

JOSIP LONČAR

## O MJERENJIMA KOD ISPITIVANJA ZAŠTITA OD RENTGENSKIH I GAMA RADIJACIJA

Osoblje zaposleno s rentgenskim i radioaktivnim radijacijama izvrnuto je pogibeljima za zdravlje i život od prejakih doza takvih radijacija. Propisi o potrebnoj zaštiti predviđaju i kontrolu te zaštite prikladnim aparaturama. Danas je ta kontrola pogotovu neophodna zbog sve veće primjene, u medicini i u industriji, vrlo prodornih rentgenskih zraka i pridolaska u upotrebu, pored prirodno radioaktivnih tvari, i umjetno radioaktivnih izotopa. A uvođenje atomskih oružja i očekivane mirnodopske primjene atomske energije još su pooštrili problem. U članku se, nakon uvoda o potrebnim osnovnim pojmovima i jedinicama, te tolerantnim dozama, razmatra problematika mjerenja radijacija ionizacionim komorama. A zatim se daju neki podaci o dvije u Zavedu za osnove elektrotehnike i električarstva Tehničkog fakulteta u Zagrebu razvijene elektroničke realizacije »monitora« rentgenskih i gama radijacija, kojima se baš udobno mjere intenziteti radijacija, kakvi dolaze kod ispitivanja zaštitnih mjera od spomenutih radijacija. Donose se i detalji o baždarenju i mjernim mogućnostima s oba aparata, te o proračunavanju njihovih podataka na ukupne doze kod vremenski konstantnih i ne tek trenutnih radijacija. Upozorava se zatim na važnost i mogućnosti mjerenja totalnih doza dozimetrima s ionizacionom komorom, koji neposredno integriraju pojedinačne doze, čak i u slučajevima rentgenskih impulsa primjenjivanih kod rentgenskih momentnimaka. Na kraju se uspoređuju mjerenja intenziteta i doza uz upotrebu ionizacionih komora s mjerenjima doza na bazi pocrnjenja rentgenskim ili gama zrakama izloženih i standardno razvijenih filmova, s rezultatom da iz principnih i praktičnih razloga treba ionizacionim komorama i uopće elektroničkim aparaturama dati prednost.

I. Već prije više od pola stoljeća, nakon prvih neočekivano neugodnih iznenađenja sa zdravstvenim oštećenjima od rentgenskih zraka i zraka radioaktivnih tvari, postalo je očito, da će se kod upotrebe ovakvih radijacija, koje su se sve više primjenjivale u medicini i industriji, morati poduzimati zaštitne i kontrolne mjere. Te su mjere trebale poslužiti, da osobe zaposlene s rentgenskim aparaturama i s radioaktivnim supstancijama, a i pacijenti, na koje se primjenjuju pripadna zračenja, budu osigurani od neželjenih posljedica tih zračenja, a kod rentgenskih aparatura i od pogibelji visokih električkih napona.

Dok je međutim pogibelji od visokih napona brzo uspjelo relativno potpuno eliminirati »naponski sigurnim« rentgenskim uređajima, gra-

denima po metodama suvremene visokonaponske tehnike, pitanja zaštite od samih prodornih radijacija, i kontrole te zaštite, ne samo da nisu mogla uvijek biti praktički radikalno rješavana, nego su se u toku vremena čak sve više komplicirala pridolaskom u upotrebu sve intenzivnijih i sve prodornijih radijacija. Stvar se pogotovu zaoštrila posljednjih godina, kad su se, pored običnih rentgenskih cijevi i prirodno radioaktivnih preparata, kao izvori zraka za terapijsku upotrebu u medicini, te rentgenskoradiografske, gamaradiografske i druge upotrebe u industriji i nauci, počele upotrebljavati nove naprave za vanredno prodorne rentgenske i gama radijacije, poput betatrona, linearnih akceleratora i dr., pa različiti, atomskim reaktorima i drugim atomističkim uređajima lako proizvedivi i po tom općenito pristupni umjetno radioaktivni izotopi, među kojima se na pr. radioaktivni kobalt ( $Co\ 60$ ) danas već mnogo upotrebljava mjesto preparata sa radijem ( $Ra\ 226$ ), i to ekstremno čak u količinama do više »kirija« radioaktivnosti, a daje gama zrake višestruko prodornije kroz olovo od rentgenskih zraka, koje izvode rentgenski uređaji i najviših napona.

Pitanja zaštite od pogibelnih prodornih radijacija, te mjerenja doznih jakosti ili intenziteta, i u određenom vremenu ukupno primljenih doza tih radijacija (uz ostalo i doza apliciranih pacijentima), konačno su se zaoštrila i time, što su novim atomskim oružjima omogućena jaka radioaktivna zagađenja od mnogo kvadratnih kilometara, s velikim pogibeljima za ljude i životinje na tim površinama, kako su pokazale dvije primjene prvih atomskih bombi pod konac prošloga rata. Pogotovu su na pogibelji ukazali poznati poslijeratni pokusi s novijim običnim i vodikovim atomskim bombama, kod kojih su konstatirana oštećenja, pa čak i s letalnim svršetkom, stotine kilometara od mjesta pokusa udaljenih ljudi, pogođenih »radioaktivnim pepelom«. Tako je problematika mjerenja prodornih radijacija dobila na značenju i za zaštitu civilnog stanovništva pod ratnim prilikama, za PAZ i slično, te nema sumnje, da će joj trebati obraćati pažnju i pri sve gušće podizanim atomskim reaktorima i doskora očekivanim uređajima za mirnodopske primjene atomske energije. A ne treba zaboraviti ni na važnost mjerenja radioaktivnih radijacija i kod rudarskih traženja radioaktivnih ležišta, kao i kod različitih medicinskih, bioloških i drugih primjena i industrijskih upotreba t. zv. metode radioaktivnih »tracera«.

II. S obzirom na naprijed obrazloženu golemu važnost mjerenja rentgenskih i radioaktivnih radijacija, koja se kudikamo najpouzdanije izvode različitim električkim, i posebno elektroničkim metodama, pisac je prije nekoliko godina poduzeo da eksperimentalno razrađuje, u Zavodu za osnove elektrotehnike i električka mjerenja Tehničkog fakulteta u Zagrebu, a uz djelomičnu materijalnu pripomoć za potrebni elektronički materijal od Jugoslavenske akademije znanosti i umjetnosti u Zagrebu, kojoj neka i na ovom mjestu bude izrečena topla hvala, problematiku

raznih električkih metoda spomenutih mjerenja prema našim mogućnostima. Počelo se od najosjetljivijih mjerenja slabih radijacija s Geiger-Müllerovim cijevima, djelomično u vczi s t. zv. »scalerima«, pa se onda prelazilo na uređaje za već nešto jače, srednje jake i konačno naročito jake radijacije, s ionizacionim komorama i nadovezanim elektroničkim aparaturama za mjerenja u danom momentu postojećih intenziteta (monitori radijacija), ili nadovezanim kondenzatorsko-elektrometerskim kombinacijama za mjerenja ukupno primljenih doza (dozimetri).

Nešto o tim istraživanjima, koja još nisu sva završena, bilo je saopćeno i demonstrirano već prije (predavanje pisca 13. V. 1953. u Odjelu za matematičke, fizičke i tehničke nauke Jugoslavenske akademije na temu: Elektronički brojači, scaleri i ionizacione komore, gdje je uz ostalo bio predveden prvi i za onda još jedini kod nas konstruirani brzi dekadski scalerski stepen sa četiri flip-flop spoja kombinirana za neposredno pokazivanje znamenaka: 1, 2, 3, ... 9, 0). A nešto je predviđeno da bude drugdje izneseno. Na ovom mjestu referirat će se, u skladu s namjenom Arhiva za higijenu rada i uz isključenje u mnogom bitno drukčije problematike alfa, beta i neutronske radijacija, posebno o dvjema zavodskim konstrukcijama monitora radijacija, prikladnih za neposredna pokazivanja baš onih intenziteta rentgenskih i gama zračenja, kakvi se susreću, kad treba ustanovljivati dostatnost ili nedostatnost zaštita na raznim mjestima u medicinskim i industrijskim pogonima, koji rade sa rentgenskim zrakama ili s radioaktivnim tvarima. A dodatno će se referirati i o dosad stečenim iskustvima s mjerenjima ukupno primljenih doza takvih radijacija.

