

SPEKTRALNI ANALIZATORI S PROPORCIONALNIM BROJACIMA

P. GUGIĆ

Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb

(Primljeno 10. X 1963)

Usporedo sa sve širom primjenom nuklearne energije, razvijaju se i uređaji za detekciju i mjerenje ionizantnog zračenja. Značajno mjesto na tom području zauzimaju spektralni analizatori. U ovom prikazu su dani osnovi rada i neke od suštinskih karakteristika njihovih sastavnih dijelova.

UVOD

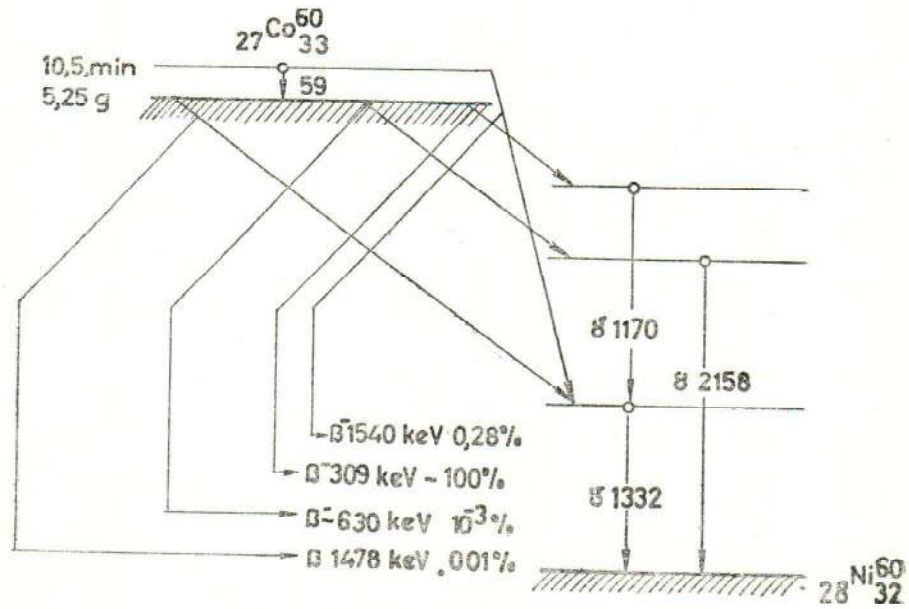
Radionuklidi spontano emitiraju iz sebe ionizantno zračenje različitih vrsta i energija, koje ima osobinu da ionizira materiju. Svaki radionuklid ima svoju vlastitu shemu raspadanja (primjer: Sl. 1) koja je za nj karakteristična i jednoznačno određena, kako po energijama i vrstama zračenja tako i po načinu raspadanja (1). Budući da se pokazalo da postoje velike mogućnosti primjene radionuklida, zahvaljujući upravo tim njihovim osobinama, učinjeni su ozbiljni pokušaji da se pronađu metode za brzo i tačno određivanje vrsta zračenja i njihovih energija. S time u vezi je i na području nuklearne instrumentacije konstruiran veliki broj mjernih uređaja. Istaknuto mjesto među njima pripada bez sumnje spektralnim analizatorima s proporcionalnim brojačima, pomoću kojih se brzo i jednostavno mogu identificirati sheme radioaktivnog raspadanja i mjeriti jakosti radioaktivnih izvora.

Istraživanje sheme raspadanja radionuklida može se vršiti na više načina (2). Neki od njih se temelje na činjenici da ionizantno zračenje ionizira materiju kroz koju prolazi i da pri tome postepeno gubi svoju vlastitu energiju. Jedna od takvih metoda istraživanja sastoji se u tome da se energija tako dobivenih ionskih parova posredno ili neposredno pretvori u električke impulse i zatim analizira na posebnim elektroničkim uređajima. Ako je veličina dobivenih električkih impulsa propor-

cionalna s energijama istraživanog zračenja i ako elektronički uređaj sa svoje strane ne naruši tu proporcionalnost, onda se analizom električnih impulsa može dobiti vjerna slika ionizacijskog polja, i po vrstama zračenja i po energijama. Uređaji koji rade na tom principu nazivaju se spektralni analizatori s proporcionalnim brojačima. Sastoje se od pretvarača, uređaja za oblikovanje, indikatora i izvora napona (Sl. 2).

Simboli upotrijebljeni u tekstu:

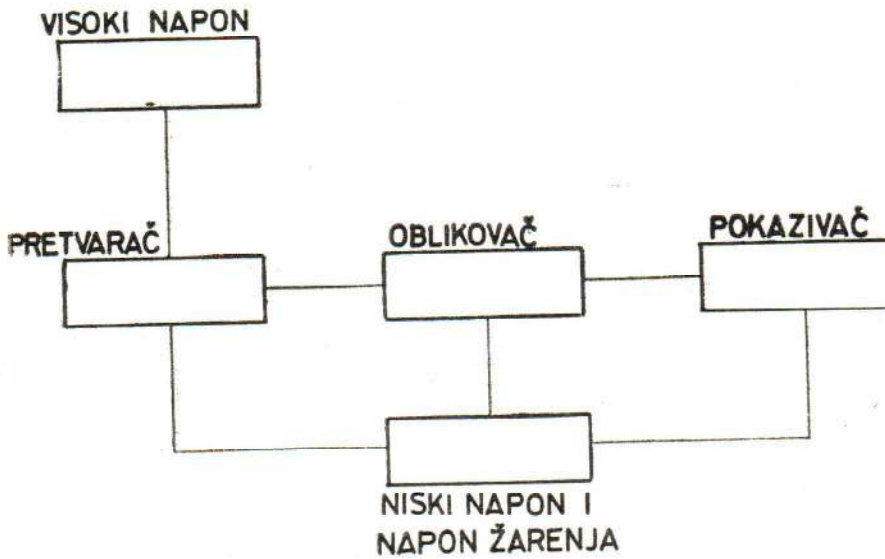
- L – jakost svjetlosti
- E – energija ionizantnih čestica
- F – broj scintilacija fotovrha
- S – ukupni broj scintilacija
- Z – broj ionizantnih čestica ili gama fotona koji dopiju u brojač
- A – amplituda električkih impulsa
- x – put ionizantne čestice



Sl. 1 – Shema raspadanja Co-60 (1)

Prevarači

Ima više vrsta pretvarača energije ionizantnog zračenja (4, 5) u električke impulse, ali za potrebe spektralne analize dolaze u obzir samo oni s linearnom karakteristikom funkcije $A = f(E)$. Sve takve brojače je ispravno nazvati »proporcionalni brojači« (6). (Treba izbjegavati uobičajenu upotrebu tog izraza kao kraticu za »plinske proporcionalne brojače«, jer to stvara konfuziju u stručnoj terminologiji.) Najpoznatiji su plinski proporcionalni brojači, ionizacijske komore i scintilacijski brojači. Prve dvije vrste se primjenjuju kod mjerenja alfa-spektara, te mekih beta i X spektara, a scintilacijski se brojači pretežno upotrebljavaju za mjerenje tvrdih beta i gama zračenja. (Pod tvrdim odnosno mekim zračenjem se razumijeva zračenje velikih odnosno malih energija.) Područja primjene je vrlo teško razgraničiti, jer se vrlo često preklapaju i u najviše slučajeva će za krajnji izbor biti odlučni samo specifični zahtjevi i okolnosti.

