

Układ spektrometru izotopowego do zastosowań w miernictwie przemysłowym

Streszczenie: W artykule przedstawiono algorytm i ideę układu do radioizotopowych pomiarów spektroskopowych. Przedstawiona idea pomiaru widma energetycznego promieniowania radioizotopowego pozbawiona jest wyrafinowanych układów elektronicznych. Prezentowany układ oraz algorytmy pomiarowe mogą być wykorzystane do pomiarów spektroskopowych z automatyczną kompensacją niestabilności detektora scyntylacyjnego z fotowielaczem. Algorytm kompensacji polega na dynamicznej zmianie progów dyskryminacji impulsów, a nie jak w większości dotychczasowych układów, na regulacji wzmocnienia poprzez zmianę napięcia zasilania fotowielacza.

Abstract: In the paper a circuit and algorithm for radiation spectroscopy measurements has been presented. Described idea of measurements of energetic spectrum of radioisotope radiation is free of any sophisticated electronic circuits. Presented algorithms of measurements can be easily used for automatic instability compensation in the case of scintillator-photomultiplier detector. Compensation algorithm is based on dynamic comparator thresholds adjustment instead of gain control based on high voltage photomultiplier tuning. **(Isotopic Spectrometer System for Use in Industrial Measurements).**

Słowa kluczowe: spektroskopia radioizotopowa, detektor scyntylacyjny, stabilizacja detektora scyntylacyjnego

Keywords: radiation spectroscopy, scintillation detector, scintillation detector stabilization.

doi:10.12915/pe.2014.07.10

Wstęp

Zastosowanie radioizotopów, a szerzej promieniowania radioizotopowego, jest obecnie bardzo szerokie. Najpowszechniej znanymi i wzbudzającymi wiele emocji, pomijając zastosowania militarne, jest wytwarzanie energii elektrycznej.

Znacznie mniej emocji wzbudza zastosowanie promieniowania izotopowego w medycynie. Zastosowania te obejmują zarówno terapię i diagnostykę. Zastosowania diagnostyczne polegają na użyciu izotopów promieniotwórczych, jako znaczników do wykrywania zmian chorobowych. Podobne zastosowanie polegające na śledzeniu przemieszczania się śladowych ilości, sztucznie wprowadzanych izotopów promieniotwórczych, stosowane jest w biologii, ochronie środowiska i w przemyśle np. w defektoskopii [1].

Poza defektoskopią, zastosowanie promieniowania przenikliwego w procesach przemysłowych polega głównie na wykorzystaniu zjawiska jego osłabiania przy przechodzeniu przez materię [2]. W pewnym uproszczeniu powiedzieć można, że absorpcja promieniowania jest proporcjonalna do masy materii, przez którą przechodzi wiązka. W zależności od zastosowania oraz sposobu kalibracji konstruuje się czujniki poziomu, wagi izotopowe, mierniki grubości lub gramatury, gęstościomierze, przepływomierze masowe, mierniki stężenia kwasów (na wiązce neutronowej). Oprócz wiązki głównej promieniowania można wykorzystać promieniowanie rozproszone lub wtórne. Na takiej zasadzie działają np. niektóre mierniki zagęszczenia gruntu lub wagi izotopowe. W innych jeszcze przypadkach stosuje się nie jedno, a dwa źródła izotopowe i wykorzystuje odmienny efekt oddziaływania promieniowania o różnej energii lub innej naturze (np. promieniowanie gamma i neutronowe). Tak działają niektóre popiołomierze, wilgotnościomierze itp. [2] [3] [4].

Lista zastosowań promieniowa radioizotopowego w miernictwie nie kończy się na wymienionych wyżej. Co jakiś czas pojawiają się nowe, często wyrafinowane metody pomiarowe np. pozwalające określić przepływ mieszanin dwufazowych [5], [6].

