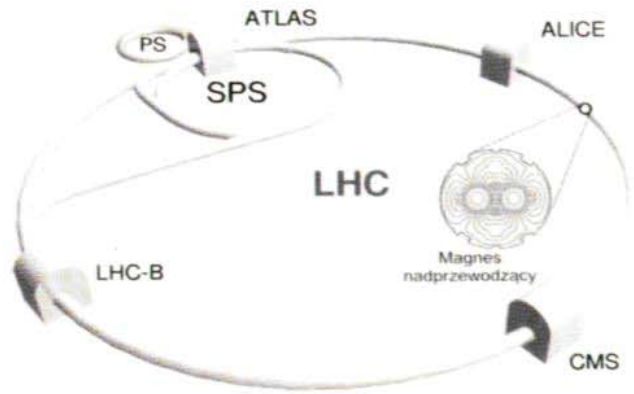


Rys. 3. $M_H > 500 \text{ GeV}/c^2$: rozpad cząstki Higgsa na dwa leptony i dwa dżety cząstek
Fig. 3. Higgs particle decay into two leptons and two jets

LHC jest największym współczesnym urządzeniem tego typu na świecie. Do jego budowy użyto najbardziej zaawansowanych technik akceleratorowych oraz technologii magnesów nadprzewodzących z NbTi, wytwarzających pole magnetyczne o wartości 8,4 T. Zastosowanie ich pozwoli nadać przeciwbieżnym pakietom protonowym energię po 7 TeV i tym samym umożliwi osiągnięcie energii 14 TeV w środku masy zderzenia. W każdej rurze akceleratora będzie krążyć 2875 paczek protonowych zderzających się ze sobą co 25 ns. W paczce będzie znajdować się 10^{11} protonów, co spowoduje zajście oddziaływań nieelastycznych pomiędzy 10...20 parami protonów w każdym przecięciu. Przewiduje się osiągnięcie świetlności rzędu $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, czyli o rząd wielkości więcej niż w obecnie istniejących maszynach tego typu [14]. Należy dodać, że świetlnosc jest parametrem charakteryzującym możliwości odkrywcze akcele-



Rys. 4. Fragment struktury akceleratora LHC obejmujący moduły magnesów dipolowych
Fig. 4. Part of the LHC accelerator with dipole magnets



Rys. 5. Kompleks akceleratorów oraz eksperymentów programu badawczego LHC
Fig. 5. Accelerators and experimental sites in the LHC experiment

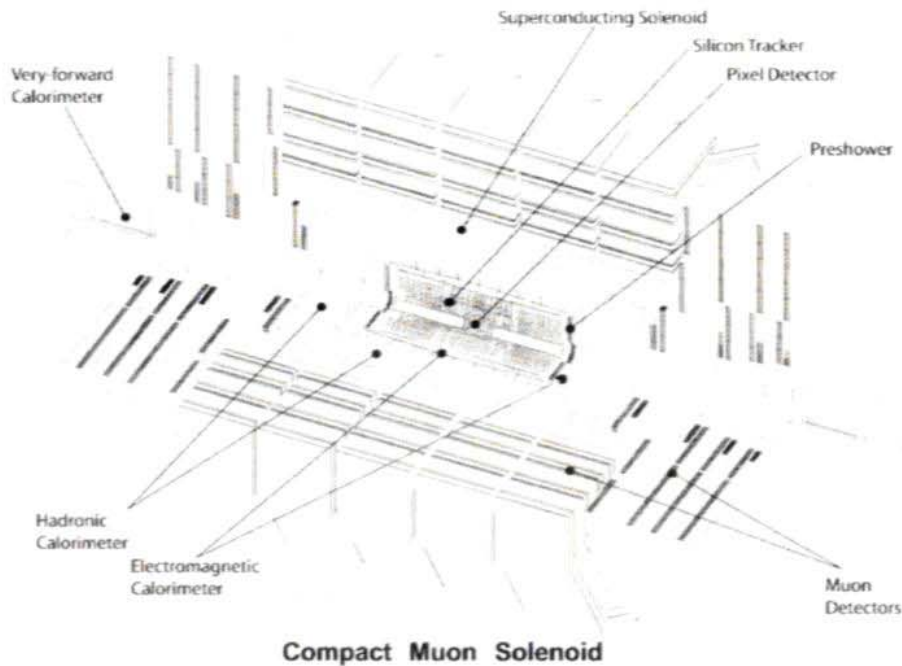
ratora. Częstość przypadków procesu o przekroju czynnym σ w akceleratorze o świetlności L wynosi $\sigma \cdot L$, co oznacza, że dla akceleratorów o większej świetlności uzyskuje się większą liczbę wyników badawczych.

Akcelerator LHC został umieszczony w istniejącym już tunelu akceleratora LEP o długości 26,6 km. Wykorzystanie starego tunelu oraz zasilania przez istniejące źródła cząstek i wstępne akceleratory były istotnym czynnikiem minimalizującym koszty całego przedsięwzięcia, szacowanego na kwotę 3 mld dolarów. Na rys. 4 przedstawiono fragment budowy akceleratora LHC, a na rys. 5 pokazano kompleks akceleratorów i eksperymentów dla programu badawczego LHC w CERN. Eksperymenty są rozmieszczone w czterech halach na obwodzie akceleratora, gdzie wiązki mogą się ze sobą przecinać bądź być ekstrakowane. W bogatym programie naukowym będzie uczestniczyć pięć eksperymentów: CMS [15] i zintegrowany z nim TOTEM [16] oraz ATLAS [17], są dużymi, uniwersalnymi eksperymentami przeznaczonymi do badania sektora Higgsa i poszukiwaniu nowej fizyki. Eksperyment ALICE [18] jest przeznaczony do badania oddziaływań ciężkich jonów, a LHCb [19] jest ukierunkowany na badanie łamania symetrii CP w sektorze kwarków pięknych - b.

Proces selekcji przypadków w Eksperymentcie Compact Muon Solenoid (CMS)

Eksperyment CMS [20] jest przeznaczony do prowadzenia bardzo precyzyjnych pomiarów zderzeń proton-proton oraz jądro-jądro, wytwarzanych w akceleratorze LHC. Jest zoptymalizowany do badania twardych procesów z produkcją elektronów lub mionów o wysokich pędach. Urządzenie pomiarowe eksperymentu stanowi dużej skali uniwersalny spektrometr modułowy CMS (Compact Muon Solenoid). Umożliwia on precyzyjny pomiar mionów w obszarze ich pędów poprzecznych do 200 GeV/c oraz detekcję elektronów i kwantów gamma, w podobnym zakresie energii. Zapewnia również pomiar kalorymetryczny hadronów w pełnym kącie bryłowym.

Ogólny schemat spektrometru CMS przedstawiono na rys. 6. Jest zbudowany dookoła cewki nadprzewodzącej o długości ok. 12 m i średnicy wewnętrznej ok. 6 m, wytwarzającej w środku jednorodne pole magnetyczne o indukcji 4 T. Punkt oddziaływania wiązek otaczają kolejne warstwy detektorów wewnątrz i na zewnątrz magnesu. Łączna liczba kanałów odczytu wynosi ok. 10^8 . Spektrometr CMS jako całość



Rys. 6. Struktura spektrometru CMS Fig. 6. Compact Muon Solenoid structure

stanowi beczkę o średnicy 15 m i długości 22 m, podzieloną na pięć oddzielnych kół i dwa denka. Całkowity ciężar urządzenia wynosi 12 500 t.

Wewnątrz spektrometru CMS znajdują się centralne krzemowe detektory śladowe o łącznej powierzchni 210 m². Około 100 mln kanałów odczytu zapewnia bardzo dobrą rozdzielczość przestrzenną i dokładność pomiaru trajektorii cząstek naładowanych. Detektory śladowe umożliwiają rejestrację produktów rozpadów cząstek zawierających kwarki *b*, rekonstrukcję mionów o wysokim pędzie poprzecznym, odseparowanie wysokoenergetycznych elektronów i hadronów przy zachowaniu efektywności powyżej 98% dla pseudospieszczości $|\eta| < 2,5$ [21-23]. Pseudospieszczość (*pseudorapidity* w j. angielskim) jest wielkością charakteryzującą odchylenie produkowanej cząstki od kierunku zderzających się protonów $\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$, gdzie θ jest kątem pomiędzy kierunkiem protonu a cząstki. Wokół punktu oddziaływania umieszczono *Pixel Detector*. Składa się on z dwóch beczek krzemowych o promieniach 4 i 7 cm oraz grubości warstwy detektorowej 0,03 cm zakończonych denkami. Rozmiary pojedynczego detektora wynoszą 150 x 150 μm^2 , a uzyskiwana rozdzielczość przestrzenna jest rzędu 10...15 μm [24,25]. *Silicon Strip Detectors* tworzą zewnętrzną warstwę detektorów śladowych. Składają się z kilkunastu warstw szybkich mikropaskowych detektorów krzemowych o łącznej powierzchni ok. 200 m². Detektor składa się z 15148 modułów krzemowych na których łącznie rozmieszczono 10 mln pojedynczych pasków detekcyjnych o grubości 300 μm w warstwach wewnętrznych i 500 μm dla warstw zewnętrznych [26,27].

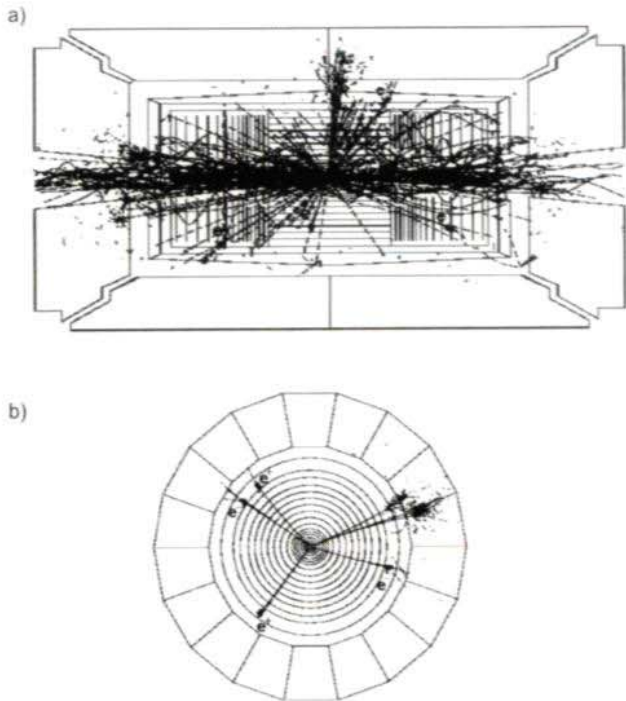
Hermetyczna warstwa kalometryczna spektrometru CMS zapewnia precyzyjny pomiar energii cząstek oraz wyliczenie energii neutronów uciekających z detektora CMS z bilansu energetycznego z wykorzystaniem ponad 100 000 kanałów odczytu. W obszarze beczki spektrometru CMS składa się ona z dwóch, wzajemnie uzupełniających się rodzajów kalymetrów. Warstwę wewnętrzną stanowi jednorodny *kalymetr elektromagnetyczny* umożliwiający pomiar energii elektronów i fotonów. Dla przedziału $m_H < 150$ GeV zapewnia dokładny pomiar rozpadów dwufotonowych (*rys. 1*), natomiast dla prze-

działu $140 < m_H < 700$ GeV umożliwia pomiar elektronów i pozytronów z rozpadów W i Z (*rys. 2*). Kalymetr elektromagnetyczny jest zbudowany z ponad 80 000 scyntylujących kryształów wolframanu ołowiu PbWO_4 o powierzchni 22 x 22 mm² i długości 220 mm. Zapewnia rozdzielczość energetyczną 1% powyżej energii 100 GeV oraz rozdzielczość kątową rzędu $40\text{mrad}/\sqrt{E}$ [GeV] [28]. *Kalymetr hadronowy* jest umieszczony w warstwie zewnętrznej. Umożliwia identyfikację dżetów hadronowych powstałych z kwarków i gluonów poprzez pomiar kierunku i energii neutralnych oraz naładowanych kaskad hadronowych. Jest zbudowany z 50 mm warstw mosiądzu przekładanego 5 mm warstwami scyntylatora. Rozdzielczość energetyczna wynosi $65\%/\sqrt{E}$ [GeV] \otimes 5%. Na zewnątrz beczki spektrometru CMS umieszczono dwa kalymetry przednie dla cząstek o małych kątach ($3 < |\eta| < 5$). Uzyskiwana rozdzielczość energetyczna detektorów wynosi $65\%/\sqrt{E}$ [GeV] \otimes 5%.

Na zewnątrz cewki znajdują się detektory mionów, umieszczone w jarzmie magnesu zamykającym strumień pola magnetycznego o wartości 1,8 T. Jednocześnie jarzmo pełni rolę absorbera przedzielającego cztery warstwy detektorów. Umożliwiają one identyfikację mionów oraz dokładny pomiar ich pędów. Celem pomiarów jest dostarczanie sygnałów dla wielu oczekiwanych procesów fizycznych. W spektrometrze CMS wykorzystano trzy typy mionowych szybkich detektorów gazowych o efektywności do 98% i łącznej liczbie kanałów ok. miliona [30,31]. *Drift Tubes* są umieszczone wyłącznie w obszarze beczki ($0 < |\eta| < 1,3$) [32], *Cathode Strip Chambers* w pokrywach ($0,9 < |\eta| < 2,4$) [33]. Oba typy detektorów umożliwiają precyzyjny pomiar trajektorii mionów dla czasu dryftu odpowiednio 400 i 50 ns. *Resistive Plate Chambers* są rozmieszczone w obu obszarach spektrometru CMS w zakresie $|\eta| < 2,1$. Zapewniają dobrą rozdzielczość czasową wynoszącą ok. 2 ns, ale ma gorszą rozdzielczość przestrzenną [34].

