

9 ZOSILŇOVAČ A PREDZOSILŇOVAČ

UČEBNÉ CIELE

Študent by mal vedieť charakterizovať signál na výstupe detektora v tvare náboja a prúdového impulzu a popísať postup k získaniu informácie o energii ionizujúceho žiarenia, charakterizovať rozdiely pri použití napäťového, prúdového alebo nábojového predzosilňovača, charakterizovať výhody a nevýhody spojenia detektora z predzosilňovačom pomocou oddeľovacieho kondenzátora a prostredníctvom jednosmerného spojenia, charakterizovať potrebné vlastnosti predzosilňovača ako súčasti spektrometra, charakterizovať vlastnosti „rýchleho“ a spektrometrického výstupu predzosilňovača, charakterizovať amplitúdu a tvar signálu z predzosilňovača a možnosti jeho ďalšej úpravy, objasniť spôsoby zníženia úrovne šumu pomocou aktívnych filtrov a pomocou úpravy tvaru impulzov integračným a derivačným článkom, objasniť problémy pri registrovaní udalostí s vysokými početnosťami, vedieť sa rozhodnúť medzi úpravou tvaru signálu na unipolárny alebo bipolárny impulz, poznať cesty k zmenšeniu možnosti superpozície impulzov, charakterizovať potrebné vlastnosti zosilňovača ako súčasti spektrometra.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Celkový náboj z detektora, prúdový impulz, napäťový, prúdový alebo nábojový predzosilňovač, výstup pre „rýchly“ a pre spektrometrický signál, testovací vstup, optimalizácia pomeru signál / šum, stabilizácia základnej úrovne signálu, eliminácia superpozície impulzov.

9.1 PREDZOSILŇOVAČ

Signál z detektorov ionizujúceho žiarenia môže byť reprezentovaný nábojom, prúdovými alebo napäťovými impulzmi, ktoré majú v sebe zakódovanú informáciu o sledovanom fyzikálnom jave. Tak napríklad početnosť impulzov charakterizuje intenzitu žiarenia, z amplitúdového rozdelenia impulzov možno získať informáciu o energetickom spektre žiarenia, z tvaru impulzu možno usudzovať na typ žiarenia a pod.

Vo väčšine detektorov má impulzný signál na výstupe detektora malú amplitúdu a treba ho zosilniť. Tak napríklad polovodičový detektor potrebuje na vytvorenie páru elektrón – diera energiu $\omega_{ed} \sim 3,3\text{eV}$. Ak nabitá častica stratila v citlivom objeme detektora napr. energiu $\Delta W = 1\text{MeV}$ vytvorilo sa tým $Q = Ne = \Delta W / \omega_{ed} = 3,3 \cdot 10^5$ párov elektrón – diera. Po úplnom zbere náboja od elektrónov $Q = N \cdot e = 3,3 \cdot 10^5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 4,84 \cdot 10^{-14}\text{C}$ bude na výstupe detektora s vlastnou kapacitou detektora $C_d = 20\text{pF}$ a parazitnou montážnou kapacitou $C_p = 25\text{pF}$ maximálne amplitúda napätia:

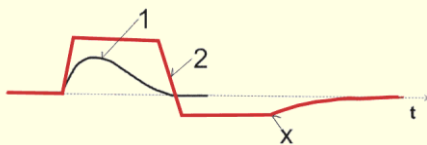
$$U_{\max} = Q / (C_d + C_p) = 4,84 \cdot 10^{-14} / [(20 + 25) \cdot 10^{-12}] = 1,07\text{mV}.$$

V ionizačnej komore so vzduchovou náplňou, kde je potrebná energia na vytvorenie páru elektrón – kladný ión $\omega_{ie} \sim 25\text{eV}$, je amplitúda impulzu o rád $(\omega_{ie} / \omega_{ed})$ menšia, takže potrebnosť zosilnenia je ešte vyššia. V proporcionálnom detektore

využívajúcom plynové zosilnenie je v porovnaní s ionizačnou komorou amplitúda väčšia $10^3 - 10^5$ krát, vo fotonásobiči je typické zosilnenie $10^7 - 10^8$ a požiadavky na zosilnenie sú ešte menšie.

9.1.1 Vstupný obvod zosilňovača

Každý zosilňovač má určitý, tzv. **dynamický rozsah**, v ktorom je výstupná amplitúda signálu lineárne závislá od vstupnej amplitúdy. Pri amplitúde signálu málo prevyšujúcej dynamický rozsah dochádza k zhoršeniu linearity, až pri vstupe príliš veľkej amplitúdy impulzu dôjde k obmedzeniu výstupnej amplitúdy, v dôsledku toho, že tranzistory sa dostanú do nasýteného (saturovaného) alebo nevodivého stavu. Po skončení trvania príliš veľkej amplitúdy signálu, dodaný prebytočný náboj, ktorý spôsobil saturáciu vstupných obvodov zosilňovača, sa rozptyľuje, čo následne predlžuje trvanie impulzu, podobne ako na obr. 9-1. Preťaženie vstupných obvodov, okrem lineárneho skreslenia, tiež spomaľuje činnosť zosilňovača.



Obr. 9-1.

Vplyv preťaženia zosilňovača príliš veľkou amplitúdou:

- 1 - Tvar impulzu z výstupu zosilňovača pri vstupnej amplitúde v rámci dynamického rozsahu zosilňovača.
- 2 - Pri príliš veľkej amplitúde môže dôjsť až k obmedzeniu amplitúdy a preťaženiu vstupných obvodov zosilňovača.
- X - Dôsledok procesu rozptyľovania prebytočného náboja je vznik podkmitu amplitúdy.

Často je "užitočný" zosilňovaný impulzný signál malej amplitúdy doprevádzaný impulzmi podstatne väčšej amplitúdy, napr. impulzmi vzniknutými rôznymi zhukmi nasuperponovaných impulzov, alebo inými, napríklad sieťovými poruchami, ktoré nemožno vylúčiť z pozorovania. Veľkosť zosilnenia býva nastavená s ohľadom na zosilňovanie impulzov s malou amplitúdou a preto pri vstupe veľkej amplitúdy impulzov dôjde k obmedzeniu ich výstupnej amplitúdy a tiež k saturovaniu vstupu zosilňovača a následnému predĺženiu impulzu, v dôsledku trvania rozptyľovania dodaného prebytočného náboja. Vhodnou voľbou zapojenia možno zmenšiť citlivosť **vstupných obvodov zosilňovača** na **preťaženie** a následné spomalenie zosilňovača. Napríklad diferencný zosilňovač je minimálne citlivý na preťaženie, lebo pri zväčšení prúdu cez jeden tranzistor sa zmenší prúd cez druhý tranzistor a pretože celkový emitorový prúd je limitovaný nemôže dôjsť k preťaženiu.

9.1.2 Náboj z detektora ako vstupný signál

Signál z detektora ionizujúceho žiarenia má obecné tvar krátkych prúdových impulzov o trvaní od 100ps do 10us, v závislosti od rozmerov a typu detektora. Celkový náboj Q , obsiahnutý v prúdovom impulze $i_d(t)$, je úmerný energii ΔW , odovzdanej časticou alebo kvantom citlivému objemu detektora:

$$\Delta W \approx Q = \int i_d(t) dt$$

Na získanie potrebnej informácie o energii treba preto vykonať integráciu prúdového signálu $i_d(t)$. Technicky sa takáto integrácia dá realizovať s využitím prechodového javu na kondenzátore rôznym spôsobom, závislým predovšetkým od

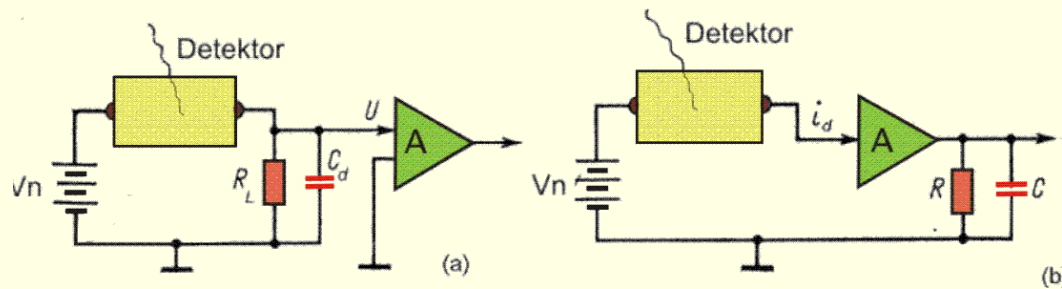
podmienok experimentu, ktorý určí, ktorý kondenzátor hrá úlohu akumulátora náboja pre integráciu. Podľa toho formálne má predzosilňovač vlastnosti:

- napätového zosilňovača;
- prúdového zosilňovača;
- nábojového zosilňovača.

Najčastejšie predstavuje integračný RC článok, podľa obr. 9-2a, výstup detektora s pracovným rezistorom R_L a kondenzátorom $C_d=(C_{det}+C_{vs})$, kde zložená kapacita C_d predstavuje kapacitu detektora C_{det} spolu s kapacitou prislúchajúcej montáži C_{vs} . Výstupné napätie na RC článku je integrálom vstupného priebehu napätia pri splnení podmienky $U_2 \ll U_1$, čo možno splniť, ak časová konštanta $R_L(C_{det}+C_{vs}) \gg t_c$ bude veľka voči dobe zberu t_c náboja v detektore.

Kapacita $C_d=C_{det}+C_{vs}$ je daná konštrukciou detektora a prevedením vstupu zosilňovača, čím je limitovaná amplitúda $U_{max}=Q/C_d$. Na splnenie podmienky voľby veľkej časovej konštanty $R_L C_d \gg t_c$ treba teda použiť vysoký odpor R_L pracovného rezistora detektora. Pri voľbe $R_L \approx \infty$ možno získať maximálne amplitúdu $U_{max}=Q/C_d$. Po integrovaní prúdu $i_d(t)$, s použitím integračného článku $R_L C_d$, sa napätový impulz zosilňuje ďalej pomocou **napätového zosilňovača** (obr. 9-2a) s vysokým vstupným odporom $R_{vs} \gg R_L$, aby sa neznižoval výsledný odpor na výstupe detektora. Pri vhodnej voľbe bude $R_L // R_{vs} \sim R_L$ a amplitúda napätia na vstupe zosilňovača bude približne rovnaká ako pôvodná amplitúda napätia $U_1 = I_d R_L$. **Prúdový impulz $i_d(t)$ sa teda integruje priamo na výstupe detektora** pomocou článku $R_L C_d$ a získaný napätový signál sa potom zosilňuje.

- Iná možnosť vykonania operácie integrovania, až po predbežnom prúdovom zosilnení, teda s odporom R a kondenzátorom C odlišným od tých, ktoré sú použité v obvode detektora, teda pomocou integračného článku $RC \neq R_L C_d$, je znázornená na obr. 9-2b. Potrebná **integrácia sa teda vykoná až na výstupe tohto zosilňovača, po predbežnom prúdovom zosilnení**. Pri tomto spôsobe je vstupný odpor prúdového zosilňovača malý, takže časová konštanta vstupu, ktorá je spojená s parazitnými kapacitami a kapacitou detektora je menšia a môže byť rovnaká ako trvanie zberu náboja, resp. trvanie záblesku scintilátora a preto tvar prúdového impulzu z detektora len málo ovplyvňuje. Impulzy majú teda krátke trvania, najčastejšie niekoľko desiatok nanosekúnd, v závislosti od druhu použitého detektora a môžu sa analyzovať aj s veľké početnosti impulzov. S takýmito krátkymi impulzmi možno uskutočniť rôzne operácie časovej selekcie (oddelenie nežiadúcich udalostí pomocou koincidenčných a antikoincidenčných obvodov) a až po výbere vhodných udalostí ich transformovať na dlhšie napätové impulzy. Pri krátkom tvare impulzov sa menej môžu superponovať amplitúdy impulzov a dôjsť tak k následnému skresleniu amplitúdovej informácie.
- Integráciu možno realizovať aj pomocou integrátora s operačným zosilňovačom – **nábojovým zosilňovačom**. Vďaka veľkému zosilneniu operačného zosilňovača A_u pre integrovanie má rozhodujúci vplyv podstatne **dlhšia efektívna časová konštanta $\tau_i = R_L C_{sv}(1+A_u) \sim \infty$** . Okrem toho je **amplitúda $U_2 \sim Q/C_{sv}$ na výstupe nábojového predzosilňovača** (obr. 4-24) **už nezávislá od kapacity detektora C_d** . Toto eliminovanie závislosti zosilnenia od kapacity detektora C_d je dôležité pre polovodičové detektory, nakoľko ich kapacita $C_d \sim S/(U_{VN})^{0,5}$ závisí od plochy S detektora a nepriamoúmerne závisí od napájacieho napätia U_{VN} , čím môže pri zmene režimu napájania dôjsť k zmene amplitúdy výstupného napätového impulzu a zmenšeniu presnosti stanovenia amplitúdy impulzu.

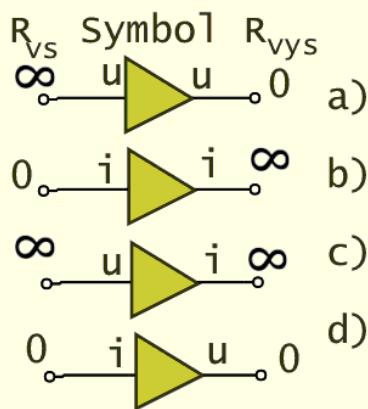


Obr.9-2.

Možnosti integrácie prúdového impulzu z polovodičového detektora:

- na vstupe $R_L C_d$ predzosilňovača a vytvorený napätový impulz sa potom ďalej zosilňuje napätovým zosilňovačom (s vysokým vstupným odporom);
- po zosilnení impulzu prúdovým zosilňovačom (s malým vstupným odporom) dochádza na výstupe prúdového zosilňovača k integrácii pomocou RC člena.

Vstupný a výstupný odpor predzosilňovača možno ovplyvniť jednak voľbou zapojenia tranzistora, napr. SB alebo SK a jednak spätnou väzbou. Obrázok 9-3 ilustruje vplyv rôzneho typu spätnej väzby na vstupný R_{vs} a výstupný odpor R_{vyst} zosilňovačov. Pomocou napätovej, resp. prúdovej spätnej väzby možno ovplyvniť výstupný odpor R_{vyst} a pomocou sériovej resp. paralelnej spätnej väzby možno ovplyvniť vstupný odpor R_{vs} . Spätná väzba ovplyvňuje aj šírku frekvenčného pásma zosilňovača a tým jeho operačnú rýchlosť. Šumy sa však pôsobením spätnej väzby nedajú zmenšiť, lebo sa rovnako zosilňujú ako signál a preto pomer signál/šum - S/N nezávisí od spätnej väzby.



Obr. 9-3.

Schematické zobrazenie vplyvu typu spätnej väzby na vstupný R_{vs} a výstupný odpor R_{vyst} (0 – nízky odpor, ∞ - vysoký odpor) u 4 základných typov zosilňovačov:

- Napätový zosilňovač;
- Prúdový zosilňovač;
- Prevodník napätia na prúd;
- Prevodník prúdu na napätie.

