

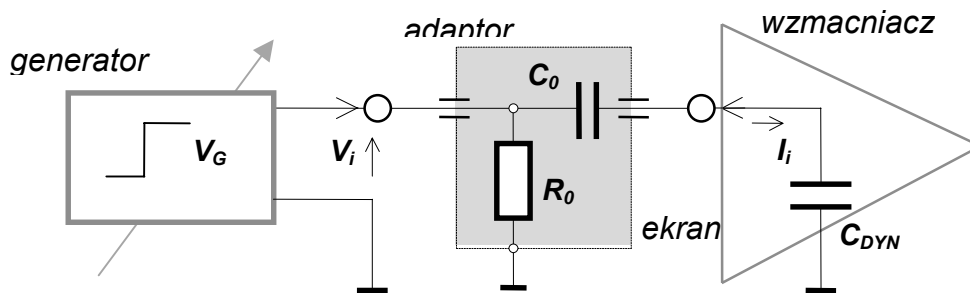
Dodatek H.

Metody pomiaru parametrów znamionowych przedwzmacniaczy ładunkowych.

W licznych zespołach parametrów znamionujących własności przedwzmacniacza ładunkowego czołowe miejsce zajmują: **czułość ładunkowa** oraz **rozdzielczość ładunkowa**, mające poprzez liniowy związek z podlegającym pomiarowi sygnałem pierwotnym (energiami promieniowania jonizującego) swoje odpowiedniki w skali energii.

Metody pomiarowe służące do wyznaczenia wartości tych parametrów wymagają odpowiedniego wyposażenia aparaturowego. Obejmuje ono obok *źródła sygnału wzorcowego*, szeroki wachlarz elektronicznych przyrządów i urządzeń pomiarowych (*impulsowy wzmacniacz kształtujący* i zależnie od metody - *wielokanałowy analizator amplitudy impulsów względnie kalibrowany woltomierz rms* i *synchroskop pomiarowy*).

W celu zapewnienia porównywalności rezultatów pomiarowych Międzynarodowa Komisja Elektrotechniki opracowała i zaleciła **standardowe procedury pomiarowe** oraz sformułowała **warunki** jakim muszą odpowiadać urządzenia pomocnicze. Według tych rekomendacji formowanie wzorcowych impulsów ładunkowych realizuje się w układzie: *regulowany generator wzorcowych impulsów napięciowych* - **adaptor ładunkowy**. Zasadę formowania impulsu ładunkowego w takim układzie zilustrowano na rysunku H1.



Rys. H1. Ilustracja zasady działania *adaptora ładunkowego*

Założmy, że generator wzorcowy jest źródłem napięciowego sygnału schodkowego o amplitudzie *schodka* V_G . Odnosząc dyskusję do pojedynczego schodka możemy napisać

$$V_i(t) = V_G H(t) \quad (\text{H-1})$$

Operatorowe równanie obwodowe determinujące prąd wejściowy przedwzmacniacza przyjmie zatem postać

$$I_i(p) = \frac{V_G}{p} \frac{C_o C_{DYN}}{(C_o + C_{DYN})} p \underset{C_o \ll C_{DYN}}{\cong} V_G C_o \quad (\text{H-2})$$

W dziedzinie czasu otrzymujemy więc quasi-dirakowski impuls prądowy

$$I_i(t) \cong V_G C_o \delta(t) \quad (\text{H-3})$$

noszący ładunek równy

$$Q_i = V_G C_o \quad (\text{H-4})$$

Zależność (H-4) opisującą ładunek iniekowany do przedwzmacniacza przez pojedynczy skok napięcia z dobrym przybliżeniem można adaptować dla przypadku periodycznego ciągu impulsów o zaniku eksponencjalnym, pod rygorem dopełnienia następujących warunków:

- czas narastania impulsu $t_r \leq 20 \text{ ns}$
- czas opadania impulsu $t_d \geq 100 \mu\text{s}$
- częstotliwość repetycji $f_G \leq 100 \text{ Hz}$

Takie właśnie warunki sformułowano w zaleceniach normalizacyjnych Międzynarodowej Komisji Elektrotechniki (IEC) ustalających także optymalny zakres amplitud impulsów:

- amplituda impulsu $V_G = (0 \div 1.0) \text{ V}$.