W wyniku zderzeń proton-proton (lub jądro-jądro) powstają stany końcowe zawierające wiele cząstek, w tym cząstki nietrwale. Optymalnie dobrana warstwowa struktura detekcyjna spektrometru CMS pozwala uzyskać dokładny opis stanu końcowego. Dzięki bardzo dobrym właściwościom metrologicznym użytych detektorów uzyskuje się dokładne

charakterystyki prawie wszystkich cząstek wtórnych o czasie życia większym niż 10^{-10} s. Badanie cząstek o krótszych czasach życia polega na analizie ich bardziej trwałych produktów rozpadu, a w przypadku cząstek nie rejestrowanych (np. neutrina na obserwacji energii brakującej). Przykład symulacji produkcji $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e$ dla masy cząstki Higgsa $M_H < 160$ GeV (rys. 2) w wyniku zderzeń pakietów proton-proton został zamieszczony na rys. 7. Powstaje złożony obraz trajektorii cząstek przedstawiony na rysunku w dwóch rzutach [35].

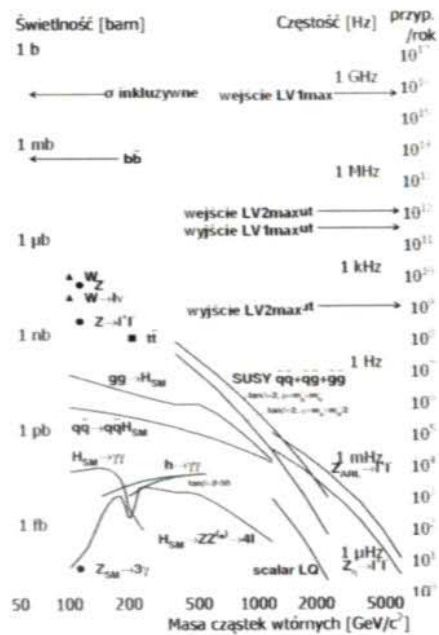


Rys. 7. Przykład symulacji zderzenia pakietów proton-proton: a) przekrój wzdłużny CMS z wykrytą produkcją $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e$, b) przekrój poprzeczny CMS
 Fig. 7. Example simulation of proton-proton collision with the detected production $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e$: a) longitudinal cross-section of the CMS, b) transversal cross-section of the CMS

Przekroje czynne na interesujące procesy produkcji cząstek Higgsa, cząstek supersymetrycznych itp. są bardzo małe, pomimo bardzo wysokiej energii zderzeń ($\sqrt{s} = 14$ TeV) oraz świetlności $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ uzyskiwanej w akceleratorze LHC. Na rys. 8 zamieszczono oczekiwane częstości wystąpienia produkcji wybranych cząstek dla LHC [36]. Przykładowo, spodziewana częstość produkcji cząstki Higgsa o masie 120 GeV kształtuje się na poziomie 10^{-2} Hz, czyli średnio raz na dwie minuty. Natomiast obserwacja kanału rozpadu Higgsa na dwa fotony (rys. 1) charakteryzuje się prawdopodobieństwem wystąpienia na poziomie $5 \cdot 10^{-4}$, czyli średnio dwa razy na godzinę [13]. Rzeczywiste tło fizyczne w akceleratorze LHC (LV1 input) kształtuje się na poziomie 1 GHz oddziaływań przy częstości zderzeń 40 MHz [12]. Rejestracja wszystkich zdarzeń, w celu ich późniejszej analizy komputerowej jest technicznie niemożliwa.

Tryger eksperymentu CMS decyduje jakie dane, wstępnie zarejestrowane w detektorach, należy trwale zapamiętać. W tym celu tryger został zoptymalizowany pod kątem:

- efektywności, dzięki wykorzystaniu nowoczesnych, wielokanałowych detektorów,
- wydajności, którą zapewnia współczesny poziom zaawansowania technologicznego,
- selektywności, czyli zdolności wyboru zjawisk o dokładnie określonych parametrach.



Rys. 8. Efektywność procesów w funkcji masy produkowanych cząstek wtórnych w LHC
 Fig. 8. Efficiency of processes in LHC as the function of mass of produced secondary particles



Rys. 9. Stopniowa selekcja przypadków w eksperymencie CMS
 Fig. 9. Multistage selection of events in the CMS experiment

Względy funkcjonalne i techniczne leżą u podstaw realizacji dwustopniowego systemu trygerowania w eksperymencie CMS [36,37]. Ogólną strukturę stopniowej selekcji przypadków przedstawiono na rys. 9. Pierwszy stopień trygera (L1) eksperymentu CMS redukuje częstość przypadków do maksymalnego poziomu 100 kHz. Do czasu podjęcia decyzji przez L1, wszystkie dane z detektorów są zapamiętane w buforach danych na okres 3,2 μs . Stąd do realizacji trygera wykorzystano szybkie detektory i moduły elektroniczne [38]. Pozytywna decyzja na poziomie L1 powoduje przekazanie wyselekcjonowanych danych do drugiego stopnia trygera (L2) poprzez szybką matrycę przełączającą. Docelowo jest planowana instalacja matrycy 1000 x 1000 oraz podobnego rzędu

farmy komputerowej, złożonej ze standardowych maszyn klasy PC [39-40]. Ostatecznie dokonywana jest redukcja przypadków na poziomie 10^7 , czyli efektywnie tylko 100 zderzeń na sekundę (*LV2 output*) będzie rejestrowanych przez system akwizycji danych.

Zasada działania L1 w eksperymencie CMS polega na odnalezieniu określonych obiektów oraz ich uporządkowania według określonych kryteriów. W odróżnieniu od innych rozwiązań stosowanych w eksperymentach FWE, na poziomie trygera kalorymetrycznego i mionowego nie jest podejmowana decyzja o selekcji przypadków. Uzyskane informacje są przesyłane do *trygera globalnego*, gdzie zgodnie z określonymi kryteriami fizycznymi, kalibracyjnymi bądź technicznymi następuje wypracowanie decyzji. Do tego celu wykorzystuje się nie tylko dane energetyczne i identyfikacyjne cząstek, ale również dane topologiczne z całego obszaru spektrometru CMS. W *tab. 1* zamieszczono podstawowe uwarunkowania dla trygera pierwszego stopnia względem procesów fizycznych [38].

Tryger kalorymetryczny identyfikuje i selekcjonuje elektrony, fotony, leptyony τ oraz dżety. Spośród każdego rodzaju cząstek są wybierani czterej kandydaci o najwyższych energiach oraz jest obliczany wektor całkowitej brakującej energii poprzecznej. *Tryger mionowy* wykrywa maksymalnie osiem mionów o najwyższych pędach. Stanowi ważki element procesu badawczego eksperymentu CMS, ponieważ liczne rozpadły poszukiwanych nowych cząstek produkują miony (*tab. 1*). Są to cząstki o dużej przenikalności, dlatego system komór mionowych jest umieszczony w zewnętrznej warstwie spektrometru CMS. Do tych obszarów nie docierają pozostałe produkty zderzeń, wcześniej pochłonięte w kalorymetrach lub żelazie. Uzyskuje się sygnatury mionowe dobrze wyodrębnione z tła [36].

Tryger pierwszego stopnia eksperymentu CMS narzuca bardzo wysokie wymagania czasowe. Jeden z trygerów został wyposażony w szybkie detektory RPC, które stanowią pierwotny element decyzyjny. Zapewniają bardzo dobrą rozdzielczość czasową i nieco gorszą przestrzenną. Umożliwiają odrębną detekcję przejść mionów dla poszczególnych zderzeń pakietów w akceleratorze LHC oraz dobrą separację trajektorii cząstek [37]. Dostarczenie z detektorów RPC uporządkowanej informacji, identyfikującej po cztery najbardziej energetyczne miony z obszaru beczki i pokryw, wymagało realizacji szybkiego elektronicznego systemu przetwarzania.

W niniejszej pracy omówiono zasadę działania *Trygera Mionowego RPC*. Do realizacji tych zadań wykorzystano prawie dziesięć tysięcy szybkich układów FPGA. W dalszej

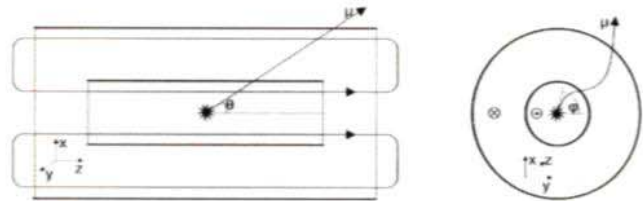
części artykułu przedstawiono realizację w FPGA poszczególnych etapów algorytmu. Omówiono zastosowane metody implementacji, synchronizacji, monitoringu i diagnostyki.

Pomiar trajektorii mionu w polu solenoidu CMS

Pomiar pędu mionów jest przeprowadzany na podstawie analizy zakrzywienia ich trajektorii w stałym i jednorodnym polu magnetycznym ($\vec{B} = \text{const}$) spektrometru CMS. Ruch mionu o masie spoczynkowej m_0 , ładunku q i prędkości \vec{V} opisuje równanie:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = m_0 \frac{d(\gamma\vec{V})}{dt} = q(\vec{V} \times \vec{B}) \quad (1)$$

gdzie: $\vec{p} = gm_0\vec{V}$, $g = (1 - (V/c)^2)^{-1/2}$, a c oznacza prędkość światła. Pole magnetyczne oddziałuje jedynie na trajektorię ruchu cząstki, natomiast energia cząstki pozostaje niezmienna: $E = gm_0c^2 = \text{const}$.



Rys. 10. Konfiguracja pola magnetycznego w spektrometrze CMS. Lewa strona - przekrój wzdłuż osi akceleratora, prawa strona - przekrój poprzeczny

Fig. 10. Magnetic field configuration in the CMS (left side - longitudinal cross-section, right side - transversal cross-section)

Schematyczny rozkład linii sił pola magnetycznego w spektrometrze CMS przedstawiono na *rys. 10*. Ze względu na konfigurację pola magnetycznego, wytworzonego przez cylindryczną cewkę miony zakrzywane będą tylko w płaszczyźnie $x - y$. Nadprzewodzący magnes wytwarza jednorodne stałe pole o natężeniu $B_1 = 4\text{T}$ wewnątrz cewki i $B_0 = 2\text{T}$ na zewnątrz, w obszarze obejmującym detektory RPC. Metoda pomiaru pędu przez detektor RPC wykorzystuje analizę zakrzywienia trajektorii tylko w płaszczyźnie $x - y$. Mierzony jest pęd poprzeczny p_T określony przez pęd całkowity mionu p i kąt rozproszenia Θ względem osi akceleratora (z):

Tab. 1. Podstawowe uwarunkowania L1 względem badanych procesów fizycznych
Tabl. 1. Basic constraints of L1 trigger related to investigated physical processes

| Trigger | Thresholds GeV | Examples of explorable physics channels |
|--|----------------|--|
| 1μ | 15 | $H_{\rightarrow 3\ell}, H, A, H^\pm, W, W^*, t, B$ -physics channels |
| 2μ | 5, 5 | $H_{\rightarrow 3\ell}, h, H, A, Z, Z', DY, V, \mu\mu, \tau\tau, \gamma\gamma, \gamma\gamma, lq, \nu, I_2^{\mu\tau} = 2\mu, \Upsilon, \Upsilon', \Upsilon''$ |
| $\mu + e/\tau$ | 5, 15 | $H_{\rightarrow 3\ell}, H, A, t, WW, WZ, W^*, \gamma, \gamma', \gamma^\pm, \mu\mu, \nu, V$ |
| $\mu + \text{jet(s)}$ | 5, 50 | $H_{\rightarrow 3\ell}, h, H, A, q, \bar{q}, lq, t$ |
| $\mu + E_T^{\text{miss/stop}}$ | 5, 100 | $t, q, \bar{q}, l, lq, WW, WZ, W^*$ |
| $1e/\tau$ | 20 | $H_{\rightarrow 3\ell}, h, H, A, W, W^*, t, B$ -physics channels |
| $2e/\tau$ | 15, 15 | $H_{\rightarrow 3\ell}, h, H, A, Z, Z', DY, WW, WZ, W^*, l, \gamma', \gamma^\pm, lq$ |
| 2 jets | 60, 60 | QCD |
| $e/\tau + \text{jet(s)}$ | 15, 60 | $H_{\rightarrow 3\ell}, h, H, A, q, \bar{q}, lq, \text{QCD } (\tau + \text{jets}), W + \text{jets}$ |
| $\text{jets} + E_T^{\text{miss/stop}}$ | 60, 100 | \bar{q}, q, H^\pm |
| $\mu + \tau$ | 5, 20 | $H_{\rightarrow 3\ell}, H, A, q, \bar{q}$ |
| $e/\tau + \tau$ | 15, 20 | $H_{\rightarrow 3\ell}, H, A, q, \bar{q}$ |
| $\tau + \text{jets}$ | 15, 60 | H^\pm |

$$p_{\perp} = p \cdot \sin \Theta \quad (2)$$

Wektor natężenia pola B zawiera tylko składową wzdłużną B_z . Pole oddziałuje wyłącznie w płaszczyźnie $x - y$ na składową prostopadłą V_T wektora prędkości. Skalarne równania ruchu dla składowych V_x i V_y , przy warunku zachowania energii mionu E :