Obecnie radioizotopowe metody pomiarowe w przemyśle nie są chętnie stosowane. Głównym argumentem jest dążenie do wyeliminowania zagrożeń wynikających z zastosowania izotopów promieniotwórczych oraz chęć uniknięcia specjalnych środków ostrożności,

jakim podlega eksploatacja źródeł radioizotopowych. W wielu jednak przypadkach, zalety pomiarów radioizotopowych dają im przewagę:

- promieniowanie izotopowe jest, co prawda osłabiane, ale przenika przez większość materiałów, co pozwala na pomiary poprzez ścianki zbiorników (wskaźniki lub mierniki poziomu), rurociągów (gęstościomierze), elementy nośne (pomiar urobku kopalnianego na transporterach),
- pomiary są bezkontaktowe, co pozwala odsunąć głowice pomiarową od mierzonego medium, a to jest bardzo istotne np. przy pomiarze papieru bezpośrednio na maszynie papierniczej, przy pomiarze grubości folii, lub pomiarze grubości taśm metalowych w czasie ich walcowania,
- miernik reaguje selektywnie na masę mierzonego medium pomijając inne czynniki, jak np. przejrzystość czy kolor. Przykładem może być pomiar grubości papieru lub izotopowe czujki dymu, które mimo wielu prób ich zastąpienia układami optoelektronicznymi, ciągle są w powszechnym użyciu,
- bezkontaktowy pomiar „in situ” składu chemicznego na podstawie analizy promieniowania wtórnego np. popiołowość lub wilgotność węgla.

W przemysłowych zastosowaniach pomiarowych najczęściej wykorzystuje się liczniki G-M, komory jonizacyjne i detektory scyntylacyjne. Jeśli chodzi o scyntylatory, to jest ich wiele, ale nowe o ciekawych własnościach stale są badane (np. [7], [8]). Najczęściej stosowanymi w przemyśle są scyntylatory NaI(Tl), CsI(Tl) i scyntylatory plastikowe [9].

Istnieje bardzo duża liczba izotopów promieniotwórczych, które znajdują zastosowanie w miernictwie przemysłowym [1], [2], [3], [4], [9]. Jednak do najczęściej stosowanych należą:

- promieniowanie α – ameryk (^{241}Am),
- promieniowanie β – krypton (^{85}Kr), stront ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$),
- promieniowanie γ – ameryk (^{241}Am), krypton (^{85}Kr), kobalt (^{60}Co), cez (^{137}Cs),
- promieniowanie neutronowe – beryl ($^9\text{Be}+^{241}\text{Am}$), kaliforn (^{252}Cf)

Warto również wspomnieć, że pojawiają się układy pomiarowe, w których źródła radioizotopowe są zastępowane źródłami elektronicznymi. W niektórych przypadkach możliwe okazuje się zastąpienie

promieniowania gamma promieniowaniem X generowanym elektronicznie oraz pojawiają się również próby budowy elektronicznych generatorów neutronowych do zastosowań przemysłowych [9]. Biorąc to pod uwagę, można się spodziewać, że techniki pomiarowe opracowane dla mierników radioizotopowych mogą stać się bardziej atrakcyjne, gdy w miejsce izotopów promieniotwórczych wprowadzi się instrumenty elektroniczne.

Pomiary spektroskopowe

We wszystkich układach pomiarowych do detektora, poza promieniowaniem pochodzącym ze źródła – wiązką bezpośrednią – dochodzi również promieniowanie rozproszone i wtórne o mniejszej energii. Pomiarów dokonywać można albo poprzez detekcję całego promieniowania lub dokonując analizy energetycznej jego spektrum.

Liczniki G-M i komory jonizacyjne nie nadają się do analizy energii, pomijając fakt, że sprawność detekcji różnego rodzaju promieniowania jest różna. Inaczej jest w przypadku liczników proporcjonalnych, detektorów scyntylacyjnych i półprzewodnikowych. Sygnały elektryczne z tego typu detektorów mają postać impulsów o amplitudzie zależnej do energii detekowanego promieniowania. Analizując, więc amplitudy impulsów określić można rozkład energii odbieranego promieniowania i tym samym uzyskać więcej jakościowych i ilościowych informacji pomiarowych.

