

11. ANALÝZA ČASOVEJ INFORMÁCIE

UČEBNÉ CIELE

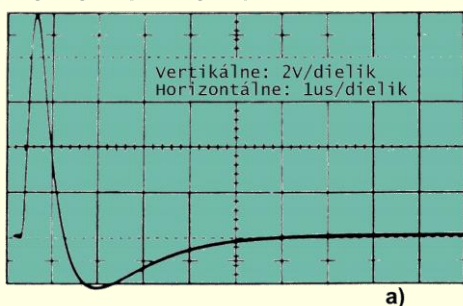
Študent by mal vedieť charakterizovať v čom spočívajú odlišnosti spracovania signálu s časovou informáciou, mal by vedieť akým spôsobom môže zosilňovač a diskriminátor ovplyvniť presnosť časovej analýzy impulzného signálu, mal by poznať príčiny, ktoré zhoršujú presnosť určenia okamihu výskytu udalosti, vedieť definovať význam časového rozlíšenia aparatury a popísať spôsoby jeho kontroly počas experimentu, vedieť charakterizovať princíp koincidenčného merania a jeho prínos pre meranie, vedieť popísať metódy na meranie veľmi krátkych časových intervalov vo fyzikálnom experimente.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

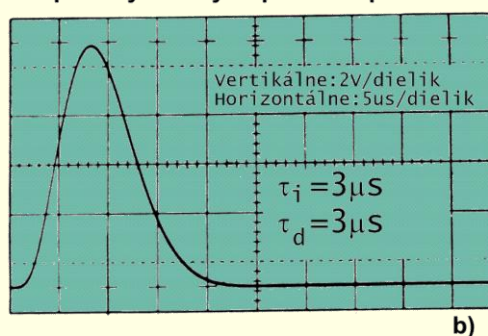
„Rýchla“ elektronika, zosilňovač s vysokou operačnou rýchlosťou, čelo impulzu, presnosť odvodu referenčného impulzu pre časové meranie: („jitter“, „walk“), koincidenca, antikoincidenca, časová rozlišovacia schopnosť diskriminátorov a koincidenčných obvodov, nulový detektor, diskriminátor so slediacim prahom, elektrické a fyzikálne časové rozlíšenie koincidenčných obvodov, náhodné koincidence, pravé koincidence, koincidenca na báze prúdových a napäťových impulzov – prednosti a nedostatky, koincidenca na majoritnom princípe, priame a nepriame metódy prevodu $t \rightarrow A$.

11.1 IMPULZ AKO ZDROJ ČASOVEJ INFORMÁCIE

"Rýchly" bipolárny impulz



Unipolárny tvar výstupného impulzu



Obr.11-1.

Príklady tvaru impulzu:

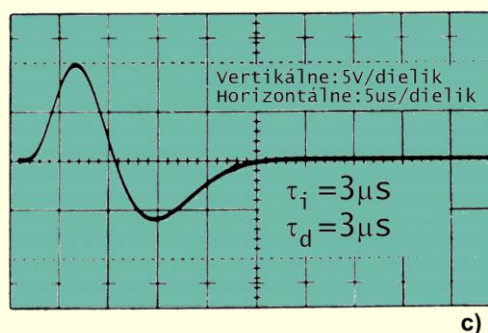
a) "rýchly" impulz z predzosilňovača pre časové meranie

"Pomalé" impulzy zo zosilňovača pre amplitúdové merania:

b) unipolárny ,

c) bipolárny

Bipolárny tvar výstupného impulzu

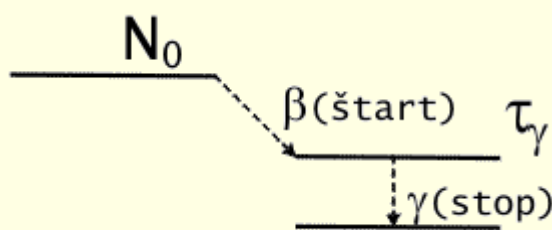


Impulzný signál z detektora poskytuje Informáciu nielen svojou amplitúdou alebo tvarom impulzov ale aj okamihom výskytu impulzov. Obrázok 11-1 umožňuje porovnať odlišnosti tvaru impulzu, vhodného pre meranie amplitúdy s tvarom „rýchleho“ impulzu. „Rýchly“ impulz by, pre určenie okamihu výskytu nejakej udalosti, mal mať krátke trvanie. Informáciu o okamihu výskytu určitej udalosti, poskytuje čelo impulzu alebo ťažisko impulzu. Meraním získaná informácia, je:

- buď priamo spojená s fyzikálnymi veličinami, ktoré majú rozmer času, napr. doba života vzbudeného stavu prechodného jadra;
- alebo je spojená pomocou nejakého prechodného procesu s inými fyzikálnymi veličinami, ako sú: energia častíc, rýchlosť a pod., čo umožňuje na základe stanovenia časového údaja určiť inú fyzikálnu veličinu, napr. na základe odmerania trvania preletu cez určitú vzdialenosť stanoviť okamžitú rýchlosť resp. energiu častice.

11.1.1.1 Príklad merania časových intervalov medzi určitými udalosťami

Obrázok 11-2 ilustruje sled udalostí pri meraní strednej doby života vzbudeného jadra po beta rozpade. V tomto experimente sa pomocou dvoch detektorov registruje okamih výskytu β - častice a γ - kvantu. Zaregistrovanie β -častice dáva signál – štart, o zrodení stavu registrovanej udalosti, a γ -kvánt iniciuje signál stop, o ukončení procesu. Na základe odmeraného oneskorenia stop – signálov, voči príslušným spúšťacím štart – signálom, možno ohodnotiť strednú dobu života vzbudeného stavu.



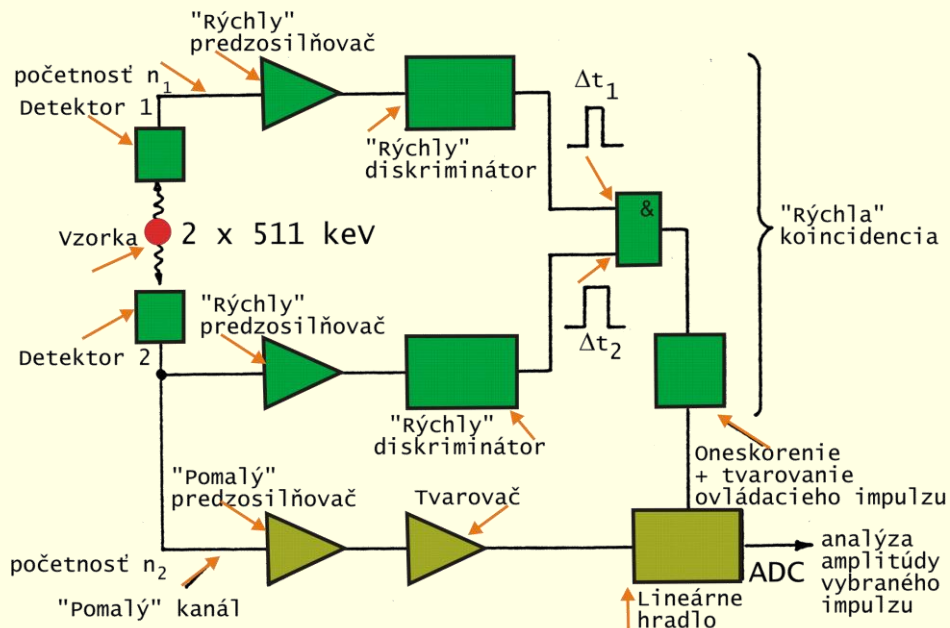
Obr. 11-2.

Ilustračný obrázok na časovú analýzu udalostí (výber udalostí, ktoré sú v koincidencii) - metódy, ktorá sa používa napríklad, pri určovaní aktivity žiariča: (N_0 - aktivita žiariča vyjadrená početnosťou β -rozpadov.)

11.1.1.2 Príklad ovládania výberu udalostí na základe ich časovej korelácie

Mnohokrát sa zhromažďovanie informácie pre amplitúdovú analýzu dopĺňa informáciou o časových súvislostiach udalostí. Pre experimenty, v ktorých je predmetom záujmu meranie amplitúdy impulzov v určitých časových okamihoch výskytu registrovaných udalosti, sa používa technika "**rýchlo - pomalej**" **koincidencie**. Obrázok 11-3 ilustruje rozdelenie ciest spracovania signálu na "rýchly" kanál, pracujúci s vysokou operačnou rýchlosťou a "pomalý" spektrometrický kanál. Dôvodom pre takéto rozdelenie ciest spracovania signálu je, že požiadavky na zosilňovanie "rýchlych" impulzov, ktoré sú nosičmi informácie o okamihu výskytu udalosti a "pomalých" impulzov, v ktorých môže byť zakódovaná informácie o amplitúde alebo tvare impulzu, sú rozdielne a obtiažne realizovateľné v jednom zariadení. "Rýchle" impulzy z oboch detektorov, po zosilnení a tvarovaní vstupujú na koincidenčný obvod, z výstupu ktorého môžu ovládať okamih merania amplitúdy v "pomalom" kanále, pomocou lineárneho hradla. Cieľom ovládania lineárneho hradla pomocou koincidenčného výberu je potlačenie pozadia na základe výberu impulzov, vznikajúcich len pri vzniku súčasnej udalosti (anihilácii).

Pri zbežnom pohľade na elektronické zapojenie na obr. 11-3 vidno, že v „pomalom“ aj „rýchlom“ kanále sa vyskytujú moduly, ktoré sa rovnako nazývajú – zosilňovač, diskriminátor, resp. že moduly nanosekundovej logiky: koincidenčný a antikoincidenčný obvod, by funkčne bolo možné zrealizovať pomocou integrovaných logických obvodov – AND, NAND, OR a pod. **V ďalšom výklade pôjde teda o upozornenie na odlišné požiadavky na činnosť elektronických obvodov, ktoré plynú z krátkeho trvania impulzov, resp. veľmi krátkych trvaní prechodných javov trvaní čela a tyla impulzov alebo s veľmi vysokými početnosťami výskytu týchto krátkych impulzov.**



Obr. 11-3.

Príklad "rýchlo - pomalej" koincidence. Okamih anihilácie pozitronu (registrovaný pomocou koincidenčného obvodu v "rýchlom" kanále) určuje okamih pre meranie amplitúdy impulzu v "pomalom" kanále (pomocou ovládania lineárneho hradla. Oneskorenie medzi rýchlym a pomalým kanálom na vstupe lineárneho hradla musí byť vhodne skompenzované.)

11.2 ZOSILŇOVAČ "RÝCHLYCH" IMPULZOV

Pri zosilňovaní impulzov krátkeho trvania alebo impulzov s krátkym trvaním čela, tzv. „rýchlych“ impulzov, aké sa používajú pri časovej analýze v jadrovo fyzikálnych experimentoch, je dôležité, aby **vlastný príspevok zosilňovača k skresleniu impulzu bol minimálny**. Tvar impulzu môže ovplyvniť:

- kvalita montáže, charakterizovaná montážnou kapacitou na vstupe, výstupe zosilňovača a parazitnou kapacitou prepojujúcich vodičov v zosilňovači. Premyslenou technológiou montáže, napr. v tvare hybridného integrovaného obvodu možno tieto montážne parazitné kapacity minimalizovať. Spolu s voľbou vhodne malých zaťažovacích odporov tranzistorov možno potom zabezpečiť **malú časovú konštantu prechodového javu ustáľovania napätia na parazitných kapacitách**.
- závislosť **vlastnosti tranzistorov** od frekvencie.