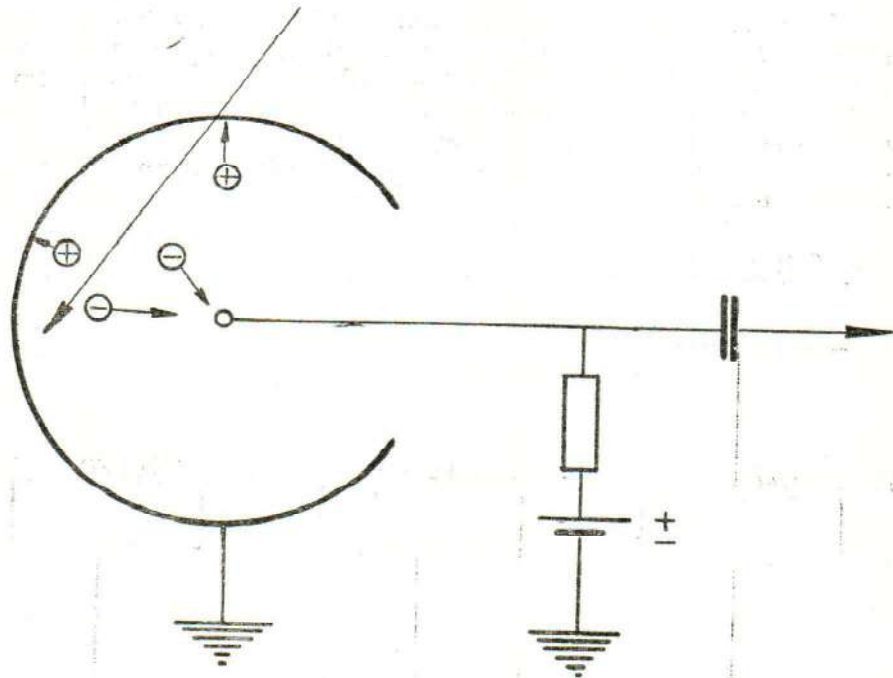


Sl. 2 - Blok-shema spektralnog analizatora s proporcionalnim brojačem

Konstrukcija plinskih proporcionalnih brojača je vrlo jednostavna. Sastoje se iz dvije elektrode, na koje je narinut istosmjerni električki napon i u čijem se međuprostoru nalazi plin određenog sastava i pritiska. Obično je to metan i argon, a pritisak je nešto malo veći od normalnog (8). Cilindrično kućište brojača je negativna, a centralno postavljena tanka metalna nit pozitivna elektroda. S obzirom na vrstu zra-

čenja kojoj je brojač namijenjen, postoje na izgled vrlo različite izvedbe, ali je kod svih osnovni princip rada uvijek isti.

Na svom putu, ionizantna čestica ionizira plin u brojaču, tj. stvori niz ionskih parova, koji se pod utjecajem električnog polja multipliciraju i idu na pozitivnu odnosno negativnu elektrodu. Budući da su proizvedeni električki naboj, a s time i struja u električkom krugu, proporcionalni energiji koju je upadna čestica predala plinu, postojat će analogija između rasporeda amplituda električkih impulsa i energija mjerenog spektra, a to je upravo ono što se htjelo i postići.



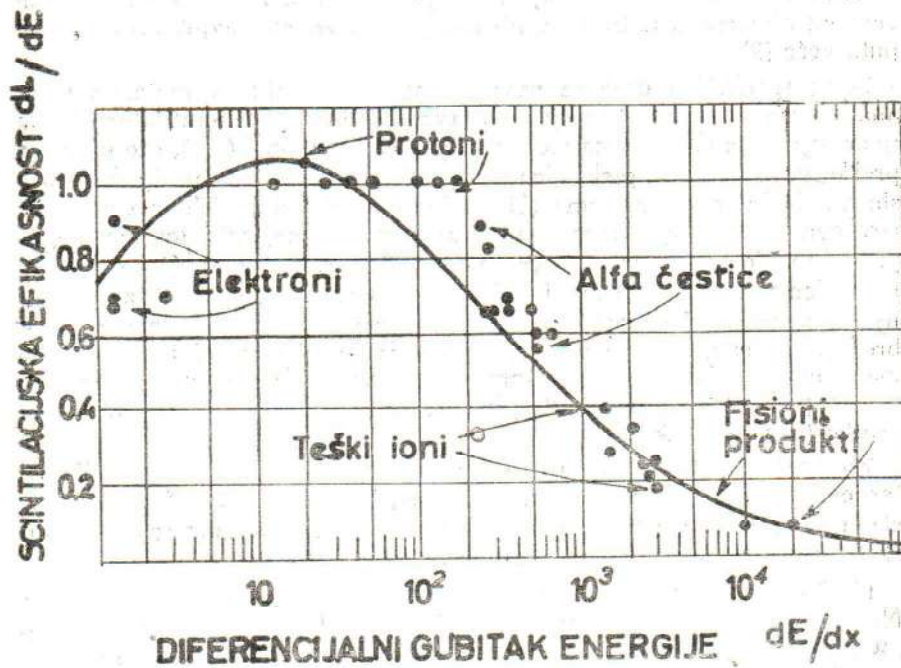
Sl. 3 - Shema spoja ionizacijske komore ili proporcionalnog brojača

Ionizacijske komore su vrlo slične plinskim proporcionalnim brojačima. I one se sastoje iz dvije elektrode zatvorene u plinsku komoru, najčešće normalnog pritiska. Elektrode im mogu biti pločaste ili cilindrične, a jakost električnog polja treba biti dovoljno velika da stvoreni ionski parovi dospiju na pripadne elektrode. Razlika između ionizacijskih komora i plinskih proporcionalnih brojača je baš u jakosti polja. Kod ionizacijskih komora dovoljna je ona jakost polja koja će dovesti ione pripadnim elektrodama, a kod plinskih proporcionalnih brojača polje mora biti tako jako, da usmjereni ioni mogu proizvesti i sekundarnu ionizaciju. Dosljedno tome su i impulsi ionizacijskih komora osjetno manji, pa za-

htijevaju i mnogo veće pojačanje nego kod plinskih proporcionalnih brojača. Zbog toga se ionizacijske komore upotrebljavaju za spektralnu analizu samo onda kad je od primarnog značaja dobro energetske razlučivanje.

