Elektronika dla detektorów fizyki wysokich energii

„Okiem fizyka”

Plan wykładu:

1. wyjaśnienia i uwagi natury ogólnej;
2. jak wydobyć sygnał z detektora i go przy tym nie zgubić – czyli o elektronice analogowej;
3. jak zrobić z niego coś użytecznego – konwertery i podstawowe elementy cyfrowe;
4. jak nakarmić nim komputer – interfejsy, systemy odczytu;
5. jak szybko pozbyć się danych zbędnych – specjalna elektronika do systemów wyzwalania

Uzasadnienie

Nie ma współczesnego detektora cząstek elementarnych bez rozbudowanego elektronicznego systemu odczytu...

- ...bo praktycznie wszystkie współczesne typy detektorów dostarczają informacji w formie impulsów elektrycznych,
- ...bo ilość informacji z detektora jest tak ogromna, że bez elektornicznego przetwarzania nie da rady,

Ktokolwiek buduje lub użytkuje detektory fizyki wysokich energii nie uniknie bliskiej znajomości z rozmaitymi urządzeniami elektronicznymi.

Elektronika jest trudna, skomplikowana i najlepiej zostawić ją fachowcom.
$\Rightarrow$ należy wynająć najlepszych jakich uda się znaleźć!

Więc po co ten wykład?

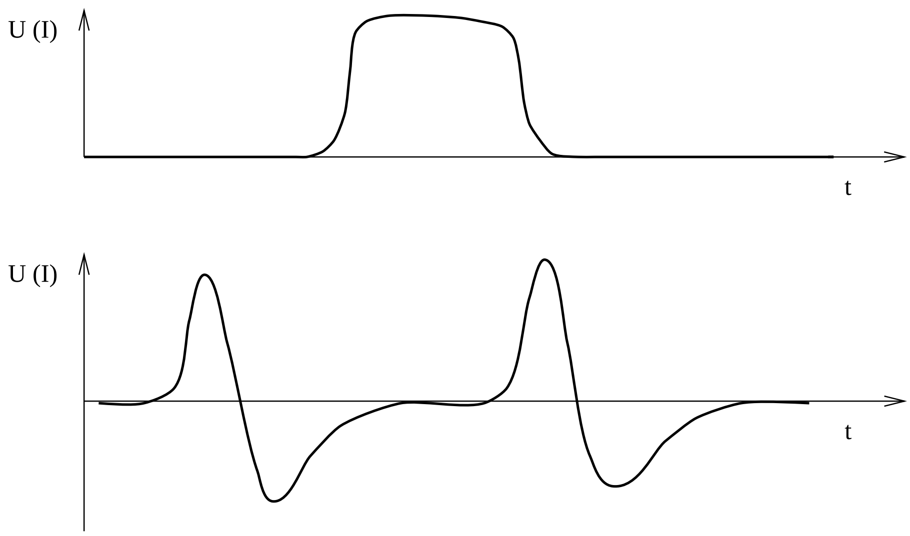
- żeby wiedzieć co się da zrobić i jak to trudne;
- żeby mieć z fachowcem wspólny język;
- żeby nie zawracać fachowcowi głowy drobiazgami.

Reszta wykładu będzie praktycznie przeglądem problemów natury elektronicznej na jakie natrafiamy budując detektory i ich typowych rozwiązań.
Nie będzie to w żadnym wypadku przegląd kompletny – bo i czasu za mało, a poza tym sam nie na wszystkim się znam...

Uwagi ogólne:

W detektorach mamy do czynienia prawie wyłącznie z sygnałami impulsowymi (w odróżnieniu od techniki radiowej czy audio z przebiegami ciągłymi).

Przykłady przebiegów impulsowych:



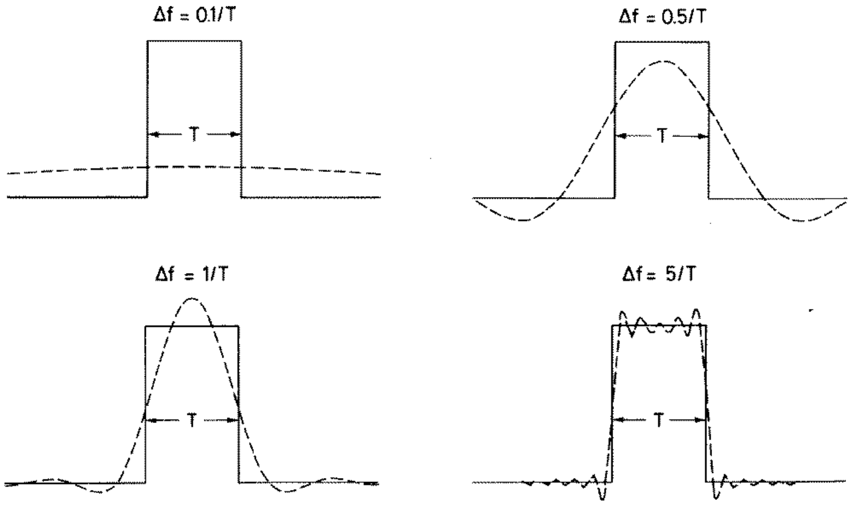
Typowe czasy trwania impulsów – od nanosekund do dziesiątków mikrosekund. Odstępy między impulsami są nieregularne.

Własności liniowych układów elektronicznych są dobrze określone dla przebiegów sinusoidalnych – do badania zachowania układu dla dowolnego przebiegu stosujemy transformacje Fouriera.