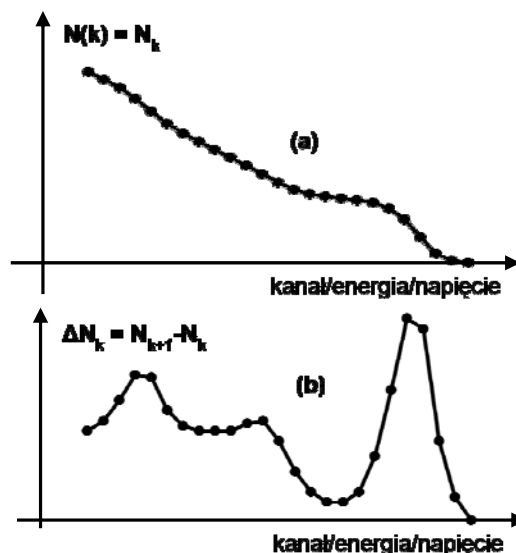
Do metod radioizotopowych, wykorzystujących charakterystyki spektralne, zaliczyć można przede wszystkim, pomiary składu chemicznego materiału polegające na analizie tłumienności kwantów o różnej energii lub analizie promieniowania wtórnego wzbudzanego promieniowaniem radioizotopowym. Typowym przykładem zastosowania jest pomiar popiołowości węgla.

Do przedstawienia rozkładu energii kwantów promieniowania izotopowego użyć można dwóch rodzajów wykresów. Jeden z nich to spektrum całkowite, w którym wykresła się liczbę impulsów zarejestrowanych N w określonym czasie, o amplitudzie większej niż pewna określona wartość napięcia U odpowiadająca kreślonej energii kwantu E tzn. $N(E) = N(\text{energia} > E)$.

Pomiary dokonuje się dla dyskretnych, równoodległych wartości U_k (odpowiadających E_k). Zakres amplitud $\Delta U = U_{k+1} - U_k$ odpowiadający przyrostowi energii ΔE nosi nazwę kanału. Stąd oś pozioma takiego wykresu wyskalowana może być w napięciu (amplituda impulsu) energii (energia odpowiadająca danej amplitudzie) lub w numerach poszczególnych kanałów. Należy podkreślić, że zależność pomiędzy energią, a kanałem lub amplitudą charakteryzuje się zazwyczaj pewną nieliniowością i przesunięciem zera (offsetem), co wymaga przeprowadzenia procedury kalibracyjnej [3], [8].

Znacznie bardziej czytelny jest drugi typ wykresu przedstawiający tzw. spektrum różniczkowe, na którym wykresła się ilość zaliczeń (lub ich intensywność) w poszczególnych kanałach. Wykres ten uzyskać można przez różniczkowanie wykresu poprzedniego. Widać na nim wyraźne maksima odpowiadające najliczniejszym kwantom pochodzącym wprost ze źródła, lub wzbudzonym w próbce pomiarowej. Poglądowe wykresy spektrum całkowitego i różniczkowego pokazano na rysunku 1.

Należy tu podkreślić, że charakterystyki spektralne nie reprezentują widm energetycznych samych źródeł izotopowych, ale spektrum amplitud impulsów na wyjściu detektorów, a te są rezultatem wielu złożonych zjawisk, jakie zachodzą na skutek oddziaływania pierwotnych kwantów pochodzących ze źródeł z materią w obszarze pomiędzy źródłem a detektorem oraz w samym detektorze [3] [9].



Rys. 1. Spektrum energetyczne całkowite (a) i różniczkowe (b)

Najprostszym sposobem pomiaru widma jest tzw. spektroskop jednokanałowy (rys. 2). Zbudowany on jest z komparatora napięcia oraz licznika. Poprzez nastawę progu komparatora licznik zlicza impulsy o amplitudzie większej niż zadany próg U_k . W ten sposób, zmieniając napięcie U_k , uzyskać można bezpośrednio widmo całkowite, a po przeliczeniu widmo różniczkowe. Pomiar taki jest jednak uciążliwy, gdyż pomiar należy powtórzyć tyle razy ile kanałów energetycznych zamierzamy zmierzyć. Długi czas pomiaru wymaga przyjęcia założenia, że układ pomiarowy nie zmienia swoich parametrów w czasie całego cyklu pomiarowego.