Drugi tip pretvarača energije su scintilacijski brojači. Oni su danas redovito sastavljeni od scintilatora i fotomultiplikatora, koji zajedničkim djelovanjem pretvaraju energiju ionizantne čestice u električki impuls. U scintilacijskom brojaču, ili kako se popularno kaže »scintilacijskoj glavi«, događaju se dvije energetske pretvorbe; nuklearna u svjetlosnu, i svjetlosna u električku. Prva nastaje u scintilatoru, a druga u fotomultiplikatoru.

Impozantni broj danas poznatih scintilatora, kojih ima u sva tri agregatna stanja, može se razvrstati u tri osnovne skupine, i to su: organski materijali, anorganski materijali i plemeniti plinovi (4). Od svih se traži da imaju što veću efikasnost pretvaranja nuklearne energije u svjetlo-



Sl. 4 - Usporedbeni prikaz eksperimentalnih rezultata i teoretske krivulje efikasnosti u zavisnosti od vrsta ionizantnih čestica

snu, da budu što prozirniji za vlastitu svjetlosnu emisiju, da imaju maksimum emisionog spektra u području koje se što bolje podudara sa spektrima raspoloživih fotomultiplikatora i da vrijeme svjetlucanja bude što kraće. Pod vremenom svjetlucanja razumijeva se ono vrijeme

koje je potrebno da bude emitiran dio od $1-e^{-1}$ ili 63% od ukupnog broja fotona. I druge osobine, kao gustoća, oblik, higroskopičnost, agregatno stanje itd. igraju važnu ulogu pri izboru scintilatora za određenu svrhu.

Efikasnost pretvaranja nuklearne energije u svjetlosnu (dL/dE) osjetno se razlikuje za različite scintilatore, kao što se to vidi na tablici 1. Ta razlika se još više povećava ako se radi o različitim zračenjima. Pokazalo se, međutim, da se zavisnost efikasnosti od vrste čestica može teoretski objasniti i na osnovu toga izračunati krivulja $dL/dE = f(dE/dx)$, koja – kao što se iz sl. 4 vidi – dobro odgovara eksperimentalnim rezultatima (10).

Krivulja na sl. 4 je snimljena s kristalom Cs J (Tl). Organski kristali ne daju iste takve rezultate, ali se ni suštinski ne razlikuju (10).

Anorganski scintilatori i plemeniti plinovi imaju manju efikasnost od organskih scintilatora, ali im je velika prednost u tome što im je vrijeme svjetlucanja mnogo manje (4). Tako je efikasnost Na J (Tl) dvostruko veća od efikasnosti antracena, ali mu je zato vrijeme svjetlucanja deset puta veće (9).

Zbog specifičkih osobina raznih vrsta scintilacijskih materijala, za analizu različitih zračenja upotrebljavaju se i različiti scintilatori. Tako se za mjerenje alfa-čestica najčešće upotrebljava Zn S (Ag), i to u obliku praška nanesenog na pleksiglas ili direktno na čelo fotomultiplikatora u sloju debljine oko 8 mg/cm^2 . (U nuklearnoj tehnici se debljina redovito izražava u dimenziji »masa na jedinicu površine«, zato jer masa igra presudnu ulogu u procesu kočenja ionizantnog zračenja). Osim toga se neki plemeniti plinovi i Na J (Tl) isto tako mogu upotrijebiti za mjerenje alfa-čestica. Prednost Zn S (Ag) pred ostalim scintilatorima je u dobroj efikasnosti, koja je oko tri puta veća od efikasnosti Na J (Tl), a mana mu je u lošem energetskom razlučivanju. Za mjerenje jakih alfa izvora prikladni su plemeniti plinovi, jer im je vrijeme svjetlucanja kratko (oko 10^{-8} sek.) (6).

Za analizu beta spektra upotrebljavaju se obično antracen, stilben i terpenil, a ponekad i plastički scintilatori, koji su uprkos lošem energetskom razlučivanju u izvjesnim slučajevima prikladni zbog relativno niske cijene i velike mogućnosti oblikovanja (6).

Najčešće upotrebljavani scintilator za analizu gama spektara je Na J (Tl). Pronađeno je, međutim, da je Cs J (Tl) u mnogočem bolji scintilator (10). U prvom redu nije higroskopian, ima veću moć zastavljanja, bolji foto-odnos F/S i bolje energetsko razlučivanje. Za mjerenje niskih aktivnosti Cs J (Tl) ima prednost pred Na J (Tl), zato što se iz njega može eliminirati K-40 i tako postići niže osnovno brojanje (10). Promjena amplitude s promjenom temperature je kod cezijskog scintilatora linearna, a kod natrijeva kristala nije (12). Osim toga, utjecaj temperature na jakost svjetlosne emisije i sposobnost energetskog razlučivanja u području od $20-60^\circ \text{C}$ te na vrijeme svjetlucanja u

području od 20–40° C mnogo je manja nego kod Na J (Tl) (11). Mane su mu u manjoj svjetlosnoj emisiji, duljem vremenu svjetlucanja (tablica 1) i u tome što je 2–2,5 puta skuplji od Na J (Tl) (10).

Tablica 1

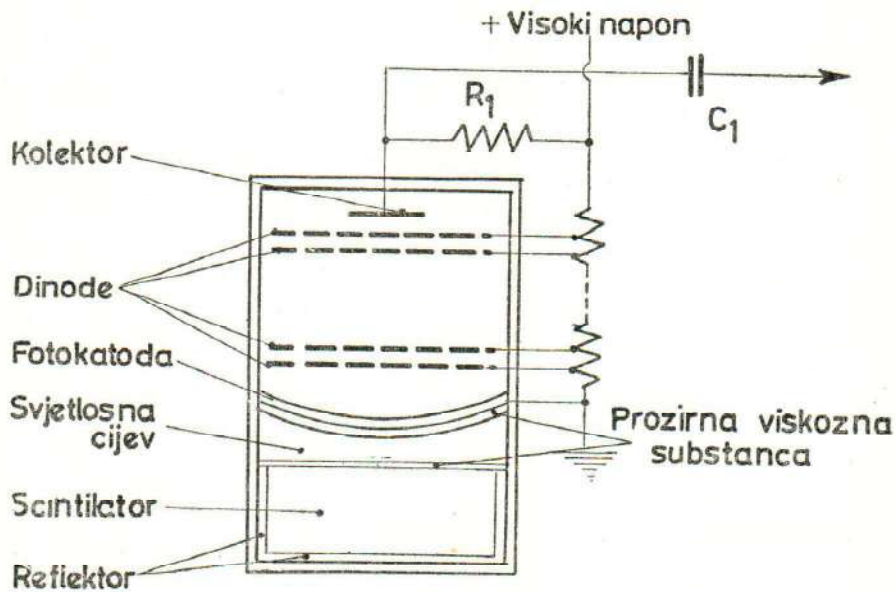
Pregled osobina nekih češće primjenjivanih scintilatora