III. Najprije treba nešto reći o pojmovima i jedinicama (doznih) intenziteta i doza rentgenskih i gama radijacija, te o tolerantnim dozama, koje se smatraju još praktički neškodljivima za ljudski organizam, ako ih on prima u određenim intervalima vremena. Još će se uvesti pojam i jedinica radioaktivnosti određene količine radioaktivne tvari.

Najbolje će biti poći od pojma doze. Po definiciji se na dozu (količinu)  $D$  rentgenskih ili gama radijacija zaključuje iz njima proizvedene, na istraživanom mjestu prostora, ukupne ionizacije određene mase uzduha [rastavljanje molekula u uzduhu na parove suprotno nabijenih iona; primarni pojav je rastavljanje na jednovalentne pozitivne ione u uzduhu i elektrone (3, 7)]. A specijalno se pod jedinicom doze 1 rentgen (1 r; po Röntgen) razumijeva doza, kojom se po 0,001293 grama uzduha (dakle po 1 cm<sup>3</sup> uzduha pri normalnim prilikama pritiska i temperature: 760 mm st. Hg, 0 °C) stvori ionâ u uzduhu: pozitivnih ukupnog naboja  $+ \frac{1}{3 \cdot 10^9}$  ampersekundi (kulona) i negativnih ukupnog naboja  $- \frac{1}{3 \cdot 10^9}$  ampersekundi ( $\frac{1}{3 \cdot 10^9}$  ampersekundi ili kulona zvalo se

prije: 1 »elektrostatska jedinica« naboja). Lako je, znajući apsolutni iznos  $0,160 \cdot 10^{-18}$  ampersekundi naboja jednovalentnih iona, vidjeti da izlazi na isto, ako se kaže: 1 r stvara u  $1 \text{ cm}^3$  uzduha normalnog stanja  $\frac{1}{3 \cdot 10^9}$ :  $0,160 \cdot 10^{-18}$  ili  $2,083 \cdot 10^9$  (nešto preko dvije milijarde) parova iona.

Kako je jedinica rentgen često prevelika za praksu, izražavaju se manje doze većinom u tisućinkama rentgena ili milirentgenima (mr), a katkad čak u milijuntinama rentgena ili mikrorentgenima ( $\mu\text{r}$ ).

Uspjelo je također pokazati (3), da se kod primjene doze 1 r prenese na masu  $0,001293 \text{ g}$  uzduha energija  $10,8 \cdot 10^{-9}$  vatsekundi (što po gramu uzduha čini gubitak energije  $8,35 \cdot 10^{-6}$  vatsekundi). A po 1 gramu tkiva čovječjeg tijela apsorbirana energija pri primjeni doze 1 r može se uzimati da je  $9,3 \cdot 10^{-6}$  vatsekundi.

IV. Dalje se pod (doznim) intenzitetom (doznom jakošću)  $J$  vremenski stalnih rentgenskih ili gama radijacija razumijeva doza preračunana na jedinicu vremena djelovanja zraka, dakle na jednu sekundu (s), minutu (min), sat (h), tjedan (tj) ili slično, prema čemu se iznosi  $J$  izražavaju jedinicama: rentgen na sekundu (r/s), rentgen na minutu (r/min), rentgen na sat (r/h), rentgen na tjedan (r/tj), ali također i alikvotnim dijelovima tih jedinica: milirentgen na sat (mr/h), milirentgen na tjedan (mr/tj) i slično.

Prema rečenom nekoj bi dozi  $D$  vremenski stalnih radijacija apliciranih u toku intervala vremena  $t$  odgovarao intenzitet radijacija  $J$  dan formulom:

$$J = \frac{D}{t} \quad (1),$$

a obrnuto bi se doza  $D$  izražavala sa  $J$  i  $t$  relacijom:

$$D = J \cdot t \quad (1').$$

Najpreglednije se ti odnosi izražavaju pišući veličine s naznakom pripadnih jedinica, na pr.  $J(\text{mr/h}) = D(\text{mr}):t(\text{h})$ ,  $D(\text{r}) = J(\text{r/h}) \cdot t(\text{h})$  i t. d.

Iz spomenutoga se na pr. odmah razabira, da bi se iste doze primile (a i biološki bi učinci bili praktički isti), ako bi neka osoba u toku 5 radnih dana nekog tjedna boravila svaki dan po 8 h, dakle u tjednu svega 40 h, na nekom radnom mjestu, gdje bi je zgađale zrake relativno slabog intenziteta  $15 \text{ mr/h}$ , na pr. iz preblizog ili preslabo olovom oklopljenog radium-preparata, ili ako bi ta osoba sjedeći pri nedovoljno zaštićenom komandnom pultu rentgenske aparature bila obasjavana već jačim intenzitetom  $120 \text{ mr/h}$  u toku ukupno 60 aplikacija u tjednu rentgenskih radijacija trajanja po 5 min, dakle ukupnog trajanja 300 min ili 5 h. U oba, naime, slučaja produkt  $J \cdot t$  daje po tjednu istu dozu:

$$D = 15 \left( \frac{\text{mr}}{\text{h}} \right) \cdot 40 (\text{h}) = 120 \left( \frac{\text{mr}}{\text{h}} \right) \cdot 5 (\text{h}) = 600 \text{ mr} = 0,6 \text{ r}$$

(koji se rezultat, manje prikladno, može izraziti i kao 600 mr/tj ili 0,6 r/tj).

Navedimo još kao primjer intenziteta  $J$  (r/min), da je na pr., po Bouwersu (2), radijacija jedne rentgenske cijevi stalnog istosmjernog anodnog napona 200 kV (kilovolta), pri anodnoj struji 10 mA (mili-ampera), nakon prolaza kroz 2,5 mm debeli filtar iz bakra Cu, pokazuje, u daljini od fokusa 1 m okomito na smjer upadanja elektrona, intenzitet 4,5 r/min ili 270 r/h.

V. Što se tiče tolerantnih doza, dakle onih, koje na pr. tjedno kroz dulje vrijeme može primati čovječji organizam bez praktičke vjerojatnosti zamjetljivih oštećenja organizma, bilo je u prvo vrijeme dosta nesigurnosti, a i kasnije su znatno veće doze nego danas dopuštane kao neškodljive (1). Danas se većinom uzima 0,3 r ili 300 mr kao tolerantna doza, kojoj u toku godinâ može svakog tjedna biti izvirgavano još bez oštećenja organizma cijelo čovječje tijelo. Za pojedine dijelove tijela (noge i ruke) mogu se dopustiti i nešto veći iznosi (3), a za genitalne organe, zbog pogibelji za naslijede osoba, koje u tom pogledu dolaze u obzir, trebalo bi izbjegavati i znatno manje tjedne doze. Neki propisi za rentgenske pogone, na pr. njemački iz 1940. i 1944. (5, 6) i naši iz 1947. (4), dopuštaju dnevno još 0,25 r za cijelo tijelo, odnosno samo 0,025 r za genitalne organe. Apsolutno se, uostalom, nitko ne može ukloniti prodornim radijacijama, jer i bez rentgenskih i radioaktivnih izvora djeluju svuda radijacije kozmičkih zraka, kojima već u malim nadmorskim visinama odgovaraju tjedne doze reda veličine 0,001 r.

Doze od više rentgena, primljene jednim kratkotrajnim obasjavanjem ili u više izlaganja zrakama u kraćim vremenskim razmacima, mogu izazvati lakša ili teža biološka oštećenja, naročito kod čovjeka. Tako već doze oko 25 r, primijenjene na cijelo čovječje tijelo, mogu izazvati oštećenje organizma, koje se manifestira privremenim smanjenjem broja bijelih krvnih tjelešaca. A sa sve većim dozama razorni su učinci rentgenskih i gama radijacija sve ozbiljniji, tako da se, prema danas poznatim činjenicama, doze iznosa 400 do 500 r moraju već smatrati srednjim letalnim dozama, t. j. dozama, kod kojih oštećenja kod polovice pogođenih nesretnika konačno dovode do smrti. Zanimljivo je, da je srednja letalna doza za mnogo niže organizme mnogostruko viša nego za čovjeka, na pr. za voćnu muhu čak oko 80000 r, za puža oko 20000 r. Ali za kunića ona je samo oko 750 r, i sl.

