

10 AMPLITÚDOVÁ ANALÝZA IMPULZOV

UČEBNÉ CIELE

Oboznámiť sa s možnosťami spracovania lineárnych signálov z výstupov detektorov ionizujúceho žiarenia – predovšetkým s metódami amplitúdovej selekcie impulzov pomocou diskriminátorov, ako aj s použitím lineárneho hradla na výber udalostí, ktoré sú predmetom ďalšej analýzy pomocou mnohokanálového analyzátora.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Amplitúdový diskriminátor napätových alebo prúdových impulzov, integrálne a diferenciálne spektrum, prahová hladina, šírka kanála, poloha kanála, rozhodovací obvod selektora na báze komparátora, resp. Schmittovho preklápacieho obvodu, vhodný tvar vstupného impulzu pre diskriminátor, jednokanálový a mnohokanálový analyzátor, lineárne hradlo a vzorkovací obvod, rozlišovacia schopnosť, rýchlosť a nelinearita prevodníkov, číslicovo – analógový prevodník (DAC) a amplitúdovo – číslicový prevodník (ADC), priamy (paralelný) a nepriamy (sériový) spôsob A/D prevodu, ADC používajúci Wilkinsonovu metódu s lineárne sa meniacim kompenzačným napätím, ADC používajúci metódu binárne váhovanej aproximácie amplitúdy, A/D prevodník s kízavou škálou prevodu, rýchlosť a presnosť A/D prevodu, mŕtva doba ADC.

10.1 TVAR AMPLITÚDOVÉHO ROZDELENIA IMPULZOV

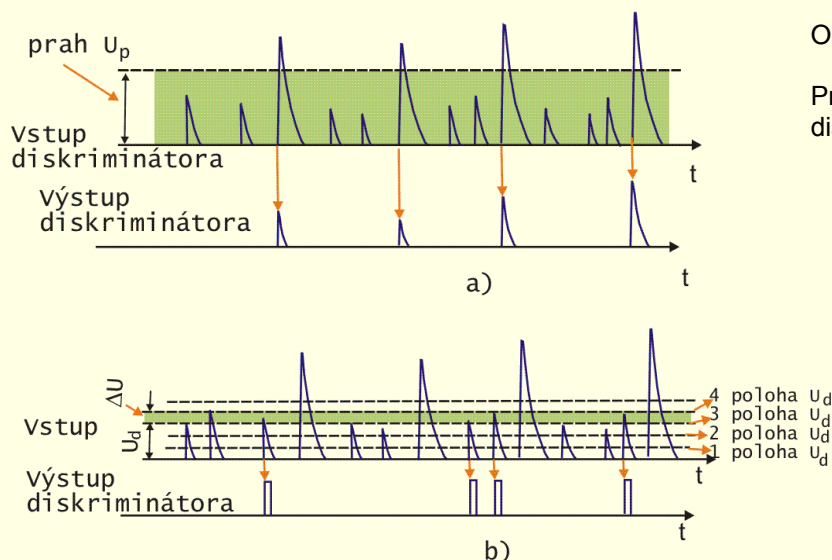
Pri spektrometrických meraniach je ďalšie spracovanie lineárnych signálov po zosilnení zamerané na odmeranie amplitúdy impulzu z výstupu hlavného zosilňovača, nakoľko táto amplitúda, po prekalibrovaní meracieho zariadenia, umožňuje špecifikovať energiu meraného žiariča. Od typu experimentálneho merania závisí či sa amplitúda impulzu sa špecifikuje na základe odmerania tvaru spektra: integrálneho ;
diferenciálneho.

Najjednoduchší spôsob amplitúdovej analýzy impulzov je založený na oddelení väčších amplitúd impulzov, zodpovedajúcich sledovanému žiareniu od menších impulzov, napríklad od šumov alebo impulzov žiarenia s menšou energiou. Na toto oddelenie impulzov sa používajú amplitúdové diskriminátory. Vstupné amplitúdy impulzov (obr. 10-1a) menšie ako prahová hladina U_p neprejdú na výstup diskriminátora, zatiaľ čo vstupné amplitúdy impulzov väčšie ako prahová hladina U_p prejdú cez rozhodovací obvod diskriminátora a možno ich registrovať pomocou počítadla impulzov.

Pomocou meraní početnosti impulzov, (vždy za rovnaký časový interval T) pri postupnom posuve prahu U_p diskriminátora, možno získať informáciu o amplitúde impulzov – **integrálne amplitúdové spektrum** $n=f(U_p)$. Obrázok 10-2 ilustruje jednak príklad tvaru takéhoto spektra a jednak ilustruje tiež grafickú konštrukciu, pomocou ktorej možno získať informáciu o tom koľko impulzov Δn sa vyskytuje v kanáli (o šírke ΔU) s určitou amplitúdou $A=U_p$ až $A=U_p+\Delta U$. Spektrum $\Delta n/\Delta U=f(A)$ na obr. 10-2b sa nazýva **diferenciálne amplitúdové spektrum**. Uvedený spôsob

konštrukcie spektra na základe výpočtu diferencií $\Delta n = n' - n'' \pm (n' + n'')^{0.5}$ je málo presný a používa sa len zriedka. Na určenie amplitúdy impulzu je k dispozícii dokonalejšie zariadenie:

- jednokanálovým analyzátor;
- mnohokanálovým analyzátor.

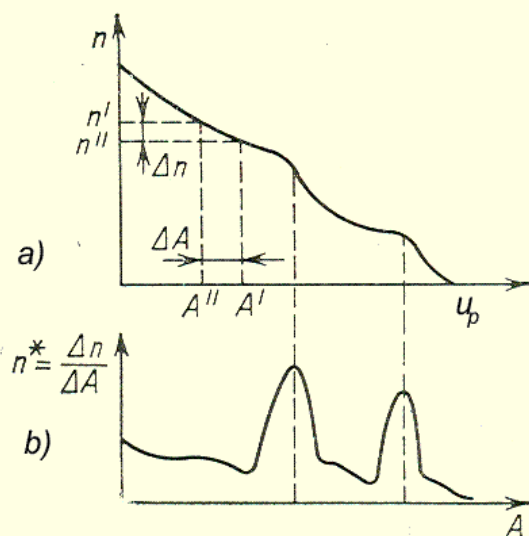


Obr. 10-1a.

Princíp amplitúdovej diskriminácie.

Obr. 10-1b.

Princíp merania diferenciálneho amplitúdového spektra. Šírka kanála je stála ΔU . Pri 1 meraní je $U_d=0$ a registrujú sa impulzy s amplitúdou 0 až ΔU . Pri 2 meraní je $U_d=\Delta U$ registrujú sa impulzy s amplitúdou ΔU až $2\Delta U$, atď. Amplitúda výstupných impulzov je upravená na normovanú hodnotu logického impulzu.



Obr. 10-2.

Amplitúdové spektrum:

- integrálne $n=f(U_p)$
 - diferenciálne $\Delta n/\Delta U=f(A)$.
- Amplitúda na osi x $A=U_p=k \cdot \Delta U$ sa postupne mení o stálu šírku kanála ΔU v rozmedzí celého spektra amplitúd U_{min} po U_{max} a registruje sa početnosť $\Delta n/\Delta U$ v danom kanále. Celkový počet meraní je daný počtom kanálov $m=(U_{max}-U_{min})/\Delta U$.

Základom jednokanálového analyzátoru je diferenciálny diskriminátor, ktorý registruje impulzy amplitúda ktorých spadá do rozmedzia amplitúd U_d po U_h . (obr. 10-1b), teda v intervale $\Delta U=U_h-U_d$. Ak sa pomocou tohto diferenciálneho diskriminátora bude posúvať tzv. **šírku kanálu** $\Delta U=U_h-U_d$ cez celé rozmedzie amplitúd a zároveň po každom posuve merať početnosť impulzov (vždy za rovnaký

časový interval T), potom zodpovedajúca závislosť $\Delta n/\Delta U=f(U_p)$ početnosti impulzov od amplitúdy bude **diferenciálne amplitúdové spektrum impulzov** (obr.10-1b). Nedostatkom jednokanálového analyzátoru je menšia presnosť, ktorá závisí od reálne použiteľnej šírky kanála ($\sim 25\text{mV}$) a pomerne dlhá doba merania. Na premeranie celého spektrálneho rozdelenia amplitúd od $U_{min}=0$ po U_{max} je potrebné vykonať $m=U_{max}/\Delta U$ meraní s rôznymi referenčnými diskriminačnými úrovňami, takže celkový potrebný čas na odmeranie spektra je mT .

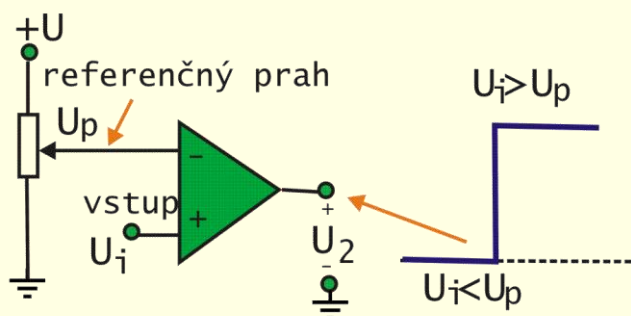
Mnookanálový analyzátor zaregistruje celé spektrum impulzov naraz - paralelne, teda bez postupného posúvania amplitúdy kanála (napr. za interval T). Počet kanálov analyzátoru závisí od energetického rozlíšenia detektora, použitého v experimente. So scintilačným detektorom postačuje 100-200 kanálov, pre polovodičové detektory treba analyzátor s niekoľkými tisícami kanálov.

10.1.1 Integrálny diskriminátor

Diskriminátor je elektronický modul používaný vo fyzikálnom experimente, ktorý umožňuje selekciu impulzov podľa amplitúdy napätia alebo prúdu. Diskriminátory napätových impulzov sa používajú v spojení s lineárnym zosilňovačom, diskriminátory prúdových impulzov sa pripájajú na výstup scintilačných detektorov, ktoré generujú prúdové impulzy s krátkym trvaním.

Modul diskriminátora, používaný vo fyzikálnom experimente, pozostáva z obvodu, ktorý rozhoduje o vzťahu vstupnej a referenčnej amplitúdy a následne zapojeného výstupného tvarovacieho obvodu, ktorý zabezpečuje štandardizáciu tvaru výstupného impulzu.

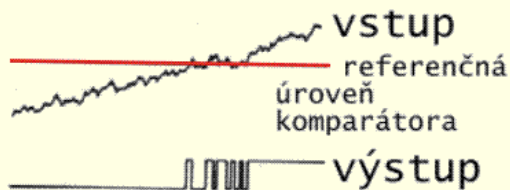
10.1.1.1 Diskriminátor napätových impulzov



Obr. 10-3. Rozhodovací obvod integrálneho napätového diskriminátora, realizovaný pomocou komparátora na báze operačného zosilňovača.

