

Sl. 19. Postupak grafičke integracije za određivanje broja prijenosnih jedinica rektifikacijskih kolona s prokapskim tijelima. *a* dijagram  $x, y$ , *b* dijagram  $y, 1/(y_e - y)$ ; 1 pravac  $x = y$ , 2 ravnotežna krivulja, 3 radni pravac za  $(L/V)_{rad}$ , 4 radni pravac za  $(L/V)_{min}$ , 5 dno kolone

**Visina prijenosnih jedinica.** Za izračunavanje pripadne visine prijenosnih jedinica za film, posebno za parnu i kapljevitu fazu, mogu se izvesti izrazi

$$H_V = \frac{V}{k_{Va}} p \quad \text{i} \quad H_L = \frac{L}{k_{La}} \rho_L, \quad (52)$$

gdje su  $k_{Va}$  i  $k_{La}$  koeficijenti prijenosa tvari za filmove parne, odnosno kapljevite faze, karakteristični za vrstu i dimenzije prokapskih tijela,  $p$  je procesni tlak u koloni, a  $\rho_L$  gustoća kapljevine. Pomoću  $H_V$  i  $H_L$  određuju se ukupne visine prijenosne jedinice iz izraza

$$H_{uv} = H_V + \lambda H_L \quad \text{i} \quad H_{ul} = H_L + \frac{H_V}{\lambda}, \quad (53)$$

gdje je  $\lambda$  omjer nagiba ravnotežne krivulje i radnog pravca.

Osim određivanjem visine i broja prijenosnih jedinica, rektifikacijske se kolone s prokapskim tijelima mogu proračunavati i metodom određivanja visine ekvivalentne teorijskoj plitici.

Visina sloja prokapskih tijela izračuna se tada iz izraza

$$h_p = N_{uv} H_{uv}. \quad (54)$$

U literaturi se može naći mnogo podataka o vrijednostima visina prijenosnih jedinica. Tako su na raspolaganju nomogrami iz kojih se za razna punila mogu očitati visine za  $H_V$  u ovisnosti o tlaku, temperaturi i linearnoj brzini para, a i tabelirane vrijednosti za  $H_L$  (tabl. 4). Ipak se uvijek treba oslanjati na eksperimentalne podatke ako su raspoloživi.

Tablica 4  
VRIJEDNOSTI  $H_L$  ZA NEKE TIPOVE PROKAPNIH TIJELA

Naziv	Dimenzije mm				
	12	18	25	40	50
Raschigovi prsteni	0,073	0,092	0,104	0,143	0,177
Pallovi prsteni	—	—	—	0,122	0,150
Intalox-sedla	0,061	0,079	0,089	0,122	—

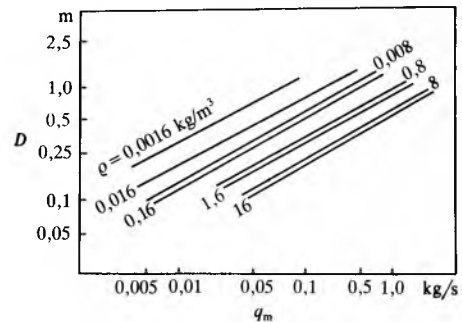
Proračun je kolona na osnovi prijenosnih jedinica dugotrajan. Zato se često i za proračun kolone s prokapskim tijelima primjenjuje metoda određivanja broja teorijskih plitica. Visina sloja prokapskih tijela se tada dobiva množenjem broja teorijskih plitica s visinom ekvivalentnom teorijskoj plitici (VETP). Određivanje VETP obično se osniva na iskustvu i eksperimentima, a mnoge su vrijednosti, upotrebljive za tu visinu, publicirane.

**Promjer rektifikacijskih kolona s prokapskim tijelima** grubo se može odrediti pomoću dijagrama (sl. 20) na kojem je ucertana ovisnost promjera kolone o masenom protoku za pojedine dimenzije prokapskih tijela. Promjer se kolone,

međutim, određuje kad se računa sa stvarnim brzinama strujanja procesnih faza i brzinama potapanja kolone.

