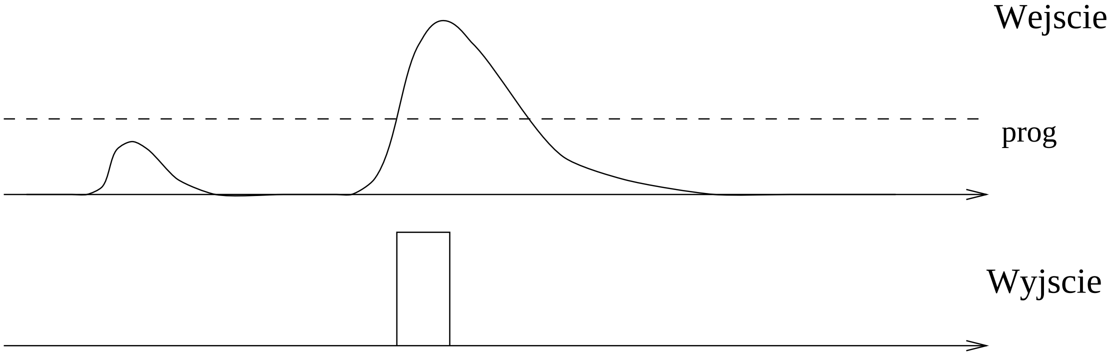
Przetworniki analogowo-cyfrowe

Dyskryminator

Najprostszy przetwornik sygnału analogowego na cyfrowy – generuje sygnał cyfrowy o ustalonej szerokości ilekroć amplituda sygnału analogowego przekroczy pewien ustalony poziom (próg wyzwalania):



Próg i szerokość impulsu cyfrowego są zazwyczaj regulowane.

Zastosowanie: odcinanie słabych pulsów (szumów), układy wyzwalające, pomiar czasu nadejścia impulsu.

Dyskryminatory dzielimy na:

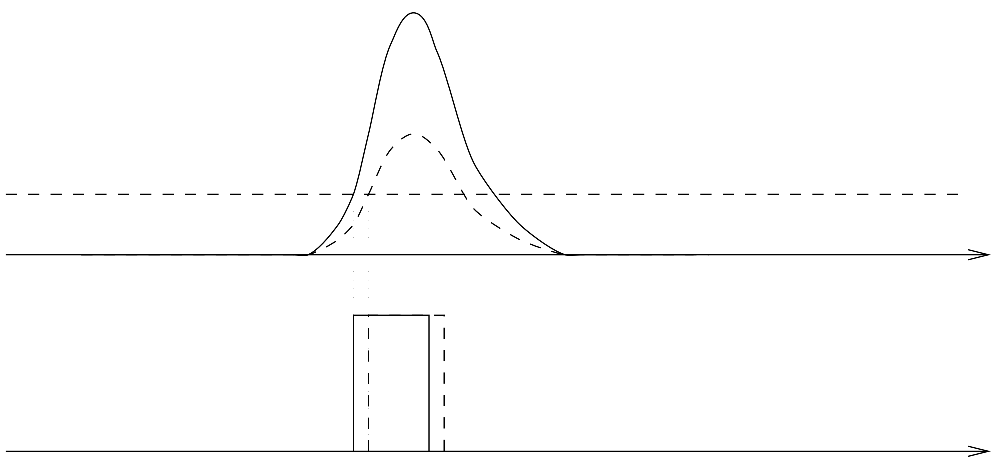
- wyzwalane zboczem (edge-sensitive) – jeżeli wyzwolenie następuje w chwili przekraczania na wejściu poziomu progu
- wyzwalane poziomem (level-sensitive) – jeżeli wyzwolenie następuje zawsze gdy poziom sygnału na wejściu jest powyżej progu.

$\Rightarrow$ częściej używa się dyskryminatorów wyzwalanych zboczem – bo zwykle tego właśnie potrzebujemy.

Istotny parametr dyskryminatora: rozdzielczość czasowa, czyli minimalna odległość między impulsami wejściowymi dla której wygenerowane zostaną osobne impulsy na wyjściu.

- dla szybkich dyskryminatorów może wynosić kilka nanosekund
- oczywiście nie może być krótsza niż szerokość impulsu cyfrowego

Dyskryminatory ze stałym progiem mają problem "wędrówki" pulsu wyjściowego w zależności od amplitudy:

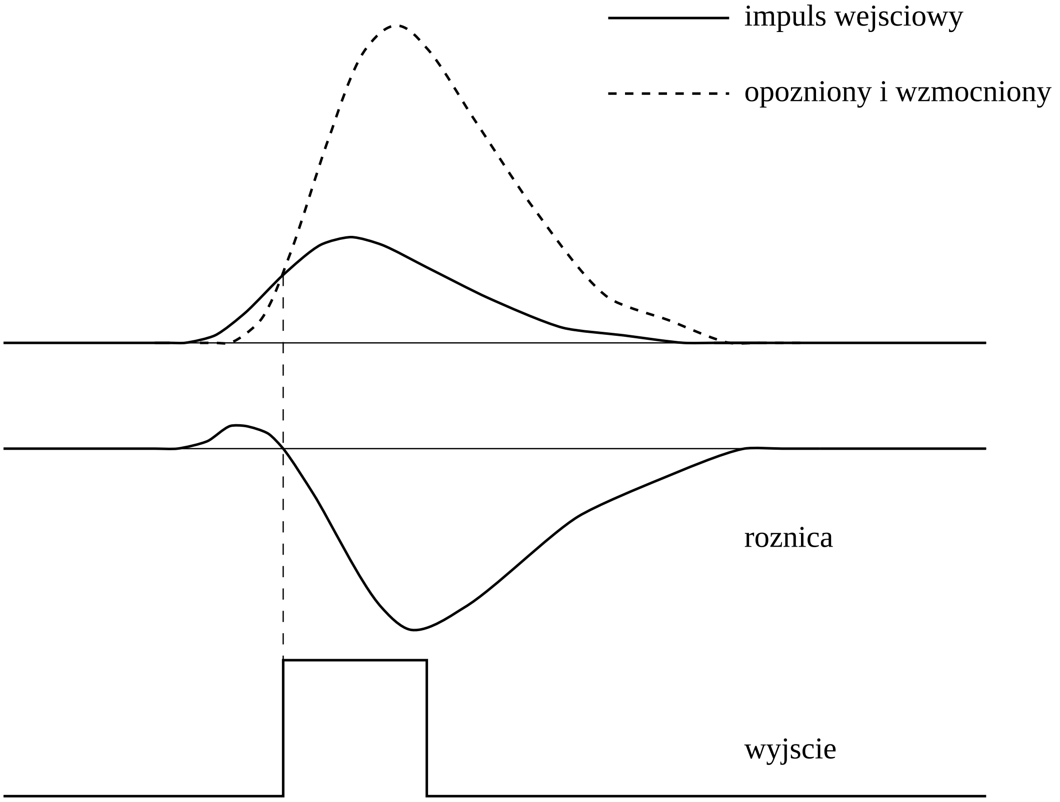


- Bywa istotnym problemem w zastosowaniach wymagających dokładnego pomiaru czasu przyjścia impulsu (np. precyzyjne komory dryfowe).