V tranzistoroch ovládaných elektrickým poľom sa ovláda kolektorový prúd pomocou napätia medzi riadiacou elektródou a emitorom. Pretože cez riadiacu elektródu neprechádza prakticky žiaden prúd má FET vysoký vstupný odpor (vyšší ako $10^{14} \Omega$), čo je prednosťou z hľadiska malého zaťažovania obvodu, s ktorého sa zosilňuje signál, ale z hľadiska operačnej rýchlosti je nevýhodou, nakoľko spomaľuje trvanie prechodového javu pri zmene náboja na vstupnom hradle tranzistora.

Rýchlejší je bipolárny tranzistor, ktorý pozostáva z 2 PN prechodov:

- P-N prechodu medzi emitorom a bázou, polarizovaného pre majoritné nosiče náboja vodivo, v ktorom sa injektujú nosiče náboja,
- P-N prechodu, medzi bázou a kolektorom, ktorý je pre majoritné nosiče náboja polarizovaný nevodivo.

Dôsledkom takéhoto zapojenia BJT je, že v bipolárnom tranzistore malý bázový prúd ovláda oveľa väčší kolektorový prúd. Pre zosilňovanie "rýchlych" impulzov je dôležitá oblasť vysokých frekvencií ($10\text{kHz} < f < 1\text{GHz}$), v ktorej ovplyvňuje zosilňovanie predovšetkým kapacita nevodivej ochudobnenej vrstvy záverne polarizovaného prechodu báza-kolektor a obmedzená rýchlosť difúzie nosičov náboja cez vodivý prechodu báza - emitor. BJT sa chová pri vysokých frekvenciách ako dolnopriepustný filter s hornou hraničnou frekvenciou.

Z hľadiska jednoduchosti zapojenia je pre dosiahnutie čo najväčšieho napäťového zisku s 1 tranzistorom najefektívnejšie zapojenie tranzistora so spoločným emitorom. V takomto zapojení však, v dôsledku pôsobenia spätnej väzby cez vnútorné kapacity tranzistora – tzv. Millerovho javu, sa výrazne znižuje napäťový zisk s rastúcou frekvenciou. Pre vysokofrekvenčné zosilňovače sa preto používajú rôzne viactranzistorové obvody, využívajúce prednosti zapojenia so spoločnou bázou a spoločným kolektorom, v ktorých kapacita nevodivého PN prechodu neprispieva k pôsobeniu Millerovho javu.

Ak amplitúda impulzu na výstupe, napr. zo scintilačného detektora, je vyššia ako prah tvarovacieho obvodu možno impulz použiť priamo bez zosilňovania. V opačnom prípade sa impulz z detektora musí zosilniť pomocou „rýchleho“ zosilňovača. Často býva predzosilňovač tak upravený, aby poskytol na svojich výstupoch vhodne upravený „rýchly“ a „pomalý“ impulz, podobných tvarov ako na obr. 11-1. Teda najneskôr na výstupe predzosilňovača dochádza k oddeleniu impulzov pre meranie amplitúdy od impulzov nesúcich časovú informáciu, súvisiacu s okamihom ich výskytu.

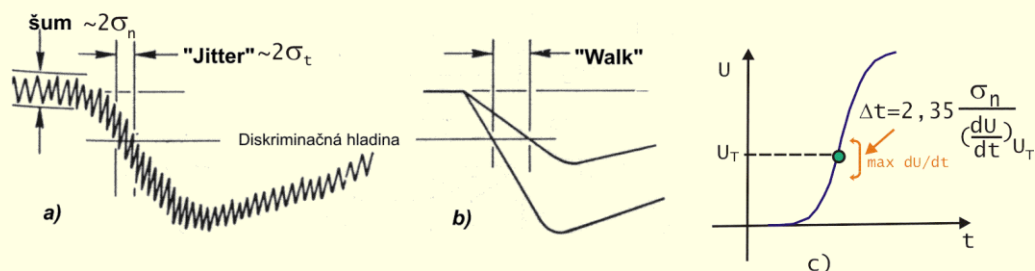
Časová informácia o okamihu výskytu častice alebo kvanta je zakódovaná do tvaru čela impulzu z detektora, resp. do ťažiska krátkeho impulzu. Úlohou "rýchleho" zosilňovača je v čo najmenej predĺžiť trvanie čela impulzu, ako aj samotný impulz, teda parametre, ktoré odrážajú rýchle zmeny pri zbere náboja v detektore. Trvanie reakcie v polovodičových detektoroch a časová reakcia rýchlych scintilátorov ležia v oblasti od niekoľko nanosekund do niekoľko desiatok nanosekund. Aby sa táto informácia pri zosilňovaní nestratila sú potrebné **zosilňovače so šírkou pásma 100 až 300 MHz**, resp. **s vlastným príspevkom k trvaniu čela impulzu 3 až 1 ns**, ktoré len minimálne skreslia tvar impulzu. Pri krátkom trvaní impulzov voľba dolnej hraničnej frekvencie frekvenčného pásma zosilňovača nie je kritická. Z hľadiska možného posunu a fluktuácie strednej hodnoty základnej "nulovej" úrovne v dôsledku nerovnomerného nabíjania a vybíjania väzobného kondenzátora sa u „rýchlych“ zosilňovačov preferuje jednosmerná väzba, bez použitia väzobných kondenzátorov. Pre „rýchly“ **zosilňovač s vysokou operačnou rýchlosťou** sú kritéria na veľkosť zosilnenia, na linearitu, na teplotnú stabilitu a podobne, druhoradé v porovnaní s

“pomalými” spektrometrickými zosilňovačmi, kde zosilňované impulzy majú zvonovitý tvar s trvaním okolo 1 μ s.

11.3 DISKRIMINÁTORY PRE ČASOVÚ ANALÝZU IMPULZOV

Na získanie informácie o výskyte udalosti sa impulz z predzosilňovača konvertuje na logický tvar impulzu, s unifikovaným trvaním a amplitúdou. Na tento účel by bolo principiálne možné použiť aj amplitúdové diskriminátory. Pre meranie časových súvislostí medzi rôznymi udalosťami však nie je rozhodujúca stabilita a presnosť prahu diskriminátora, tak ako ako pri amplitúdovej analýze, ale hlavným kritériom je **presnosť odvodu časovej informácie o vzniku udalosti** zo vstupného signálu (impulzu) a **nezávislosť** takto získanej informácie **od amplitúdy a tvaru** signálu (amplitúdy a trvania čela impulzu).

Časová rozlišovacia schopnosť diskriminátorov sa charakterizuje schopnosťou rozlíšiť dva za sebou sledujúce impulzy. **Mŕtva doba** je minimálny interval oneskorenia medzi impulzmi, pri ktorom diskriminátor ešte registruje impulzy ako oddelené udalosti. Ak je interval medzi dvoma impulzami už o niečo kratší, tak diskriminátor prestane registrovať impulzy ako oddelené udalosti. Mŕtva doba však závisí aj od amplitúdovej citlivosti vstupných tvarovacích obvodov - bude dlhšia ak impulzy majú rozdielnu amplitúdu. Pri často sa vyskytujúcich „zhlukoch“ impulzov **ďalším zdrojom nepresnosti** môže byť posuv prahovej úrovne (**drift**) spôsobený nedostatočnou rýchlosťou vybíjania väzobnej kapacity komparátora.

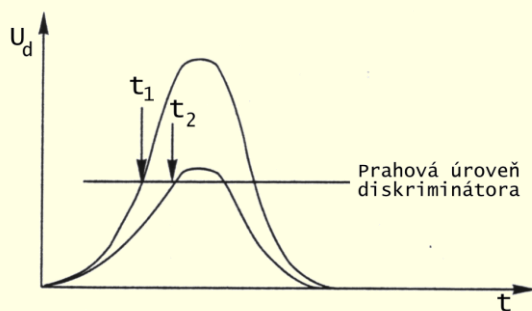


Obr.11-4.

Dve hlavné príčiny, ktoré zhoršujú presnosť odvodu referenčného impulzu pre časové meranie:

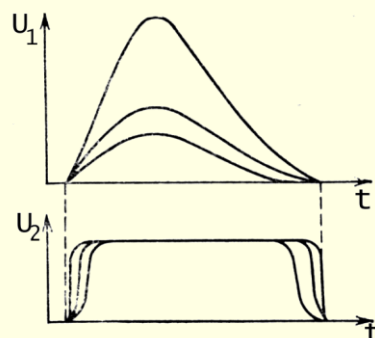
- „jitter“ - fluktuácia amplitúdy vplyvom namodulovaného šumu,
- „walk“ - fluktuácia amplitúdy vplyvom rozptylu tvaru impulzu.
- nastavenie diskriminačnej hladiny U_T pri najstrmšom náraste amplitúdy, teda v okolí \sim tretiny amplitúdy impulzu

Referenčný impulz v diskriminátore vzniká v okamihu, keď impulz narastie na určitú úroveň, väčšiu ako prahová úroveň. Trvanie čela impulzu z detektora nie je nulové a okrem toho amplitúda impulzu kolíše vplyvom šumu a štatistických fluktuácií signálu z detektora. Obrázok 11-4a ilustruje **vplyv šumových fluktuácií amplitúdy** na neistotu určenia vzniku referenčného impulzu Δt – **jitter**. Napr. v polovodičovom detektore hlavným zdrojom takýchto fluktuácií je kolísanie zvodového prúdu detektora. Obrázok 11-4b objasňuje vplyv **fluktuácií vstupnej amplitúdy** na kolísanie rýchlosti nárastu (trvania čela) impulzu, ktoré spôsobuje neistotu určenia vzniku referenčného impulzu Δt – **walk**. Napr. v scintilačnom detektore fluktuácie tvaru impulzu ovplyvňuje rozptyl pri konverzii fotónov na elektróny spolu s rozptylom zberu náboja v procese zosilnenia.



Obr. 11-5.

Vznik časovej fluktuácie pri kolísaní amplitúdy impulzu



Obr. 11-6.

Veľkým zosilnením impulzu, až do režimu blízkeho stavu saturácie, možno "unifikovať tvar impulzov" a tak zmenšiť rozptyl trvania čela impulzu.

Z hľadiska minimalizovania vplyvu rozptylu vstupnej amplitúdy vplyvom šumov (jitter) by mal byť prah diskriminátora nastavený omnoho vyššie ako základná úroveň - 0V a z hľadiska minimalizovania vplyvu kolísania amplitúdy (walk) by mala byť poloha prahu čo najbližšie k základnej úrovni - 0V. Teda sú to evidentne **protichodné požiadavky**.

11.3.1 Zmenšenie rozptylu zosilnením impulzu

Voľba vhodnej metódy získania referenčného časového impulzu závisí od tvaru signálu – od trvania čela impulzu a veľkosti kolísania amplitúdy impulzu.