**Brzina potapanja kolone** s prokapskim tijelima jest brzina strujanja parne faze od koje se daljim ubrzanjem po drugi put počinje naglo povećavati pad tlaka kroz kolonu.

Stanje u tom trenutku naziva se *točkom potapanja*. Prvi put se ubrzanje porasta tlaka pojavljuje kad su šupljine u sloju prokapskih tijela većim dijelom ispunjene kapljevinom. To se stanje naziva *vizualnim potapanjem*.



Sl. 20. Ovisnost promjera kolone  $D$  za rektifikaciju kontinuiranim kontaktom faza o masenom protoku  $q_m$  i gustoći plina  $\rho$

Da se osigura veća rezerva, općenito se predviđa brzina strujanja para 60...75% od točke potapanja. Ipak kolone s prokapskim tijelima bolje odjeljuju ako rade u režimu blizu točke potapanja, jer su tada tijela bolje promočena i pare bolje raspodijeljene. Za određivanje linearne brzine strujanja pri potapanju kolone s nekim prokapskim tijelima postoje različiti nomogrami. Pomoću njih i množenjem određenim faktorima mogu se izračunati i brzine strujanja pri potapanju kolona s drugim prokapskim tijelima.

Za proračun promjera kolona s prokapskim tijelima pad tlaka kroz aparat nije bitan, osim za rektifikaciju u vakuumu. Potrebno je samo kontrolirati da li je procesni tlak koji slijedi iz odabrane brzine strujanja i izračunanog promjera kolone prihvatljiv.

LIT.: R. J. Robinson, E. R. Gilliland, Elements of Fractional Distillation. McGraw-Hill Book Co., New York 1950. – E. Kirschbaum, Destillier- und Rektifizierteknik. Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1960. – B. D. Smith, Design of Equilibrium Stage Processes. McGraw-Hill Book Company, New York 1963. – E. J. Henley, H. K. Staffin, Stagewise Process Design. J. Wiley and Sons, New York 1963. – M. Van Winkle, Distillation. McGraw-Hill Book Company, New York 1967. – C. J. King, Separation Processes. McGraw-Hill Book Company, New York 1971. – B. D. Smith, B. Block, K. C. D. Hickman, Section 13, Distillation, u djelu: R. H. Perry, C. H. Chilton, Chemical Engineers Handbook. McGraw-Hill Book Co., New York 1973. – R. Billet, Industrielle Destillation. Verlag Chemie, GmbH, Weinheim 1973. – J. R. Bachurst, J. H. Harker, Process Plant Design. Heinemann Educational Books, London 1973. – C. D. Holland, Fundamentals of Multicomponent Distillation. McGraw-Hill Book Company, New York 1981.

F. Šef

**RENDGENSKA TEHNIKA**, uređaji i postupci za proizvodnje i primjenjivanje rendgenskog zračenja. Zbog njegove velike prodornosti mnogo se primjenjuje za medicinsku rendgensku dijagnostiku i terapiju, tehničku rendgensku dijaskopiju, defektoskopiju, strukturnu analizu, spektralnu analizu itd. (v. Defektoskopija, TE 3, str. 183; v. Kristalografija, TE 7, str. 375; v. Nuklearno zračenje, TE 9, str. 535).

Rendgensko zračenje otkrio je 1855. god. njemački fizičar W. C. Röntgen, koji ga je nazvao X-zrakama, a tako se još i danas često naziva na engleskom (X-rays). Za samo nekoliko mjeseci istraživanja on je pronašao njihova osnovna svojstva i ukazao na mogućnost njihove primjene za medicinsku i tehničku dijaskopiju. Za to je 1901. god. dobio prvu Nobelovu nagradu za fiziku.

