

18. ĆWICZENIE LABORATORYJNE 18

Badanie modułu krzemowych detektorów pozycjoczułych do detekcji promieniowania X

Zakres ćwiczenia

- Zapoznanie się z wewnętrzną architekturą modułu krzemowych detektorów pozycjoczułych do detekcji promieniowania X.
- Parametryzacja modułu pomiarowego.
- Kalibracja fizyczna modułu krzemowych detektorów – weryfikacja zaimplementowanego układu kalibracji wewnętrznej.

Przedmiot ćwiczenia

Przedmiotem ćwiczenia jest poznanie wewnętrznych architektur specjalizowanych układów scalonych (*ASIC*¹) do odczytu detektorów promieniowania wykorzystywanych np. w eksperymentach fizyki wysokich energii. Moduł krzemowych detektorów pozycjoczułych składa się z wielokanałowego półprzewodnikowego detektora promieniowania, specjalizowanego wielokanałowego układu elektroniki odczytu oraz systemu kontroli i akwizycji danych. Całość, stanowiąca przedmiot ćwiczenia, będzie parametryzowana poprzez wyznaczenie podstawowych parametrów analogowego układu, takich jak: wzmocnienie, napięcie niezrównoważenia oraz poziom szumu dla każdego kanału z osobna.

Sygnał prądowy pochodzący z poszczególnych segmentów detektora po wzmocnieniu i ukształtowaniu zostaje poddany konwersji i przesłany do systemu akwizycji danych. Wyróżnić można dwa sposoby konwersji amplitudowej sygnału:

- *analogowa*; polegająca na tym, że sygnał po wzmocnieniu i ukształtowaniu jest przesyłany do systemu akwizycji danych. Dla ograniczenia liczby połączeń wprowadza się analogowy multiplekser, na którego narzuca się odpowiednie wymagania szybkościowe. Jednocześnie wyróżnia się też systemy wyposażone w wewnętrzne przetworniki analogowo-cyfrowe, których zadaniem jest konwersja amplitudy sygnału analogowego do postaci słowa cyfrowego. W takich systemach informacja o parametrze analogowym, jakim jest amplituda sygnału dalej przesyłana jest magistralą cyfrową do systemu akwizycji danych,
- *binarna*; polegająca na tym, że sygnał po wzmocnieniu i ukształtowaniu w postaci analogowej podlega dyskryminacji na ściśle określonym poziomie i jedynie informacja o przekroczeniu zadanego progu dyskryminacji jest przesyłany dalej w postaci pojedynczego bitu do systemu akwizycji danych. Zastosowanie odpowiednich technik kompresji danych znacznie ogranicza liczbę połączeń w systemie. Rozwiązanie to wymaga by projektowany układ elektroniki *front-end*² był wysokiej klasy z minimalnym poziomem szumów oraz bardzo dobrą jednorodnością (wzmocnienia, napięcia niezrównoważenia, poziomu szumów) poszczególnych torów odczytowych w konfiguracji wielokanałowej. Wymóg ten związany jest między innymi z tym, że do wszystkich kanałów odczytowych podawany jest wspólny poziom dyskryminacji. Informacja o amplitudzie impulsu przy odczycie binarnym, czyli o energii zdeponowanej w detektorze oraz poziom szumów może być tylko uzyskana w procesie pomiaru ze zmienną wartością progu dyskryminacji.