Strukturalnie *adaptor ładunkowy* stanowi ekranowany trójnik pasywny z rezystancją wejściową R_θ dobraną z warunku dopasowania do oporności falowej linii transmisyjnej Z_θ , z założenia równej oporności wyjściowej generatora. Dodajmy, że generatory impulsów wzorcowych są skalowane dla warunków dopasowania rezystancji. Wartość pojemności szeregowej C_θ przyjmowana jest na poziomie ułamka do paru pikofaradów (najczęściej $1 \div 2 \text{ pF}$).

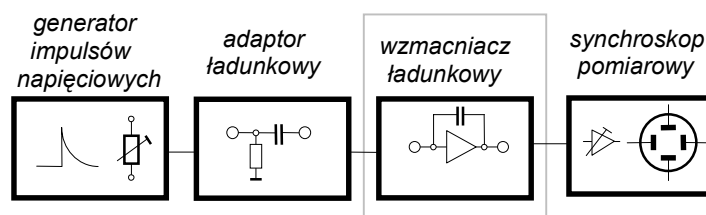
Dla osiągnięcia wymaganej dokładności pomiarów niezbędne jest zastosowanie urządzeń pomiarowych odpowiednio wysokiej klasy o parametrach znamionowych dostosowanych do parametrów czasowych i amplitudowych sygnału.

Pomiar czułości ładunkowej

Wyznaczenia *czułości* ładunkowej k_q dokonuje się pośrednio na gruncie definicji tej wielkości poprzez pomiar amplitudy V_o odpowiedzi przedwzmacniacza na zadane wymuszenie ładunkowe Q_i .

$$k_q \triangleq \frac{V_o}{Q_i} \quad (\text{H-5})$$

Służący temu celowi układ pomiarowy przedstawiono schematycznie na rysunku H2.



Rys. H2. Schemat układu do pomiaru *czułości ładunkowej*

Wyrażając iniekowany ładunek Q_i w terminach zależności (H-4) sprowadzamy formułę (H-5) do praktycznie użytecznej postaci wiążącej wielkość mierzoną V_o z wielkościami zadanymi (nastawianymi) V_G i C_θ .

$$k_q = \frac{V_o}{C_\theta V_G} \quad (\text{H-6})$$

W praktyce spektrometrii jądrowej chętniej korzysta się z alternatywnej wielkości odniesionej do energii promieniowania jonizującego deponowanej w detektorze w akcie jego detekcji,

zwanej **czułością energetyczną** k_E przedwzmacniacza. Jej wartość jest dodatkowo uwarunkowana rodzajem użytego detektora półprzewodnikowego zgodnie z relacją wiążącą zaabsorbowaną energię E_j ze wzbudzonym ładunkiem Q_i . W szczególności dla detektora krzemowego otrzymamy

$$Q_i = E_j \frac{q}{W_{Si}} \quad (\text{H-7})$$

Uwzględniając wartości liczbowe stałych: $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C oraz $W_{Si} = 3.6$ eV/parę elektron-dziura, i wyrażając amplitudy impulsów w mV , a pojemności C_0 w pF , z przekształcenia formuły (H-6) otrzymamy

$$k_{E_{Si}} = \frac{4.44 V_o}{V_G C_o} \left[\frac{mV}{MeV} \right] \quad (\text{H-8})$$

W literaturze przedmiotu czułość ładunkowa często oznaczana jest symbolem A_Q zaś czułość energetyczna odpowiednio A_{Si} .

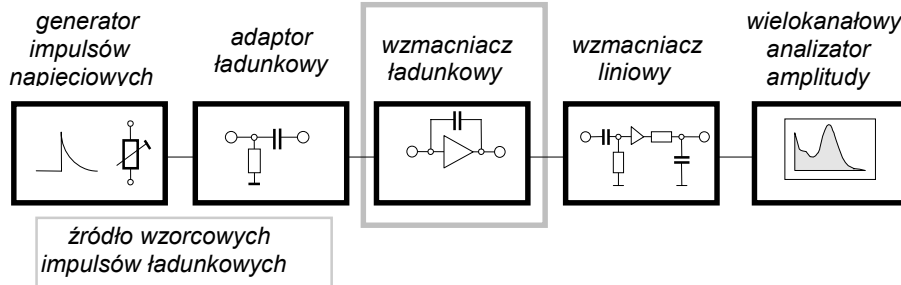
Pomiar ładunkowej i energetycznej zdolności rozdzielczej.