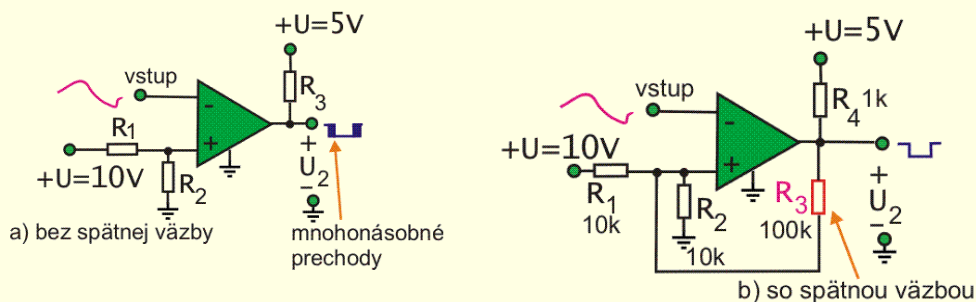
Podľa obr. 10-1a na výstupe napätového **amplitúdového diskriminátora** sa objaví impulz len vtedy, ak amplitúda U_i skúmaného impulzného signálu, ktorý sa privádza na vstup diskriminátora, je väčšia ako nastavená referenčná tzv. **prahová hladina** U_p . Ako rozhodovací obvod diskriminátora napätových impulzov môže poslúžiť komparátor (obr. 10-3). V tomto zapojení je komparátor realizovaný pomocou operačného zosilňovača bez spätnej väzby, teda obvodom s veľkým zosilnením A a vysokým vstupným odporom. V dôsledku veľkého zosilnenia $A \approx 10^4$ má zosilňovač OZ len malý dynamický rozsah, v ktorom obvod lineárne zosilňuje a už malá zmena vstupného napätia $\geq 1\text{mV}$ medzi invertujúcim a neinvertujúcim vstupom OZ postačuje na to, aby sa obvod dostal do nasýteného stavu. Normálne sa operačný zosilňovač pripojuje k symetrickému zdroju napätia $\pm U_n$, v dôsledku čoho sa pri vstupnom napätí väčšom ako dynamický rozsah ($\approx \pm(U_n/A) \leq 1\text{mV}$) objaví na

výstupe saturované napätie $-U_n$ alebo $+U_n$. V zapojení komparátora na obr. 10-3 je použité nesymetrické napájanie so zdroja $+U_n$. Pri nesymetrickom napájaní sa na výstupe komparátora vyskytnú saturované úrovne 0 alebo $+U_n$, ktoré môžu byť potom interpretované ako logické stavy, na základe ktorých možno posúdiť či je vstup $U_i < U_p$ alebo $U_i > U_p$. Veľkosť rozdielu napätí medzi invertujúcim a neinvertujúcim vstupom komparátora ($U_n / A \approx 1\text{mV}$) rozhoduje o presnosti, s ktorou možno posúdiť shodu amplitúd a teda ohraničuje aj minimálnu veľkosť kroku zvyšovania prahovej hladiny diskriminátora, resp. minimálnu veľkosť šírky okna diferenciálneho diskriminátora.



Obr. 10-4. Vznik mnohonásobných prekmitov na výstupe komparátora bez spätnej väzby na obr. 10-5a pri pomaly sa meniacom „zašumenom“ signále na vstupe.

Jednoduchý komparátor z obr. 10-3 má nevýhodnú vlastnosť. Ak na vstupe takéhoto komparátora pôsobí pomaly sa meniaci „zašumený“ signál, podobne ako na obr. 10-4, tak sa môže stať, že počas trvania prechodu vstupného napätia cez prah bude sa výstup viackrát prepínať z jedného stavu do druhého, dôsledkom čoho sa bude generovať niekoľko výstupných impulzov. Tento nedostatok možno odstrániť pomocou kladnej spätnej väzby podľa obr. 10-5b. Takáto úprava zapojenia s OZ sa nazýva **Schmittov preklápací obvod**. Vplyvom spätnej väzby Schmittov preklápací obvod rýchlejšie zmení stav svojho výstupu ako jednoduchý komparátor. Pôsobením spätnoväzobného odporu R_3 má obvod dva prahy, závislé od stavu výstupu. V príklade na obr. 10-6 ak je vstupné napätie menšie ako prah 4,76V je na výstupe 5V a ak je na vstupe menej ako je prah 4,76V je na výstupe 0V. Jav ilustrovaný obrázkom 10-6, keď výstup závisí jednak od vstupného napätia a jednak od predhistorie sa volá **hysterézia**. Vplyvom hysterézie je zmenšená citlivosť na preklopenie v okolí referenčnej úrovne a tým je zabezpečené jednoznačnejšie nastavovanie výstupného stavu obvodu.

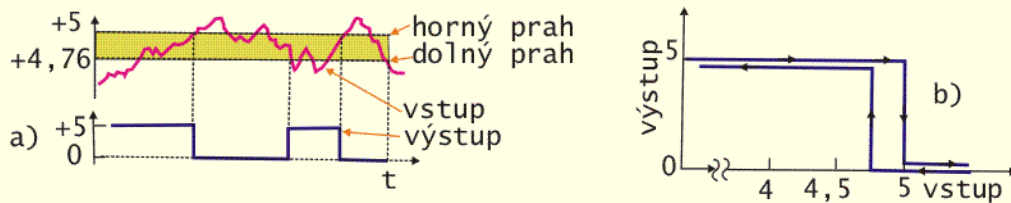


Obr. 10-5.

- a) Komparátor na báze OZ bez spätnej väzby
- b) Schmittov preklápací obvod na báze komparátora s kladnou spätnou väzbou privedenou prostredníctvom odporu R_3 . (Pralele k odporu R_3 sa na urýchlenie preklopenia často pripája urýchľujúci kondenzátor $C \approx 10 - 100\text{pF}$)

Za rozhodovacím obvodom v module diskriminátora kvôli tvarovaniu impulzov obvykle nasleduje monovibrátor, ktorý sa spúšťa impulzom z komparátora alebo

Schmittovho preklápacieho obvodu a tvaruje výstupný priebeh na štandardizovaný logický impulz, napr. o trvaní 500ns.



Obr. 10-6.

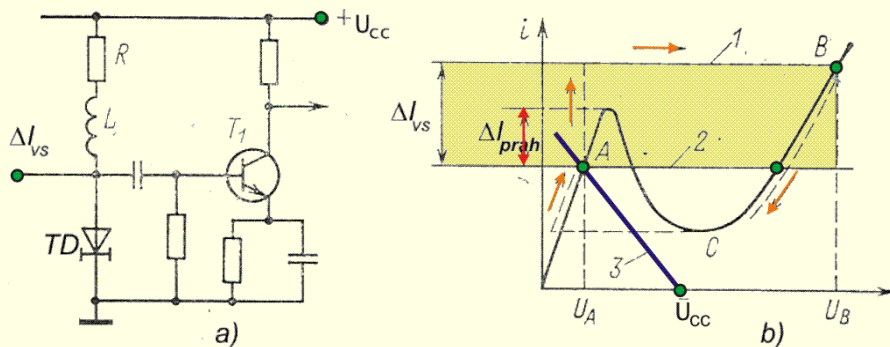
Ilustrácia činnosti Schmittovho preklápacieho obvodu:

a) Porovnanie vstupných a výstupných napätí.

b) Hysterézia okamihu preklopenia v závislosti od smeru zmeny vstupnej amplitúdy.

10.1.1.2 Diskriminátor prúdových impulzov

Na výstupe rýchlych (scintilačných a čerenkovských) detektorov s fotonásobičmi sa vyskytujú dostatočne výkonné impulzy anódového prúdu, ktoré netreba zosilňovať. Napríklad pri registrácii vysokoenergetických častíc na urýchľovačoch možno priamo pripojiť výstup detektora na vstup prúdového diskriminátora. Prednosťou priameho pripojenia anódy fotonásobiča k prúdovému diskriminátoru je malý vstupný odpor prúdového diskriminátora a tým aj malá časová konštanta vstupného obvodu, v dôsledku čoho má obvod minimálny vplyv na predĺženie trvania impulzu, čo je podstatné pri registrácii krátkych impulzov s veľkými početnosťami.



Obr. 10-7.

a) Rozhodovací obvod integrálneho prúdového diskriminátora, realizovaný pomocou monovibrátora s tunelovou diódou (TD).

b) V-A charakteristika tunelovej diódy:

1 - trajektória posuvu pracovného bodu pri preklopení obvodu,

2 - dynamická pracovná záťažovacia charakteristika impedancie $Z=R+pL$,

3 - statická záťažovacia priamka odporu R.

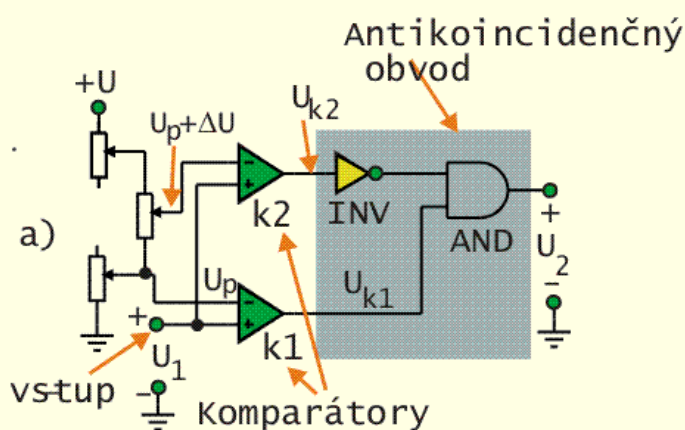
Na obr. 10-7a je zapojenie monovibrátora s tunelovou diódou (TD), ktoré možno použiť na diskrimináciu krátkych prúdových impulzov. Zapojenie na obr. 10-7a má jeden stabilný stav, definovaný priesečníkom A charakteristiky TD a zaťažovacieho odporu R, pripojeného k zdroju napätia U_{cc} (obr. 10-7b). Vďaka indukčnosti L vzrastie počas prechodového javu impedancia $R+pL$ záťaže a vstupný impulz s amplitúdou $I_{vs} > I_{prah}$ preklopí monostabilný obvod do pracovného bodu B. Postupne so znižovaním amplitúdy impulzu s časovou konštantou $\tau=L/R$ sa vráti

pracovný bod do bodu A. Výsledkom je generovanie napätového impulzu na dióde TD s amplitúdou $\Delta U = U_B - U_A$. Tvar tohto impulzu určujú parametre obvodu (R, L) a charakteristika TD. Tranzistor T_1 slúži na prispôsobenie TD k ďalším častiam zapojenia.