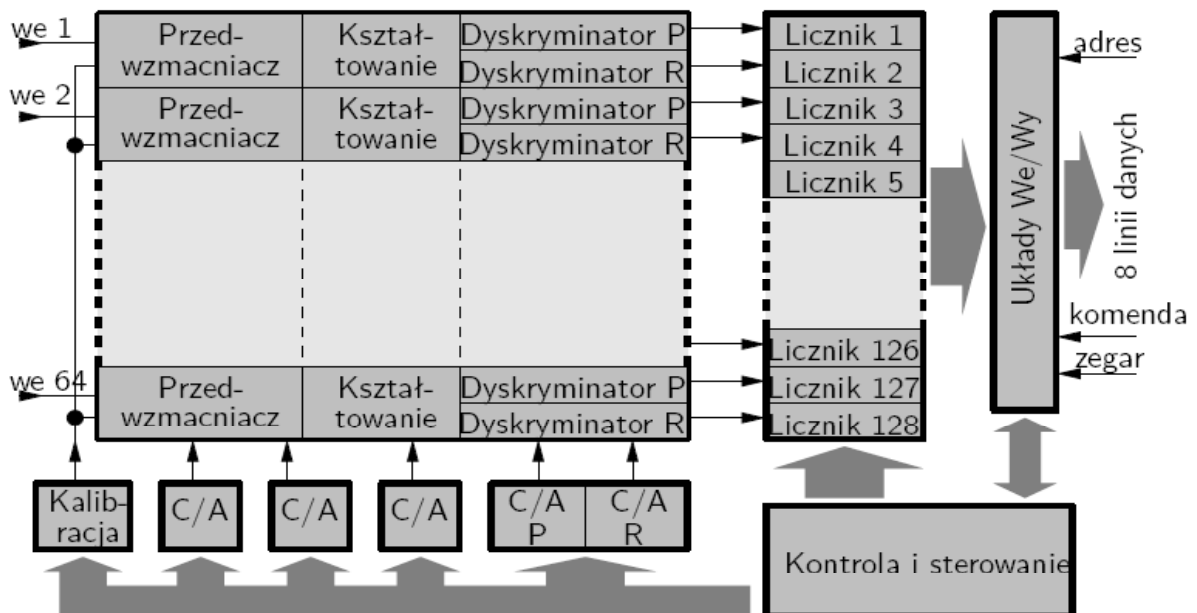
¹ *ASIC* z ang. *Application Specific Integrated Circuit*

² elektronika *front-end* obejmuje układy bezpośrednio sprzężone z detektorem

Ponieważ do odczytu pozycjoczulych detektorów w ćwiczeniu wykorzystywany będzie układ odczytowy o architekturze binarnej, poniżej zostanie przedstawiony dokładniejszy opis tychże układów.

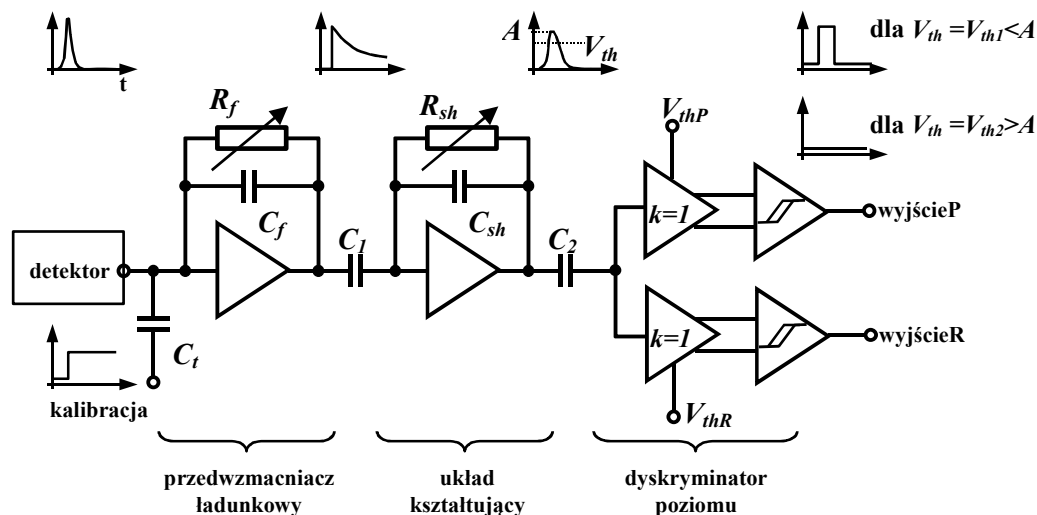
Binarny system odczytu – przykład budowy i techniki wykorzystania

Przykładowym układem elektroniki odczytu krzemowych detektorów mikropaskowych o architekturze binarnej jest zaprojektowany przez zespół Zakładu Elektroniki Jądrowej Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH w Krakowie specjalizowany układ scalony RX64 [1]. Układ ten oprócz specyficznej konstrukcji 64 kanałów elektroniki odczytu *front-end* posiada zintegrowane 20-to bitowe liczniki cyfrowe w każdym kanale (po dwa na kanał). Część cyfrowa nadzorowana jest wewnętrznym dekodrem komend (rysunek 18-1).