Osnovno svojstvo rendgenskog zračenja za dijaskopijsku primjenu jest ovisnost njegovog intenziteta o gustoći tvari

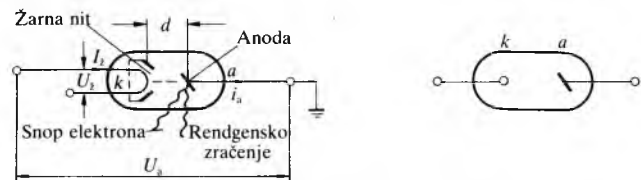
kroz koju prolazi. Snop nakon prolaza kroz tvar nejednolike gustoće sadrži u svom presjeku podatke o razlikama u gustoći tvari kroz koju su prošli pojedini dijelovi snopa. Vizualiziranjem presjeka snopa rendgenskog zračenja na fluorescentnom zastoru ili snimanjem na fotografskom (rendgenografskom) sloju ili elektroničkim pretvornikom, postaje vidljiva slika gustoća prozračenog predmeta. Tako se na slici mogu vidjeti unutrašnji dijelovi različitih gustoća, npr. kosti, pojedini organi i meka tkiva u tijelu, unutrašnji dijelovi strojeva, nepravilnosti u odljevcima, pukotine u varovima itd.

**NASTAJANJE I SVOJSTVA RENDGENSKOG ZRAČENJA**

Rendgensko zračenje se proizvodi umjetnim putem bombardiranjem mete (anode, antikatode) brzim elektronima, ubrzanim u elektronskoj, tzv. rendgenskoj cijevi, ili u akceleratorima čestica (linearni akcelerator, betatron), a prirodno nastaje pri promjenama u atomskom omotaču izazvanim nuklearnim procesima (v. *Nuklearno zračenje*, TE 9, str. 539).

Pri bombardiranju mete brzim elektronima nastaju dvije bitno različite komponente rendgenskog zračenja. Naglim kočenjem brzih elektrona u meti nastaje tzv. *zakočno zračenje* s kontinuiranim spektrom intenziteta po valnim duljinama. Izbacivanjem elektrona iz atomskih ljuski nižih energetske razina brzim elektronima koji udaraju u metu, te popunjavanjem tih praznih mjesta elektronima iz viših energetske razina, nastaje zračenje sa samo nekoliko valnih duljina, karakterističnih za kemijski element od kojeg je anoda. To je tzv. *karakteristično zračenje* s diskretnim (linijskim) spektrom.

Da bi se dobili brzi elektroni kojima se bombardira anoda, kao katoda se upotrebljava volframova žarna nit. Ta se nit žari na temperaturu ~2600 K, pa ona emitira dovoljan broj elektrona. Zbog električnog polja između anode i katode ti se elektroni ubrzavaju (sl. 1). Brzina elektrona ovisi o jakosti električnog polja, odnosno o visini napona između anode i katode. Da bi se elektroni mogli slobodno gibati prema anodi, katoda i anoda nalaze se u staklenom balonu iz kojeg je isisan zrak do tlaka ~10<sup>-4</sup> Pa. Prve rendgenske cijevi imale su samo razrijeđen zrak, katoda se nije žarila, a elektroni su se oslobađali ionizacijom plina u električnom polju između katode i anode.



Sl. 1. Principijelna izvedba rendgenske cijevi i njezin shematski znak

Sila koja djeluje na elektron naboja  $e$  između katode i anode na razmaku  $d$ , uz napon  $U_a$ , jest

$$F = \frac{U_a e}{d} \tag{1}$$

Ta sila ubrzava elektron, tako da on nakon prijeđenog puta između katode i anode ima brzinu  $v_1$ , a određena je pretvaranjem potencijalne energije u kinetičku

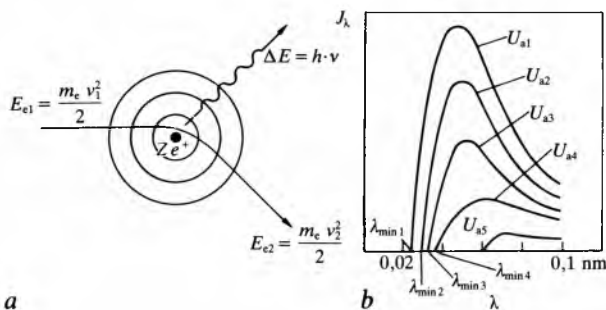
$$Fd = \frac{m_e v_1^2}{2} \tag{2}$$

gdje je  $m_e$  masa elektrona. Prema tome, elektron udara u anodu brzinom  $v_1$  koja je prema (1) i (2)

$$v_1 = \sqrt{\frac{2eU_a}{m_e}} \tag{3}$$

Udarom elektronâ u anodu velik se dio kinetičke energije pretvara u toplinu, a samo se nekoliko postotaka pretvara u rendgensko zračenje (najviše 3...4%).