Istnieje wiele sposobów rejestracji widm w wielu kanałach równocześnie, przy czym ilość kanałów dochodzi do kilku tysięcy. Głównym problemem spektrometru wielokanałowego jest układ rozdzielu impulsów o różnych amplitudach do liczników odpowiadających poszczególnym kanałom. Prostym sposobem, z punktu widzenia zasady działania, jest idea wielokanałowego rejestratora całkowego jak na rysunku 3. Zawiera on szereg komparatorów o progach ustalonych za pomocą prostego dzielnika napięciowego i liczniki. Aczkolwiek idea takiego układu jest prosta, to ilość komparatorów i liczników musi być równa ilości kanałów, co przy dużej ich liczbie jest uciążliwe w realizacji. Współczesne wyrafinowane konstrukcje spektrometrów idą w kierunku zastosowania szybkich przetworników analogowo-cyfrowych i algorytmów cyfrowej obróbki sygnałów [3] [9].

Prezentowana w pracy idea układu jest prostsza. Nie zawiera wyrafinowanych układów elektronicznych i, jak pokazują przykłady, nadaje się do wykorzystania w układach przemysłowych.

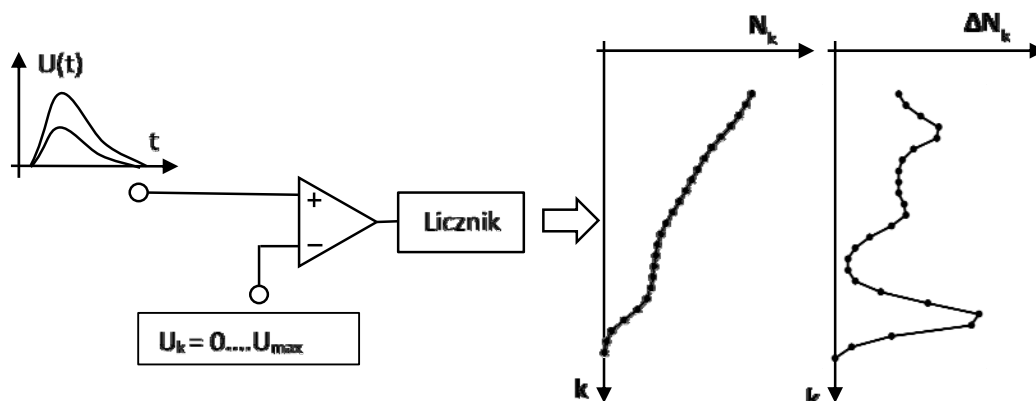
Układ spektrometru

Proponowany układ spektrometru oparty jest na zasadzie pokazanej na rysunku 3, ale zawiera tylko 4 liczniki i 4 komparatory. Dodatkowo progi skrajnych komparatorów sterowane są z przetworników cyfrowo-analogowych (CA) (rys. 4). Zaletą takiego rozwiązania jest prostota oraz możliwość wykorzystania wewnętrznych liczników mikrokontrolera oraz przetworników CA sterowanych z tego samego procesora. Wadą takiego układu jest, w przypadku dużej ilości kanałów, czas pomiaru. Jednak, w prezentowanym układzie, jest on i tak 4 razy krótszy w porównaniu z analizatorem jednokanałowym. Algorytm pracy układu polega na pomiarze impulsów z

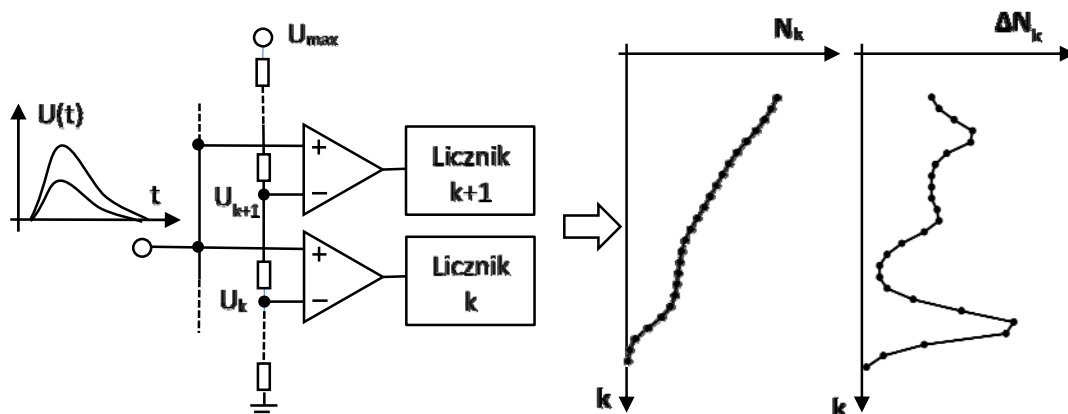
czterech liczników, a następnie na kolejnej zmianie nastaw obu przetworników analogowo cyfrowych tak, aby uzyskać wyniki dla określonej liczby kanałów w pożądanym zakresie zmienności amplitud impulsów.