11.3.1.1 Použitie predzosilňovačov s veľkým zosilnením

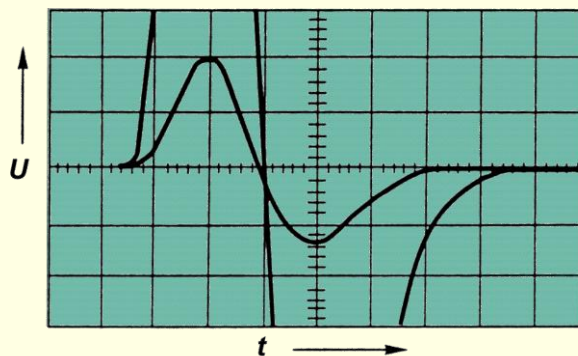
Impulzy zo spektrometrických detektorov majú dlhšie trvanie čela impulzu, čo môže, pri veľkom amplitúdovom rozptyle, mať za následok neistotu odvodu referenčného impulzu, väčšiu ako je trvanie ich čela impulzu. Napríklad u "pomalých" scintilačných detektorov (s kryštálom NaI(Tl)) alebo u veľkoplošných polovodičových detektorov s nábojovým zosilňovačom, býva trvanie čela impulzu $\sim 0,5\mu s$. Takýto problém časovej fluktuácie, ilustrovaný obrázkom 11-5, by bolo možné zmenšiť **zosilnením impulzov do takej miery, že dôjde k obmedzeniu amplitúdy** impulzov na výstupe zosilňovača, podľa obr. 11-6. Veľká amplitúda na vstupe tranzistora má za následok injektovanie podstatne viac nosičov náboja do oblasti bázy tranzistora ako je treba na vytvorenie maximálneho kolektorového prúdu. Vytvorený prebytok náboja sa po skončení vstupného podnetu musí rozptýliť, čo vedie k predĺženiu výstupného impulzu a tým k spomaleniu operačnej rýchlosti tranzistora. Spôsob demonštrovaný na obr. 11-6 **možno teda použiť pri nižších početnostiach registrovaného sledu udalostí**, keď predĺženie impulzu pri nelineárnom zosilnení nie je na závalu.

11.3.1.2 Použitie fotonásobičov s veľkým zosilnením

Pri registrácii monoenergetického toku častíc, napr. v experimentoch fyziky vysokých energií na urýchľovačoch, môžu fotonásobiče scintilačných detektorov s plastickými scintilátormi pracovať s veľkým zosilnením, až v nelineárnych pracovných podmienkach, nakoľko impulzy sa nebudú používať pre amplitúdovú analýzu. Vďaka nelineárnemu zosilneniu fotonásobičov, podobne ako na obr. 11.6, sa zlepšia podmienky pre odvodenie referenčného okamihu.

V takýchto podmienkach, keď v dôsledku nelineárneho zosilnenia fotonásobičov, sa amplitúda impulzov len málo mení a impulzy majú veľkú strmosť nárastu, možno použiť "rýchle" **diskriminátory s pevným prahom – tvarovače**. Informácia o čase výskytu impulzu je odvodená od okamihu, keď amplitúda signálu s krátkym trvaním čela impulzu dosiahne pomerne nízko nastavený prah.

Elektronické zapojenie tvarovača je funkčne zhodné so zapojením amplitúdového diskriminátora, ktorý má prah diskriminácie pevne nastavený. Základom tvarovača je komparátor alebo Schmittov tvarovací obvod, pomocou ktorého sa overuje či amplitúda impulzu dosiahla prahovú úroveň. Za komparátorom je ešte pripojený monovibrátor, ktorý upraví impulz, ktorý splnil podmienku vstupnej diskriminácie, na štandardizovanú amplitúdu a štandardizované trvanie. Použitie štandardizovaných impulzov zjednodušuje konštrukciu obvodov nanosekundovej logiky, napr. koincidenčných obvodov.



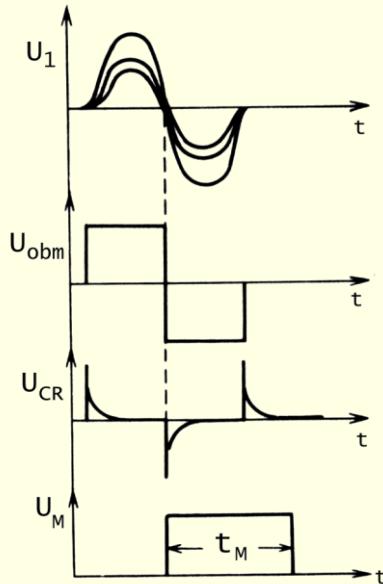
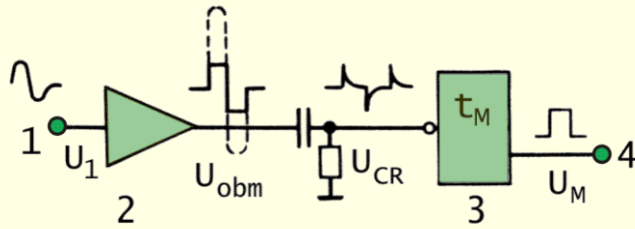
Obr.11-7.

Ilustrácia vplyvu zosilnenia na skrátenie trvania nárastu čela impulzu a tiež ilustrácia malého vplyvu kolísania amplitúdy signálu na okamih prechodu nulovou základnou úrovňou.

11.3.2 Nulový detektor

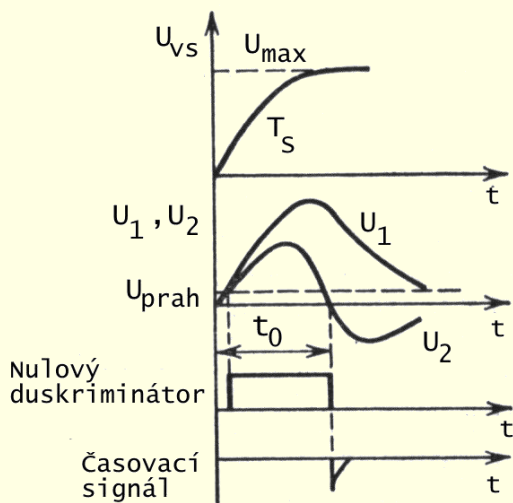
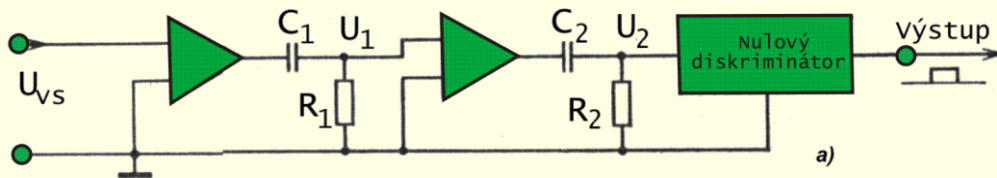
Z obrázku 11-5 vidno, že časová referencia odvodená od trvania čela impulzu závisí viac od kolísania amplitúdy impulzu ako časová referencia odvodená od polohy maxima impulzu. Zderivovaním tvaru impulzného priebehu možno získať bipolárny impulz (obr. 11-7), ktorého okamih prechodu cez nulovú úroveň je rovnaký ako okamih keď pôvodný impulz dosahuje maximum. Takýto spôsob získania informácie o vzniku registrovanej udalosti využíva tzv. **nulový detektor**. Anglický názov – Zero crossing detector – lepšie vystihuje skutočnosť, že sa na výstupe diskriminátora generuje impulz v okamihu **prechodu bipolárneho impulzu cez nulovú úroveň**.

Nulový detektor (diskriminátor) na obr. 11-8, **určený pre vstupný bipolárny impulz**, pozostáva zo zosilňovača – obmedzovača amplitúdy, pomocou ktorého sa vstupný bipolárny signál najprv zosilní až do ohraničenia amplitúdy, čím sa vytvaruje do skoro obdĺžnikového tvaru s krátkymi trvaniami čiel impulzov. Po prechode tohto bipolárneho impulzu cez derivačný článok (obr. 11-9) sa tvaruje na skrátené trvanie impulzu tak, aby krátky záporný impulz, ktorý je korelovaný s okamihom prechodu bipolárneho signálu cez nulovú úroveň, spúšťal monovibrátor. Na výstupe monovibrátora je potom k dispozícii referenčný časový impulz so štandardizovanou amplitúdou a trvaním t_M , pre použitie v ďalšej časovej analýze.



▲ Obr.11-8.
Nulový diskriminátor:
1) vstupný bipolárny signál;
2) zosilňovač s obmedzovačom;
3) monovibrátor;
4) výstupný impulz štandardného tvaru a amplitúdy.

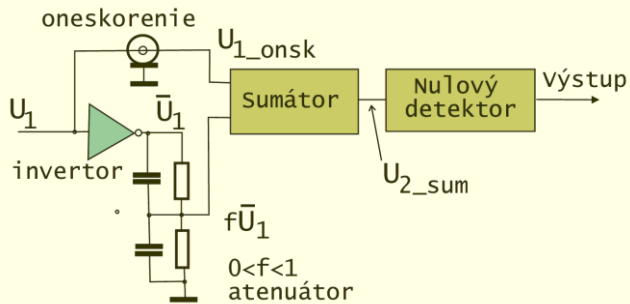
◀ Obr.11-9.
Princíp vzniku referenčného impulzu (o trvaní t_M a amplitúde U_M) v nulovom diskriminátore. Začiatok generovania výstupného impulzu je v korelácii s okamihom prechodu vstupného impulzu cez nulovú úroveň.



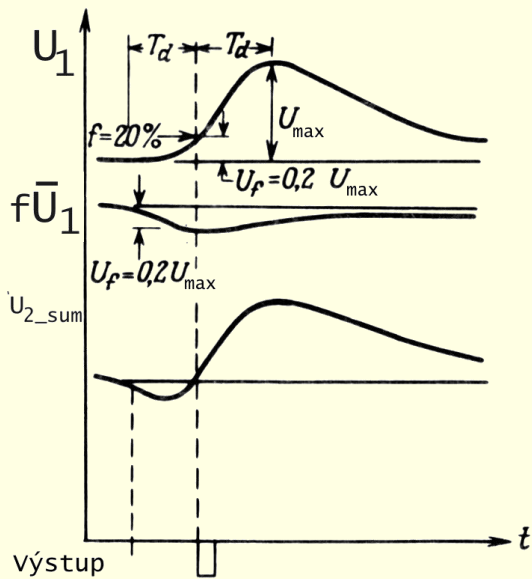
▲ Obr.11-10.
a) Na základe dvojnásobného tvarovania derivačnými článkami C_1R_1 a C_2R_2 sa vytvaruje bipolárny impulz, ktorý sa následne vyhodnotí nulovým diskriminátorom.

◀ b) Odvodenie referenčného časovacieho signálu z „pomalého“ scintilátora NaI(Tl), ktorého záblesk má časovú konštantu $T_S \sim 0,5 \mu s$.

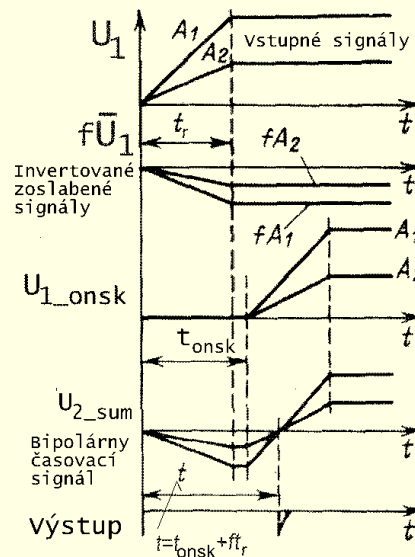
b)



Obr.11-11. Princíp CF diskriminátora (CF – constant fraction), ktorého prah je úmerný amplitúde vstupného impulzu, resp. je nastavený na stály pomer f vstupnej amplitúdy.



Obr. 11 -12. Tvar signálov v CF diskriminátore:
 U_1 – signál na vstupe
 $f\bar{U}_1$ – invertovaný zoslabený signál U_1 ($f=0,2$)
 U_{2_sum} – vstup nulového diskriminátora
 $U_{výstup}$ – výstupný časovací signál



Obr. 11 -13. Ilustrácia nezávislosti vplyvu amplitúdy na okamih prechodu signálu cez nulovú úroveň v CF diskriminátore.