9.1.3 Príklady obvodov predzosilňovača

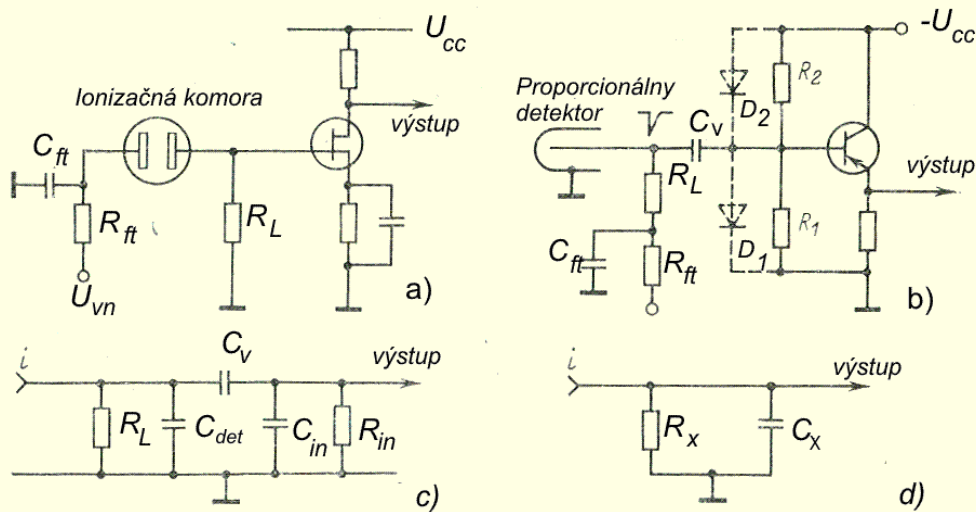
9.1.3.1 Spojenie detektora s predzosilňovačom

Obrázok 9-4 ilustruje spôsob, akým možno zosnímať signál z pracovného odporu detektora na vstup elektronickej aparatúry. Toto spojenie detektora so zosilňovacím obvodom môže byť:

- Galvanické - pomocou jednosmernej väzby** (obr.9-4a) V tomto prípade je potom pracovný odpor detektora R_L elementom zosilňovacieho obvodu. Je to konštrukčne najjednoduchšie riešenie, s menším počtom súčiastok. Nie je použiteľné v prípade, že by príliš veľký zaťažovací odpor detektora bol taký

veľký, že by sa narušila normálna činnosť zosilňovacieho stupňa alebo v prípade, že je pracovný odpor pod vysokým napätím tak ako na obr. 9-4b.

- **cez oddeľovací kondenzátor** (obr. 9-4b). V tomto prípade sú obvody funkčne oddelené. Oddeľovací (alebo väzobný) kondenzátor musí byť dimenzovaný s dostatočnou rezervou na napätie, nesmie mať zvod, lebo aj minimálny zvodový prúd môže byť zdrojom falošného signálu na vstupe zosilňovacieho obvodu. Podobne ako pri väzbe zosilňovacích stupňov, ide o neskraslený transport signálu z detektora na zosilňovací stupeň, pre ktorý treba zvoliť časovú konštantu väzobného obvodu $C_v R_{vs} > t_i$ dlhšiu ako je trvanie t_i impulzu z detektora (R_{vs} – vstupný odpor zosilňovacieho obvodu, v prípade obr. 9-4b aj so zahrnutím odporu deliča R_1 - R_2).



Obr. 9-4.

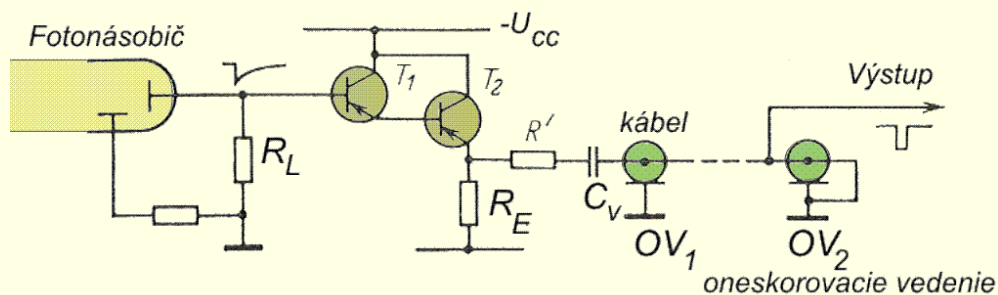
- Galvanická väzba z detektora na riadiacu elektródu FE tranzistora. (Rezistor R_L je pracovný odpor detektora. Filtračný článok $C_{ft} R_{ft}$, možno chápať ako súčasť zdroja VN a slúži na zdokonalenie vlastností zdroja VN.)
- Väzba detektora so zosilňovacím stupňom s bipolárnym tranzistorom prostredníctvom väzobného kondenzátora C_v .
- Náhradný obvod vstupného obvodu b) s oddeľovacím kondenzátorom C_v .
- Zjednodušený náhradný obvod. Pre zapojenie a) je $C_x = C_{det} || C_{vs}$ a $R_x = R_L || R_{vs}$, kde R_{vs} je vstupný odpor tranzistorového obvodu, v prípade FET je $R_{vs} = \infty$. Náhradný obvod je použiteľný aj pre prípad zapojenia b) s vhodne veľkým kondenzátorom $C_v = \infty$. V tomto prípade s bipolárnym tranzistorom je $R_{vs} = R_{12} || R_{vst}$, kde $R_{12} = R_1 || R_2$ a $R_{vst} \approx (\beta + 1) R_E$. Vplyv ochranných diód D_1, D_2 sme kvôli zjednodušeniu neuvažovali.

9.1.3.2 Obvod napäťového zosilňovača

Ako už bolo spomenuté pri napäťovom zosilňovači napäťové impulzy sa integrujú (obr.9-2a) integračným článkom $R_L C_d$ detektorového obvodu. Odpor záťaže R_L býva vysoký a volí sa v závislosti od typu detektora a podmienok zberu náboja, typicky býva 10k Ω až 1M Ω . Preto k nemu pripojený zosilňovací obvod (obr.9-4) musí mať vyšší vstupný odpor R_{vs} , aby sa nezmenšovala výsledná hodnota odporu $R_L || R_{vs} \sim R_L$ integračného článku. Jedna z možností je použitie **unipolárneho tranzistora na vstupe zosilňovacieho stupňa**, napr. tak ako v predzosilňovači k z ionizačnej komory na obr.9-4a. V proporcionálnych alebo scintilačných detektoroch, kde amplitúda impulzov nevyžaduje veľké zosilnenie, možno použiť podľa obr. 9-4b **emitorový sledovač**, ktorý síce nezosilňuje (má napäťový zisk $A_u \leq 1$) ale má vysoký vstupný odpor ($R_{vs} \approx (\beta + 1) R_E$) a nízky výstupný odpor ($R_{vys} = r_e + R_g(\beta + 1)$, kde $r_e = 1/g_m$

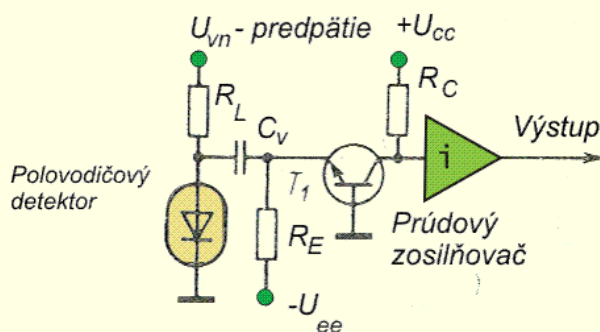
– odpor emitorového prechodu a $R_g=R_L$ – odpor zdroja signálu), takže sa javí ako vhodný element prispôsobenia vysokého vstupného odporu na nízky výstupný odpor. Odpor R_{vys} býva len desiatky ohmov.

Na obr. 9-5 je zapojenie **sledovača vhodného pre prenos vysokých početností** sledovaných udalostí zo scintilačného detektora. Darlingtonove zapojenie tranzistorov sledovača, vďaka vysokému $\beta=\beta_1\beta_2$, umožňuje použiť väčší pracovný odpor R_L detektora než pri obyčajnom emitorovom sledovači. Zároveň nízky výstupný odpor Darlingtonovho sledovača ($R_{vys}\approx r_e$, kde $r_e=1/g_m$ – odpor emitorového prechodu) umožňuje dobré prispôsobenie pre prenos impulzov cez kábel OV1. (Väzobný kondenzátor sa volí podobne ako v zapojení na obr. 9-4b). Dobré prispôsobenie k vlnovému odporu prenosového vedenia OV₁ umožňuje použiť na prijímacej strane kábla ďalší krátky úsek kábla OV₂, ako oneskorovacie vedenie ukončené skratom, na tvarovanie krátkych, „prakticky obdĺžnikov“ impulzov (o trvaní závislom na dĺžke použitého úseku vedenia OV₂) s amplitúdou, úmernou energii ΔW , odovzdanej časticou alebo kvantom citlivému objemu detektora, avšak vďaka krátkemu trvaniu impulzu, len málo citlivú na skreslenie odmeranej amplitúdy vplyvom možnej superpozície impulzov pri vysokých početnostiach.



Obr. 9-5.

Darlingtonove zapojenie emitoroveho sledovača na prispôsobenie pracovného odporu scintilačného detektora k vlnovému odporu prenosového kábla OV1. Druhý kábel OV2, so skratom sa používa ako tvarovací obvod na skrátenie trvania impulzu.



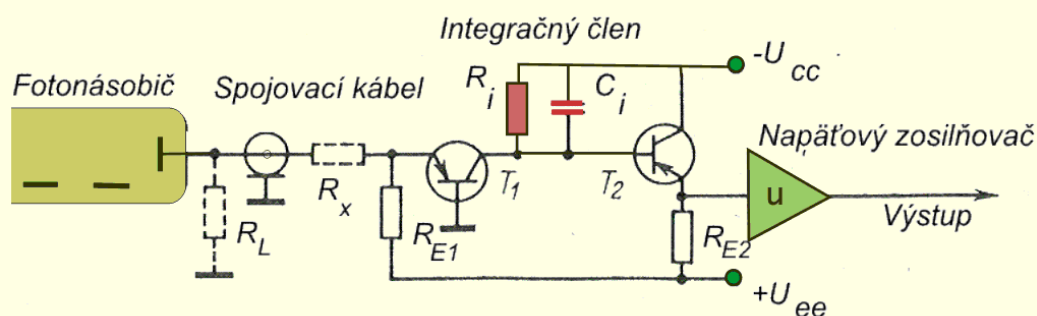
Obr. 9-6.

Vstupný obvod prúdového zosilňovača (s tranzistorom v zapojení so spoločnou bázou) pre polovodičový detektor. Jeho vstupný odpor ($R_{vs}\approx r_e\approx 200\Omega$; kde $r_e=1/g_m$ – odpor emitorového prechodu) je malý, čo zabezpečuje aj pri väčšej kapacite detektora $C_d\approx 500\text{pF}$ malú časovú konštantu $R_{vs}C_d=0,1\mu\text{s}$ a tým umožňuje aj zosilnenie vysokých početností impulzov. Pre voľbu väzobnej kapacity C_v platia podobné podmienky voľby ako na obr. 9-4

9.1.3.3 Obvod prúdového zosilňovača

V niektorých aplikáciách „rýchlych“ detektorov (scintilačných a polovodičových detektorov pre časovú analýzu) je vhodné zachovať pôvodné krátke trvania impulzov z detektora a použiť prúdový zosilňovač. Podobne tiež postupujeme v prípade, keď je detektor z nejakej príčiny vzdialený od elektronickej aparatury. Po kábli sa prenášajú krátke impulzy zosilnené prúdovým zosilňovačom (obr. 9-6). Tieto impulzy sa tvarujú integračným článkom až po presune cez kábel v ďalšej časti zosilňovača (obr. 9-7).

Pri transporte prúdových impulzov je vhodné použiť zosilňovač s malým vstupným odporom R_{vs} , aby sa ľahko splnila podmienka, že časová konštanta vstupného obvodu $R_{vs}C_d \leq t_i$ s celkovou kapacitou detektora $C_d \sim (C_{det} + C_{in})$ bude kratšia ako trvanie impulzu t_i . Vhodným vstupným obvodom pre prúdové zosilňovača je **zapojenie so spoločnou bázou**. Obr. 9-6 ilustruje zapojenie prúdového zosilňovača pre polovodičový detektor, v ktorom je použitý na prvý zosilňovací stupeň tranzistor so spoločnou bázou. Na obr. 9-7 je analogický príklad spracovania impulzov zo scintilačného detektora. Impulzy z fotonásobiča sa po prenose cez spojovací kábel najprv zosilnia prúdovým zosilňovačom. Až po tomto zosilnení krátkych impulzov sa integrujú článkom $R_i C_i$ v kolektore tranzistora T_1 a ďalej sa zosilňujú ako napätové impulzy s dlhším trvaním tyla, ktoré závisí od integračnej konštanty $R_i C_i$.



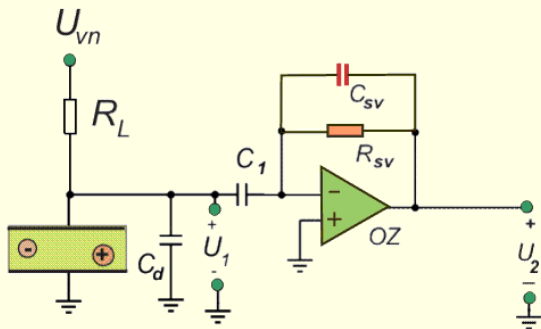
Obr. 9-7.

Príklad spracovania impulzov z detektora s fotonásobičom. Impulzy z fotonásobiča sa po prenose cez spojovací kábel najprv zosilnia prúdovým zosilňovačom (pomocou rezistorov R_x a R_L sa zlepšuje prispôbenie k vlnovému odporu kábla). Až po tomto zosilnení krátkych impulzov sa integrujú článkom $R_i C_i$ v kolektore tranzistora T_1 a ďalej sa zosilňujú ako napätové impulzy s dlhším trvaním tyla, ktoré závisí od integračnej konštanty $R_i C_i$.

9.1.3.4 Obvod nábojového zosilňovača

Integráciu náboja z detektora, pomocou prúdového alebo napätového predzosilňovača, sa používa predovšetkým u scintilačných detektorov. V polovodičovom detektore, ktorý má plochu detektora S , sa kapacita detektora mení so zmenou pracovného napätia U_{VN} detektora podľa vzťahu $C_d \sim S / (U_{VN})^{0.5}$, čím by pri zmene režimu napájania, mohlo dôjsť k zmene amplitúdy výstupného napätového impulzu a k zhoršeniu energetického rozlíšenia detektora. Úpravou spätnej väzby zosilňovača, pomocou spätňoväzobnej kapacity C_{sv} na obrázku 9-8a, možno skompenzovať závislosť zosilnenia od kapacity detektora. Takýto zosilňovací obvod s kapacitnou spätnou väzbou sa nazýva **integračný zosilňovač, resp. nábojový zosilňovač**. Na výstupe nábojového predzosilňovača je teda amplitúda

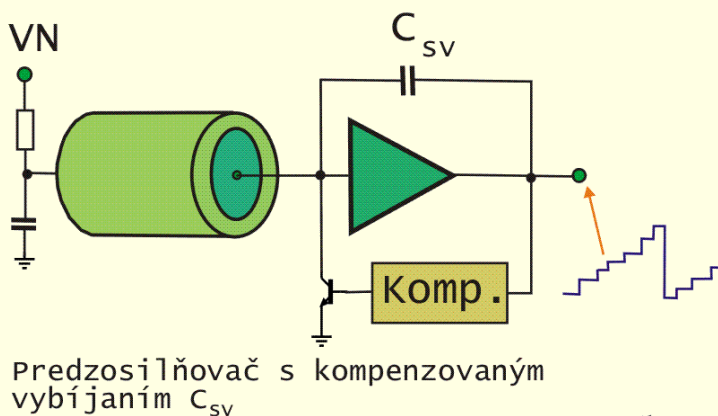
$U_2 \sim Q/C_{sv}$ už nezávislá od kapacity detektora C_d a tým aj od jednosmerného predpätia U_{VN} na detektore.



Obr. 9-8a.