W rozkładzie fourierowskim przebiegu impulsowego występują częstotliwości od bliskich zeru, do znacznie powyżej odwrotności czasu trwania impulsu.

W praktyce każdy układ elektroniczny ma jakieś górne ograniczenie przenoszonych częstotliwości (”pasmo przenoszenia”).

Efekt ograniczonego od góry pasma przenoszenia elektroniki:



⇒ Aby uniknąć zniekształceń konieczne jest szerokie pasmo przenoszenia (nawet do kilkuset MHz).

- Szczególnie duża szerokość pasma jest potrzebna jeżeli zależy nam na zachowaniu kształtu impulsu.

⇒*Nie takie proste!*

Podział impulsów:

1. analogowe: nośnikiem informacji jest pewien ciągły parametr impulsu (amplituda, kształt, czas trwania...), każda wartość parametru z pewnego przedziału jest dopuszczalna.

2. cyfrowe: parametry impulsu mogą przyjmować wartości z pewnego skończonego, dyskretnego ich zbioru (zazwyczaj dwie dopuszczalne wartości – impuls binarny).

Impuls analogowy niesie więcej informacji niż cyfrowy, ale jest bardziej podatny na zakłócenia (szumy, zniekształcenia) niszczące zawartość informacyjną.

Impuls cyfrowy jest mało wrażliwy na tego typu zakłócenia (daje się odtworzyć nawet po znacznym zniekształceniu). Zawartość informacyjną można zwiększyć kodując liczby jako ciągi impulsów, przesyłane równolegle bądź szeregowo.

Gwałtowny rozwój technologii cyfrowej w ostatnich latach – możemy skorzystać w obróbce, wizualizacji i zapisie sygnałów.
$\Rightarrow$ chętniej operujemy impulsami cyfrowymi.

Większość detektorów dostarcza impulsu analogowego (są wyjątki – np. licznik GM) $\rightarrow$ sygnał musi być poddany digitalizacji (zamianie istotnych parametrów na postać cyfrową).

W konsekwencji podział elektroniki na:

1. analogową (liniową) – przetwarza impulsy analogowe (wzmacniacze, bramki liniowe, układy kształtujące...)
2. cyfrową – operuje impulsami bądź ciągami impulsów cyfrowych (bramki logiczne, układy koincydencyjne, liczniki, procesory...)
3. konwertery analogowo-cyfrowe (dyskryminatory, ADC, TDC, DAC...)

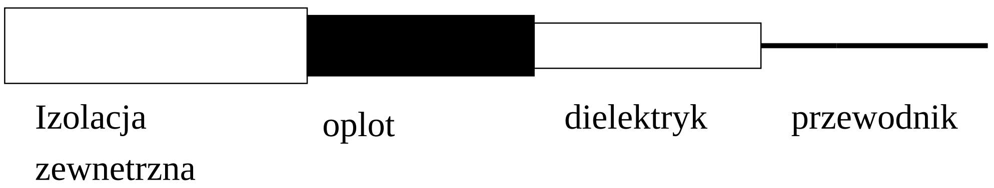
Transmisja sygnałów

Praktycznie w każdym eksperymencie pojawia się potrzeba transmisji sygnałów elektrycznych na mniejsze lub większe odległości.
$\Rightarrow$ *Tylko pozornie proste!*

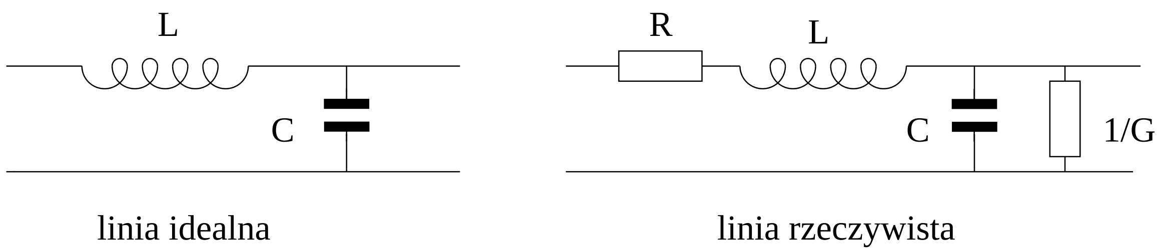
Analizą propagacji sygnałów w kablach zajmuje się się teoria linii transmisyjnych.

Idealna linia transmisyjna – para idealnych, równoległych przewodników (ustalona geometria)

- Przykład – często stosowane kable koncentryczne: jeden przewodnik w formie okrągłego drutu, drugi w formie cylindra (zwykle oplotu), umieszczone współosiowo.



Obwód zastępczy odcinka linii przesyłowej:



L – samoindukcja
C – pojemność
R – oporność przewodników
G – przewodnictwo dielektryka
Wszystkie wielkości na jednostkę długości kabla.

Łatwo udowodnić, rozwiązując odpowiednie równania dla powyższego obwodu zastępczego (patrz "Wstęp do fizyki", II rok), że w idealnym kablu impuls propaguje się bez strat i zniekształceń z prędkością grupową

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Dla kabla koncentrycznego $LC = \epsilon\epsilon_0\mu\mu_0$. Typowo $v \approx 0.2$ m/ns (nie c!)

- Kable czasami dostarczane są w odcinkach o zdefiniowanym czasie propagacji impulsu – np. 1 ns czy 5 ns (około metr).