W rozwiązaniu praktycznym wykorzystano procesor ze rdzeniem ARM typu STM32F100RB oraz przetwornik

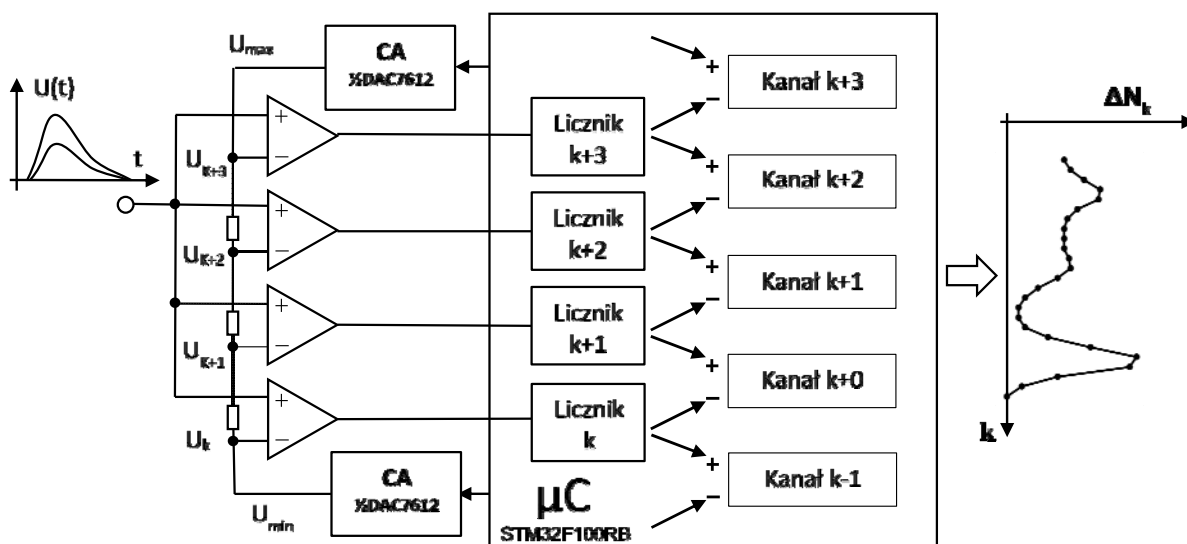
cyfrowo-analogowy DAC7612. Rozdzielczość zrealizowanego analizatora wyniosła 10mV, przy maksymalnej amplitudzie sygnału 2,4V, co dało możliwość analizy 240 kanałów.



Rys. 2. Idea spektrometru jednokanałowego



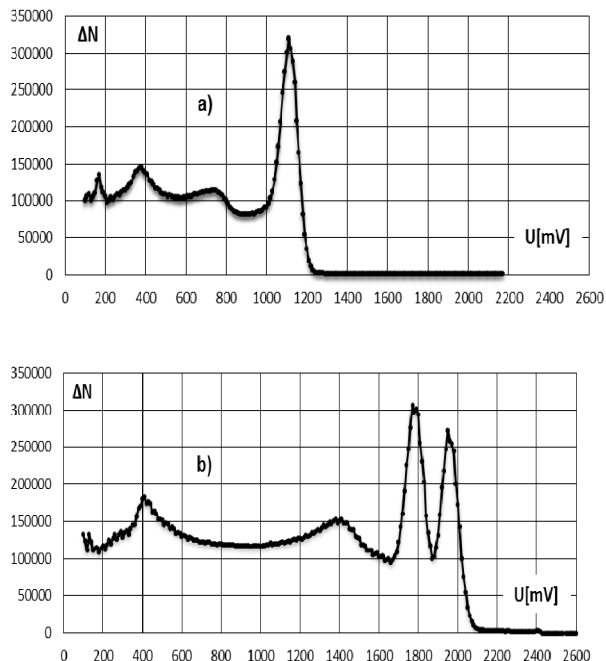
Rys. 3. Idea całkowitego spektrometru wielokanałowego