**Zakočno rendgensko zračenje.** Prolaskom elektrona u neposrednoj blizini atomske jezgre (sl. 2a) on se naglo



Sl. 2. Nastajanje elektromagnetskog zračenja kočenjem elektrona. a model kočenja u atomu, b kontinuirani spektar zakočnog zračenja

usporava i brzina mu se smanjuje od  $v_1$  na  $v_2$ . Posljedica toga je smanjenje početne energije  $E_{e1}$  na vrijednost  $E_{e2}$ , a razlika se energije  $\Delta E_e = E_{e1} - E_{e2}$  pretvara u foton elektromagnetskog zračenja frekvencije  $\nu$  prema relaciji

$$E_e = h\nu, \tag{4}$$

gdje je  $h$  Planckova konstanta. Valna duljina takvog zračenja je određena brzinom prostiranja elektromagnetskog zračenja  $c$ ,  $\lambda = c/\nu$ , odnosno

$$\lambda = \frac{hc}{E_e} \tag{5}$$

Kada bi se sva kinetička energija elektrona pretvorila u elektromagnetsko zračenje, što se događa vrlo malom broju elektrona, onda bi bilo  $\Delta E = E_{e1} = eU_a$ . Ta najveća moguća energija stvorenog fotona daje najvišu moguću frekvenciju, odnosno najkraću valnu duljinu rendgenskog zračenja nastalo uz anodni napon  $U_a$

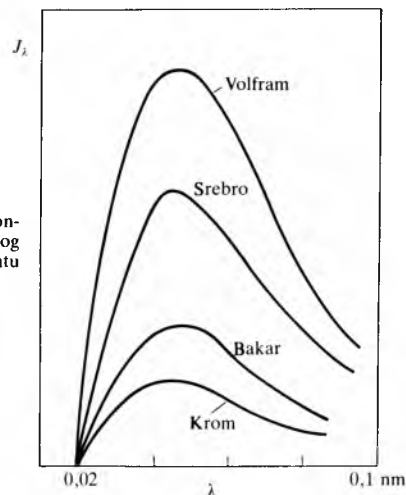
$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eU_a} = \frac{k}{U_a}, \tag{6a}$$

gdje je koeficijent proporcionalnosti  $k \approx 12,4 \cdot 10^{-7} \text{ V m}$ .

Prilagođena relacija za napon izražen u kilovoltima i valnu duljinu u nanometrima glasi

$$\lambda_{\min} = \frac{1,24 \text{ kV nm}}{U_a} \tag{6b}$$

Za ostali, mnogo veći broj elektrona energija  $\Delta E_e$  koja se pretvara u elektromagnetsko zračenje manja je od primarne energije  $E_{e1}$ , pa su valne duljine tog zračenja veće. To je vidljivo na sl. 2b, a također i to da gustoća energijskog toka (nazivana i intenzitetom zračenja) raste s porastom anodnog napona. Intenzitet zračenja ovisi i o materijalu anode (sl. 3): što je veći atomski broj  $Z$  kemijskog elementa od kojeg je anoda, to je veći i intenzitet zračenja. Ukupni intenzitet  $J$  snopa kontinuiranog spektra rendgenskog zračenja može se predočiti integralom u granicama  $\lambda_{\min}$  do  $\infty$