Problem rozwiązuje **Constant Fraction Discriminator** (CFD) – wyzwalanie następuje w momencie gdy sygnał osiągnie ustalony procent swej amplitudy maksymalnej (zakładamy, że impulsy mają ten sam kształt a różnią się jedynie amplitudą – w praktyce zwykle tak właśnie jest).

$\Rightarrow$ ten prosty w opisie algorytm bardzo trudno zrealizować przy pomocy układów liniowych!

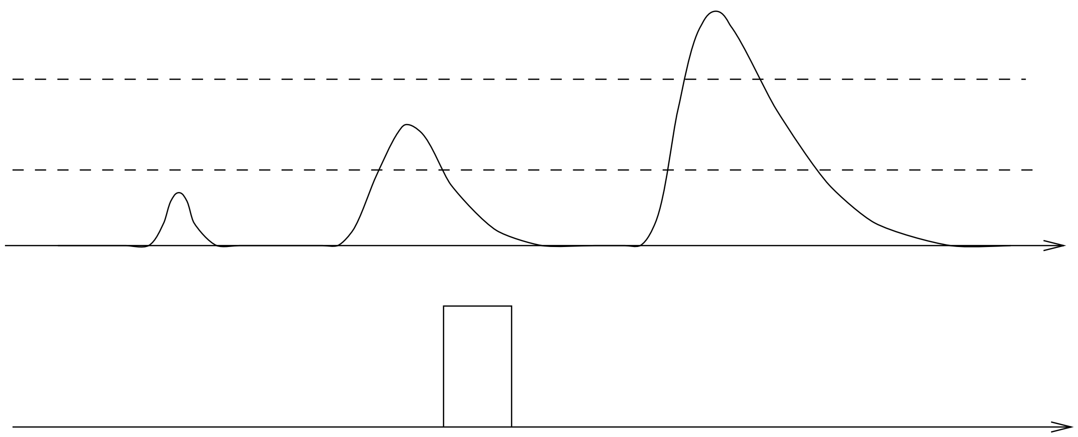
W praktyce CFD jest realizowany zwykle ten sposób, że sygnał wejściowy jest rozdzielany na dwa tory, w jednym z nich jest wzmacniany i nieco opóźniany, a następnie odejmowany od drugiego. Wyzwolenie następuje w chwili gdy różnica, po początkowym wzroście, powróci do zera.



- Działa tylko pod warunkiem, że czas narastania impulsów jest stały i niezależny od amplitudy.
- Przy takim założeniu możliwe jest zredukowanie wędrówki do kilkudziesięciu ps, wobec $\sim$ 10 ns dla standardowego dyskryminatora.

Analizator jednokanałowy

(Single channel analyser, SCA)
Dyskryminator o dwóch progach: minimalnym i maksymalnym. Wyzwolenie następuje tylko dla impulsów których amplituda leży pomiędzy tymi progami:



SCA dostarcza typowo możliwości niezależnej regulacji progów, bądź osobnej regulacji dolnego progu i szerokości "okna".

Podobnie jak w wypadku dyskryminatorów konstruowane są analizatory jednokanałowe z kompensacją "wędrówki" czasowej, do zastosowań wymagających pomiaru czasu.

Przetwornik analogowo-cyfrowy (ADC)

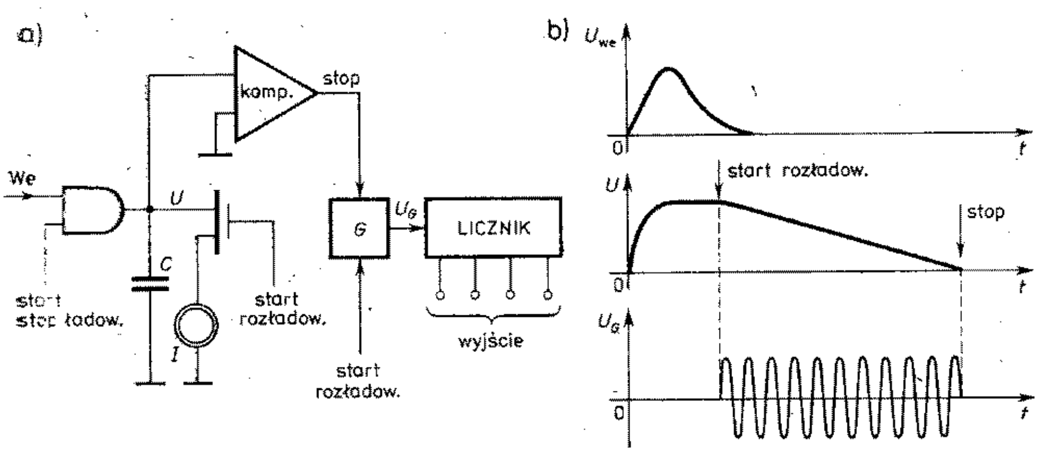
Podstawowy element współczesnego systemu odczytu detektorów. Mierzy parametry sygnału analogowego, zamienia je na postać cyfrową (zakodowaną liczbę).

Typowe ADC ma wejście analogowe dla mierzonego sygnału i wejście cyfrowe (bramkę) definiujące kiedy należy rozpocząć (zakończyć) pomiar. Często wymagane jest też napięcie odniesienia, względem którego dokonywany jest pomiar.