Rysunek 18-1: Schemat blokowy układu RX64 (zaczepnięty z pracy [2])

Schemat blokowy pojedynczego kanału elektroniki *front-end*, układu RX64, przedstawia rysunek 18-2. W skład kanału wchodzi następujące bloki funkcjonalne: przedwzmacniacz ładunkowy, układ kształtujący i dyskryminator amplitudy. Stałe czasowe kształtowania sygnału są znacznie większe od czasu trwania wejściowego impulsu prądowego, więc jako miarę wielkości sygnału wejściowego można używać wartości całkowitego ładunku zawartego w impulsie – Q_{in} . Całkowity ładunek Q_{in} jest całkowany na pojemności C_f przedwzmacniacza ładunkowego. Odpowiedź przedwzmacniacza przybiera postać skoku jednostkowego o amplitudzie $\frac{Q_{in}}{C_f}$. Zastosowanie rezystora R_f zapewnia rozładowanie pojemności C_f i zapobiega spiętrzeniom kolejnych impulsów w przedwzmacniaczu.



Rysunek 18-2: Schemat blokowy pojedynczego kanału odczytu binarnego.

Dla celów testowych wstrzykuje się na wejście elektroniczne impulsy prądowe. Powszechnie stosowany sposób, to podanie skoku jednostkowego o amplitudzie V_0 poprzez pojemność testową C_t . Do wejścia przedwzmacniacza zostaje wstrzyknięty ładunek $Q_{in} = V_0 \cdot C_t$. Układ RX64 wyposażono w wewnętrzny blok generujący impulsy napięciowe o regulowanej amplitudzie. Blok ten nosi nazwę układu wewnętrznej kalibracji.

Kolejny blok sprzężony zmiennoprądowo poprzez C_1 odpowiedzialny jest za poprawne ukształtowanie sygnału i filtrację szumów. Preferowanym kształtem odpowiedzi ze względu na minimalizację poziomu szumów jest impuls *quasi-gaussowski* [3]. Uzyskanie takiej odpowiedzi jest możliwe przez zastosowanie konfiguracji układu kształtującego w postaci filtra CR-(RC)ⁿ (przy $n \rightarrow \infty$). Z praktycznego punktu widzenia liczbę członów całkujących (RC) ogranicza się do kilku ($n = 2 - 3$). Wartość amplitudy odpowiedzi *quasi-gaussowskiej* zależna jest od ładunku iniekowanego z detektora (Q_{in}) oraz wzmocnienia układu kształtującego [3].

W kolejnym stopniu sygnał poddawany jest dyskryminacji amplitudowej na dwóch poziomach V_{thP} , V_{thR} . Dzięki temu możemy nie tylko odseparować sygnał od szumu, ale również wybrać selektywnie okno energii dla rejestrowanego promieniowania. Sygnały binarne na wyjściu dyskryminatora są zliczane w zadanym przedziale czasu przez liczniki impulsów, stowarzyszone z każdym dyskryminatorem.

