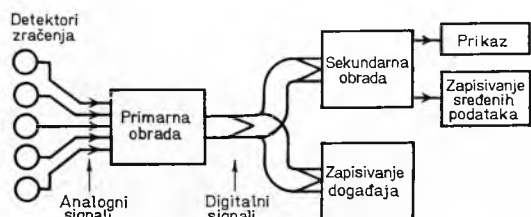


**ELEKTRONIČKA INSTRUMENTACIJA U NUKLEARNOJ FIZICI** bitni je sastavni dio eksperimentalnih sistema u nuklearnoj fizici. Njena je specifičnost obrada signalâ iz detektorâ nuklearnog zračenja (v. *Detekcija nuklearnog zračenja*, TE 3, str. 240). *Nuklearna elektronička instrumentacija* jest elektronička instrumentacija vezana uz detekciju zračenja. Područje elektronike koje se njome bavi jest *nuklearna elektronika*.

U ovom se članku govori o mnogim pojmovima, metodama i sklopovima koji su opisani u člancima *Analogna računala*, TE 1, str. 298; *Digitalna računala*, TE 3, str. 313, *Električna mjerenja*, TE 3, str. 590, *Elektronika i Impulsna tehnika*.

Tipični eksperimentalni sistem u nuklearnoj fizici prikazan je shematski na sl. 1. Nuklearnim procesom stvara se zračenje koje se sastoji od čestica ili kvanata; iz njihovih se svojstava i međusobnih odnosa donose zaključci o samom procesu. Pomoću detektorâ raspoređenih po određenoj geometriji, zračenje se pretvara u strujne impulse koji daju podatak o trenucima dolaska i energijama čestica i kvanata koji su na detektore stigli. Impulsi iz detektorâ zračenja predaju se kao analogni signal elektroničkom sistemu za *primarnu obradu*, koji na temelju njihove veličine i vremenskih odnosa ustanovljuje da se je desio unaprijed određeni događaj i klasificira (svrstava prema određenim kriterijima) taj događaj u jednu od unaprijed definiranih klasa. Obično je svakoj klasi pridijeljen broj koji se pri klasifikaciji po jednom parametru naziva *redni broj kanala*, a pri složenijoj klasifikaciji *deskriptor*. Sistem za primarnu obradu daje na svojim izlazima digitalne električne signale, koji označavaju događaj i izražavaju redni broj kanala ili deskriptor u pogodnom kodu. Ti se signali prenose na sistem za *sekundarnu obradu* u realnom vremenu (tj. za vrijeme pristizanja podataka) ili na sistem za *zapisivanje* na magnetsku traku, bušenu papirnatu traku itd. radi naknadne automatske sekundarne obrade. Sekundarna se obrada sastoji najčešće od određivanja broja klasificiranih događaja za svaku klasu, od prikaza dobivenih podataka sređenih na prikladan način i od zapisivanja sređenih podataka. Za sekundarnu obradu u realnom vremenu često se primjenjuju digitalna elektronička procesna računala, a katkada još i velika digitalna računala, ako se zahtijeva složenija i opsežnija obrada podataka.



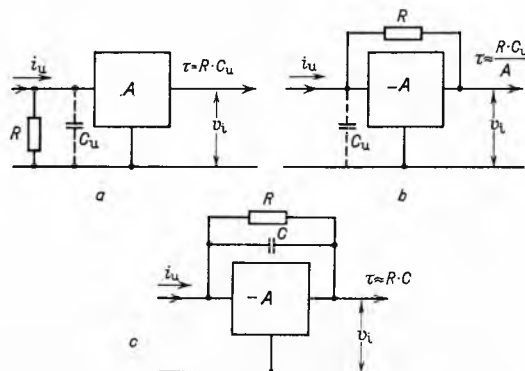
Sl. 1. Blok-shema elektroničkog mjernog i analizatorskog sistema upotrebljavanog pri eksperimentima u nuklearnoj fizici

Broj detektorâ, funkcija i kompleksnost elektroničkog sistema ovisi o eksperimentu, pa se samo za neke vrlo česte i jednostavnije slučajeve mogu nabaviti kompletni sistemi. U većini slučajeva elektronički je sistem sastavljen od više ili manje standardiziranih funkcionalnih jedinica, koje su jedne s drugima povezane u jednu cjelinu direktno ili preko za tu svrhu specijalno izvedenih jedinica. Funkcionalne jedinice izvedene su najčešće kao modularne jedinice bez vlastitog napajanja. Više takvih jedinica stavlja se u zajedničku kutiju u kojoj se nalaze i izvori za napajanje. Eksperimentalni sistemi u nuklearnoj fizici mogu biti vrlo kompleksni; sistemi uz velike akceleratora, npr., mogu imati stotinjak detektora i mnogo funkcionalnih i modularnih jedinica za primarnu obradu i napajanje detektora.

Veličine po kojima se događaji najčešće selektiraju i klasificiraju jesu naboji ili amplitude detektorskih impulsa, koji su mjera za energiju čestica ili kvanata, i relativna vremenâ pojavâ impulsa pojedinih detektora. Da bi se mogla izvršiti takva selekcija i klasifikacija, mora se analognim elektroničkim operacijama u pogodnim sklopovima izvršiti analogna obrada signalâ iz detektorâ zračenja, kako bi se istaknula ona veličina prema kojoj se vrši selekcija i klasifikacija.