VI. Razumije se, da će dozni intenziteti  $J$ , i u određenim intervalima vremena primljene doze  $D$ , ovisiti osim približno obrnuto proporcionalno kvadratu udaljenosti od izvora zrakâ, još i o radijacionoj jakosti izvora. Kod rentgenskih cijevi jakost radijacija raste mnogo naglije

nego linearno s anodnim naponom cijevi (kilovolti), a po prilici linearno s anodnom strujom (miliamperi). Tako se u malo prije navedenom slučaju cijevi sa 200 kV i 10 mA prema intenzitetu 270 r/h u daljini 1 m od fokusa mogu očekivati: 4-struko veći intenziteti (1080 r/h) na pola metra daljine, 16-struko veći intenzitet (4320 r/h) na četvrt metra daljine i t. d., pa bi specijalno na pola metra daljine bila postignuta visoka doza  $D = 54$  r već nakon 0,05 h ili 3 min!

VII. Kod radioaktivnih tvari koje emitiraju gama radijacije utječe dakako na  $J$ , u određenoj daljini od dane količine nekog radioaktivnog preparata, broj radioaktivnih raspada (dezintegracija) u jedinici vremena. Specijalno se na sekundu svedeni broj dezintegracija određene količine radioaktivne tvari zove aktivnost te količine tvari. Polazeći prvobitno od radioaktivnosti 1 g čistoga Ra, jedinicu 1 kiri (po Curie-u) možemo uopće pripisivati svakom radioaktivnom preparatu u kome se sekundno zbiva  $37 \cdot 10^9$  (37 milijardi) radioaktivnih dezintegracija (d), tako da se može staviti: 1 kiri =  $37 \cdot 10^9$  d/s (3). Tisućinka odnosno milijuntina kirija (c) zovu se milikiri (mc) odnosno mikrokiri ( $\mu c$ ).

Pod specifičnom aktivnošću razumijeva se aktivnost 1 grama radioaktivnog preparata. Na pr.: iz atomskih reaktora dobivani Co 60 može imati, već prema stepenu neutronske iradijacije polazne tvari Co 59, vrlo različite specifičke aktivnosti, od manjih reda veličine 100 mc/g do onih reda veličine 10000 mc/g (preparati upotrebljavani u radiografiji i dubokoj terapiji).

Očito proporcionalno veću aktivnost imaju preparati većih količina iste tvari, a kod istih količina veće aktivnosti daju tvari većih brzina raspadanja, dakle manjeg polovičnog vremena  $T$  (t. j. vremena, nakon kojega se polovica radioaktivnih atoma raspadne, a polovica ostane još neraspadnuta). Tako i malena masa čistog Co 60 pokazuje dosta veliku aktivnost, jer se Co 60 već umjereno brzo raspada (s polovičnim vremenom 5,3 godina).

Za 1 mc Co 60 okružena uzduhom može se uzimati (3, 11) da izvodi u daljini 1 m intenzitet gama radijacija  $J = 1,35$  mr/h, a radiografski ekvivalentnim moglo bi se tom 1 mc Co 60 smatrati 1,55 mg Ra (3). Kod okomito na smjer zraka postavljene ploče od olova Pb debljine oko 13 mm, između izvora i mjesta mjerenja intenziteta  $J$ , ovaj potonji bi oslabio na okruglo polovicu (11). Prema tomu bi na pr. već 8 mc Co 60 za nezaštićenu osobu, koja bi boravila u daljini 2 m tjedno 40 h, značilo tjednu dozu iznosa:

$$D = \frac{8 \cdot 1,35}{2^2} \left( \frac{\text{mr}}{\text{h}} \right) \cdot 40 \text{ (h)} = 108 \text{ mr,}$$

dakle više od trećine tjedne tolerantne doze 300 mr. A s četverostrukim intenzitetom u daljini 1 m tjedna doza bi znatno premašila tolerantnu.

Međutim, danas se već upotrebljavaju za radiografiju i duboku terapiju količine Co 60 s aktivnostima do mnogo kirija, pa i do nekoliko tisuća kirija (kilokirija, milijuna milikirija)!

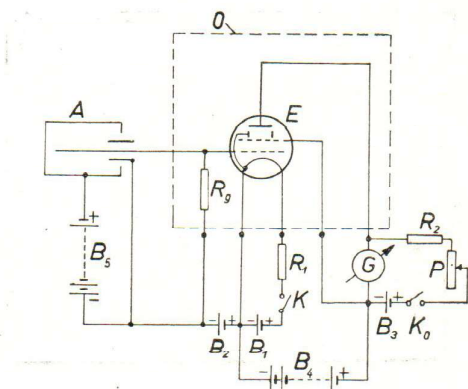
VIII. Na temelju dosad uvedenih podataka, i njima sličnih, naročito o prodornosti različitih zraka kroz olovo i druge tvari prikladne za zaštitu, moglo bi se zamišljati, da se računski razraduju mjere potrebne za zaštitu od rentgenskih i gama radijacija. Prejake tjedne doze mogle bi se izbjegavati, kod potrebne jakosti i vrste izvora, debljim zaslonima od olova i sl., boravkom u što većoj daljini od izvora i obasjanih predmeta (sekundarne zrake!), te konačno smanjenim tjeđnim brojem sati prisustva osoblja zaposlenog u pripadnim pogonima. No imajući s jedne strane pred očima znatne raznolikosti primjena u pojedinim pogonima i vrlo brojna radna mjesta, na kojima osoblje pri radu boravi i slično, a s druge strane vanredno teške i dijelom nepopravljive posljedice, koje mogu nastupiti kod prekomjernih doza, suvremena higijena rada predviđa i inspekcija rada s punim pravom propisuje adekvatne zaštitne mjere i njihovu opetovanu kontrolu pouzdanim mjernim napravama.

Uzme li se sad u obzir, da se tolerantna tjeđna doza izražava rentgenima, a rentgeni su definirani ionizacionim učinkom radijacija na uzduh, te da ima razloga uzimati, da približno s tim učinkom idu paralelno biološka djelovanja radijacija u širokom području tvrdoća ili prodornosti tih radijacija, onda se očito najprirodnijima i prema tome najpouzdanijima od svih metoda moraju smatrati metode s ionizacionim komorama, gdje se proizvedeni ioni sastavljaju, pod utjecajem napona podržavanog između dvije elektrode komore, u električnu struju. Ako se ta ionizaciona struja  $I$  učini izmjerivom, to dalje dopušta zaključivanje na intenzitet radijacija  $J$  (na pr. u mr/h). Za dozu se pak učini izmjerivim strujom  $I$  u nekom određenom vremenu  $t$  ukupno preneseni električki naboj  $Q$ , što odmah dopušta zaključivanje na dozu  $D$  (na pr. u mr). Naprave prvog tipa zovu se monitori radijacija, a one drugog tipa dozimetri. Sve druge metode dopuštaju samo posredna zaključivanja na mr/h odnosno mr.

Međutim, malo razmatranja pokazuje, da problem mjerenja doznih intenziteta  $J$  ionizacionim strujama nije nipošto lagan. Ionizacione struje mogu s jedne strane biti izobličene različitim neželjenim utjecajima, a i u slučajevima da se dobiju u ispravnom iznosu  $I$  kod mjerenja zaštite one su, pri prikladnim dimenzijama ionizacionih komora, mnogo preznatnog iznosa, da bi ih mogli pokazivati i najosjetljiviji galvanometri laboratorijskog tipa, koji se jedva pomaknu pri  $10^{-9}$  ili ekstremno  $10^{-10}$  A. A od dobrog prenosivog monitora zahtijevat će se, da radi i sa tisuće puta neosjetljivijim robustnim ugrađenim instrumentom mjer-

nog područja, na pr. 0–50  $\mu\text{A}$ . Ni mjerenje naboja  $Q$  prenesenog vremenski promjenljivim ionizacionim strujama određenog trajanja  $t$  nije baš lagan problem.