Wyjściowy sygnał przedwzmacniacza ładunkowego obciążony jest zakłóceniami fluktuacyjnymi mającymi swe źródło zarówno w detektorze jak i w samym przedwzmacniaczu. W spektrometrii niskoenergetycznego promieniowania jonizującego dominujące znaczenie mają zakłócenia tkwiące inherentnie w przedwzmacniaczu. Stanowią je mianowicie szumy generowane w jego pasywnych i aktywnych elementach składowych. Stąd też obok pojęcia rozdzielczości pomiaru stosowany jest termin „**rozmycia szumowego**” sygnału. Ilościowo określa go średnie odchylenie standardowe rozkładu napięć wyjściowych σ_{V_o} otrzymywanego w odpowiedzi na wymuszenie ciągiem monoamplitudowych impulsów ładunkowych. Alternatywny sposób za miarę rozmycia szumowego przyjmuje pełną szerokość wyjściowego rozkładu amplitudowego na połowie jego wysokości oznaczany skrótem literowym $(FWHM)_{V_o}$ - (ang. *Full Width at Half Maximum*). W praktyce spektrometrycznej operuje się z reguły wielkościami rozmycia szumowego sprowadzonymi na wejście przedwzmacniacza, wyrażanymi w konsekwencji w jednostkach ładunku. Wyrażane są one bądź jako średnie, ładunkowe odchylenie standardowe σ_Q czy też jego odpowiednik (ENC) zwany **równoważnym ładunkiem szumów**, a rzadziej, jako szerokość połówkowa równoważnego rozkładu ładunkowego $\Delta Q_{1/2}$.

Uwzględnienie konwersji sygnału w detektorze pozwala wyrazić efekt dyspersji sygnału w jednostkach energii. Określone w ten sposób rozmycie szumowe utożsamiamy z pojęciem **energetycznej zdolności rozdzielczej**. W tym sposobie opisu wyrażane jest ono jako zredukowane do postaci energetycznej średnie odchylenie standardowe σ_E bądź też jako szerokość połówkowa $(FWHM)_{Si}$, oznaczana alternatywnie symbolem $\Delta E_{(1/2)Si}$. Indeks „Si” wiąże te wielkości z detektorem krzemowym.

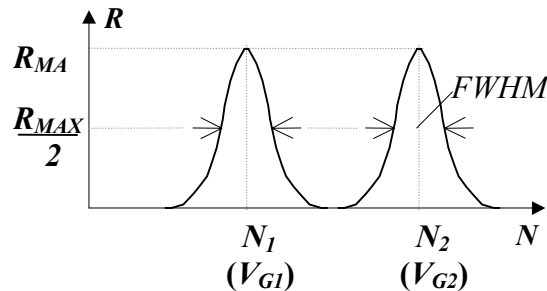
Zalecenia normalizacyjne IEC przewidują dwie metody pomiaru: metodę **wielokanałowego analizatora amplitudy** oraz metodę **woltomierza RMS i oscyloskopu**, przy czym preferowana jest metoda pierwsza. Bezpośrednim rezultatem pomiarowym według metody pierwszej jest rozkład amplitudowy impulsów wyjściowych, pozwalający w prostych procedurach obliczeniowych wyznaczyć wartości $(FWHM)$ w dowolnej reprezentacji (napięciowej, ładunkowej lub energetycznej).

Na rysunku H3 przedstawiono schemat blokowy układu do pomiaru energetycznej zdolności rozdzielczej przedwzmacniaczy ładunkowych preferowaną metodą **wielokanałowego analizatora amplitudy impulsów**. Zawiera on obok złożonego wzorcowego źródła impulsów ładunkowych impulsowy wzmacniacz impulsowy z obwodami filtracji sygnału oraz wielokanałowy analizator amplitudy impulsów.



Rys. H3. Zestaw do pomiaru energetycznej zdolności rozdzielczej przedwzmacniaczy ładunkowych metodą wielokanałowego analizatora amplitudy impulsów.

Wyznaczenia energetycznej zdolności rozdzielczej według tej metody dokonuje się w dwóch identycznych procedurach pomiarowych dla dwóch dostatecznie różnych (mieszczących się w rekomendowanym zakresie) amplitud impulsów napięciowych generatora wzorcowego. Dają one w rezultacie parę wzajemnie przesuniętych rozkładów amplitudowych zobrazowanych w „naturalnych współrzędnych” analizatora „R-N” (liczba zliczeń vs. numer kanału). Uzyskiwany efekt pomiarowy nieco przesadnie ilustruje rysunek H4.



Rys. H4. Przykładowe przebiegi spektrogramów rozmycia szumowego dwu ciągów impulsów wzorcowych o różnych amplitudach.