### Obrada impulsa za selekciju i klasifikaciju

**Pretpojačala.** Strujni impulsi iz detektora zračenja obično su toliko slabi da se prije prijenosa na sistem za primarnu obradu moraju pojačati. U tu svrhu služe pretpojačala s malim izlaznim otporom. Strujni impuls iz detektora obično se preko otpornika R (sl. 2 a) pretvara u naponski impuls, koji se pojačava jednostavnijim naponskim pojačalom velikog ulaznog otpora. Često se



Sl. 2. Sklopovi pretpojačala i njihove vremenske konstante integracije s otpornikom na ulazu (a), s otpornikom u povratnoj vezi (b) i s kondenzatorom u povratnoj vezi (c); A pojačanje naponskog pojačala,  $C_u$  ukupni kapacitet na ulaznim stezaljkama

primjenjuje spoj prikazan na sl. 2 b, s otpornikom R u povratnoj vezi. Kad se zahtijeva neovisnost izlaznog impulsa o kapacitetu detektora, upotrebljavaju se *nabojna pretpojačala* (sl. 2 c) kod kojih kondenzator C u povratnoj vezi određuje pojačanje. To je pojačalo u stvari integrator struje, pa je promjena napona na izlazu proporcionalna naboju detektorskog impulsa. Otpornik R služi samo za izbijanje kondenzatora C. Pretpojačala moraju biti izvedena tako da unose što manji šum. Najmanji se šum postiže primjenom unipolarnih tranzistora (v. *Elektronika, sastavni dijelovi*) koji su hlađeni na nisku temperaturu. Otpornik R također unosi šum, pa njegov otpor ne smije biti suviše malen.

**Glavna pojačala.** Naponski se impulsi iza pretpojačala dovode preko kabela na glavna pojačala, gdje se pojačavaju i oblikuju tako da budu što prikladniji za selekciju i klasifikaciju po amplitudi ili vremenu. Glavna pojačala sastoje se od nekoliko kaskadno vezanih pojačivačkih stupnjeva s povratnim vezama. Sklopovi za linearno oblikovanje nalaze se između stupnjeva ili u povratnim vezama.

*Linearna pojačala* moraju zadovoljiti najveće zahtjeve u pogledu linearnosti i stabilnosti pojačanja. Njima se pojačavaju impulsi za amplitudnu klasifikaciju. Integralna i diferencijalna nelinearnost pojačala mora biti što manja (ispod 1%).

Integralna nelinearnost obično je definirana kao relativna promjena pojačanja, tj. omjera između amplitude izlaznog impulsa i amplitude ulaznog impulsa u području od najmanje do najveće specificirane amplitude. Diferencijalna nelinearnost u tom području relativna je promjena omjera između porasta amplitude izlaznog impulsa i porasta amplitude ulaznog impulsa.

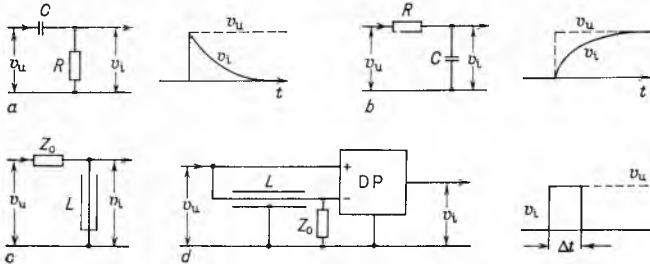
Dobra linearnost postiže se pomoću jakih povratnih veza u stupnjevima. Najčešće se upotrebljavaju stupnjevi s istosmjernom vezom na čijim se ulazima, zbog smanjenja utjecaja preuzbude i temperature, nalaze diferencijalni parovi. (Istosmjernom se naziva veza bez posredstva kondenzatora ili transformatora, koja prenosi također istosmjerne napone. Diferencijalni parovi su dva jednaka tranzistora ili dvije jednake elektronske cijevi kojima su emiteri, odn. katode, među sobom vezane a rade u spoju diferencijalnog pojačala.) U pojačalima za spektroskopiju visokog razlučivanja kod vrlo velike učestalosti impulsa, veze između stupnjeva obično su istosmjerne, osim na mjestima gdje su zbog oblikovanja takve veze nemoguće.

*Brza pojačala* izvedena su tako da mogu pojačati vrlo kratke i brze signale; linearnosti nije posvećena veća pažnja. Ona služe za pojačanje impulsa radi vremenske selekcije i klasifikacije.

*Tzv. prozorska pojačala* primjenjuju se u nekim specijalnim slučajevima. Ona pojačavaju, naime, samo one dijelove impulsa

koji se nalaze iznad podesivog praga. Takva pojačala nemaju sklop za oblikovanje impulsa. Ako su impulsi suviše kratki, gubi se linearna ovisnost između amplituda na izlazu i ulazu.

**Sklopovi za linearno oblikovanje**, stavljeni između stupnjeva glavnog pojačala, mogu se podijeliti u sklopove za diferenciranje i sklopove za integraciju. Najčešće se upotrebljavaju jednostavni sklopovi s kondenzatorima i otpornicima prikazani na sl. 3 a za CR-diferenciranje i na sl. 3 b za RC-integraciju s vremenskom konstantom  $\tau = RC$ . Odziv tih sklopova na skok,

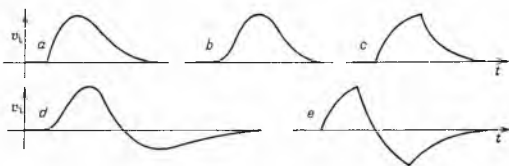


Sl. 3. Osnovni sklopovi za oblikovanje (lijevo) i njihov odziv na skok (desno): a CR-diferenciranje, b RC-integracija, c i d diferenciranje linijom za kašnjenje; L; DP diferencijalno pojačalo,  $v_u$  ulazni napon,  $v_l$  izlazni napon

tj. oblik impulsa  $v_l$  na izlazu kad ulazni signal  $v_u$  predstavlja skokovitu promjenu od nule na određenu konstantnu vrijednost, prikazan je na sl. 3 a i b desno od njihove sheme. Brzina opadanja ili porasta izlaznog signala ovisi o vremenskoj konstanti  $\tau$ . Diferenciranje se može izvršiti i sklopovima s linijom za kašnjenje, koja djeluje tako da signal kasni za interval vremena  $\Delta t$  (sl. 3 c i d). Odziv na skok tih sklopova je pravokutni impuls trajanja  $\Delta t$ . Izlazni napon  $v_l$  u trenutku  $t$  proporcionalan je razlici između ulaznog napona  $v_u$  u trenutku  $t$  i ulaznog napona u trenutku  $t - \Delta t$ .