Scintilator	Gustoća (g/cm ³)	Spektralni maksimum Å	Vrijeme scintilacije (μ sek.)	Relativna efikasnost za beta zrake
NaJ (Tl) (7)	3,67	4100	0,25 (10)	100
CsJ (Tl) (10)		4200–5700	1,2	40–45
ZnS (Ag) (3)	4,10	4500	10	95
Antracen (7)	1,25	4400	0,027	48
Polistiren + tetrafenil + butadien (7)	1,06	4000	5,10–3	17
Ksilen + terfenil + di- fenilheksatrien (7)	0,86	4500	0,025	23
Xenon (3)		ultra- ljubičasto	10 ⁻⁸ — 10 ⁻⁹	loša

Drugi dio scintilacijske glave je fotomultiplikator. Sastoji se od fotoosjetljive katode, 10–16 dinoda i kolektora. Cijav sistem je zatvoren u evakuiranu staklenu posudu s jednom posebno priređenom prozirnomo površinom i izvodima za električki napon (13). Kad foton energije od najmanje 1000 eV (7) padne na fotokatodu, on iz nje izbije sekundarni elektron. Taj se elektron u električkom polju ubrzava i usmjerava prema idućoj dinodi. A sve elektrode su tako porazmještene da električko polje, uspostavljeno iz vana narintim naponom, usmjerava i ubrzava elektrone od katode preko svih dinoda do kolektora. Faktor pojačanja, koji se na taj način postigne, ide kod komercijalnih cijevi do oko 10⁶, a specijalno konstruirani fotomultiplikatori od 18 elektroda i 4000 V dostižu pojačanje od 2×10⁸ i osjetljivost od 200 amp/lumenu (10).

Treći dio koji se ponekad ugrađuje u scintilacijsku glavu je »svjetlosna cijev« (light pipe). Nalazi se između kristala i fotomultiplikatora. Izrađena je iz materijala prozirnog za spektralno područje scintilatora. Upotrebljava se onda kad je zbog prostora i oblika nemoguće scintilator direktno priljubiti uz prozor fotomultiplikatora i onda kad je kristal jako tanak, pa ga treba odmaknuti od fotokatode radi jednoličnijeg osvjetlje-

nja. Svjetlosna cijev povećava mrtvo vrijeme i smanjuje osjetljivost, ali zato, naročito u drugom slučaju, poboljšava sposobnost energetskog razlučivanja (15, 16).



Sl. 5 - Shema spoja scintilacijske glave

Spojne površine scintilatora, svjetlosne cijevi i fotomultiplikatora vežuju se radi boljeg prolaza svjetlosti s prozirnim viskoznom supstancijama, kao što su kanada-balzam za antracen (3), te silikonsko ulje, silikonska mast i vazelin za Na J (Tl) (17). Pri sastavljanju treba biti oprezan, kako se nepravilnim rukovanjem ne bi smanjila prozirnost vezivnog materijala, jer se to, naročito kod silikonskog ulja, može dogoditi.

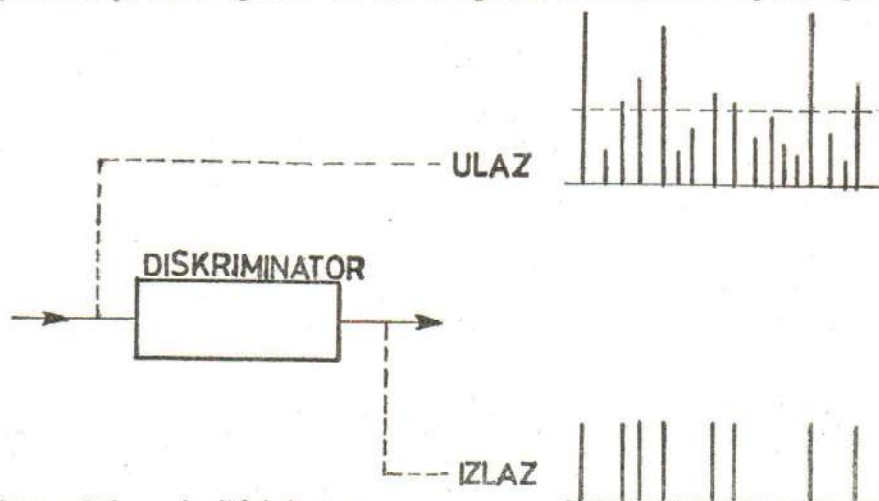
Obično se u kućište scintilacijske glave ugrađuje još i prepojačalo s katodnim sljedilom. Svrha tog električkog sloga je da pojača impulse iz fotomultiplikatora direktno na samom izlazu, tj. još prije nego se miješaju s okolnim smetnjama, i drugo, da izlaz scintilacijske glave prilagodi niskoomskom izlazu priključnog kabela. Prvo je zbog toga da se odnos signal-šum učini što većim, a drugo, da se gušenje zbog neprilagođenih impedancija učini što manje.

Sve tri vrste spomenutih proporcionalnih brojača imaju svojih prednosti i mana. Scintilacijski brojači, koji se danas najviše proizvode, imaju veliku efikasnost za sve vrste zračenja, za razliku od drugih tipa brojača kojima je efikasnost za gama zrake vrlo malena (oko 70% naprema oko 0,5%). Dalje, mrtvo vrijeme, tj. najkraće vrijeme između početaka dvaju susjednih impulsa, je kod scintilatora reda 10^{-8} sek. (8).

a kod plinskih proporcionalnih brojača oko 10^{-4} sek. (4). Prednost im je u velikom izlaznom impulsu u uspoređenju s plinskim proporcionalnim brojačima, pa dosljedno tome i u potrebi manjeg pojačanja. S druge strane, plinski proporcionalni brojači imaju osjtno bolje energetske razlučivanje od scintilacijskih brojača pa se stoga i upotrebljavaju tamo gdje jakost izvora nije kritična, a zahtijeva se dobro razlučivanje vrlo bliskih energija (7).