10.1.2 Diferenciálny diskriminátor

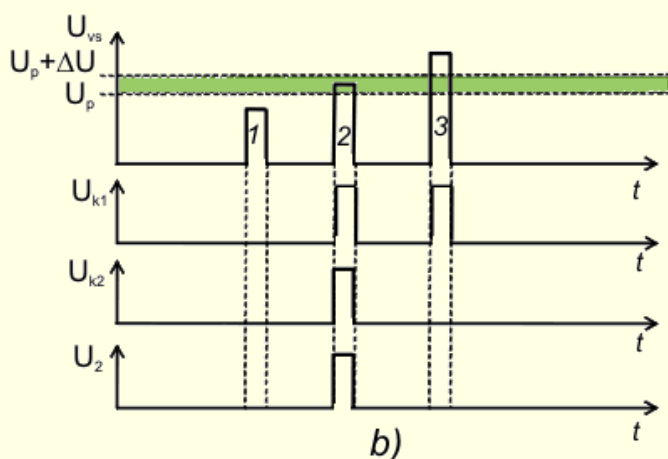
Úpravou integrálneho diskriminátora možno získať dokonalejšie zariadenie na určenie amplitúdy impulzu. **Diferenciálny diskriminátor**, ktorý je základnou súčasťou jedнокanálového analyzátoru, pozostáva z dvoch diskriminátorov, prahy ktorých sú posunuté o určitú veličinu – šírku okna ΔU (obr. 10-8). Ak amplitúda vstupného impulzu je väčšia ako dolné prahové napätie $U_d = U_p$ a je nižšia ako je horné prahové napätie $U_h = U_p + \Delta U$ – teda amplitúda vstupného impulzu je v hraniciach "okna" $\Delta U = U_h - U_d$, alebo tiež "kanála", tak sa tvaruje (pomocou antikoincidenčného obvodu) logický impulz na výstupe. Poloha prahov diskriminátora sa v praxi môže nastavovať dvoma spôsobmi:

- dolný U_d a horný U_h prah sa nastavuje nezávisle,
- nastavuje sa len dolný prah U_d a šírka okna $\Delta U = U_h - U_d$.



Obr. 10-8a.

Rozhodovací obvod diferenciálneho diskriminátora, zložený z 2 komparátorov a antikoincidenčného obvodu.

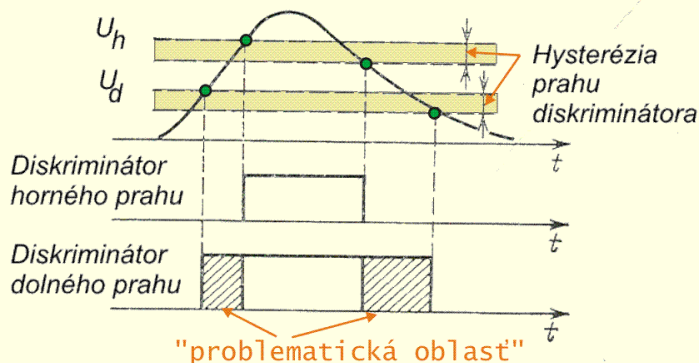


Obr. 10-8b.

Princíp činnosti diferenciálneho diskriminátora – len impulzy U_i s amplitúdou padnúcou do okna medzi U_p až $U_p + \Delta U$ vyvolajú na výstupe impulz.

Tvar vstupného impulzu je v dôsledku existencie reálneho trvania čela a tyla impulzu pri základni širší ako pri vrchole. Obrázok 10-9 ilustruje ako v rôznych okamihoch reagujú dolný a horný diskriminátor na vstupný impulz. Na vstupoch (antikoincidenčného) logického obvodu môžu byť preto splnené podmienky pre vznik výstupného impulzu aj počas krátkych (vyšrafovaných) okamihov, keď impulz

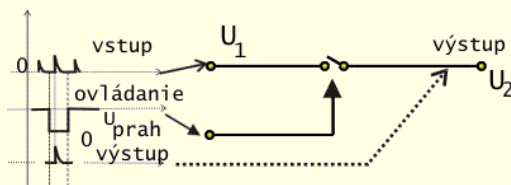
prevyšuje oba diskriminačné prahy. Na odstránenie tohto rušivého javu sa preto impulzy pred vstupom na antikoincidenčný obvod tvarovo upravujú (minimalizujú sa trvania ich čela a tyla, resp. aj trvanie impulzu sa upravuje na rovnakú veľkosť).



Obr. 10-9. Závislosť (rozptyl) okamihu generovania výstupného impulzu diskriminátora od okamihu keď amplitúda vstupného impulzu dosiahne referenčnú úroveň U_d a U_h .

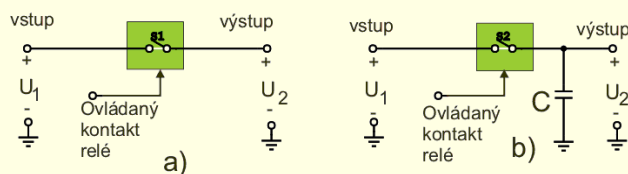
10.1.3 Lineárne hradlo

V spektrometrických meraniach často treba bez zmeny tvaru prepustiť impulzy, alebo skupinu impulzov počas určitého časového intervalu. Takáto úloha sa vyskytuje pri filtrácii signálov od šumov, od pozadia alebo od iného signálu, ktorý v danom prípade nie je hlavným objektom pozorovania. Na ovládanie priepustnosti impulzov, často veľmi krátkeho trvania, bez skreslenia ich tvaru a s lineárnym prevodom amplitúdy sa používa tzv. **lineárne hradlo** – obvod s ovládaným spínacím prvkom. Lineárne hradlo (obr. 10-10) teda prepúšťa analógový signál počas trvania ovládacieho logického signálu so štandardizovanou amplitúdou a trvaním.



Obr. 10-10. Princíp činnosti lineárneho hradla. Funguje ako ovládaný spínač (vo veľmi jednoduchom prípade ako mechanický spínač s reléovým ovládaním).

Iný, lineárnemu hradlu podobný, tzv. **koincidenčný obvod**, pri súčasnom výskyte impulzov na jeho vstupe, dokáže generovať na výstupe logický impulz so štandardizovanou výstupnou amplitúdou, ktorá už nemôže byť ďalej použitá pre ďalšie meranie amplitúdy. Podobne v **diskriminátore sa vstupný analógový impulz**, ktorý vyhovuje danému amplitúdovému kritériu, prekonvertuje na **logický signál**, štandardného tvaru a amplitúdy. Tieto výstupné logické impulzy možno potom použiť napr. na ovládanie lineárneho hradla, nie však už na prípadnú ďalšiu amplitúdovú analýzu.



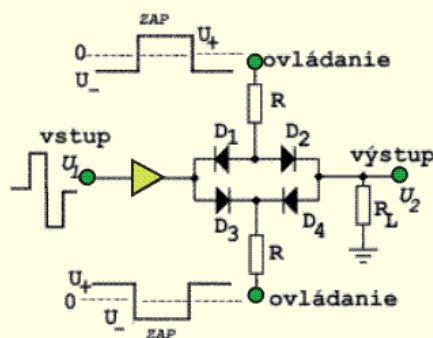
Obr. 10-11. Princíp činnosti: a) lineárneho hradla; b) vzorkovacieho obvodu (C – pamäťový vzorkovací kondenzátor).

Lineárne hradlo, na rozdiel od hradla logických obvodov, musí vo vodivom stave (keď je otvorené) prepúšťať analógový signál s minimálnym lineárnym skreslením amplitúdy a keď je zatvorené blokovat' prechod signálu zo vstupu hradla na jeho výstup. Princíp činnosti spínača umožňujúceho pomocou mechanického spínača pripájať stálu amplitúdu vstupného signálu na výstup obvodu znázorňuje obrázok 10-11a. Keď je spínač S1 zopnutý je na výstupe napätie $U_2=U_1$ a vstupný impulz bez podstatnej zmeny svojho tvaru sa dostane na výstup.

Zdokonalené zapojenie lineárneho hradla s kondenzátorom C, podľa obr. 10-11b, možno použiť aj pre sledovanie priebehu zmien amplitúdy pomaly sa meniaceho signálu tak, že pomocou dostatočne rýchleho pripájania spínača sa na kondenzátore C bude zapamätávať momentálna amplitúda sledovaného analógového signálu, čím sa z vstupného priebehu vyberie sled úzkych impulzov, ktorý je amplitúdovo modulovaný vstupným analógovým signálom. Podmienkou verného vzorkovania priebehu (Sample and Hold) je, aby sledované zmeny amplitúdy analógového signálu mali omnoho nižšiu frekvenciu než je frekvencia krátkych spínacích vzorkovacích impulzov hradla.

Signál z výstupu takéhoto **vzorkovacieho obvodu**, ktorý sa potom ďalej analyzuje pomocou analógovo – číslicového prevodníka má, v tomto prípade tvar impulzov. Kapacita tzv. **pamäťového kondenzátora C** musí byť vhodne volená s ohľadom na krátke trvanie jeho nabíjania počas vzorkovacieho intervalu a s ohľadom na udržanie stálej amplitúdy napätia na kondenzátore C počas následnej A/D konverzie.

Mechanický kontakt má, z hľadiska priepustnosti, vlastnosti ideálneho spínača, avšak pre rýchlejšie ovládanie spínača nie je vhodný. Preto sa namiesto mechanických kontaktov používajú elektronické prvky, s regulovateľnou vodivosťou, ako napr. diódy alebo unipolárne tranzistory JFET.



Obr. 10-12.

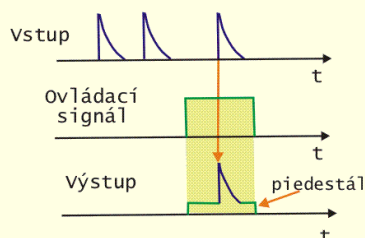
Príklad diódového mostíkového zapojenia analógového spínača na ovládanie bipolárnych impulzov pre lineárne hradlo. Pri nezabezpečení presne rovnakej amplitúdy U_+ a U_- ovládacích impulzov vznikne piedestál (obr. 10-13) výstupného impulzu.

V jadrovo – fyzikálnych experimentoch má signál z výstupu zosilňovačov, ktorého amplitúda sa má digitalizovať, väčšinou tvar impulzov zvonovitého tvaru. Pred vykonaním A/D prevodu treba preto pomocou lineárneho hradla najprv nabiť pamäťový kondenzátor a potom pri nevodivom hradle zabezpečiť, aby počas určitého intervalu konverzie (napríklad $2\mu s$) zostala amplitúda napätia na kondenzátore prakticky nemenná, čo reálne znamená, že na vstupe ADC by mal byť impulz s veľmi plochým tvarom vrcholu. Preto býva aj pre toto použitie súčasťou lineárneho hradla **pamäťový kondenzátor**. Takéto vzorkovacie lineárne hradlo dokáže na kondenzátore udržať (niekedy aj pomocou ďalšej spätnej väzby OZ) stále napätie počas intervalu, ktorý treba na uskutočnenie prevodu A/D. Takýto vzorkovací obvod musí rýchlo nabiť pamäťový kondenzátor a po dosiahnutí maximálnej amplitúdy

odpojiť vzorkovací kondenzátor od vstupu a pripojiť ho k inej časti obvodu, kde sa bude zase kontrolovať pomocou malého prúdu vybíjať.