Nábojový zosilňovač (integrátor) .
(Odpor R_{sv} má len pomocnú funkciu pri stabilizácii jednosmerného zosilnenia a pri vybíjaní kondenzátora C_{sv}). Pozri tiež náhradný obvod na obr. 4-24

Spätoväzobná kapacita C_{sv} v zapojení na obr. 9-8a zabezpečuje konverziu náboja na amplitúdu napätia $U_2=Q/C_{sv}$. Odpor R_{sv} slúži na nastavenie jednosmerného zosilnenia integrátora a tiež zabezpečuje vybíjanie spätoväzobného kondenzátora s časovou konštantou $R_{sv}C_{sv}$. Z hľadiska funkcie integračného zosilňovača by mal byť odpor R_{sv} veľmi veľký, z hľadiska operačnej rýchlosti spracovania impulzov z detektora by mal byť odpor R_{sv} dostatočne malý, aby sa rýchlo vybil kondenzátor. Odpor R_{sv} je však aj zdrojom tepelného šumu, ktorý zhoršuje rozlišovaciu schopnosť detektora.



Predzosilňovač s kompenzovaným vybíjaním C_{sv}

Obr. 9-8b.
Princíp funkcie vybíjania nahromadeného náboja z kondenzátora C_{sv} po dosiahnutí určitej úrovne nabitia, aby sa udržal pracovný bod OZ v rámci dynamického rozsahu predzosilňovača

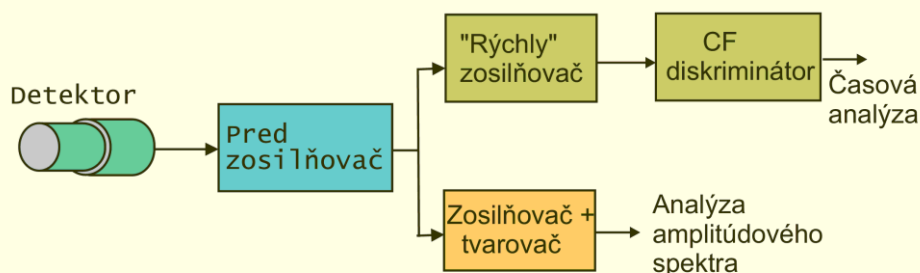
Na obr. 9-8b sa spätoväzobný odpor R_{sv} nábojového predzosilňovača odpája počas normalnej činnosti integračného predzosilňovača a zapája sa v prestávke medzi impulzami, keď možno vybiť náboj z kondenzátora C_{sv} . Ovládanie procesu pripájania a odpájania spätoväzobného odporu R_{sv} je ovládané pomocou komparátora so spínacím tranzistorom. Keď je odpor R_{sv} odpojený, tak náboj na kondenzátore sa hromadí a zvyškové napätie na výstupe sa skokovite začne blížiť k hornej hranici dynamického rozsahu predzosilňovača a hrozilo by skreslenie zosilnenia, v dôsledku saturácie tranzistorov predzosilňovača. Kompenzačný obvod po určitom náraste zostatkového napätia na kondenzátore zopne tranzistorový spínač, čím sa rýchlo vybije kondenzátor a obvod je pripravený na ďalšiu činnosť. Vybíjanie integračného kondenzátora C_{sv} sa môže vykonávať popísaným spôsobom **opakovane po dosiahnutí určitej úrovne nabitia kondenzátora alebo po každom zosilnenom impulze** sa rýchlou fotodiódou LED osvetľuje prechod hradlo - emitor

tranzistora JFET a pomocou takejto optoelektronickej spätnej väzby sa následne vybíja integračný kondenzátor C_{sv} a koriguje sa náboj na kondenzátore. Takýto predzosilňovač s kompenzovaným vybíjaním kapacity C_{sv} sa žargonovo nazýva nábojový **predzosilňovač s automatickým resetom** spätoväzobného kondenzátora C_{sv} .

9.1.4 Predzosilňovač ako súčasť aparatury

Na základe vyššie uvedených zosilňovacích obvodov sa zhotovujú samostatne vyrábané moduly predzosilňovačov pre univerzálne použitie s rôznymi detektormi a aparaturou pre rôzny experiment. Kvôli zjednodušeniu konštrukcie a lepšiemu prispôsobeniu pre rôzne typy fyzikálnych experimentov sa **zosilňovanie realizuje v dvoch stupňoch: v predzosilňovači a následne v hlavnom zosilňovači.**

Použitím oddeleného modulu - predzosilňovača možno prekonať problém zoslabenia signálu pri jeho transporte cez dlhý kábel od detektora k zosilňovaču s analyzátorom. Predzosilňovač zosilní malé impulzy z detektora (~10 až 100 krát z polovodičového detektora a plynových detektorov, ale ~1 zo scintilačného detektora) a tiež zabezpečí prispôsobenie prenosu signálu na nízku výstupnú impedanciu dlhého kábla tak, aby bol transport signálu uskutočnený s minimálnym tvarovým a amplitúdovým skreslením.



Obr 9-9.

Príklad elektronickej aparatury s použitím predzosilňovača na spoločné zosilnenie signálu z detektora - jednak pre časovú analýzu ("rýchly" zosilňovač a CF diskriminátor), ako aj pre meranie energie ("pomalý" výstup vhodne tvarovaných impulzov pre meranie ich amplitúdy).

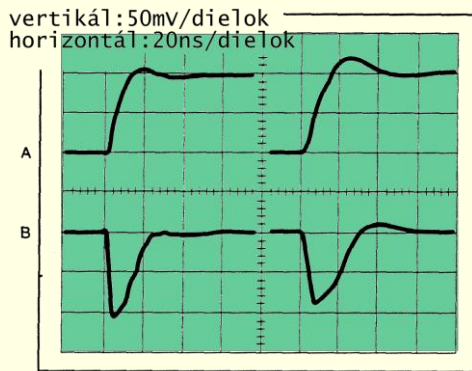
Druhý modul - hlavný zosilňovač by mal mať možnosť meniť zosilnenie (od 1 do 10^4 podľa veľkosti signálu z pripojeného detektora), mať vysokú linearitu a vysokú stabilitu zosilnenia, aby za nim zapojený obvod analyzátor mohol čo najpresnejšie identifikovať vlastnosti meraného spektra impulzov. Pre použitie hlavného zosilňovača s rôznymi typmi detektorov sa požaduje dostatočne široká šírka jeho frekvenčného pásma, s možnosťou meniť šírku pásma a tak optimalizovať pomer signál/šum (teda tvar impulzov pomocou derivačnej a integračnej konštanty) podľa typu pripojeného detektora.

Podľa spôsobu použitia v experimente sa zosilňovače rozdeľujú na:

- **spektrometrické** zosilňovače – ktorých úlohou je lineárne zosilniť a optimálne vytvárať impulzy pre následnú amplitúdovú analýzu;
- zosilňovače **s veľkou operačnou rýchlosťou** – ktoré pomáhajú z krátkeho trvania čela impulzu získať informáciu pre časovú analýzu impulzov. **Čelo impulzu** z detektora má trvanie, ktoré **zodpovedá trvaniu zberu nosičov**

náboja (napr. v polovodičovom detektore od 1 do 100ns, v plynových detektoroch od stoviek nanosekúnd do niekoľko mikrosekúnd).

Obrázok 9-9 ilustruje typické zapojenie detektora so spoločným predzosilňovačom a oddelenými zosilňovačmi pre časové a spektrometrické meranie v jadrovo - fyzikálnom experimente. Dôvodom na oddelené spracovanie informácie v časovom a amplitúdovom kanále sú **rozdielne požiadavky na optimálny tvar impulzu pre časové a spektrometrické merania**. Predzosilňovač býva spoločný pre oba kanály.

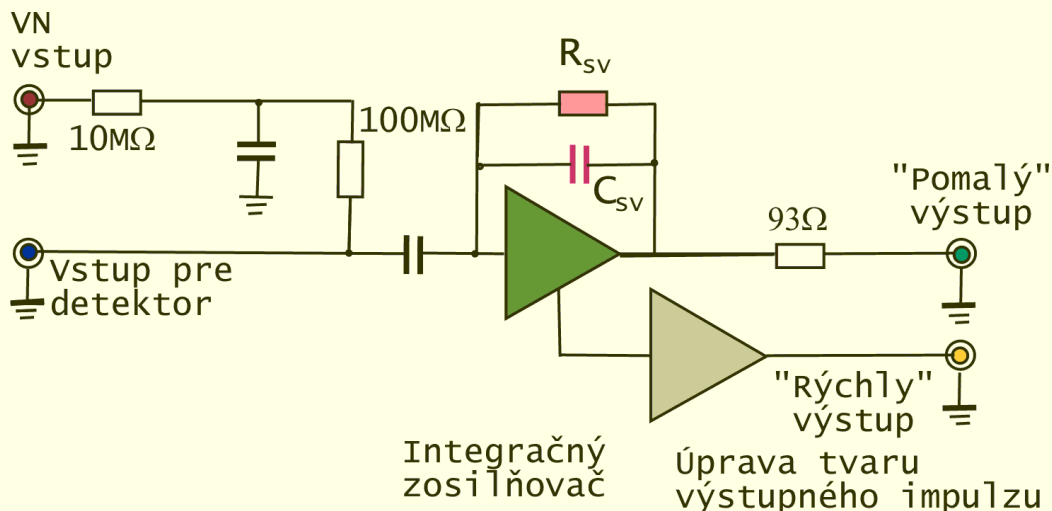


Obr. 9-10.

Tvary impulzov na výstupoch predzosilňovača:

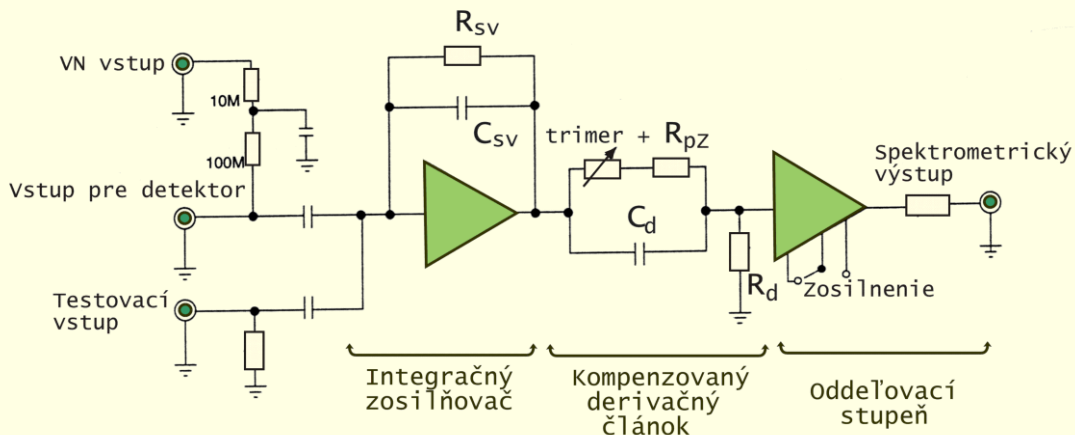
- pre časovú analýzu (B: pri $C=10\text{pF}$, D: pri $C=100\text{pF}$), keď nositeľom zaujímavej informácie je okamih výskytu impulzu;
- pre spektrometriu (A, C), keď nositeľom zaujímavej informácie je amplitúda ustáleného impulzu;

Predzosilňovač na obr. 9-11 a obr. 9-12 má len malé zosilnenie, minimálne tvaruje zosilňované impulzy a slúži hlavne na prispôbenie prenosu impulzov po kábli k hlavnej meracej aparatúre. Základom modulu predzosilňovača je zapojenie zosilňovacieho obvodu so spätnou väzbou, pomocou ktorej (obr. 9-3) možno prispôbiť vstup predzosilňovača s výstupom detektora. Predzosilňovače, podľa typu spätnej väzby, bývajú **napätové, prúdové alebo nábojové**. (Obidva príklady predzosilňovačov na obr. 9-11 a obr. 9-12 sú však nábojové.) Optimálne je použiť ako vstupný tranzistor predzosilňovača unipolárny tranzistor (FET), pre jeho veľký napätový zisk a nízky šum pri veľmi vysokom vstupnom odpore (na obr. 9-11 a obr. 9-12 je detail tranzistora skrytý v symbole pre zosilňovač).



Obr. 9-11.

Schematické zapojenie nábojového predzosilňovača pre kremíkové detektory s "rýchlym" a "pomalým" výstupom. VN vstup slúži na pripojenie pracovného napätia, pracovný odpor detektora $R_L=100\text{M}\Omega$ je súčasťou predzosilňovača. Detektor sa pripája pomocou zvláštneho konektora. Odpor 93Ω na výstupe spektrometrického kanála slúži na prispôbenie k vlnovému odporu kábla $Z=100\Omega$. Prispôbenie pre "rýchly" kanál je zrejme "schované" v oddeľovacom zosilňovači.

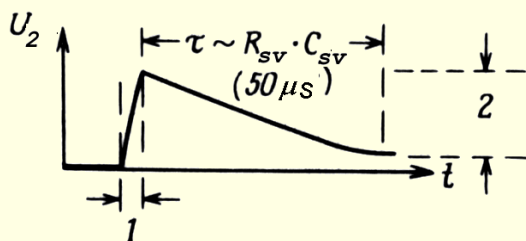


Obr. 9-12.

Modifikácia zapojenia predzosilňovača s obrázku 9-11, ktoré namiesto väzobného kondenzátora používa kompenzovaný derivačný článok $(R_{pz}||C_d)R_d$. Oddeľovací zosilňovací stupeň na výstupe má dvojestupňovo prepínateľné zosilnenie. Testovací vstup slúži pre kalibračné účely.

Kvôli univerzálnosti sa používajú 2 rôzne typy výstupov predzosilňovača:

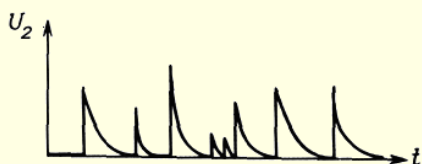
- jeden, tzv. „**rýchly**“ alebo tiež **časový výstup**, na ktorom je tvar impulzu veľmi blízky tvaru vstupného signálu a
- druhý tzv. „**spektrometrický**“ alebo tiež **energetický výstup**, ktorý má z dôvodov vykonávania integrácie prúdu z detektora s časovou konštantou $25\mu s - 500\mu s$ tylo, tak ako na obr. 9-13, s podstatne dlhším spádom než vstupný impulz.



Obr. 9-13.

Tvar impulzu na výstupe nábojového zosilňovača.

- 1 - trvanie čela (trvanie zberu náboja) $\sim 0,1-100ns$
 - 2 - amplitúda, napr. $10-25mV/MeV$
- τ - časová konštanta $R_{sv}C_{sv} \sim 50\mu s$ určuje trvanie tyla impulzu.



Obr. 9-14.

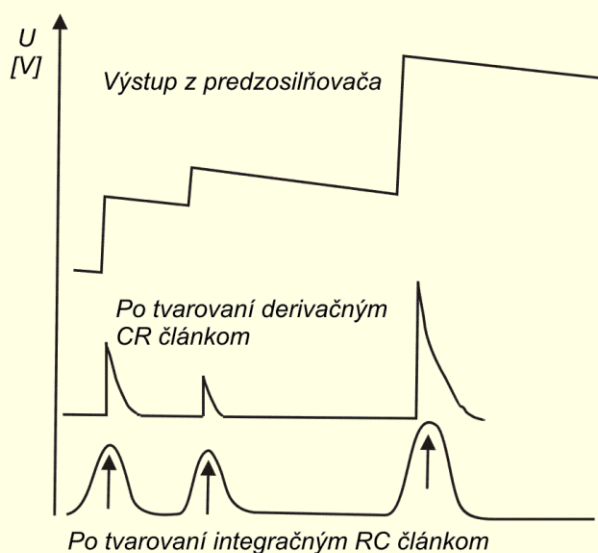
Tvar sledu impulzov z výstupe nábojového zosilňovača **pri stredne veľkej záťaži (početnosti)**. Impulz z obr. 9-13 (v inej mierke na časovej osi) je jeden z týchto zobrazených impulzov.