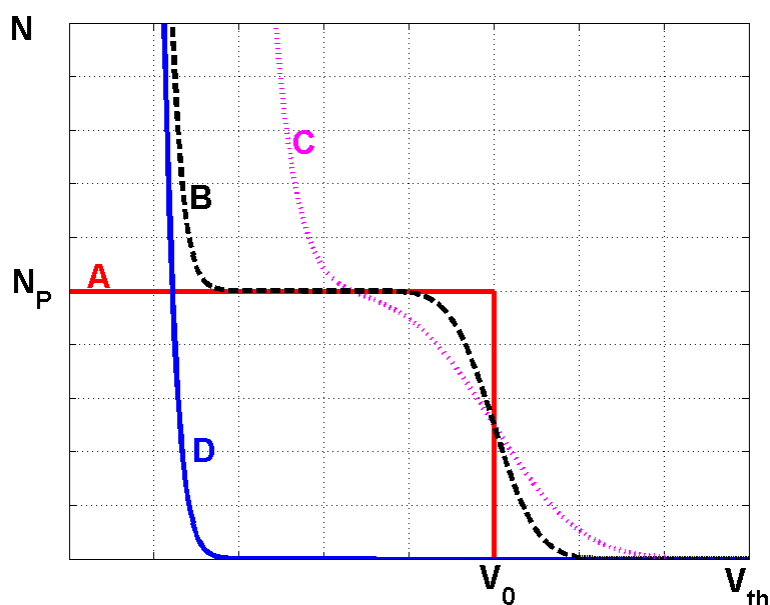
Podstawowe parametry układu *front-end*, tj. wzmocnienie, poziom szumu i napięcie niezrównoważenia dyskryminatora amplitudy uzyskuje się z krzywych częstości zliczeń w funkcji progu dyskryminacji, czyli widm całkowych dla szeregu wartości ładunku wejściowego Q_{in} . Parametryzację tego typu można przeprowadzić w dwojaki sposób.

Po pierwsze wykorzystując impulsy prądowe pochodzące z detektora przy detekcji fotonów o różnych energiach lub używając szeregu wartości impulsów kalibracyjnych. To drugie rozwiązanie niesie ze sobą większą niepewność w określeniu wartości iniekowanego ładunku, zależną od amplitudy skoku jednostkowego i pojemności C_t , oraz większy rozrzut tego ładunku od kanału do kanału, wynikający z rozrzutu technologicznego wartości pojemności kalibracyjnych. Zaletą tego rozwiązania jest natomiast możliwość szybkiego uzyskania wyniku bez konieczności użycia źródeł promieniowania. Określenie parametrów układu oraz ich rozrzuty znacznie dokładniej wyznacza się poprzez pomiary z fizycznymi sygnałami pochodzącymi z detektora dla wymuszenia kwantami o różnych energiach.

Dla każdej kombinacji wielkości ładunku Q_{in} i progu dyskryminacji w ściśle określonym czasie można spodziewać się odpowiedniej liczby generowanych impulsów prądowych. Dla

pomiarów z zewnętrznym źródłem promieniowania liczba impulsów zależna jest od intensywności źródła, warunków geometrycznych i oczywiście podlega statystycznym fluktuacjom emitowanych fotonów. Dla pomiarów z wykorzystaniem układu wewnętrznej kalibracji liczba przypadków jest ściśle określona i zależy od liczby generowanych napięciowych skoków jednostkowych. Wyznaczając zależność rejestrowanych zliczeń w funkcji progu dyskryminacji, której odpowiadać będzie komplementarna funkcja błędu, otrzymujemy z parametrów dopasowania dla różnych wymuszeń Q_{in} wzmocnienie, napięcie niezrównoważenia dyskryminatorów oraz ENC .

Jeśli założyć idealny przypadek, gdzie na sygnał nie ma nałożonego szumu i brak jest fluktuacji generowanych ładunków w detektorze wynikiem pomiaru dla każdej wartości wymuszenia byłaby funkcja skokowa, o 100% rejestrowanych impulsów dla progów dyskryminacji poniżej poziomu amplitudy i 0% dla progów dyskryminacji powyżej amplitudy impulsów – krzywa A na rysunku 18-3.



Rysunek 18-3: Częstość zliczeń impulsów w funkcji progu dyskryminacji. Krzywa A – idealny przypadek wymuszenia monoenergetycznego bez szumów. Krzywa B, C – rzeczywisty przypadek wymuszenia monoenergetycznego z nałożonym rozmyciem szumowym ($\sigma_C=2\sigma_B$). Krzywa D – tylko szum elektroniczny bez wymuszenia monoenergetycznego – tzw. krzywa Rice’a.