Treba napomenuti da već i pretpojačalo vrši oblikovanje, i to integraciju s vremenskom konstantom  $\tau$ , koja je označena na sl. 2, a koja je obično velika. Ako su vremenske konstante integracije vrlo velike prema trajanju oblikovanog impulsa, mogu se takve integracije smatrati idealnim integracijama. Isto tako mogu se diferenciranja s velikim vremenskim konstantama, kao što su to npr. izmjenične veze (tj. veze preko kondenzatora ili transformatora) zanemariti u prvoj aproksimaciji.

U većini je slučajeva vremenska konstanta integracije  $\tau$  pretpojačala velika prema trajanju oblikovanog impulsa, a trajanje strujnog impulsa iz detektora vrlo je kratko. Pod tim uvjetima oblik je oblikovanog impulsa praktički jednak odzivu na skok glavnog pojačala.



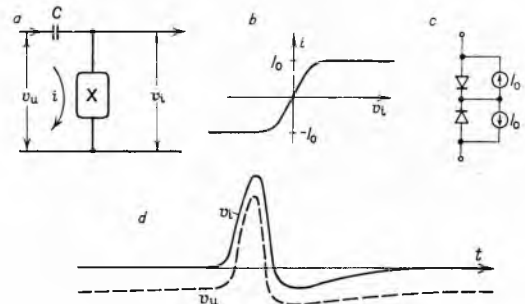
Sl. 4. Odziv na skok pojačala s različitim oblikovanjima. a) Jedno CR-diferenciranje i jedna RC-integracija, b) jedno RC-diferenciranje i četiri RC-integracije, c) jedno diferenciranje linijom za kašnjenje i jedna RC-integracija, d) dva CR-diferenciranja i četiri RC-integracije, e) dva jednaka diferenciranja linijama za kašnjenje i jedna RC-integracija. Vremenske konstante CR-diferenciranja jednake su vremenskim konstantama RC-integracija. Što su vremenske konstante veće, impulsi su dulji

Na sl. 4 prikazan je odziv na skok glavnog pojačala za nekoliko tipičnih oblikovanja. Odziv na skok je unipolaran ako se primijeni jedno diferenciranje (sl. 4 a...c), a bipolaran ako se upotrijebe dva (sl. 4 d, e). Kod većine pojačala može se pomoću preklopnika birati prikladan način oblikovanja. Često postoji mogućnost uključivanja jednog ili dvaju diferenciranja i nekoliko integracija s promjenljivim vremenskim konstantama.

**Oblikovanje impulsa za amplitudnu klasifikaciju** vrši se tako da njihova tjemena vrijednost (amplituda) bude proporcionalna naboju detektorskog impulsa sa što manjom pogreškom

zbog šuma, slučajne pojave impulsa i promjene oblika detektorskog impulsa. Veličina pojedinih pogrešaka ovisi o obliku impulsa i njegovom trajanju. Uz zadani oblik oblikovanog impulsa, utjecaj šuma je najmanji kad impuls traje određeno vrijeme. Što impuls dulje traje to je utjecaj promjena oblika detektorskog impulsa manji. Zbog slučajnosti pojave impulsa mogu se dva ili više impulsa pojaviti jedan uz drugi, pa tjemena vrijednost valnog oblika nastalog zbrajanjem njihovih trenutnih vrijednosti može bitno odstupati od amplitude impulsa (engl. *pile up*). Vjerojatnost da se to dogodi s tim je veća što su oblikovani impulsi dulji, a učestalost impulsa veća.

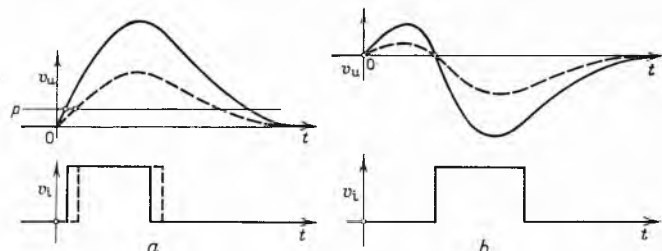
Ako postoje izmjenične veze ili integracije sa velikim vremenskim konstantama, oblikovani impulsi imaju jedva primjetljive dugačke repove. Zbrajanjem ovih repova dolazi kod većih učestalosti impulsa do znatnih sporih odstupanja početnog nivoa, što izaziva odstupanja tjemena vrijednosti od amplituda impulsa. Za bitno smanjenje i korekciju tih odstupanja primjenjuju se *uspostavljači početnog nivoa* (engl. *base line restorer*) (sl. 5 a), koji se u principu sastoje od kondenzatora C i sklopa X, čiji je diferencijalni otpor malen za male napone, a beskonačan za veće. Za ulazne napone  $v_u$  koji se sporo mijenjaju, kao što je to odstupanje početnog nivoa, struja kroz C je mala, pa X predstavlja mali otpor i napon na izlazu  $v_l$  je praktički 0. Oblikovani impuls je napon koji se brzo mijenja, pa X postaje beskonačni otpor.



Sl. 5. Uspostavljač početnog nivoa. a) Osnovni sklop, b) karakteristika sklopa X, c) jedna od izvedbi sklopa X, d) valni oblici ulaznog i izlaznog napona

Oblikovani impuls se dakle prenosi na izlaz bez bitne promjene oblika, a počinje od nivoa 0. Na sl. 5 b prikazana je karakteristika sklopa X, na sl. 5 c jedna od mogućih izvedbi tog sklopa, a na sl. 5 d oblik ulaznog i izlaznog impulsa.