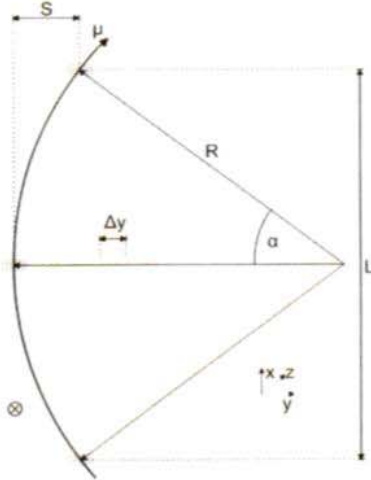
$$\begin{aligned} 1) m_0 \frac{dV_x}{dt} &= qV_y B_z \\ 2) m_0 \frac{dV_y}{dt} &= -qV_x B_z \\ 3) E &= \gamma \cdot m_0 c^2 \end{aligned} \quad (3)$$

wyznaczają promień R okręgu, po którym porusza się cząstka naładowana:

$$R = m_0 \gamma \cdot \frac{V_T}{qB_z} = \frac{p_T}{qB_0} \quad (4)$$

Krzywizna trajektorii określona promieniem R wyznacza pęd poprzeczny mionu p_T :

$$p_T = qB_0 R \quad (5)$$



Rys.11. Zasada wyznaczania pędu mionu w detektorze RPC
Fig. 11. Assessment of muon momentum in the RPC detector

Ogólną zasadę geometrycznej metody wyznaczania pędu poprzecznego mionu przez detektor RPC zamieszczono na rys. 11. Zgodnie z równaniem (4), promień koła R jest wprost proporcjonalny do wartości pędu poprzecznego mionu p_T . Trajektorię cząstki opisuje zależność $R = f(L, S)$, gdzie odpowiednio:

$$\begin{aligned} L &= 2R \sin \alpha \\ S &= R(1 - \cos \alpha) \end{aligned} \quad (6)$$

Z układu równań można wyznaczyć promień R :

$$R = f(L, S) = \frac{L^2 - 4S^2}{8S} \quad (7)$$

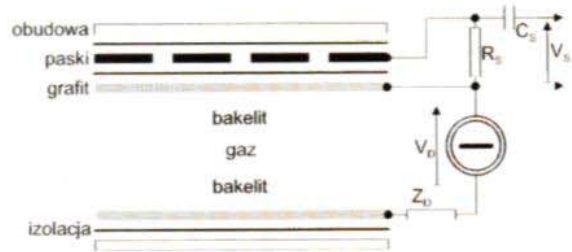
Po przyrównaniu prawych stron równań (4) i (7), pęd poprzeczny mionu określa wzór:

$$p_T = qB_0 \frac{L^2 - 4S^2}{8S} \quad (8)$$

Pomiar pędu poprzecznego dla wysokoenergetycznych mionów uzyskiwanych w akceleratorze LHC pozwala przyjąć założenie, że $S \ll R$, stąd:

$$\begin{aligned} p_T &\cong qB_0 \frac{L^2}{8S} \cdot p_T [\text{GeV}/c] = \\ &= \frac{0.3}{8} \cdot \frac{B \cdot L^2}{S} [\text{H} \cdot \text{m}] \end{aligned} \quad (9)$$

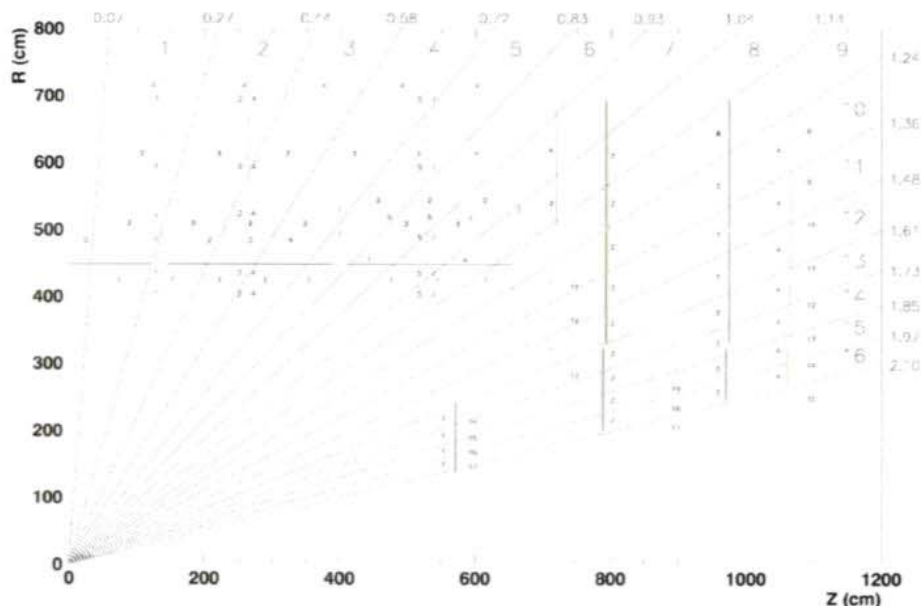
Położenie komór RPC w obszarze pola zwrotnego nadprzewodzącej solenoidu powoduje, że analiza pędu musi być przeprowadzona na podstawie trajektorii mionu odchylanego w pierw przez pole 4 T, a następnie przez pole przeciwne o natężeniu 1,8 T (por. rys. 10). Dodatkowo na kształt trajektorii mionu mogą mieć wpływ efekty stochastycznej, takie jak rozpraszanie wielokrotne oraz strata energii mionu.



Rys. 12. Budowa komory RPC w przekroju poprzecznym
Fig. 12. Transversal section of the RPC chamber

Budowę pojedynczej komory RPC w przekroju poprzecznym zamieszczono na rys. 12. Komora składa się z dwóch bakelitowych płyt o rezystancji $10^{10} \dots 10^{11} \Omega \text{cm}$. Warstwy tworzą szczelne pudło gazowe o grubości przerwy 2 mm. Jest ono wypełnione mieszką gazową (freon z dodatkiem innych gazów). Do zewnętrznej powierzchni płyt pokrytych warstwą grafitu jest przyłożone wysokie napięcie V_D . Metalowe paski umożliwiają pozytywny odczyt ładunku kaskady elektronowej wywołanej przejściem naładowanej cząstki. Długość paska wynosi 80 lub 120 cm, a szerokość paska mieści się w zakresie od 2,1 cm w warstwach wewnętrznych do 4,1 cm w warstwach zewnętrznych. Maksymalny czas propagacji sygnału z paska nie przekracza 10 ns, co umożliwia uzyskanie pełnej rozdzielczości czasowej względem zderzeń pakietów cząstek w akceleratorze LHC. Komory RPC pracują w ograniczonym modzie proporcjonalnym, ze średnią efektywnością nie mniejszą niż 98%.

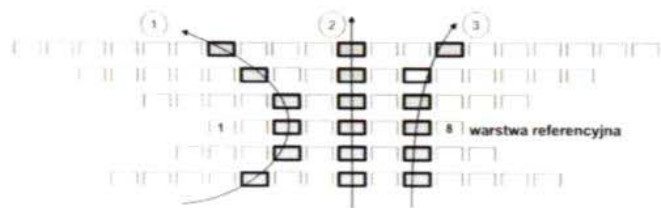
Rozłożenie komór RPC w obrębie spektrometru CMS pokazano na rys. 13. Dwa tysiące komór zostało podzielonych w płaszczyźnie kąta θ na 33 wieże. Szerokość stożka jest definiowana przez długość pasków komór referencyjnych (stacje oznaczone numerem 2). Każda wieża dzieli się na 12 logicznych sektorów w płaszczyźnie kąta ϕ . Stacje mionowe w beczce dzielą się na pięć kół, z których każde składa się z 12 sektorów obejmujących po 30° w ϕ . Paski odczytowe komór RPC biegną równoległe do wiązki, a ich szerokość wynosi od 2 do 4 cm. W pokrywach każda z czterech warstw stacji mionowych dzieli się w ϕ na 36 sektorów. Dla najbliższych wiązce obszarów stacji 2, 3 i 4 zastosowano podział na 18 sektorów. Paski komór RPC są ułożone radialnie, prostopadłe do wiązki.



Rys. 13. Podział systemu komór RPC na wieże w przekroju podłużnym spektrometru CMS
Fig. 13. Layout of RPC chambers in the towers in the transversal cross-section of CMS

System detektorów RPC umożliwia wydajne odnajdywanie wysokoenergetycznych mionów. Z wysoką efektywnością identyfikuje ślady mionów, w szczególności trajektorie wysokoenergetycznych cząstek. Jednoznacznie przypisuje znalezione miony do przecięcia, z którego pochodzą.

Trajektorie mionów dla całego obszaru spektrometru CMS są wypracowywane co 25 ns, na podstawie sygnałów z 200 000 pasków komór RPC. W konsekwencji została zastosowana bardzo szybka metoda wykrywania trajektorii mionu oraz wyznaczania jego pędu na podstawie krzywizny toru w stałym polu magnetycznym. Zaimplementowano metodę równoczesnego porównywania sygnałów detekcji z wzorcami trajektorii (ang. *pattern recognition*). Zasadę działania algorytmu przedstawiono na rys. 14.



Rys. 14. Detekcja trajektorii mionów w stożku
Fig. 14. Detection of muon tracks in the cone

Wyznacza się obszar 6 warstw pasków komór RPC określany jako *stożek* (oznaczony na rys. 14 kolorem jasno-szarym). Jest to obszar obejmujący swoim zasięgiem wszystkie przewidywane trajektorie mionów ograniczone zakresem pędów poprzecznych podlegających pomiarowi. Każdy stożek bazuje na warstwie referencyjnej, zawierającej dokładnie 8 pasków. Zgodnie z oznaczeniami na rys. 13, warstwę tę oznaczono numerem 2. Szerokość pozostałych warstw wynika z położenia w obrębie spektrometru CMS oraz przewidywanych trajektorii mionów dla danego obszaru. Każdy z wzorców posiada przypisane wartości pędu poprzecznego (tzw. kod pędowy) oraz znaku. Znak jest określany na podstawie kierunku zagięcia trajektorii w polu magnetycznym i odpowiada znakowi ładunku cząstki. Wykrycie zgodności

rzeczywistej trajektorii z wzorcem skutkuje przypisaniem tej trajektorii parametrów danego wzorca. Trzy przykłady pokrycia się trajektorii z wzorcami, zróżnicowane pod względem wartości p_T , przedstawiono na rys. 14. Trajektorja o największym zagięciu reprezentuje najniższą wartość p_T . Dodatkowo trajektorie 1 i 3 różnią się znakami. Wysokopędowa prosta trajektorja 2 posiada umownie znak dodatni. Porównanie wzorca z rzeczywistą trajektorią prowadzi do bardzo silnie uwarunkowanej koincydencji. Dla 98% efektywności detekcji w komorze RPC, uzyskuje się efektywność dopasowania wzorca na poziomie: $0,98^6 = 88\%$. Z tego powodu, w algorytmie uwzględniono cztery warianty dopasowania, używając od sześciu do trzech płaszczyzn komór i przypisując im odpowiedni kod dopasowania.

W strukturze przestrzennej komór RPC pokazanej na rys. 13 zdefiniowano w sumie 6200 stożków, które są równocześnie poddawane analizie porównawczej dla około 2000 wzorców przypisanych dla każdego ze stożków. Ich rezultatem jest wypracowanie 6200 kandydatów mionowych określonych przez trójkę (kod dopasowania, kod pędowy, znak). Kandydaty są następnie poddane procesowi sortowania, który doprowadza do wyznaczenia do czterech najbardziej energetycznych mionów w beczce i czterech w pokrywach wraz z informacją o miejscach ich wykrycia.