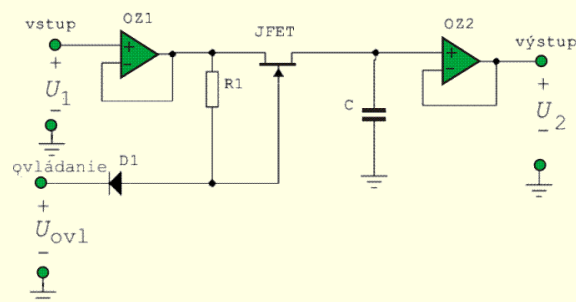
Na obrázku 10-12 je diódový mostíkový typ analógového spínača pre lineárne hradlo s vysokou operačnou rýchlosťou (pre impulzy s trvaním niekoľko ns), ktorý je vhodný pre hradlovanie aj bipolárnych impulzov. Ak je ovládacie napätie v stave „vypnuté“, sú všetky diódy D_1 - D_4 nevodivé a signál na výstup prakticky neprechádza. V stave ovládania „zapnuté“ sú všetky diódy vodivé a cez mostík tečie prúd. Ak je vstupné napätie $U_1=0$ je prúd cez diódy D_1 - D_3 a diódy D_2 - D_4 rovnaký, mostík je vyvážený a na výstupe je napätie $U_2=0$. Vstupné napätie $U_1 \neq 0$ potom naruší symetriu vyváženého mostíka a na výstupe sa objaví napätie $U_2 \neq 0$. Aby zoslabenie pri prechode signálu cez mostík bolo minimálne treba, aby odpor diódy R_{DF} vo vodivom stave bol minimálny a aby odpor $R \gg R_L$.

Pri nedokonalnej symetrii mostíka, alebo pri nerovnakej amplitúde ovládacích impulzov prenikne časť ovládacieho signálu na výstup. Táto časť výstupného signálu, trvajúca počas ovládacieho impulzu, sa žargonovo nazýva **pedestál** (obr. 10-13). Veľkosť pedestálu je počas merania stála a pokiaľ má malú amplitúdu nevplyva na linearitu spínača a môže byť skorigovaná pri kalibrácii analyzátoru.



Obr. 10-13. Ilustrácia vzniku pedestálu pri hradlovaní impulzov - časť ovládacieho impulzu prenikne aj na výstup.

Na obrázku 10-14 je nakreslený elektronický variant vzorkovacieho obvodu s unipolárnym tranzistorom JFET ako spínačom. Operačné zosilňovače slúžia na oddelenie spínača JFET s pamäťovým kondenzátorom C od vstupného a výstupného obvodu. Vysoký vstupný odpor OZ2 a JFETu zabezpečujú stálu amplitúdu napätia na pamäťovom kondenzátore. Veľkosť kapacity kondenzátora C ohraničujú požiadavky na rýchlosť jeho nabíjania cez OZ1 a JFET pri hradlovaní. Miesto kondenzátora C možno tiež využiť integračné účinky operačného zosilňovača s kapacitnou spätnou väzbou – integrátora.

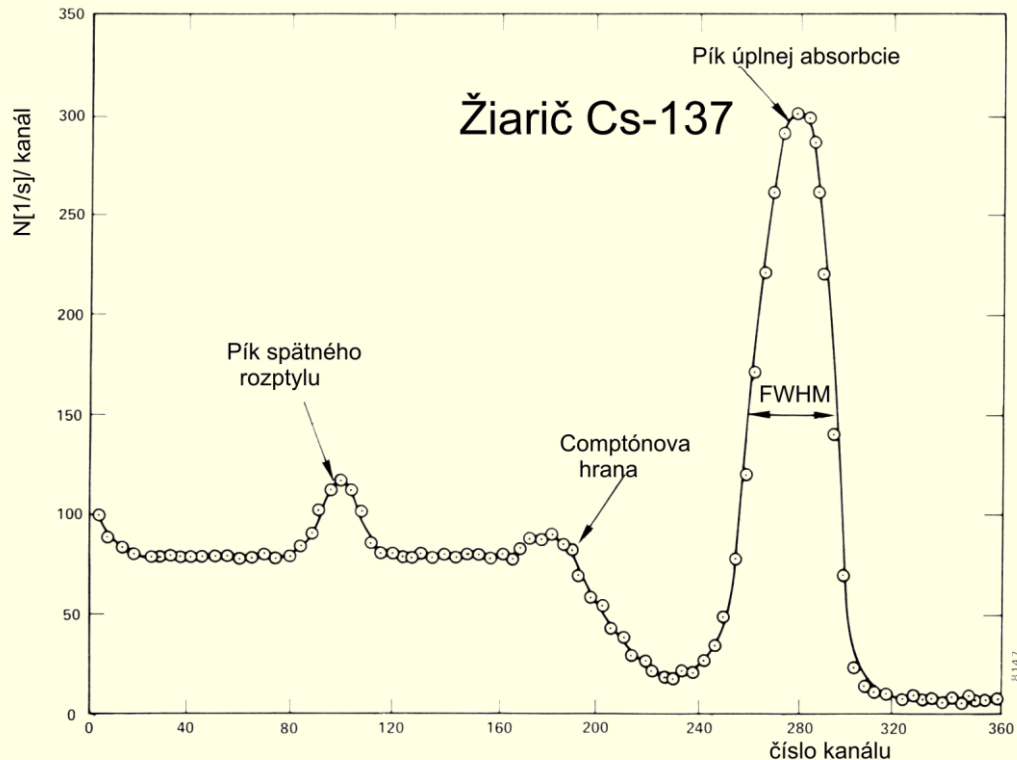


Obr. 10-14. Vzorkovací obvod na báze JFET (OZ slúžia na oddelenie vstupu a výstupu od spínača JFET)

10.2 DIGITALIZÁCIA AMPLITÚDY IMPULZU

Pri meraniach v jadrovej fyzike sa analýza analógového signálu väčšinou vykonáva na základe odmeraného diferenciálneho amplitúdového spektra

(obr. 10-2b). Obrázok 10-15 ilustruje tvar spektra gama žiariča zo scintilačného detektora a tiež amplitúdy typické pre toto spektrum. Ako už bolo spomenuté takéto spektrum – závislosť počtu výskytov udalostí v kanále od amplitúdy, možno odmerať aj „pomalou“ metódou jednocanálového analyzátora pomocou postupného zvyšovania diskriminačnej hladiny diferenciálneho diskriminátora.



Obr. 10-15.

Prístrojové spektrum gama žiarenia žiariča ^{137}Cs , ilustrujúce:

- fotoefekt (pík úplnej absorpcie);
- Comptonov rozptyl (pík spätného rozptylu);
- Comptonovskú hranu ;
- rozlíšenie FWHM, charakterizujúce presnosť odmerania amplitúdy.

Rýchlejšiu a presnejšiu informáciu o spektre, teda bez postupného posúvania amplitúdy kanála, možno získať pomocou amplitúdovo – číslicového (A/D) prevodu. Počet kanálov takéhoto amplitúdového analyzátora závisí od energetického rozlíšenia detektora, použitého v experimente. So scintilačným detektorom postačuje 100-200 kanálov, pre polovodičové detektory treba analyzátor s niekoľkými tisícmi kanálov. Napríklad pri meraní s polovodičovým detektorom s rozlišovacou schopnosťou 0,1% pomocou 1000 kanálového spektrometra sa jednotlivý pík zobrazí len do niekoľkých kanálov.

10.2.1 Parametre digitalizovaného prevodu

Kvalitu analógovo – číslicového (A/D) a číslicovo – analógového (D/A) prevodu sa posudzuje podľa spoločných parametrov a v ďalšom výklade kvôli zosručeniu sa definície objasňujú len pre jeden typ prevodu. V D/A prevodníku je vstupnou veličinou číslicový kód a výstupnou veličinou analógový signál – napätie

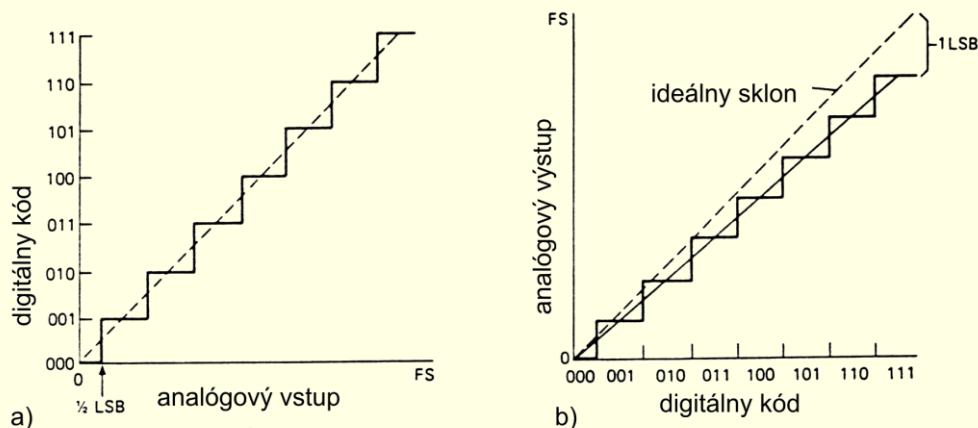
alebo prúd. V A/D prevodníku je tomu naopak - vstupnou veličinou je analógový signál a výstupnou veličinou je číslicový kód.

Rozlišovacia schopnosť D/A prevodníka sa charakterizuje počtom diskretných úrovní výstupného analógového napätia. Napr. 8 – bitový D/A prevodník má $2^8=256$ úrovní, čo zodpovedá rozlišovacej schopnosti:

$$\frac{1}{256} \cdot 100 = 0,4\%$$

Výstupné napätie sa mení po jednotlivých diskretných stupňoch skokovite z jednej úrovne na druhú. Chyba spôsobená diskretnými úrovňami napätia sa nazýva **kvantizačná chyba** a dosahuje maximálne $\pm 1/2$ hodnoty, zodpovedajúcej najnižšiemu bitu vstupného slova.

Maximálna **rýchlosť D/A prevodu** je určená počtom vstupných slov, ktoré môžu byť prekonvertované za jednotku času. Doba D/A prevodu je recipročná hodnota rýchlosti prevodu. Je to interval medzi privedením vstupného slova na prevodník a okamihom dosiahnutia výstupu analógovej veličiny – prúdu alebo napätia. Napr. pre 8 bitový prevodník pri zmene vstupného kódu z 00H na FFH trvá ustálenie výstupu 85 – 150ns.