**Oblikovanje impulsa za vremensku klasifikaciju** izvodi se obično tako da im se daje svima ista amplituda i oblik i jednako određeno trajanje. Time se gubi informacija sadržana u obliku i amplitudi impulsa, ali se zadržava i ističe informacija o trenutku pojave. Ovakvo oblikovanje je nelinearno i naziva se često vremenskim oblikovanjem, a impulsi koji se time dobivaju, vremenskim impulsima. U tu se svrhu primjenjuju vremenski sklopovi za oblikovanje ili diskriminatori, u kojima su bitni elementi nelinearni, i okidni sklopovi. Najčešće se vremenski impulsi dobivaju iz početnog brida linearno oblikovanog impulsa na ulazu kad njegova trenutna vrijednost pređe određeni prag (sl. 6 a). Početak tako dobivenog vremenskog impulsa ovisi o amplitudi, što dolazi do izražaja to manje što je prag niži. Ako je prag suviše nizak, generiraju se zbog šuma pogrešni vremenski impulsi. Oba spomenuta nedostatka mogu se bitno smanjiti primjenom prolaza

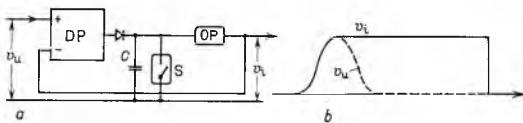


Sl. 6. Valni oblici na ulazu i izlazu vremenskih sklopova za oblikovanje kod dobivanja vremenskog impulsa korištenjem početnog brida (a) i kod dobivanja vremenskog impulsa prolazom kroz nulti nivo (b)

bipolarno oblikovanog impulsa kroz nulti nivo (sl. 6 b) koji ne ovisi o amplitudi. Vremenski se impuls generira samo ako je prije toga bio prekoračen određeni prag. U svim slučajevima nastaju zbog šuma fluktuacije u kašnjenju pojave vremenskih impulsa u odnosu prema impulsima iz detektora, o čemu treba voditi računa kod izbora linearnog oblikovanja impulsa na ulazu u vremenski sklop za oblikovanje.

**Brane.** U mnogim se sistemima šalju na dalju obradu samo neki odabrani impulsi. Za propuštanje takvih impulsa bez promjene njihovih karakteristika upotrebljavaju se linearne brane, na čijem izlazu se pojavljuju ulazni impulsi samo kad postoji signal za propuštanje, tj. kad je brana otvorena. Linearne brane su izvedene tako da prouzrokuju što manje nelinearnosti, naročito što se tiče amplitude. Često se zahtijeva da otvaranje i zatvaranje brane ne izazove promjene nultog nivoa, a ni značajnije prelazne pojave. Najčešće se upotrebljavaju unipolarne linearne brane, koje propuštaju samo unipolarne impulse, odnosno samo dijelove jednog polariteta bipolarnih impulsa. Linearne brane su u biti električnim signalima upravljane tranzistorske ili diodne sklopke, ili su to pojačala kojima je pojačanje smanjeno na nulu kad nema signala za propuštanje.

**Produživači amplitude** često su potrebni u sistemima u kojima se impulsi klasificiraju po amplitudi. Ti sklopovi kroz određeno vrijeme pamte amplitudu impulsa na ulazu, pošto on dosegne tjemenu vrijednost. Izlaz iz sklopa je zapamćena amplituda. Pamćenje amplitude vrši se kondenzatorom, koji se nabija na tjemenu napon impulsa na ulazu. U tu se svrhu često primjenjuje sklop s povratnom vezom (sl. 7 a). Kondenzator za pamćenje C ne smije se izbijati u intervalu pamćenja, pa se između njega i izlaza stavlja odvojno pojačalo OP. Na kraju intervala pamćenja, kondenzator se izbije sklopom za izbijanje S. Na ulazu u produživač obično se nalazi linearna brana koja se zatvara kad impuls na ulazu dosegne tjemenu vrijednost, a otvara nakon izbijanja kondenzatora. Produživači impulsa su često uključeni u druge jedinice, npr. u amplitudno-digitalne pretvarače.



Sl. 7. Produživač amplitude s povratnom vezom. a) Osnovni sklop, b) valni oblici ulaznog i izlaznog napona; DP diferencijalno pojačalo, OP odvojno pojačalo, S sklop za izbijanje kondenzatora za pamćenje C

**Linije za kašnjenje.** Često impulsi treba da zakasne za određeni iznos, a da se pri tome ne mijenjaju njihove ostale karakteristike, kao što su amplituda, oblik i trajanje. U tu se svrhu primjenjuju linije za kašnjenje. Manja kašnjenja dobivaju se prilagođenim spojnim kabelima odgovarajuće duljine (kašnjenje je  $\sim 4$  nanosekunda po metru duljine). Za veća kašnjenja služe specijalni kabeli za kašnjenje s povećanom samoindukcijom vodiča ili kompaktne linije za kašnjenje s određenim kašnjenjima. Često se na ulaz i izlaz linija za kašnjenje stavlja odvojna pojačala.

**Sklopovi za analognu računsku operaciju** primjenjuju se u primarnoj obradi impulsa samo iznimno, i to za zbrajanje, množenje i dijeljenje naponâ (ili struja). Ove operacije se obično vrše s amplitudama impulsa.

#### Vremenska i amplitudna selekcija

**Koicidencije-antikoicidencije** služe selekciji događaja po vremenskim odnosima između impulsâ. To su digitalni sklopovi koji se svode na logičku I-operaciju i koji daju na svom izlazu normirani impuls (impuls određene amplitude i oblika) samo onda kad na svim koicidentnim ulazima postoje istovremeno impulsi, a nema impulsa ni na jednom antikoicidentnom ulazu. Na ulaz u te sklopove daju se normirani impulsi iz sklopa za vremensko oblikovanje, amplitudnih diskriminatora ili drugih sklopova. Trajanje tih impulsa na samom I-sklopu i potrebno vrijeme preklapanja određuju razlučivanje koicidencije-antikoicidencije, tj. širinu vremenskih intervala unutar kojih se moraju nalaziti počeci impulsa da se dobije izlazni impuls kod koicidencije, odnosno da se ne dobije izlazni impuls kod antikoicidencije.

Kod brzih koicidencija, vremena razlučivanja reda veličine nanosekunde, razlučivanje je obično definirano širinom vremenskog intervala unutar kojeg je vjerojatnost da koicidencija daje izlazni impuls 50% ili veća. Zbog boljeg definiranja vremena razlučivanja, u jedinice za koicidenciju-antikoicidenciju ugrađeni su obično sklopovi za određivanje trajanja impulsa, kao npr. univibratori, diferencijatori s linijama za kašnjenje, itd. Sporije koicidencije za vremena razlučivanja iznad  $0,1 \mu s$ , koriste se uobičajenim logičkim sklopovima i digitalnim integriranim krugovima. U brzim sklopovima koicidencije primjenjuju se sklopovi s brzim elementima ili vrlo brzi integrirani krugovi ECL-logike (emiterško vezani logički sklopovi), a u najbržim koicidencijama upotrebljavaju se sklopovi s tunelskim diodama.