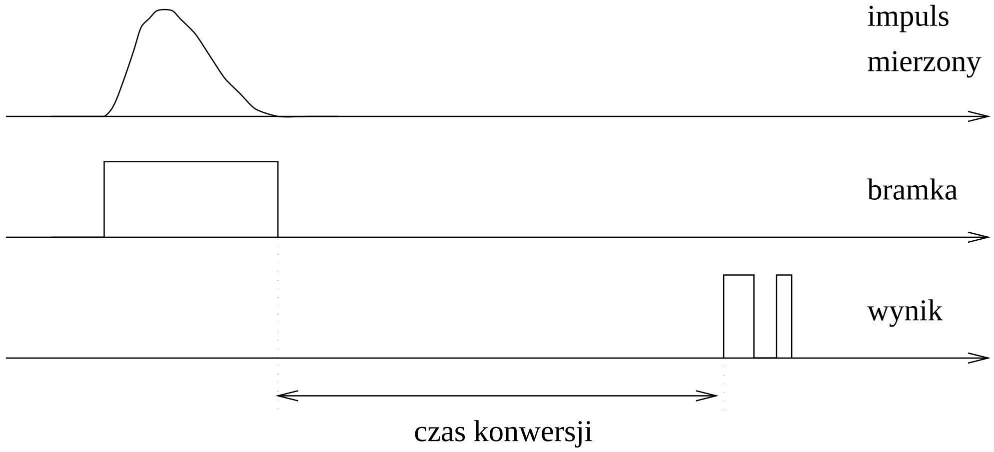
Klasyfikacja ADC ze względu na rodzaj mierzonego parametru:

- ładunkowe – mierzą całkowity ładunek przeniesiony w czasie otwarcia bramki. Najczęściej używane (jako że ładunek jest w wielu detektorach proporcjonalny do straty energii cząstki).
- napięciowe – mierzą chwilową wartość napięcia na wejściu
- "peak-sensing" – mierzą amplitudę impulsu (najwyższą wartość napięcia widzianą w czasie otwarcia bramki).

Większość ADC działa na zasadzie pomiaru czasu ładowania bądź rozładowania kondensatorów stałym prądem:



Metoda daje duża dokładność pomiaru, ale powoduje znaczny czas pomiędzy bramką a uzyskaniem wyniku (czas konwersji). Typowo kilka-kilkanaście μs. Jest to oczywiście czas martwy – nie można w tym czasie zmierzyć innego impulsu:



Niektóre ADC mają w związku z tym dodatkowe wejście *clear* – podanie na nie impulsu powoduje przerwanie rozpoczętego procesu konwersji i natychmiastową gotowość do przyjęcia kolejnego sygnału.

Parametry ADC (na co patrzeć kupując przetwornik):

- zakres wejściowy: jest to największa wartość parametru jaką można zmierzyć;
  - często "dopasowujemy" impuls do wymagań ADC przy pomocy wzmacniaczy lub tłumików.
- rozdzielczość (zakres dynamiczny): ile różnych wartości można zmierzyć w zakresie. Zwykle podawany jako liczba bitów wyniku (ADC najczęściej mają 2^N "kanałów"). Typowe ADC mają od 8 do 12 bitów.
- czas konwersji;

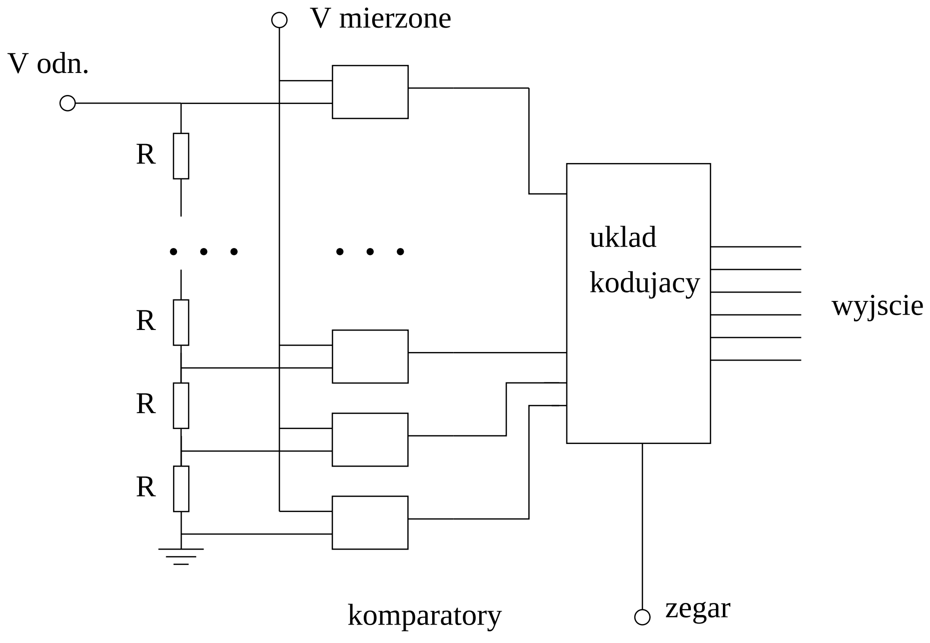
- liniowość:
  - całkowita, czyli maksymalne odchylenie charakterystyki od prostej;
  - różniczkowa, czyli na ile równa jest szerokość kanałów.
- stabilność: jak bardzo kalibracja (przelicznik odczytu ADC na jednostki fizyczne) zmienia sie z czasem i z temperaturą.

Bywa, że mikrosekundowy czas konwersji jest za duży... Wtedy pomaga

Szybkie ADC (FADC)

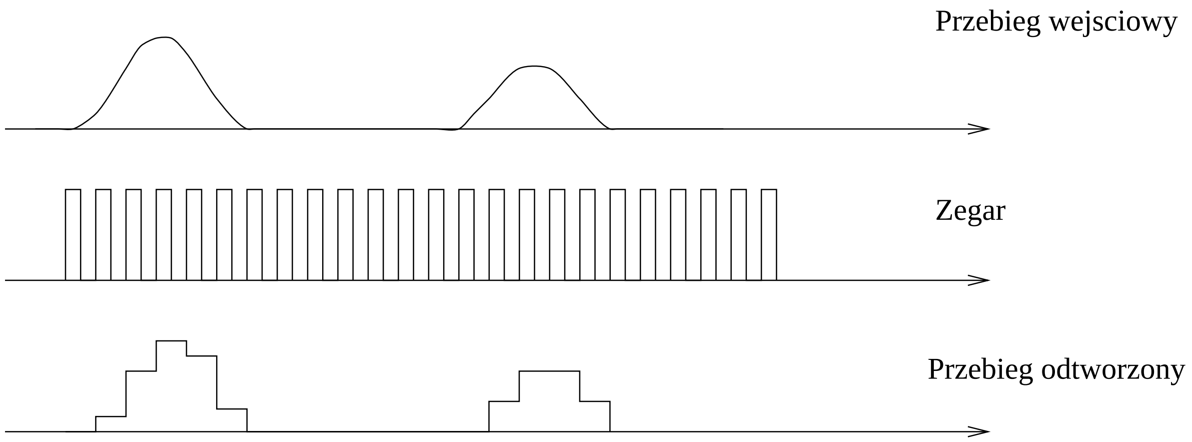
(od Flash ADC)