Obrázok 9-14 ukazuje, v inej mierke na časovej osi, ako môže vyzerat' postupnosť niekoľkých impulzov na výstupe nábojového predzosilňovača pri vyššej početnosti impulzov. Dlhý spád impulzov môže byť príčinou superpozície tyli impulzov, podobne ako na obr. 9-15. Superpozícia impulzov môže byť aj príčinou vzniku kolísania základnej jednosmernej úrovne a mať za následok skreslenie merania amplitúdy impulzov. Na skrátenie impulzov, tak ako ilustruje obrázok 9-15,

možno použiť derivačný CR článok, alebo ďalší derivačný článok v tvare kompenzovaného derivačného obvodu, tak ako v predzosilňovači na obrázku 9-12.

Prispôbenie výstupu predzosilňovača k vlnovému odporu kábla, ktorý privedie signál k hlavnému zosilňovaču, je na obrázku 9-11 a obr. 9-12 zrealizované pomocou na výstup zaradeného sledovača. Pretože výstupný odpor sledovača je okolo 1-10 Ω je potrebné, na dokonalé prispôbenie k vlnovému odporu kábla (50 - 100 Ω), dodať na výstup ešte sériovo zapojený rezistor na dokompenzovanie. V zapojení predzosilňovača na obr. 9-11 je to odpor 93 Ω .

Kvôli kontrole činnosti alebo na hrubú energetickú kalibráciu spektrometrickej aparatúry možno využiť špeciálny **testovací vstup predzosilňovača** na obr. 9-12. Ako testovací impulz sa používa skokový impulz s veľmi krátkym trvaním čela impulzu (a veľmi dlhým trvaním tyla). Testovací impulz vstupuje cez malú väzobnú kapacitu ($C_T=1\text{pF}$ – ktorá sa rýchlo nabije a vybije) tak, aby sa vytvoril náboj $Q=C_T U$ (napríklad 1pC/V). Pre presnú kalibráciu sa dokonca niekedy používa vonkajší presnejší kalibračný kondenzátor.



Obr. 9-15.

Tvar impulzov z výstupu nábojového zosilňovača **pri vyššej záťaži (početnosti)**. Superpozícií impulzov možno zabrániť skrátením trvania impulzu pomocou derivačného CR článku. Informácia o energii zakódovaná v amplitúde sa pritom zachová. Ďalšie dotvarovanie impulzu pomocou integračného RC článku sa uskutoční v hlavnom zosilňovači.

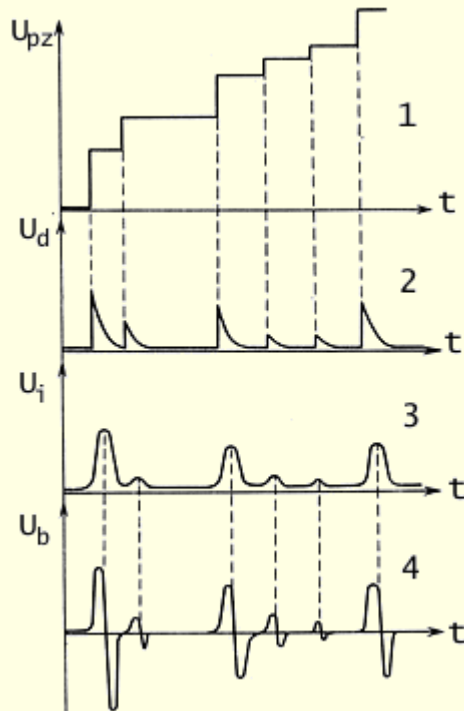
9.2 HLAVNÝ ZOSILŇOVAČ

Hlavný zosilňovač sa v jadrovej elektronike používa:

- **Na ďalšie zosilnenie spektrometrického signálu z predzosilňovača** z úrovne mV na úroveň 0,1 – 10V, vhodnú pre amplitúdovú analýzu. Aby bolo možné použiť rozličné detektory v rôznych oblastiach energii máva hlavný zosilňovač regulované zosilnenie. V starších typoch zosilňovačov sa regulácia zisku vykonáva pomocou prepínačov - atenuátorov, v modernejších zosilňovačoch sa namiesto deličov napätia s prepínačmi používajú operačné zosilňovače s prepínateľným stupňom veľkosti spätnej väzby. Vstupný stupeň zosilňovača by mal každopádne byť malým zdrojom šumov, aby pri veľkom zosilnení sa nezhoršovalo energetické rozlíšenie.
- **Na optimalizáciu pomeru signál/šum** pomocou zmeny šírky frekvenčného pásma zosilňovača (pomocou derivačnej a integračnej konštanty) tak, aby to vyhovovalo typu pripojeného detektora.

- Na **úpravu tvaru impulzov** (obr. 9-16) pre ďalšiu amplitúdovú analýzu pri rôznych rýchlostiach registrácie udalostí, keď hrozí nebezpečenstvo superpozície amplitúdy impulzov alebo posuvu základnej nulovej úrovne.

Na zosilňovač určený pre spektrometrické merania sú kladené vysoké požiadavky na **linearitu** a dlhodobú **stabilitu** zosilnenia. Ak sa na meranie amplitúdy impulzov používajú 8 – 16 bitové ADC prevodníky amplitúdových analyzátorov požaduje sa linearita zosilnenia lepšia ako 10^{-4} .



Obr. 9-16.

Úprava tvaru impulzov v zosilňovači. Tvar impulzov:

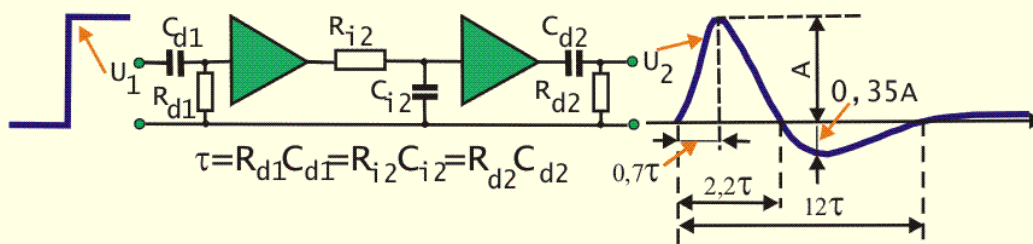
- 1) Na výstupe predzosilňovača
- 2) Po skrátení impulzu pomocou jedného derivačného článku CR
- 3) Po úprave impulzu pomocou niekoľkých prechodov cez integračný článok RC.
- 4) Po úprave impulzu na bipolárny tvar.

9.2.1 Potlačenie šumu

9.2.1.1 Skompenzovaný derivačný článok

Signál-1 z výstupu predzosilňovača na obr. 9-16 má vďaka vhodnej mierke zobrazenia tvar stupňovitých zmien napätia, hoci ide v podstate o exponenciálne klesajúce priebehy s veľmi dlhou časovou konštantou. Tieto stupňovité zmeny, ktoré sa vyskytujú štatisticky sa môžu nasuperponovať na seba a aj keď majú malú amplitúdu pri nasuperponovaní jedného impulzného skoku na druhý môžu tvoriť veľkú sumárnu amplitúdu. Pretože nositeľom užitočnej informácie o energii je len skoková zmena amplitúdy napätia, možno sa vyhnúť skresleniu spôsobenému superpozíciou dlhých impulzov tak, že sa budú ďalej zosilňovať a následne aj analyzovať len skrátené impulzy (v najjednoduchšom prípade upravené pomocou derivačného CR článku), v ktorých zostáva zachovaná bezo zmeny pôvodná informácia o skokovitej zmene napätia (priebeh 2 na obr. 9-16).

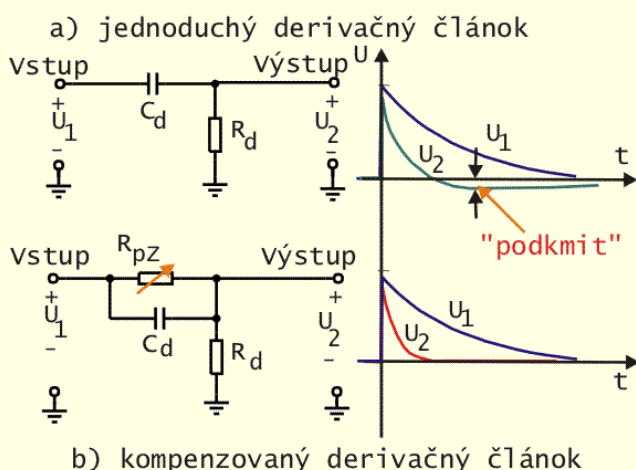
Pri použití scintilačných detektorov má tylo impulzu z detektora exponenciálny priebeh, závislý od trvania dosvitu τ_S scintilátora (obr.9-18a). Ak takýto impulz pôsobí na vstupe derivačného C_dR_d článku, ktorý má časovou konštantou $\tau_d=C_dR_d \sim \tau_S = \tau$ blízku trvaniu dosvitu τ_S scintilátora, tak vznikne jav podobný dvojnásobnému tvarovaniu derivačným článkom C_dR_d .



Obr. 9-17.

Dôsledkom dvojnásobného tvarovania pomocou derivačného článku s rovnakou časovou konštantou je podkmit impulzu.

Obr.9-17 demonštruje ako použitie ďalšieho derivačného článku, teda **dvojnásobného tvarovania CR článkom s rovnakou časovou konštantou, vedie k vzniku podkmitu** v priebehu ušľachovania amplitúdy. Na obr. 9-17 pri tvarovaní impulzného skoku článkami $C_{d1}R_{d1} - C_{i2}R_{i2} - C_{d2}R_{d2}$ vzniká podkmit 35% amplitúdy. V dôsledku prechodového javu podkmitu vzniknutá zmena základnej "nulovej" úrovne, sledujúca tvarovaný signál, môže byť, v prípade s malým oneskorením sledujúceho ďalšieho impulzu, **príčinou menej presného odmerania amplitúdy impulzu**, tak ako na obr. 9-19b.



Obr. 9-18.

Porovnanie tvarovania impulzu zo scintilačného detektora pomocou: CR článku, skompenzovaného CR článku.

S cieľom zmenšiť počet derivačných CR článkov sa často u scintilačných detektorov, kde nie je potreba príliš veľkého zosilnenia, používa jednosmerná väzba medzi zosilňovacími stupňami, bez prítomnosti ďalších väzobných kondenzátorov. Použitie jednosmerne viazaných zosilňovacích stupňov je však obmedzené použiteľné len pri menších zosilneniach. Pri väčšom zosilnení v jednosmerne viazanom zosilňovači vzniká možnosť vzniku nežiadúceho posunu predpätia tranzistorov zosilňovača vplyvom kolísania teploty, alebo kolísania napájacieho napätia. V zosilňovačoch s väčším zosilnením sa teda nedá vyhnúť použitiu oddeľovacích kondenzátorov a tým aj viacnásobnej prítomnosti derivačného CR článku v trase zosilňovania. Každý väzobný kondenzátor a vstupný odpor nasledujúceho zosilňovacieho stupňa tvoria derivačný CR článok, ktorý sa zúčastní na tvarovaní impulzov. Väzobné kondenzátory slúžiace na oddelenie jednotlivých zosilňovacích stupňov z hľadiska jednosmerného napätia musia dobre prepúšťať striedavý impulzný signál, avšak časová konštantá týchto CR článkov by mala byť

tak volená, aby bola odlišná od trvania dosvitu scintilátora, poprípade bola odlišná od časovej konštanty iného derivačného CR článku .

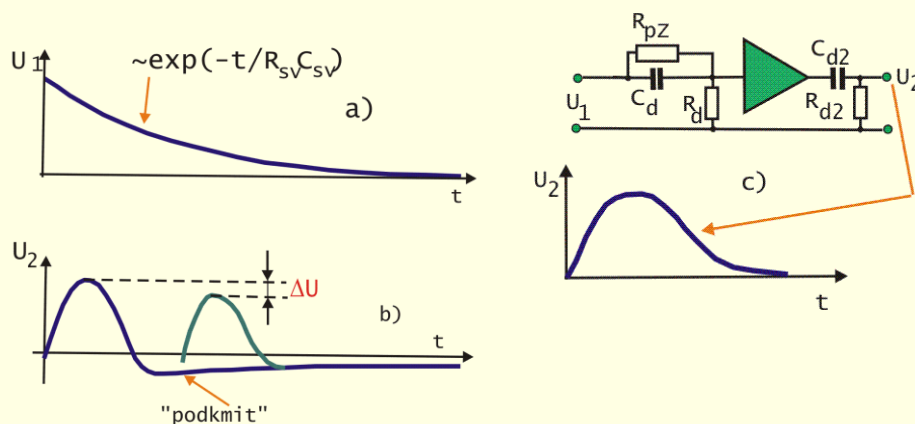
Vhodnou úpravou derivačného CR člena na tzv. **skompenzovaný derivačný článok podľa** obr. 9-18b možno dosiahnuť, že prechodový jav ustalovania amplitúdy bude bez podkmitu. Anglický názov metódy - Pole Zero Cancellation - zrušenie pólu nulou - naznačuje postup, v ktorom sa vykompenzuje účinok člena polynómu prechodovej funkcie z čitateľa (tzv. pólu) členom polynómu funkcie z menovateľa (tzv. nulou). Skompenzovaný derivačný článok na obr. 9-18b tvorí okrem základného $C_d R_d$ derivačného článku ešte rezistor R_{pZ} , paralelne zapojený s kondenzátorom C_d . Ak na vstupe pôsobí skok napätia $u_1(t)=U_m \cdot \mathbf{1}(t)$ pre operátorový tvar $U_2(p)$ výstupného napätia $u_2(t)$ platí:

$$U_2(p) = \frac{U_m}{\left(p + \frac{1}{\tau_s}\right)} \cdot \frac{R_d}{R_d + \left(R_{pZ} \parallel \frac{1}{pC_d}\right)} = \frac{U_m}{\left(p + \frac{1}{\tau_s}\right)} \cdot \frac{p + \frac{1}{C_d R_{pZ}}}{\left(p + \frac{1}{\tau_s}\right) \left(p + \frac{1}{C_d (R_{pZ} \parallel R_d)}\right)};$$

$$\text{ak } \tau_s \sim C_d R_{pZ} \text{ je } \left(p + \frac{1}{\tau_s}\right) = \left(p + \frac{1}{C_d R_{pZ}}\right) \Rightarrow$$

$$U_2(p) \approx \frac{U_m}{\left(p + \frac{1}{C_d (R_{pZ} \parallel R_d)}\right)}; \Rightarrow u_2(t) = U_m \cdot \exp\left(-\frac{t}{C_d (R_{pZ} \parallel R_d)}\right);$$

Pri vhodnej voľbe $\tau_s = R_{pZ} C_d$ je $(p + 1/\tau_s) = (p + 1/C_d R_{pZ})$ a výsledný časový priebeh impulzu bude mať exponenciálny tvar bez podkmitu.



Obr. 9-19.