Uredaji za oblikovanje impulsa

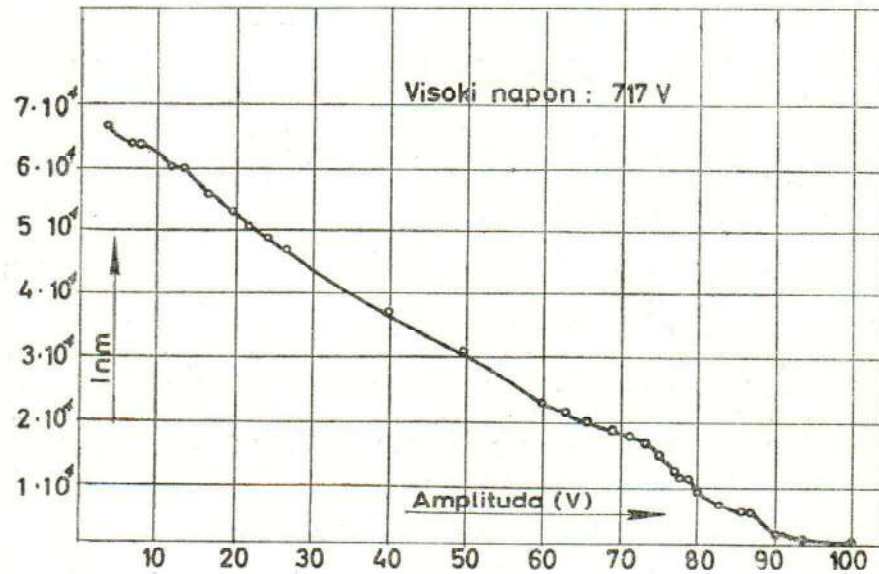
Iz proporcionalnog brojača električki impuls ide u uređaj za oblikovanje i selekciju, koji može biti građen za integralnu ili diferencijalnu spektralnu analizu. Prvi je u principu vrlo jednostavan, a sastoji se od impulsnog pojačala (18) i diskriminatora (19). Za scintilacijske proporcionalne brojače je dovoljno pojačanje od oko 10^4 , a plinski proporcionalni brojači zahtijevaju pojačanje od oko 3×10^5 (6). Iz pojačala impulsi idu u diskriminator. Amplitudna raspodjela impulsa mora na ovom mjestu biti proporcionalna energijama ioniziranih čestica. Budući da je taj uvjet nemoguće postići za neograničeni energetski spektar, definiraju se granice u kojima je postignuta linearnost s određenim procentom odstupanja. Pojačani impulsi dolaze napokon u diskriminator, koji pomoću jednog promjenljivog prednapona diskriminira sve one impulse koji su niži od namještenog prednapona, a sve ostale propušta. Grafički je to prikazano na slici 6, gdje je na apscisi naneseno vrijeme, a na ordinati amplituda. Postepenim pomicanjem diskriminatora od najniže do najviše vrijednosti dobije se tzv. integralni spektar. Na slici 7 prikazan je takav spektar Co-60. Integralni analizatori se rijetko upo-



Sl. 6 - Prikaz rada diskriminatora

trebljavaju za spektralnu analizu, jer su im rezultati, kao što se vidi iz slike 7, jako nepregledni.

Mnogo praktičniji su uređaji za diferencijalnu analizu, poznati kao kanalni analizatori (3, 21, 22, 23, 24). Kod njih se također na ulazu nalazi impulsno pojačalo, iza kojega dolaze dva diskriminatora i antikoincidentni izlaz (Sl. 8). Ako je impuls veći od D_2 (Sl. 9), propustit će ga oba diskriminatora i tako udvostručiti. Impuls iz gornjeg diskriminatora za



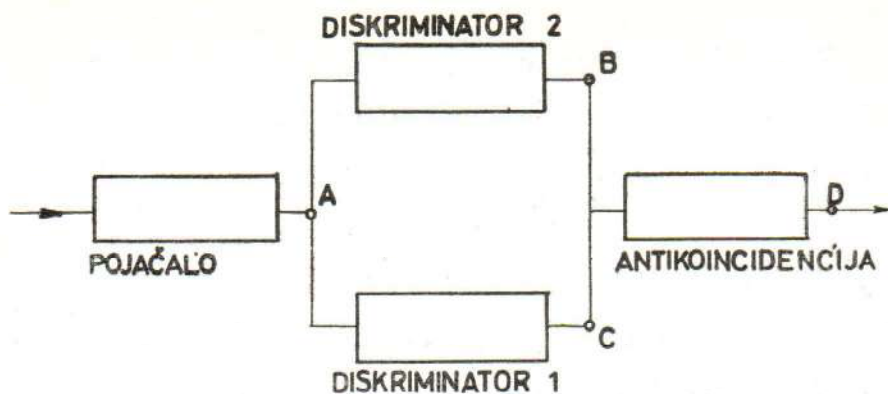
Sl. 7 - Integralni spektar Co-60

određeno vrijeme zatvori antikoincidentnu jedinicu i tako onemogućiti drugom impulsu da se probije na izlaz. Takav impuls, koji je veći od D_2 , neće biti odbrojan.

Ako je impuls manji od D_2 a veći od D_1 , onda će on uzбудiti samo donji diskriminator, pa budući da u tom slučaju blokirajući impuls gornjeg diskriminatora neće blokirati izlaz, donji će impuls nesmetano dospjeti na izlaz antikoincidentne jedinice. Takav impuls, kojemu se vrijednost nalazi između D_1 i D_2 , bit će prema tome proslijeđen u indikator i registriran.

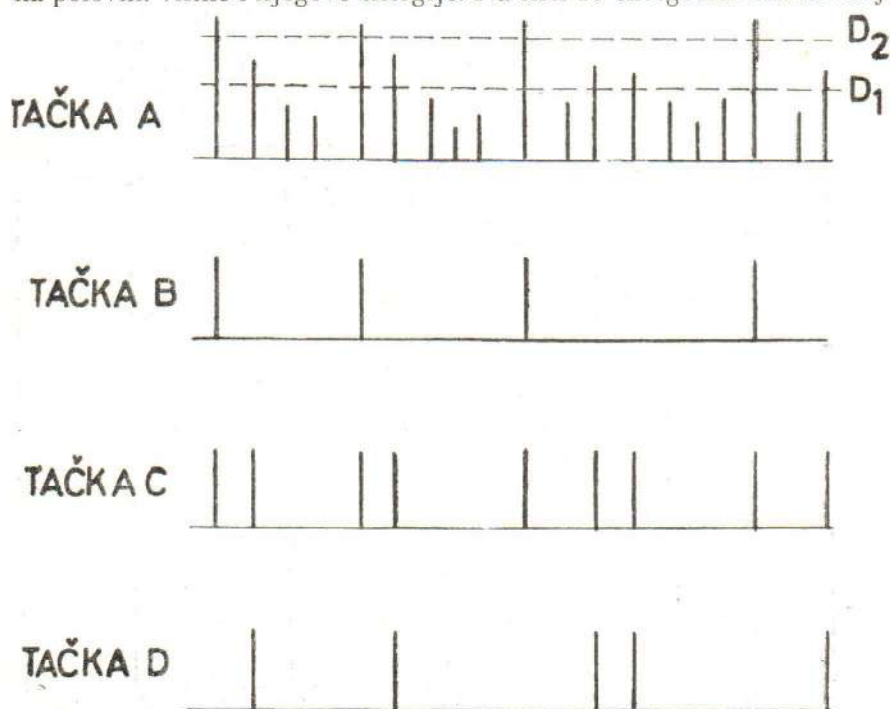
Impuls manji od D_1 nije u mogućnosti uzbuditi ni jedan od diskriminatora, pa prema tome ne može biti ni odbrojan.