Na obr. 11-10 je znázornené použitie nulového detektora pre unipolárne impulzy z „pomalého“ scintilátora NaI(Tl) , ktorého záblesk má časovú konštantu $T_S \sim 0,5 \mu\text{s}$. Najprv sa dvojnásobným tvarovaním pomocou derivačných článkov C_1R_1 - C_2R_2 vytvorí z unipolárneho bipolárny impulz (obr. 11-10a). Z tohto impulzu sa pomocou komparátora alebo Schmittovho preklápacieho obvodu, s veľmi nízkym prahom, vytvaruje pomocný impulz o trvaní t_0 , na základe konca trvania ktorého, sa vygeneruje krátky časovací impulz, ktorý je korelovaný s prechodom bipolárneho impulzu cez nulovú úroveň.

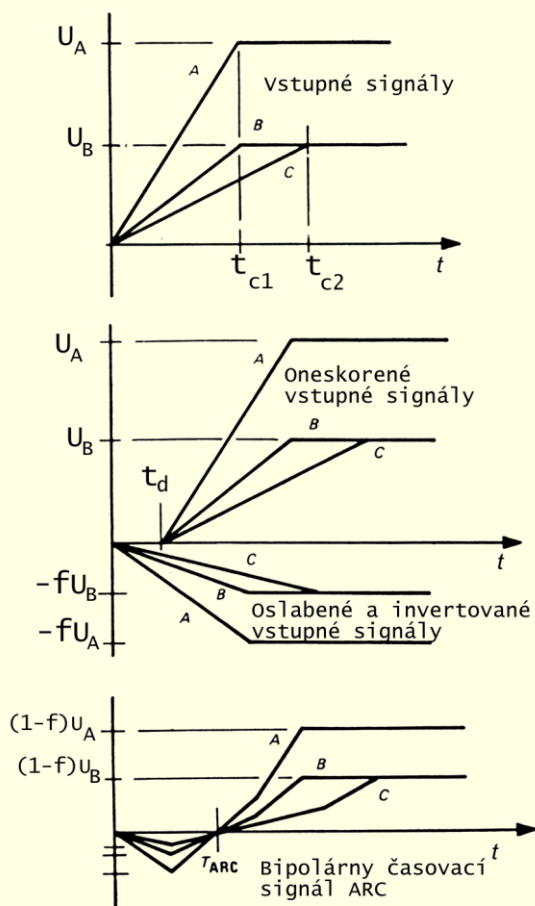
11.3.3 Diskriminátor so slediacim prahom

Určenie referenčného okamihu výskytu impulzu bude najpresnejšie v oblasti najstrmšieho nárastu amplitúdy, teda pri nastavení diskriminačného prahu v okolí \sim tretiny amplitúdy impulzu. Toto možno splniť ak diskriminátor nepoužíva pevný diskriminačný prah ale **slediaci prah**, ktorý je **úmerný amplitúde impulzu**. V CF

diskriminátore so slediacim prahom (CF - constant fraction) sa najprv vhodne upraví vstupujúci unipolárny impulzu na bipolárny tvar, ktorý má prechod cez nulu v oblasti najstrmšieho nárastu čela vstupujúceho impulzu, čím tento okamih už nebude závisieť od rôznej amplitúdy impulzu.

V zapojení na obr. 11-11 sa a základe zloženia oneskoreného pôvodného impulzu a zoslabenej časti invertovaného impulzu vytvorí bipolárny impulz, spôsobom ilustrovaným na obr. 11-12. Vlastnosťou tohto vytvarovaného bipolárneho impulzu je, že jeho okamih prechodu nulovou úrovňou je invariantný voči amplitúde vstupného impulzu (obr. 11-13) a môže byť pomocou nulového diskriminátora použitý na generovanie referenčného impulzu k okamihu vzniku udalosti, ktorá je spojená so vstupným impulzom.

CF diskriminátor možno použiť, ak je **trvanie čela vstupných impulzov z detektora stále**. Trvanie čela impulzov je úmerné dobe zberu náboja v detektore. Bohužiaľ napríklad pre veľkoobjemové germániové detektory je trvanie zberu náboja a tým aj trvanie nárastu amplitúdy (čela impulzu) závislé od dráhy a dĺžky stopy ionizujúcej častice v citlivom objeme detektora (v polovodičovom detektore od dvoch zložiek náboja: kratšej elektrónovej a dlhšej dierovej zložky).

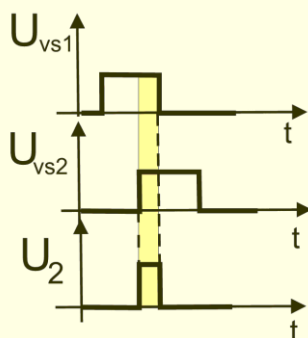


Obr.11-14.

Kompenzácia vplyvu rôzneho trvania čela impulzu na určenie okamihu prechodu signálu cez nulovú úroveň v ARC diskriminátore.

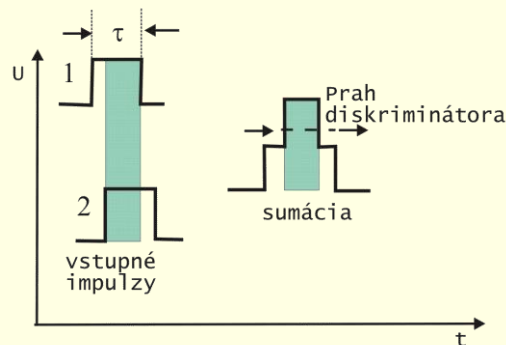
Pre experimenty, v ktorých sa registrujú udalosti, pri ktorých môžu vzniknúť impulzy s rôzne dlhým trvaním čela impulzov je určená úprava **ARC diskriminátora**. Obrázok 11-14 objasňuje, ako v určitom intervale trvaní čiel impulzu možno skompenzovať rôznu nárasť amplitúdy čela impulzu. Riešenie je založené na doplnkovom výbere impulzov, ktorých amplitúda padne do rozmedzia okna U_A-U_B diskriminačného prahu, tak aby impulzy ktoré sú predmetom nášho záujmu mali

trvanie čela v intervale $t_{c2}-t_{c1}$, alebo kratšie ako t_{c2} . V ARC diskriminátore sa vyhodnocujú len takýmto spôsobom vytriedené udalosti. Všetky udalosti, ktoré sa vyskytnú neskôr, s dlhším trvaním čela impulzu sú z tvarovania vylúčené.



Obr. 11 -15.

Princíp činnosti obvodu vyhodnocovania koincidencie **napätových impulzov** je rovnaký ako pri hradlovaní v súčinovom hradle AND. Na výstupe obvodu vznikne impulz počas trvania prekryvania impulzov .

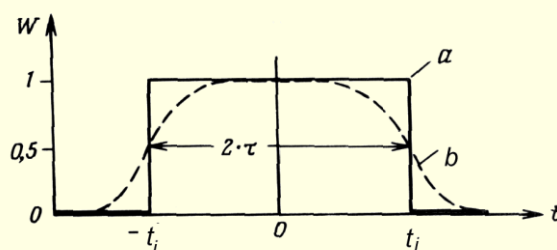


Obr. 11 -16.

Princíp funkcie výberového obvodu koincidencii na báze **prúdových impulzov** - na výstupe obvodu vznikne impulz ak amplitúda vstupného napätia v dôsledku sumárneho pôsobenia vstupných prúdových impulzov prekročí prahovú úroveň. Zmenou nastavenia prahu možno meniť násobnosť koincidencii.

11.4 KOINCIDENČNÝ OBVOD – RÝCHLE HRADLO AND

Ideálnym **koincidenčným obvodom** je súčinové logické hradlo AND s nekonečnou operačnou rýchlosťou, ktoré reaguje svojim výstupným signálom na prítomnosť vstupných impulzov v súlade s Boolovou logikou. V ideálnom prípade pri obdĺžnikovom tvare impulzov o trvaní impulzov t_{i1} a t_{i2} charakterizuje súčasnú prítomnosť impulzov tzv. **elektrické časové rozlíšenie** $2\tau_{re}=t_{i1} + t_{i2}$, ktoré pre tieto obdĺžnikové impulzy s rovnakou amplitúdou špecifikuje či ešte dochádza k vzájomnému prekrytiu vstupných impulzov (obr. 11-15). Viacvstupové hradlo AND možno použiť ako viacnásobný koincidenčný obvod. Uvedený idealizovaný variant hradla AND je blízky realite pri impulzoch obdĺžnikového tvaru s veľmi krátkym trvaním čela a tyla impulzu.



Obr. 11 -17.

Časové rozlíšenie:

a) (ideálne) elektronické $2\tau_{re} = 2t_i$

b) (reálne) fyzikálne τ_r v polovičnej výške krivky oneskorených koincidencii $W(t)$.

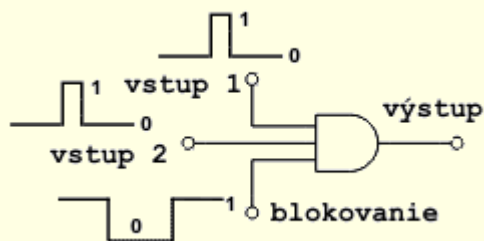
Rozdiel medzi koincidenčným obvodom a logickým hradlom AND spočíva v prístupe k rozhodujúcej funkcii obvodu - získaniu časovej informácie o tom či sa určité impulzy vyskytujú súčasne alebo nie. Pri logickom hradle AND je rozhodujúce splnenie kombinačnej podmienky, ktorá sa vyhodnocuje na základe

dlhodobejšej prítomnosti resp. neprítomnosti impulzov na vstupoch hradla. Pre koincidenčný obvod je dôležité dokázať špecifikovať časový vzťah impulzov, často počas ich krátkodobej prítomnosti.

S použitím pojmov Boolovej algebry možno teda sformulovať činnosť koincidenčného obvodu : ak na vstupe koincidenčného obvodu ako súčinového hradla sa vyskytnú dva impulzy (s úroveňou logickej "1") maximálne vzájomne oneskorené o interval τ_{re} (Obr.11-17) budú zaregistrované hradlom AND a na výstupe bude úroveň logickej "1", počas trvania vzájomného sa prekrývania impulzov (obr. 11-15). Na rozdiel od jednoduchého hradla AND by koincidenčný obvod (ako elektronický modul jadrovej elektroniky) mal pozostávať z:

- vstupného tvarovača – monovibrátora, pre každý vstup, ktorý vytvaruje krátke a "strmé" impulzy s rovnakou amplitúdou;
- **člena vyhodnocujúceho koincidence** – výberového obvodu (napr. hradlo AND, výberový obvod s tunelovou diódou);
- výstupného tvarovača – monovibrátora na obnovu tvaru impulzu na štandardizovaný tvar (amplitúdu a trvanie).

Vyhodnocovacie obvody koincidence väčšinou využívajú **princíp hradlovania napät'ových impulzov** (obr. 11-15) pomocou rýchlych integrovaných hradiel, napr. typu ECL. Pre veľmi rýchle aplikácie s časovým rozlíšením kratším ako 10ns sa využíva princíp **superpozície prúdových impulzov** (obr. 11-16), kde sa vo funkcii prúdových spínačov používajú tunelové diódy. Pomocou výberového obvodu, založeného na superpozícii prúdových impulzov možno uskutočniť aj **majoritný výber**, napr. nielen zistiť či došlo k súčasnému výskytu impulzov na všetkých m vstupoch obvodu ale zistiť aj či došlo k súčasnému výskytu impulzov na rôznej kombinácii väčšiny n vstupov, teda registrovať kombinácie n – násobných koincidencei zo všetkých m možných vstupov ($n < m$).



Obr. 11 -18.

Princíp zapojenia dvojevstupového koincidenčného obvodu s kanálom antikoincidence (vstup blokovanie).