Ilustrácia vzniku podkmitu z polovodičového detektora po zosilnení v nábojovom zosilňovači na obr. 9-9:

a) Trvanie čela impulzu z predzosilňovača závisí predovšetkým od trvania zberu elektrónov a dier a je krátke - niekoľko nanosekúnd. Trvanie tyla impulzu určuje časová konštantá $R_{sv} C_{sv}$ v obvode spätnej väzby.

b) Ilustrácia chyby pri meraní rýchlo za sebou sledujúcich impulzov v prípade použitia $C_d R_d$ tvarovania s rovnakou časovou konštantou - $C_d R_d \sim R_{sv} C_{sv}$.

c) Úprava zapojenia vstupného derivačného článku $C_d R_d$ na skompenzovaný derivačný člen na vstupe predzosilňovača. Pri voľbe $R_{sv} C_{sv} = R_{pZ} C_d$ sa odstráni podkmit, podobne ako pre impulz zo scintilačného detektora

Obr.9-19a demonštruje podobný problém vzniku podkmitu pri dvojnásobnom tvarovaní derivačným článkom s rovnakou časovou konštantou ako u scintilačného detektora. Trvanie tyla impulzu **z nábojového predzosilňovača** určuje časová konštantá $R_{sv}C_{sv}$ v obvode spätnej väzby. Ak má tvarovacia časová konštantá derivačného C_dR_d článku, niekde v zosilňovači, rovnakú časovú konštantu ako je časová konštantá $R_{sv}C_{sv}$, vzniká podkmit v priebehu ustáľovania amplitúdy.

V nábojovom predzosilňovači na obr. 9-12, ktorého impulz má exponenciálny spád s časovou konštantou $R_{sv}C_{sv}$ (obr. 9-19) bol namiesto derivačného článku C_dR_d , s približne rovnakou časovou konštantou $C_dR_d \sim R_{sv}C_{sv}$ použitý skompenzovaný derivačný článok. Pri voľbe $R_{sv}C_{sv} \sim R_{pz}C_d$ sa odstráni podkmit, podobne ako pre impulz zo scintilačného detektora. Oddeľovacie kondenzátory v zosilňovačoch by mali byť tak zvolené, že neovplyvňujú tvar impulzu, ale aj s ohľadom na duplicitný výskyt rovnakých časových konštant väzobných derivačných článkov.

Príklad 9-1

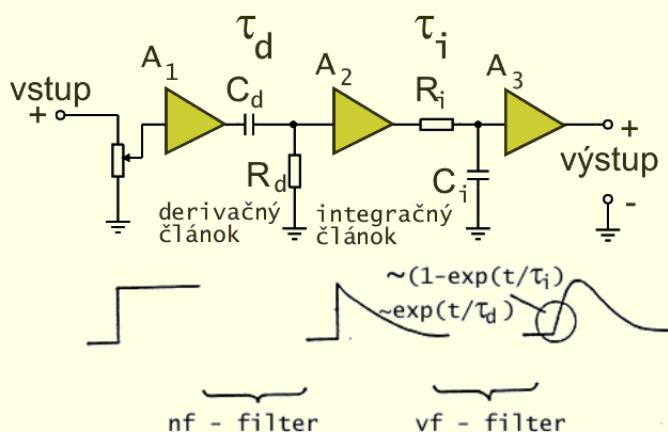
Na vstupe derivačného C_dR_d článku na obr. 9-18a pôsobí impulz $u_1(t) = U_m e^{-(t/\tau_s)}$, ktorého exponenciálny spád určuje časová konštantá τ_s trvania dosvitu τ_s scintilátora. Časová konštantá derivačného článku $\tau_d = C_dR_d \sim \tau_s$ je rovná trvaniu dosvitu τ_s scintilátora. Určite výstupné napätie $u_2(t)$.

Riešenie

$$u_1(t) = U_m e^{-(t/\tau_s)}; \Rightarrow U_1(p) = \frac{U_m}{p(p + \frac{1}{\tau_s})};$$

$$U_2(p) = \frac{U_m}{p(p + \frac{1}{\tau_s})} \frac{p}{(p + \frac{1}{\tau_d})} = \frac{U_m}{(p + \frac{1}{\tau})};$$

$$u_2(t) = U_m t e^{-t/\tau}.$$



Obr. 9-20.

Náhradný obvod zosilňovača, so šírkou frekvenčného pásma $\Delta f = f_h - f_d$, ktorej:

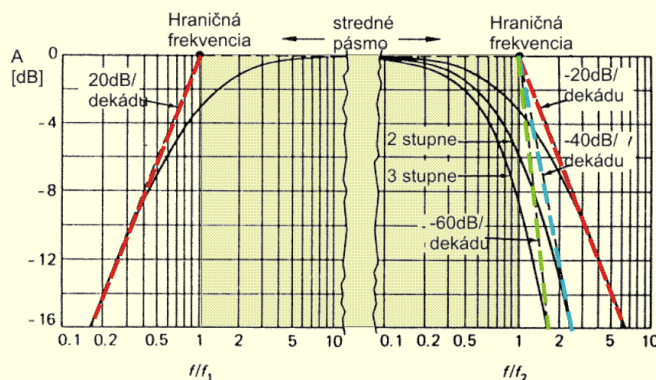
- horná hraničná frekvencia f_h závisí od vlastností hornopriepustného RC (vf) filtra (integračného článku s časovou konštantou τ_i);
- dolná hraničná frekvencia f_d závisí od vlastností dolnopriepustného CR (nf) filtra (derivačného článku s časovou konštantou τ_d).

9.2.1.2 RC – CR tvarovanie v zosilňovači

Na obr. 9-20 sú znázornené podstatné súčasti zosilňovača, ktoré charakterizujú jeho vlastnosti – zosilnenie skoncentrované v trojuholníkovom symbole a frekvenčné charakteristiky zosilňovača pomocou filtračných článkov – dolno priepustného a hornopriepustného. Obrázok 9-21 ilustruje typický priebeh amplitúdovej frekvenčnej charakteristiky zosilňovača so zlomovými frekvenciami f_h a f_d , ktoré vymedzujú šírku frekvenčného pásma $\Delta f = f_h - f_d$, v ktorej sa zosilňujú signály s maximálnym zosilnením bez výrazného tvarového skreslenia. **Minimálna šírka frekvenčného pásma $\Delta f = f_h - f_d$ zosilňovača bude pri $f_d \sim f_h$.**

Obrázok 9-21 tiež ilustruje ako sa mení frekvenčná charakteristika po pridaní ďalších zosilňovacích stupňov: každý pridaný zosilňovací stupeň, s rovnakou zlomovou frekvenciou f_h , zostrmuje charakteristiku (zmena sklonu asymptoty z 20dB/dekádu na 40dB/dekádu pri 2 stupňoch a až 60dB/dekádu pri 3 stupňoch).

Spektrálna hustota "bieleho" (tepelného a výstrelového šumu nezávisí od frekvencie, takže v šume sú zastúpené všetky frekvenčné zložky. Zmenšením šírky pásma zosilňovača $\Delta f = f_h - f_d$ možno vyrezať úzke pásmo frekvencií, ktoré sa budú ďalej zosilňovať a tak pri zosilňovaní zvýhodniť signál voči šumu. Dolnopriepustným CR článkom sa odfiltrujú zložky šumu s frekvenciami nižšími ako je dolná hraničná frekvencia $f_d = 1/(2\pi\tau_d)$ frekvenčného pásma zosilňovača. Pomocou hornopriepustného RC článku možno upraviť hornú hraničnú frekvenciu $f_h = 1/(2\pi\tau_h)$ zosilňovača a tým úroveň šumu odfiltrovaním frekvenčných zložiek šumu s frekvenciami $f > f_h$.



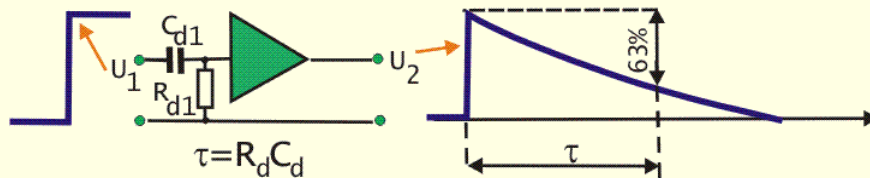
Obr. 9-21.

Príklad amplitúdovej frekvenčnej charakteristiky: 1-stupňového zosilňovača; 2-stupňového zosilňovača; 3-stupňového zosilňovača; (Sklon charakteristiky po 2 stupni zosilňovača v oblasti $f > f_h$ sa zväčšil z -20dB na dekádu frekvencie na -40dB na dekádu frekvencie. V 3-stupňovom zosilňovači je sklon -60dB na dekádu.)

Tvar signálu z detektora nemá tvar harmonickej funkcie, aký bol použitý pri meraní amplitúdovej frekvenčnej charakteristiky. Možno však použiť predstavu, že tvar signálu možno aproximovať radom harmonických funkcií s vhodnými amplitúdami. Potom by zosilňovač mal mať takú šírku pásma $\Delta f = f_h - f_d$, v ktorej hraničné frekvencie f_h a f_d , by zodpovedali významným frekvenciám z tejto aproximácie.

Názornejšiu predstavu o úprave tvaru signálu z detektora možno získať na základe aproximácie impulzného signálu z detektora skokovými zmenami amplitúdy, poprípade veľmi krátkymi obdĺžnikovými impulzmi. Skoková zmena amplitúdy dobre imituje zintegrováný prúdový impulz z detektora. Obrázok 9-22a ilustruje vplyv derivačného CR článku s časovou konštantou $\tau_d = C_d R_d$ na skrátenie trvania impulzu so skokovou zmenou amplitúdy. Obrázok 9-22b ilustruje prechodový jav nárastu amplitúdy s časovou konštantou $\tau_i = R_i C_i$. Podobne ako pri frekvenčnom

charakterizovaní prenosu zosilňovača so šírkou pásma $\Delta f=f_h-f_d$ existuje určité trvanie impulzu $\tau_d \ll t_i \ll \tau_i$, ktoré bude minimálne ovplyvnené tvarovaním $C_d R_d$ a $R_i C_i$ článkami. Obrázok 9-23 ilustruje súčasný vplyv derivačného CR a integračného RC článku s rovnakou časovou konštantou $\tau_d=C_d R_d=\tau_i=R_i C_i$. Pôsobením integračného RC článku sa, predtým vytvarovaný impulz pomocou derivačného CR článku, zaobluje na zvonovitý tvar.



Obr. 9-22a.

Derivačný $C_d R_d$ článok - jednoduchý spôsob na skrátenie trvania impulzu (skoku $\mathbf{1}(t)$).

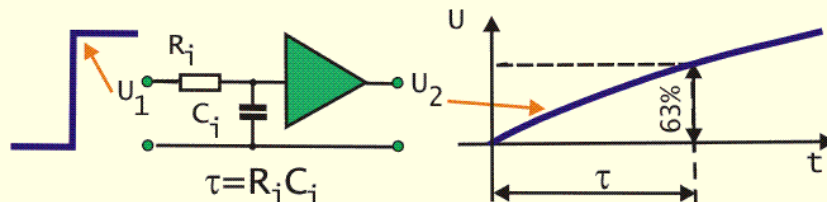
Príklad 9-2

Na vstupe derivačného článku podľa obr. 9-22a pôsobí jednotkový skok napätia $u(t)=U_0 \cdot \mathbf{1}(t)$. Charakterizujte prenosovú funkciu $G_{CR}(p)=U_2(p)/U_1(p)$ tohto tvarovacieho obvodu a určite $u_2(t)$.

Riešenie

$$G_{CR}(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{p}{(p + 1/R_d C_d)};$$

$$\text{pre } u_1(t) = \mathbf{1}(t) \Rightarrow U_1(p) = \frac{1}{p} \Rightarrow u_2(t) = e^{-t/(R_d C_d)};$$



Obr. 9-22b.

Integračný $R_i C_i$ obvod vplýva na tvar čela impulzu.

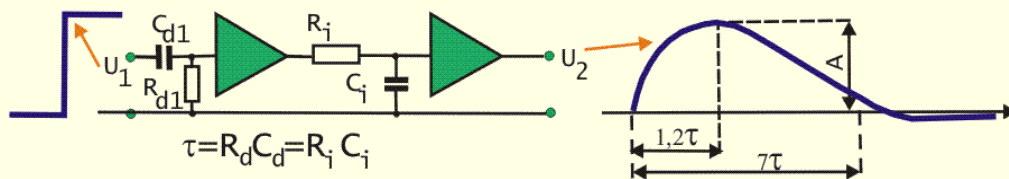
Príklad 9-3

Na vstupe integračného článku podľa obr. 9-22b pôsobí jednotkový skok napätia $u(t)=U_0 \cdot \mathbf{1}(t)$. Charakterizujte prenosovú funkciu $G_{RC}(p)=U_2(p)/U_1(p)$ tohto tvarovacieho obvodu a určite $u_2(t)$.

Riešenie

$$G_{RC}(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{1/R_i C_i}{(p + 1/R_i C_i)};$$

$$\text{pre } u_1(t) = \mathbf{1}(t) \Rightarrow U_1(p) = \frac{1}{p} \Rightarrow u_2(t) = (1 - e^{-t/(R_i C_i)});$$



Obr. 9-23.

Tvarovanie (skoku $1(t)$) článkom CR a RC. Pri použití rovnakej časovej konštanty CR a RC článku bude tvar výstupného impulzu do $1,2\tau$ tvarovať $R_i C_i$ článok a koniec impulzu od $1,2\tau$ do 7τ bude tvarovaný $C_d R_d$ článkom.

Príklad 9-4

Na vstupe zapojenia náhradného obvodu na obr. 9-20 pôsobí jednotkový skok napätia $u(t)=U_0 \cdot 1(t)$. Jednotlivé tvarovacie obvody sú vzájomne oddelené ideálnym zosilňovačmi so zosilnením $A \sim 1$ a s nekonečným vstupným a nulovým výstupným odporom, aby sa vzájomne nemohli ovplyvňovať. Charakterizujte prenosovú funkciu $G_{CR}(p) \cdot G_{RC}(p) = U_2(p)/U_1(p)$ tohto tvarovacieho obvodu a určite $u_2(t)$.

Riešenie

$$G(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{1/R_i C_i}{(p + 1/R_i C_i) \cdot (p + 1/R_d C_d)} ;$$

a) pre $\tau_d \neq \tau_i$ a $U_1(p) = 1/p$

$$U_2(p) = \frac{1}{\tau_i (p + 1/\tau_i) (p + 1/\tau_d)} \Rightarrow u_2(t) = \frac{\tau_d}{\tau_d - \tau_i} (e^{-t/\tau_d} - e^{-t/\tau_i});$$

b) pre $\tau_d = \tau_i = \tau$ a $U_1(p) = 1/p$

$$U_2(p) = \frac{1}{\tau (p + 1/\tau)^2} \Rightarrow u_2(t) = \frac{t}{\tau} e^{-t/\tau};$$

Celkove teda skoková zmena napätia $1(t)$, po prechode článku CR a zosilňovačom oddeleného článku RC má Laplaceov obraz výstupu $U_2(p)$ a časový tvar výstupného priebehu $u_2(t)$, ktorý je zobrazený na obr. 9-23:

Príklad 9-5

Na vstupe obvodu na obr. 9-24 pôsobí jednotkový skok napätia $u(t)=U_0 \cdot 1(t)$. Jednotlivé tvarovacie obvody sú vzájomne oddelené ideálnym zosilňovačmi so zosilnením $A \sim 1$ a s nekonečným vstupným a nulovým výstupným odporom, aby sa vzájomne nemohli ovplyvňovať. Určite $u_2(t)$ na výstupe tohto tvarovacieho obvodu s 1 derivačným a 2 integračnými článkami s časovými konštantami $\tau_d = C_d R_d = \tau_i = R_i C_i = \tau$.

Riešenie

$$U_2(p) = \frac{p}{(p + 1/R_d C_d) (p + 1/R_i C_i) \cdot \frac{1/R_i C_i}{(p + 1/R_i C_i)}} U_1(p);$$

a) pre $\tau_d = \tau_i = \tau$ a $U_1(p) = 1/p$

$$u_2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{\tau}\right)^2 e^{-t/\tau};$$

Priebeh $u_2(t)$ ilustruje obr. 9-24. Pridaním ďalšieho integračného RC článku sa tvar impulzu stáva symetrickejšim a má menšiu amplitúdu.