Da se izvrši selekcija po vremenu prema željenim vremenskim kriterijima, potrebno je često da ulazni impulsi zakasne za određene iznose. U tu svrhu upotrebljavaju se jednostavne linije za kašnjenje (ili spojni kabeli) ili, pak, elektronički sklopovi za kašnjenje, kao npr. univibratori (monostabilni multivibratori) i drugi sklopovi čiji se rad temelji na nabijanju kondenzatora. Elektronički sklopovi za kašnjenje daju na izlazu normirani impuls čije karakteristike najčešće ovise samo o sklopu.

**Amplitudni diskriminatori** služe za selekciju impulsâ po amplitudi. Ti sklopovi daju po amplitudi normirani impuls na izlazu, kad impuls na ulazu zadovoljava određene uvjete.

**Integralni amplitudni diskriminatori** daju normirani impuls na izlazu kad impuls na ulazu pređe određeni prag, tj. samo ako je amplituda impulsa veća od praga diskriminatora. Trajanje izlaznog impulsa određeno je obično diskriminatorom. Kod nekih diskriminatora impuls traje dok ulazni impuls ne padne ispod praga vraćanja. Integralni diskriminatori su u biti okidni sklopovi kojima su dodani elementi za što bolje definiranje praga.

**Diferencijalni amplitudni diskriminatori** daju na izlazu normirani impuls samo ako je amplituda ulaznog impulsa između njegovog donjeg i gornjeg praga, tj. unutar kanala. Izlazni impuls se pojavljuje nakon što ulazni impuls dostigne tjemenu vrijednost, a kod nekih diskriminatora tek nakon što ulazni impuls padne ispod donjeg praga. Od diferencijalnih diskriminatora zahtijeva se stabilnost i dobra diferencijalna linearnost, tj. da donji prag bude jednak namještenoj vrijednosti, a da širina kanala bude neovisna o donjem pragu. Diferencijalni diskriminatori su zapravo specijalni slučaj paralelnog amplitudno-digitalnog pretvarača sa samo jednim kanalom.

Često je potrebno izvršiti selekciju događaja po amplitudnim i vremenskim kriterijima, kao npr. selektirati one istovremene događaje čiji impulsi imaju amplitude unutar određenih kanala. Za veća vremena razlučivanja moguće je u tu svrhu koristiti se sporijim koicidencijama, na čije se ulaze daju impulsi iz diferencijalnih diskriminatora. Na taj se način ne mogu postići bolja razlučivanja, jer su impulsi na ulazu u diskriminatore oblikovani obično za amplitudnu klasifikaciju, a osim toga amplitudni diskriminatori nisu građeni za dobra vremenska razlučivanja. Mala vremena razlučivanja mogu se postići dodavanjem brze koicidencije (s posebnim pojačalima i sklopovima za oblikovanje), čiji se izlazni impulsi uz odgovarajuće kašnjenje daju na ulaz iste koicidencije na koju se daju i impulsi iz diskriminatora.

#### Vremenska i amplitudna klasifikacija

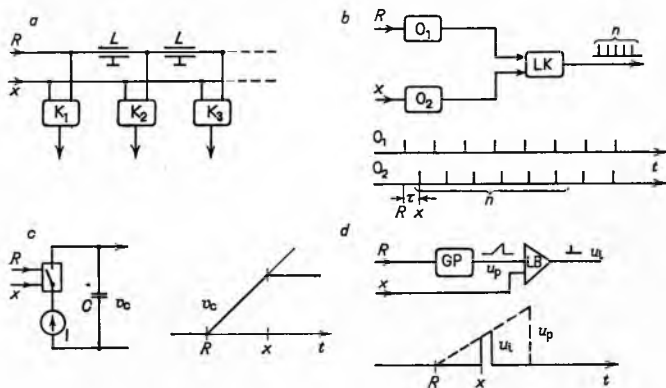
**Analogno-digitalni pretvarači** jesu složeni sklopovi kojima se neka analogna veličina klasificira u jedan od  $N$  mogućih kanala. Analognoj veličini pridjeljuje se broj kanala, koji je cijeli broj između 1 i  $N$ . Ova se operacija često naziva analogno-digitalnom pretvorbom ili digitalizacijom. Analogna se veličina klasificira u onaj kanal čiji je donji prag iznad iznosa analogne veličine, a gornji prag ispod njega. Razlika između granica kanala je širina kanala, koja bi morala biti jednaka za sve kanale. Diferencijalna nelinearnost pretvarača, definirana kao relativno odstupanje širine kanala u zadanom području, mora biti što manja. Nakon izvršene pretvorbe, broj kanala izražen je signalima na digitalnim izlazima najčešće u paralelnom binarnom kodu.

**Vremensko-digitalni pretvarači** klasificiraju vremenske intervale između impulsa na referentnom ulazu (R) i impulsa na ulazu za signale (X).

Klasifikacija većih vremenskih intervala, odnosno njihovo mjerenje širinom kanala iznad 2 ns, može se izvršiti *brojanjem periodičkih impulsa* oscilatora stabilne frekvencije koji se pojavljuju unutar vremenskog intervala koji se klasificira. U tu se svrhu primjenjuju samostalni oscilatori sa sklopovima koji na izlazu daju impulse oscilatora samo u intervalu mjerenja, tj. od pojave impulsa R do X, ili upravljani oscilatori koji osciliraju samo u tom intervalu. Broj kanala izražen je u kodu električnim signalima na digitalnim izlazima brojila. Kad treba klasificirati vremenske intervale od nekoliko impulsa (X) s obzirom na isti referentni impuls, brojanje se ne prekida tim impulsima, već se njima upiše broj kanala iz brojila u privremenu memoriju.