V rozličných experimentálnych zariadeniach vzniká často potreba potlačiť koincidenčný signál ak sa súčasne vyskytne **blokovací antikoincidenčný impulz**. V princípe stačí na realizovanie antikoincidenčného výberu pripojiť k doterajším koincidenčným vstupom invertovaný blokovací signál (avšak s trvaním o niečo dlhším ako vstupné koincidenčné impulzy), aby bola účinnosť blokovania spoľahlivejšia (obr. 11-18).

Vo fyzike vysokých energií sa okrem koincidenčných a antikoincidenčných obvodov tiež používajú zložitejšie kombinačné obvody - tzv. **moduly logického výberu**, ktoré umožňujú v zložitých experimentálnych zariadeniach prepínať vstupy tak, aby vykonávali logické funkcie AND, OR, XOR, INVERT. Technicky sú realizované pomocou integrovaných obvodov, vzájomne pozapájaných jednosmernými spojmi podľa podmienok v experimente alebo aj počítačom ovládaným špecifikovaním funkcie obvodu.

11.4.1 Princíp koincidenčnej metódy

Na ilustráciu použitia koincidenčnej metódy v experimente nám poslúži úloha Praktika z jadrovej fyziky na FMFI UK, kde sa používa koincidenčná metóda pri určovaní aktivity vzbudeného jadra po beta rozpade (obr. 11-2). Na registráciu žiarenia sa používajú dva detektory. Pomocou jedného detektora sa ako početnosť N_β registrujú β - častice a pomocou druhého detektora ako početnosť N_γ zase γ - kvanty. Na základe zistenia výskytu časovo korelovaných udalostí β a γ , t.j. početností N_C čo sú v koincidenčii, možno určiť napríklad aktivitu žiariča, charakterizovanú početnosťou N_0 , ktorá na obr. 11-2 určuje rýchlosť rozpadu β .

Priamym meraním možno zistiť len početnosti N_β a N_γ (ktoré závisia od príslušnej efektívnosti detektorov ε_β a ε_γ),

$$N_\beta = N_0 \varepsilon_\beta \qquad N_\gamma = N_0 \varepsilon_\gamma$$

Ďalej priamym meraním sa dá určiť početnosť N_C (počet pravých koincidenčii za sekundu) korelovaných udalostí β a γ , odmeraná pomocou koincidenčného obvodu

$$N_C = N_0 \varepsilon_\beta \varepsilon_\gamma$$

Hodnoty účinností detektorov ε_β a ε_γ nie sú vopred známe a preto z nameraných početností N_β a N_γ nemožno stanoviť N_0 . Početnosť N_0 možno však určiť na základe odmeraných N_C , N_β a N_γ

$$N_0 = N_\beta N_\gamma / N_C$$

11.4.2 Časové rozlíšenie koincidenčného obvodu

Presnosť s akou koincidenčný obvod umožňuje rozhodnúť o súčasnom výskyte registrovaných udalostí je určená časovým rozlíšením. Ako už bolo uvedené vyššie a zobrazené na obr. 11-17 pre amplitúdovo štandardizované impulzy o trvaní t_i sa používa tzv. **elektronické časové rozlíšenie** τ_{re} . Obvod pokladá výskyt 2 impulzov za súčasný, ak sa vzájomne predbiehajú alebo oneskorujú maximálne o interval $2\tau_{re} = 2t_i$. Pre impulzy, ktoré nemajú obdĺžnikovitý tvar, poprípade nemajú jednotnú veľkosť amplitúdy, tak ako to býva pri impulzoch z rozličných detektorov, sa používa tzv. **fyzikálne časové rozlíšenie** τ_r (určené na polovičnej výške závislosti oneskorených koincidenčii $W(t)$ na obr. 11-17)

V dôsledku konečného trvania intervalu - $2\tau_r$ sa registrujú koincidenčným obvodom nielen **skutočné (pravé) koincidenčné udalosti** N_C ale aj **náhodné koincidenčné udalosti** N_{rnd} , ktoré spôsobujú impulzy, ktoré neprislúchajú sledovaným „pravým“ udalostiam, ale sa náhodne vyskytujú v rámci intervalu - $2\tau_r$. Pri slabo korelovaných početnostiach (napr. pri nízkej efektívnosti $\varepsilon_\beta \ll 1$ a $\varepsilon_\gamma \ll 1$ v predošlom experimente) sa môžu v rámci intervalu $2\tau_r$ vyskytnúť náhodné koincidenčie:

$$N_{rnd} = 2N_\beta N_\gamma \tau_r$$

Na základe porovnania N_{rnd} , N_C

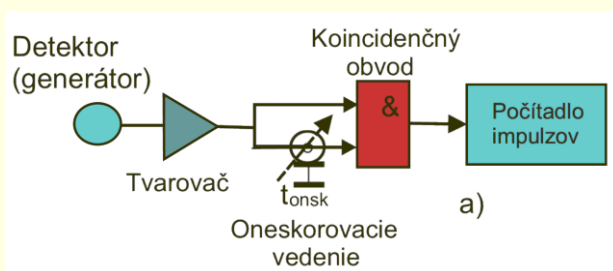
$$N_{\text{rnd}}/N_C = 2N_0 \cdot \tau_r$$

plynie uzáver, že pre meranie s vysokou štatistickou dôveryhodnosťou treba mať:

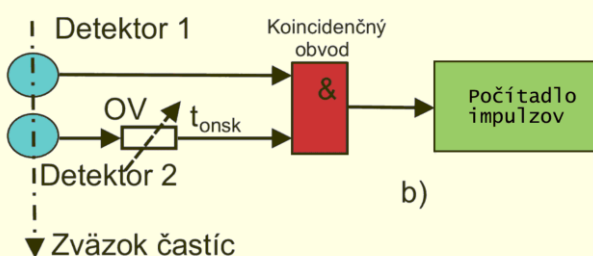
- tak ako pri iných meraniach, buď veľkú aktivitu vzorky alebo zvoliť dostatočne dlhú dobu merania tak, aby sa získala veľká početnosť N_C ;
- a okrem toho koincidenčný obvod by mal mať **malé časové rozlíšenie** τ_r .

V uvedenom experimente β - γ koincencii na obr. 11-2, však časové rozlíšenie nemôže byť príliš krátke, aby sa bez strát mohli zaregistrovať všetky korelované udalosti, pretože emisia β - častíc a γ - kvánt sa koná následne, hoci veľmi rýchlo, za sebou. Okrem tohoto základného fyzikálneho ohraničenia treba mať ešte na zreteli aj špecifiká detekčného systému:

- Oneskorenie signálu na výstupe detektora voči inicializačnej udalosti, ktoré je charakteristické štatistickými fluktuáciami, ako sú trvanie zberu elektrónov a dier, trvanie dosvitu scintilátora, trvanie preletu elektrónov cez fotonásobič a pod. Stupeň vplyvu týchto fluktuácií (na obr. 11-4 označených ako walk) na presnosť určenia časového okamihu závisí od spôsobu tvarovania signálu z detektora.
- Druhou príčinou zvyšujúcou nepresnosť definovania okamihu vzniku udalosti (na obr. 11-4 označených ako jitter) je oneskorenie spôsobené kolísaním amplitúdy impulzu.



Obr. 11 -19.
Meranie časového rozlíšenia koincidenčného obvodu metódou oneskorených koincencií pomocou **spoločného zdroja**.



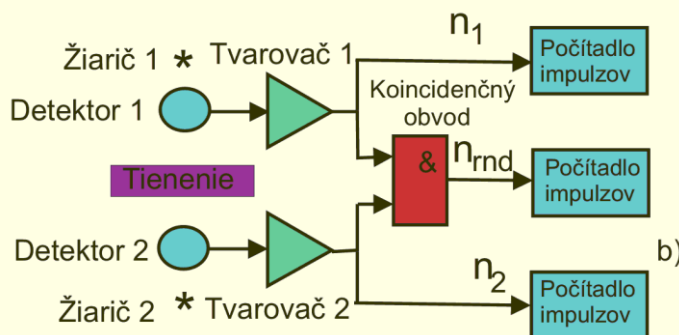
Obr11 -20.
Meranie reálneho časového rozlíšenia koincidenčného obvodu metódou oneskorených koincencií **z dvoch detektorov** na sväzku častíc urýchľovača. OV – oneskorovacie vedenie.

11.4.3 Meranie časového rozlíšenia a vplyv náhodných koincencií

Funkciu koincidenčného obvodu možno skontrolovať podľa obrázku 11-19. Na jeden vstup koincidenčného obvodu vstupuje impulz priamo (resp. cez nepatrné oneskorenie) a na druhý vstup obvodu cez regulovateľné oneskorovacie vedenie (zrealizované z rôzne dlhých kúskov kábla). Na výstupe koincidenčného obvodu sa registrujú impulzy pomocou počítača impulzov. Impulzy vstupujúce na koincidenčný

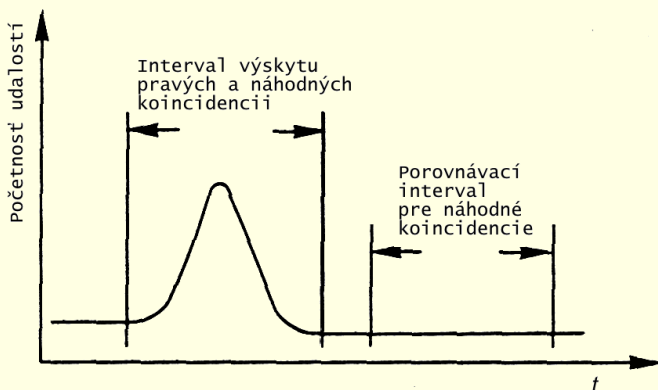
obvod sú z jedného zdroja (napr. generátora alebo z detektora). Sú teda **časovo korelované** a vzájomne jeden kanál voči druhému oneskorené pomocou oneskorovacieho vedenia. Počítadlo na výstupe koincidenčného obvodu registruje impulzy, ktoré sa vyskytli na vstupe koincidenčného obvodu v rámci intervalu určeného časovým rozlíšením τ_r koincidenčného obvodu. Tvar nameranej závislosti početnosti impulzov na výstupe obvodu v závislosti od vzájomného oneskorenia vstupných impulzov – **krivka oneskorených koincidií** na obr. 11-17, bude mať tvar (a) pri obdĺžnikovom tvare impulzov z generátora a tvar (b) ak je ako zdroj impulzov použitý detektor ionizujúceho žiarenia, z ktorého impulzy nie sú uniformované. V prípade generátora impulzov, keď sú impulzy prakticky rovnakého tvaru a amplitúdy sa meraním získa **elektrické rozlíšenie** obvodu $\tau_{re} = \tau_i$.

Na odmeranie reálneho fyzikálneho časového rozlíšenia τ_r treba na meranie, podľa obrázku 11-20, použiť dva oddelené detektory. Pri tomto meraní sa sa uplatnia aj amplitúdové a časové fluktuácie signálov, takže **fyzikálne časové rozlíšenie** $\tau_r > \tau_{re}$.



Obr. 11-21.

Princíp merania náhodných koincidií. Zdrojom sú dva nezávislé žiariče, vzájomne oddielené. Pred vstupom na vlastný rozhodovací obvod koincidií sú impulzy z detektorov upravené na približne rovnaký tvar tvarovačmi.



Obr. 11-22.

Ilustrácia funkcie vzájomného oneskorenia impulzov vstupujúcich na koincidenčný obvod pre meranie skutočných koincidií a náhodných koincidií.