Zauważmy, że numer kanału N_i jednoznacznie określa wartość ładunku Q_i iniekowanego do przedwzmacniacza, a w dalszej konsekwencji odzwierciedla amplitudę V_{Gi} impulsu napięciowego generatora wzorcowego. Możemy więc napisać

$$N_1 = \kappa Q_1 = \kappa (C_0 V_{G1}) \quad \text{oraz} \quad N_2 = \kappa Q_2 = \kappa (C_0 V_{G2}) \quad (\text{H-9})$$

skąd

$$(N_1 - N_2) = \kappa C_0 (V_{G1} - V_{G2}) \quad (\text{H-10})$$

Z takim samym współczynnikiem κ przenoszone jest „rozmycie” szumowe ładunku $\Delta Q_{1/2}$ manifestując się na spektrogramie szerokością połówkową rozkładu $\Delta N_{1/2}$.

$$\Delta N_{1/2} = \kappa \Delta Q_{1/2} \quad (\text{H-11})$$

Kombinacją związków (H-10) i (H-11) prowadzi do formuły opisującej *rozdzielczość ładunkową* przedwzmacniacza.

$$\Delta Q_{1/2} = C_0 \frac{V_{G1} - V_{G2}}{N_1 - N_2} \Delta N_{1/2} \quad (\text{H-12})$$

Poprzez zależność wiążącą ładunek wzbudzony w detektorze z deponowaną w nim energią promieniowania jonizującego z równania (H-12) łatwo uzyskać wyrażenie determinujące *energetyczną zdolność rozdzielczą* przedwzmacniacza. Przyjmuje ono postać ogólną

$$\Delta E_{(1/2)D} \equiv (FWHM)_D = \frac{W_D}{q} C_0 \Delta N_{1/2} \frac{(V_{G2} - V_{G1})}{(N_2 - N_1)} \quad (\text{H-13})$$

w której indeksem „D” zaznaczono odniesienie do rodzaju detektora półprzewodnikowego.

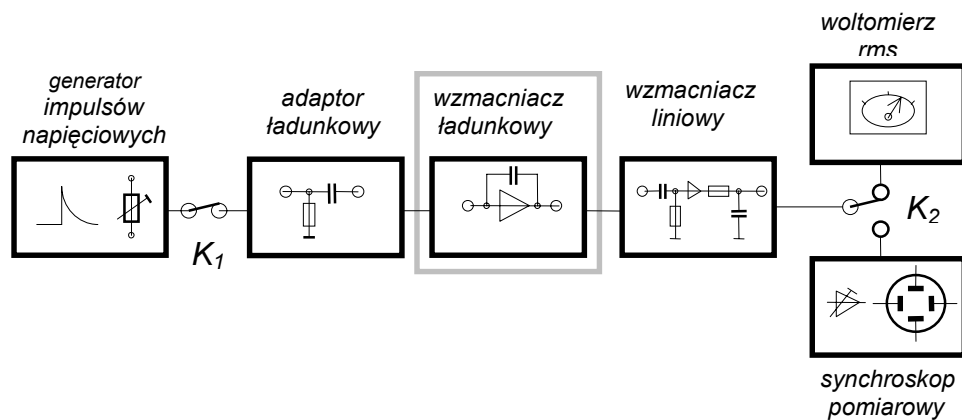
W przypadku detektora krzemowego $(W_{Si}/q) = 2.25 \times 10^{19}$ [eV/C], co przy wyrażaniu amplitud impulsów napięciowych w woltach i rozdzielczości energetycznej w kiloelektronowoltach, prowadzi do szczegółowej zależności

$$(FWHM)_{Si} = 22.5 C_0 \Delta N_{1/2} \frac{\Delta V_G}{\Delta N} \quad (\text{H-14})$$

gdzie ΔV_G oraz ΔN oznaczają skrótowo odpowiednio różnicę napięć i różnicę numerów kanałów przynależnych szczytom obu rozkładów.

Dla zapewnienia zadowalającej dokładności pomiaru zalecenia normalizacyjne IEC ustalają minimalne liczby kanałów przynależnych odpowiednio do odległości wierzchołków rozkładów amplitudowych oraz do ich szerokości połówkowej. Wynoszą one odpowiednio: $\Delta N \geq 50$ kanałów oraz $\Delta N_{1/2} \geq 8$ kanałów. Rekomendacje dotyczą również stałych czasowych filtru górno i dolnoprzepustowego wzmacniacza impulsowego zalecając ich wartości równe $\tau_d = \tau_i = 2.0 \mu\text{s}$.