Klasifikacija manjih vremenskih intervala u kanale širine ispod 2 ns može se izvršiti pomoću niza *koincidencija povezanih s linijama za kašnjenje* koje djeluju tako da referentni impuls kasni za iznos  $\Delta$ , sl. 8 a. Uz odgovarajući izbor duljine impulsa, prva koincidencija daje izlazni impuls kad impuls kasni od 0 do  $\Delta$ , druga kad kasni od  $\Delta$  do 2  $\Delta$ , itd. Širina kanala određena je kašnjenjem linija, pa je teško postići dobru diferencijalnu linearnost.

Bolja diferencijalna linearnost postiže se *vremenskim nonijem* (sl. 8 b). Referentni impuls pokreće generator  $O_1$  periodičkog valnog oblika (impulsi ili sinusoida) s periodom  $T$ . Impulsom čije se kašnjenje  $\tau$  mjeri pokreće se isto takav generator  $O_2$  sa smanjenom periodom  $T - \Delta$ . Nakon  $n = \tau/\Delta$  perioda generatora  $O_2$  poklapat će se valni oblici obiju generatora, pa se brojanjem perioda generatora  $O_2$  do poklapanja s valnim oblikom generatora  $O_1$  dobiva broj kanala.



Sl. 8. Osnovni sklopovi vremensko-digitalnih pretvarača. a Pretvarač s koincidencijama K i linijama za kašnjenje L, b vremenski nonij, c pretvarač vrijeme-amplituda s nabijanjem kondenzatora, d pretvarač vrijeme-amplituda s uzimanjem uzorka pilastog napona;  $O_1$  i  $O_2$  generatori periodičkih impulsa, LK sklop za propuštanje impulsa iz  $O_1$ , GP generator pilastog napona, LB linearna brana

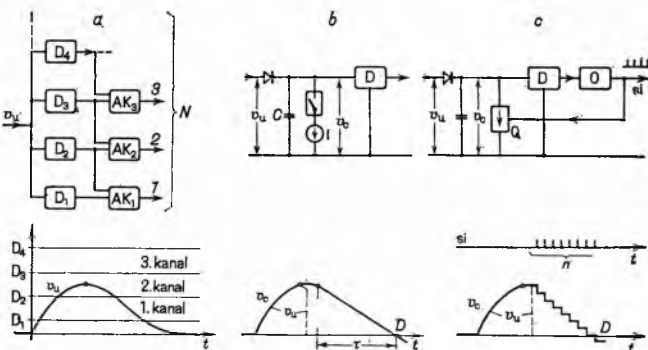
Klasifikacija vremenskih intervala u kanale širine od nekoliko desetaka pikosekunda može se izvršiti *vremensko-amplitudnim pretvaračima*, koji pretvaraju vremenske intervale u impulse s njima proporcionalnim amplitudama. Ovi impulsi se zatim digitaliziraju amplitudno-digitalnim pretvaračima. Pretvorba vremenskog intervala u amplitudu može se izvršiti nabijanjem kondenzatora izvorom konstantne struje koji je uključen za vrijeme vremenskog intervala koji se klasificira (sl. 8 c) ili uzimanjem uzorka pilastog napona, koji započinje referentnim impulsom u trenutku pojave impulsa X čije se kašnjenje mjeri (sl. 8 d).

**Amplitudno-digitalni pretvarači** klasificiraju impulse po amplitudi, tj. digitaliziraju amplitude impulsa. Uz diferencijalnu linearnost, najvažnija karakteristika tih pretvarača je vrijeme pretvorbe, koje ovisi o načinu analognog-digitalne pretvorbe.

**Paralelni amplitudno-digitalni pretvarači**, kod kojih se pragovi kanala određuju integralnim amplitudnim diskriminatorima, upotrebljavaju se katkada za klasifikaciju u manji broj kanala uz malo vrijeme pretvorbe (sl. 9 a). Ako se amplituda impulsa nalazi između praga  $n$ -tog i  $(n + 1)$ -og diskriminatora, svi diskriminatori do uključivo  $n$ -tog daju na izlazu impulse, a  $(n + 1)$ -i i viši diskriminatori ne daju impulse. Logičkim sklopovima, koji se u biti sastoje od antikoincidencija impulsa diskri-

minatora sa susjednim višim, generira se impuls samo na izlazu iz  $n$ -te antikoincidencije, tj. na vodu  $n$ -tog kanala. Širina kanala ovisi o razlici pragova diskriminatora, pa se teško postiže dobra diferencijalna linearnost.

**Amplitudno-digitalni pretvarači s izbijanjem kondenzatora** primjenjuju se najčešće jer su razmjerno jednostavni i imaju dobru diferencijalnu linearnost. Kondenzator koji se izbija dio je proizvođača impulsa, pa je napon na njemu nakon tjemena impulsa jednak amplitudi impulsa.



Sl. 9. Osnovni sklopovi amplitudno-digitalnih pretvarača. a Paralelni pretvarač, b pretvarač s linearnim izbijanjem kondenzatora, c pretvarač sa stepeničastim izbijanjem kondenzatora;  $D_1, \dots, D_n$  integralni diskriminatori,  $AK_1, \dots, AK_n$  sklopovi koji sadrže antikoincidencije, Q generator strujnog impulsa određenog naboja, O upravljani oscilator koji generira izlazne impulse si i okida generator Q

Kod pretvarača s *linearnim izbijanjem* (sl. 9 b) uključuje se zatim izvor konstantne struje, koji smanjuje napon na kondenzatoru linearno s vremenom. Vremenski interval od početka izbijanja do pada napona ispod praga amplitudnog diskriminatora proporcionalan je amplitudi impulsa i pretvara se u digitalni oblik vremensko-digitalnom pretvorbom brojanjem impulsa iz oscilatora.

Kod pretvarača sa *stepeničastim izbijanjem* (sl. 9 c) izbija se kondenzator pomoću generatora impulsa konstantnog naboja i broji broj impulsa potrebnih da se kondenzator izbije ispod praga diskriminatora.