Časové rozlíšenie možno **skontrolovať aj pomocou náhodných koincidií**. V zapojení na obrázku 11-21 sú použité dva nezávislé žiariče, detektory sú vzájomne odelené Pb tienením a vzájomné oneskorenie impulzov je zámerne nevhodne zvolené podľa obrázku 11-22, takže impulzy na vstupoch koincidenčného obvodu nie sú časovo korelované. Nehľadiac na to, môžu vyvolať niektoré náhodné impulzy koincidenčnú udalosť. Pre m - vstupový koincidenčný obvod s časovým rozlíšením τ_r bude početnosť náhodných koincidií určená vzťahom

$$N_{\text{rnd}(m)} = m \cdot N_1 \cdot N_2 \dots N_m \cdot \tau_r^{(m-1)},$$

kde: N_1, N_2, \dots, N_m sú početnosti z jednotlivých vstupov

V najjednoduchšom prípade 2 - vstupového koincidenčného obvodu

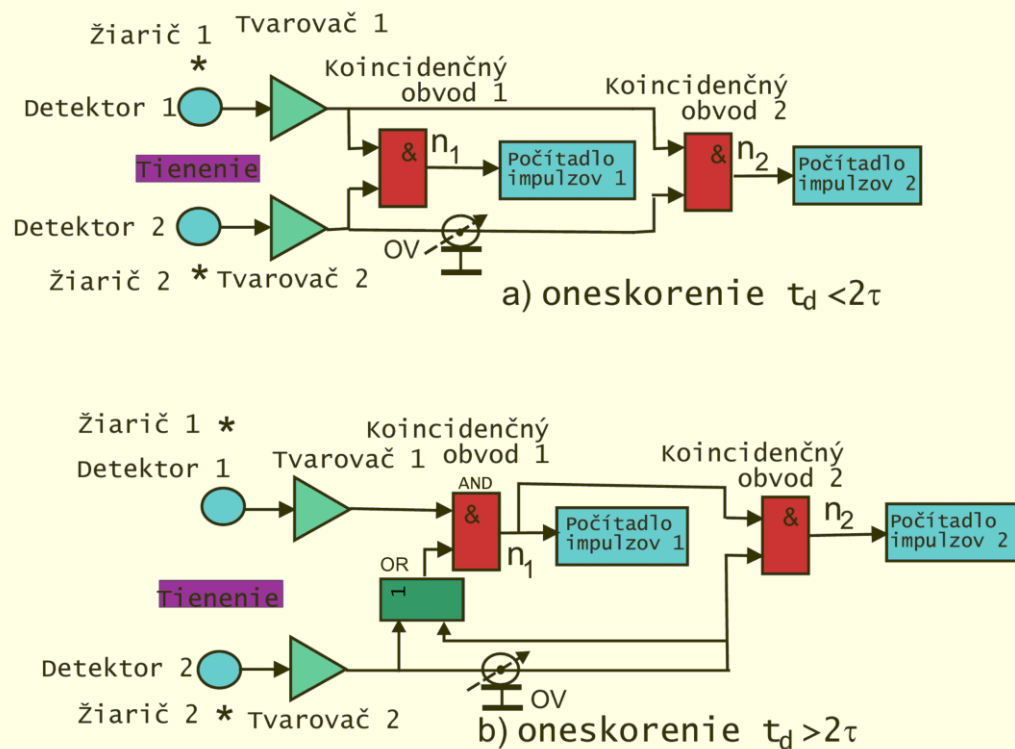
$$N_{\text{rnd}(2)} = 2 \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot \tau_r,$$

možno získať vzťah pre časové rozlíšenie:

$$\tau_r = N_{\text{rnd}(2)} / (2 \cdot N_1 \cdot N_2),$$

ktorý je vhodný pre experimentálnu kontrolu.

V tých prípadoch, keď je početnosť náhodných koincidií N_{rnd} porovnateľná s početnosťou skutočných koincidií N_C nemožno ich existenciu zanedbať, resp. je treba s nimi počítať. Napríklad pri registrovaní málo intenzívneho žiarenia s nízkou energiou za prítomnosti šumov pomocou scintilačného detektora.



Obr. 11-23.

Princíp kontroly skutočných (N_C) a náhodných (N_{rnd}) udalostí pomocou odmerania početností:

a) $N_1 = N_C + N_{\text{rnd}} = n_1/t$ - koincidií na výstupe koincidenčného obvodu 1.

$N_2 = N_{\text{rnd}} = n_2/t$ -- koincidií na výstupe koincidenčného obvodu CC₂.

b) Zlepšená metóda z obr. 10-23a eliminujúca odchýlky parametrov koincidenčných obvodov.

Na obrázku 11-23a je uvedené jednoduché zapojenie na kontrolu náhodných a skutočných koincidií, ktoré pozostáva z dvoch koincidenčných obvodov s rovnakým časovým rozlíšením a rovnakou vstupnou citlivosťou. Koincidenčný obvod 1 s počítadlom 1 je pripojené priamo k detektoru (pomocou káblov s rovnakou dĺžkou) a registruje skutočné a náhodné koincidence $N_1 = N_C + N_{\text{rnd}}$. Koincidenčný obvod 2 s počítadlom 2 neregistruje skutočné koincidence, pretože oneskorovacie vedenie je nastavené (obr. 11-22) tak, aby jeho oneskorenie $t_o > 2\tau_r$, takže počítadlo 2

registruje početnosť náhodných impulzov $N_2=N_{\text{rnd}}$. Početnosť skutočných koincidií je:

$$N_C=N_1-N_2.$$

Bohužiaľ nie je možné vždy s absolútnou istotou tvrdiť, že koincidenčné obvody 1 a 2 majú zhodné časové rozlíšenie. Okrem toho časové rozlíšenie nie je časovo absolútne stabilné v dôsledku kolísania diskriminačnej prahovej citlivosti a aj kvôli rozptylu amplitúdy vstupných impulzov. Preto použitá metóda z obrázku 11-23a nemusí byť vždy dostatočne presná. Na obrázku 11-23b je vylepšený variant zapojenia, v ktorom sa používa koincidenčný obvod 1 s počítadlom 1, na ktorého jeden vstup je pripojený signál z detektora D_1 a na druhý vstup je pripojená cez logický člen OR kombinácia signálov z detektora D_2 a tiež oneskorené (oneskorenie $t_o>2\tau_r$) náhodné koincidence N_{rnd} . Takže počítadlo 1 registruje početnosti $N_1=N_C+2N_{\text{rnd}}$. Na počítadle 2 z výstupu koincidenčného obvodu 2 budú registrované len náhodné koincidence $N_2=N_{\text{rnd}}$. V tomto prípade bude početnosť skutočných koincidií:

$$N_C=N_1-2N_2.$$

11.5 MERANIE ČASOVÝCH INTERVALOV

11.5.1 Princíp štart - stop metódy prevodu t/D

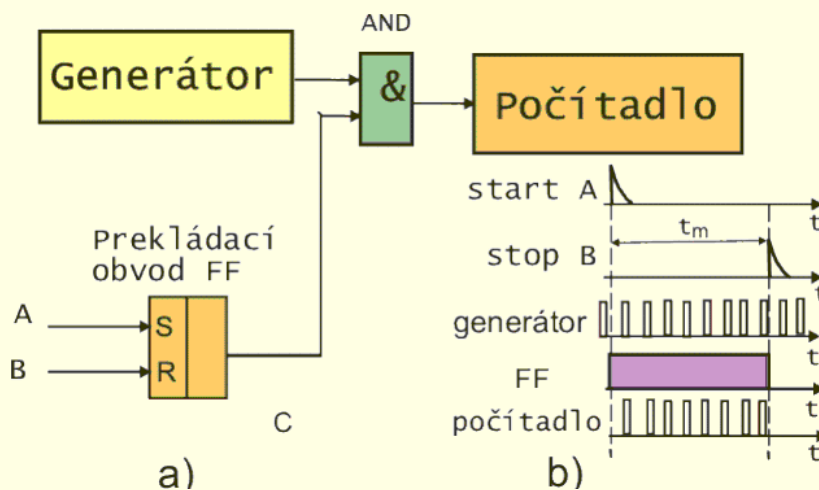
Najjednoduchší spôsob merania časových intervalov dlhších ako 500ns je **priama metóda štart – stop**, založená na meraní počtu N periód T_0 znamej hodinovej (a tiež aj stabilnej) frekvencie $f_0=1/T_0$, ktoré sa uložia medzi príslušný štart - stop impulzmi (obrázok 10-24). Impulzy na výstupe súčinového hradla AND sa registrujú počítadlom impulzov. Zaregistrovaný počet impulzov N je výsledok prvej časti $t \rightarrow N$ merania. V ďalšom sa obsah počítadla N , v jednotkách T_0 , prepočíta na trvanie meraného intervalu v číslicovom tvare D (prevod $n \rightarrow D$). Postup v prevodníku t/D pri konverzii **intervalu na číslo** metódou štart-stop možno teda schematicky vyjadriť zápisom: $t \rightarrow N \rightarrow D$, resp skrátene $t \rightarrow D$, resp. t/D.

Prednosťou metódy štart - stop je široký dynamický rozsah meraných intervalov, pohybujúci sa od niekoľkých desiatok ns do niekoľkých μs . Presnosť merania limituje šírka krokovania T_0 , ktorá závisí od frekvencie $f_0=1/T_0$ generátora hodinových impulzov. Šírka kroku - kanál T_0 môže byť od niekoľkých ps do niekoľkých desiatok ns. Napríklad pomocou generátora s frekvenciou 200 MHz býva šírka kanála okolo 5 ns a prevod dlhých intervalov na číselný kód možno uskutočniť s dostatočnou presnosťou. Prevod kratších intervalov je limitovaný rýchlosťou preklápania obvodov predovšetkým počítadla impulzov ale aj generátora impulzov.

Pri meraní doby života vzbudených stavov jadier vzniká impulz štart v okamihu zrodzenia stavu vzbudenia a impulz stop určuje koniec tohto stavu. Oba impulzy majú štatisticky časovo náhodný výskyt.

Pri meraní doby preletu častíc v experimentoch na urýchľovačoch môže byť ovládací signál štart odvodený z cyklickej činnosti urýchľovača. Potom je efektívnosť registrácie tohto signálu rovná 1. Na každý štartovací impulz sa však

môže vyskytnúť aj viac stop - impulzov, resp. niekedy aj žiadny, takže ovládacia elektronika by mala zabezpečiť odblokovanie preklápacieho obvodu typu SR na obr. 10-24, ak sa do určitej doby nevyskytne stop - impulz.



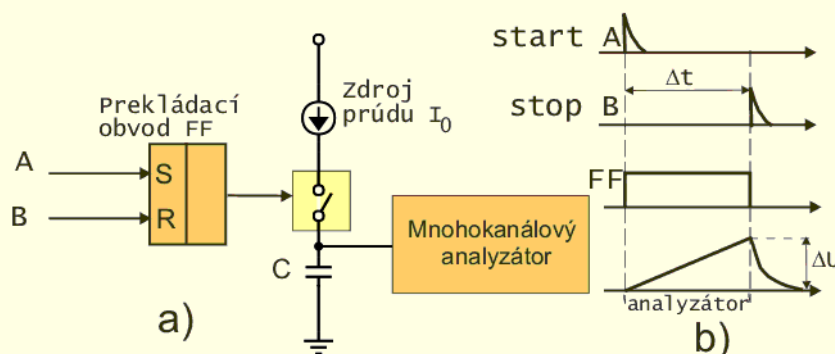
Obr.11-24.

a) Princíp metódy štart - stop na meranie časových intervalov medzi príchodom impulzov štart a stop.

b) Trvanie impulzu t_m bude odmerané v jednotkách počtu periód T_0 etalónovej frekvencie $f_0=1/T_0$ a následne upravené na číselný časový údaj.