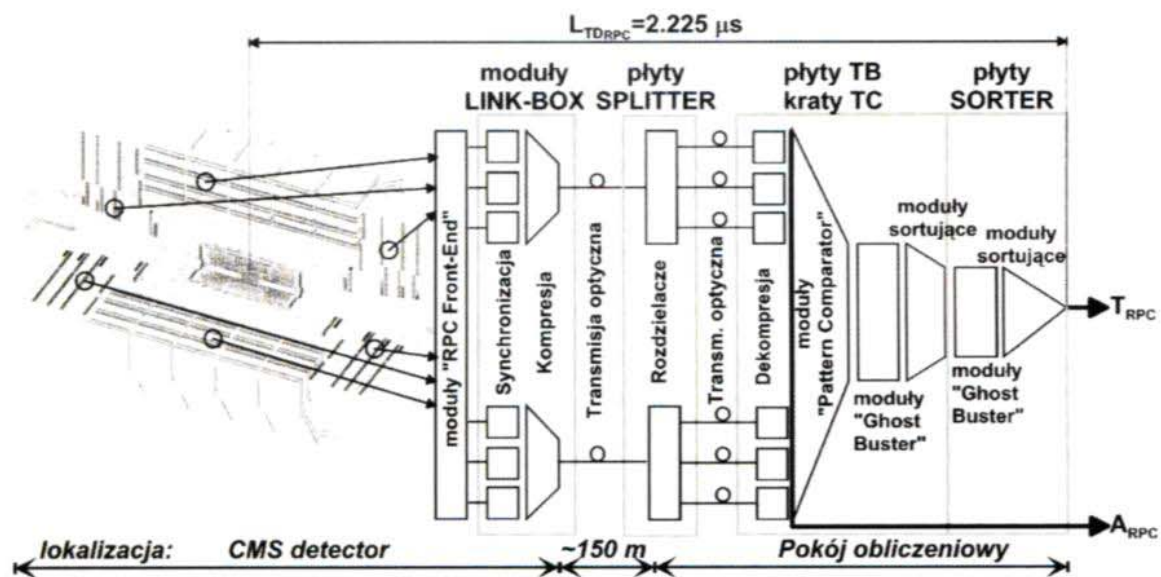
Omówiony powyżej szybki algorytm wyznaczania najbardziej energetycznych czterech mionów w obszarze detektorów RPC musi co 25 ns dokonywać kolejnej analizy 200 000 sygnałów i w trybie potokowym wypracować odpowiedź po stałym czasie opóźnienia (tzw. latencji), równej 89 taktom zegara 40 MHz, czyli po 2,225 μ s. W tym celu opracowano elektroniczny, wielokanałowy, rozproszony i synchroniczny system trygera mionowego RPC, którego część funkcjonalna została w całości zaimplementowana w układach FPGA (tzw. *firmware*) przez autorów niniejszej pracy z Instytutu Systemów Elektronicznych. Wraz z grupą warszawską CMS z Uniwersytetu Warszawskiego oraz grupami z Bari (Włochy) i Lappeeranta (Finlandia), autorzy uczestniczyli także w opracowaniu części sprzętowej systemu, a następnie jego instalacji oraz uruchomieniu w eksperymencie CMS.

Budowa systemu trygera mionowego RPC

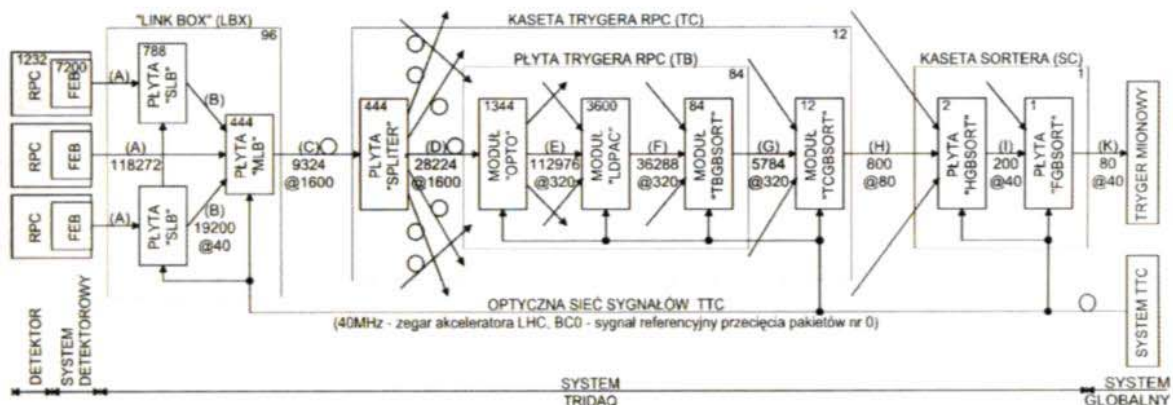
W strukturze przestrzennej systemu komór RPC, pokazanej na rys. 13, zdefiniowano ponad 6000 stożków. W efekcie wypracowuje się taką samą liczbę kandydatów mionowych określonych przez trójkę: (kod dopasowania, kod pędowy, znak). Ponieważ w większości stożków w danym przypadku, nie wykrywa się kandydatów jest generowana arbitralnie trójka (0,0,0). Kandydaci są następnie sortowani według jakości (liczby użytych płaszczyzn) i wartości energii. Ostatecznie wyznacza się maksymalnie cztery najbardziej energetyczne miony (wraz z informacją o miejscach ich wykrycia) z obszarów beczki oraz pokryw detektora CMS.

Na rysunku 15. przedstawiono podstawowy podział funkcjonalny i konstrukcyjny systemu Trygera Mionowego RPC. Ze względów konstrukcyjnych są one tożsame z podziałem warstwy funkcjonalnej na poszczególne moduły lub płyty elektroniczne:

- *moduły RPC Front-End* wzmacniają sygnały z komór RPC, przeprowadzają ich dyskryminację i formują standaryzowane impulsy odpowiedzi,
- *synchronizatory* przeprowadzają proces „okienkowania” i przypisania wyjściowej informacji logicznej do właściwego przecięcia,
- *kompresja* realizuje algorytm synchronicznej kompresji danych, redukując tym samym sześciokrotnie liczbę wymaganych łączy optycznych,
- *transmisja optyczna* jest biernym etapem synchronicznej dystrybucji informacji,
- *rozdzielacze* powielają sygnały optyczne,
- *dekompresja* odtwarza z informacji skompresowanej pierwotny obraz danych z komór RPC, zachowując jednocześnie stałą latencję transmisji sygnału skompresowanego,
- *moduły Pattern Comparator* porównują tory cząstek z wzorcami i wyznaczają kandydatury mionowe o najlepszej rekonstrukcji i najwyższych kodach pędowych,



Rys. 15. Podstawowa struktura funkcjonalna systemu TRIDAQ detektora RPC
Fig. 15. Basic functional structure of the TRIDAQ system of the RPC detector



Rys. 16. Konstrukcja systemu Trygera Mionowego RPC ozn.: liczby w górnej części prostokątów - liczba modułów danego typu, liczby przy połączeniach (strzałkach) - liczba przesyłanych bitów informacji @ szybkość [MHz]
Fig. 16. Structure of the RPC Muon Trigger explanations: numbers in the upper parts of rectangles - number of modules of the particular kind, numbers at the arrows - numbers of transmitted bits @ transmission speed [MHz]

- *moduły GhostBuster* redukują trajektorie wtórne, powstające na wspólnym obszarze sąsiadujących stożków,
- *sortowanie* wyznacza po cztery kandydaty z beczki i pokryw o najwyższej jakości dopasowania i wartościach kodów pędowych (wyjście T_{RPC}),
- *akwizycja danych* rejestruje dane skompresowane, synchronicznie z trygerem pierwszego stopnia eksperymentu CMS (wyjście A_{RPC}).

Pod względem swojej budowy system TRIDQA detektora RPC zalicza się do grupy bardzo dużych i rozproszonych systemów pomiarowych. Jego złożoną strukturę konstrukcyjną przedstawiono ilościowo na rys. 16. System jest podzielony na dwie części, umieszczone odpowiednio na spektrometrze CMS i w pokoju obliczeniowym.

Część umieszczona na spektrometrze CMS (kasety *LINK BOX - LBX*) jest bezpośrednio połączona okablowaniem z 7200 modułami *RPC FRONT-END*. Te uwarunkowania techniczne wymagały rozmieszczenia 96 osobnych kaset *LBX* wokół całego spektrometru CMS. Poszczególne kasetki są oddalone od siebie nawet o kilkadziesiąt metrów. Z uwagi na dopuszczalne rozrzuty czasu detekcji rzędu 3...5 ns, wszystkie kable muszą posiadać taką samą długość, a ich parametry transmisyjne nie mogą wprowadzać całkowitego rozrzutu większego niż 1 ns. Każda kasetka *LBX* zawiera płytkę *LINK BOARD*. Na nich zaimplementowano moduły synchronizacji oraz kompresji. Płytki zostały podzielone na dwa typy: *SLAVE (SLB)* i *MASTER (MLB)* odpowiednio do wariantu kompresji. Na płytach *SLB* jest jedynie przeprowadzana kompresja pojedynczej komory, a na płycie *MLB* dodatkowo multipleksowanie pakietów i wysyłanie danych

przez łącze optyczne. Na rys. 17 została pokazana konstrukcja pojedynczej płytki. Jej głównym elementem wykonawczym są układy programowalne typu *Spartan3* [12] (ozn. *F*). Ta rodzina FPGA została wybrana przede wszystkim ze względu na dobrą odporność na podwyższone promieniowanie jonizujące.

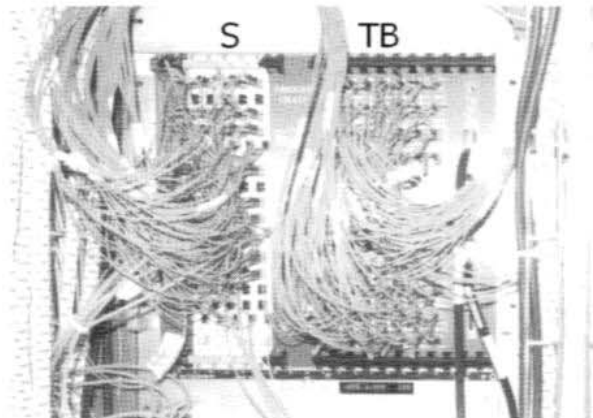
W pokoju obliczeniowym moduły Trygera Mionowego *RPC* umieszczono w kasetach *VME*. Na rys. 18 przedstawiono jedną z 108 zainstalowanych płyt *TB (TRIGGER BOARD)*. Każda płyta posiada 18 odbiorników optycznych (ozn. *L* na dwa odbiorniki) wraz z układami *FPGA*, które zapewniają odbiór danych (ozn. *O*) i ich redystrybucję do czterech modułów *LDPAC* (ozn. *P*) i jednego modułu *AKWIZYCJI DANYCH* (ozn. *A*). Są to moduły umieszczone na płytkach nakładkowych. Przewidziana jest możliwość ich wymiany na nowe wersje układów *FPGA*. Na płycie nakładkowej jest również umieszczony pierwszy element kaskady sortującej *TBG-BSORT* (ozn. *S*). Płyta jest dodatkowo wyposażona w interfejs komunikacyjny *VMEbus* (ozn. *S*), poprzez który można również zaprogramować układy *FPGA*. Układ płyt *SPLITTER* (ozn. *S*) i *TB* w kasecie trygerowej pokazano na rys. 19, a układ kasetki sortera (*SC*) zawierającej kaskadę płyt sortujących (ozn. *S*) zamieszczono na rys. 20.

Układy *FPGA* stanowią reprogramowalny rdzeń funkcjonalny systemu trygera mionowego *RPC*, w tym także jego toru akwizycji danych i modułów sterowania. Ich łączne zestawienie ilościowe zamieszczono w tab. 2.

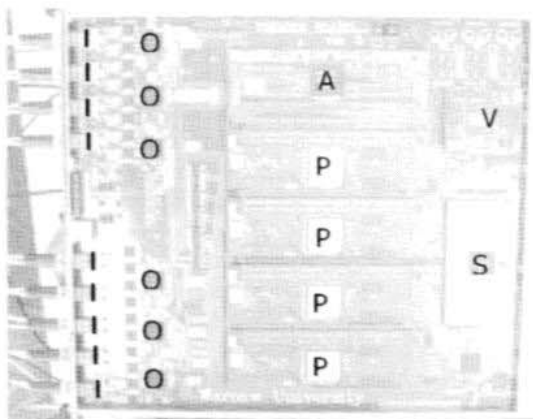
Z liczby ponad 4000 układów *FPGA*, jedynie około 250 jest programowanych stałą konfiguracją. Pozostałe układy mogą być wielokrotnie zdalnie rekonfigurowane, bez konieczności



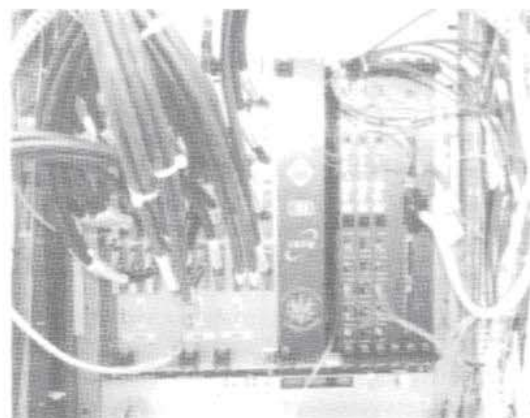
Rys. 17. Budowa płytki *LINK BOARD*
Fig. 17. View of the *LINK BOARD*



Rys. 19. Układ kasetki trygerowej (*TC*)
Fig. 19. View of the *Trigger Crate*



Rys. 18. Budowa płytki *TRIGGER BOARD*
Fig. 18. View of the *TRIGGER BOARD*



Rys. 20. Układ kasetki sortującej (*SC*)
Fig. 20. View of the *Sorting Crate*

Tab. 2. Ilościowe zestawienie zaimplementowanych układów FPGA
 Tabl. 2. Inventory of FPGA chips used for implementation of the RPC Muon Trigger