Vrijeme pretvorbe pretvarača s izbijanjem kondenzatora proporcionalno je rednome broju kanala u koji se klasificira amplituda. Brzina pretvorbe je do 200 kanala po mikrosekundi. Broj kanala u koje se vrši klasifikacija kreće se najčešće od 128 do 8192. Vrijeme pretvorbe pretvarača za 4096 kanala je od 25 do 500  $\mu$ s, ovisno o frekvenciji oscilatora.

**Pretvarači sa sukcesivnom aproksimacijom** omogućuju vrijeme pretvorbe od nekoliko mikrosekundi u veliki broj kanala. Ovi pretvarači moraju imati proizvođača impulsa, a dobra diferencijalna linearnost može se postići samo primjenom sistema za smanjivanje diferencijalne nelinearnosti. Najčešće se upotrebljava sistem kod koga se ulaznoj veličini doda određeni iznos, koji se mijenja od pretvorbe do pretvorbe, a od digitalnog izlaza odbija njegov digitalni ekvivalent. Time se ulazna veličina istog iznosa klasificira u različite kanale pretvarača, pa je za veliki broj pretvorbi ekvivalentna širina kanala jednaka srednjoj širini kanala. Pretvarači sa sukcesivnom aproksimacijom prilično su složeni i skupi.

Amplitudno-digitalni pretvarači izvedeni su obično tako da se nakon izvršene pretvorbe blokiraju, tj. da ne mogu početi s novom pretvorbom dok ne dobiju signal za deblokiranje. U te jedinice obično su ugrađene i spore koincidencije-antikoincidencije te diskriminatori za određivanje područja amplituda unutar kojeg se omogućuje analognog-digitalna pretvorba.

### Sekundarna obrada, registracija i prikaz podataka

Najčešća operacija sekundarne obrade jest brojanje impulsa.

**Elektronička brojila** (v. *Električna mjerenja*, TE 3, str. 608) često se upotrebljavaju za to. Ona pamte broj impulsa koji su se pojavili na ulazu i povećavaju taj broj za jedinicu svaki put kad se pojavi novi impuls. Za brzine brojanja do nekoliko stotina megaherca u brojilima se upotrebljavaju digitalni integrirani krugovi, a za brzine brojanja do iznad 500 MHz hibridni sklopovi

• tunelskim diodama. Brojila se brišu, tj. postavljaju u stanje koje odgovara broju 0, električnim impulsom ili pritiskom na tipku. Većina brojila ima indikatore za očitavanje zapisanog broja (stanja brojila) i električne digitalne izlaze koji u paralelnom binarnom ili binarno-dekadskom kodu izražavaju zapisani broj za njegovo automatsko očitavanje i prijenos u druge dijelove sistema. Neka brojila izvedena su tako da nakon unaprijed određenog broja registriranih impulsa daju impuls na izlazu. Taj broj postavlja se preklopnici ili digitalnim električnim signalima. Posljednje spomenuta brojila uotrebljavaju se najčešće za definiranje vremenskih intervala.

Direktno brojnje događaja klasificiranih u više kanala zahtijeva za svaki kanal posebno brojilo, kojemu se direktno ili preko odgovarajućih pretvarača koda daje impuls kad je događaj svrstan u taj kanal. Ovakav je način brojanja vrlo skup ako se broje događaji klasificirani u veliki broj kanala. U tom slučaju jeftinije je rješenje upotreba feritnih ili drugih memorija, ili digitalnih procesnih računala, koji uz brojanje mogu izvršavati i druge funkcije u sistemu, npr. u vezi s ispisivanjem i prikazom podataka.

**Feritne memorije** (v. *Digitalna računala*, TE 3, str. 320) mogu se upotrijebiti za brojanje impulsa ako imaju aritmetički krug za pribiranje jedinice. Svakom kanalu pridijeljena je jedna lokacija memorije u koju je upisan broj registriranih događaja. Taj se broj u određenom kanalu povećava tako da se u registar adrese upiše broj kanala (deskriptor) i daje impuls za povećanje broja za jedinicu. Time se iz lokacije memorije koju određuje broj upisan u registru adrese očitava broj registriranih događaja i upiše u aritmetički krug, gdje mu se pribraja jedinica. Tako povećani broj se zatim ponovo upiše u istu lokaciju memorije. Ova operacija traje obično 1...10  $\mu$ s. Broj registriranih događaja u kanalu očitava se preko aritmetičkog kruga kao kod brojila, pošto se broj upiše iz pripadne lokacije memorije u aritmetički krug na gore opisani način, ali bez pribiranja jedinice. S digitalnih izlaza može se zapisati broj prenijeti na druge sisteme i ispisati štampačem, teleprinterom, bušačem, itd. Ispisivanje se obično vrši kanal po kanal počevši od prvog kanala. Sadržaji kanala mogu se također ispisati u analognom obliku pomoću pisača i/ili prikazati na ekranu katodne cijevi. Za pretvorbu broja u analogni oblik, tj. njemu proporcionalnu struju ili napon, upotrebljavaju se digitalno-analogni pretvarači, koji su vezani na digitalne izlaze aritmetičkog kruga i registra adrese i daju napone za otklon točke katodne cijevi, odnosno pera pisača, po koordinatama. Radom memorije i njenih sklopova upravlja programator. Operacija koju će izvršiti memorija bira se pomoću preklopnika, tipaka ili električnim signalima. Najčešće se primjenjuju feritne memorije od  $10^3$ ... $10^4$  kanala s kapacitetom do  $10^6$  po kanalu. Katkada se upotrebljavaju i drugi tipovi memorija, kao cirkulirajuće memorije, bubnjevi ili diskovi. Tim je memorijama potrebno znatno veće vrijeme za registraciju, reda veličine milisekunde.