IX. Suptilnost problematike mjerenja struja  $I$  ionizacionih komora najbolje će se razabrati na konkretnom primjeru. Zamislimo cilindričku ionizacionu komoru, poput A u shemama spajanja na sl. 1. i 2., s aksijalnom unutarnjom (kolektorskom) elektrodom pomno izoliranom od vanjske elektrode u obliku plašta komore. Uzduh u komori neka je normalnog stanja i volumena 250  $\text{cm}^3$ . Prije svega treba se, dakako, pobrinuti, da dobivena struja bude doista »struja zasićenosti« komore, dakle da se podržava između obje elektrode komore dovoljno visok napon  $U$



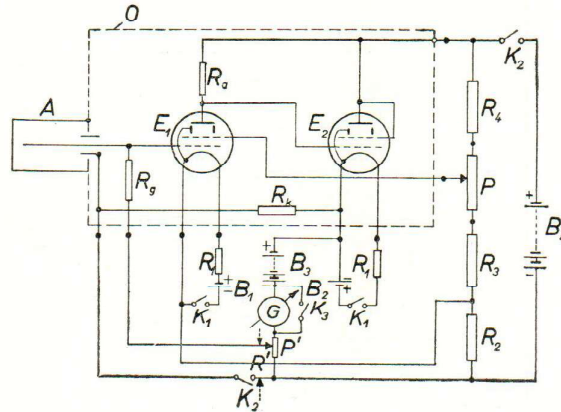
Sl. 1

(baterije  $B_5$  odn.  $B_4$  na sl. 1. odn. 2.). Kod prcniskog naime napona  $U$  djelovanjem mjenjenih radijacija u komori stvoreni ioni ne iskoriste se svi za ionizacionu struju  $I$ , budući da se mnogi parovi iona relativno brzo natrag kombiniraju (rekombiniraju) u molekule u uzduhu i s preostalim parovima iona rezultira manja struja od struje zasićenosti  $I$ . Treba još po mogućnosti izbjeći, da zbog napona  $U$  teku kroz izolaciju između obih elektroda ma i najneznačajnije struje izolacije, odnosno da one bar ne utječu na iznos  $I$  (kvalitetna izolacija od najboljih poznatih izolacionih tvari, polistirola i sl., osobito oko unutarnje elektrode; zaštitni prsten vidljiv na sl. 1. i 2.). Konačno treba se pobrinuti, da mjerene radijacije, pa i one malo prodorne, mogu prodrijeti u unutarnjost ionizacione komore bez zamjetljive apsorpcije kod prolaza kroz prednju



stijenku (prozor) ili kroz plašt komore, te da ne bude sekundarnih radijacija ni uopće utjecaja stijenke komore (stijenke po mogućnosti tanke i k tomu od materijala s atomima malenih atomskih težina: bakelita, aluminijska i sl.; stijenke iz izolacionih tvari učinjene iznutra vodljivima tankim premazom koloidalnog grafita i sl.).

I sad, ako se i postigne ispravna ionizacijska struja  $I$ , ona će biti vanredno neznatna. Da bi se na pr. mogli, kod kontrole zaštite od rentgenskih ili gama radijacija, mjeriti intenziteti radijacija 5 mr/h ili  $1,39 \cdot 10^{-6}$  r/s, treba se sjetiti, da radijacije ovog intenziteta sekundno po svakom  $\text{cm}^3$  uzduha izvode tek  $2,083 \cdot 10^9 \cdot 1,39 \cdot 10^{-6}$  ili 2900 parova iona, i prema tomu u komori volumena  $250 \text{ cm}^3$  stavlja ju sekundno na raspolaganje,



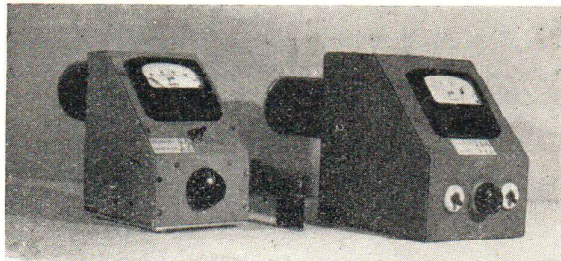
Sl. 2

za ionizacionu struju  $I$ , naboj  $2 \cdot 2900 \cdot 0,160 \cdot 10^{-18} \cdot 250$  ili  $0,232 \cdot 10^{-12}$  As. A to znači struju  $I = 0,232 \cdot 10^{-12}$  A! Kod komore 50-struko manjeg volumena  $5 \text{ cm}^3$  struja  $I$  bila bi samo još  $I = 0,464 \cdot 10^{-14}$  A!

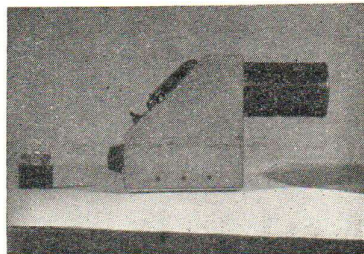
X. Kako se struje poput dobivenih, pa i nešto jače, ne daju mjeriti ni galvanometrima, ne preostaje nego ih učiniti zamjetljivima bar posredno. To je i postignuto elektroničkim specijalnim pojačavačkim spojevima u oba tipa monitora radijacija M1 i M2, razvijana u toku godinâ 1952. i 1953. u Zavodu za osnove elektrotehnike i električka mjerenja na inicijativu i pod rukovodstvom pisca, a uz požrtvovnu konstruktivnu suradnju bivšeg zavodskog asistenta ing. Z. Šolca.

Jednostavnijem i samo umjereno osjetljivom jednocijevnom tipu M1 shema spojeva donesena je u sl. 1., a vanjski izgled mu je prikazan na

sl. 3. lijevo i na sl. 4. (pogledi postrance i en face; za usporedbu dimenzija može poslužiti istodobno fotografirani mali benzinski upaljivač). Shema spojeva mnogostruko osjetljivijega dvocijevnog tipa M2 vidi se na sl. 2., a vanjski izgled tog monitora predočen je na sl. 3. desno. Prednji dijelovi obih aparata su ionizacione komore A iz sl. 1. i 2. Ostali spojni elementi iz sl. 1. i 2., zajedno s izvorima raznih potrebnih napona u obliku minijaturnih baterija iz malih plosnatih elemenata (po-



Sl. 3



Sl. 4

put onih upotrebljivanih u aparatima za nagluhe) i izvorima struje grijanja, smješteni su u kutiju svakog aparata, iz koje straga vire tek skala mikroampermetra G, ručke raznih sklopki (K na sl. 1., odnosno  $K_1$  i  $K_2$  na sl. 2.) i dugmeta potencimetara (P na sl. 1. i sl. 2.).

XI. Ne ulazeći na ovom mjestu u detalje elektroničkih problema, kojih je obilno bilo kod konstrukcije monitora M1 i pogotovu M2, spomenimo samo, da se u oba tipa, u svrhu jakog istosmjernog pojačavanja, struja  $I$  ionizacione komore pušta kroz otpor specijalno visokog iznosa  $R_g = 10^{11}$  oma = 100000 megoma (za manje osjetljivosti dostajalo bi na pr. samo  $10^{10}$  ili čak samo  $10^9$  oma). Međutim otpor  $R_g$  je također u spoju mrežnog kruga na komoru jednog ili drugog moni-

tora neposredno nadovezane i posebno za ovakve svrhe odabrane elektronke (E u M1 i E<sub>1</sub> u M2), a mrežica te elektronke podvrgnuta je prikladno udešenom negativnom prednaponu (kod cijevi E taj prednapon daje mala mrežna baterija B<sub>2</sub>). Spomenutim prednaponom radna točka anodne struje potisnuta je na linearnom dijelu prema donjem koljenu radne karakteristike cijevi, tako da se pri djelovanju mrežnog prednapona samog za sebe, dakle u odsutnosti ionizacionih struja, uspostavi tek neka mala anodna »struja mirovanja« I<sub>0</sub>. I sad nadolaskom ionizacionih struja I, i njima proizvedenim padovima napona I·R<sub>k</sub> u otporu R<sub>k</sub> kao pozitivnim doprinosima iznosu napona mrežice, smanjuje se prvobitno jedino djelotvorni negativni mrežni prednapon, pa poteku povećane anodne struje I' cijevi E odnosno E<sub>1</sub> takvih iznosa da porasti I'-I<sub>0</sub> izlaze mnogostruko veći od ionizacionih struja I, koje su ih izazvale. Kod ostajanja pak na linearnom dijelu radne karakteristike cijevi iznosi I'-I<sub>0</sub> izlaze čak i proporcionalni ionizacionim strujama I, a time u daljoj konsekvenciji proporcionalni i mjerenim intenzitetima radijacija J.