Sl. 3. Ovisnost intenziteta kontinuiranog spektra rendgenskog zračenja o kemijskom elementu od kojega je anoda

$$J = \int_{\lambda_{\min}}^{\infty} J_{\lambda} d\lambda, \quad (7)$$

gdje je  $J_{\lambda}$  intenzitet zračenja u području  $d\lambda$ . Intenzitet zakočnog rendgenskog zračenja proporcionalan je atomskom broju kemijskog elementa od kojeg je anoda, anodnom naponu  $U_a$  i anodnoj struji  $I_a$  (jer je ona pokazatelj broja elektrona koji bombardiraju anodu). Mjerenja su pokazala da je intenzitet proporcionalan kvadratu anodnog napona, pa se taj odnos može napisati

$$J = c_k Z U_a^2 I_a, \quad (8)$$

gdje je  $c_k$  koeficijent proporcionalnosti. Električna snaga rendgenske cijevi je

$$P = U_a I_a, \quad (9)$$

pa je stupanj djelovanja  $\eta$  rendgenske cijevi omjer (8) i (9)

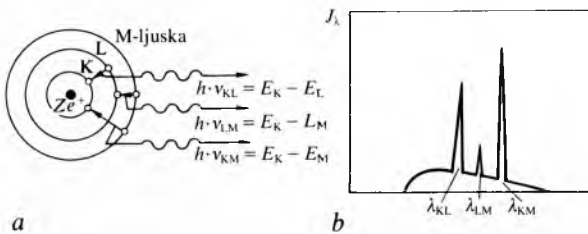
$$\eta = c_k Z U_a. \quad (10)$$

Tek se uz visok anodni napon  $\sim 400$  kV i velik  $Z$  može ostvariti stupanj djelovanja  $\sim 3\%$ .

**Karakteristično rendgensko zračenje.** Neki od elektrona koji bombardiraju anodu izbacuju elektrone iz atomskih ljuski najnižih energetskih razina. Popunjavanjem tih praznih mjesta elektronima s viših energetskih razina zrači se razlika energija viših i nižih stanja u obliku fotona tzv. karakterističnog rendgenskog zračenja (sl. 4a). Na taj način nastaje zračenje diskretnih frekvencija, odnosno valnih duljina, karakteristično za kemijski element od kojeg je anoda (v. *Nuklearno zračenje*, TE 9, str. 539). Da bi nastalo karakteristično zračenje određene karakteristične frekvencije  $\nu_k$ , odnosno karakteristične valne duljine  $\lambda_k$ , anodni napon rendgenske cijevi mora biti viši od tzv. kritičnog anodnog napona  $U_{a,krit}$

$$U_{a,krit} = \frac{k}{\lambda_k}, \quad (11)$$

gdje je  $k$  koeficijent iz relacija (6a). Karakteristični spektar prikazan je na sl. 4b, a kritični napon za nekoliko različitih elemenata u tabl. 1.



Sl. 4. Nastajanje elektromagnetskog zračenja izbacivanjem elektrona iz atomskih ljuski najnižih energija. a model, b karakteristični spektar tako nastalog zračenja

Tablica 1

KRITIČNI NAPON NASTAJANJA KARAKTERISTIČNOG RENDGENSKOG ZRAČENJA NEKIH ELEMENATA

Element	Atomski broj	Napon, kV	
		K-ljuska	L-ljuska
Olovo	82	87,6	15,8
Platina	78	78,1	13,9
Volfram	74	69,3	12,1
Molibden	42	20,0	2,9
Bakar	29	8,2	–
Nikal	28	8,3	–
Željezo	26	7,1	–

Intenzitet karakterističnog zračenja statistički je procijenjen

$$J = c_d I_a (U_a - U_{a,krit})^n, \quad (12)$$

gdje je  $c_d$  koeficijent proporcionalnosti, a eksponent  $n = 1 \dots 2$ . Ta formula vrijedi samo uz anodni napon koji nije viši od  $4 U_{a,krit}$ . Uz karakteristično zračenje uvijek nastaje i zakočno.

Karakteristično zračenje je intenzivnije kad se upotrijebi niži anodni napon (ali još uvijek viši od  $U_{a,krit}$ ) i anoda od elemenata s manjim atomskim brojem  $Z$ , jer je tada manji intenzitet zakočnog zračenja. Filtriranjem prikladnim filtrima može se dobro odvojiti karakteristično od zakočnog rendgenskog zračenja.