Razine D_1 i D_2 obično se nazivaju donjim i gornjim pragom, a njihov razmak kanalom analizatora. Skokovitim pomicanjem kanala od minimalne do maksimalne vrijednosti dobije se slika spektralne raspodjele analiziranog zračenja u diferencijalnom obliku. Slika 10 ilustrira tako



Sl. 8 - Blok-shema kanalnog analizatora

dobiveni diferencijalni spektar Co-60, na kojemu su, za razliku od integralnog spektra, uočljivo istaknuti fotovrhovi energija 1,17 i 1,33 MeV. Uobičajena mjera za ocjenu kvalitete diferencijalnog spektra je tzv. energetska razlučivanje, koje je definirano kao kvocijent širine fotovrha na polovini visine i njegove energije. Na slici 10 energetska razlučivanje



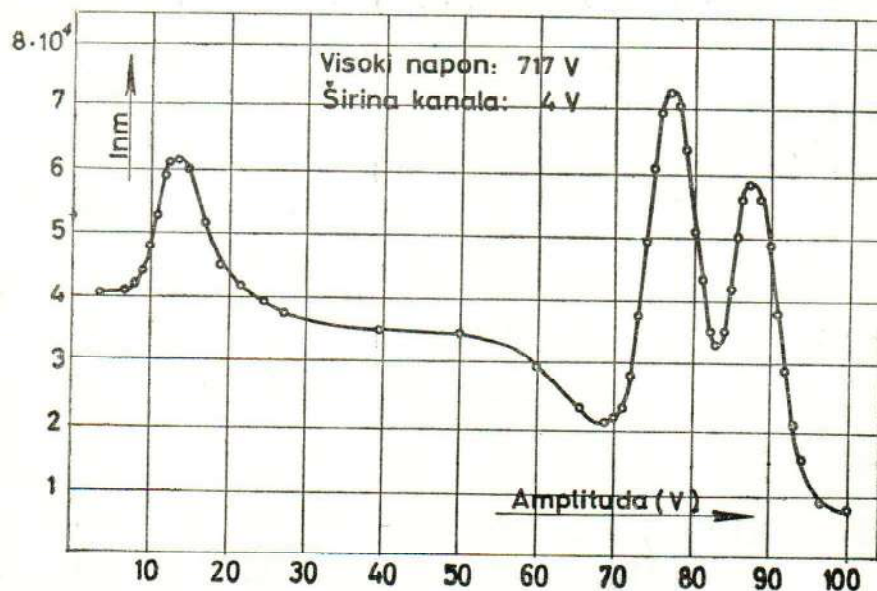
Sl. 9 - Prikaz rada kanalnog analizatora

fotovrha za kobaltovu energiju od 1,17 MeV iznosi $\frac{0,14 \times 10^2}{1,17} = 12\%$.

S primjenom linearnog pojačala, kao što je naprijed i pretpostavljeno, raspored fotovrhova na apscisi će biti linearan. Kad se radi o širokim spektralnim područjima, iza pojačala se dodaju elektronički slogovi s logaritamskom karakteristikom. S njima se u prvom redu obuhvaća širi energetski raspon, a u drugim redu postiže se linearni prikaz jakosti fotovrhova (24).

Poboljšana izvedba jednokanalnih analizatora sadržava uređaj za automatsko pomicanje kanala (scanner). Taj se uređaj sastoji od jednog sinhronog motora koji pokreće osovine potenciometara gornjeg i donjeg diskriminatora, pa tako i kanal analizatora od jednog do drugog krajnjeg položaja. Ako se impulsi s uređaja za oblikovanje i selekciju preko brzinojera impulsa (ratemeter) dovedu na pisač (recorder), onda će na papiru pisača biti nacrtan diferencijalni spektar (Sl. 10).

Za analizu izvora malih aktivnosti ili malih vremena poluraspada, jednokanalni analizatori ne daju dobre rezultate ni u slučaju automatskog pomicanja kanala. Zbog toga su izvedeni uređaji s nizom diskriminatora, koji čine višekanalne sisteme. Umjesto skokovitog pomicanja jednog kanala, kod višekanalnih analizatora jednovremeno broje svi kanali, pa se tako višestruko ubrzava vrijeme mjerenja. Ušteda u vremenu naročito se očituje kod rada s radionuklidima kratkih perioda, gdje bi u slučaju primjene jednokanalnih analizatora, uz ostalo, trebalo vršiti i



Sl. 10 - Diferencijalni spektar Co-60

posebnu vremensku korekciju za svaki pojedini kanal. (Perioda radionuklida je vrijeme potrebno da se jakost radioaktivnog izvora smanji na polovicu.)

Dalji korak u poboljšanju uređaja za energetska analizu učinjen je zamjenom diskriminatora analogno-digitalnim konverterima (28, 29), a kasnije primjenom memorije i katodne cijevi (30, 31, 32, 33). (Memorija je uređaj koji može određene podatke uskladištiti i kasnije reproducirati.) S takvim višekanalnim analizatorima, koji mogu imati i po nekoliko stotina kanala, dobije se energetska spektar direktno prikazan na ekranu katodne cijevi. Broj impulsa u pojedinom kanalu može se u svako doba očitati na jednom jedinom priključnom brojilu, koje kod analizatora s memorijom služi za očitavanje svih kanala analizatora.

Indikatori

Indikatori mogu biti izvedeni na principu brojila (scaler) ili brzino-mjera impulsa (ratemeter). Kod brojila je svaki impuls na neki način odvojeno registriran, a rezultat mjerenja je određeni broj impulsa. Brzinomjeri, međutim, pokazuju prosječni broj impulsa u određenom vremenu i iskazuju rezultate u broju impulsa na jedinicu vremena.

Brojila ima binarnih i dekadskih (8, 21, 35, 36). Binarna su sastavljena od serije bistabilnih elektroničkih slogova, koji obično završavaju s dekadskim mehaničkim registrom. U binarnom sistemu je rezultat najčešće prikazan tinjalicama. Odlikuju se jednostavnošću konstrukcije i velikom brzinom brojanja. Može se postići mrtvo vrijeme od ispod 10^{-6} sek. Zbog nepreglednosti rezultata u binarnom sistemu, često se taj sistem izbjegava, a bistabilni slogovi se primjenjuju za gradnju dekadskih brojila (34). Takva brojila zadržavaju i dalje malo mrtvo vrijeme, ali im se broj elemenata donekle povećava.