XII. Kod M1 bi se takvi porasti I'-I<sub>0</sub> mogli primjećivati po povećanjima otklona mikroampermetra G u anodnom krugu cijevi E s početnog iznosa I<sub>0</sub> na povećani I'. No kako se ne bi morao od očitavanih iznosa I' svakiput odbijati isti iznos I<sub>0</sub> struje mirovanja, predviđeno je kod spoja po sl. 1. monitora M1 kompenziranje struje mirovanja I<sub>0</sub> na nulu. Ono je postignuto instrumentu G paralelnom kombinacijom male baterije B<sub>3</sub> u seriji s jednim dvodijelnim otporom. Ovakva kombinacija šalje kroz G struju suprotnu struji I<sub>0</sub>, pa se adjustirajući potenciometrom P promljenjivi dio iznosa otpora kompenzacione grane može lako postići, da struja I<sub>0</sub> bude u G baš poništena suprotnom kompenzacionom jednakog iznosa. U tom slučaju sve izlazi na to, kao da je I<sub>0</sub> = 0 i I' - I<sub>0</sub> = I', pa je moguće ionizacione struje prosuđivati po neposrednim otklonima instrumenta G, s prirodnom nulom njegove skale kao početkom. Tako ujedno postaje iskoristiv puni opseg skale mikroampermetra G za očitavanja I' pojačanih ionizacionih struja I, a time i intenziteta J mjerenih radijacija, ako se baždarenjem, uz upotrebu prikladnog etalona za izvođenje poznatog intenziteta radijacija, odredi, kod izvjesne udešene osjetljivosti, koliko na pr. mr/h odgovara 1 μA skale na G. Često se iznosi J u mr/h i neposredno nanese na skalu instrumenta G.

Za elektronku E uzeta je, kao najpogodnija od cijevi raspoloživih u Zavodu, baterijska minijaturna beam-tetroda 1S4 (Brimar). Uz ionizacionu komoru volumena oko 300 cm<sup>3</sup> moglo se lako sa M1 postići, da se dobije puni otklon 50 μA instrumenta G već pri intenzitetu radijacija 500 mr/h, odnosno da 1 μA otklona na G vrijedi 10 mr/h. Pri-

tom su naponi pojedinih izvora po sl. 1. bili ovi:  $B_5$  30 V,  $B_2$  3 V,  $B_4$  15 V,  $B_1$  1,5 V (oveći element američanskog tipa za struju grijanja),  $B_3$  1,5 V.

Jedini zahvati pri ukopčavanju i iskopčavanju monitora M1 jesu: ukopčavanje struje grijanja: sklopkom K; kratko vrijeme kasnije: ukopčavanje sklopke  $K_0$  i zatim reguliranje otpora kompenzacione grane; oboje se izvodi okretanjem ručke potencijometra P, koje se nastavlja, dok G kod odsutnih radijacija ne pokaže nulu otklona. Kod prekida rada treba samo zakrenuti P natrag do kraja (da se i  $K_0$  otvori), te iskopčati K.

XIII. Kako se vidi, dovoljan je bio, s danom komorom i danim područjem intenziteta radijacija, napon ionizacione komore 30 V. Za anodni napon (i onaj zaštitne mrežice) cijevi E namjerno je predviđen izvor od samo 15 V. Analogno postupku kod specijalnih elektrometarskih cijevi neznatnim naponima anode (i zaštitne rešetke) cijevi 1S4, uz relativno visok negativni prednapon prve mrežice, potisne se skoro potpuno na nulu mrežna struja prve mrežice, a to treba željeti, jer kroz  $R_g$  ne treba da teče druga struja osim ionizacione struje I. Zapravo je dosta, da mrežna struja bude daleko ispod očekivanih ionizacionih struja, na pr. da bude ispod  $10^{-14}$  A pri ionizacionim strujama reda veličine  $10^{-12}$  A.

Zamjenom elektrometarske triode beam-tetrodom 1S4 postignute su veće srednje strmine (oko  $100 \mu\text{A/V}$  prema 25 do  $60 \mu\text{A/V}$  nekih poznatih elektrometarskih cijevi), i veća pojačanja. No, da bi se ta mogla iskoristiti, trebalo je osigurati besprijeorne izolacione odnose cijevi 1S4. Posebno je izolacioni otpor prve mrežice prema katodi cijevi 1S4 trebao da bude reda veličine bar  $10^{14}$  oma, da ne dođe do smetnja od struja kroz taj otpor. To se moglo postići samo tako, da se mjesto na normalno podnožje spoj cijevi 1S4 izveo s neposrednim priključkom na osamljeni izvod prve mrežice te cijevi. Cijev je još morala biti pomno očišćena i tankim slojem ceresinskog voska izolaciono poboljšana. Zajedno s mrežnim otporom  $R_g$  ona je nadalje zaštićena od utjecaja vanjske vlage i baterijskih para pomno zabrtvenim oklopom O (vezanim na +pol baterije  $B_5$ ). Važno je za upotrebu u monitorima odabrati primjerak cijevi 1S4 s osobito visokim vakuumom, jer se onda, kod niskih napona cijevi, ne će uspostaviti ni neželjene ionizacione struje u samoj cijevi, od ionizacije zadnjih plinskih molekula preostalih u cijevi i nakon najpomnijiijeg evakuiranja!

XIV. Svim opisanim pojedinostima, i još drugima, trebalo je, dakako, i k tomu u povećanoj mjeri, obraćati pažnju kod mnogostruko osjetljivijega dvocijevnoga monitora M2. Predaleko bi odvelo ovdje opisivati detalje znatno suptilnijeg spoja po sl. 2. monitora M2. Neka

bude samo spomenuto, da je ovdje prva cijev  $E_1$  spojena u stepen isto-smjernog pojačavanja u izgladnjelom (starvation) režimu rada (9), karakteriziranom vanredno visokim anodnim otporom  $R_a$  (100 megoma), neznatnom anodnom strujom, malim naponom zaštitne mrežice i pojačanjima od mnogo stotina puta. Pojačani napon iskorišćuje se, neposrednim spojem anode prve cijevi  $E_1$  s prvom mrežicom druge cijevi  $E_2$ , za upravljanje ove potonje cijevi, koja radi kao cathode follower (10) u triodnom spoju. Indikatorski instrument G priključen je s katodne strane cijevi  $E_2$ . Radi povećanja stabilnosti, vezom na mrežni otpor  $R_g$  prve cijevi preko klizača djelatelja napona  $P'$ , uvedena je kontinuirano varijabilna negativna reakcija (feedback) drugog stepena na prvi (10). Pojačavanjem negativne reakcije povećava se stabilnost rada spoja na račun ukupne osjetljivosti, tako da se razumnim kompromisom mogu postizavati i vrlo velike osjetljivosti uz još dovoljne stabilnosti. Očitane na G struje  $I''$  proporcionalne su mjerenim intenzitetima  $J$ . Tako se, uzimajući za  $E_1$  i  $E_2$  cijevi 1S4, mogao puni odklon  $50 \mu A$  na G, uz još prihvatljivu stabilnost i pri ionizacionoj komori volumena  $500 \text{ cm}^3$ , postići pri intenzitetu radijacija  $J = 10 \text{ mr/h}$ , dakle uz  $1 \mu A$  odklona na G postizavan već sa  $0,2 \text{ mr/h}$ . A to je već 50-struko veća osjetljivost od osjetljivosti monitora M1, uglavnom postignuta efikasnijim spojem monitora M2, i samo malim dijelom nešto povoljnijim volumenom njegove ionizacione komore. U praksi je obično dovoljno raditi s manjim osjetljivostima uz povećanu stabilnost, na pr. uz  $50 \mu A$  na G pri  $25 \text{ mr/h}$ , odnosno pri  $50 \text{ mr/h}$ . Pritom M2 još uvijek mjeri i tako slabe radijacije, da na njih M1 više zamjetljivo ne reagira. Vrijedno je upozoriti i na samo 4 izvora struje potrebna kod M2.