Zasada działania: napięcie wejściowe jest nieustannie porównywane przez szereg komparatorów z napięciami odniesienia branymi z drabinki identycznych oporników. W chwili zbocza impulsu zegarowego układ kodujący sprawdza ile komparatorów widzi napięcie mierzone wyższe od swojego napięcia odniesienia i koduje tę liczbę cyfrowo



- oczywiście tylko w wersji napięciowej;
- czas konwersji bliski zeru → możliwa bardzo duża częstotliwość próbkowania sygnału (100 MHz i więcej);
- niewielki zakres dynamiczny – cena rośnie bardzo gwałtownie z liczbą komparatorów (podwajaną na każdy bit wyniku). Typowe mają 8 bitów, spotykane 6 do 10;
- dalsza elektronika musi sobie poradzic z takim strumieniem danych!

Stosowane coraz częściej w nowoczesnych detektorach, np. w TPC (Time Projection Chamber). Umożliwia jednoczesny pomiar amplitudy i czasu przyjscia każdego impulsu, w warunkach gdy może przyjść ich wiele bliskich czasowo. Digitizując przebieg napięcia z elektrody możemy zrekonstruować wszystkie:



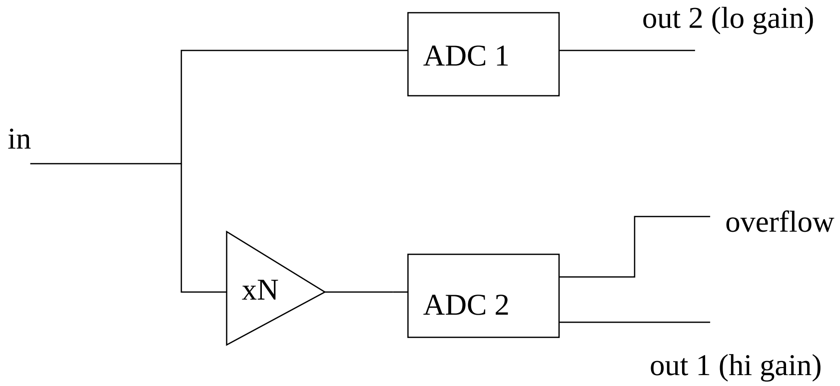
Jeżeli impuls ma dobrze ustalony kształt (rola układów kształtujących) to można zrekonstruować czas przyjścia z dokładnością dużo lepszą niż częstotliwość zegara!

- najłatwiej zrobić to znajdując w ciągu odczytów lokalne maksimum i sprawdzając odczyt przed i za nim. Jeżeli są sobie równe, to znaczy że zegar trafił w maksimum impulsu mierzonego. Jeżeli nie – z różnicy można wyliczyć poprawkę.

- w podobny sposób można poprawić pomiar amplitudy, nawet jeżeli ”nie trafiliśmy” z próbkowaniem w maksimum impulsu.
- przy większej gęstości próbkowania i dobrze określonym kształcie impulsu można stosować precyzyjniejsze algorytmy.

⇒ Jak obejść mały zakres dynamiczny FADC?

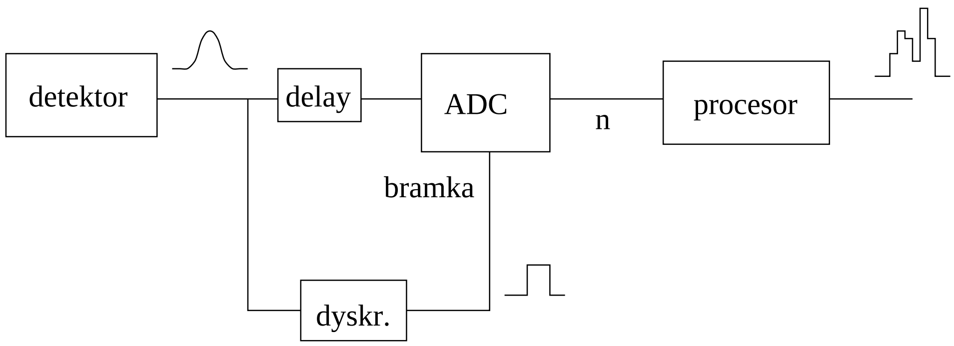
Można zastosować wzmacniacz i dwa przetworniki:



Rozdzielamy sygnał na dwie gałęzie i jeden wzmacniamy (zwykle o czynnik będący potęgą dwójki). Oba podajemy na identyczne przetworniki ADC. Jeżeli sygnał jest słaby – używamy wyniku pomiaru ADC 2 (wzmocnionego). Jeżeli pomiar wyszedł poza jego zakres – używamy odczytu ADC 1.

⇒ Działa tylko jeżeli możemy się pogodzić z utratą dokładności pomiaru dla dużych sygnałów (np. w kalorymetrii).

Przykład zastosowania ADC: **Analizator wielokanałowy** (multichannel analyser):



W istocie jest to tak podstawowy i często stosowany układ pomiarowy, że jest produkowany jako kompletne urządzenie, z wbudowanym regulowanym wzmacniaczem, dyskryminatorem, przetwornikiem, pamięcią na histogram i wyjściem do odczytu komputerowego (a czasami i monitorem).

- jedno z podstawowych narzędzi fizyki jądrowej...
- ... ale i nam zdarza się go użyć.

Przetwornik czas-cyfra (TDC)

Służy (jak sama nazwa wskazuje) do pomiaru czasu przyjścia impulsu. Przetwornik ma zazwyczaj dwa wejścia cyfrowe: START i STOP. Zbocze wznoszące impulsu cyfrowego rozpoczyna (kończy) pomiar czasu. Wynik pomiaru można odczytać, tak jak w wypadku ADC, jako liczbę na wyjściu cyfrowym przetwornika.