Obr. 10-16.

Príklad integrálnej nelinearity INL;

a) offset nuly prevodovej charakteristiky ADC o $1/2$ LSB (LSB - Last significant bit - najnižší bit), charakterizujúci kvantizačnú chybu;

b) sklon prevodovej charakteristiky DAC menší o 1LSB

Linearita medzi amplitúdou výstupných a vstupných impulzov u reálneho zosilňovača je len približná, resp. platí len v určitej oblasti amplitúd. Podobne ako v zosilňovači by malo byť zosilnenie $A_0=U_2/U_1$ stále v celom rozsahu zosilňovaných amplitúd napätia, v reálnom zosilňovači to platí len v určitej oblasti tzv. dynamického rozsahu amplitúd a možno tvrdiť, že zosilnenie $A_0=f(U_2)$ je *obecne* závislé od zosilňovanej amplitúdy U_2 . Na charakterizovanie odchýlky od linearity sa u zosilňovačov a prevodníkov A/D a D/A používa:

- integrálna nelinearita $\varepsilon_i(U_2)$, ktorá charakterizuje celkové skreslenie amplitúdy (maximálny odklon od lineárnej závislosti v zadanej oblasti):

$$U_2 = U_1 A_0 [1 + \varepsilon_i(U_2)]$$

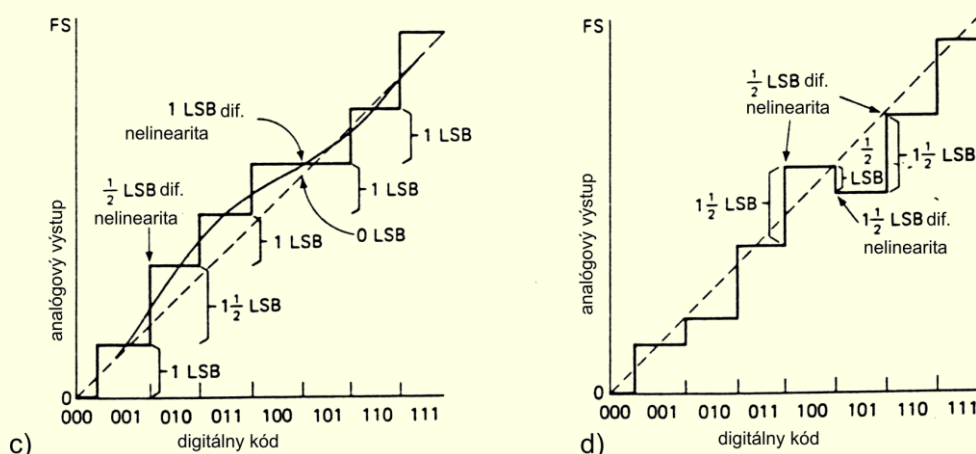
kde $\varepsilon_i(U_2)$ – integrálna nelinearita (INL).

- diferenciálna nelinearita $\varepsilon_d(U_2)$ ktorá charakterizuje skreslenie malých (lokálnych) zmien amplitúdy:

$$dU_2 = dU_1 A_0 [1 + \varepsilon_d(U_2)]$$

kde $\varepsilon_d(U_2)$ - diferenciálna nelinearita (DNL).

Vo fyzikálnom meraní s mnohokanálovým analyzátorom integrálna nelinearita ovplyvňuje kalibráciu energie amplitúdového spektra (polohu piku), diferenciálna nelinearita sa prejavuje ako zmena šírky kanálov (skreslenie tvaru piku). Obrázok. 10-16 ilustruje najbežnejšie chyby, vyskytujúce sa pri prevode A/D a D/A.



Obr. 10-16.

Príklad diferenciálnej nelinearity DNL

c) diferenciálna nelinearita prevodovej charakteristiky DAC +1/2LSB a 1LSB;

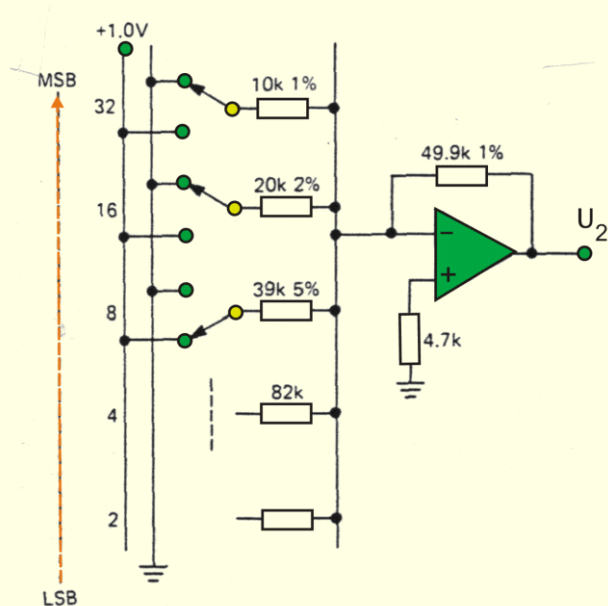
d) nemonotonnosť prevodovej charakteristiky DAC.

10.2.2 Číslicovo – analógový prevodník

Číslicovo – analógový prevodník (**D/A prevodník**, poprípade konvertor - **DAC**), slúži na prevod informácie z číslicového tvaru (napr. binárneho kódu) na analógový tvar (napr. amplitúdu prúdu alebo napätia). V amplitúdovom analyzátoe sa používa pri vykresľovanie obrázkov spektier a tiež aj ako pomocný prevodník pre generovanie referenčného napätia v niektorých typoch amplitúdovo – číslicových prevodníkov.

Princíp D/A prevodu ilustruje obr. 10-17. Vstupný číslicový kód ovláda spínače, ktoré pripájajú váhované rezistory ($R_0, 2R_0, 4R_0, 8R_0$ atď.). Podľa toho či je spínač zopnutý alebo nie, pripojujú sa k vstupu operačného zosilňovača prúdy, veľkosť ktorých je úmerná váhe príslušného bitu. Do vstupu zosilňovača priteká súčet prúdov, ktorý závisí od stavu spínačov. Operačný zosilňovač prekonveruje tento prúd na výstupné napätie. Podľa použitia váhovaného binárneho odstupňovania odporov sa tento typ prevodu nazýva prevodom D/A s **váhovanou štruktúrou odporovej siete**.

Uvedený prevodník je názorný pre objasnenie činnosti, avšak prakticky sa nepoužíva. Nedostatkom tohto prevodníka je, že vyžaduje širokú škálu binárne odstupňovaných presných odporov. Pri veľkých odporoch rezistorov sa tiež viacej uplatňujú parazitné a montážne kapacity, takže rýchlosť tohto typu prevodníka je nízka.

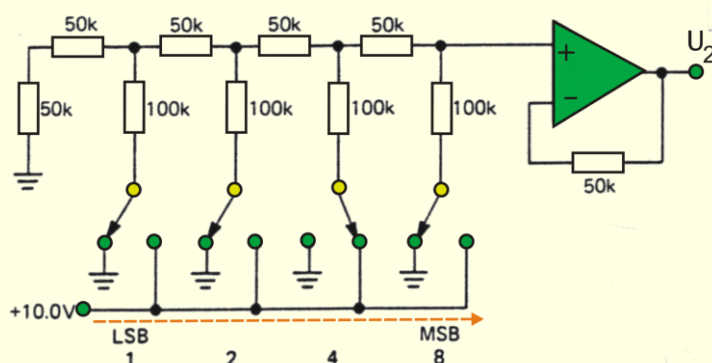


Obr. 10-17.

D/A prevodník s váhovou štruktúrou odporovej siete.

V prípade 4 stupňového (4 bitového) prevodníka má vstupný spínač s rezistorom $8R_0 \sim 80k\Omega$ najmenšiu váhu (LSB – last significant bit). Pri zvolenom referenčnom napätí $U_r=1V$ a zopnutom spínači tvorí príspevok k vstupnému prúdu operačného zosilňovača $\sim 1/(8R_0)$. Vstupný spínač s rezistorom $R_0 \sim 10k\Omega$ má najvyššiu váhu (MSB – most significant bit), lebo príspevok k vstupnému prúdu operačného zosilňovača tvorí $\sim 1/(R_0)$.

Na obr. 10-18 je nakreslený D/A prevodník, v ktorom je odporový delič zhotovený len z rezistorov dvoch hodnôt odporov - R a $2R$. Napätie z referenčného zdroja $10V$ sa delí každým článkom na polovicu, takže v jednotlivých uzloch bude napätie $10V/2$, $10V/4$, $10V/8$ atď., t.j. príspevok každého nasledujúceho bitu k výstupnému analógovému napätiu sa vždy znižuje binárne na polovicu. Odporový delič R a $2R$ majú porovnateľný odpor a môžu byť zhotovené s vyhovujúcou toleranciou rovnakou technológiou, napr. ako hybridný obvod. Na základe podobnosti odporového deliča s rebríkom alebo priečkou sa tento typ D/A prevodníka nazýva **DAC s priečkovou štruktúrou R-2R odporovej siete**.



Obr. 10-18.

D/A prevodník s priečkovou štruktúrou R-2R odporovej siete. Pri stave spínačov podľa obrázku pripája spínač 4 bitu na vstup operačného zosilňovača napätie $10V/4=2,5V$

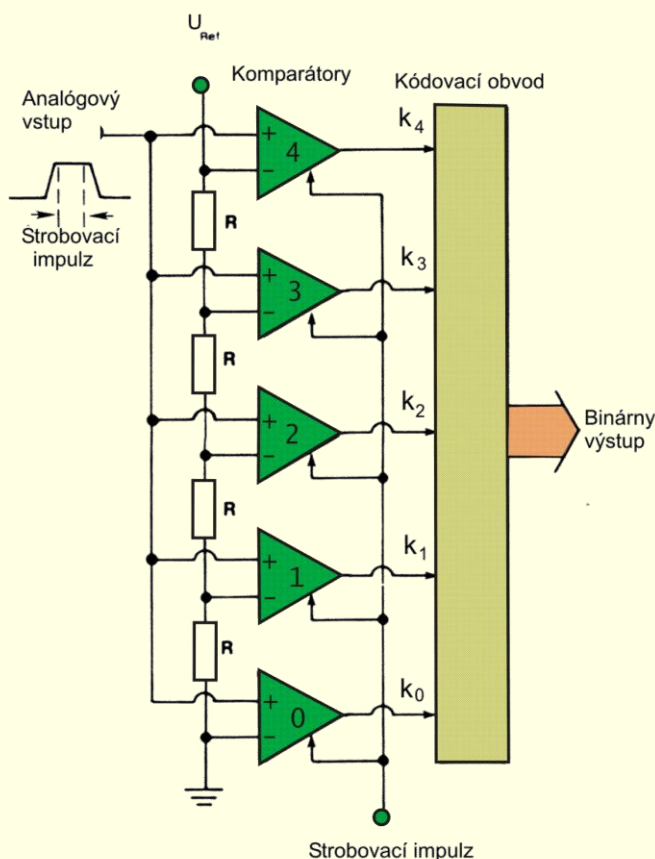
Pri doterajšom výklade činnosti DAC boli používané hypotetické mechanické spínače. Ich funkciu v reálnych D/A prevodníkoch zastávajú elektronické spínače na báze diód alebo FET.