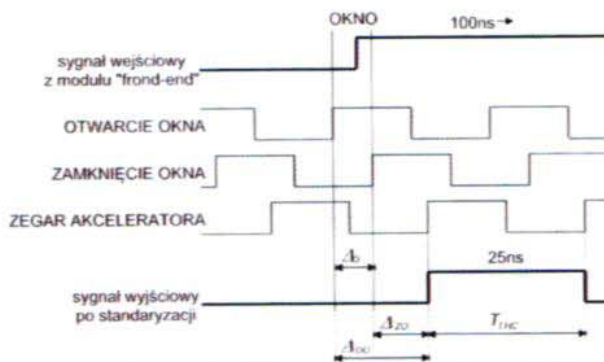
| Nazwa płyty | Rodzaj układu FPGA | | | Liczba układów FPGA | |
|---------------|--------------------|-------------|--------------|---------------------|------------|
| | Producent | Rodzina | Typ | na płycie | w systemie |
| Link Board | Xilinx | Spartan3 | 3S1000fg456 | 2 | 2424 |
| Control Board | Xilinx | Spartan3 | 3S1000fg456 | 1 | 182 |
| | Actel | ProASIC+ | APA450FGG256 | 1 | 182 |
| Trigger Board | Altera | Cyclone | EP1C6F256C6 | 7 | 588 |
| | Altera | Stratix II | EP2S30F672 | 2 | 168 |
| | Altera | Stratix II | EP2S60F672 | 4 | 336 |
| | Altera | ACEX1K | EP1K50FC256 | 1 | 84 |
| Trigger Crate | Altera | Stratix II | EP2S60F1020 | 1 | 12 |
| | Altera | ACEX1K | EP1K50FC256 | 1 | 12 |
| Sorter Board | Xilinx | VirtexIIPro | 2VPX70ff1704 | 1 | 3 |
| | Altera | ACEX1K | EP1K50FC256 | 1 | 3 |
| DCC board | Altera | Stratix | EP1S25F672 | 2 | 6 |
| | Xilinx | VirtexIIPro | XC2VP7FG456 | 9 | 27 |
| | Altera | ACEX1K | EP1K30QC208 | 1 | 3 |
| | | | | łącznie: | 4012 |

jakiegokolwiek ingerencji fizycznej. Przyjęcie powyższej koncepcji zarządzania warstwą funkcjonalną umożliwia jej rekonfigurację już po docelowej instalacji systemu w eksperymencie. Dzięki temu, usunięcie wykrytych nieprawidłowości lub implementacja nieprzewidzianych wcześniej potrzeb funkcjonalnych może być zrealizowana na poziomie *firmware* i nie wymaga ingerencji ekip technicznych oraz kosztownej wymiany aparatury elektronicznej. W kolejnych rozdziałach przedstawiono najważniejsze elementy funkcjonalne systemu Trygera Mionowego RPC zaimplementowane w układach FPGA. Pominęto opis algorytmu wykrywania mionu przez moduł PAC, który został opisany wcześniej.

Synchronizacja sygnałów z komór RPC

Momentowi przejścia cząstki przez komorę RPC 1 odpowiada narastające zbocze 100 ns impulsu cyfrowego, wytworzone w module *RPC FRONT-END 1*. Impuls ten jest poddawany procesowi synchronizacji. Na rys. 21 pokazano ogólną zasadę działania procesu synchronizacji.

Narastające zbocze sygnału OTWARCIE OKNA wyznacza początek okresu okna, a narastające zbocze sygnału ZAMKNIĘCIE OKNA jego zakończenie. Oba sygnały są uży-



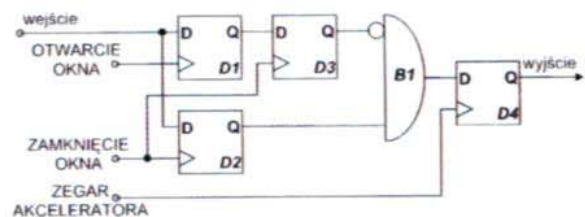
Rys. 21. Ogólna zasada działania procesu standaryzacji dla jednego kanału
 Fig. 21. General principle of the standardization process for single ch

skiwane poprzez zadane przesunięcie fazy (odpowiednio Δ_{00} i Δ_{20}) względem sygnału ZEGARA AKCELERATORA. Przedział czasu trwania okna Δ_W wynosi:

$$\Delta_W = \Delta_{00} - \Delta_{20} \quad (10)$$

Rezultatem działania procesu standaryzacji jest wyrowadzenie, w czasie najbliższego okresu ZEGARA AKCELERATORA, pozytywnego stanu logicznego dla przypadku stwierdzenia narastającego zbocza sygnału wejściowego w czasie trwania okna (Δ_W).

Układowa realizacja procesu standaryzacji dla pojedynczego kanału została pokazana na rys. 22. Omawiany proces składa się w rzeczywistości z dwóch etapów synchronizacji. W pierwszym etapie przeprowadzana jest rejestracja stanu logicznego sygnału wejściowego odpowiednio dla otwarcia ($D1$) i zamknięcia ($D2$) okna. Stan otwarcia okna zostaje następnie przepisany do przerzutnika $D3$, taktowanego sygnałem ZAMKNIĘCIE OKNA. Blok logiczny $B1$ wykrywa warunek niskiego stanu dla otwarcia okna i wysokiego stanu dla zamknięcia okna. Warunek ten odpowiada wystąpieniu zbocza narastającego sygnału wejściowego w trakcie trwania okna. W przerzutniku $D4$ następuje zapamiętanie wyniku logicznego z bloku logicznego $B1$ na okres jednego taktu ZEGARA AKCELERATORA. W efekcie tworzy się binarny strumień synchroniczny.



Rys. 22. Realizacja układu standaryzacji
 Fig. 22. Implementation of the standardization circuit

Synchroniczna kompresja i dekompresja danych

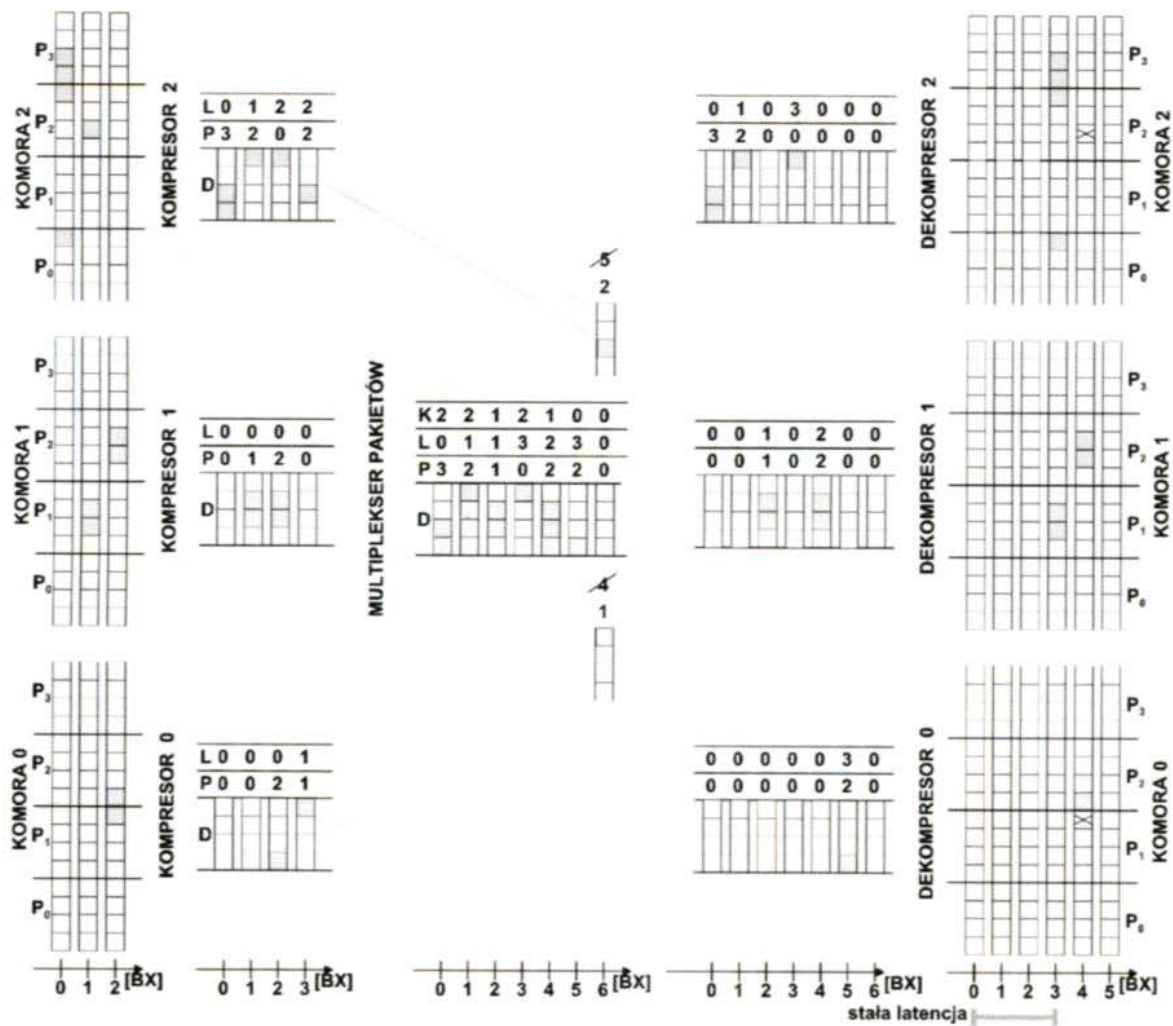
Prawidłowe działanie algorytmu wyszukiwania najbardziej energetycznych mionów z obszaru całego detektora RPC, wymaga dostarczenia pełnego obrazu wszystkich zarejestrowanych trajektorii mionów w danym przecięciu. Odpowiada to przekazaniu do modułów PAC informacji o „zapalonych” paszkach w zakresach obszarów, które poszczególne moduły analizują (rys. 14). Oczekiwana częstość zapaleń jest średnio 1 na 100 BX, a w najgorszym przypadku nie przekracza 1 na 10 BX. W algorytmie kompresji synchronicznej wykorzystano fakt, że częstość „zapaleń” paszków w komorze RPC na przecięcie jest stosunkowo niewielka i przeważająca większość informacji, przesyłanych przez łącza optyczne, dotyczyłaby nieaktywnych paszków. Dokonano redukcji tej informacji (tzw. metoda zero suppression), co pozwoliło na zmniejszenie wymaganego pasma transmisji. Wybrano cztery warianty grupowania danych przesyłanych przez pojedyncze łącza optyczne: 1/2, 1, 2 lub 3 komory RPC. Uzyskano sześciokrotną redukcję liczby łączy w stosunku do przesyłania danych bez kompresji, co zmniejszyło koszt budowy systemu TRIDAQ o około 1 mln CHF.

Na rysunku 23. przedstawiono ogólną zasadę działania algorytmu synchronicznej kompresji i dekompresji dla trzech komór, ponumerowanych od 0 do 2 i zawierających po szes-

naście paszków. Każdą komorę podzielono na cztery równe partycje, numerowane od 0 do 3 i oznaczone jako P_0, \dots, P_3 . Każda partycja zawiera po cztery paszki, gdzie pojedynczy pasek reprezentuje osobne pole kwadratowe. Pasek „zapalony” jest oznaczony szarym kolorem. Na rys. 23 umieszczono historię aktywności komór (część lewa) dla trzech kolejnych przecięć, oznaczonych na osi BX jako 0, 1, 2 (część dolna).

Niepuste partycje są wysyłane kolejno, począwszy od partycji oznaczonej najwyższym numerem. Dla prezentowanego przypadku komory nr 2, pierwsza dana ($BX = 0$) posiada trzy niepełne partycje. Partycja P_4 zostaje wysłana natychmiast i dlatego jej wartość latencji (L) wynosi 0. Zawartość partycji D jest kopiowana w niezmięnionej formie. W następnym przecięciu jest wysyłana partycja P_2 , opóźniona względem danej o jedno przecięcie ($L = 1$), a ostatnia partycja jest wysyłana w przecięciu $BX = 2$. Kolejna dana (dla $BX = 1$) posiada jedną niepełną partycję. Partycja P_2 jest opóźniona o dwa przecięcia ($L = 2$). W przypadku, gdy brak jest niepełnych partycji do wysłania, zostaje wysłana tzw. pusta partycja, która zawiera puste dane partycji $P = 0$ dla latencji $L = 0$. Wysyłanie pustych partycji ma miejsce przy kompresji danych z komór nr 1 i 0. Partycje, które uzyskają opóźnienie większe niż wartość L_{MAX} będą stracone.

Trzy wejściowe potoki danych skompresowanych są łączone w jeden wspólny potok wyjściowy przez moduł *MULTIPLESERA PAKIETÓW* i następnie wysyłane łączem



Rys. 23. Ogólna zasada działania algorytmu synchronicznej kompresji i dekompresji
Fig. 23. General principle of the synchronous compression and decompression

optycznym. Łączenie polega na sukcesywnym multipleksowaniu niepustych partycji z potoków wejściowych. Włączana do potoku partycja jest uzupełniana o numer komory (K), a jej wartość latencji (L) jest aktualizowana. Dwa wyróżnione pakiety (z komory nr 2 i 0) uzyskały latencję większą niż $L_{MAX} = 3$ i zostały usunięte (dla $BX = 6$). W zamian została wysłana pusta partycja przypisana komorze nr 0 ($K = 0$). Utracone dane zostały przedstawione (prawa strona rys. 23) w formie zakratkowanych pól kwadratów.

Synchroniczna dekompresja polega na odtworzeniu danych źródłowych z zachowaniem stałej liczby przecięć opóźnienia (tzw. stałej latencji), równej wartości L_{MAX} . Proces dekompresji jest wykonywany przez moduł *DEKOMPRESORA* niezależnie dla każdej komory. Ze skompresowanego potoku pobiera się wyłącznie partycje opatrzone właściwym numerem komory, a pozostałe pakiety są traktowane jak pakiety puste. Dane partycji są wyprowadzane na wyjście modułu z opóźnieniem odwrotnym do wnoszonego przez partycję: $L_{WYJ} = L_{MAX} - L$.