Parametry TDC:

- rozdzielczość, czyli długość 'jednostki czasu'. Spotykane są TDC o rozdzielczości od 20 ps do dziesiątków ns.

- zakres, czyli najdłuższy czas jaki można zmierzyć. Równy liczbie kanałów razy rozdzielczość. Liczba kanałów (podobnie jak dla ADC) jest często wyrażana w bitach.

TDC na ogół nie mają dużych problemów z liniowością i stabilnością – pomiary czasu należą do najdokładniejszych w fizyce.

Zasada działania TDC – najprościej sygnałem START uruchomić generator i liczyć impulsy do sygnału STOP. Ale to praktyczne tylko do rozdzielczości rzędu 1 ns. Dla mniejszych rozdzielczości stosuje się dwa generatory o niewielkiej różnicy częstości, jeden uruchamiany sygnałem START, drugi sygnałem STOP. Czas po jakim generatory będą w fazie pozwala wyznaczyć dokładnie czas przyjścia sygnału STOP (zasada noniusza).

Podstawowe zastosowanie: komory dryfowe i detektory czasu przelotu (TOF).

Przetwornik cyfrowo-analogowy (DAC)

Odwrotność ADC: wpisujemy liczbę, na wyjściu dostajemy napięcie proporcjonalne do niej.

Bardzo ważne urządzenie dla cyfrowej techniki audio/video.

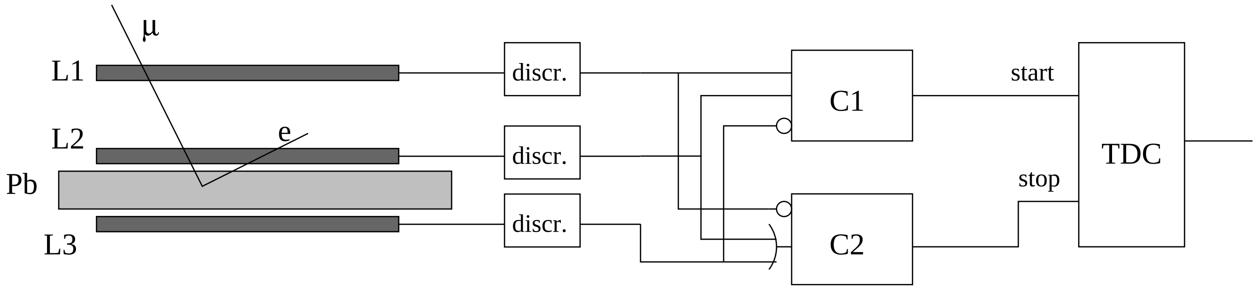
Zastosowanie w technice detektorowej raczej ograniczone, głównie do "zdalnego sterowania" inną elektroniką (np. progami wyzwalania dyskryminatorów). Nie mamy w związku z tym wielkich wymagań odnośnie szybkości urządzenia, istotna jest przede wszystkim stabilność.

Układy cyfrowe

Technika cyfrowa jest bardzo intensywnie wykorzystywana w układach detektorowych. W tej części wykładu przedstawię podstawowe typy prostych modułów cyfrowych.

Układ koincydencyjny

Ma kilka wejść, sygnał na wyjściu jest generowany jeżeli na wszystkich wejściach jednocześnie jest logiczna "1" (czyli jest to bramka AND). Zwykle ma również wejścia antykoincydencji – na wejście bramki AND jest podawane logiczne zaprzeczenie takiego wejścia. Przykład zastosowania: układ do pomiaru czasu życia mionu.



Układy koincydencyjne realizują funkcje:

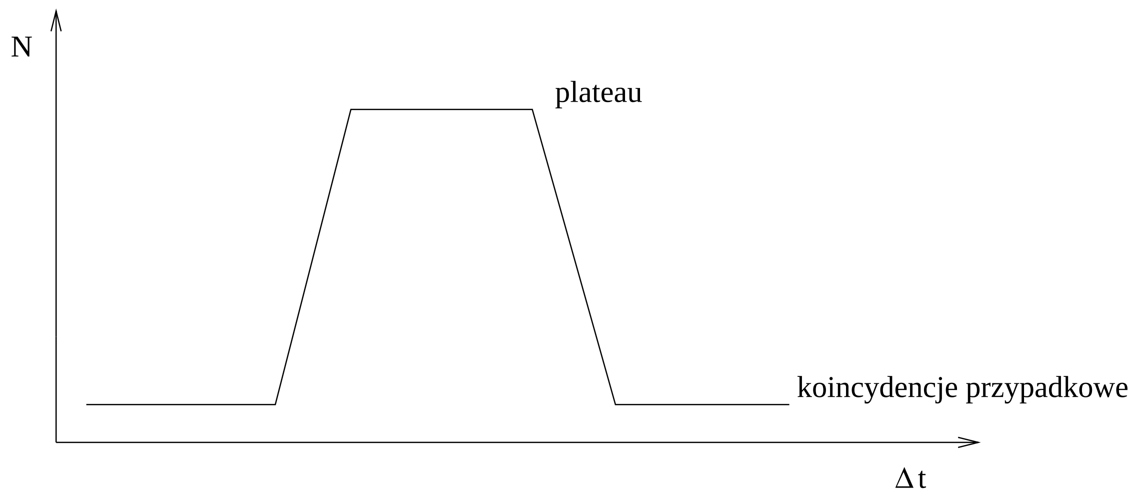
$$C_1 = L_1 \cdot L_2 \cdot \bar{L}_3, \qquad C_2 = \bar{L}_1 \cdot (L_2 + L_3)$$

czyli C_1 daje sygnał gdy cząstka przeszła przez L_1 i L_2 ale nie L_3 (mion kosmiczny zatrzymał się w płycie ołowianej), zaś C_2 da sygnał gdy odezwał się licznik L_2 lub L_3, ale żadna cząstka nie weszła z zewnątrz do układu (L_1 nie zareagował) – czyli cząstka pochodzi z płyty. TDC mierzy czas pomiędzy sygnałem wchodzącego mionu a elektronu z rozpadu.

Używając układów koincydencyjnych, zwłaszcza w dużych lub odległych detektorach, trzeba pamiętać o uwzględnieniu czas przelotu cząstki przez detektor, czasu odpowiedzi detektora i czasu propagacji impulsu po kablu.

$\Rightarrow$ Zwykle trudno jest teoretycznie wyliczyć wszystkie opóźnienia w układzie $\rightarrow$ koincydencję trzeba ustawić doświadczalnie.