Kod drugog tipa dekadskih brojila upotrebljavaju se za gradnju elektronke sa deset stabilnih stanja. Prednost im je u velikom pojednostavljenju brojačkog sloga i u tome što direktno daju rezultate u dekadskom sistemu. A mana im je u relativno maloj brzini rada, koja za dekatrone s hladnom katodom tipa GC 10/4 B iznosi oko 4000 i/sek., a za nomotrone tipa G 10/241 E oko 20.000 i/sek. Mnogo veće brzine rada postižu se s vakuumskom dekadskom cijevi, i sa trohotronom tipa VS 10 H, kod kojega se primjenjuje kombinacija električkog i magnetskog polja. U slučaju EIT ta je brzina oko 30.000 i/sek., a u slučaju VS 10 H oko 2×10^6 i/sek.

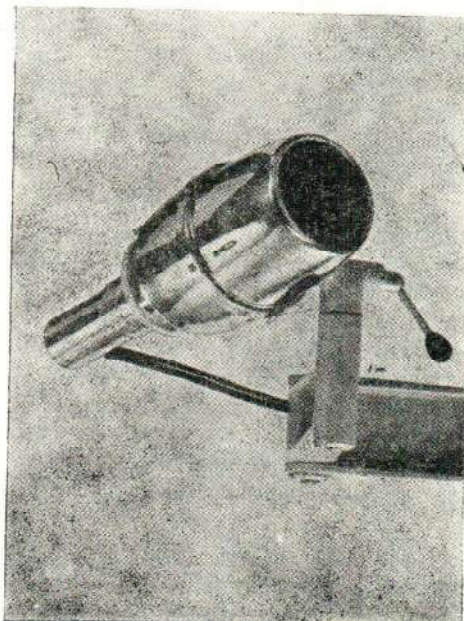
Brzinomjeri su naročito važne jedinice u sklopu jednokanalnih analizatora s automatskim pomicanjem kanala (36, 37). Kod takvih uređaja je pisac koji crta krivulju energetska spektra napajan od brzino-mjera. Njegov izlaz, izražen u istosmjernoj struji ili naponu, mora biti linearno proporcionalan mjerenom broju impulsa u jedinici vremena. Ako brzino-

mjer nije linearan, deformirat će se spektar i rezultat će biti pogrešan, bez obzira na veliku tačnost svih ostalih elemenata. Mjerna područja komercijalnih brzinomjera su od oko 1 i/sek. do oko 10^6 i/sek.

Izvori napona

Zadnji po redu, ali ne i po važnosti, su izvori napona (power supply), koji elektroničke jedinice opskrbljuju potrebnim električkim naponima (21). Mogu biti baterijski, akumulatorski ili elektronički. Prvi i drugi su samostalni izvori energije, a elektronički uređaji su samo pretvarači jednog oblika energije u drugi. Zbog toga ih treba napajati iz nekog drugog elektroenergetskog izvora.

Za rad spektralnih analizatora potrebne su općenito tri vrste napona, i to: naponi žarenja, niski naponi i visoki naponi. Naponi žarenja su obično izmjenični, a služe za žarenje elektronka. Najčešće vrijednosti su im 6,3; 4 i 5 V. U slučaju varijacija mreže preko $\pm 5\%$, preporučljivo ih je stabilizirati. Vrijednosti niskih napona se kreću od oko — 150 V do oko 500 V, a mogu se od konstrukcije do konstrukcije jako razlikovati. Stabilizacija koja se zahtijeva od jedinica niskog napona kreće se oko 0,01% za varijacije mreže od $\pm 1\%$. Visoki napon se redovito izvodi

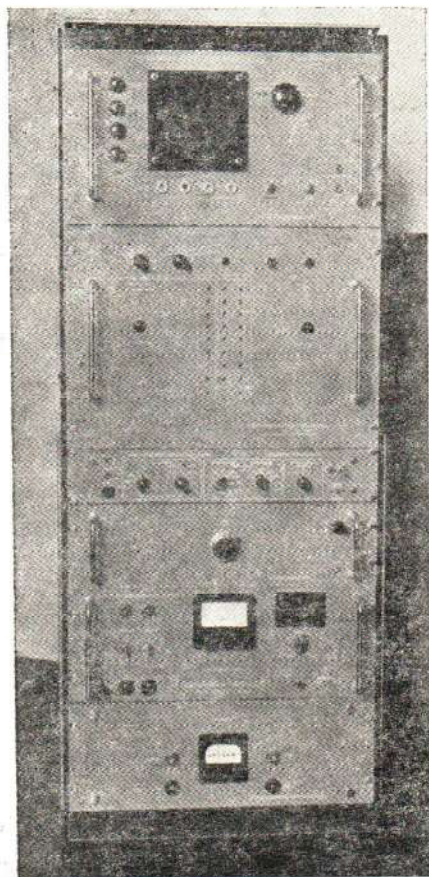


Sl. 11 — Scintilacijska glava tvrtke »Nuclear Chicago«, SAD

s promjenljivim izlazom od oko 400 do oko 2000 V, a upotrebljava se za napajanje brojača. Stabilizacija ne smije biti manja od 0,01% za promjenu mreže od $\pm 1\%$, a vremenske fluktuacije unutar 10-satnog pogona ne smiju prelaziti 0,1%. U slučaju da nestabilnost mrežnog napona prelazi $\pm 10\%$ nominalne vrijednosti, preporučuje se stabilizirati mrežni napon.

Osobitosti spektralnih analizatora

Uređaji za spektralnu analizu, bez obzira koliko je pažnje bilo obraćeno izboru njihovih sastavnih elemenata, neizbježno podliježu tehničkim nesavršenostima. Te se nesavršenosti očituju u nestabilnosti rada, koja može biti jednosmjerna ili dvosmjerna. Prva je uzrokovana stare-



Sl. 12 - Kanalni analizator izrađen u Institutu »Ruder Bošković«, Zagreb.

njem, a druga tehnološkim nedostacima, zatim fluktuacijama napona za napajanje i nestabilnošću ambijenta u pogledu temperature, vlage, pritiska itd. Da bi se svi ti utjecaji sveli na minimum i tako osigurala reproduktivnost rezultata, izveden je čitav niz elektroničkih povratnih sprega, kojima se željeni cilj u velikoj mjeri i postiže. Međutim, uprkos svim tehničkim dostignućima, treba faktorima okoline obratiti punu pažnju i nastojati da se njihove fluktuacije što je više moguće smanje. Naročito treba paziti da se nikad ne počinje mjerenjem prije nego je uređaj postigao svoju radnu temperaturu. Taj se podatak obično navodi u uputstvima za rukovanje, ali se po potrebi može vrlo lako i eksperimentalno odrediti.