Rys. 4. Schemat poglądowy prezentowanego spektrometru

Przykładowe pomiary

Przykładowe widma amplitudowe dla źródeł cezowego i kobaltowego pokazano na rysunku 5. Źródła przysłonięte były częściowo przesłoną ołowianą. Zastosowano detektor scyntylacyjny NaI(Tl) o średnicy 51mm i tej samej długości. Pomiary wykonano przy czasie zliczania równym 150s, dla kanałów o szerokości 10mV, co odpowiada ich szerokości energetycznej około 7,7keV.



Rys. 5. Widmo różniczkowe dla źródła ^{137}Cs – a) i ^{60}Co – b) dla detektora scyntylacyjnego NaI(Tl) uzyskane prezentowanym układem. Czas zliczania 150s, szerokość kanału 10mV.

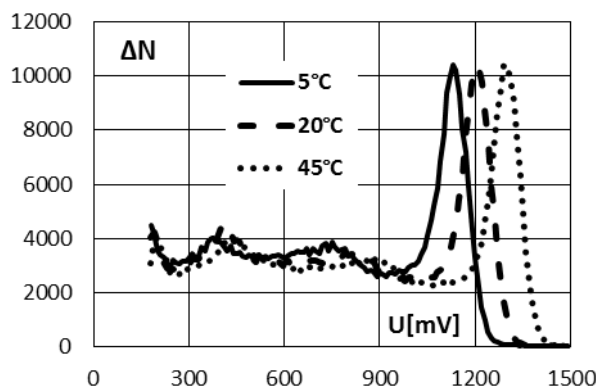
W układach przemysłowych takich jak pomiar poziomu, gramatury, czy gęstości zastosowanie pełnej, wielokanałowej analizy spektralnej nie jest konieczne. Często wystarcza pomiar impulsów o amplitudzie większej od zadanej wartości, tak jak w spektrometrze jednokanałowym. Istnieje jednak potrzeba stabilizacji wzmocnienia układu detektora oraz układu kształtowania impulsów [3], co stale jest przedmiotem nowych poszukiwań (np. [11, [12]).

Niestabilność pracy detektora polega na zmianie amplitud impulsów pod wpływem czynników zewnętrznych jak np. temperatury oraz efektów starzeniowych. Przykład niestabilności detektora ilustruje rysunek 6, gdzie pokazano widma uzyskane dla źródła cezowego dla trzech temperatur zewnętrznych.

Najprostszym sposobem eliminacji błędów jest zastosowanie pojedynczego komparatora i zliczanie impulsów o napięciu takim, żeby niestabilności nie miały dużego wpływu na pomiar. W przykładzie z Rys. 6 odpowiednim progiem byłoby napięcie około 0.9V, które zapewnia minimalizację błędów dla pomiarów jednokanałowych (analogizator jednokanałowy ze stałym progiem) w zakresie temperatur 5 do 45 stopni Celsjusza. Miejsce to (minimum tuż przed głównym pikiem) nosi nazwę plateau [3].

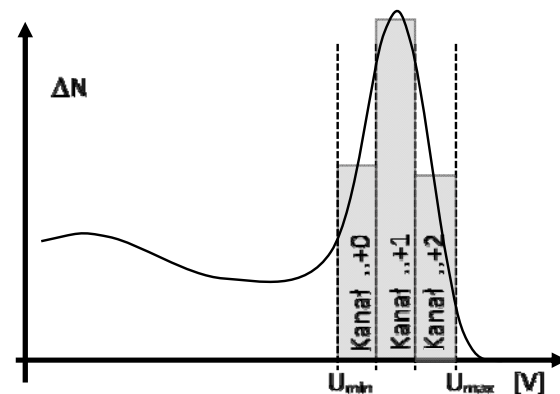
Bardziej rozbudowane układy stabilizacji uzyskać można stosując tzw. stabilizację położenia pików. Polega ona na pomiarze spektrum oraz analizie umiejscowienia pików o znanej energii i takiej regulacji wzmocnienia, aby pik ten pozostawał w swoim położeniu. W przypadku braku w mierzonym spektrum odpowiedniego pików można w

systemie zainstalować dodatkowe, słabe źródło kontrolne w pobliżu detektora lub wprowadzić (w przypadku detektora scyntylacyjnego) impulsy wysokostabilnego źródła światła [3] [9].