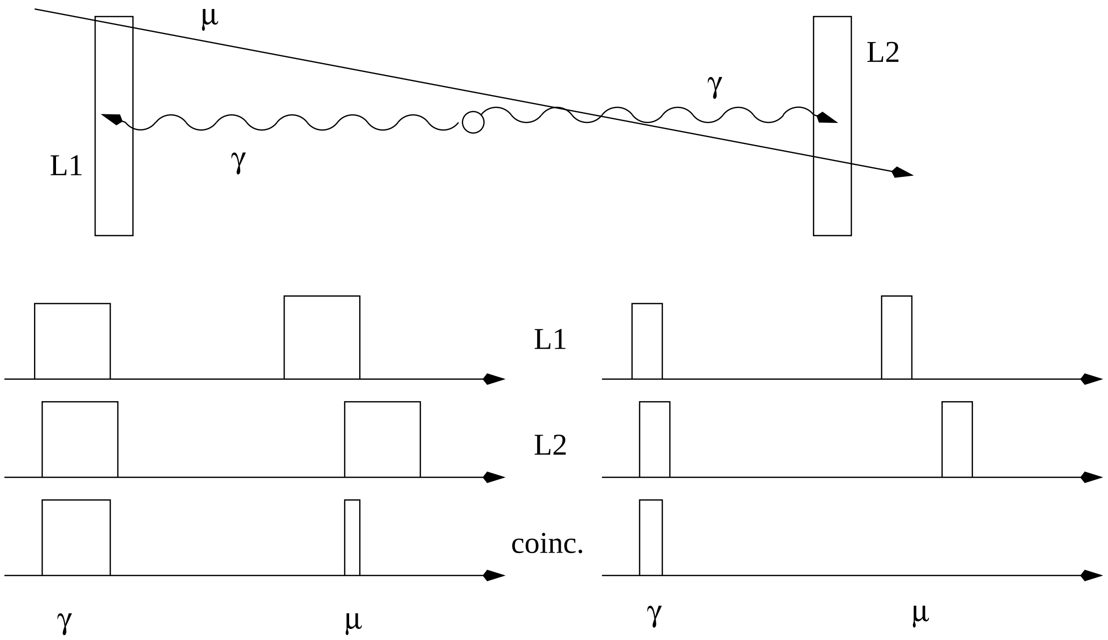
Najlepiej ustalić przybliżone ustawienie na podstawie obliczeń, a potem manipulować względnym opóźnieniem sygnałów, licząc koincydencje. Normalnie dostaniemy krzywą podobną do poniższej:



Optymalne ustawienie opóźnienia jest na środku plateau.

Znaczenie szerokości sygnału: zbyt mała (mniejsza niż rozmycie czasu przyjścia sygnału z detektora) spowoduje, że nie będziemy w stanie zarejestrować wszystkich rzeczywistych koincydencji. Zbyt duża zwiększa poziom koincydencji przypadkowych.

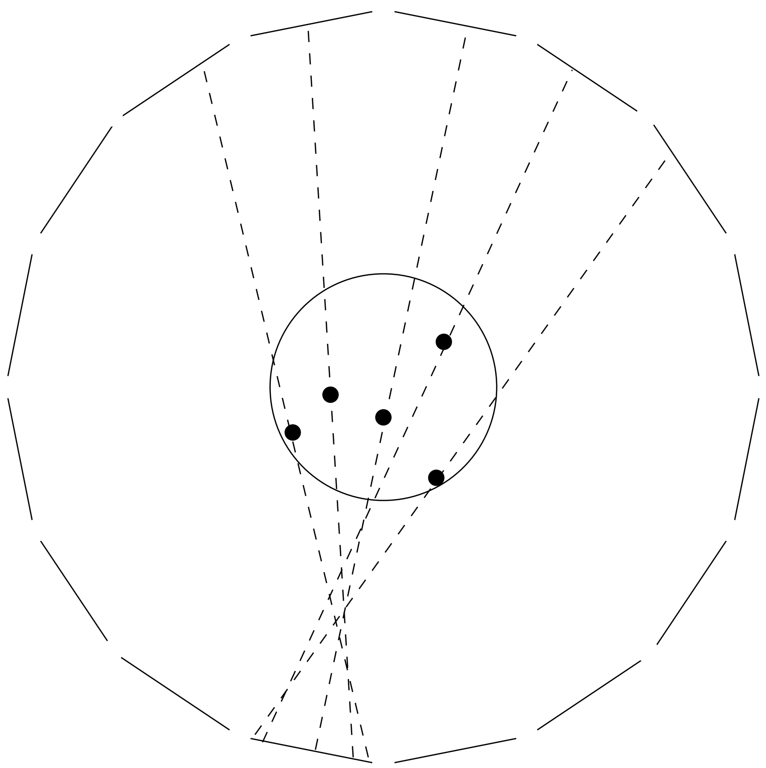
Przykład użycia koincydencji do redukcji tła w eksperymencie – odrzucanie tła kosmicznego:



Czas przelotu mionu (cząstki tła) wynosi kilka ns – taka jest różnica w czasie przyjścia sygnału z detektorów. Dla cząstek pochodzących z oddziaływania w tarczy czas przybycia sygnałów jest niemal równy. Jeżeli tylko czas odpowiedzi detektora jest dostatecznie dobrze ustalony (z dokładnością lepszą niż czas przelotu mionu między detektorami) możemy w ten sposób pozbyć się tła.

Bardziej zaawansowany układ koincydencyjny – **układ większościowy** (majority). Ma n wejść cyfrowych, odpowiedź na wyjściu jest generowana jeżeli dowolne k z nich ma jednocześnie wartość logiczną "1".