10.2.3 Analógovo – číslicový prevodník

Analógovo – číslicový prevodník (alebo aj amplitúdovo - číslicový prevodník, A/D prevodník alebo konvertor - **ADC**) premieňa vstupnú analógovú veličinu, napríklad amplitúdu napätia alebo prúdu na číslicový tvar, najčastejšie na binárny

kód. Tento prevod môže byť **priamy (paralelným spôsobom)**, keď sa A/D prevod vykonáva naraz v jednej fáze – paralelne, alebo **nepriamy (sériovým spôsobom)**, pri ktorom sa vstupné analógová veličina, napríklad napätie konvertuje najprv na inú analógovú veličinu, napríklad trvanie impulzu a až v ďalšom kroku sa prekonvertuje na číslcový tvar, napríklad pomocou počítadla impulzov a generátora presných hodinových impulzov. **Paralelný spôsob je rýchlejší, avšak sériovým spôsobom sa dá dosiahnuť väčšia presnosť A/D prevodu.**

Z prevodovej charakteristiky ADC na obrázku 10-16a vidno, že vstupné analógové napätie U_1 možno kvantovať do výstupného slova o dĺžke n-bit, teda ho kvantovať do 2^n úrovní. ADC má teda $2^n - 1$ nenulových rozhodovacích úrovní. Stupeň kvantovania – **kvantizačný krok** $Q = U_{max} / (2^n - 1)$ závisí od plného rozsahu vstupnej amplitúdy U_{max} a počtu nenulových rozhodovacích úrovní. Krok Q , zhodný s najnižším binárnym rádom výstupného slova bitu – LSB (Last Significant Bit) určuje **rozlišovaciu schopnosť** ADC. V dôsledku diskrétného počtu bitov vzniká pri A/D prevode systematická, tzv **kvantizačná chyba** $Q_E = \pm 1/2 Q$ (obr. 10-21a). Okrem tejto chyby môže k chybe A/D prevodu prispieť **nelinearita A/D prevodu – integrálna alebo diferenciálna** (obr. 10-16), poprípade aj tzv. **dynamická chyba**, spôsobená zmenou vstupnej analógovej veličiny, napríklad nestálosťou napätia na pamäťovom kondenzátore počas A/D prevodu.



Obr. 10-19.

Paralelný (2 bit) A/D prevodník s 5 referenčnými napätiami U_{ri} .

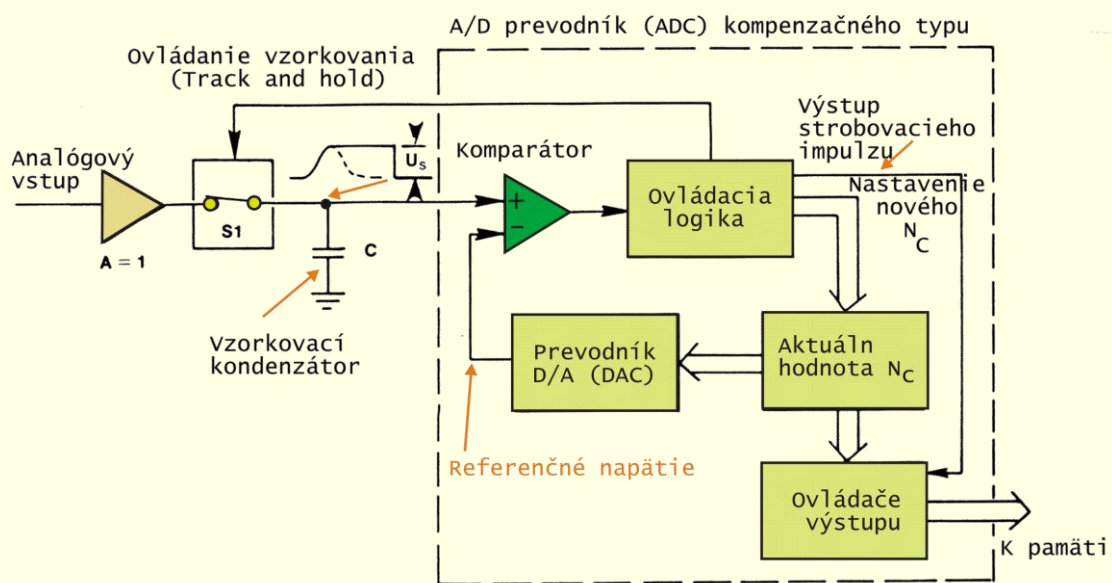
Vstupný impulz je vo vhodnom okamihu pomocou výberového signálu (Strobe) vzorkovacieho obvodu pripustený na vstup komparátorov. Výstup z komparátorov sa iným, oneskoreným výberovým signálom (Strobe), po ustálení výstupov komparátorov, zapíše do registra kódovacieho obvodu. Kóder priority slúži na prevod kódu z výstupu komparátorov k_0-k_4 na binárny kód. (napr. ak sú k_0-k_2 v stave "1" a k_3 a k_4 v stave "0" je kód $k_0-k_4 = 00111B$ a na výstupe kódera bude kód $0011B = 3D$).

10.2.3.1 Paralelný spôsob A/D prevodu

Najjednoduchší a **najrýchlejší spôsob prevodu** amplitúdy impulzu na číselný kód je tzv. paralelný A/D prevod, založený na použití n - komparátorov (napr. n=256 pri 8 bitovom prevodníku). Vstupy komparátorov (s veľkou operačnou

rýchlosťou) na obr. 10-19, na ktoré sa privádza meraný impulz sú porovnávané s referenčným napätím U_{ri} , ktoré je vytvorené pomocou presného odporového deliča a etalónového zdroja napätia U_{Ref} . V prípade, že je vstupná amplitúda napätia U_1 na vstupe komparátora $U_1 > U_{ri}$, bude na výstupe príslušného komparátora logická úroveň „1“. V opačnom prípade bude na výstupe komparátora stav s logickou hodnotou „0“. V závislosti od amplitúdy vstupného napätia bude na výstupe určitého počtu komparátorov, počnúc komparátorom k_0 , stav s logickou hodnotou „1“. Stav výstupu komparátorov sa vo vhodnom okamihu, po ustálení vstupnej amplitúdy napätia, uloží do záchytného registra a prekonvertuje do kódu, vhodnejšieho pre ďalšie použitie, napr. na obr. 10-19 pomocou kódera priority do binárneho kódu.

Jednotlivé referenčné napätia U_{ri} sú postupne odstupňované s krokom $U_{Ref}/2^n$ - na obr. 10-19 v prípade $n=2$ bitového ADC s krokom $U_{Ref}/2^2$. Pre výstupné viac bitové slovo treba použiť veľký počet komparátorov, napr. pre dosiahnutie 1% presnosti s 100mV odstupom referenčných úrovní a etalonovým zdrojom napätia 10V treba ~100 komparátorov. Pri veľa bitovom výstupnom slove je zložitejší aj kódovací obvod. Predovšetkým z dôvodov obtiažnosti zabezpečenia dostatočnej stability a presnosti nastavenia referenčných úrovní U_{ri} prahového napätia deliča sa zriedka používajú viac ako 8-10 bitové prevodníky tohto typu. Doba prevodu paralelného A/D prevodníka je určená dobou ustálenia výstupov komparátorov a prenosovým oneskorením kombinačných obvodov – môže byť okolo 10ns. Tento typ ADC sa preto veľmi často používa pri rýchlom predbežnom triedení amplitúd signálov.



Obr.10-20.

Blokové zapojenie A/D prevodníka kompenzačného typu, ktorý umožňuje použiť lineárne vzrastajúce referenčné napätie alebo referenčné napätie úmerné váhe binárneho čísla.

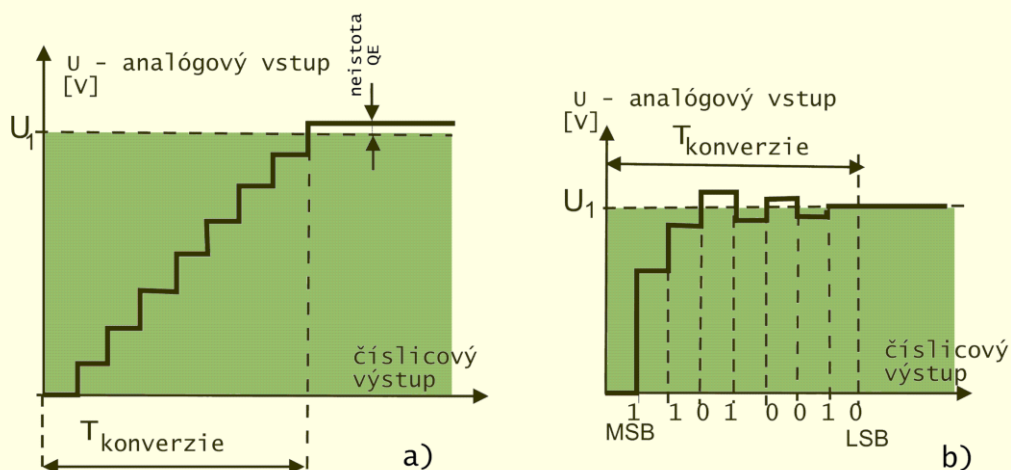
10.2.3.2 Sériový spôsob A/D prevodu

Pre rozlišovaciu schopnosť vyššiu ako 8 bitov treba použiť iné ako paralelné metódy A/D prevodu. V jadrove-fyzikálnych meraniach sú najviac používané metódy:

- Wilkinsonova metóda s lineárne sa meniacim kompenzačným napätím;
- Metóda postupnej aproximácie amplitúdy.

Obidve metódy sú založené na postupnom kompenzovaní neznámeho vstupného napätia známym referenčným napätím a líšia sa hlavne spôsobom generovania referenčného napätia – v starších analyzátoroch pomocou generátora pílovitého napätia, v modernejších, mikroprocesorom riadených analyzátoroch, pomocou D/A prevodníka.