9.2.1.3 Tvar impulzu pre optimálny pomer signál/šum

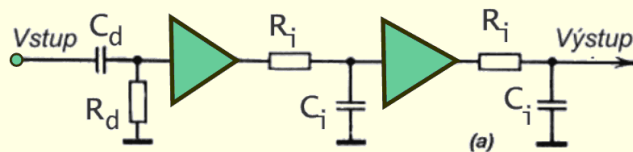
Optimálny pomer signál/šum (S/N) možno dosiahnuť pri časovej konštante $\tau_d = \tau_i = RC$, pomocou časových konštánt $\tau_i = \tau_d \sim 0,1$ až $100 \mu s$, najčastejšie voľbou

$\tau = \tau_i = \tau_d \sim 1-10 \mu\text{s}$. Vhodná voľba τ závisí od konkrétneho zloženia šumu (od veľkosti paralelnej a sériovej zložky šumu a od trvania impulzu z detektora).

Pridanie ďalšieho integračného RC článku je obdobou úpravy hornej hraničnej frekvencie $f_h = 1/(2\pi\tau_h)$ zosilňovača na obr. 9-21, ktoré vďaka strmšej frekvenčnej charakteristike v oblasti frekvencií $f > f_h$ lepšie oddeľuje šum od signálu. Pri skokovom tvare vstupného podnetu pridanie každého ďalšieho integračného RC článku podľa obrázku 9-24 upravuje impulz na symetrickejší zvonovitý tvar.

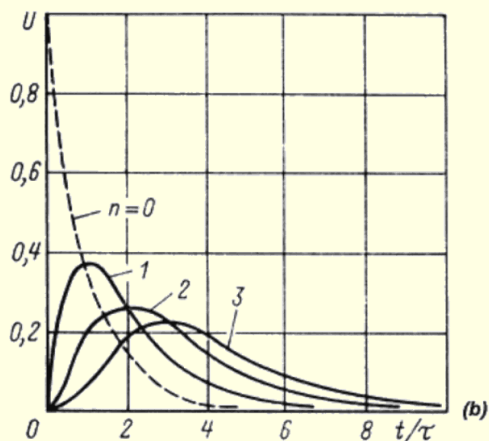
Z hľadiska dosiahnutia čo najvyššieho pomeru signál/šum mali by mať zosilňované impulzy tvar s exponenciálnym čelom a tylom podľa obr. 9-25a. Tvar impulzu na obr. 9-25a je teoretický namodelovaný tvar impulzu, ktorý je však v praxi nerealizovateľný a nevhodný pre meranie na prevodníku A/D, podobne ako aj ďalší teoretický optimálny trojuholníkový tvar impulzu na obr. 9-25b.

V tabuľke na obr. 9-25 je na ohodnotenie kvality potlačenia šumu, v dôsledku uvedeného tvarovania impulzov zavedený **pomerný koeficient šumového náboja CF**, vzťahnutý na optimálny „teoretický“ tvar impulzu z obr. 9-25a. Napríklad z obrázku 9-25d vidno, že priebeh s tvarovaním $CR+(RC)^5$ má pri $CF=1,16$ len o 4% horšie vlastnosti ako priebeh na obr. 9-25c, s omnoho náročnejším tvarovaním $CR+(RC)^n$. Na základe porovnania CF možno zväžiť či efekt pripojenia ďalšieho integračného článku bude vyvážený komplikáciou zapojenia, nakoľko každý ďalší pridaný článok musí byť oddelený operačným zosilňovačom.



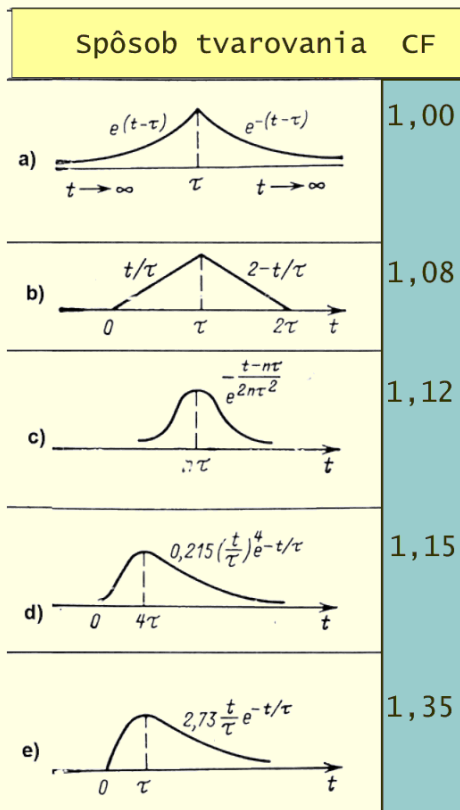
Obr. 9-24.

Príklad semi Gaussovho tvarovania pomocou $(CR+RC^n)$.



Zvyšovaním počtu integračných RC článkov sa tvar impulzu stáva symetrickejšim. V praxi nebýva počet integračných článkov väčší ako 2-3.

Túto nevýhodu možno odstrániť nahradením pasívnych filtračných článkov operačným zosilňovačom s tzv. **aktívnym filtrom** v obvode spätnej väzby. V aktívnom filtri, zhotovenom pomocou jedného operačného zosilňovača a frekvenčnej priepuste (komplikovanejšieho dvojbranu s vlastnosťami filtra prepúšťajúceho signál s určitými frekvenciami) v obvode spätnej väzby možno zhotoviť jednoduchšie požadovanú filtráciu, poprípade aj iný spôsob tvarovania, odlišný od tvaru Gaussovej funkcie (napríklad priebeh $CR+(RC)^5$ na obr. 9-25d). Na obr. 9-26 je príklad realizácie takéhoto zosilňovača, v ktorom je pasívny RC integrátor zamenený za aktívny integrátor na báze dvoch operačných zosilňovačov.



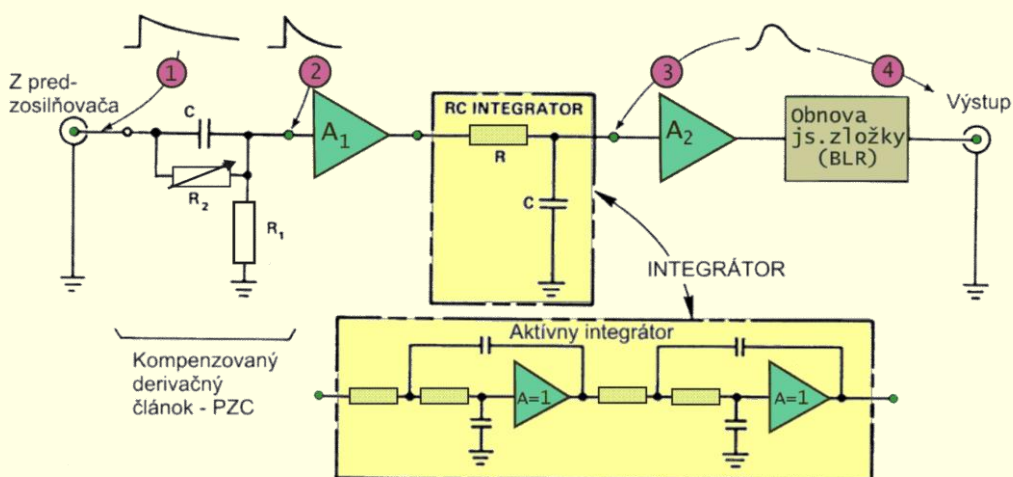
Obr. 9-25.

Porovnanie tvaru impulzov pre dosiahnutie optimálneho pomeru S/N. Ako kritérium je použitý faktor CF:

- a) optimálny "teoreticky navrhnutý" tvar,
- b) trojuholníkový impulz získaný pomocou ideálnej integrácie a oneskorenia,
- c) Gaussov tvar - výsledok tvarovania (CR+RCⁿ),
- d) Semi Gaussov tvar - výsledok tvarovania (CR+RC⁵),
- e) Tvarovanie (CR+RC)

Pre bipolárny impulz tvarovaný:

- (CR)²+RC je CF=1,68
- úsekom kábla je CF=1,38



Obr. 9-26.

Náhradný obvod hlavného zosilňovača so súčasťami:

- Vstupným tvarovaním pomocou skompenzovaného derivačného článku (PZC). Pomocou potenciometra R_2 a osciloskopu sa v priebehu experimentu prispôbi tvar impulzu aparátúre s detektorom tak, aby bol impulz bez podkmitu.
- tvarovaním pomocou aktívneho integrátora (namiesto jednoduchého integračného článku je použitý operačný zosilňovač so spätnou väzbou)
- obvodom na obnovu jednosmernej základnej úrovne (BLR) na výstupe.

Technicky realizovateľný optimálny tvarov impulzu z hľadiska dosiahnutia čo najvyššieho pomeru signál/šum je symetrický zvonovitý impulz pripomínajúci tvar Gaussovho rozdelenia na obr. 9-25c. Takýto impulz možno vytvarovať z napäťového skoku pomocou jedného derivačného článku CR a $n=20$ integračných článkov RC, z ktorých každý je oddelený operačným zosilňovačom. (Tento oddeľovací zosilňovač by mal mať vysoký vstupný odpor a nízky výstupný odpor). Nevýhodou takejto realizácie filtra z pasívnych CR a RC článkov je veľké zoslabenie amplitúdy impulzu po prechode cez n integračných článkov (a n oddeľovacích zosilňovačov, ktoré v dôsledku vneseného fázového posuvu signálu môžu ešte navyiac zhoršovať stabilitu zosilňovača aj pri nízkom celkovom zosilnení).

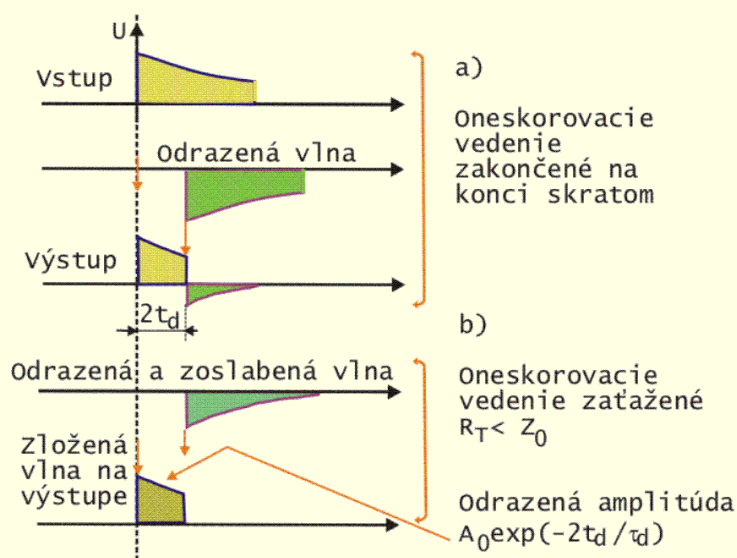
9.2.2 Tvarovanie impulzov pri vysokých početnostiach

9.2.2.1 Tvarovanie impulzov pomocou oneskorovacieho vedenia

Na skrátenie trvania "rýchlych" impulzov (s krátkym trvaním čela) možno použiť **tvarovanie impulzu pomocou oneskorovacieho vedenia**, pri ktorom sa využívajú vlastnosti **vedenia ako obvodu s rozloženými parametrami** :

- vlastné prenosové oneskorenie impulzu cez kábel o určitej dĺžke ;
- odraz na neprispôsobenom úseku vedenia.

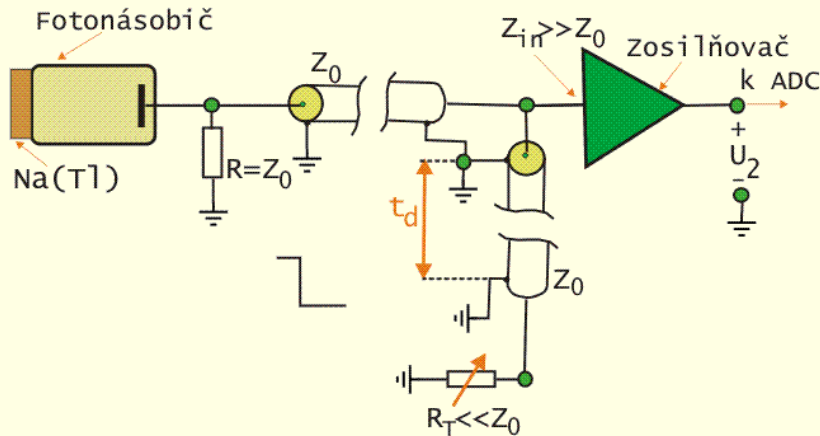
Pri dokonalom prispôbení vlnového odporu kábla Z_0 k výstupnému odporu R obvodu, v mieste pripojenia kábla $R=Z_0$, nedochádza k odrazom impulzov. Pomocou krátkeho úseku kábla, so skratom na konci, možno vytvarovať invertovaný napäťový impulz obdĺžnikovitého tvaru. Ak má krátky úsek malý útlm bude trvanie čela zodpovedať trvaníu tyla impulzu a tvar priameho a odrazeného impulzu bude prakticky zhodný.



Obr 9-27. Objasnenie spôsobu tvarovania obdĺžnikovitého impulzu o trvaní $2t_d$ pomocou úseku kábla ukončeného: a) skratom. Pokiaľ vstupný impulz nemá stálu amplitúdu vzniká podkmit. b) "skoro skratom" - malým odporom $R_T < Z_0$. Odpor R_T zoslabuje odraz, čím sa podarí odrezať podkmit.)

Obrázok 9-27a objasňuje spôsob tvarovania krátkeho impulzu pomocou úseku kábla ukončeného skratom. Úsek kábla oneskoruje prechádzajúci cez neho impulz o interval t_d . Ak je na konci úseku kábla skrat vznikne napäťový impulz opačnej polarity, ktorý sa po uplynutí intervalu $2t_d$ zloží s pôvodným impulzom a vytvaruje sa obdĺžnikovitý impulz o trvaní $2t_d$.

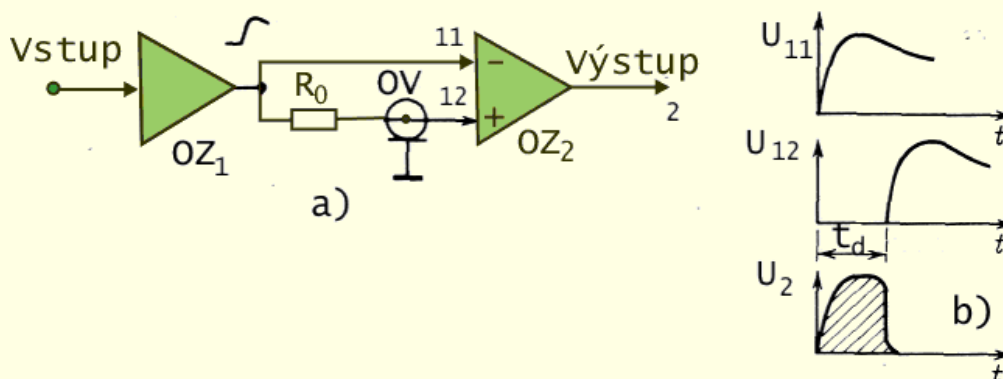
Pokiaľ vstupný impulz nemá stálu amplitúdu počas celého svojho trvania, odrazený impulz sa nezhoduje so vstupujúcim a vznikne podkmit. Obrázok 9-27b znázorňuje ako možno deformovať odrazený impulz, aby sa pokmit odstránil. Tvarovací úsek kábla nie je zakončený skratom ale malým odporom $R_T \ll Z_0$, kde R_T je oveľa menší ako vlnový odpor kábla Z_0 . Po nájdení vhodného odporu R_T možno zmenšiť odraz a tak zosúlasiť amplitúdu odrazenej vlny s poklesom vrcholu priamej vlny, čím sa podarí odrezať podkmit.