Konečná rýchlosť preklápania obvodov v počítadlách, resp. **konečné trvanie čiel impulzov** ohraničujú zvyšovanie **časovacej frekvencie**. Preto pre meranie veľmi krátkych časových intervalov, namiesto priameho t/D prevodu, sa používajú **nepriame metódy prevodu**, založené na:

- použitie **prevodu $t \rightarrow A$** , teda pomocou **prevodníka** typu **TAC**. Časový interval sa najprv prekonvertuje na inú analógovú veličinu, najčastejšie na amplitúdu impulzu, ktorá sa potom presne odmeria napr. pomocou mnohokanálového analyzátoru.
- "rozťahnutí" krátkeho meraného intervalu pomocou expandéra impulzu na dlhší, jednoduchšie merateľný, alebo merateľný s použitím presnejšej interpolačnej metódy merania času. V oboch prípadoch - pri použití expandéra impulzu alebo pri použití noniusovej metódy interpolácie- sa jedná o **prevod $t \rightarrow A \rightarrow N \rightarrow D$** , teda o **prevodník typu TADC**.



Obr. 11-25.

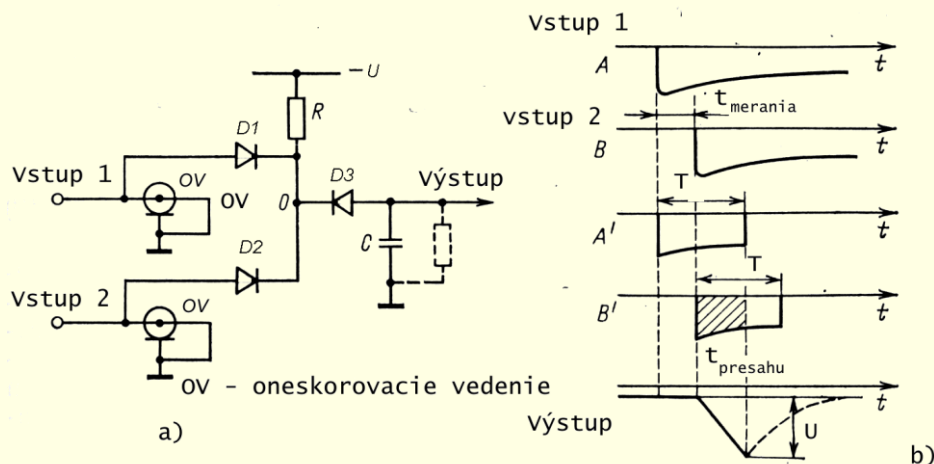
a) Princíp $t \rightarrow A$ konverzie merania časových intervalov Δt medzi príchodom impulzov štart a stop na preklápací obvod FF.

b) Vytvorená amplitúda napätia ΔU sa určí mnohokanálovým analyzátorom.

11.5.1.1 Prevod $t \rightarrow A$

V jadrovej fyzike sa krátke časové intervaly z nanosekundovej oblasti merajú pomocou ich prekonvertovania na amplitúdu napätia na kondenzátore, ktorú už relatívne pomaly možno odmerať použitím mnohokanálového analyzátora. Podľa spôsobu prevodu meraného intervalu na amplitúdu napätia možno prevodníky typu TAC rozdeliť na dva typy:

- Prevodník na obr. 11-25, ktorý využíva princíp štart - stop s preklápacím obvodom na nabitie kondenzátora C stálym prúdom, počas trvania meraného intervalu Δt . Amplitúda vzniknutého pílovitého impulzu $\Delta U \sim \Delta t$ je následne odmeraná pomocou mnohokanálového analyzátora. Po odmeraní napätia, ktoré trvá okolo $\sim 2\mu s$, sa kondenzátor pomocou zoskratovania spínačom vybije. Rýchlosť analyzátora teda limituje početnosť výskytu registrovaných udalostí. Prednosťou prevodníka tohto typu je, že jeho činnosť nezávisí od trvania krátkeho intervalu medzi vstupom štart a stop impulzu. Pri meraní intervalov od niekoľko ns do $1\mu s$ môže byť relatívne časové rozlíšenie takéhoto TAC $\sim 10^{-4}$ a absolútne rozlíšenie $\sim 10ps$.



Obr. 11 -26.

a) Princíp $t \rightarrow A$ metódy prekrytia impulzov na meranie intervalu $t_{merania}$ pomocou koincidenčného obvodu s diódami D_1, D_2, D_3 . Vstupujúce štart (A) a stop (B) impulzy sú, pomocou kábla OV so skratom na konci, skrátene (A' a B') na trvanie impulzu T, dlhšie ako meraný interval.

b) Počas intervalu $t_{presahu}$, keď sa prekrývajú vstupné impulzy o trvaní T sa nabíja kondenzátor C na amplitúdu napätia U, ktorú možno odmerať, podobne ako na obr. 11-25, pomocou mnohokanálového analyzátora. Hľadaný časový interval $t_m = T - t_{presahu}$

- Prevodník na obr. 11-26 ktorý, namiesto nedostatočne rýchleho preklápacieho obvodu, využíva **koincidenčnú metódu prekrytia impulzov** na ovládanie procesu nabíjania kondenzátora. V tomto prevodníku sa najprv musí upraviť trvanie vstupných impulzov na určité krátke trvanie (na obr. 11-26 označené $t_i = T$), zvolené tak aby, trvanie $T > t_{max}$ bolo dlhšie ako maximálne trvanie meraného intervalu t_{max} . V zapojení na obr. 11-26 je dĺžka impulzov na oboch vstupoch upravená na požadované trvanie pomocou kábla so skratom na konci. Tento typ tvarovania je použiteľný len **pre impulzy s krátkym trvaním čela a tyla impulzu**, čo v danom prípade ak chceme merať nanosekundové

interval je splnený. Počas koincidencie sa prekrývajú vstupné impulzy a výstupný impulz z diódového koincidenčného obvodu nabíja pripojený kondenzátor počas trvania t_{presahu} , takže na základe odmerania amplitúdy napätia na kondenzátore možno stanoviť trvanie t_{presahu} , a následne aj trvanie meraného intervalu $t_m = T - t_{\text{presahu}}$. Nevýhodou zapojenia na obr. 11-26 je, že pri výskyte štart a stop signálov v opačnom poradí sa objaví na výstupnom kondenzátore C tiež impulz, ktorý reprezentuje "záporný" časový interval. Výskyt takýchto udalostí preto treba eliminovať pomocou doplňujúceho logického zapojenia.

Zachovanie linearity prevodu $t \rightarrow A$ pomocou jednoduchého integračného RC článku vyžaduje použitie z exponencialneho priebehu napätia na kondenzátore

$$u_c(t) = -U(1 - \exp(-t/RC)) \sim Ut/RC \text{ (pre } t \ll RC \text{)}$$

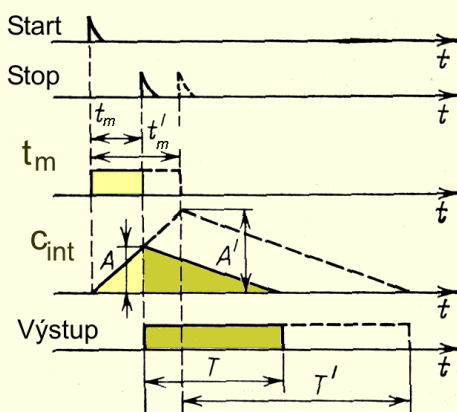
len začiatok $t \ll RC$ exponenciály, s lineárnym priebehom, čo má za následok redukciiu amplitúdy impulzu pre analyzátor. Preto treba použiť väčšie napájacie napätie U, resp. v zložitejších zapojeniach použiť zdroj stabilizovaného nabíjacieho prúdu.

11.5.1.2 Meranie extrémne krátkych intervalov

Intervaly s nanosekundovým trvaním vyžadujú použitie extrémne vysokej frekvencie hodinových impulzov a extrémne rýchle integrované obvody. Pomocou vhodnej metódy merania, napríklad ak sa meranie nevykonáva príliš často, možno použiť:

- časový expander;
- nóniusovú metódu interpolácie,

pomocou ktorých možno pretransformovať merané nanosekundové intervaly do mikrosekundovej oblasti, kde ich už možno presnejšie odmerať.



Obr. 11 - 27.

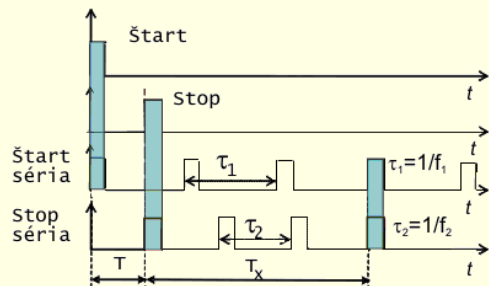
Princíp $t \rightarrow A \rightarrow N \rightarrow D$ metódy s použitím časového expandéra. Trvanie nabíjania integračného kondenzátora C_{int} počas meraného štart - stop intervalu t_m je podstatne rýchlejšie ako proces vybíjania tohto kondenzátora C_{int} počas merania času T, pomocou generátora hodinových impulzov. Na obrázku je ilustrovaný spôsob odmerania 2 rôzne dlhých intervalov : t_m a t'_m .

11.5.1.2.1 Časový expandér

Obrázok 11-27 ilustruje činnosť **časového expandéra**, v ktorom prebieha proces nabíjania integračného kondenzátora C_{int} , počas meraného štart - stop intervalu t_m , podstatne rýchlejšie ako proces vybíjania tohto kondenzátora C_{int} , počas merania času T, s pomocou generátora hodinových impulzov. V čase meraného intervalu t_m od vstupu štart impulzu po vstup stop impulzu sa **kondenzátor lineárne nabíja veľkým prúdom** a následne (po skončení intervalu t_m) sa **vybíja ďaleko menším (250 až 1000 krát) prúdom**. Vďaka tomuto "rozťahnutiu" prechodového

javu vybíjania kondenzátora možno s ns až ps presnosťou odmerať trvania intervalov, na odmeranie ktorých by bežnou štart- stop metódou bolo treba použiť hodinovú frekvenciu vyššiu ako 1GHz. Interval vybíjania kondenzátora do nulového napätia má trvanie T . Tento interval potom slúži ako hradlovací impulz pre vstup hodinových impulzov tak, ako v štandardnej štart - stop metóde. Celý proces prevodu ($t \rightarrow A \rightarrow N \rightarrow D$) sa vykonáva na spoločnom integračnom kondenzátore **bez účasti mnohokanálového analyzátora MCA**.

11.5.1.2.2 Nóniusová metóda interpolácie



Obr. 11 - 28.

Princíp nóniusovej metódy:

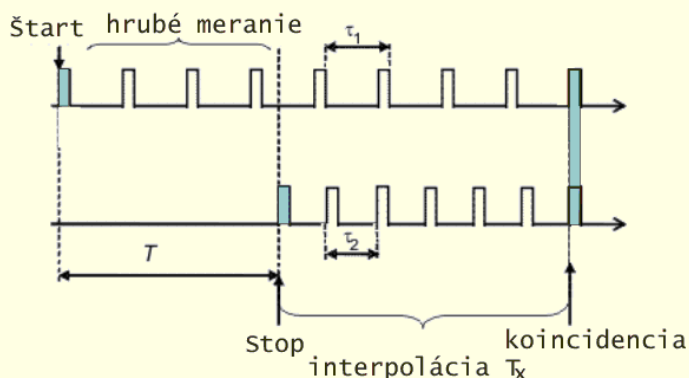
T - meraný interval medzi príchodom impulzu štart a stop.