Sortowanie hierarchiczne

Wykorzystano algorytm sortowania cechujący się wysokim stopniem przetwarzania równoległego w trybie potokowym 1. Zasada działania algorytmu bazuje na wyznaczeniu pozycji wyjściowej danego kanału wejściowego jako sumy pozytywnych porównań jego wartości z wartościami z pozostałych kanałów. Odpowiedni dobór operatorów porównania wyznacza pozycję danego kanału w sposób jednoznaczny, bez względu na wartości wejściowe. Takie rozwiązanie prowadzi do wskazania pozycji wyjściowej każdego kanału wejściowego w sposób autonomiczny. Algorytm składa się z trzech zasadniczych kroków przetwarzania funkcjonalnego:

- **na pierwszym etapie** są wykonywane równoczesne porównania wartości wszystkich N kanałów wejściowych. W rezultacie otrzymuje się binarną macierz wyników $[C]$ o rozmiarach $N \times N$, gdzie wg definicji przekształcenia porównującego, wartość 1 oznacza pozytywny wynik operacji porównania, a wartość 0 wynik negatywny:

$$[C]_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & A_1 \geq A_2 & \dots & A_1 \geq A_N \\ A_2 > A_1 & 1 & \dots & A_2 \geq A_N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_N > A_1 & A_N > A_2 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

- **na drugim etapie** przetwarzania jest określana pozycja wyjściowa dla wejściowego kanału $k \in \langle 1, N \rangle$. Pozycję wyznacza wartość elementu wektora $[S]$, która jest sumą rezultatów porównań w wierszu k macierzy $[C]$, opisaną wyrażeniem:

$$\forall_{k \in \langle 1, N \rangle} S_k = \sum_{j=1}^N C_{k,j} = \sum_{j=1}^{k-1} (A_k > A_j) + \sum_{j=k+1}^N (A_k \geq A_j) + 1 \quad (12)$$

Dokonując dla definicji porównania $[C]$ prostego przekształcenia tożsamościowego:

$$A < B \Leftrightarrow \overline{A \geq B}$$

można zastąpić $n^2 - n$ bloków porównujących liczbą $(n^2/2) - n$ bloków, czyli prawie dwukrotnie mniejszą. Otrzymuje się w tym wypadku następującą postać macierzy $[C]$:

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & A_1 \geq A_2 & \dots & A_1 \geq A_N \\ A_1 \geq A_2 & 1 & \dots & A_2 \geq A_N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_1 \geq A_N & A_2 \geq A_N & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Pozycję wyjściową dla wejściowego kanału k można wyznaczyć następująco:

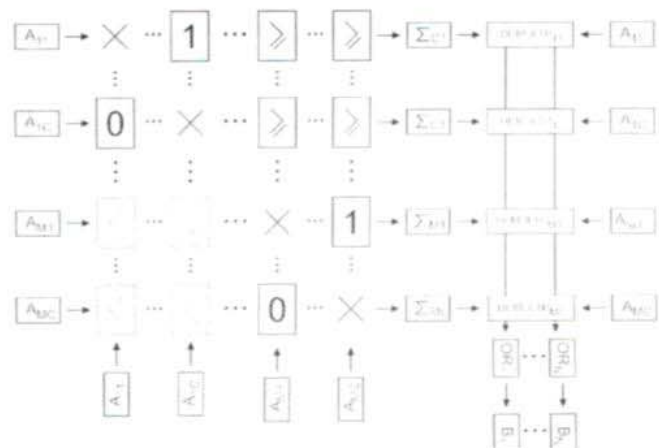
$$\begin{aligned} \forall_{k \in \langle 1, N \rangle} S_k &= \sum_{j=1}^{k-1} (A_k \geq A_j) + \sum_{j=k+1}^N (A_k \geq A_j) + 1 = \\ &= \sum_{j=1}^{k-1} C_{k,j} + \sum_{j=k+1}^N C_{k,j} + 1 \end{aligned} \quad (14)$$

- **na trzecim etapie** przeprowadzane jest jednoznaczne przekierowanie wartości kanałów wejściowych na odpowiednie wyjścia bloku sortującego, zgodnie z wyznaczonymi sumami pośrednimi P_k , co opisuje wyrażenie:

$$\forall_{k \in \langle 1, N \rangle} B_{P_k} = A_k \quad (15)$$

Dokonuje się w ten sposób porządkowania kanałów, w kolejności od wartości najmniejszej do wartości największej. Jedynie cztery ostatnie kanały wyjściowe są wyprowadzane z bloku sortera, zgodnie z przyjętym założeniem poszukiwania czterech mionów o największych pędach poprzecznych.

Moduł sortujący w strukturze hierarchicznej można opisać jako M grup zawierających po C kanałów posortowanych. W ten sposób uzyskuje się N kanałowy sorter, gdzie $N = C \cdot M$. Stosowanie układu symetrycznego nie jest konieczne, ale zostało tutaj przyjęte dla uzyskania większej przejrzystości omawianego algorytmu. Konsekwencją wprowadzenia posortowanych kanałów w ramach grupy jest z góry znany rezultat ich wzajemnych porównań w obrębie jej podmacierzy zwycięstw $[C_M]$. Uzyskuje się w ten sposób identyczne struktury podmacierzy grup, ułożone ortogonalnie w ramach macierzy $[C]$. Strukturę funkcjonalną jądra modułu realizującego algorytm sortowania hierarchicznego pokazano na rys. 24.



Rys. 24. Hierarchiczny algorytm sortowania dla M grup po C kanałach posortowanych
Fig. 24. Hierarchical algorithm of sorting for M groups containing C sorted channels

Synchroniczna transmisja danych

Równoległy pomiar pędów poprzecznych mionów w procesorach PAC wymaga jednoczesnego podania na ich wejścia wszystkich sygnałów z detektorów RPC. Wyznaczenie czterech najbardziej energetycznych mionów metodą sortowania kaskadowego jest prawidłowo realizowane wyłącznie przy spełnieniu warunku synchronizacji danych wejściowych. Wyjściowe rezultaty pomiaru mionów, przekazywane do Trygera Mionowego CMS muszą być jednoznacznie odniesione do określonego numeru przecięcia (BCN). Powyższe wymagania implikują konieczność zapewnienia pracy synchronicznej całego systemu RPC. Ogólną zasadę synchronicznej transmisji danych pomiarowych w całym systemie Trygera Mionowego RPC zamieszczono na rys. 25.

Pomiędzy wejściem a wyjściem danych pomiarowych jest transmitowanych $[D]$ bitów z częstotliwością zegara eksperymentu CMS ($f_T = 40$ MHz), z zachowaniem stałej latencji T_L . Wartość latencji wynika zarówno z fizycznych opóźnień wprowadzanych przez układy elektroniczne i połączenia, jak również z opóźnień wprowadzanych w liniach opóźniających w celu uzyskania synchronizacji pomiędzy kanałami.

Do celów synchronizacji transmitowanych danych pomiarowych oraz ciągłego monitoringu stabilności synchronizacji wykorzystano sygnał BCN0, dystrybuowany globalnie przez system TTC. Sygnał ten wyznacza przecięcie pakietów cząstek o umownym numerze 0. Powtarza się na początku każdej orbity akceleratora LHC (orbitą nazywamy czas, w którym pojedyncza paczka obiega obwód akceleratora). Dla zachowania wyznaczenia kolejnych pakietów wprowadzono licznik przecięć BNC (CNT) odliczający kolejne takty zegara. Jest on automatycznie zerowany sygnałem BCN0. Dane wysyłane z nadajnika są opatrzone sygnaturą czasową złożoną z bitu BCN0 oraz z $[T - 1]$ najmłodszych bitów licznika BCN. O właściwym stanie synchronizacji świadczy zgodność nadawanej sygnatury czasowej z sygnaturą lokalną. Elementy DELAY służą do indywidualnego dopasowania sygnałów BCN0 w poszczególnych blokach.

Z modułów SENDER i RECEIVER wydzielono odpowiednio podmoduły MUXER i DEMUXER umożliwiające transmisję na wyższych częstotliwościach w celu redukcji liczby połączeń fizycznych. Współczynnik multiplikacji $[M]$ wyraża liczbę bitów danych transmitowanych jedną linią sygnałową. Ich struktura jest wymienna ponieważ w systemie RPC zostały zastosowane różne media transmisyjne. Do bezpośredniej transmisji sygnałów z częstotliwością eksperymentu (40 MHz) wykorzystano standard LVTTL 3,3 V, dla szybkości 80 MHz i 320 MHz zastosowano standard LVDS, natomiast dla szybkości transmisji 1600 MHz użyto łącza optycznego.

Łączna dystrybucja ponad 125 tysięcy bitów informacji przez ponad 4100 strumieni synchronicznych zachodzi z okresem T_{LHC} , tzn. co 25 ns. W konsekwencji wymagana przepustowość netto całego systemu Trygera Mionowego RPC przekracza 5 Tb/s. Zbiorcze zestawienie zrealizowanych w praktyce implementacji przedstawiono w tab. 3.

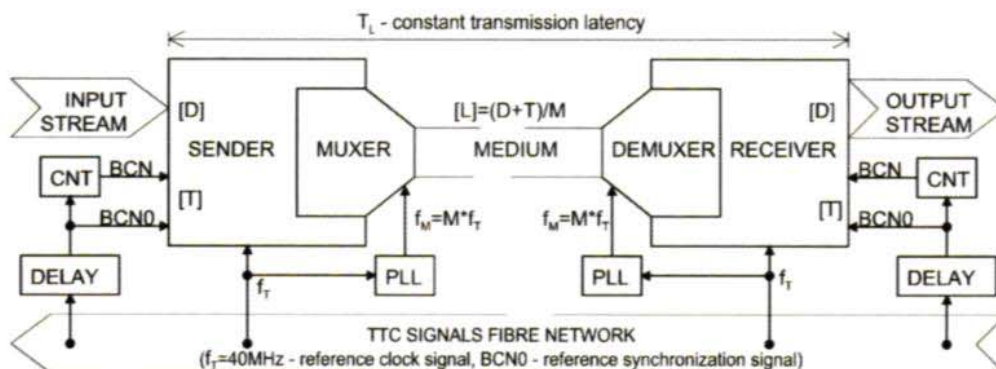
Akwizycja danych na poziomie pierwszego stopnia trygera

Dane zarejestrowane przez detektory RPC, pochodzące z przecięć, wybranych przez tryger pierwszego poziomu (L1A) muszą zostać dostarczone do systemu akwizycji danych detektora CMS (CMS-DAQ) w celu późniejszej analizy przez tryger wysokiego poziomu (HLT). To zadanie jest realizowane przez tor odczytu detektora RPC. Dodatkowo, dla zapewnienia właściwej diagnostyki systemu, przewidziano także możliwość przesyłania danych z kilku przecięć poprzedzających przecięcie wybrane przez tryger pierwszego poziomu i kilku przecięć następnych.

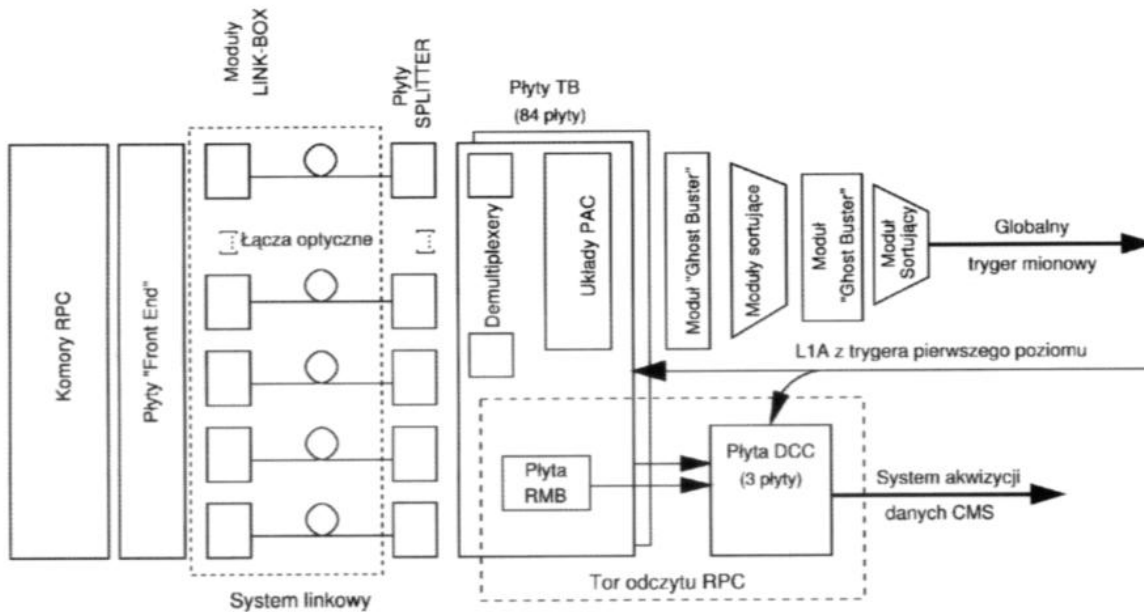
Na rysunku 26. przedstawiono ogólną budowę toru odczytu danych. Na wstępie jest dokonywana tzw. derandomizacja (wyluskowanie) danych dostarczanych do płyt trygera, a następnie ich uporządkowanie i przekazanie do nadajnika optycznego. W tym celu na płycie RMB (rys. 28) jest wstępnie wykonywana synchronizacja danych. Następnie wybierane są zdarzenia pochodzące z przecięć, które zostały wybrane przez tryger pierwszego poziomu. Możliwe jest uzupełnianie danymi z kilku przecięć poprzedzających i kolejnych. Wyselekcjonowane dane są doprowadzane do sortera, który sortuje je najpierw według numeru przecięcia, a potem według numeru kanału. Ostatecznie dane są grupowane w pakiety, zawierające dane z pojedynczego przecięcia i każdy pakiet opatrywany jest 12-bitową sumą kontrolną. Tak przygotowane dane dostarczane są do kolejki wyjściowej, w której oczekują na transmisję przez łącze optyczne do dalszej części toru odczytu.