W wyniku superpozycji sygnałów z detektora i szumów rozkład amplitud jest rozkładem gaussowskim, a mierzona krzywa wydajności dla danego wymuszenia jest całką z funkcji Gaussa, czyli odpowiada komplementarnej funkcji błędu:

$$N = \frac{N_P}{2} \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{V_{th} - V_0}{\sigma \sqrt{2}} \right) \right) \quad (1)$$

gdzie: N – częstość rejestrowanych impulsów na wyjściu dyskryminatora,
 N_P – częstość impulsów na wejściu dyskryminatora,
 V_0 – poziom dyskryminacji odpowiadający średniej amplitudzie impulsów,
 σ – odchylenie standardowe obrazujące poziom szumu elektroniki odczytu jak i fluktuację generowanego ładunku w detektorze,

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt.$$

Wartość progu dyskryminacji (V_0) dla wydajności 50% odpowiada średniej amplitudzie impulsów na wejściu dyskryminatora, a rozmycie krzywej (σ) zawiera informację o wielkości szumu.

Przy braku impulsów prądowych pochodzących z detektora lub układu kalibracji, ze względu na szумы własne toru analogowego, częstość zliczeń szumowych w funkcji progu dyskryminacji przybiera kształt przedstawiony krzywą D na rysunku 18-3. Teoretyczną formułę opisującą zależność całkowego widma szumowego przy filtracji pasmowej pierwszego rzędu podał Rice [4]:

$$N_R = N_{R0} \cdot \exp\left(\frac{-V_{th}^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

gdzie: N_R – częstość rejestrowanych impulsów powyżej progu V_{th} ,

N_{R0} – częstość impulsów dla progu dyskryminacji równego zeru,

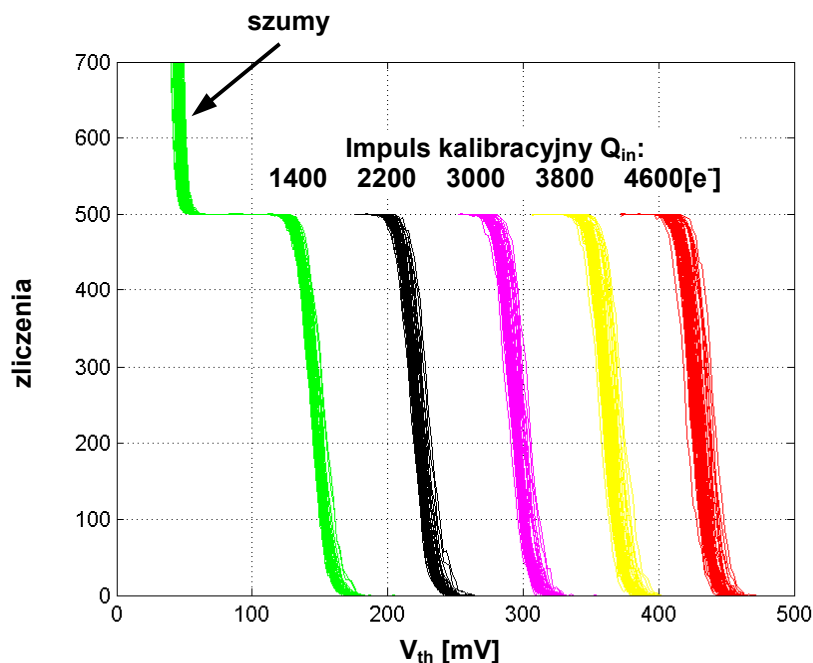
σ – odchylenie standardowe rozmycia szumowego równe wartości średniokwadratowej szumu na wejściu dyskryminatora.

Przedstawione krzywe B i C na rysunku 18-3 odpowiadają superpozycji równań 1 i 2, odzwierciedlając rzeczywiste widmo całkowite z charakterystycznym plateau.