Inna ważna wielkość dla linii transmisyjnej to impedancja charakterystyczna

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Z nie zależy od długości kabla, a tylko od jego geometrii. Dla kabla koncentrycznego:

$$Z \approx 60\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}\ln\frac{b}{a}\ [\Omega]$$

W praktyce najczęściej używa się kabli o $Z = 50\,\Omega$. (nie mamy, jak widać, zbyt dużego wyboru!)

Znaczenie fizyczne Z – jest to "opór falowy". Ma znaczenie dla tego co się dzieje na końcu kabla:

- Jeżeli obciążymy kabel na końcu oporem omowym o wartości równej Z, to wówczas sygnał zostanie całkowicie pochłonięty w tym oporniku.

- w przeciwnym wypadku powstanie sygnał odbity wędrujący w strone nadajnika. Współczynnik odbicia:

$$\frac{U_{odb}}{U_0} = \rho = \frac{R-Z}{R+Z}$$

- w rezultacie odbicia tracimy część energii sygnału, mogą się też pojawić zniekształcenia.

⇒ Trzeba znać Z linii i odpowiednia ją obciążać (”terminować”) dołączając oporniki (szeregowo lub równolegle) aby oporność odbiornika i nadajnika dopasować do impedancji linii.

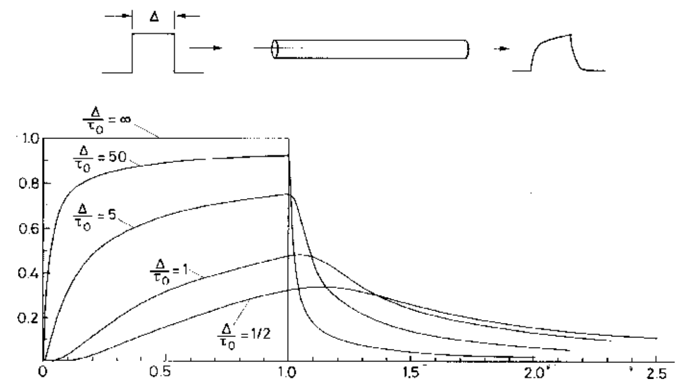
- Pamiętać przy doborze elektroniki...
- ...a zwłaszcza przy oglądaniu impulsów na oscyloskopie! (oscyloskop ma zazwyczaj bardzo dużą oporność wejściową).

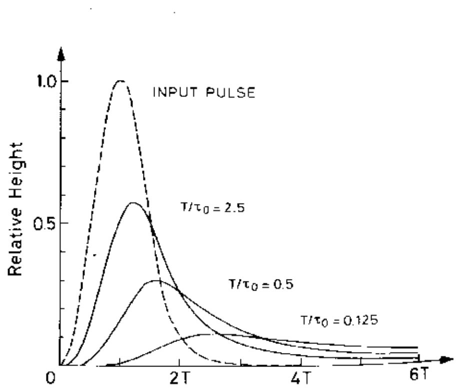
To wszystko było dla idealnego kabla. Co z kablem rzeczywistym?

- Rozwiązanie ma postać fali biegnącej o amplitudzie malejącej eksponencjalnie z odległością – straty sygnału na oporności omowej
  - straty mocy istotne na odległościach rzędu kilkudziesięciu metrów
- Współczynnik tłumienia zależy od częstości
  - schemat zastępczy kabla jest schematem filtra dolnoprzepustowego – wyższe częstości są silniej tłumione
  - R i G rosną z częstością (naskórkowość, straty na zmianę polaryzacji dielektryka).

Zależność od częstości powoduje zniekształcenia impulsu, bo poszczególne składowe fourierowskie są w różnym stopniu tłumione, a także dlatego, że względne fazy poszczególnych składowych mogą ulegać zmianie.

Zniekształcenie to rośnie z długością kabla – czas charakterystyczny $\tau_0 \sim l^2$. Przykład efektu w odniesieniu do impulsu prostokątnego i typowego impulsu z fotopowielacza:





Wszelkie problemy, jak widać, rosną gwałtownie z długością kabla

⇒ Unikać długich kabli (ustawiać elektronikę blisko detektora).

⇒ Jeżeli się nie da – przesyłać długie, wolnozmienne pulsy, odpowiednio je wzmocnić przed transmisją, unikać kodowania informacji kształtem impulsu.

Łączenie kabli koncentrycznych

Cała powyższa teoria działa dla kabli jednorodnych. Niestarannie wykonane połączenie kabli będzie punktem niejednorodności – źródłem odbić i strat.

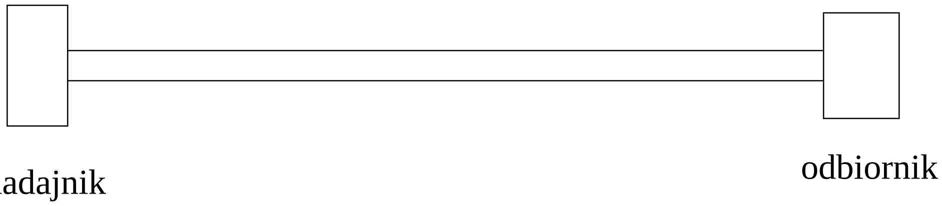
Istnieje kilka standardów złącz kabli koncentrycznych – zależnie od rodzaju kabla (najbardziej popularne – BNC i LEMO). Zapewniają elektrycznie jednorodne połączenie, łatwość rozłączania, zabezpieczenie przed przypadkowym rozłączeniem.