Dane z grupy płyt TB są przesyłane do płyt koncentratora danych DCC [43]. Jedna płyta DCC (rys. 27) może obsługiwać do 36 płyt TB. Schemat blokowy płyty DCC w konfiguracji układów FPGA zaimplementowanych na użytek Trygera Mionowego RPC przedstawiono na rys. 29.

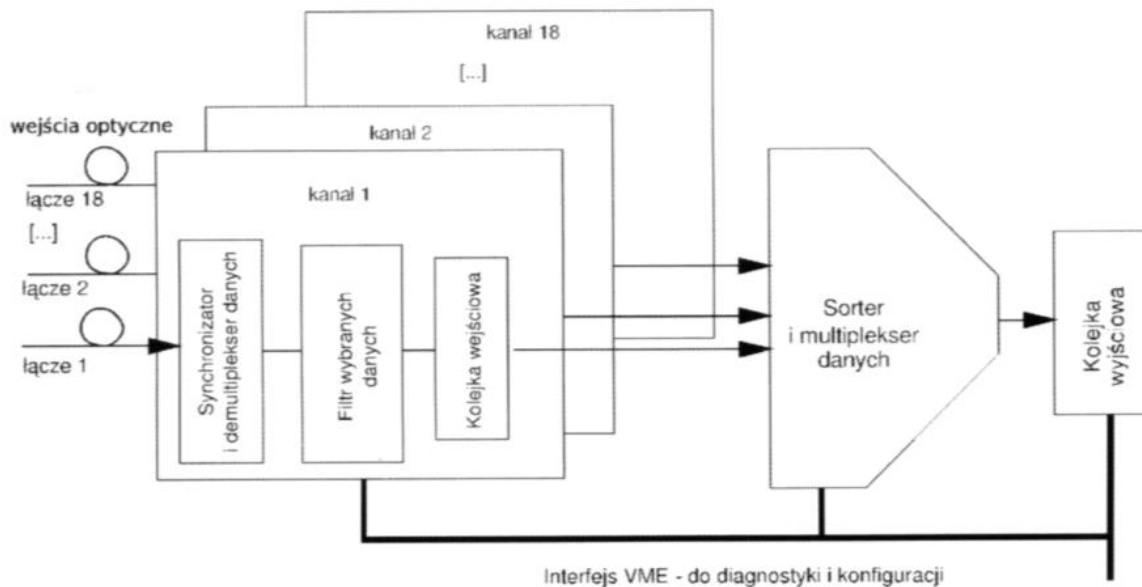
Dane wysyłane przez płyty RMB są odbierane przez odbiorniki RocketIO w układach wejściowych IH (ang. *Input Handler*). Tam sprawdzana jest poprawność sumy kontrolnej i pakiety z błędną sumą kontrolną są odrzucane. W pewnych przypadkach błędy transmisji mogą zniszczyć całą strukturę pakietów, co z kolei może zaburzyć pracę całego układu wejściowego. Dlatego kanały, w których zostanie zaobserwowane



Rys. 25. Ogólna zasada transmisji synchronicznej synchronizowanej sygnałem BCN0
Fig. 25. General principle of the synchronous transmission synchronized with the BCN0 signal



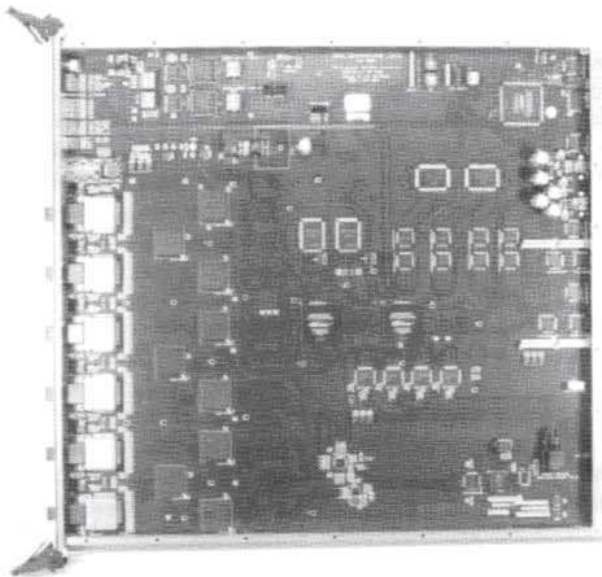
Rys. 26. Ogólna budowa toru odczytu danych Fig. 26. General structure of the readout system



Rys. 27. Budowa płyty DCC Fig. 27. View of the DCC board

Tab. 3. Zestawienie parametrów torów transmisji synchronicznych Tabl. 3. Parameters of synchronous transmission links

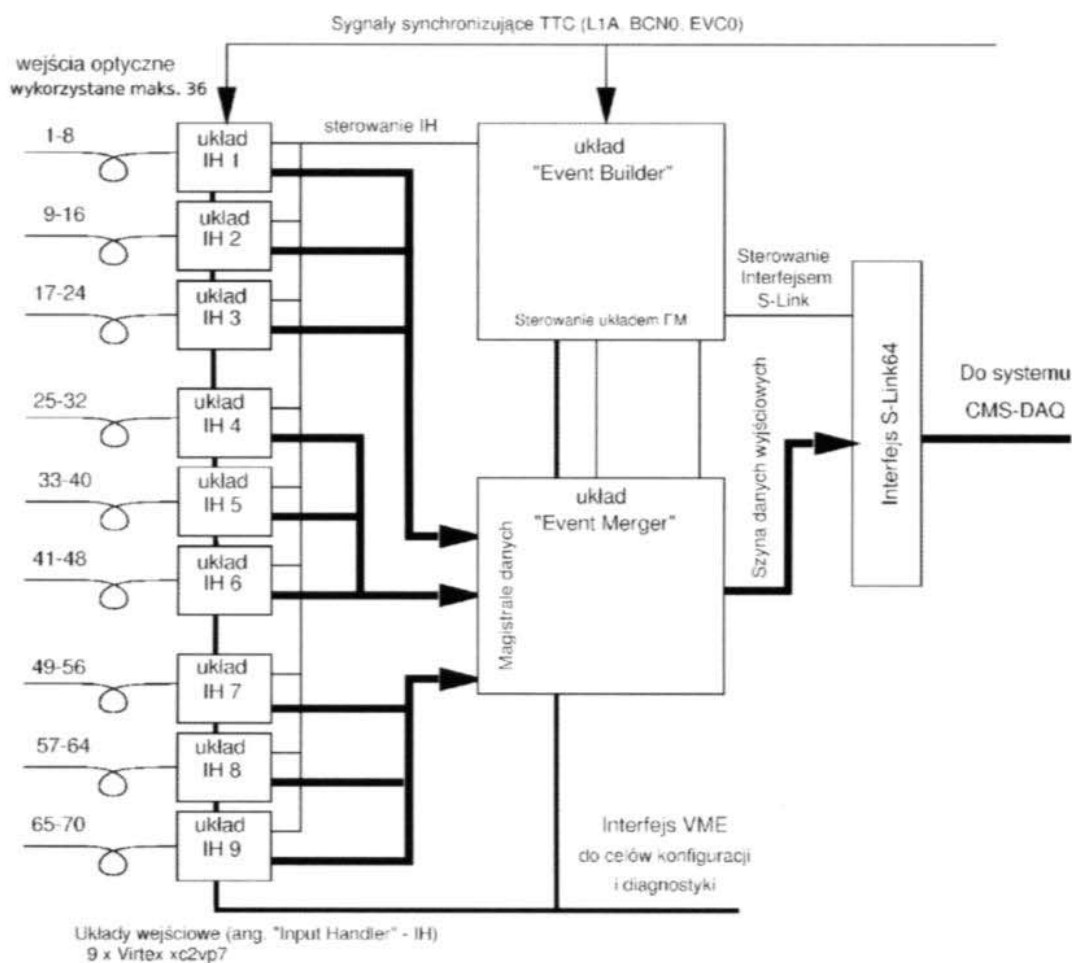
| Etap | Liczba strumieni | Liczba bitów danych w strumieniu | Zegar transmisji [MHz] | Liczba linii transmisji | Przepustowość [Mb/s] | Latencja L [bx] |
|-----------------------------|------------------|----------------------------------|--|-------------------------|----------------------|-----------------|
| (B) | 1232 | 17 | 40 | 20 | 800 | 1 |
| (C) | 444 | 21 | 1600 | 1 | 1600 | 20 |
| (D) | 1944 | 21 | 320 | 3 | 960 | 3 |
| (E) | 432 | 108 | 320 | 14 | 4480 | 3 |
| (F) | 108 | 68 | 320 | 9 | 2280 | 3 |
| (G) | 12 | 42 | 80 | 24 | 1920 | 2 |
| Przepustowość /BX [1/25 ns] | | 125596 | Całkowita przepustowość systemu TM-RPC: [Mb/s] | | 5766880 | $\Sigma=32$ |



Rys. 28. Struktura toru przetwarzania zaimplementowana w układzie FPGA dla modułu RMB
 Fig. 28. Structure of processing track implemented in FPGA circuit for RMB module

takie zjawisko są automatycznie blokowane. Poprawnie odebrane pakiety są przekazywane do kolejek wejściowych, w których oczekują na przekazanie do koncentratora wejść. Koncentrator wejść odbiera dane pochodzące z określonego przecięcia z kolejnych kolejek wejściowych i wysyła je na magistralę danych, do której podłączony jest dany układ IH.

Odbiorem danych z kolejek wejściowych steruje układ konstruktora zdarzeń EB (ang. *Event Builder*), odbierający informacje o przecięciach wybranych przez tryger pierwszego poziomu i na podstawie tego ustalający, jakich danych powinny dostarczyć układy IH. EB żąda dostarczenia danych z kolejnych wybranych przecięć (i ewentualnie diagnostycznych danych z przecięć poprzedzających i następných). Każdy układ IH musi przekazać dane z żadanego przecięcia ze swoich kolejek wejściowych, lub komunikat, że żadne dane z żadanego przecięcia do niego nie napłynęły. Oprócz tego EB określa przyporządkowanie poszczególnych przecięć do kolejnych zdarzeń i zleca układom IH uzupełnienie wysyłanych danych dodatkowymi znacznikami, ułatwiającymi ich interpretację przez kolejny układ - koncentrator zdarzeń EM (ang. *Event Merger*). Na przykład IH, który jako pierwszy dostaje polecenie wysłania danych z pierwszego przecięcia należącego do danego zdarzenia, wstawia znacznik „początek zdarzenia” oraz nagłówek zdarzenia. Inne znaczniki określają „początek danych na magistrali” i „koniec danych na magistrali” oraz „koniec zdarzenia”



Rys. 29. Schemat blokowy płyty DCC w konfiguracji układów FPGA zaimplementowanych na użytek Trygera Mionowego RPC
 Fig. 29. Block diagram of the DCC board configured for operation in the RPC Muon Trigger

Płyta DCC posiada trzy magistrale danych, co pozwala odbierać równolegle dane z trzech układów IH. Dane te napływają do kolejek wejściowych układu EM, a następnie są porządkowane na podstawie znaczników wprowadzonych wcześniej przez układy IH.

Układ EM uzupełnia pogrupowane dane znacznikami końca i sumą kontrolną. W rezultacie, na wyjściu koncentratora zdarzeń pojawiają się zdarzenia zapisane w formacie CDF wymaganym przez CMS-DAQ 1, które przez interfejs S-Link64 są wysyłane do systemu akwizycji danych CMS.