T_x - Časový interval od príchodu stop impulzu po výskyt prvej koincidencie série impulzov, s približne rovnako dlhou periódou τ_1 a τ_2

Princíp **nóniusovej** (vernierovej) **metódy** na obrázku 11-28, je založený na tom, že spúšťač štart impulz uvoľňuje generovanie skupiny impulzov s frekvenciou $f_1 = 1/\tau_1$ a stop impulz uvoľňuje generovanie skupiny impulzov s trocha vyššou (napr. o 1%) frekvenciou $f_2 = 1/\tau_2$. Pomocou koincidenčného obvodu s vysokou operačnou rýchlosťou sa stanoví okamih, keď dôjde k prvému výskytu koincidencie medzi týmito postupnosťami impulzov. Časový interval T_x od príchodu stop impulzu po výskyt tejto koincidencie možno vhodnou voľbou frekvencie postupností impulzov nastaviť tak, aby $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2 \ll \tau_2$. Potom bude interval

$$T_x = T\tau_2/\Delta\tau .$$

omnoho dlhší ako pôvodný meraný interval $0 < T < \tau_1$ medzi výskytom štart a stop impulzu a preto ho možno s tou istou hodinovou frekvenciou presnejšie odmerať.



Obr. 11 - 29.

Použitie nóniusovej metódy na spresnenie merania dlhších intervalov

Nóniusová metóda interpolácie môže byť použitá:

- jednak na meranie **veľmi krátkych trvaní impulzov**, kde sa jej použitím dosiahne predĺženie interpolačného intervalu $T_x \gg T$ (obrázok 11-28)

- a tiež **ako spresnenie metódy**, aj na meranie dlhších intervalov, na základe použitia jednej frekvencie (f_1 alebo f_2) ako hodinovej. Obrázok 11-29 ilustruje použitie noniusovej metódy na spresnenie merania. Najprv sa pomocou hodinovej frekvencie f_1 určí hrubo interval T (od príchodu štart impulzu po príchod stop impulzu) a potom podľa počtu interpolačných impulzov s frekvenciou f_2 sa upresní údaj T_x .

KONTROLNÉ OTÁZKY

1. Charakterizujte v čom spočívajú odlišnosti spracovania signálu s časovou a amplitúdovou informáciou?
2. Charakterizujte ako môže zosilňovač a diskriminátor ovplyvniť presnosť registrovania určitej časovej udalosti?
3. Charakterizujte ako ovplyvňuje tvar čela impulzu presnosť odvodenia referenčného impulzu pre časové meranie?
4. Charakterizujte ako možno spresniť získanie referenčného časového impulzu pri kolísaní amplitúdy impulzu?
5. Porovnajete vlastnosti diskriminátorov pre amplitúdovú a časovú analýzu impulzov?
6. Popíšte spôsob určenia časového okamihu generovania referenčného impulzu v CF diskriminátore so slediacim prahom?
7. Popíšte ako možno na základe odmerania krivky oneskorených koincidencii určiť časové rozlíšenie koincidenčného obvodu?
8. Charakterizujte prednosti a nedostatky koincidenčného obvodu na báze prúdových a napäťových impulzov ?
9. Prečo nie je elektrické a fyzikálne časové rozlíšenie koincidenčného obvodu zhodné?
10. Popíšte ako možno na základe odmerania náhodných koincidencii určiť časové rozlíšenie koincidenčného obvodu?
11. Čím sa odlišuje súčinové logické hradlo AND od koincidenčného obvodu?
12. Popíšte princíp činnosti výberového obvodu 3 z 5 majoritných koincidencii ?
13. Porovnajete funkciu koincidenčného obvodu a lineárneho hradla?

SÚHRN

Impulzný signál z detektora poskytuje informáciu nielen svojou amplitúdou alebo tvarom impulzov ale aj okamihom výskytu impulzov. Časová informácia o okamihu výskytu častice alebo kvanta je zakódovaná do tvaru čela impulzu z detektora (resp. do ťažiska impulzu). Úlohou "rýchleho" zosilňovača je v čo najmenej predĺžiť trvanie čela impulzu, ako aj samotný impulz, teda parametre, ktoré odrážajú rýchle zmeny pri zbere náboja v detektore. Trvanie reakcie v polovodičových detektoroch a časová reakcia rýchlych scintilátorov ležia v oblasti od niekoľko nanosekund do niekoľko desiatok nanosekund. Aby sa táto informácia pri zosilňovaní nestratila, je dôležité, aby vlastný príspevok zosilňovača k skresleniu impulzu bol minimálny.

Na získanie informácie o výskyte udalosti sa analógový signal - impulz konvertuje na logický impulz unifikovaného tvaru, trvania a amplitúdy. Pre

meranie časových súvislostí medzi rôznymi udalosťami je hlavným **kritériom presnosť odvodu časovej informácie o vzniku udalosti** zo vstupného impulzu a **nezávislosť** takto získanej informácie **od amplitúdy a trvania čela** impulzu.

Amplitúda impulzu kolíše vplyvom šumu a štatistických fluktuácií signálu z detektora a tým vznikajú nepresnosti pri určovaní referenčného okamihu. Šumové fluktuácie amplitúdy spôsobujú nepresnosť určenia času - **jitter**, vplyv **fluktuácii vstupnej amplitúdy** na kolísanie rýchlosti nárastu čela impulzu spôsobuje neistotu časovej informácie – **walk**. Z hľadiska minimalizovania vplyvu rozptylu vstupnej amplitúdy vplyvom šumov (jitter) by mal byť prah nastavený omnoho vyššie ako základná úroveň - 0V a z hľadiska minimalizovania vplyvu kolísania amplitúdy (walk) by mala byť poloha prahu čo najbližšie k základnej úrovni - 0V. Teda sú to evidentne **protichodné požiadavky**. Z hľadiska presnosti určenia referenčného okamihu z tvaru čela impulzu je **najvhodnejšie nastavenie diskriminačnej hladiny pri najstrmšom náraste amplitúdy**, teda v okolí ~ tretiny amplitúdy impulzu. Voľba vhodnej metódy získania referenčného časového impulzu závisí od tvaru signálu – od trvania čela impulzu a veľkosti kolísania amplitúdy impulzu. Pre spresnenie určenia referenčného okamihu výskytu impulzu sa používa:

- Nelineárne „saturované“ **zosilnenie impulzu**;
- **Nulový diskriminátor**, ktorý generuje impulz v okamihu prechodu bipolárneho impulzu cez nulovú úroveň;
- **CF diskriminátor so slediacim prahom**, ktorý je úmerný amplitúde impulzu a môže byť nastavený v okolí ~ tretiny amplitúdy impulzu, teda pri najstrmšom náraste amplitúdy.

Koincidenčný obvod je súčinové logické hradlo, ktorého úlohou je špecifikovať časový vzťah vstupných impulzov, počas ich krátkodobej prítomnosti. V rozličných experimentálnych zariadeniach vzniká často potreba potlačiť koincidenčný signál ak sa, v určitom okamihu, súčasne vyskytne **blokovací antikoincidenčný impulz**.

Časová rozlišovacia schopnosť diskriminátorov a koincidenčných obvodov sa charakterizuje schopnosťou rozlíšiť dva za sebou sledujúce impulzy. **Mŕtva doba diskriminátora** je minimálny interval oneskorenia medzi impulzmi, pri ktorom diskriminátor ešte registruje impulzy ako oddelené udalosti. Ak je interval medzi dvoma impulzami už o niečo kratší, tak diskriminátor prestane registrovať impulzy ako oddelené udalosti.

Presnosť s akou koincidenčný obvod umožňuje rozhodnúť o súčasnom výskyte registrovaných udalostí je určená časovým rozlíšením. Pre amplitúdovo štandardizované obdĺžnikové impulzy sa používa tzv. **elektronické časové rozlíšenie**. Obvod pokladá výskyt 2 impulzov za súčasný, ak sa vzájomne predbiehajú alebo oneskorujú maximálne o interval ich trvania.. Pre impulzy, ktoré nemajú obdĺžnikovitý tvar, poprípade nemajú jednotnú veľkosť amplitúdy, tak ako to býva pri impulzoch z rozličných detektorov, sa používa tzv. **fyzikálne časové rozlíšenie**, určené na polovičnej výške závislosti oneskorených koincidií. V dôsledku konečného trvania intervalu časového rozlíšenia sa registrujú koincidenčným obvodom nielen **skutočné (pravé) koincidenčné udalosti N_c** ale aj **náhodné koincidenčné udalosti**, ktoré spôsobujú impulzy, ktoré sa náhodne vyskytujú v rámci intervalu rozlíšenia. V tých prípadoch, keď je početnosť náhodných koincidií porovnateľná s početnosťou skutočných koincidií nemožno ich existenciu zanedbať, resp. je treba s nimi počítať. Pre meranie s vysokou štatistickou dôveryhodnosťou treba mať:

- buď veľkú aktivitu vzorky alebo zvoliť dostatočne dlhú dobu merania tak, aby sa získala veľká početnosť pravých koincidií;
- okrem toho koincidenčný obvod by mal mať **malé časové rozlíšenie**.

Ak sledované udalosti vznikajú následne, hoci veľmi rýchlo, za sebou, časové rozlíšenie nemôže byť príliš krátke, aby sa bez strát mohli zaregistrovať všetky korelované udalosti. Okrem tohoto základného fyzikálneho ohraničenia treba mať ešte na zreteli aj špecifiká detekčného systému: oneskorenie signálu na výstupe detektora voči inicializačnej udalosti, ktoré je charakteristické štatistickými fluktuáciami, ako sú napr. trvanie zberu elektrónov a diér, trvanie dosvitu scintilátora, trvanie preletu elektrónov cez fotonásobič a pod. Stupeň vplyvu týchto fluktuácií (**walk**) na presnosť určenia časového okamihu závisí od spôsobu tvarovania signálu z detektora. Druhou príčinou zvyšujúcou nepresnosť definovania okamihu vzniku udalosti (**jitter**) je oneskorenie spôsobené kolísaním amplitúdy impulzu.

Časové rozlíšenie koincidenčného obvodu možno skontrolovať na základe:

- **krivky oneskorených koincidií**, t.j. na základe nameranej závislosti početnosti impulzov na výstupe obvodu v závislosti od vzájomného oneskorenia vstupných impulzov,
- pomocou náhodných koincidií.

Najjednoduchší spôsob merania časových intervalov dlhších ako 500ns je **priamou metódou start-stop**, založenou na meraní počtu N periód T_0 znamej hodinovej (a tiež aj stabilnej) frekvencie $f_0=1/T_0$, ktoré sa uložia medzi príslušný start - stop impulzmi. Konečná rýchlosť preklápania obvodov v počítadlách ohraničuje zvyšovanie časovacej frekvencie. Preto pre meranie veľmi krátkych časových intervalov namiesto priameho t/D prevodu sa používajú **nepriame metódy prevodu**, založené na:

- použitie **prevodu $t \rightarrow A$** , teda pomocou **prevodníka** typu **TAC**. Časový interval sa najprv prekonvertuje na inú analógovú veličinu, najčastejšie na amplitúdu impulzu na kondenzátore, ktorá sa potom presne odmeria napr. pomocou mnohokanálového analyzátora.
- "rozťahnutie" krátkeho meraného intervalu pomocou expandéra impulzu na dlhší, jednoduchšie merateľný, alebo použitím presnejšej interpolačnej metódy merania času, teda pomocou **prevodníka typu TADC**.



Návrat z acrobat readera - ❌ (zatvorením okna)