**Digitalna procesna računala** mogu se upotrijebiti za brojanje klasificiranih događaja na dva načina: bez posredstva programa i s prekidom programa. U režimu rada *bez posredstva programa* — koji nije moguć kod svih procesnih računala — brojanje se odvija gotovo na isti način kao što je to opisano za feritne memorije. Kad treba registrirati događaj u režimu rada *s prekidom programa*, računalo se daje signal za prekid programa, te onda računalo prelazi na posebni program, kojim se upiše deskriptor u akumulator i izvršavaju sve potrebne operacije za povećanje sadržaja pripadne lokacije memorije. Kad je to izvršeno, računalo prelazi na onaj program koji je bio prekinut. Računalo je povezano sa sistemom za primarnu obradu preko sistema za povezivanje s računalom (*interface* u užem smislu), koji se sastoji od logičkih i digitalnih sklopova. Očitavanje broja registriranih događaja, ispisivanje i prikaz podataka odvija se također programom, što omogućava veliku fleksibilnost, jer se program može lako mijenjati i adaptirati prema potrebi. Za registraciju i prikaz podataka upotrebljavaju se periferne jedinice računala, kao teleprinter, bušač, osciloskop, itd.

**Privremene memorije** stavljaju se u nekim slučajevima između sistema za primarnu i sistema za sekundarnu obradu. U njih se podaci mogu upisivati brzinom većom od brzine upisa u sistem za sekundarnu obradu. Privremenim memorijama pamte se privremeno deskriptori događaja kad ih sistem vezan na njihov

izlaz ne može prihvatiti jer je zauzet obradom prethodnog događaja. Privremenim memorijama s manjim brojem riječi (lokacijâ) i vremenima upisa do 10 ns smanjuje se utjecaj slučajnosti pojave podataka. Veće i sporije privremene memorije služe za pamćenje podataka kad je njihova učestalost velika samo u kratkim intervalima, nakon kojih slijede dulji intervali s manjom učestalošću podataka, u kojima se svi zapamćeni podaci mogu predati sistemu na izlazu.

**Sistem za zapisivanje događaja** sastoji se od uređaja za digitalno zapisivanje, s potrebnim električnim elementima, i električnog uređaja za prijenos deskriptora iz sistema za primarnu obradu u potrebne modifikacije. Obično je deskriptor prevelik da bi se mogao odjedanput zapisati, pa se on mora podijeliti u dijelove, koji se zapisuju jedan za drugim. Zapisivanje događaja često se izvršava preko procesnog digitalnog računala, koje ujedno može služiti i kao privremena memorija i selektor događaja, i također obavljati druge funkcije.

#### Ostale funkcije u sistemu

Za vrijeme eksperimenta potrebno je često mjeriti i registrirati također neke druge veličine i izvršavati neke dodatne operacije.

Najčešće se registrira *vrijeme mjerenja*, jer je broj događaja obično proporcionalan tom vremenu. Ono se obično mjeri brojanjem impulsa oscilatora stabilne frekvencije. Često se registrira *živo vrijeme mjerenja*, tj. ukupno vrijeme kroz koje je sistem bio spreman da primi i registrira događaje. U tom se slučaju broje impulsi oscilatora samo u intervalima kad je sistem spreman.

Broj događaja za vrijeme eksperimenata koji se koriste snopom akceleratora proporcionalan je integralu struje snopa. Taj integral može se odrediti *integratorima struja*.

Kad se zahtijeva naročita stabilnost i točnost, primjenjuju se *sistemi za stabilizaciju*. Najčešće se stabiliziraju nulti nivo i ukupno pojačanje, u što je uključena i amplitudno-digitalna pretvorba.

Eksperimentalni su sistemi danas u većoj ili manjoj mjeri *automatizirani*. Najčešće se mjerenje automatski prekida nakon unaprijed određenog vremena mjerenja. Često se nakon toga izvršavaju druge operacije prema unaprijed određenom programu, kao npr. ispisivanje podataka, mijenjanje parametara itd., i nastavlja mjerenje.

#### Mnogokanalni amplitudni analizatori sa feritnom memorijom

To su u nuklearnoj fizici najčešće upotrebljavani cjeloviti kompleksni električni instrumenti. Njima se određuje amplitudna raspodjela impulsa na ulazu, tj. izmjereni broj po amplitudi klasificiranih impulsa kao funkcija broja kanala, tj. amplitude. Bitni su sastavni dijelovi tih instrumenata amplitudno-digitalni pretvarač, feritna memorija sa pripadnim sklopovima i programatorom, osciloskop za prikaz sadržaja, sistem za ispisivanje podataka i sistem za mjerenje ili određivanje vremena mjerenja. Klasifikacija se može uvjetovati vanjskim impulsima i time određivati uvjetovane raspodjele. Izmjerena raspodjela vidi se na ekranu katodne cijevi i za vrijeme mjerenja. Nakon završenog mjerenja može se raspodjela ispisati analognom pisačem, odštampati teleprinterom, zapisati za naknadnu obradu, itd.

Primjenom vremensko-amplitudnih pretvarača mogu se mjeriti i vremenske raspodjele. Osim toga analizatorima se obično mogu i brojati impulsi u vremenskim intervalima odabrane duljine, koji slijede jedan iza drugoga. Impulsi koji se pojavljuju u prvom intervalu klasificiraju se u prvi kanal, oni koji se pojavljuju u drugom, u drugi kanal, itd. Često se memorija može podijeliti u dijelove, te uzastopce mjeriti i pamti istovremeno nekoliko raspodjela. Ispisane raspodjele mogu se jedne s drugima kombinirati zbrajanjem ili odbijanjem. Amplitudni analizatori koji se danas proizvode imaju obično od 200 do 8192 kanala.

LIT.: R. L. Chase, Nuclear pulse spectroscopy, New York 1961. — W. J. Price, Nuclear radiation detection, New York 1964. — Л. А. Маталин, Ж. Нарай и др., Методы регистрации и обработки данных в ядерной физике и технике, Москва 1968. — J. J. Samuëli, J. Piqueret, A. Sarazin, Instrumentation électronique en physique nucléaire, Paris 1968. — L. J. Herbst, Electronics for nuclear particle analyses, London 1970. — E. Kowalski, Nuclear electronics, Berlin-Heidelberg-New York 1970. — P. Weinzierl, M. Drossel, Lehrbuch der Nuklearelektronik, Wien-New York 1970.

M. Konrad