Obr. 9-28.

Skrátenie impulzu z fotonásobiča na trvanie $2t_d$ pomocou úseku kábla, ktorý je na konci kábla zaťažený malým odporom $R_T \ll Z_0$.

Obrázok 9-28 ilustruje použitie tohto spôsobu pri úprave tvaru impulzov z fotonásobiča. Ku vstupu „rýchleho“ zosilňovača je pripojený úsek kábla o dĺžke l , zakončený malým odporom $R_T \ll Z_0$. Časť impulzu sa šíri pozdĺž tvarovacieho kábla a po uplynutí intervalu $t_d = l/v$, ktorý závisí od dĺžky kábla l a rýchlosti šírenia vlny v v dielektriku kábla, dorazí ku koncu kábla, odrazí sa od skratovaného zakončenia kábla a ako invertovaný napäťový impulz sa šíri opačným smerom. Po uplynutí intervalu $2t_d$ sa tento odrazený impulz odčíta od pôvodného tak, že na vstupe zosilňovača sa získa približne obdĺžnikový impulz o trvaní $2t_d$. Pomocou nedokonalého skratu $R_T \ll Z_0$ na konci kábla možno dokorigovať tvar impulzu na bezprekmitový, tak ako na obr. 9-27b.



Obr 9-29.

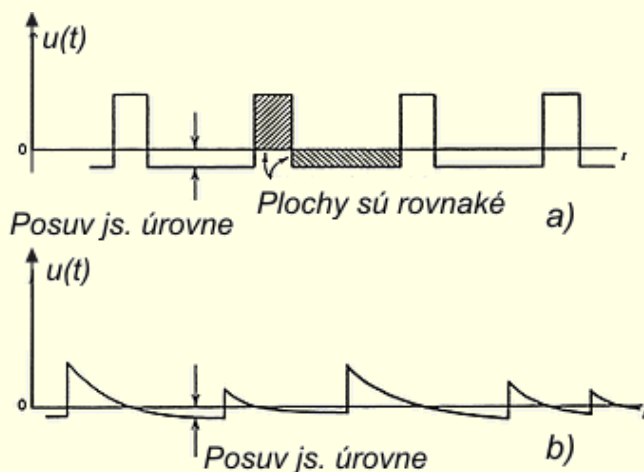
- Impulzy prichádzajúce na vstupy operačného zosilňovača OZ_2 sú vzájomne oneskorené pomocou oneskorovacieho vedenia OV o interval t_d ,
- Na výstupe operačného zosilňovača OZ_2 vzniká impulz o trvaní impulzu t_d , nakoľko impulz prechádza cez kábel OV len raz.

9.2.2.2 Tvarovanie impulzov pomocou operačného zosilňovača

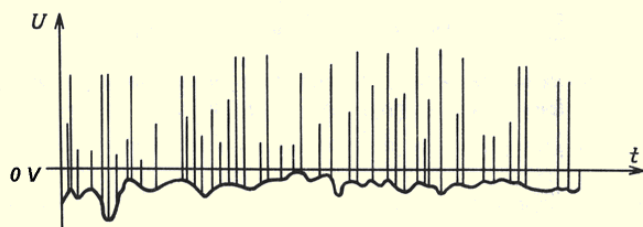
Obrázok 9-29 ilustruje inú možnosť tvarovania krátkeho obdĺžnikového impulzu pomocou „rýchleho“ operačného zosilňovača, s využitím oneskorenia impulzu t_d pri prechode cez kábel zaradený medzi dva zosilňovacie stupne OZ_1 a OZ_2 . V tomto prípade dochádza k oneskoreniu len pri jednorázovom prechode cez kábel na invertujúci vstup „rýchleho“ operačného zosilňovača OZ_2 . V zapojení na obr. 9-29a sa predpokladá, že výstupný odpor R_{vyst} oddeľovacieho zosilňovača OZ_1 je menší ako vlnový odpor kábla Z_0 a odpor $R_0 = Z_0 - R_{vyst}$ slúži na prispôsobenie odporu jednej strany kábla a tým na potlačenie nežiadúcich odrazov impulzov. Na základe odpočítania pôvodného a oneskoreného impulzu vznikne na výstupe zosilňovača OZ_2 impulz o trvaní t_d . Operačné zosilňovače OZ_1 a OZ_2 , ktoré sa používajú na vytvorenie rozdielu impulzných priebehov musia mať vysokou operačnú rýchlosť, aby len minimálne prispievali k zmene tvaru impulzu.

9.2.2.3 Základná nulová úroveň signálu

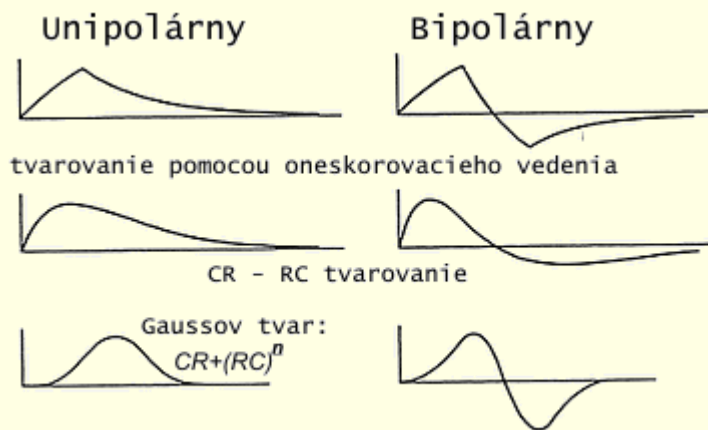
Pri vysokých početnostiach impulzov sa nestíha ustáliť prechodový jav na väzobnom kondenzátore CR článku a hromadenie náboja na sériovom oddeľovacom kondenzátore môže spôsobovať posun jednosmernej úrovne signálu. Pri pravidelnej postupnosti impulzov by posun základnej nulovej úrovne mohol vyzeráť podobne ako na obr. 9-30a, kde posunutá základná úroveň sa nastavila tak, aby plochy úmerné náboju, pod a nad základnou "nulovou" úrovňou boli rovnaké. Stály posun základnej úrovne by sa dal zakalkulovať do kalibrácie spektrometra. Problémom je náhodne sa meniaci posun základnej úrovne podľa obr. 9-31, vznikajúci pri vysokej početnosti impulzov z detektora, ktorý môže nepriaznivo ovplyvňovať presnosť určenia amplitúdy impulzu.



Obr. 9-30.
Ilustrácia vzniku posunu základnej nulovej úrovne pri:
a) pravidelne sa vyskytujúcej postupnosti obdĺžnikových impulzov
b) nepravidelne (štatisticky) sa vyskytujúcich impulzoch.



Obr.9-31.
Ilustrácia posuvu nulovej základnej úrovne na oddeľovacom kondenzátore pri vysokých početnostiach impulzov.



Obr. 9-32.

Porovnanie unipolárnych a bipolárnych impulzov, získaných na základe rôzneho tvarovania (pomocou oneskorovacieho vedenia, pomocou derivačného CR a integračného článku.)

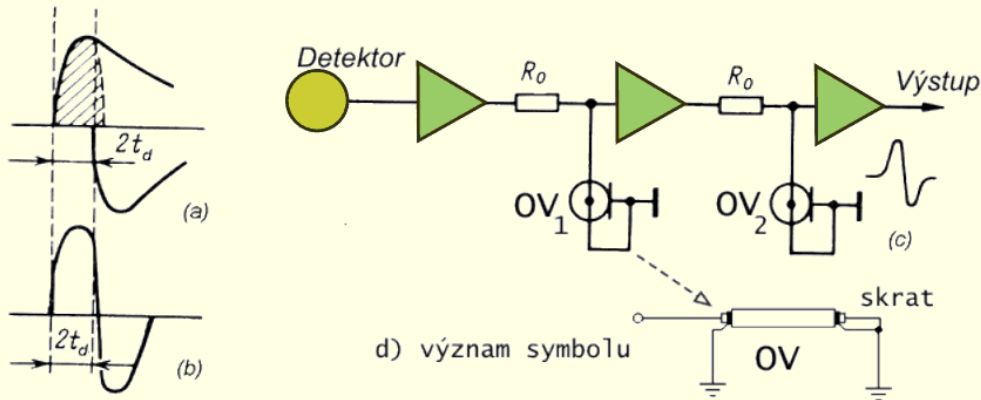
9.2.2.4 Tvarovanie bipolárnych impulzov

Posun základnej nulovej úrovne nebude vznikáť, ak sa použije bipolárny impulz, vďaka ktorému sa oddeľovací kondenzátor nabije a vybije bez vytvorenia posunu základnej úrovne. Preto sa niekedy v zosilňovači upravujú impulzy na **bipolárny tvar**, ktorý zabezpečí rýchlejšiu obnovu náboja na kondenzátoroch. **Energetické rozlíšenie** dosažiteľné s pomocou bipolárnych impulzov je **o 25 – 50% horšie** než rozlíšenie, ktoré možno dosiahnuť s pomocou unipolárnych, nie príliš často sa vyskytujúcich impulzov. Aby sa experimentátor, podľa podmienok vykonávaného experimentu, mohol rozhodnúť pre optimálnu voľbu tvarovania, na dosiahnutie čo najlepšieho rozlíšenia spektrometrickej aparatúry, býva **na paneli zosilňovača umiestnený prepínač na voľbu bipolárneho resp. unipolárneho tvarovania impulzov**, poprípade okrem konektora pre unipolárny výstup sa môže vyskytovať ešte **další bipolárny výstup**.

Obr. 9-32 znázorňuje najbežnejšie spôsoby tvarovania bipolárnych impulzov: Pre impulzy s dlhším trvaním sa využíva dvojnásobné tvarovanie derivačným CR článkom, princíp ktorého ilustruje obr. 9-17.

Pre vysoké operačné rýchlosti treba veľmi krátke bipolárne impulzy, s veľmi rýchlym návratom výstupného signálu na nulovú úroveň, aké možno vytvárať s pomocou kábla z výstupom nakrátko.

V zapojení na obr. 9-33 odpory R_0 slúžia na prispôbenie výstupu zosilňovača k vlnovému odporu tvarovacieho kábla. Druhý koniec tvarovacích káblov je zakončený nakrátko, takže na vstupe zosilňovača dôjde k skráteniu trvania vstupujúceho impulzu. Prvý zosilňovač má za úlohu oddeliť vstup od tvarovacej časti. Za jeho spoluúčasti sa zosilnený impulz dopraví na vstup druhého zosilňovača. Tu sa prechodom cez prvý tvarovací kábel podľa obr. 9-33a tvaruje z dlhšieho impulzu krátky unipolárny impulz o trvaní $\sim 2t_d$. Prítom pri prechode pôvodného impulzu cez tvarovací úsek kábla smerom ku skratovanému koncu vzniká oneskorenie t_d a o rovnaký interval t_d sa oneskorí invertovaný impulz. Tento skrátený unipolárny impulz sa po zosilnení druhým zosilňovačom rovnakým postupom podľa obr. 9-33b invertuje pomocou úseku kábla, čím vzniká druhá časť bipolárneho impulzu.



Obr. 9-33.

Dvojnásobné tvarovanie pomocou oneskorovacieho vedenia so skratom na konci:

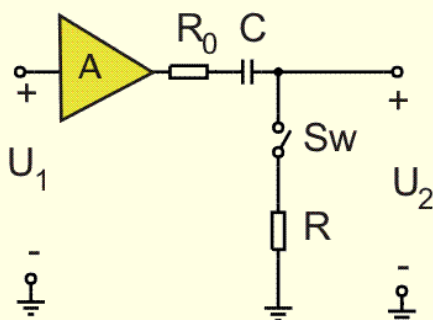
- a) Pri prvom tvarovaní sa tvaruje unipolárny impulz o trvaní $\sim 2t_d$.
- b) Pri druhom tvarovaní sa invertovaním a oneskorením $\sim 2t_d$ vytvorí druhá časť bipolárneho impulzu.
- c) Celkové zapojenie tvarovacieho obvodu.
- d) Ozrejmienie symbolu tvarovacieho kábla, zakončeného skratom.

9.2.2.5 Stabilizácia základnej úrovne

Základná nulová úroveň signálu na výstupe hlavného zosilňovača môže byť ovplyvňovaná:

- výskytom neželaných podkmitov od mnohostupňového tvarovania signálu, ktoré sa nepodarilo odstrániť pomocou skompenzovaných derivačných článkov, pretože tylo impulzov nemalo spád charakterizovaný jedinou časovou konštantou.
- zostatkovým nábojom na väzobných kondenzátoroch pri vysokých početnostiach impulzov.

Obr. 9-31 ilustruje typický **posuv a fluktuácie strednej hodnoty základnej "nulovej" úrovne** pri vysokých rýchlostiach sledovania impulzov. Pre spektrometrické meranie by základná úroveň mala byť stála (0V), pretože náhodne sa vyskytujúce fluktuácie nulovej úrovne môžu zväčšiť šírku spektrálnej krivky a tým prispieť k zhoršeniu energetického rozlíšenia



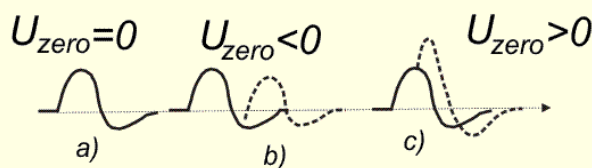
Obr. 9-34.

Princíp funkcie obvodu na obnovu základnej jednosmernej úrovne - BLR, založeného na použití kontaktu Sw relé.

Pomocou špeciálnych obvodov **na stabilizáciu (obnovu) základnej úrovne** - BLR (Base line restorer) možno zredukovať na minimum jednosmerný posuv základnej "nulovej" úrovne za väzobným kondenzátorom v prípade výskytu "zhľuku" impulzov s veľkou početnosťou. Princíp činnosti obvodu BLR, založeného na použití

kontaktu relé, ilustruje obr. 9-34. Pri nízkych početnostiach je kontakt S spínača rozpojený. Úlohou obvodu BLR je po výskyte zhluky impulzov, vo vhodných okamihoch počas absencie signálu, pomocou ovládaného spínača S, odvádzať náboj z väzobného kondenzátora C.

V moderných, tzv. **aktívnych obvodoch BLR** funkciu relé zastáva tranzistor FET, ktorý po dosiahnutí maxima impulzu (s oneskorením na trvanie štandardne očakávaného impulzu), automaticky na dobu zadanú časovou konštantou tvarovania impulzu, sa skratovať na nulový potenciál. Takýto obvod BLR na obnovu jednosmernej úrovne signálu sa najčastejšie vyskytuje **vo výstupnom stupni hlavného zosilňovača** (obr. 9-26) alebo v špeciálnom module, ktorý sa zapája za výstup hlavného zosilňovača. Je tiež potrebné, aby experimentátor mal možnosť odpojiť obvod BLR, pre prípad kontroly alebo pri meraní impulzov s nízkymi početnosťami, kde bez použitia BLR možno dosiahnuť lepšie energetické rozlíšenie.



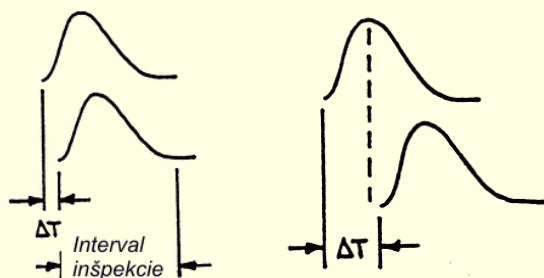
Obr. 9-35.