Rys. 6. Widmo ^{137}Cs dla różnych temperatur otoczenia; detektor scyntylacyjny NaI(Tl); czas zliczania 5s.

Istotę takiego sposobu stabilizacji pokazuje rysunek 7, gdzie do analizy wykorzystano trzy kanały - jeden w maksimum pików i dwa na jego zboczach. Stabilizacja, w tym przypadku może polegać na takiej regulacji wzmocnienia detektora, aby ilość zaliczeń w kanałach skrajnych była jednakowa. W tradycyjnych układach tego typu sygnał wykonawczy steruje zazwyczaj wysokim napięciem fotopowielacza i w ten sposób zmienia wzmocnienie detektora.



Rys. 7. Ilustracja algorytmu stabilizacji położenia pików.

Proponowany w artykule układ, o idei pokazanej na rysunku 7, idealnie nadaje się tego typu stabilizacji. Algorytm takiej regulacji polega na odpowiednim, dynamicznym dobraniu, za pomocą przetworników CA, progów komparacji (U_{min} i U_{max} na rysunku 7), tak, aby kanały podążały za pikiem. Istotne jest, że zmieniając progi komparatorów zmienia się zarówno położenie kanałów jak i ich szerokość. Bardzo istotne jest również to, że w tym przypadku, nie jest konieczna regulacja wzmocnienia detektora (np. napięcia zasilania fotopowielacza). Jako wartość pomiarową ilości zliczeń można przyjąć kanał środkowy lub sumę wszystkich trzech kanałów (rys. 7).

W tabeli 1 przedstawiono porównanie ilości zliczeń dla przypadku pomiaru liczby impulsów dla układu jednoprogowego i napięcia progowego równego 0,9V oraz liczby impulsów przy dynamicznej zmianie położenia progów, dla różnych temperatur jak w przykładzie na rysunku 6. W pierwszym przypadku widać wyraźną zmianę ilości zliczeń wraz ze zmianą temperatury, przekraczającą wyraźnie błąd statystyczny [3] [9]. Taki sposób pomiaru może okazać się wystarczający w przypadku

sygnałizatorów poziomu, nie nadaje się jednak do pomiarów wielkości analogowych. W przypadku prezentowanego układu i wykorzystując wyżej opisany algorytm stabilizacji, ilość zliczeń jest nieco mniejsza, ale ich rozrzut nie przekracza rozrzutu wynikającego ze statystyki, co potwierdza wyraźnie poprawność takiego sposobu korekcji niestabilności detektora.

Tabela 1. Porównanie ilości zliczeń układu jednoprogowego i dla dynamicznej zmiany położenia progów komparacji.

T [°C]	5	25	45
$N(U_{th} > 0.9V) \cdot 10^3$	165	175	199
$N(U_{min} < U < U_{max}) \cdot 10^3$	112.2	111.1	111.6
U_{min}/U_{max} [mV]	950/1100	1030/1180	1120/1270

Podsumowanie

W pracy zaprezentowano idę prostego układu spektrometru radioizotopowego o rozdzielczości rzędu 7,7keV, pozwalającego na współpracę z detektorem scyntylacyjnym. Układ zbudowano w oparciu o popularny układ mikroprocesorowy bez wykorzystania innych wyrafinowanych podzespołów elektronicznych. Prezentowane przykłady pomiarów spektrum energetycznego z użyciem źródeł cezowego i kobaltowego oraz detektora scyntylacyjnego NaI(Tl) dowodzą poprawnej pracy układu. Stosunkowo mała rozdzielczość oraz długi czas pomiaru, w przypadku konieczności pomiaru całego spektrum, może być częściowo skompensowana stale rozwijanymi, licznymi metodami obliczeniowymi (np. [13], [14]).