**Gušenje rendgenskog zračenja u tvarima.** Veličine prema izrazima (8) i (12) opisuju zračenje na mjestu nastanka, dakle uz anodu rendgenske cijevi. Kod rendgenskih cijevi kojih se anoda može smatrati približno točkastim izvorom intenzitet zračenja opada s kvadratom udaljenosti od izvora. Prolaskom rendgenskog zračenja kroz neku tvar zračenje se guši (njegov intenzitet slabi), ovisno o debljini sloja i koeficijentu gušenja zračenja u toj tvari. Intenzitet rendgenskog zračenja kao i svih elektromagnetskih zračenja opada pri prolasku kroz homogenu tvar po eksponencijalnom zakonu (v. *Nuklearno zračenje*, TE 9, str. 547)

$$J_d = J_0 e^{-\mu d}, \quad (13)$$

gdje je  $J_0$  intenzitet zračenja na ulazu,  $J_d$  intenzitet zračenja na izlazu iz sloja debljine  $d$ , a  $\mu$  je koeficijent gušenja (slabljenja, atenuacijski koeficijent), koji se sastoji od četiri osnovne komponente

$$\mu = \tau + \sigma_k + \sigma_c + \pi. \quad (14)$$

Prva komponenta  $\tau$  je koeficijent apsorpcije, a druge dvije su koeficijenti raspršenja, dok je četvrta komponenta  $\pi$  koeficijent gušenja uslijed stvaranja parova elektron–pozitron, i njezin je utjecaj za rendgensko zračenje vrlo malen. Koeficijent raspršenja u klasičnom smislu je  $\sigma_k$ , a  $\sigma_c$  je koeficijent raspršenja zbog Comptonova efekta. Pri apsorpciji se kvant rendgenskog zračenja dijelom troši na udaljšavanje elektrona iz njegove ljuske. Na taj se način rendgensko zračenje pretvara u druge oblike energije, kao što su svjetlosna ili toplinska. Koeficijent apsorpcije  $\tau$  proporcionalan je gustoći tvari  $\rho$  kroz koju zračenje prolazi, atomskom broju elementa od kojeg je anoda i valnoj duljini:

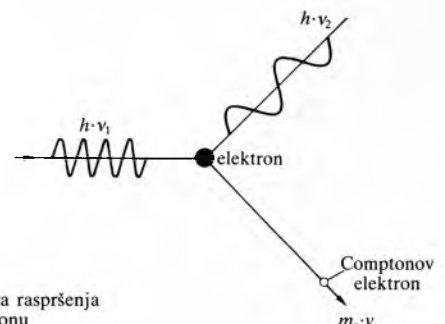
$$\tau = a \rho Z^3 \lambda^3, \quad (15)$$

gdje je  $a$  koeficijent proporcionalnosti. Prema tome, rendgensko zračenje kraćih valnih duljina bit će manje apsorbirano, dakle je prodornije od onoga duljih valnih duljina. Rendgensko zračenje kratkih valnih duljina zove se *tvrdno zračenje*, a ono dugih valnih duljina *meko*.

Prolazom kroz nehomogeno tijelo rendgensko zračenje je prema (15) više apsorbirano na mjestima veće gustoće i mjestima koja su od elemenata većeg atomskog broja. Ta se pojava primjenjuje u rendgenskoj dijaskopiji, i to u medicinskoj rendgenskoj dijagnostici, tehničkoj rendgenskoj defektoskopiji itd.

Kod klasičnog raspršenja foton mijenja smjer pa dio zračenja napušta osnovni snop. Pri takvom raspršenju ne mijenja se frekvencija raspršenog zračenja. Koeficijent klasičnog raspršenja  $\sigma_k$  dominira u području kratkih valnih duljina i malih atomskih brojeva  $Z$ , gdje je koeficijent apsorpcije  $\tau$  mali. I taj je koeficijent proporcionalan atomskom broju i valnoj duljini, a raste s nižom potencijom. Za valne duljine kraće od 0,03 nm koeficijent klasičnog raspršenja  $\sigma_k$  ne ovisi o valnoj duljini.