Fluktuácia základnej úrovne U_{zero} pri vysokých početnostiach impulzov:

- a) bez vplyvu na posuv základnej úrovne $U_{zero}=0$,
- b) superponovanie impulzu na podkmit predošlého impulzu $U_{zero}<0$,
- c) superpozícia dvoch amplitúd impulzov $U_{zero} >0$.

9.2.2.6 Potlačenie vplyvu nasuperponovaných impulzov

Okrem dlhodobého posuvu základnej "nulovej" úrovne a fluktuácie strednej hodnoty základnej " nulovej" úrovne (obr. 9-31) sa pri meraní amplitúdy impulzov nepriaznivo prejavuje aj možné **nasuperponovanie amplitúd impulzov**, ktoré sa podľa obr. 9-35 môže prejaviť predovšetkým pri vysokých početnostiach impulzov.



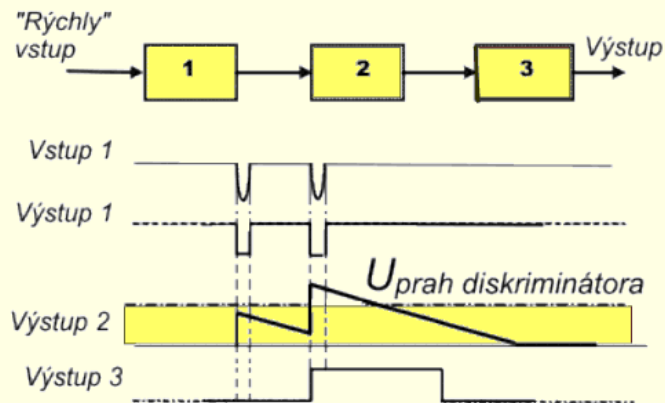
Obr. 9-36.

Ilustrácia vzájomného oneskorenia ΔT impulzov, pri superponovaní ich amplitúd:

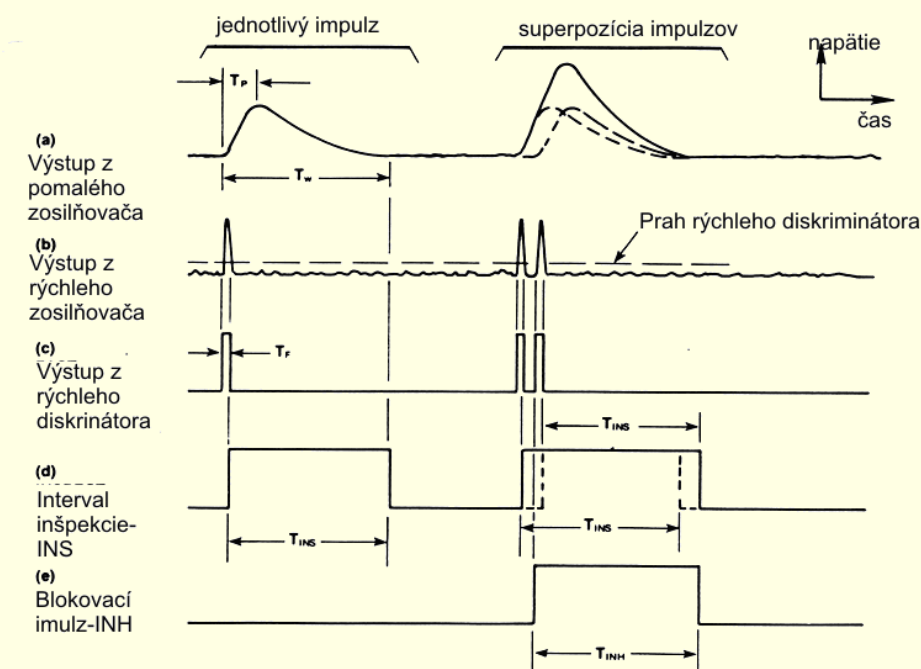
- impulzy nemožno rozlíšiť ak oneskorenie ΔT je kratšie ako trvanie čela impulzu,
- impulzy možno rozlíšiť a zablokovať ich analýzu ak oneskorenie ΔT je dlhšie ako trvanie čela impulzu.

Obr. 9-36 ilustruje možnú úspešnosť pri identifikácii nasuperponovania impulzov s ohľadom na ich vzájomné oneskorenie ΔT . S obrázku 9-36 vidno, že pokiaľ je vzájomné oneskorenie ΔT dvoch impulzov kratšie ako trvanie čela impulzu, impulzy možno len veľmi obtiažne rozlíšiť. V prípade vzájomného oneskorenia ΔT dlhšieho ako trvanie čela impulzu, impulzy možno rozlíšiť a zablokovať zaregistrovanie superpozície impulzov pomocou špeciálneho **obvodu inšpekcie nasuperponovaných impulzov**.

Obr. 9-37 znázorňuje princíp obvodu na eliminovanie nasuperponovaných impulzov, ktorý pozostáva z monovibrátora, integrátora a diskriminátora. Činnosti inšpekčného obvodu je zložená na možnosti ovládať priepustnosť impulzov z výstupu hlavného zosilňovača na analyzátor pomocou lineárneho hradla. Predzosilňovač, podobného zapojenia ako na obr. 9-11, umožňuje odoberať jednak „rýchle“ impulzy pre ovládaciu časť inšpekčného obvodu na obr. 9-37 a tiež „pomalé“ impulzy, pre potreby spektrometrie, ktoré cez hlavný zosilňovač a lineárne hradlo, podobného typu ako na obr. 4-9, prichádzajú na amplitúdový analyzátor. Lineárne hradlo môže byť vo vhodnom okamihu trvania inšpekčného intervalu zablokované impulzom z ovládacej časti obvodu inšpekcie.



Obr. 9-37. Princíp ovládacej časti inšpekčného obvodu na eliminovanie nasuperponovaných impulzov: 1) monovibrátor, 2) integrátor, 3) diskriminátor. Výstup 3 ovláda lineárne hradlo. V prípade výskytu nasuperponovaných impulzov sa cez lineárne hradlo zablokuje prístup na analyzátor.

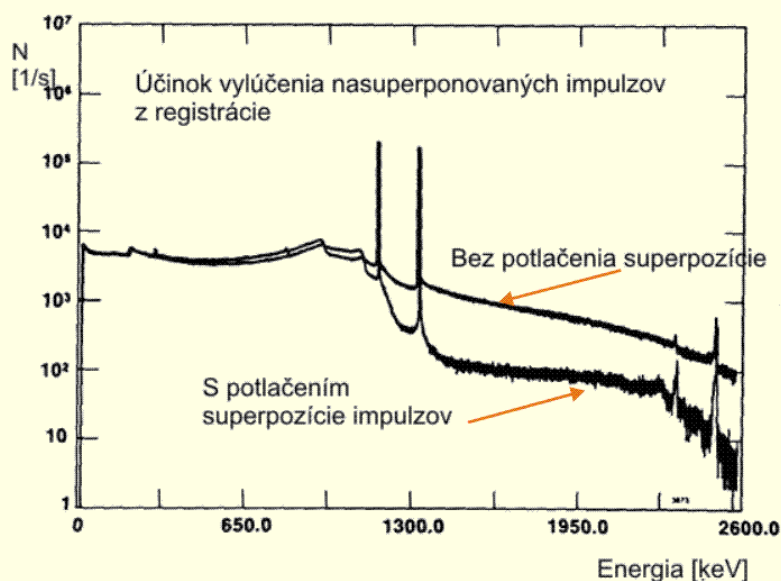


Obr. 9-38.

Základné signály sprevádzajúce činnosť inšpektora nasuperponovaných (Pile-up) impulzov

- Vstupný impulz "pomalého kanálu" s trvaním čela T_p a trvaním impulzu T_w , ktorý postupuje cez lineárne hradlo na analyzátor,
- T_F - trvanie impulzu z "rýchleho" diskriminátora,
- T_{INS} - trvanie inšpekčného intervalu,
- T_{INH} - trvanie blokovacieho impulzu, v prípade novej superpozície.

Obr. 9-38 detailnejšie objasňuje činnosť inšpekčného obvodu. Pri výskyte impulzu v „pomalom“ kanále, ktorý sa má analyzovať (obr. 9-38a) generuje sa na základe impulzu z „rýchleho“ výstupu predzosilňovača najprv krátky referenčný impulz diskriminátora (obr. 9-38c) a následne impulz inšpekčného intervalu (INS na obr. 9-38d). Ak dôjde počas inšpekčného intervalu v „pomalom“ kanále k výskytu ďalšieho impulzu hrozí, že by mohlo dôjsť k nasuperponovaniu amplitúd impulzov, inšpekčný obvod generuje blokovací impulz (INH na obr.9-38e), ktorý zablokuje priepustnosť lineárneho hradla, cez ktoré postupuje impulz ďalej na prevodník A/D. Efektívnosť potlačenia nasuperponovaných impulzov vo fyzikálnom experimente pomocou uvedeného princípu demonštruje obr. 9-39.



Obr.9-39.

Ilustračný príklad efektívnosti potlačenia nasuperponovaných impulzov pri meraní spektra ^{60}Co pomocou Ge detektora pri početnostiach okolo 50 000 registrovaných udalostí za sekundu

KONTROLNÉ OTÁZKY

1. Charakterizujte signál na výstupe detektora v tvare náboja a v tvare prúdového impulzu?
2. Objasnite príčiny používania napäťového, prúdového alebo nábojového predzosilňovača?
3. Charakterizujte výhody a nevýhody spojenia detektora z predzosilňovačom pomocou oddeľovacieho kondenzátora a prostredníctvom jednosmerného spojenia?
4. Charakterizujte vlastnosti predzosilňovača z hľadiska potrieb spektrometra?
5. Čím sa líši impulz z „rýchleho“ a spektrometrického výstupu predzosilňovača?
6. Prečo sa upravuje trvanie impulzov po vstupe na hlavný zosilňovač?
7. Objasnite spôsob zníženia úrovne šumu pomocou integračného a derivačného článku?
8. Objasnite prečo je efektívnejšia metóda zníženia úrovne šumu pomocou aktívnych filtrov než pomocou jednoduchého integračného a derivačného článku?
9. Aký je ideálny tvar impulzu z hľadiska optimalizácie pomeru signál - šum?

10. Objasnite tvrdenie, že optimálny pomer signál - šum možno dosiahnuť pri časovej konštante $\tau_d = \tau_i = RC$?
11. Prečo sa pre analýzu amplitúdy sa niekedy používa unipolárny a niekedy bipolárny tvar impulzu?
12. Charakterizujte odlišnosti skrátenia trvania impulzov pomocou derivačného článku, diferenčného zosilňovača a úseku kábla?
13. Prečo sa používa skompenzovaný derivačný článok namiesto obyčajného CR článku?
14. Ako sa minimalizuje vplyv superponovania impulzov s vysokými početnosťami?
15. Ako sa dá eliminovať superponovanie vzájomne málo oneskorených impulzov?
16. Objasnite ako môže vzniknúť posuv a fluktuácie strednej hodnoty základnej " nulovej" úrovne pri vysokých rýchlostiach sledovania impulzov?
17. Charakterizujte vlastnosti hlavného zosilňovača z hľadiska potrieb spektrometra?
18. Ako možno vytvárať z unipolárneho impulzu bipolárny tvar impulzu?
19. Aké sú prednosti nábojového predzosilňovača s resetom spätnoväzobného kondenzátora?
20. Prečo sa používa v nábojovom predzosilňovači spätnoväzobný odpor R_{sv} , keď z hľadiska funkcie integrátora je zbytočný, resp. prispieva k zvýšeniu úrovne šumov?

SÚHRN

Vo väčšine detektorov má impulzný signál na výstupe detektora malú amplitúdu a treba ho zosilniť. Signál z detektora ionizujúceho žiarenia má obecné tvar krátkych prúdových impulzov o trvaní od 100ps do 10 μ s, v závislosti od rozmerov a typu detektora. Na získanie potrebnej informácie o energii treba preto vykonať integráciu prúdového signálu, na základe jednej z uvedených možností:

- hneď na výstupe zosilňovača;
- po predbežnom prúdovom zosilnení;
- s použitím nábojového predzosilňovača.

Podľa spôsobu použitia v experimente sa zosilňovače rozdeľujú na:

- **spektrometrické** zosilňovače – ktorých úlohou je lineárne zosilniť a optimálne vytvárať impulzy pre následnú amplitúdovú analýzu;
- zosilňovače **s veľkou operačnou rýchlosťou** – ktoré pomáhajú na základe krátkeho trvania čela impulzu získať informáciu pre časovú analýzu impulzov.

Kvôli zjednodušeniu konštrukcie a lepšiemu prispôbeniu pre rôzne typy fyzikálnych experimentov obvykle pozostáva zosilňovač z dvoch modulov:

- predzosilňovača ;
- hlavného zosilňovača.

Predzosilňovač má len malé zosilnenie, minimálne tvaruje zosilňované impulzy a slúži hlavne na prispôbenie prenosu impulzov po kábli k hlavnému zosilňovaču.

Signál z výstupu predzosilňovača má tvar napätového impulzu s krátkym trvaním čela. Tylo impulzu má klesajúci priebeh s veľmi dlhou časovou konštantou, určenou kapacitou detektora a veľkým pracovným odporom detektora. Nositeľom užitočnej informácie o energii je len amplitúda. Aby sa minimalizovala možnosť

superpozície dlhých impulzov v hlavnom zosilňovači sa ďalej zosilňujú len skrátene impulzy, v ktorých zostáva zachovaná bezo zmeny pôvodná informácia o amplitúde napätového impulzu. V najjednoduchšom prípade sa úprava impulzov na kratší tvar vykonáva pomocou **derivačného CR článku**, resp. **skompenzovaného derivačného článku**. Pomocou jedného alebo viacerých **integračných RC článkov** možno upraviť hornú hraničnú frekvenciu zosilňovača a tým odfiltrovať frekvenčné zložky šumu. Na skrátenie trvania impulzov možno použiť aj oneskorovacie vedenie, alebo diferenčný zosilňovač.

Pri vysokých početnostiach registrovaných impulzov sa nestíha ustáliť prechodový jav na oddeľovacom CR článku a dochádza k hromadeniu náboja na sériovom oddeľovacom kondenzátore, čo môže spôsobovať posun jednosmernej úrovne signálu a nepriaznivo ovplyvňovať presnosť určenia amplitúdy impulzu.

Pri použití **bipolárneho impulzu** sa oddeľovací kondenzátor stihne nabiť a vybiť bez vytvorenia posunu základnej úrovne. Preto sa niekedy v zosilňovači upravujú impulzy na bipolárny tvar, ktorý zabezpečí rýchlejšiu obnovu náboja na kondenzátoroch. Energetické rozlíšenie dosažiteľné s pomocou bipolárnych impulzov je o 25 – 50% horšie než rozlíšenie, ktoré možno dosiahnuť s pomocou unipolárnych (nie príliš často sa vyskytujúcich) impulzov. Aby sa experimentátor, podľa podmienok vykonávaného experimentu, mohol rozhodnúť pre optimálnu voľbu tvarovania na dosiahnutie čo najlepšieho rozlíšenia spektrometrickej aparatúry býva na paneli zosilňovača umiestnený prepínač na voľbu bipolárneho resp. unipolárneho tvarovania impulzov, poprípade okrem konektora pre unipolárny výstup sa môže vyskytovať ešte ďalší bipolárny výstup.

Na stabilizáciu základnej úrovne v prípade výskytu "zhľuku" impulzov s veľkou početnosťou sa používajú aj špeciálne obnovovacie obvody - BLR (Base line restorer). Pomocou ďalších špecializovaných inšpekčných obvodov možno z analýzy vylúčiť tie prípady, keď by mohlo dôjsť k nasuperponovaniu amplitúd a tým k zhoršeniu presnosti odmerania spektra impulzov.



Návrat z acrobat readera - ❌ (zatvorením okna)