Da bi se pogreška smanjila što je više moguće uređaj treba povremeno baždariti. Najtrivijalniji način je upotreba izvora poznate energije i ugađanje visokog napona sve dok se vrh poznate energije ne pojavi na određenom mjestu. Mnogo je bolje rješenje da se jedan alfa izvor dugacke periode ugradi direktno u brojač. U slučaju scintilatora, to može biti i mala tinjalica s konstantnom svjetlosnom emisijom. Impulsi koji se iz tih izvora dobiju moraju biti veći od najvećeg impulsa koji pri analizi dolazi u obzir, i to zato da se ne bi miješali s osnovnim spektrom. Osim toga, ti konstantni izvori, uzeti kao referentne veličine u sprezi s regulacionim sistemom, stabiliziraju visoki napon brojača i tako smanjuju utjecaj fluktuacije napona na fotomultiplikator od osme na otprilike prvu potenciju (39).

Elektronički dio spektralnih analizatora je za sva zračenja jednak, a brojači ne samo što se razlikuju po tipu, nego im je i oblik za pojedina zračenja različit. Staviše, prikladnim izborom i smještajem brojača moguće je ne samo popraviti uvjete mjerenja, već i određene energetske spektre formirati tako da se istaknu upravo oni dijelovi koji su u određenoj prilici od veće važnosti (40, 41, 42).

Razvoj spektralnih analizatora je još uvijek u punom naponu, počevši od pretvarača pa do naponskih izvora. Krupan korak u tom smislu učinjen je u posljednje vrijeme s poluvodičima (43). To se naročito odnosi na trajnost i prostorno smanjenje čitavog uređaja. Kod poluvodiča postoje za sada još neka ograničenja, no ona su iz dana u dan sve manja, i nije teško pretpostaviti da će spektralni analizatori s poluvodičima postići u skoroj budućnosti ne samo veći vijek trajanja, nego i bolje mjerne rezultate (10).

LITERATURA

1. *Dželepov, B. S. i Peker, L. K.*: Shemii raspada radioaktivnih jader, Akademii nauk SSSR, Moskva (1958).
2. *Draganić, I., Gal, O. i Radotić, M.*: Radiokemijski praktikum, Naučna knjiga, Beograd (1959).
3. *Bell, D. R.*: Beta and Gamma-ray Spectroscopy, Interscience Publishers, Inc., New York (1959).

4. Price, W. J.: Nuclear Radiation Detection, McGraw-Hill, London, 1958.
5. Korff, S. A.: Electron and Nuclear Counters, D. van Nostrand Comp., London, 1955.
6. Sergè, E.: Vol. III, Experimental Nuclear Physics, J. Wiley, New York, 1959.
7. Holloway, J. T., Lu, D. C., and Zaffarano, D. J.: Rev. Sci. Instr., 31, (1960) 91.
8. Taylor, D.: The Measurement of Radio Isotopes, Methuen and Co. Ltd., London, 1957.
9. Blatz, H.: Radiation Hygiene Handbook, McGraw-Hill, London 1959.
10. Nucleonics Reports the Scintillation Counter Symposium, Nucleonics 18 (1960) 85-100.
11. Nazarova, M. N., Perejaslova, N. K.: Pribori i tehnika eksperimenata, 6, (1962) 49.
12. Homma, S. and Takemoto, S.: Rev. Sci. Instr. 32, (1961) 1055.
13. Zvorikin, V. K. and Ramberg, E. G.: Photoelectricity and its Application, J. Wiley, New York, 1950.
14. Sharpe, J.: Nuclonics, 17, (1959) 82.
15. Kerr, D. P. and Hogg, B. G.: Rev. Sci. Instr. 33, (1962) 391.
16. Tove, P. A.: Rev. Sci. Instr. 27, (1956) 143.
17. Handloser, J. S.: Health Physics Instrumentation, Pergamon Press, London.
18. Millman, G. J. and Taub, H.: Pulse and Digital Circuits, McGraw Hill, New York, 1956.
19. Hansen, K. B.: Conference on Nuclear Electronics, NE/10, Beograd, 1961.
20. McKollom, K. A.: Nucleonics, 17, (1959) 72.
21. Elmore, W. C. and Sands, M.: Electronics, McGraw-Hill, New York 1949.
22. Trott, B. B.: Rev. Sci. Instr. 38, (1961) 74.
23. Farley, F. J. M.: J. Sci. Instr. 31, (1954) 241.
24. Maeder, D.: Rev. Sci. Instr. 26, (1955) 805.
25. Ortel, W. C. G.: Rev. Sci. Instr. 25, (1954) 164.
26. Schumann, R. W. and McMahon, J. P.: Rev. Sci. Instr. 27, (1956) 675.
27. Schultz, H. L., Pierer, G. F. and Rosler, L.: Rev. Sci. Instr. 27, (1956) 437.
28. Wilkinson, D. H.: Proc. Cambridge Phil. Soc. 46, (1950) 508.
29. Hutchinson, G. W. and Scarrott, G. G.: Phil. Mag. 42 (1951) 792.
30. Byington, P. W. and Johnstone, C. W.: Institute of Radio Engineers Convention Record, 3 (1955) 204.
31. Schuman, R. W.: Rev. Sci. Instr. 27 (1956) 675.
32. Souček, B.: Elektrotehnički vjesnik, 13 (1959) 74.
33. Souček, B.: Elektrotehnika, 2 (1959) 132.
34. Turk, S.: Elektrotehnika, 1 (1958) 63.
35. Stoddart, H. F.: Nucleonics, 17 (1959) 78.
36. Nokes, M. C.: Radioactivity Measuring Instruments, W. Heinemann Ltd, London 1960.
37. Banner, E. H. W.: Electronic Measuring Instruments, Chapman and Hall, London 1958.
38. Codke-Yarborough, E. H. and Pulsford, E. W.: Proc. I. E. E. 98 1951.
39. Scherbatskoy, S. A.: Rev. Sci. Instr. 32 (1961) 599.
40. Takekoshi, H.: Rev. Sci. Instr., 31 (1960) 1280.
41. Perkins, P. W.: Rev. Sci. Instr. 31 (1960) 1344.
42. Bostrom, C. O.: Rev. Sci. Instr. 32 (1961) 1024.
43. Goulding, F. S.: Nucleonics 17 (1959) 64.

*Summary*SPECTRUM ANALYSERS WITH PROPORTIONAL
COUNTERS

Large application of nuclear energy brought about the development of instruments for the detection and measuring of ionizing radiation. In this field spectral analysers play an important part.

In this survey the principles of work and a few basic characteristics of the constituent parts of these analysers are presented.

*Institute for Medical Research,
incorporating the Institute of
Industrial Hygiene, Zagreb*

Received for publication November 10, 1963