Warto inwestować w staranność przy wykonywaniu połączeń!

Kabel koncentryczny jest doskonałym wynalazkiem, ale ma swoje wady...

- grubość (najcieńsze mają 1.5 mm średnicy, typowe - 2–3 mm);
- cena.

Czy można wykorzystać tańszą linię z dwóch równoległych drutów? O, np. tak:

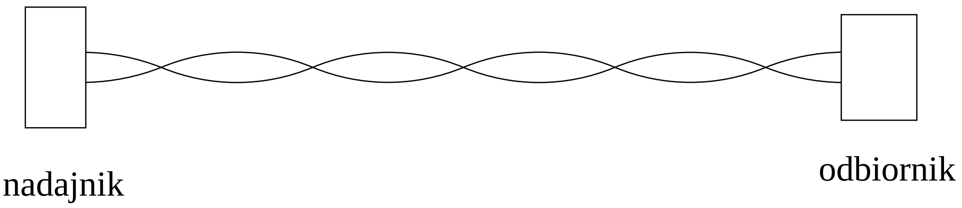


Podstawowe problemy

- tłumienie sygnału na skutek strat energii na promieniowanie;
- zakłócenia od zewnętrznych pól E-M. Przede wszystkim od zmiennego pola magnetycznego (indukcja) – np. od sąsiednich kabli...

Można próbować ratować się ekranowaniem (czyli zamykaniem kabla w metalowym oplocie) – ale tracimy część zalet w stosunku do kabla koncentrycznego.

Inny pomysł: przed podłączeniem zakręcić troche kable, o tak:



Co to daje?

Jak długo skok skręcenia jest mniejszy od przestrzennej niejednorodności pola magnetycznego, efekty indukcji dla kolejnych zwojów się znoszą. Także emisja dużo słabsza (interferencja destruktywna pomiędzy kolejnymi zwojami).

To jest idea kabla skręconego ("skrętka", twisted pair). Występuje w wersji nieekranowanej (UTP) i ekranowanej (STP) – w tym ostatnim przypadku zwykle wiele par w jednym ekranie.

Parametry skrętki są typowo gorsze niż kabla koncentrycznego (gorsza jednorodność, węższe pasmo, kiepsko określona impedancja) – stosowana więc głównie do transmisji sygnałów cyfrowych.

- Wymagania odnośnie szybkości transmisji cyfrowej można zmniejszyć stosując transmisję równoległą – czyli przesyłając jednocześnie wiele impulsów wieloma równoległymi kablami.

Jeżeli długość kabla robi się naprawde duża
(setki metrów)

wtedy warto rozważyć możliwość transmisji optycznej – kablem światłowodowym.

- drożej od kabli miedzianych;
- praktycznie tylko impulsy cyfrowe (ale analogowych i tak nikt na takie odległości nie przesyła...)
- trudniejsza technologia
  - łączenie kabli swiatłowodowych (specjalne wtyczki);
  - "optocouplery" na końcach;
  - prowadzenie kabli optycznych
- ale mniejsze problemy z tłumieniem i częstością graniczną.

Kabel optyczny może się opłacać w sytuacji gdy może zastąpić wiele kabli miedzianych, albo gdy transmisja po kablu miedzianym nie byłaby możliwa bez dodatkowych wzmacniaczy "po drodze".

Kable wysokonapięciowe

Wiele detektorów wymaga zasilania wysokim napięciem (kilkaset V do kilkunastu kV). Parametry przenoszenia w tym wypadku nieistotne – najważniejsze jest bezpieczeństwo.

Najczęstszy wybór – wysokonapięciowy kabel koncentryczny z uziemionym oplotem. Podstawowy parametr – napięcie przebicia.

Dlaczego kabel koncentryczny?

- przewodnik z wysokim napięciem jest otoczony ze wszystkich stron grubą warstwą dielektryka
- ewentualne przebicia są do oplotu kabla, a nie w niekontrolowany sposób do otoczenia
- niewielkie uszkodzenia nie powodują odsłonięcia przewodu pod napięciem.

Również specjalne wtyczki wysokonapięciowe – odporne na przebicia (i nie do pomylenia z innymi!)

Uziemienie i ekranowanie

Rola uziemienia jest potrójna:

- "Ziemia" (0V) bywa wspólnym poziomem odniesienia w obwodach elektronicznych;
- ekranowanie, czyli ochrona przed wpływem zewnętrznych pól E-M przez zamykanie urządzeń i kabli w metalowych obudowach utrzymywanych na stałym potencjale 0V;
- względy bezpieczeństwa: w urządzeniach używających wysokich napięć lub prądów wszelkie dostępne z zewnątrz elementy metalowe powinny być uziemiane.

Teoretycznie proste: podłączyć wszystkie punkty uziemienia ze sobą i z uziemieniem danym przez istalację elektryczną.

⇒ W praktyce duży ból głowy, zwąszcza przy zestawianiu dużych układów eksperymentalnych!

Zwykle uziemienie dostajemy wraz z instalacją elektryczną. Taka 'ziemia' potrafi zmieniać się od punktu do punktu.

Prądy płynące z jakichkolwiek powodów przez uziemienia w obrębie układu będą powodowały różnicę potencjałów.

Jak sobie radzić?