XV. Za baždarenje monitora M1 i M2 bilo je dovoljno poslužiti se izvorom gama radijacija u obliku određenog radioaktivnog preparata, kao etalona poznatog vremenskog toka aktivnosti u milikirijima, i savezno s time određenog, u momentu upotrebe, intenziteta gama radijacija u daljini 1 m. Uzimajući u račun i približno obrnutu proporcionalnost intenziteta radijacija s kvadratom daljine, može se na pr. konkretno očekivati, ako 1 mc (milikiri) radioaktivnog Co 60 izvodi, kako je već u VII. rečeno, u daljini 1 m intenzitet radijacija  $1,35 \text{ mr/h}$ , da će u ionizacionoj komori monitora M2, zamišljenoj u daljini 2 m, radijacije etalona Co 60, koji je u momentu nabavke bio aktivnosti 10 mc i upotrebljen je za baždarenje 6 mjeseci kasnije, biti intenziteta:  $0,85 \cdot 10 \cdot 1,35/2^2 \text{ mr/h}$  (s polovičnim vremenom 5,3 godina aktivnost Co 60 u 6 mjeseci opadne za 15%), dakle intenziteta  $2,87 \text{ mr/h}$ . Ako se dakle na instrumentu G u M2 očita  $I'' = 5,74 \mu A$ , može se uzimati, da je osjetljivost M2 tako udešena, da  $1 \mu A$  odklona na G predstavlja intenzitet iznosa  $2,87/5,74$  ili  $0,5 \text{ mr/h}$ , odnosno da punom odklonu  $50 \mu A$  instrumenta G odgovara  $25 \text{ mr/h}$ .

Mogu se, dakako, upotrebiti i drugi etaloni, na pr. Ra-etalon, a mogu se baždarenja vršiti i usporedivanjem podataka ispitivanog monitora s podacima, koje pod istim intenzitetima rentgenskih ili gama zraka daju drugi tvornički baždareni monitori ili dozimetri. Prema dosadašnjim iskustvima nema jako bitnih razlika između raznih baždarenja, pa ni između onih sa zrakama vrlo različite prodornosti. Kod usporedbe s dozimetrima mora se, dakako, iz dozimetrom u vremenu  $t(h)$  pokazane doze  $D(mr)$  zaključivati na intenzitet  $J(mr/h)$  po formuli (1) iz IV.

XVI. Kod primjena na mjerenja u svrhu zaštite, u nekim industrij-skim rentgenskim, medicinskim rentgenskim (dijaskopičkim i terapij-skim) i medicinskim radium-terapijskim pogonima, oba su se monitora pokazala vrlo upotrebljiva. Njima su se lako i brzo otkrivala mjesta pre-slabe zaštite. Pritom je M1 upotrebljavan za grublja i M2 za osjetlji-vija sondiranja. Nađeno je tako, pored ispravno izvedenih zaštita, i po-grešaka zaštite, koje su godinama izmicale tome da budu otkrivene metodom ekspozicije kontrolnih filmova. Tako je u jednoj zagrebačkoj poliklinici konstatirano probijanje jakih radijacija iz sobe rentgenske terapije u komandnu sobicu te terapije. Zaštitna stijena i prozor od olovnog stakla u njoj imali su doduše ispravnu zaštitnu vrijednost, ali je neznanjem ili nehajem olovno staklo bilo uzidano u stijenu sa ši-rokim drvenim okvirom, pa je zrakama bio kroz drvo otvoren put u komandnu prostoriju. Na tu se mogućnost godinama nije pomišljalo, dok nije nedostatak otkriven monitorom M1, i kasnije verificiran i ekspozicijom filma.

Jasno je, da se monitori mogu upotrebljavati i za niz laboratorijskih mjerenja, na pr. za istraživanje propuštanja različito prodornih zraka kroz različito debele ploče Al, Cu, Pb, i t. d.

Iako građeni za mjerenja samo rentgenskih i gama zraka monitori se još mogu bez daljega upotrebljavati bar za kvalitativna konstatir-anja beta ili alfa radijacija, ako se zbog propuštanja manje prodornih beta i još manje prodornih (i već u uzduhu malog dosega) alfa čestica prozori upotrebljenih ionizacionih komora izvedu za beta zrake na pr. od posve tankih Al-folija, a za alfa zrake od koliko je moguće što tanjih folija tinjca, najlona i sl. (izvor alfa zraka treba što više pribli-žiti prozoru komore).

XVII. U slučajevima jače zamjetljivih rentgenskih i gama radija-cija na mjestima, koja bi imala biti zaštićena, treba, dakako, ustanoviti primljene tjedne doze  $D$ , jer one ni na kojem mjestu ne smiju preko-račivati tolerantnu  $D_0$ .

Već je u IV. pokazano kako se, iz izmjerenih intenziteta  $J$  i ukupnog trajanja  $t$  radijacija u toku radnog tjedna, mogu računati na bazi for-mule (1') primljene tjedne doze, pri čemu kod radioaktivnih preparata

treba uzimati ukupno vrijeme boravka izložene osobe na pripadnom radnom mjestu, a kod rentgenskih pogona samo ukupno trajanje aplikacije rentgenskih zraka.

Međutim proračunavanja po navedenom načinu nužno imaju nešto samovoljno, više statističko, jer u praksi ne će uvijek neka osoba ostajati trajno na istom mjestu, niti će broj sati njezina boravka u blizini radioaktivnih tvari ili broj sati ukupnog trajanja aplikacijâ rentgenskih zraka ostajati svakog tjedna striktno isti. Za neposrednija određivanja primljenih doza  $D$  mogu dakle prikladniji biti dozimetri, koji i iznose  $D_1, D_2, \dots$  više pojedinačnih malih doza, na pr. u toku radnoga tjedna, sami sumiraju (integriraju) u ukupnu primljenu dozu  $D$ . Ima čak slučajeve, kad se ni pojedinačne doze  $D_1, D_2, \dots$  ne daju određivati monitorima, zbog prekratkog trajanja i kompliciranog vremenskog toka pripadnih radijacija. Monitorov mikroampermetar ne dopijeva naime u slučajevima jakih, ali vrlo kratkih rentgenskih impulsa, na pr. kod dijagnostičkih moment-snimaka trajanja, recimo, samo 0,3 sekunde, da se otkloni na srednju vrijednost intenziteta  $J$ , jer cijeli impuls već prije završi. Pokušati običi teškoću podržavanjem rentgenske radijacije bar u toku nekoliko sekundi, da bi instrument monitora dospio pokazati intenzitet  $J$ , ne vodi do cilja, jer je duže podržavanje samo trenutno dopustivih jakih radijacija spojeno s pogibelji oštećenja rentgenske aparature preopterećenjem, a iz dugotrajnijih no slabijih radijacija, pri smanjenom naponu i struji rentgenske cijevi, ne da se lako izvesti zaključak na odnose kod jačih opterećenja cijevi, odnosno i do tog zaključka se može doći tek dozimetričkim mjerenjima. Pisac je na pr. u jednoj zagrebačkoj dijagnostičkoj stanici dozimetrički usporedio, na istom mjernom mjestu, dozu primljenu od impulsa rentgenskih zraka danog (po podacima rentgenske sestre) uz 75 kV, 10 mA i 0,3 sekunde s dozom od dulje aplikacije slabijih zraka uz 45 kV, 10 mA i 8 sekundi, pa je našao, da je u danom slučaju gotovo 27-struko kratkotrajniji impuls jakih radijacija dao okruglo samo 3-struko manju dozu od doze s dugotrajnim slabijim radijacijama.

XVIII. Kako su onim, što je rečeno, postale evidentnima mogućnosti udobne i trajne primjene dozimetričnih naprava, bit će razumljivo, da njima, uz monitore prikladne za brza kontrolna mjerenja intenziteta radijacija, pripada važno mjesto kod kontrole sprečavanja prejakih tjednih doza.