Na szczególną uwagę zasługuje zaprezentowany sposób wykorzystania układu do kompensacji niestabilności układu detektora metodą stabilizacji piku bez konieczności regulacji wysokiego napięcia fotopowielacza, a poprzez dynamiczną zmianę położenia progów komparacji analizatora czterokanałowego.

LITERATURA

- [1] Dziunikowski B., Zastosowania izotopów promieniotwórczych cz.2, Kraków: AGH, 1998
- [2] Dziunikowski B., Zastosowania izotopów promieniotwórczych, Kraków: AGH, 1995
- [3] Knoll G., Radiation Detection and Measurement., New York, Wiley, 2010
- [4] Urbański P.i, Promieniowanie jonizujące w miernictwie przemysłowym, *Postępy Techniki Jądrowej*, 44(2001), nr 1, 37-44
- [5] Petryka L., Hanus R., Zych M., Zastosowanie metody absorpcji promieniowania gamma w pomiarach przepływów

- dwufazowych w rurociągach, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2012), nr 1b, 185-188
- [6] Hanus R., Szlachta A., Kowalczyk A., Petryka L., Zych M., Radioisotope Measurement of Two-Phase Flow in Pipeline Using Conditional Averaging of Signal, *Electrotechnical Conference (MELECON), 2012 16th IEEE Mediterranean*, (2012), 144-147
- [7] Tsoulfanidis N., Measurement and Detection of Radiation, New York: McGraw- Hill, 2010.
- [8] Szczęśniak T., Optymalizacja detektorów scyntylacyjnych dla pozytonowej tomografii emisyjnej z czasem przelotu, *Symposium Narodowego Centrum Badań Jądrowych*, (2013) Praca dostępna na stronie: <http://www.ncbj.gov.pl/node/2577>
- [9] Cherepy N. J., Payne S. A., Sturm B. V., Drury O. B., O'Neal S. P., Thelin P. A., Shah K. S., Hawrami R., Momayezi M., Hurst, A. Burger, A. Burger, B. Wiggins, P. Bhattacharya, L. A. Boatner B., Ramey J. O., Instrument Development and Gamma Spectroscopy With Strontium Iodide, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 60(2013), nr 2, 955-958
- [10] Sved, J. Industrial Neutron Based Elemental Analysis, Sensor Based Sorting, Aachen, April 17-19, 2012. Praca dostępna na stronie: <https://getinfo.de/app/Conference-Sensor-Based-Sorting-2012-April-17-19/id/TIBKAT%3A715939149>
- [11] Manor A., Osovizky A., Dolev E., Marcus E., Ginzburg D., Pushkarsky V., Kadmon Y., Cohen Y., Compensation of Scintillation Sensor Gain Variation during Temperature Transient Conditions Using Signal Processing Techniques, *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, (2009), 2399-2403
- [12] Budden B. S., Stonehill L. C., Dallmann N. A., Michel J. M., Baginski M. J., Best D. J., Dathy C., Frank J. M., McClish M., Smith M. B., Gain Stabilization and Pulse-Shape Discrimination in a Thermally-Variant Environment for a Hand-held Radiation Monitoring Device Utilizing Cs2L iYC16:Ce3+ (CLYC) Scintillator, *IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record (NSS/MIC)*, (2012), 351-356
- [13] Burr T., Hengartner N., Matzner-Lober E., Myers S., Rouviere L., Smoothing Low Resolution Gamma Spectra, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 57(2010), nr 5, 2831-2840
- [14] Kong Y., Pausch G., Römer K., Kreuels A., Herbach C. M., Neuer M., Lentering R., Stein J., Linearization of Gamma Energy Spectra in Scintillator-Based Commercial Instruments, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 57(2010), nr 3, 1430-1434,

Autorzy: dr inż. Jerzy Witkowski, Politechnika Wrocławska, Katedra Teorii Pola, Układów Elektronicznych i Optoelektroniki, Wydział Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, 50-370 Wrocław, Wyb. Wyspiańskiego 27, E-mail: Jerzy.Witkowski@pwr.wroc.pl; mgr inż. Mariusz Jaśnikowski, OTJ Polon Sp. z o.o., 50-421 Wrocław, ul. Na Grobli 6, E-mail: polon@polon-otj.com.pl