System sterowania modułów Link BOX

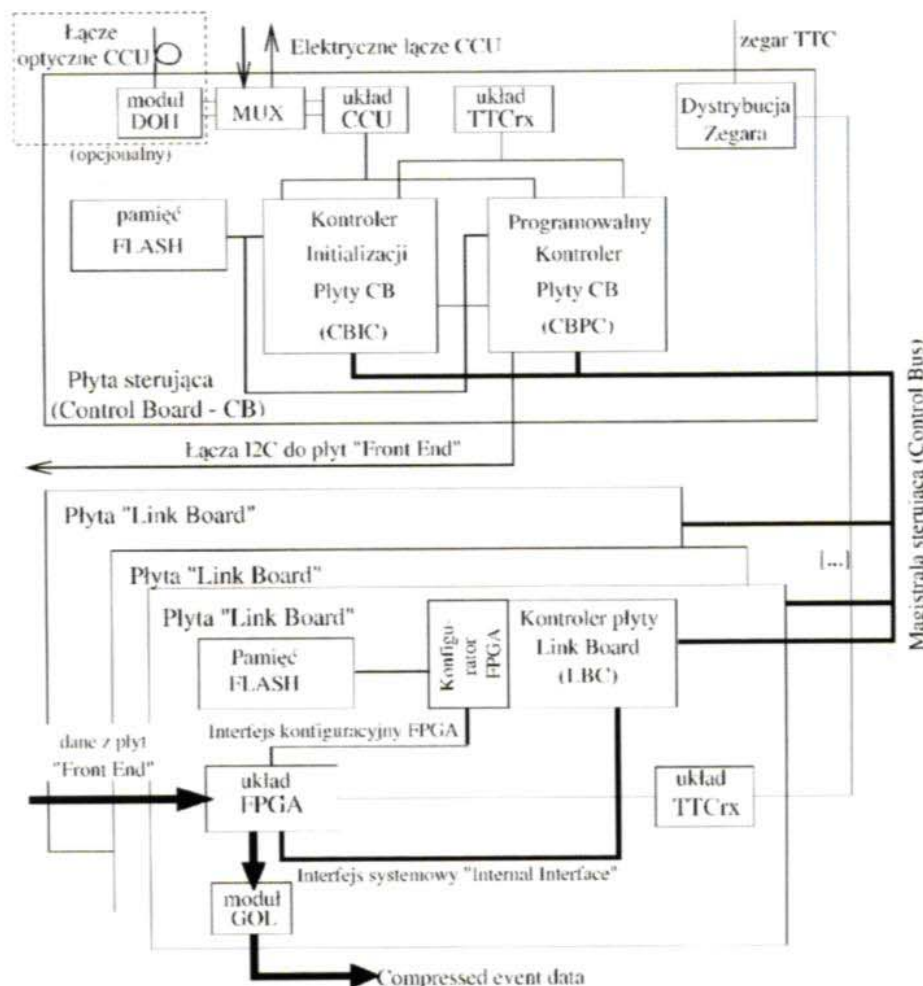
Właściwa praca modułów *Link-Box* wymaga dostarczenia danych konfiguracyjnych do układów FPGA wykorzystywanych w tych modułach, a także przesyłania różnorodnych parametrów oraz danych diagnostycznych. W tym celu został stworzony specjalny system sterowania modułami *Link-Box* detektora RPC (ang. *RPC Link-Box Control System - RLBCS*) [45-46]. Ponieważ moduły *Link-Box* działają w otoczeniu poddanym działaniu promieniowania jonizującego, konieczne jest okresowe odświeżanie konfiguracji układów FPGA i ich ustawień, a ponadto sam system RLBCS musi być odporny na promieniowanie.

Strukturę systemu RLBCS przedstawiono na rys. 30. Jako główny interfejs komunikacyjny zastosowano w nim układ CCU [47]. Układ ten został zrealizowany w technologii zapewniającej minimalizację zakłócającego działania promieniowania jonizującego. System RLBCS działa w sposób sekwencyjny.

Po włączeniu zasilania rozpoczyna pracę kontroler inicjalizacji płyty sterującej (CBIC). Przy standardowym trybie pracy bada on, czy pamięć FLASH na płycie CB zawiera poprawne dane konfiguracyjne i wykorzystuje te dane do konfiguracji programowalnego kontrolera płyty (CBPC) i kontrolera płyty LBC (*Link-Board*). Jeśli pamięć FLASH nie zawiera poprawnych danych konfiguracyjnych, CBIC sygnalizuje ten problem i przechodzi w tryb pozwalający skonfigurować układy CBPC i LBC danymi przesyłanymi przez łącze CCU (ang. *Control and Communication Unit*). Kontroler CBIC musi być układem zdolnym do rozpoczęcia pracy bez dostarczenia danych konfiguracyjnych, dodatkowo odpornym na rozprogramowanie przez promieniowanie jonizujące - dlatego użyto tu układu FPGA konfigurowanego pamięcią FLASH firmy Actel, przy czym możliwe jest jego zastąpienie układem konfigurowanym typu ANTYFUSE w rejonach detektora szczególnie narażonych na promieniowanie.

Skonfigurowany kontroler LBC sprawdza, czy pamięć FLASH na płycie *Link-Board* zawiera ważne dane konfiguracyjne i jeśli tak, używa tych danych do skonfigurowania zasadniczego układu FPGA przetwarzającego dane, a także do ustalenia parametrów pracy tego układu. Jeśli nie zostaną odnalezione ważne dane, LBC zasignalizuje ten problem i przejdzie w tryb umożliwiający konfigurację danymi przesyłanymi przez CCU.

Poprawność danych zapisanych w pamięci FLASH może być wykrywana dzięki temu, że dane te są zabezpieczone specjalnie opracowanym kodem korekcyjnym. Umożliwia on wykrywanie rozprogramowania danych w pamięci FLASH, a w przypadku nieznacznego uszkodzenia także ich korekcję.



Rys. 30. Struktura systemu sterowania modułem Link Box Fig. 30. Structure of the RPC Link Box Control System

Poprawność danych może być automatycznie badana w sposób ciągły przez układy CBIC, CBPC i LBC podczas normalnej pracy systemu. Istnieje także możliwość wymuszenia ignorowania danych zapisanych w pamięci FLASH, na przykład po to, aby można było przywrócić poprawną pracę systemu, gdy dane te są formalnie poprawne, lecz nie gwarantują poprawnego działania systemu.

Wszystkie układy CBIC, CBPC i LBC zostały zrealizowane z wykorzystaniem logiki nadmiarowej (ang. *triple redundant logic*) dla zmniejszenia zakłóceń wprowadzanych przez promieniowanie jonizujące. Jedyne układy programowalne, którego przeprogramowanie wymaga wyłączenia systemu - CBIC, implementuje tylko podstawowe funkcje, dzięki czemu możliwe było jego gruntowne przetestowanie. Bardziej złożone funkcje - obsługa protokołów komunikacyjnych, programowanie pamięci FLASH itp., są realizowane przez układy konfigurowane danymi zapisanymi w pamięci FLASH, co pozwala na wielokrotne i łatwe modyfikowanie ich funkcjonalności. Podejście to okazało się bardzo cenne przy uruchamianiu systemu i w początkowym okresie jego eksploatacji, ponieważ umożliwiło szybkie usuwanie odnajdywanych błędów i dostosowywanie systemu do korygowanych wymagań. W szczególności umożliwiło to np. ominięcie błędów w działaniu niemodyfikowalnych elementów systemu, np. układu CCU, wykrytych dopiero podczas uruchamiania systemu.

Wnioski

We współczesnych eksperymentach FWE bardzo ważną rolę odgrywają układy programowalne. Ich popularność sukcesywnie wzrasta dzięki szybko malejącym cenom oraz rosnącym zasobom logicznym. Układ FPGA może być wielokrotnie programowany, co umożliwia rekonfigurację funkcjonalną już działającego systemu.

Omówiony w artykule system Trygera Mionowego RPC jest reprezentatywnym przykładem realizacji dużego, rozproszonego systemu na bazie kilku tysięcy układów FPGA, gdzie warstwa funkcjonalna jest zaimplementowana w całości w tych układach. Dzięki wykorzystaniu technologii układów programowalnych przeprowadza się rozwój systemu w eksperymencie, optymalizując jego procesy przetwarzania danych, rozwijając warstwę diagnostyczną, eliminując wykryte nieprawidłowości itp. Prace te mogą być prowadzone zdalnie, a w efekcie są wielokrotnie szybsze i tańsze niż wymiana lub modyfikacja warstwy sprzętowej.

Literatura

- [1] Fernow R.C.: Introduction to Experimental Particle Physics. ISBN: 0521379407, Cambridge University Press; 2 edition, 1989.
- [2] http://www.hep.net/experiments/all_sites.html - [High Energy Physics Experiments].
- [3] Królikowski J.: Eksperymenty fizyki wysokich energii ostatnich dwudziestu lat. Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji PAN, Tom 48, nr 2, 2002, ss. 189-212.
- [4] <http://www.cern.ch> - [CERN - European Laboratory for Particle Physics].
- [5] <http://www.slac.stanford.edu> - [Stanford Linear Accelerator Center].
- [6] <http://www.fnal.gov> - [Fermi National Accelerator Laboratory].
- [7] <http://www.desy.de/> - [DESY home page].
- [8] Weinberg S.: Teoria pól kwantowych. T. II Nowoczesne zastosowania, PWN 1999.
- [9] Higgs P. W.: Phys. Lett., 12, 132, (1964), Phys. Rev., 145, 1156, 1966.
- [10] <http://adcon.fnal.gov/userb/www/tevatron> - [Fermilab Tevatron Home Page].
- [11] <http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/> - [LHC homepage].
- [12] The Large Hadron Collider - Conceptual Design, CERN/AC/95-05, 1995.
- [13] Wrochna G.: Physics at LHC. Acta Physica Polonica B, t. 33, nr 11, November 2002, pp. 3929-3936
- [14] <http://pdg.lbl.gov/2004/reviews/collidersrpp.pdf> - [High-energy collider parameters].
- [15] <http://cmsinfo.cern.ch/Welcome.html> - [CMS experiment Home Page].
- [16] <http://atlasinfo.cern.ch:80/Atlas/Welcome.html> - [ATLAS experiment homepage].
- [17] <http://totem.web.cern.ch/Totem/> - [TOTEM experiment homepage].
- [18] <http://www.cern.ch/ALICE/> - [ALICE - A Large Ion Collider Experiment homepage].
- [19] <http://lhcb.cern.ch/> - [LHCb experiment Home Page].
- [20] CMS Collaboration, The Compact Muon Solenoid TDR, CERN/LHCC 94-38, 1994.
- [21] CMS Collaboration, The Tracker Project, Technical Design Report, CERN/LHCC 98-6, CMS TDR 5, 15 April 1998, ISBN 92-9083-124-3.
- [22] CMS Collaboration, Addendum to the CMS Tracker TDR, CERN/LHCC 2000-016, CMS TDR 5 Addendum 1, 21 February 2000.
- [23] Lenzi M.: Performance of the all-silicon CMS Tracker. NIM A 473A, 31-38 (2001).
- [24] Dorokhov A. i in.: Tests of silicon sensors for the CMS pixel detector. NIM A 530 (2004) 71-76.
- [25] Rohe T.: Status of the CMS pixel detector. 7th International Conference on Advanced Technology and Particle Physics, 15-19 Oct, 2001, Como, Italy.
- [26] Focardi E. i in.: The CMS silicon strip tracker. Nucl. Instrum. Methods A 435 (1999) 102-108.
- [27] Klein K.: The CMS Silicon Strip Tracker - Overview and Status. HEP2005, July 21-27, 2005, Lisboa, Portugal.
- [28] CMS ECAL Technical Design Report, CERN/LHCC 97-33, CMS TDR 4, 1997.
- [29] The HCAL Technical Design Report, CERN/LHCC 97-31, CMS TDR 2, 1997.
- [30] CMS MUON Technical Design Report, CERN/LHCC 97-32, CMS TDR 3, 1997.
- [31] Fouz M. C.: The CMS muon system. NIM-B, Tom 120, pp. 264-267, 2003.
- [32] Abbrescia M. i in.: The Resistive Plate Chambers for CMS and their simulation. NIM 471 (2001), pp. 55-59.
- [33] Acosta D. i in.: Large CMS cathode strip chambers: design and performance. NIM-A Tom 453, Issues 1-2, pp. 182-187.
- [34] Abbrescia M. i in.: The RPC system for the CMS experiment at the LHC. NIM-A, Tom 508, pp. 137-141, 2003.
- [35] Green D.: The Compact Muon Solenoid at the Large Hadron Collider. http://cmsinfo.cern.ch/Welcome.html/CMSdocuments/PhysicsOfLHC/PhysicsOfLHC_index.html
- [36] The Trigger Systems, Technical Design Report, CERN/LHCC 2000 - 38, CMS TDR 6.1, 2000.
- [37] Wrochna G.: Muon Trigger of the CMS detector for LHC. CMS NOTE 1997/096.
- [38] Wulz C.-E.: Concept of the First Level Global Trigger for the CMS experiment at LHC. Tom 473, pp. 231-242, 2001.
- [39] Bock R.K. i in.: Second-level trigger: global decision structures. CERN/EAST-RD11 NOTE 92-06, 1992.
- [40] Giordano D. i in.: The CMS High-Level Trigger Selection. NIM-B t. 150, pp. 299-303, 2006.
- [41] CMS collaboration, "The Compact Muon Solenoid Trigger", Technical Design Report CERN/LHCC 2000-038.
- [42] Poźniak K. T.: Parameterized, hierarchical sorter for RPC Muon Trigger. (invited paper), Proceedings of SPIE, Bellingham, WA, USA, t. 5775, pp. 111-120, 2005.
- [43] Almeida N. i in.: Data Concentrator Card and Test System for the CMS ECAL Readout. CMS CR-2003/056.
- [44] Racz A.: DAQ/FE Interfacing Guide. http://cmsdoc.cern.ch/cms/TRIAS/horizontal/RUWG/DAQ_IF_guide/DAQ_IF_guide.html#CDF.
- [45] Zabolotny W. M., Kudla I. M., Poźniak K. T. i in.: RPC link box control system for RPC detector in LHC experiment. Proc. of SPIE, t. 5775, pp. 131-138, 2005.
- [46] Zabolotny W. M., Kudla I. M., Poźniak K. T. i in.: Radiation tolerant design of RLBCS system for RPC detector in LHC experiment. Proc. of SPIE, Tom 5948, index 59481E, 2005.
- [47] Marchioro A., Ljuslin C., Paillard C.: CCU25 communication and control unit ASIC for embedded slow control. <http://cmstracker-control.web.cern.ch/cmstrackercontrol/documents/Sandro/CCU25Specs%20v2-1.pdf>