Program ćwiczenia – instrukcja szczegółowa

Zadanie 18.1.

Wykorzystanie układu RX64 do praktycznych pomiarów wymaga przetestowania całego modułu pod względem prawidłowej pracy oraz wyznaczenia podstawowych parametrów układu *front-end*. Poniżej przedstawiono przykładowe dane testowe i zaprezentowano metodę analizy wyników. Dla każdej kombinacji wielkości impulsu kalibracyjnego i progu dyskryminacji układ kalibracyjny generuje określoną liczbę impulsów, a liczniki podłączone do dyskryminatorów liczą impulsy powyżej progu.

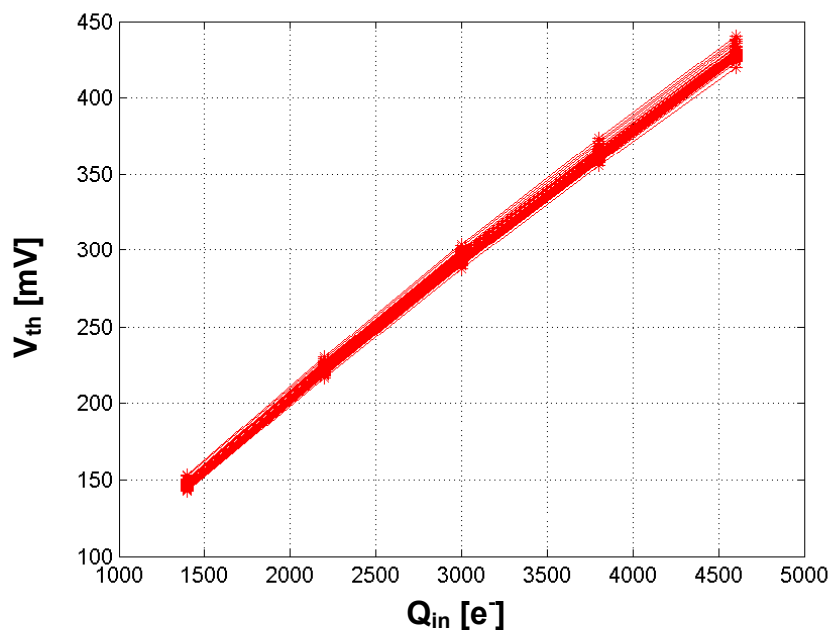


Rysunek 18-4: Widma całkowite różnych wymuszeń kalibracyjnych dla pojedynczego układu scalonego RX64. Na rysunku przedstawiono widma wszystkich 64 kanałów dla pięciu wymuszeń kalibracyjnych.

Na rysunku 18-4 przedstawiono uzyskane w ten sposób widma całkowite dla 64 kanałów jednego układu RX64. Dla niskich progów dyskryminacji poniżej ok. $50mV$ widać dominujący udział szumów elektronicznych. Odpowiedź dyskryminatora dla niższych progów uzależniona jest tylko od całkowitej gęstości widma szumowego.

Napięcie dyskryminacji w testowanym układzie RX64 jest wspólne dla wszystkich 64 kanałów, a przez to uwidacznia się rozrzut położenia widm całkowitych dla poszczególnych kanałów, wynikający z rozrzutu napięć niezrównoważenia dyskryminatorów w każdym kanale jak i również z rozrzutu wzmacnień. Źródła tych rozrzutów związane są z niejednorodnością parametryczną kanałów wynikającą między innymi z rozrzutów procesu technologicznego. Dla małych sygnałów i niskich progów dyskryminacji rozrzut zdeterminowany jest przez napięcie niezrównoważenia, natomiast dla wyższych wartości dyskryminacji rozrzut zależy bardziej od rozrzutu wzmacnień niż napięć niezrównoważenia.