Obrázok 10-20 objasňuje činnosť pri A/D prevode. Na začiatku výkladu predpokladajme, že na vzorkovacom kondenzátore C už existuje stála amplitúda napätia U_S , ktorú treba určiť. Obrázok 10-21 ilustruje rôzne možnosti generovania referenčného kompenzačného napätia pri mikroprocesorovom ovládaní. Pri použití spôsobu generovania referenčného napätia, podľa obrázku 10-21a sa najprv vynuluje počítadlo $N_C=0$ (obr. 10-20), aby sa cez pripojený D/A prevodník mohlo na vstupe komparátora, pri postupnom zvyšovaní obsahu počítadla, **generovať lineárne vzrastajúce referenčné napätie**. Po každej zmene obsahu počítadla ovládacia logika testuje stav výstupu komparátora. Akonáhle dosiahne porovnávacie napätie z D/A prevodníka úroveň amplitúdy vstupného, meraného napätia, ovládaci signál z komparátora zakončí ďalšie pripočítavanie impulzov do počítadla. Aktuálny obsah počítadla N_C je po skončení prevodu úmerný amplitúde vstupného napätia U_S . Do pamäťovej bunky, prislúchajúcej kanálu N_C sa uloží +1, ako potvrdenie, že bol zaregistrovaný výskyt jednej udalosti s danou amplitúdou. Ďalší cyklus prevodu môže začať po vynulovaní počítadla a po vynulovaní náboja na vzorkovacom kondenzátore. Potom sa môže znova aktivovať spínač vzorkovacieho obvodu S_1 , čím bude umožnené ďalšiemu impulzu zapamätať svoju amplitúdu na vzorkovacom kondenzátore C. Nakoľko A/D prevod sa začína vždy od nulového obsahu počítadla a trvanie A/D prevodu $T_{conv} \sim N_C \sim 2^n$ závisí od počtu krokov 2^n , uložených v počítadle, je trvanie A/D prevodu väčších amplitúd dlhšie ako trvanie A/D prevodu menších amplitúd.



Obr. 10-21.

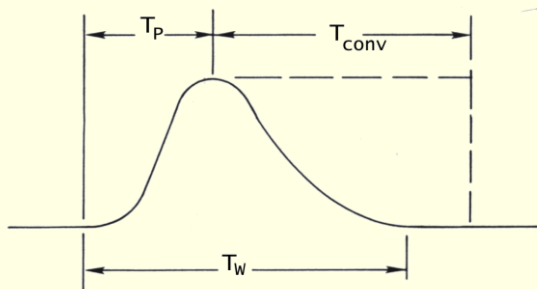
Postup pri aproximovaní vstupnej amplitúdy (T_{conv} – trvanie A/D prevodu) pomocou:

- lineárne narastajúceho napätia (QE - kvantizačná chyba len rovnakého znamienka)
- postupnej aproximácie meranej amplitúdy vstupného napätia (možnosť výskytu kvantizačnej chyby - QE a rôzneho znamienka)

Skrátiť trvanie prevodu amplitúdy T_{conv} možno iným spôsobom generovania referenčného kompenzačného napätia. V **A/D prevodníku s postupnou aproximáciou meranej amplitúdy** sa impulz najprv prepustí cez lineárne hradlo a nabije pamäťový kondenzátor, rovnako ako v predošlom prípade, avšak **referenčné**

napätie sa generuje pomocou D/A prevodníka nie lineárne narastajúcim spôsobom ale **úmerne váhe binárneho čísla** podľa obrázku 10-21b.

Prevod sa teda začne nastavením obsahu počítadla tak, aby jeho najvyšší (MSB) bit sa dostal do stavu "1" a tým sa na výstupe D/A prevodníka získa referenčné napätie s amplitúdou rovnou polovine maxima referenčnej amplitúdy U_r . V prípade 8 – bitového počítadla na obrázku 10-21b sa nastaví kódom 1000000B=80H=128D napätie $U_r(128/255)$, čo je o málo viac ako $\frac{1}{2}$ maximálneho obsahu počítadla, nastaviteľná kódom 0FFH=255D. V prvom kroku sa teda zisťuje, či je vstupné napätie na kondenzátore U_s menšie alebo väčšie ako nastavená referenčná hodnota $U_r(128/255)$. Ak ovládacia logika na výstupe komparátora indikuje splnenie podmienky $U_s > U_r(128/255)$ ponechá sa najvyšší bit MSB v stave "1". Ak je toto napätie menšie $U_s < U_r(128/255)$ uvedie sa MSB do stavu "0" a testuje sa vplyv susedného (MSB-1) bitu, čím sa pokračuje v testovaní s cieľom zistiť vzťah vstupnej amplitúdy U_s k štvrtine referenčného napätia $U_r(64/255)$. Podľa výsledku komparácie sa buď zachová prednastavený (MSB-1)=6 bit v stave „1“ alebo sa uvedie naspäť do stavu "0". Takýmto algorytmom sa pokračuje s ďalším bitom a po n krokoch, porovnaním najmenej významného (LSB) bitu, sa aproximácia zakončí. S pomocou obrázku 10-21 si možno potvrdiť, že **tento typ ADC je rýchly**, lebo proces merania sa zakončí po $n=8$ krokoch, zatiaľ čo pri použití lineárne narastajúceho kompenzačného napätia v ADC sa proces určenia veľkej amplitúdy vstupného napätia môže predĺžiť na $2^n=2^8=256$ krokov.



Obr. 10-22.

Podiel trvania A/D prevodu k mŕtvej dobe $T_M = T_{conv} + T_{MC}$ v ADC s postupnou aproximáciou :

T_w - šírka impulzu na prahovej úrovni šumov diskriminátora;

T_p - interval otvorenia lineárneho hradla, keď sa nabíja vzorkovací kondenzátor;

T_{conv} - doba A/D prevodu.

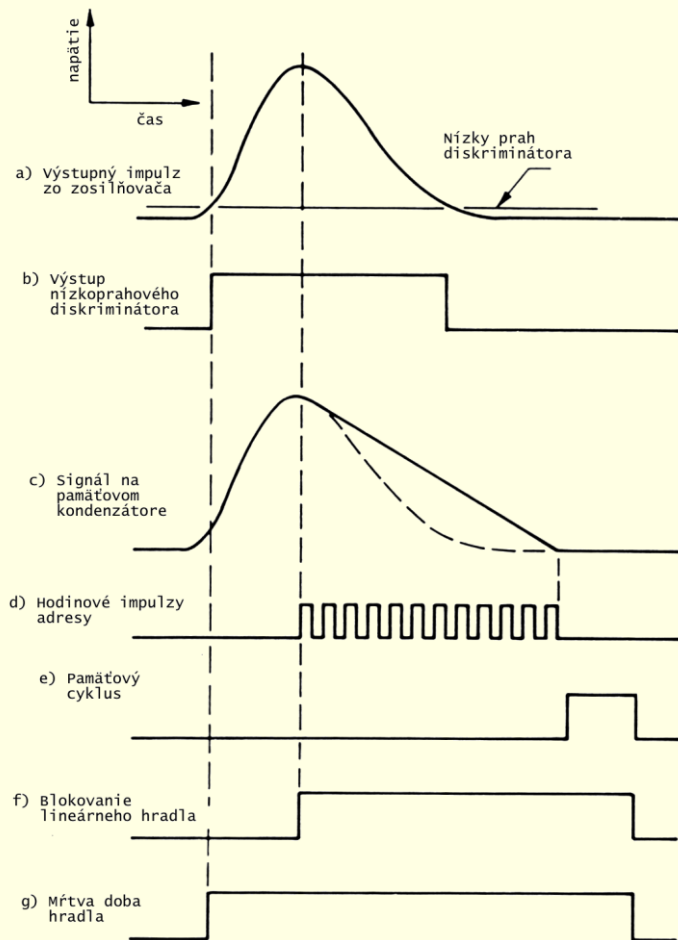
Obrázok 10-22 slúži na ilustráciu malého príspevku trvania A/D prevodu T_{conv} k mŕtvej dobe T_M A/D prevodníka s postupnou aproximáciou meranej amplitúdy vstupného napätia. Na rozdiel od ADC s lineárne sa meniacim referenčným napätím, kde doba prevodu $T_{conv} \sim N_C \sim 2^n$, v n -bitovom **ADC s postupnou aproximáciou, sa zakončí aproximácia amplitúdy po "n" krokoch aproximácie**. Trvanie intervalu, keď sa vykonáva prevod a ADC je necitlivý na vstup ďalších impulzov sa nazýva **mŕtva doba** T_M . Mŕtva doba tohto typu ADC a je o niečo dlhšia ako doba prevodu $T_{conv} = n \cdot t_a$:

$$T_M = n \cdot t_a + T_{MC}$$

kde T_{MC} – konštantné trvanie intervalu, rádovo niekoľko μs , ktoré je určené trvaním čela meraného impulzu a trvaním vnútorného spracovania signálu, do okamihu keď sa začnú počítať časovacie impulzy.

t_a – trvanie jedného kroku aproximácie.

Pre lepšiu predstavu u ADC s 4096 kanálmi ($n=12$) pri trvaní jedného kroku aproximácie $t_a \sim 1 \mu s$ trvá prevod maximálne $12 \mu s + T_{MC}$ a **mŕtva doba** v dôsledku krátkeho **trvania prevodu je prakticky nezávislá od amplitúdy**.



Obr. 10-23.

Postup pri A/D prevode Wilkinsonovým spôsobom. Pomocou nízko prahového diskriminátora (b) sa definuje trvanie vstupného impulzu (a) ako pomocný interval (c) pre určenie trvania konverzie. Proces vybíjania kondenzátora (d) je meraný počtom veľmi krátkych hodinových impulzov adresy s vysokou frekvenciou (e). Spínač S1 lineárneho hradla je blokován (f) počas vybíjania kondenzátora a aj počas ukladania do pamäti informácie o veľkosti odmeranej amplitúdy (e). Celková mŕtva doba ADC (g) je určená intervalom nabíjania kondenzátora a intervalom blokovania lineárneho hradla.