Kod Comptonova raspršenja, prema sl. 5, primarni foton velike energije  $h \cdot \nu_1$  oslobađa elektron iz vanjske ljuske



Sl. 5. Model Comptonova raspršenja fotona na elektronu

(Comptonov elektron), a preostali kvant zračenog energije  $h \cdot \nu_2$  je manji, odnosno frekvencija zračenja  $\nu_2$  je niža od primarne  $\nu_1$ .

Kao četvrta komponenta  $\pi$  može se spomenuti stvaranje parova elektron-pozitron, što također smanjuje intenzitet zračenja. Ta komponenta dolazi tek do izražaja kod velikih energija rendgenskog zračenja i, za razliku od prethodne tri, postaje sve veća što je frekvencija rendgenskog zračenja viša. Na taj način koeficijent slabljenja  $\mu$  ima neki minimum kod dosta tvrdog zračenja. Inače sve četiri komponente imaju zajedničku karakteristiku da su direktno proporcionalne gustoći tvari i atomskom broju elementa od kojeg je anoda.

Do sada je koeficijent gušenja  $\mu$  promatran za jednu određenu frekvenciju zračenja. Za kontinuirani spektar mora se uzeti u obzir neki srednji koeficijent gušenja  $\mu_{ef}$ , zajednički za sve frekvencije, odnosno valne duljine, poopćenjem relacije (13) na cijeli spektar  $\lambda_{min}$  do  $\infty$

$$\exp(-\mu_{ef}d) \int_{\lambda_{min}}^{\infty} J_{\lambda} d\lambda = \int_{\lambda_{min}}^{\infty} J_{\lambda} \exp(-\mu_{\lambda}d) d\lambda, \quad (16)$$

odakle je srednji koeficijent gušenja

$$\mu_{ef} = \frac{1}{d} \ln \int_{\lambda_{min}}^{\infty} J_{\lambda} d\lambda - \frac{1}{d} \ln \int_{\lambda_{min}}^{\infty} J_{\lambda} \exp(-\mu_{\lambda}d) d\lambda, \quad (17)$$

gdje su indeksom  $\lambda$  označene vrijednosti veličina za pojedine valne duljine.

U rendgenskoj tehnici često se gušenje izražava debljinom sloja tvari u kojoj intenzitet zračenja padne na polovinu, tzv. debljinom poluapsorpcije  $d_{1/2}$ . Iz uvjeta

$$J_{1/2} = \frac{J_0}{2}, \quad (18)$$

gdje je  $J_{1/2}$  intenzitet zračenja na izlazu iz sloja debljine  $d_{1/2}$ , slijedi

$$\ln \frac{J_0}{J_d} = \mu d_{1/2}, \quad (19)$$

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0,693}{\mu}. \quad (20)$$

Na taj se način može koeficijent gušenja izraziti pomoću debljine sloja poluapsorpcije  $d_{1/2}$  na ulazu u taj sloj. Tako je u tabl. 2 dana debljina sloja poluapsorpcije za tri različita metala: aluminij, bakar i olovo, uz različite valne duljine.

Tablica 2

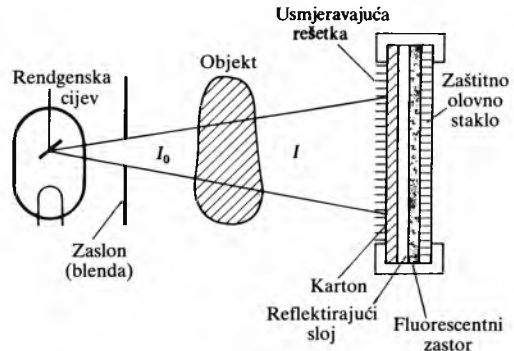
OVISNOST POLUAPSORPCIJE RENDGENSKOG ZRAČENJA U NEKIM ELEMENTIMA O VALNOJ DULJINI

Valna duljina $\lambda$ nm	Debljina sloja poluapsorpcije $d_{1/2}$ slijedećih elemenata		
	aluminij	bakar	olovo
0,001	45	15	9
0,002	36	10	5
0,005	23	6,1	0,61
0,01	15,6	2,35	0,18
0,02	9,7	0,53	0,14
0,025	7,0	0,29	0,075