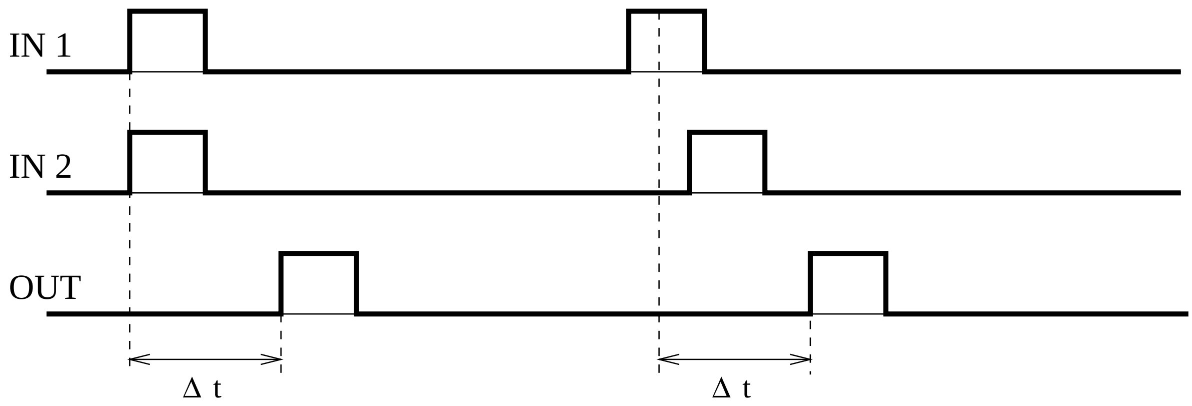
Jeszcze bardziej skomplikowany układ – **macierz koincydencji**. Można wyspecyfikować które kombinacje sygnałów wejściowych wygenerują sygnał na wyjściu. Zastosowanie: w dużych zestawach detekcyjnych do wybierania przypadków o określonej charakterystyce (np. cząstek biegnących w pewnym kierunku)



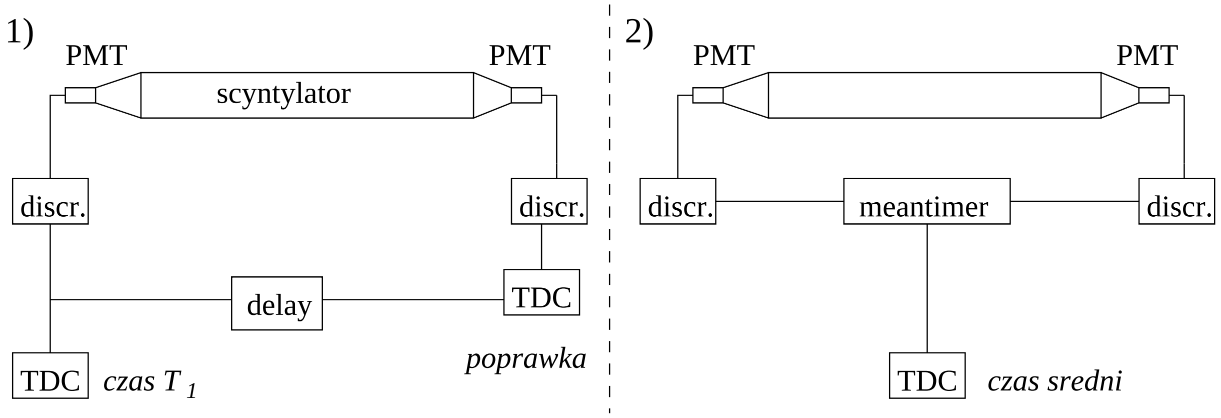
W układzie na rysunku interesują nas produkty rozpadów dwuciałowych zachodzących w obszarze oznaczonym kołem. Widać, że dla danego licznika interesujące są wyłącznie koincydencje z pięcioma "przeciwległymi". Macierz koincydencji pozwala łatwo zrealizować taki układ.

Meantimer.

⇒ Jeszcze jedna wersja układu koincydencyjnego.
Normalne moduły koincydencji generują sygnał wyjściowy w chwili pojawienia się ostatniego sygnału wejściowego. Meantimer generuje impuls w czasie będącym średnią czasów przyjścia impulsów.



Po co to? Przydaje się gdy mierzymy czas przyjścia cząstki używając dużego detektora (czas przelotu sygnału przez detektor jest niezaniedbywalny).



W pierwszym układzie drugie TDC mierzy różnicę czasów przybycia sygnałów, umożliwiając rekonstrukcję punktu trafienia cząstki (a tym samym obliczenie poprawki na czas przebiegu światła przez scyntylator). Jeżeli jednak ta informacja nie jest nam potrzebna, drugi układ jest prostszy i tańszy.

Parametr na który należy zwracać uwagę – zakres, czyli maksymalna dozwolona różnica czasów przyjścia impulsu.

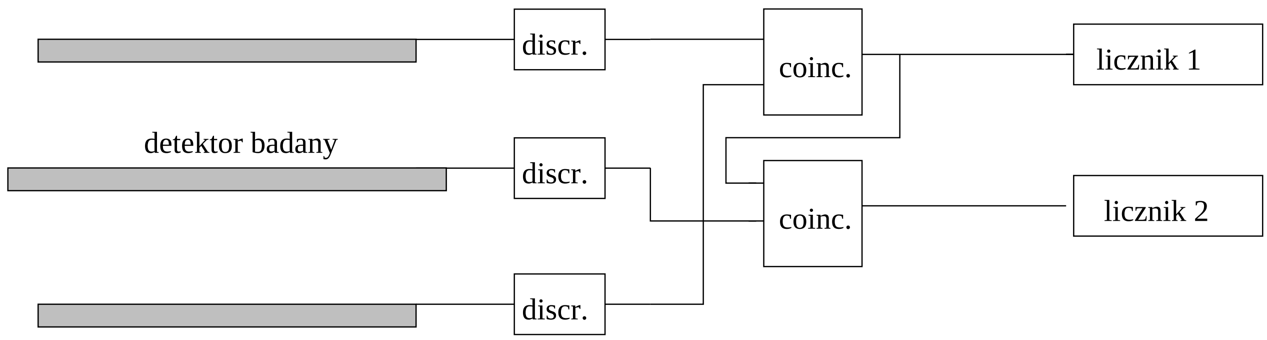
Licznik

Po prostu zlicza nadchodzące impulsy. Liczniki mają zazwyczaj rozmaite funkcje dodatkowe jak:

- dodatkowe wejście bramkujące (liczą tylko wtedy, gdy jest na nim "1");
- generowanie impulsu po osiągnięciu określonej liczby zliczeń;
- możliwość zdalnego kasowania;
- możliwość odczytu komputerem;
- funkcję pomiaru częstości (liczenie przez określony czas);
- ...

Zastosowania – nieomal w każdym "prowizorycznym" układzie eksperymentalnym. Przydaje się też np. do kontroli poziomu tła (czasem nie patrzy się nawet na liczby, tylko jak szybko się liczy...)