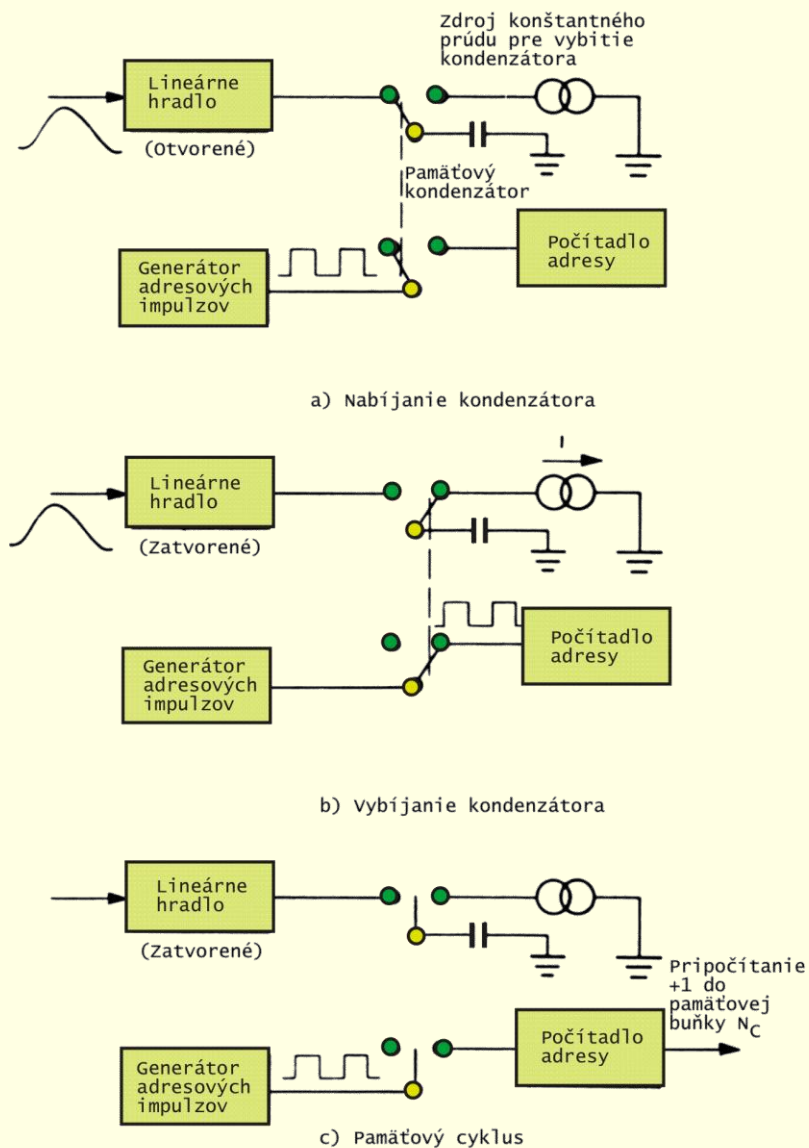
Veľkou prednosťou ADC s postupnou aproximáciou je **vysoká rýchlosť prevodu** aj pri vysokom rozlíšení. Nevýhodou je **nízka diferenciálna linearita** (typická DNL~10-20%) spôsobená tým, že pri tomto spôsobe generovania referenčného napätia môže mať kvantizačná chyba QE (obr. 10-21a) rôzne znamienka. V ADC s lineárne narastajúcim kompenzačným napätím je kvantizačná chyba QE (obr. 10-21a) len rovnakého znamienka, možno ju zahrnúť do kalibrácie spektrometra a preto je tento ADC presnejší.

Obrázok 10-23 zobrazuje modifikovaný postup A/D prevodu s pomocou lineárne klesajúceho referenčného napätia do nulovej úrovne. Zjednoduší sa tým konštrukčne komparátor a odpadá nutnosť nulovania náboja na vzorkovacom kondenzátore C, nakoľko tento sa po rýchlom nabití meraným impulzom vybije konštantným prúdom. Proces vybíjania náboja na kondenzátore sa meria pomocou periódy generátora hodinových impulzov. Tento upravený spôsob A/D prevodu je v literatúre známy ako **Wilkinsonov spôsob A/D prevodu**.

Obrázok 10-24 podrobnejšie špecifikuje jednotlivé fázy prevodu vo Wilkinsonovom ADC:

- Po vstupe impulzu pomocou diskriminátora s nízkym prahom (obr. 10-23b) sa generuje na jeho výstupe ovládací impulz (obr. 10-24a), ktorý **otvorí lineárne hradlo** (spínač S1 na vstupe ADC obr. 10-20), čím umožní **nabitie pamätového kondenzátora**.

- Po nabití kondenzátora sa **uzatvorí lineárne hradlo** (spínač S1 na vstupe ADC obr. 10-20) na celý čas prevodu (obr. 10-23f) a začne sa **proces vybíjania kondenzátora** pomocou konštantného prúdového zdroja až do úrovne 0V (obr. 10-24b). Pritom sa meria interval vybíjania kondenzátora (obr. 10-23d) pomocou hodinových impulzov z generátora, ktoré registruje počítadlo adresy.
- V poslednom pamäťovom cykle **obsah počítadla adresy N_C slúži ako adresa pamätevej lokality**, kam sa pripočíta informácia o zaregistrovaní danej amplitúdy, (t.j. počet výskytov udalostí v danej lokalite sa zväčší o +1).



Obr. 10-24.

Postup operácií pri A/D prevode Wilkinsonovým spôsobom:

- a) nabíjanie vzorkovacieho kondenzátora;
- b) vybíjanie kondenzátora;
- c) pamäťový cyklus.

Na dosiahnutie vysokej presnosti by malo trvať vybíjanie kondenzátora čo najdlhšie (čo by ale spomaľovalo činnosť prevodníka), alebo by mala byť **frekvencia f_C generátora čo najvyššia**. Napríklad moderné 12 bitové ADC s 4096 kanálmi a 13 bitové ADC s 8192 kanálmi používajú frekvencie 100 – 250 MHz.

Mŕtva doba Wilkinsonovho ADC T_M , na obr.10-23g, je trvanie keď sa vykonáva prevod a ADC je necitlivý na vstup ďalších impulzov. Je o niečo dlhšia ako doba prevodu:

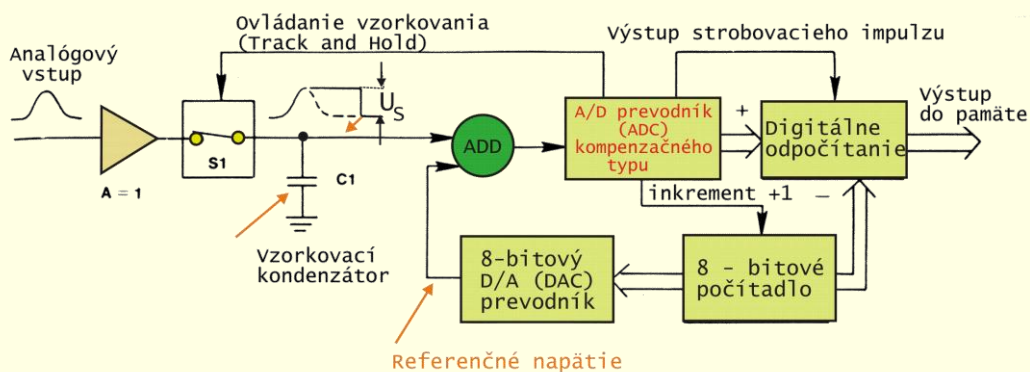
$$T_M = N_C / f_C + T_{MC}$$

Kde:

T_{MC} – konštantné trvanie intervalu, rádovo niekoľko μs , ktoré je určené trvaním čela meraného impulzu a trvaním vnútorného spracovania signálu do okamihu, keď sa začnú počítať časovacie impulzy.

Prednosťou Wilkinsonovho A/D prevodu je **linearita a stabilita prevodu** (charakterizovaná procesom vybíjania kondenzátora) a malá diferenciálna nelinearita. **Trvanie prevodu ale závisí od počtu kanálov prevodníka**. Pre lepšiu predstavu u ADC s 4096 kanálmi býva maximálna mŕtva doba $T_M \sim 40 - 45 \mu s$.

Skrátiť mŕtvu dobu T_M možno urýchlením vybíjania kondenzátora. **Prevodník s kĺzavou škálou prevodu** na obr. 10-25 je vylepšeným typom ADC, ktorý si zachováva vysokú **linearitu** prevodu ADC s lineárne sa meniacim referenčným napätím a má tiež vysokú **rýchlosť** podobne ako ADC s postupným vážením. Hrubá aproximácia sa vykoná rýchlo metódou postupnej aproximácie pomocou 8-bit počítadla a ďalej sa pokračuje pomocou pomalého vybíjania kondenzátora ako pri Wilkinsonovej metóde.



Obr. 10-25.

A/D prevodník s kĺzavou škálou prevodu Súčtový člen ADD umožňuje skombinovať rýchlu metódu postupnej aproximácie meranej amplitúdy úmerne váhe binárneho čísla pre 8 najvýznamnejších bitov – MSB s presnosťou Wilkinsonovej metódy pre zvyšnú oblasť menej významných bitov - LSB.

KONTROLNÉ OTÁZKY

1. Aká je odlišnosť činnosti integrálneho a diferenciálneho diskriminátora?
2. Čím sa líši diskriminátor napät'ových a prúdových impulzov?
3. Čo spôsobuje hysterézia prahu diskriminátora?
4. Ako vyzerá optimálny tvar impulzov na vstupe a výstupe diskriminátora?

5. Ako dlho trvá odmeranie prístrojového spektra z detektora pomocou jednokanálového a mnohokanálového analyzátora?
6. Čím sa odlišuje diskriminátor od lineárneho hradla?
7. Ako možno využiť impulzy z výstupov diskriminátora a lineárneho hradla pri spektrometrickom meraní?
8. Porovnajme vlastnosti diódy, FET a logického integrovaného hradla vo funkcii elektronického spínača.
9. Ktoré typy A/D prevodníkov sú optimálne pre vysokú rýchlosť prevodu?
10. Ktoré typy A/D prevodníkov sú najpresnejšie?
11. Linearita, rozlišovacia schopnosť a mŕtva doba A/D prevodníka?
12. Čo je prednosťou A/D prevodníka s kízavou škálou prevodu?

SÚHRN

V amplitúde impulzu z detektora ionizujúceho žiarenia môže byť zakódovaná informácia o energii žiarenia. Meranie amplitúdy impulzov je zložitú, pretože je treba aby sa pomocou lineárneho hradla vytvorila na vzorkovacom kondenzátore amplitúda napätia, ktorú možno počas určitého časového intervalu pokladať za stálu a odmerať ju podobne ako amplitúdu jednosmerného napätia. Na presné meranie amplitúd impulzov z detektorov ionizujúceho žiarenia sa používa **mnohokanálový analyzátor**, hlavnou súčasťou, ktorého je **amplitúdovo – číslicový (A/D) prevodník**. Pri voľbe typu A/D prevodníka je podľa podmienok experimentu treba voliť kompromis medzi rýchlosťou a presnosťou A/D prevodníka. V niektorých experimentoch postačuje oddeliť impulzy z rôznymi amplitúdami, pomocou **diskriminátorov** – integrálneho alebo diferencálneho. Pomocou diferencálneho diskriminátora s automatickým posuvom diskriminačnej hladiny možno vytvoriť tzv. **jednokanálový analyzátor**, teda prístroj s obdobnými vlastnosťami ako mnohokanálový analyzátor len pomalšie pracujúci. V zložitejších experimentoch možno pomocou rôznych obvodov, napr. diskriminátorov, koincidenčných a antikoincidenčných obvodov a lineárneho hradla vyberať pre amplitúdovú analýzu len niektoré vybrané udalosti. Impulzy z výstupu diskriminátora majú charakter logických impulzov, môžu ovládať lineárne hradlo ale kvôli štandardizovanej amplitúde už nie sú vhodné pre amplitúdovú analýzu.



Návrat z acrobat readera -  (zatvorením okna)