Wartość progów dyskryminacji, dla której wydajność zliczeń spada do 50% odpowiada średniej amplitudzie impulsów na wejściu dyskryminatora, natomiast rozmycie krzywej, zawiera informację o wartości średniokwadratowej szumów dla każdego kanału na wejściu dyskryminatora. Wykreślając zależność progów dyskryminacji odpowiadających wydajności zliczeń na poziomie 50% od wielkości impulsów kalibracyjnych otrzymuje się funkcję odpowiedzi (rysunek 18-5), z której następnie wyznacza się wzmacnienie części analogowej i napięcie niezrównoważenia dyskryminatora amplitudy, oddzielnie dla każdego kanału. Parametry te określa się na podstawie dopasowania prostej. Współczynnik nachylenia odzwierciedla wzmacnienie, wyraz wolny dopasowania określa napięcie niezrównoważenia.



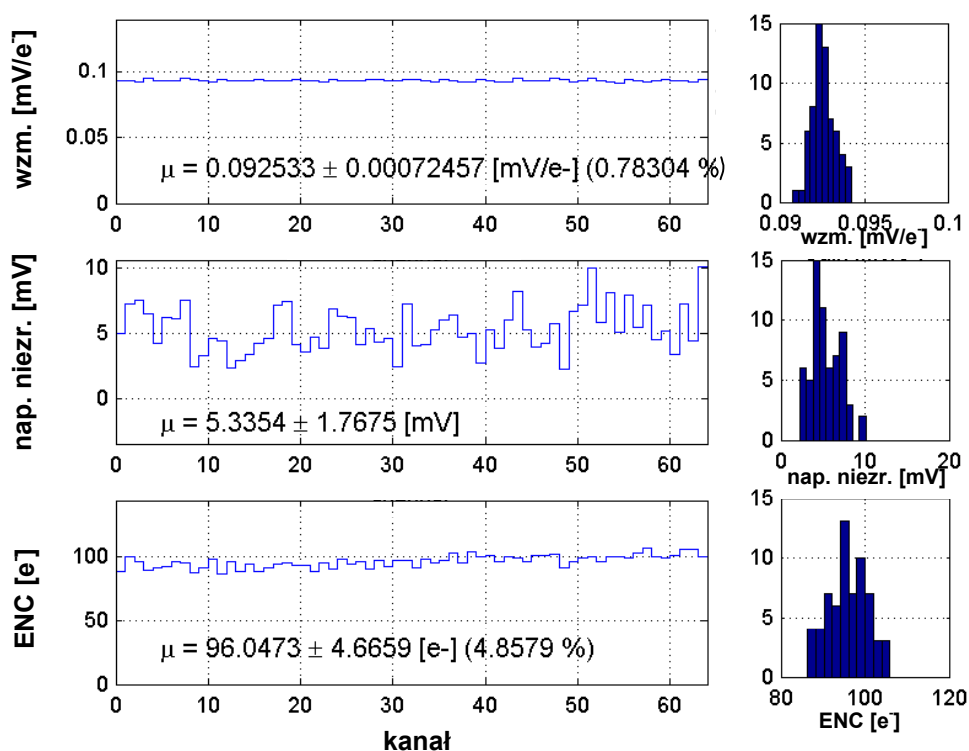
Rysunek 18-5: Funkcja odpowiedzi 64 kanałów budowana na podstawie wyników dopasowania z widm całkowitych przedstawionych na rysunku 18-4.

Dzieląc uzyskaną z dopasowania wartość średniokwadratową szumu na wejściu dyskryminatora przez wzmacnienie toru analogowego otrzymuje się ekwiwalentny ładunek szumowy ENC na wejściu elektroniki *front-end*.

Rozkłady parametrów (wzmacnienia, napięcia niezrównoważenia i ENC) dla wszystkich 64 kanałów układu RX64 przedstawiono na rysunku 18-6. Przytoczona analiza pokazuje

sposób wyznaczenia podstawowych parametrów analogowych systemu wykorzystując zintegrowany w układzie scalonym moduł wewnętrznej kalibracji oraz własności systemu o binarnej architekturze odczytu.