Srećom su baš mjerenja doza relativno lako izvediva ionizacionim komorama bez kompliciranih elektroničkih aparatura. Vrlo jednostavan raspoređaj dobiva se, ako se ionizaciona komora, koja i sama predstavlja neki kondenzator malog kapaciteta  $C_K$ , nadopuni njoj paralelnim kondenzatorom odličnog krutog dielektrikuma po potrebi manjeg ili većeg kapaciteta  $C_0$ , te ako se dobivenoj kombinaciji još para-

lelno priključi i elektrometarski sistem E, kapaciteta  $C_E$  obično neznatnog prema  $C_K + C_0$ . Ako se sad ovakva kombinacija, ukupnog kapaciteta  $C = C_K + C_0 + C_E$  (uglavnom stalnoga, jer se obično male varijacije i onako prema  $C_K + C_0$  neznatnoga kapaciteta  $C_E$  elektrometra mogu zanemariti), kratkotrajno priključi na prikladan izvor napona, na pr. bateriju malih suhih elemenata, ona će primiti neki početni naboj  $Q_0$ , odnosno nabiti se na neki početni napon  $U_0$ . Prepuštena sama sebi, ona će, i nakon prekida veze s izvorom napona, držati napon  $U_0$  dogod ne nadodu radijacije kadre da izazovu ionizaciju u komori (izbijanje će teći tek zanemarivo polagano zbog ne posve savršene izolacije naprave i zbog slabašne ionizacije od kozmičkih zraka). No nadolaskom rentgenskih ili gama zraka doći će do jačih ionizacija u komori, i odgovarajućih struja izbijanja između elektroda komore, a time i do smanjivanja naboja i prema tome do slabljenja napona naprave, koje slabljenje će se moći očitati na elektrometru E. Dok ostane u momentu  $t$  djelotvorni napon  $U$  dovoljno visok, ionizaciona struja momentanog iznosa  $i$  bit će struja zasićenosti komore, i očito u nekom vanredno neznatnom vremenskom intervalu  $dt$ , s obzirom na vezu  $Q = C \cdot U$ , vrijediti za iznos  $dQ$  gubitka naboja relacija:  $dQ = i \cdot dt = C \cdot dU$ . To znači, da integrirano (zbrojeno) za sve vremenske intervale, od momenta  $t_0$  početka izlaganja radijacijama pri  $Q = Q_0$  i  $U = U_0$ , do momenta  $t_1$  prestanka izlaganja radijacijama pri  $Q = Q_1$  i  $U = U_1$ , vrijedi veza:

$$Q_0 - Q_1 = \int_{t_0}^{t_1} i \cdot dt = C \cdot (U_0 - U_1), \quad (2)$$

koja izriče, da ukupno u konačnom vremenu  $t_1 - t_0$  radi vremenski makro promjenljivih ionizacionih radijacija izgubljeni naboj  $Q_0 - Q_1$ , a po njemu i ukupno proizvedena doza  $D$ , veličina proporcionalna gubitku naboja  $Q_0 - Q_1$ , izlaze u konačnoj konsekvenciji proporcionalni padu napona  $U_0 - U_1$ , pokazanom elektrometrom. Može se dakle također pisati, označujući sa  $K$  neku konstantu proporcionalnosti, koja se može određivati baždarenjem naprave, relacija:

$$D = K \cdot (U_0 - U_1). \quad (3)$$

Drugim riječima: opisana kombinacija predstavlja dozimetarsku napravu, s elektrometrom kao indikacionim instrumentom, na kome očitavani padovi napona proporcionalno odgovaraju primljenim ukupnim dozama na mjestu, gdje se smjesti ionizaciona komora.

Za baždarenje treba samo etalonom radijacija podržavati u toku određenog vremenskog razmaka  $t'$  određeni intenzitet radijacija  $J'$  na mjestu mjerenja. Produkt  $J' \cdot t'$  daje primljenu dozu  $D'$ , pa da se dobjije  $K$  treba samo podijeliti  $D'$  s očitanim smanjenjem  $U_0 - U'$  na



elektrometru E, koje se može i direktno očitavati, ako se za nulu skale odabere mjesto na skali pripadno naponu  $U_0$  i skala se snabdije iznosima  $U_0 - U'$ .

Kao primjer uzmimo, da je neki ionizacioni dozimetar nakon 3 sata obasjavanja njegove komore zrakama iz 8,5 mc izotopa Co 60 na daljinu 3 m izazvao pad napona na elektrometru E od 150 na 105 V, dakle pad 45 V. Kako bi po IV. primljena doza  $D'$  bila  $8,5 \cdot 1,35 \cdot 3/3^2$  ili 3,82 mr, konstanta  $K$  bi izišla:  $K = 0,085$  mr/V.

XIX. U praksi se susreće vrlo mnogo varijanata dozimetara po navedenom principu, od vrlo osjetljivih finih no teško prenosivih laboratorijskih kombinacija do grubih pogonskih naprava, s mjernim područjima za velike, za manje i za posve neznatne doze, već prema konkretnim namjenama pojedinih instrumenata. Osjetljivosti se, osim veličinom komore, mogu očitavo povećavati smanjivanjem iznosa  $C$ , pa kod osjetljivijih tipova često ni nema dodanog kapaciteta  $C_0$ . A i elektrometrov otklonski sistem se često ugradi u samu ionizacionu komoru, te se očitava dodanim malim mikroskopom s okularnom skalom.

Za trajnu upotrebu osoblja zaposlenog s rentgenskim i gama radijacijama osobito su prikladni pojednostavljeni maljušni i robustni instrumenti netom navedenog tipa, koji se mogu za vrijeme rada nositi u džepovima poput naliv-pera. Naročito su poznati ovakvi »džepni dozimetri« po Lauritsenu, po Shonki i dr. (3, 7). Mjerni im je opseg na pr. 200 mr, pa se napravom, prethodno nabijenom na određeni napon, lako kontroliraju doze primane, od nekog početnog momenta, na pr. iz dana u dan, i to jednostavnim očitavanjem, u željenom momentu, stanja elektrometra na skali mikroskopa. Manje su udobne nešto jednostavnije naprave, gdje se zapravo u džepu nose tek ionizacione komore, prethodno nabijene iz posebnog aparata, koji sadržava još elektrometar i mikroskop za očitavanja elektrometra, i može služiti za mnogo komora, pa kad se obasjavana komora donese na očitavanje, sazna se iznos primljene doze. Bilo bi svakako korisno, kad bi se i kod nas razvio prototip džepnog dozimetra, prikladan za masovnu proizvodnju u našoj zemlji. Već je predviđeno, da se naše mogućnosti i izgledi u tom pogledu pobliže razmotre.<sup>1</sup> Jer samo uz brojne, a po niskoj cijeni

<sup>1</sup> Poslije predaje rukopisa ovog članka daljím radovima u prvim mjesecima god. 1955. piscu je već uspjelo eksperimentalno razviti zavodski tip dozimetra s ionizacionim džepnim komorama nabijanima i očitavanima iz prikladne u Zavodu razvijene naprave. A uspjele su i prve eksperimentalne realizacije zavodskih džepnih dozimetara, analognih onima po Lauritsenu ili Shonki, iako još mnogo preostaje da se uradi na razvijanju našega prototipa. Konačno je već u Zavodu pokusno uspjelo postići da monitor M1 radi i kao dozimetar (na bazi već dugo poznatog nabijanja kondenzatora iz izvora istosmjerne struje propuštane ionizacionom komorom, no uz napon kondenzatora očitavan ne elektrometrom nego (13, 14) cijevnim voltmetrom. O svemu spomenutom bit će izviješteno nakon dovršetka radova. (Opaska kod korekture 25. 4. 1955.).

u zemlji pristupačne džepne dozimetre, ili džepne ionizacione komore s lako pristupnom, za razne komore zajedničkom napravom za nabijanja i očitavanja, ili makar i druge male dozimetre (12), mogu se očekivati temeljitiji uvidi u stanje zaštita već brojnih naših ustanova, koje rade s prodornim radijacijama.

XX. Pokušajmo još usporediti postupke s opisanim napravama s ionizacionom komorom sa neelektričkim metodama za kontrolu zaštite od rentgenskih i gama radijacija. Ozbiljnija razmatranja tu zaslužuju samo registriranja doza metodom pocrnjivanja fotografskih emulzija. Već sama činjenica, da se ova tako reći od otkrića rentgenskih zraka poznata metoda sve do danas održala, pokazuje, da se ne može poreći vrijednost zaključivanju na primljene doze iz pocrnjenja kroz filtere različitih debljina i iz različitih materija obasjanih filmskih traka, nošenih recimo u toku cijelog tjedna na odjeći osoblja zaposlenog u rentgenskim i radioaktivnim pogonima, te po tom poslanih na fotografska razvijanja u standardnim prilikama i fotometriiranja dobivenih pocrnjenja.