- Unikać zamykania dużych pętli uziemienia – pole magnetyczne przez efekt indukcji będzie wywoływało przepływ dużych prądów.
- Unikać transmitowania poziomu ziemi na duże odległości (np. ekrany długich kabli powinny być uziemione tylko w jednym punkcie).
- Odróżniać "ziemie ochronną" (ekrany, obudowy) od "ziemi sygnałowej" (względem której mierzymy napięcia sygnałów).

- Stosować transmisję różnicową, zwłaszcza przy większych odległościach.
- Starannie łączyć ekrany z punktami uziemienia grubymi przewodami.
- Poprosić o pomoc fachowców.

Zasilacze

Właściwie mało "elektroniczny" temat – ale warto pamiętać, że bez zasilania nie nie zadziała ani elektronika ani detektor...
Z gniazdka dostajemy 220V (380V) prądu zmiennego – najczęściej potrzeba nam czegoś innego:

- do większości detektorów: wysokiego napięcia stałego, małej mocy (niewielki prąd).
- do elektroniki: prądu stałego o niskim napięciu (typowo 3..12 V) i stosunkowo dużej mocy;

Zasilacze wysokiego napięcia:

Zadanie: dostarczyć stabilnego, regulowanego napięcia w zakresie do kilku (kilkunastu) kV. Typowy maksymalny prąd – do mA.

W ramach tego zadania dostępne są najrozmaitsze konstrukcje: od najprostszych (pokrętło, wskazówka) do wielokanałowych, sterowanych mikroprocesorem „kombajnów". Te ostatnie miewają rozbudowane dodatkowe funkcje:

- stabilizacja napięcia na ustawionym poziomie;
- pomiar prądu i napięcia, komputerowy odczyt wartości;
- programowane limity prądów i reakcja zasilacza na osiągnięcie limitu;

- programowalne procedury podnoszenia i opuszczania napięcia;
- alarmy w razie przekroczenia parametrów;
- wejścia i wyjścia na sygnał interlocku;
- ...

Przydatne zwłaszcza w wielkich eksperymentach, gdzie zasilaczy jest mnóstwo (”same się pilnują”).

Najważniejsze parametry: zakres napięć, maksymalny prąd (pamiętać o pojemności detektora!) i stabilność.

Zasilacze niskiego napięcia:

Na ogół dużo mniejszy problem, bo mniejsze wymagania (nie potrzeba ciągłej regulacji, specjalnych procedur podnoszenia i opuszczania napięcia itp).
Dlatego typowo są to znacznie prostsze i ”głupsze” urządzenia od zasilaczy HV – chociaż do specjalnych zastosowań można dostać i całkiem inteligentne.

Na co patrzeć dobierając zasilacze:

- napięcie (uwzględnić spadki napięcia na kablach!);
- moc;
- poziom zakłóceń (składowej zmiennej napięcia);
- stabilność napięcia wyjściowego (w funkcji czasu, napięcia zasilania i obciążenia zasilacza).

$\Rightarrow$ Pamiętać o chłodzeniu! Samych zasilaczy, a jeżeli zamykamy odbiorniki w ciasnych miejscach – to także i ich.

Elektronika analogowa

Linia opóźniająca

Najprostszy element analogowy, służy opóźnieniu sygnału np. dla wyrównania czasów przybycia z różnych detektorów albo w oczekiwaniu na decyzję układu wyzwalającego. Stosowana też jako element bardziej skomplikowanych układów.

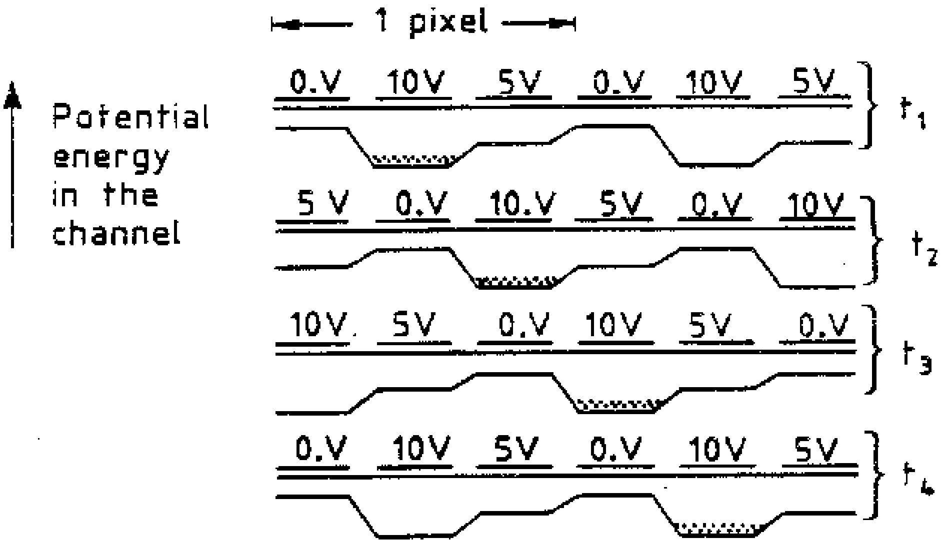
Zwykle implementowana jako odcinek dobrej jakości kabla. Ze względu na tłumienie rozwiązanie praktyczne do ok. 100 ns.

Uzyskanie większych opóźnień dużo trudniejsze! Można stosować aktywne układy (kaskady wolnych wzmacniaczy). Inną możliwością jest zastosowanie układów „pamięci analogowej”: np. urządzeń CCD.