W drugiej odmianie metodycznej bezpośrednim pomiarem objęte są dwie wielkości: *średnia kwadratowa wartość napięcia szumów* na wyjściu przedwzmacniacza oraz *amplituda odpowiedzi na impulsowe wymuszenie ładunkowe*. Rysunek H5 przedstawia schemat blokowy zestawu aparaturowego umożliwiającego wykonanie wymienionych pomiarów.



Rys. H5. Schemat blokowy zestawu do pomiaru rozmycia szumowego metodą woltmierz wartości średniej kwadratowej i oscyloskopu.

W porównaniu z poprzednią, konfiguracja tego zestawu różni się jedynie w części ściśle pomiarowej, zachowując te same bloki funkcjonalne w stopniu *generacji sygnału wzorcowego* (GENERATOR IMPULSÓW NAPIĘCIOWYCH + ADAPTOR ŁADUNKOWY) oraz w stopniu *kondycjonowania odpowiedzi przedwzmacniacza* (LINIOWY WZMACNIACZ KSZTAŁTUJĄCY). Miejsce wielokanałowego analizatora poprzedniej konfiguracji zajmują obecnie, przełączane alternatywnie kluczem K_2 , WOLTOMIERZ ŚREDNIEJ WARTOŚCI KWADRATOWEJ względnie SYNCHROSKOP POMIAROWY. Zadaniem klucza K_1 jest natomiast odłączanie generatora impulsów wzorcowych podczas pomiaru napięcia szumów. Z założenia metody w niezależnych procedurach pomiarowych dokonywany jest pomiar wartości średniej kwadratowej $(V_{Nrms})_o$ napięcia szumów wyjściowych, oraz pomiar amplitudy (V_o) odpowiedzi układu na wzorcowy impuls ładunkowy.

Rezultat pomiarowy uzyskany w pierwszej procedurze można traktować jako odpowiedź układu na działające na wejściu zaburzenie szumowe. W terminach wielkości równoważnych możemy więc napisać

$$\sigma_{V_o} = \kappa_q (ENC) \quad (H-15)$$

Oznaczony symbolem κ_q współczynnik przenoszenia układu wyznaczany jest w drugiej procedurze pomiarowej. Polega ona na oscylograficznym pomiarze amplitudy impulsu wyjściowego V_o otrzymywanego w odpowiedzi na impuls ładunkowy Q_i o wartości zadanej amplitudą V_G wzorcowego impulsu napięciowego. Wielkości powyższe związane są zależnością:

$$V_o = \kappa_q Q_i = \kappa_q V_G C_0 \quad (H-16)$$

Skojarzenie formuł (H-15) i (H-16) prowadzi do relacji

$$ENC \equiv \sigma_Q = V_G C_0 \frac{\sigma_{V_o}}{V_o} \quad (H-17)$$

z której nie trudno uzyskać wyrażenie na energetyczną zdolność rozdzielczą $(FWHM)_{Si}$.

$$(FWHM)_{Si} = 2.355 \sigma_E = 2.335 \frac{W_{Si}}{q} \sigma_Q = 2.355 \frac{W_{Si}}{q} V_G C_0 \frac{V_{No\ rms}}{V_o} \quad (H-18)$$

Ze względu na praktycznie stosowane poziomy sygnałów wygodniej jest wyrażać amplitudy V_G i $V_{no\ rms}$ w [mV] a impulsu wyjściowego V_o w [V]. Z tych też powodów pojemność szeregową adaptora ładunkowego wyrażana jest w [pF], zaś rozdzielczość energetyczna w [keV]. Przy takich założeniach wzór (H-18) sprowadza się do rutynowo stosowanej postaci

$$(FWHM)_{Si} = 0.053 \frac{C_0 V_G V_{No\ rms}}{V_{o\ max}} \quad (H-19)$$

Materiały źródłowe.

1. International Electrotechnical Commission. Technical Committee No.45.: „Electrical Measuring Instruments Used in Connection with Ionizing Radiation. Draft - *Standard test procedures - Amplifiers and preamplifiers for semiconductor radiation detectors*”. 45 Secretariat 114, October 1967, Central Office of the IEC, Geneva, Switzerland.
2. T.Dąbek, K.Korbel: Spektrometria promieniowania jądowego z wykorzystaniem detektorów półprzewodnikowych. Cz.III. - „Parametry przedwzmacniaczy ładunkowych i metody ich pomiaru”. Raport INT 141/E. Wydział Fizyki i Techniki Jądowej AGH, Kraków, 1979.