Treba ipak reći, da se filmska metoda često samo prividno čini osobito jednostavnom. Prije svega ona ima principni nedostatak, da ne bazira, kao monitori i dozimetri s ionizacionom komorom, neposredno na definiciji jedinica kao  $mr/h$  i  $mr$ , postavljenih na osnovu ionizacionog djelovanja radijacija. K tomu filmovi ni ne mogu neposredno mjeriti radijacione intenzitete ( $mr/h$ ), nego samo doze ( $mr$ ), a i doze mogu registrirati samo mnogo neosjetljivije nego dozimetri nižih mjernih područja. Filmovi se i vrlo nejednako vladaju prema različito prodornim zrakama, a prema zrakama nekih energija pokazuju i jake anomalije (apsorpcioni pojavi srebra iz emulzije). K tomu, kako bi metoda filma bila iole pouzdana, treba upotrebljavati uvijek iste fotografske emulzije, i vršiti razvijanja pod striktno standardiziranim prilikama sastava i temperature razvijача, te trajanja razvijanja. Pa i uz te mjere opreza čak filmovi nominalno istog tipa, jednako ekspozirani, mogu dati ponešto različita pocrnjenja. A kvantitativna određivanja samih pocrnjenja zahtijevaju posebne aparate, na pr. fotoelektričke fotometre. Konačno, primljene doze i postignuta pocrnjenja nisu u jednostavnom, a nisu za različito prodorne zrake ni u istom odnosu. Nedostatak je također, da se rezultati izlaganja zrakama saznaju tek nakon odašiljanja filmova u laboratorije udešćene za održavanje standardnih prilika razvijanja i fotometriiranja razvijenih filmova, te nakon čekanja na izvještaj. Ipak treba priznati da se, uz kritičan postupak, i s filmskim pocrnjenjima postizavaju posve dobri rezultati, pa se s njima i danas mnogo radi, čak i paralelno s upotre-

bom monitora i džepnih i drugih dozimetara. Ne treba tu zaboraviti ni na dokumentarnu vrijednost registracije neke doze filmskim pocrnjenjem.

S druge strane elektronički monitori i džepni dozimetri imaju bitnih prednosti. Oni daju pouzdane i smjesta očitljive rezultate. Dozimetri modernih izvedbi nose se isto tako lako u odjeći kao filmske trake, a ako su nešto skuplji u nabavci, njihov je pogon jeftiniji od pogona s filmskim trakama: jedini trošak ionizacionih monitora i dozimetara jest povremeno nadomještanje istrošenih baterija novima prvih i trošak pogona naprave za nabijanje (i eventualno očitavanje) drugih. A ne treba zaboraviti, da će većom upotrebom napravama s ionizacionom komorom cijene bezuvjetno padati. Prema tome ne samo zbog principnih razloga, zbog činjenice, da metode mjerenja ionizacionih naprava prirodno odgovaraju ionizacionim definicijama doze i intenziteta radijacija i posebno činjenice, da ionizacioni i biološki efekti teku uglavnom paralelno, nego i zbog netom iznesenih praktičkih prednosti ionizacionih naprava treba dati prednost njima pred drugim metodama, i posve je razumljivo, da su moderni (naši i strani) propisi za zaštitu od rentgenskih i gama radijacija predvidjeli ionizacione instrumente kao kontrolne za ovakve svrhe, te da električkim napravama uopće pripada budućnost.

Zavod za osnovne elektrotehnike  
i električka mjerenja  
Tehničkog fakulteta, Zagreb

Radnja primljena:  
5. 1. 1955

#### Literatura

1. *Bouwers, A., i van der Took, J. H.*: Strahlenschutz, separat iz Fortschr. a. d. Geb. d. Röntgenstr., 41 (1930), Heft 5.
2. *Bouwers, A.*, Elektr. Höchstspannungen, Berlin 1939 (Springer).
3. *Lapp, R. E., i Andrews, H. L.*: Nuclear radiation physics, II. izd., New York 1954 (Prentice-Hall).
4. Pravilnik br. 733, Služb. List FNRJ, br. 100 od 26. XI. 1947.
5. *Ernst, W. H.*: Über die neuen Unfallverhütungsvorschr. f. Anw. v. Röntgenstrahlen in mediz. Betrieben, separat iz Fortschr. a. d. Geb. d. Röntgenstr., 61 (1940), Heft 5.
6. Strahlenschutzregeln f. techn. Röntgeneinrichtungen, DIN 6806 (1944).
7. *Barton Hoag, J., i Korff, S. A.*: Electron and Nuclear Physics, 3rd ed., New York 1951 (Van Nostrand)

8. *Elmore, W. G.*, i *Sands, M.*: Electronics Experimental Techniques, New York 1949 (Mc Graw Hill).
9. *Volkers, W. K.*: Direct Coupled Amplifier in Starvation Circuits, Electronics, March 1951, i *Šolc Z.*: Pentoda u izglednjelom režimu rada, Elektrotehničar 6 (1952), 180.
10. *Eastman, A. V.*: Fundamentals of Vacuum Tubes (3. Feedback Amplifiers; Cathode-follower circuits), New York 1949 (Mc Graw Hill)
11. Radioelements and Accessories, Atomic Energy of Canada, Catalogue C (1954).
12. *Warmholtz, N.*, i *Schampers, P. P. M.*: Ein Taschendosimeter, Philips' Techn. Rdsch. 16 (1953), Heft 4/5.
13. *Van Allen, W. W.*: Instruments for measuring secondary radiation, A. M. A. Arch. of Industr. Hyg., 6 (1952), 124.
14. Tracerlog, No. 34. (Apr. 1951.), pp. 1-7, i No. 67. (Febr. 1955.), pp. 1-3.

#### Summary

### ON MEASUREMENTS IN INVESTIGATING PROTECTIONS AGAINST ROENTGEN AND GAMMA RAYS

After short introductory considerations on fundamental quantities and units of measurement, the author describes ionization chamber electronic dosage intensity meters for roentgen- and  $\gamma$ -rays, suitable as monitors in investigations of protection against these radiations. The design of the instruments is based on author's experimental investigations carried out since 1952 at the Institute for General Electrotechnics and Electrical Measurements, Technical Faculty of the University of Zagreb. Some problems of integral dosage metering in connection with pocket dosimeters are also discussed.

Two types of monitors ( $M_1$  and  $M_2$ ) are described. Type  $M_1$  is a more straightforward one valve instrument with ionization chamber connected to one stage direct current amplifier allowing the use of indicating microammeters in the range of 50 microamps. The instrument is characterised by the use of a normal Brimar 1S4 Miniature Battery Beam Tetrode instead of commonly used electrometric valves. With careful construction very stable results and full scale deflections of 50  $\mu$ A at the indicating instrument could be obtained with radiation intensities of 500 mr/h. The second instrument, the  $M_2$  monitor, is of a more elaborate design. Two 1S4 valves have been used. For the first valve stage a starvation amplifier circuit (9) with extremely large amplification has been chosen, the second stage being a cathode follower circuit (10). In addition a feed-back circuit from the second to the first stage (10) is used so that the amplification may be controlled in order to obtain sufficient stability. With radiation intensities of 10 mr/h full deflection (50  $\mu$ A) on the microammeter could be obtained. However for very stable operation ranges of 25 mr/h or even 50 mr/h may better be used.

Both instruments proved very satisfactory in investigations of protections against penetrating radiations. Difficulties were encountered, however, when measuring ra-

diation doses from short Roentgen rays pulses as used for radiographic diagnostic work. In such cases pocket dosimeters, or pocket ionization chambers with common charging and indicating equipment, should be used.

The author points out the advantages of the ionization instruments as compared with photographic film methods, although a good conducted additional film badge service may be useful for checking of results obtained with ionization instruments.

*Institute for General Electrotechnics  
and Electrical Measurements,*

*Technical Faculty of the University of Zagreb,  
Z a g r e b*

*Received for publication  
5. I. 1955.*