Co to takiego to CCD?

duża dioda półprzewodnikowa, której jedna z elektrod ma formę szeregu równoległych pasków. Polaryzując ją w kierunku zaporowym i podając na kolejne paski naprzemienne napięcia wytwarzamy w krzemie szereg "dołków potencjału" w których może zbierać się ładunek.

Zmieniając potencjał pasków można „przesuwać” uwięziony w dołkach ładunek wzdłuż urządzenia, z żądaną prędkością:



W zastosowaniu jako pamięci analogowej: wstrzykujemy ładunek do "zapamiętania" z jednej strony, po odpowiednim czasie znajdziemy go na drugim końcu kryształu.

⇒ Jeżeli w międzyczasie stwierdzimy, że wydarzyło się coś godnego szczególnej uwagi, to można nawet dostać „replay" przypadku – zwalniając zegar! Bardzo cenne przy współczesnych akceleratorach, z ich ogromną częstotliwością przecięć.

Ale nic za darmo... nie przechowamy tą metodą ciągłego przebiegu, tylko wartści średnie w pewnych przedziałach czasowych.

Inne podobne rozwiązanie – szereg identycznych kondensatorków ładowanych po kolei impulsem wejściowym (wykonanie w formie układu scalonego)

Jeszcze jedna metoda uzyskania dużych opóźnień: zamiana sygnału na falę akustyczną w ciele stałym. Stosowane w technice telewizyjnej – ale może komuś się kiedyś przyda!

Wzmacniacz

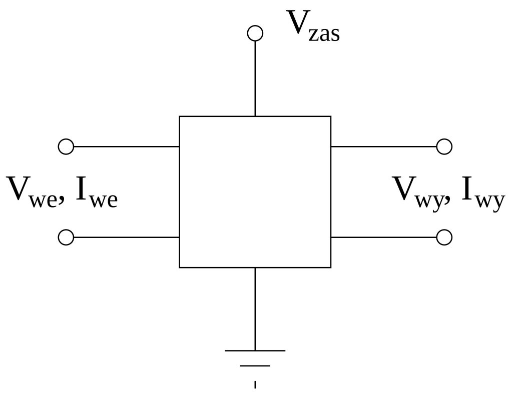
Podstawowy element elektroniki analogowej. Stosowany jest m. in. aby:

- wzmocnić słaby sygnał z detektora
- dopasować sygnał do impedancji linii (oporność wyjściowa detektora zwykle nie jest dopasowana)
- zwiększyć obciążalność układu i umożliwić rozesłanie sygnału do wielu odbiorników
- ukształtować sygnał w zależności od potrzeb (dla obniżenia wpływu szumów, uwypuklenia pewnych charakterystyk, zmniejszenia ryzyka nałożenia się sygnałów...)
- wykonać proste operacje na sygnałach analogowych (np. sumowanie).

Obecnie stosowane są wyłącznie wzmacniacze półprzewodnikowe, dzielone w zależności od technologii na:

- tranzystorowe
- scalone (wzmacniacze operacyjne)
- hybrydowe

Operacyjnie możemy traktować wzmacniacz jak czarną skrzynkę:



Normalnie pomiędzy V_{we} i I_{we} (a także V_{wy} i I_{wy}) istnieje zależność liniowa (opór wejściowy, opór wyjściowy). Ale niekoniecznie – dodanie elementów takich jak np. pojemności może wprowadzić inne zależności (patrz kształtowanie).

Zwykle zależność między V_{we} a V_{wy} jest także liniowa – przynajmniej w pewnym zakresie napięć. Oczywiście napięcie wyjściowe wzmacniacza nie może być dowolnie duże (limitem jest napięcie zasilania) – przy dużych wzmocnieniach mamy efekt nasycenia, czyli stałe napięcie wyjściowe gdy napięcie na wejściu przekroczy próg nasycenia.

Parametry wzmacniaczy:

- oporność wejściowa. W zależności od niej wzmacniacze dzielą się na:
  - prądowe (mała oporność wejściowa, prąd na wejściu steruje wyjściem)
  - napięciowe (duża oporność wejściowa, napięcie na wejściu steruje wyjściem).
- oporność wyjściowa;
- wzmocnienie (napięciowe, prądowe);
- pasmo przenoszenia (obszar w którym wzmocnienie nie zależy od częstości sygnału sinusoidalnego);
- poziom szumu (wielkość sygnału wyjściowego przy braku sygnału wejściowego – zwykle interesuje nas najniższy sygnał wejściowy dający się na wyjściu odróżnić od szumu);

- zakres dynamiczny – stosunek największego sygnału dla którego wzmacniacz daje jeszcze liniową odpowiedź do najmniejszego wykrywalnego. Istotna jest zgodność ze spodziewanym zakresem wysokości impulsów z detektora;
- faza sygnału wyjściowego (zgodna lub odwrócona);
- „biegunowość" – wzmacniacz może wzmacniać tylko sygnały o tym samym znaku amplitudy (dodatnie bądź ujemne), albo może być „bipolarny", działający niezależnie od znaku amplitudy.

Czasem wyróżnia się jeszcze wzmacniacze ładunkowe – są to po prostu wzmacniacze napięciowe z kondensatorem między elektrodami wejściowymi. Dla wielu detektorów interesuje nas całkowity ładunek jaki przepłynął w rezultacie wykrycia cząstki – kondensator całkuje ten ładunek zamieniając go na napięcie ($V = Q/C$), wzmacniane następnie przez wzmacniacz.