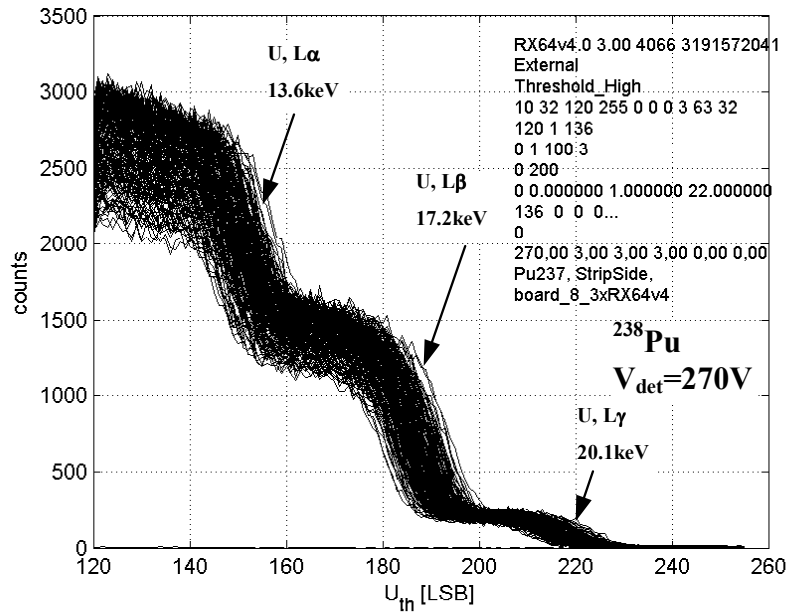
Dodać należy, że dla układów wielokanałowego ze wspólnym progiem dyskryminacji, równie istotnym parametrem, jak szumy pojedynczego kanału, są rozrzuty napięć niezrównoważenia i rozrzuty wzmacnień. Optymalne ustalenie wspólnego progu dyskryminacji musi być tak dobrane by uwzględniało oprócz szumowego rozmycia sygnału również i rozrzuty przedstawionych parametrów. Natomiast prawidłowy projekt wielokanałowego układu odczytu powinien się odznaczać małym rozrzutem napięć niezrównoważenia tak, aby po przeniesieniu na wejście ekwiwalentny rozrzutu napięć niezrównoważenia był mniejszy niż poziom szumów *ENC*.



Rysunek 18-6: Rozkład parametrów analogowych dla 64 kanałów układu RX64 wyznaczonych na podstawie pomiarów widm całkowych dla kilku wartości wymuszeń kalibracyjnych.

Zadanie 18.2.

Weryfikacja zaimplementowanego układu kalibracji wewnętrznej polega na rejestracji przez system pomiarowy (pomiar widm całkowych) kwantów promieniowania o różnych energiach. Wykorzystując izotopowe źródło promieniowania ^{238}Pu , które między innymi emituje fotony o energiach 13.6keV , 17.2keV , 20.1keV i mierząc widmo całkowite w całym zakresie rejestrowanych energii (rysunek 18-7) można analogicznie do zadania poprzedniego wyznaczyć wszystkie parametry analogowe systemu. Porównanie ich pozwala zweryfikować poprawność działania układu wewnętrznej kalibracji.



Rysunek 18-7: Widmo całkowite uzyskane z systemu pomiarowego wyposażonego w trzy układy RX64 współpracujące z 192 kanałowym mikropaskowym detektorem krzemowym. Źródło promieniowania ^{238}Pu .

Materiały pomocnicze

- [1] W. Dąbrowski, et al., "Multichannel mixed-mode IC for digital readout of silicon strip detectors", *Microelectronics Reliability* 42 (2002) 427
- [2] K. Świentek, „Zastosowanie krzemowych detektorów paskowych do obrazowania medycznego z wykorzystaniem promieniowania X o dwóch energiach”, rozprawa doktorska na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH, Kraków 2005
- [3] K. Korbel, W. Dąbrowski, „Filtracja sygnału w spektrometrycznym torze pomiarowym”, Wyd. AGH, Kraków 1992
- [4] S. O. Rice, "Mathematical Analysis of Random Noise", *Bell System Techn. J.*, 23 (1933) 282