Przykład – układ do pomiaru efektywności detektora:



Podstawowe parametry licznika – maksymalna częstość zliczania (impulsów wejściowych) i zakres, czyli maksymalna liczba impulsów jaką można zliczyć. Zwykle tyle, ile okienek ma wyświetlacz.

Generator bramki

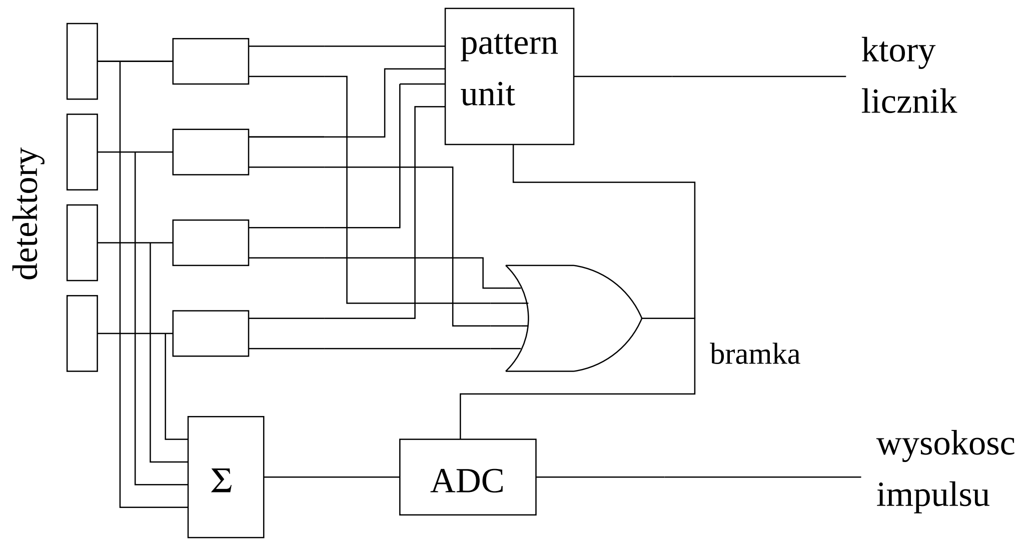
(gate generator)

Układ który w odpowiedzi na impuls wejściowy produkuje impuls wyjściowy o regulowanej szerokości i regulowanym opóźnieniu względem wejścia. Użyteczny gdy trzeba np. wygenerować sygnał bramkujący dla ADC ładunkowego – szerokość bramki ustalamy zgodną z szerokością impulsu. Bywa także używany do takich funkcji jak blokowanie kolejnych impulsów przez określony czas albo "timeout", czyli przerywanie oczekiwania na jakieś zdarzenie.

Rejestr

i różne jego odmiany – np. *pattern unit*. Ma kilka wejść cyfrowych i wejście bramkujące. Stan wejść cyfrowych w momencie przyjścia bramki zostaje zapisany w rejestrze może być odczytany później.

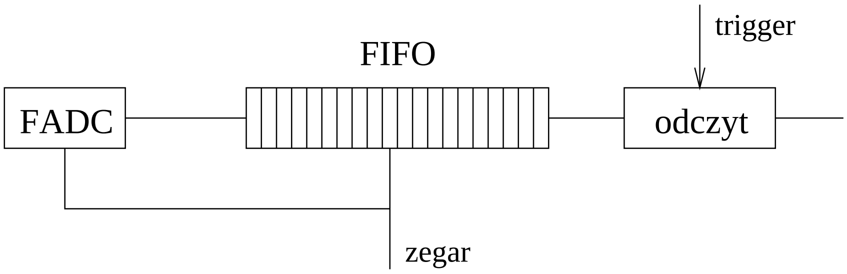
Przykład zastosowania:



Zamiast odrębnego przetwornika dla każdego detektora wykorzystujemy wspólny przetwornik i rejestr mówiący nam który z detektorów zarejestrował impuls.

Szereg rejestrów ustawionych jeden za drugim (wyjście poprzedniego zasila wejście następnego) i sterowanych wspólną bramką daje urządzenie nazwane rejestrem przesuwnym (FIFO). Każdy kolejny impuls bramkujący powoduje przepisanie zawartości każdego rejestru do następnego. Dane z ostatniego rejestru są dostępne do odczytu.

Najciekawsze zastosowanie – cyfrowy *pipeline*, czyli krótkoterminowa pamięć danych cyfrowych (inaczej linia opóźniająca dla danych cyfrowych).



W układzie na rysunku dane z FADC są nieustannie zapisywane do rejestru. Długość rejestru dobrana jest tak, że w momencie przyjścia sygnału uruchamiającego odczyt interesujące dane są przy wyjściu. Dokąd nie ma sygnału wyzwalania dane „wypadające” z rejestru po prostu giną. W chwili gdy on się pojawi – możemy je odczytać.

- Możemy nawet zatrzymać wtedy zegar i spokojnie „przejrzeć” zawartość rejestru podając pojedyńcze impulsy zegarowe i zapamiętując gdzieś kolejne odczytywane wartości.

⇒ alternatywa dla CCD i zwykłych pamięci RAM przy przechowywaniu i opóźnianiu sygnałów cyfrowych.

Konwertery poziomów logicznych

Aby sensownie współpracować ze sobą, moduły cyfrowe muszą zgodzić się na wspólną konwencję rozumienia sygnałów cyfrowych (co to jest logiczne "0" i logiczne "1"). Niestety nie ma jednego standardu dobrego „do wszystkiego".

$\Rightarrow$ konwencja wymuszona do pewnego stopnia technologią układów logicznych.

W powszechnym użyciu są co najmniej 3 konwencje:

1. TTL: "0"=0 V, "1"= +5 V. Odpowiada poziomom logicznym używanym w większości układów scalonych, ale zły do transmisji (nie dopasowany do impedancji typowych linii). Stosuje się tylko na małych odległościach.
2. NIM: "0"=0 mA, "1"= -16 mA (mierzone na 50 Ω). Dobry do transmisji po kablach koncentrycznych, dość szybki.
3. ECL: "0"= -0.9 V, "1"= -1.75 V. Umożliwia najszybszą transmisję nawet po kiepskiej jakości kablach (skrętkach) – za to zużywa znaczną moc.

Bezpośrednie łączenie urządzeń pracujących w różnych standardach nie da oczywiście niczego sensownego. Aby umożliwić dopasowanie istnieją układy do konwersji między tymi standardami
$\Rightarrow$ Zwracać uwagę przy budowaniu systemów!