Typowe zastosowania wzmacniaczy:

Przedwzmacniacz

Dla detektorów produkujących słabe sygnały (komora jonizacyjna, komora proporcjonalna, detektor półprzewodnikowy...) musimy zwykle zastosować przedwzmacniacz. Zadaniem jego jest takie wzmocnienie sygnału aby nadawał się do dalszej obróbki (lub transmisji).

- Aby unikać dodatkowych szumów przedwzmacniacz powinien być zamontowany tuż obok detektora i mieć niski własny poziom szumów.
- Większość detektorów ma dużą impedancję wyjściową – przedwzmacniacz powinien miec duża oporność wejściową (wzmacniacz napięciowy lub ładunkowy).
- Przedwzmacniacz musi często zasilić długą linię transmisyjną – dopasowanie oporności wyjściowej do impedancji linii.
- Jezeli zależy nam na pomiarze kształtu impulsu (lub czasu przyjścia) konieczne szerokie pasmo przenoszenia.

Dobór przedwzmacniaczy bardzo zależy od parametrów detektora i wymagań eksperymentatora – najlepiej pozostawić doświadczonemu elektronikowi.

Wzmacniacz końcowy

Stosowany na poźniejszych etapach obróbki sygnału najczęściej aby:

- dopasować jego amplitudę do wymogów dalszych elementów elektronicznych (np. zakresu przetworników).
- odtworzyć sygnał zniekształcony w transmisji
- jako element dopasowujący impedancję

Czasem potrzebne są też tłumiki (wzmacniacze o wzmocnieniu mniejszym niż 1). Można użyć odpowiednio włączonego wzmacniacza, można też zrobić tłumik z elementów biernych. Normalnie używa się "fabrycznych" biernych tłumików (aby uniknąć zniekształceń sygnału).

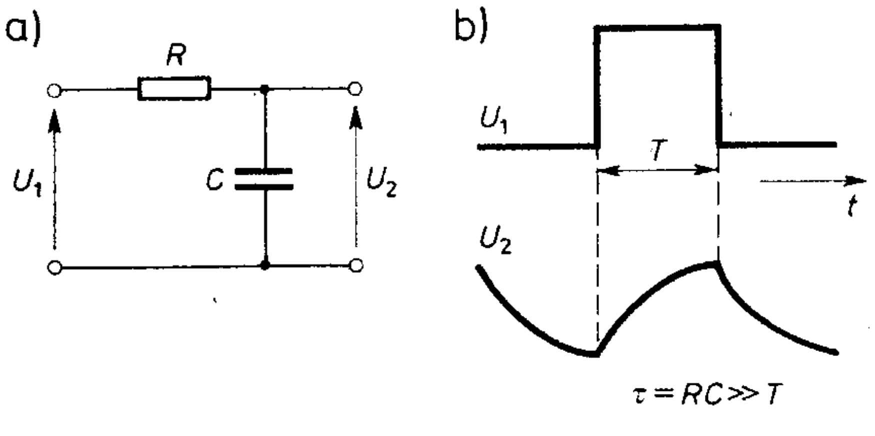
Układy kształtujące impuls

Po co w ogóle kształtowanie? Z wielu różnych powodów:

- Wiele detektorów dostarcza impulsu o długim "ogonie". Jeżeli na ogonie pierwszego impulsu przyjdzie drugi, to jego amplituda będzie zafałszowana.
- Impuls o zestandaryzowanym kształcie łatwiejszy w transmisji i obróbce (mniej składowych fourierowskich → mniejsze pasmo przenoszenia → lepsze tłumienie szumu).
- Jezeli interesuje nas tylko czas przyjścia impulsu (zbocze narastające) możemy bez szkody "wyrzucić" resztę informacji – znowu zmniejszając wrażliwość na zakłócenia.

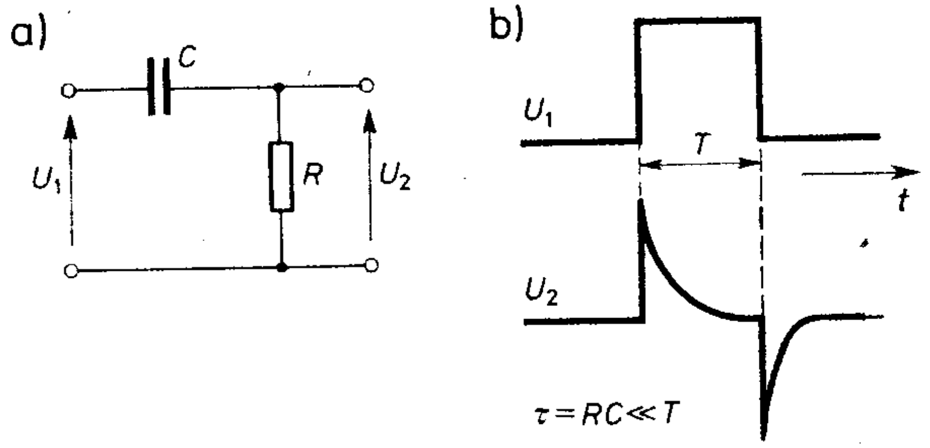
Podstawowe układy kształtujące:

1. Układ całkujący.

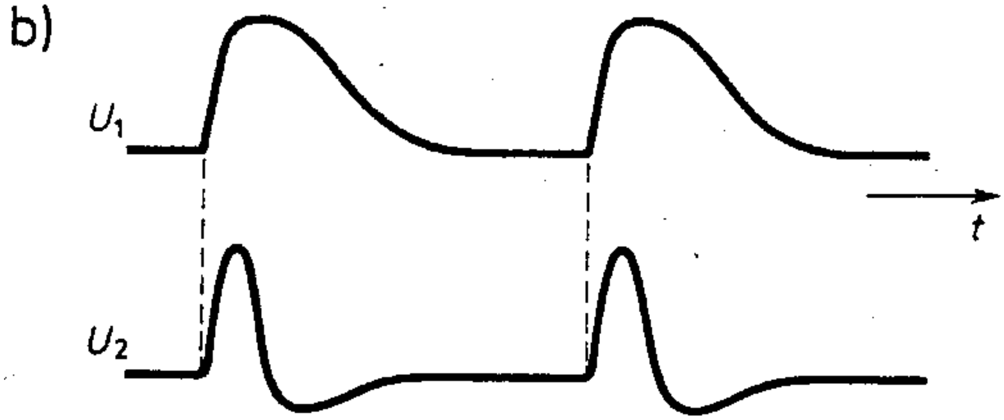


Wspomniany już przy okazji wzmacniacza ładunkowego. Zamienia całkowity ładunek na amplitudę. Likwiduje "przerzut" poniżej zera.

2. Układ różniczkujący.



Odwrotność układu całkującego. Uwypukla zbocza sygnałów, likwiduje długie "powroty do zera". Stosowany do skracania impulsów jak na rysunku:



Kombinując układy różniczkujące i całkujące z kaskadami wzmacniaczy i liniami opóźniającymi można otrzymać niemal dowolny wymagany kształt pulsu, zachowując istotne jego parametry (czas, amplitudę).

Sumator (fan-in)

Jest to wzmacniacz o kilku wejściach, dający na wyjściu sygnał proporcjonalny do sumy amplitud sygnałów wejściowych. Użyteczny np. w technice kalorymetrycznej, gdzie interesuje nas suma sygnałów z kilku detektorów, lub aby zaoszczędzić na przetwornikach (jeden przetwornik może obsłużyć w ten sposób wiele detektorów).

Zwykłe zlutowanie kabli może nie dać zadowalających rezultatów ze względu na możliwość ”cofania się” sygnału z jednego kanału w strone innych – straty amplitudy, zniekształcenia.

Wzmacniacz różnicowy

Wzmacnia różnicę napięć pomiędzy dwoma sygnałami

- pozornie każdy wzmacniacz jest różnicowy – chodzi tu o to, ze nie ma wspólnego poziomu odniesienia dla sygnałów wejściowego i wyjściowego.

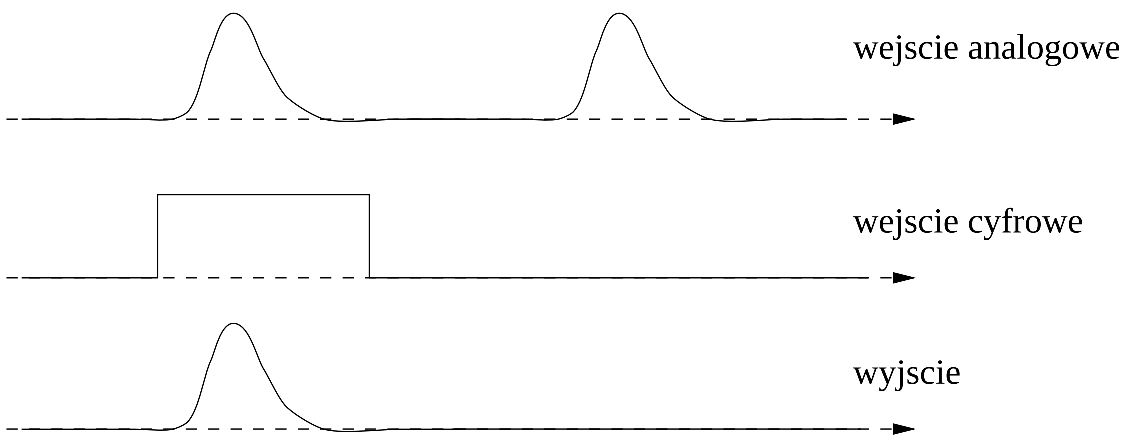
Szczególnym przypadkiem jest **komparator** – wzmacniacz różnicowy o nieskończonym wzmocnieniu (czyli z zawsze nasyconym sygnałem wyjściowym). Jest to układ z pogranicza układów digitalizujących – mówi nam które z dwóch napięć jest wyższe.

Fan-out

Wzmacniacz o wielu wyjściach, dający na każdym identyczny sygnał (niezależnie od tego jak obciążone są pozostałe). Stosowany żeby ”rozdzielić” sygnał na kilka torów bez zmiany jego amplitudy.

Bramka liniowa

Układ analogowy posiadający sterujące wejście cyfrowe. Jeżeli na wejściu cyfrowym podawany jest impuls, wówczas bramka przepuszcza impulsy analogowe. W przeciwnym wypadku bramka jest "zamknięta", na wyjściu analogowym nie ma sygnału.



Użyteczna gdy trzeba wybrać z ciągu impulsów tylko niektóre "interesujące", także aby usunąć szumy w czasie gdy nie ma użytecznego sygnału z detektora.

- wiele układów (np. przetworniki ADC) ma taką funkcję od razu wbudowaną.
- uwaga na polarność sygnału – bramki liniowe są często "unipolarne" – przepuszczają tylko impulsy jednej polaryzacji.