**PRIMJENA RENDGENSKOG ZRAČENJA**

**Indikatori rendgenskog zračenja.** Za direktno promatranje rendgenskog zračenja upotrebljava se fluorescentni zastor. Fluorescentni materijal apsorbira zračenje koje na njega pada i jedan dio pretvara u sekundarno zračenje druge valne duljine. Stokesovo pravilo kaže da je valna duljina sekundarnog emitiranog fluorescentnog zračenja uvijek veća od valne duljine primarnog zračenja. Na taj se način kod izbora odgovarajućih fluorescentnih materijala rendgensko zračenje pretvara u zračenje u vidljivom dijelu spektra. Kao fluorescentni materijal upotrebljava se cink-sulfid, kadmij-sulfid ili cink-silikat. Da bi došlo do fluorescencije, potrebno je u

kristalnu strukturu tih fluorescentnih materijala ubaciti mjesta s izvjesnim defektom strukture, tzv. centre fluorescencije, koji se dodaju kao 0,1% primjesa srebra ili bakra. Fluorescentni zastor sastoji se od: podloge koja vrlo slabo apsorbira rendgensko zračenje, reflektirajućeg sloja i fluorescentnog sloja, što je vidljivo na sl. 6. Usmjeravajuća rešetka onemogućava pristup zračenja iz drugih smjerova. Kao posljednji sloj upotrebljavaju se prozračno staklo ili plastična folija s primjesom olova koje zaštićuje promatrača i omogućava upotrebu zračenja većeg intenziteta uz manju opasnost od zračenja za promatrača. Što je manje zrno fluorescentnog materijala i tanji sloj, to je bolja rezolucija dobivene slike, ali je i manja svjetljivost dobivene slike, pa je između rezolucije i intenziteta potrebno naći optimalnu debljinu fluorescentnog sloja.

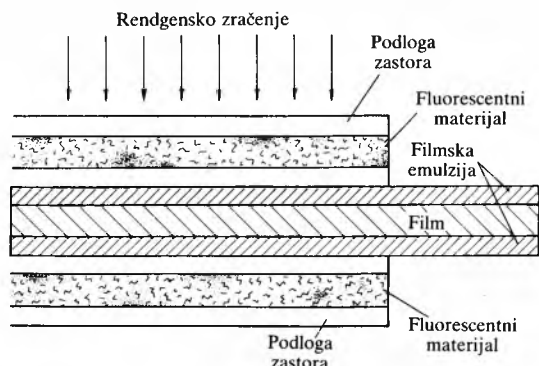


Sl. 6. Raspored izvora, prozračenog objekta i fluorescentnog zaslona pri direktnom promatranju rendgenskog zračenja

Upotreba fotografskog materijala omogućava veliko povećanje osjetljivosti u usporedbi s direktnim promatranjem na fluorescentnom zastoru. Velika osjetljivost fotografske emulzije od srebrnog bromida zasnovana je na činjenici da se vrlo slabim kvantima zračenja načne razgradnja srebrnog bromida, koja je nevidljiva (latentna slika). Proces redukcije provodi se do kraja upotrebom alkalnog razvijачa (metil-hidrokinon ili fenidon), a na taj način se djelovanje zračenja pojačava više milijuna puta.

Budući da je sloj fotoemulzije vrlo tanak, dolazi do slabe apsorpcije rendgenskog zračenja. Povećanje te apsorpcije može pojačati djelovanje rendgenskog zračenja na filmsku emulziju 10...100 puta stavljanjem fluorescentnog sloja ispred fotoemulzije. Taj fluorescentni sloj pri apsorpciji rendgenskog zračenja zrači sekundarno ultraljubičasto zračenje i na taj način pojačava djelovanje rendgenskog zračenja na fotografsku emulziju. Sljedeće povećanje osjetljivosti može se postići stavljanjem fotografske emulzije s obje strane filmske podloge. Tada se i fluorescentni materijal nalazi s obje strane filma, kao što je to pokazano na sl. 7. Kasete su u koje se umeće film od aluminija, zbog njegove male apsorpcije rendgenskog zračenja (tabl. 2).

Za detekciju rendgenskog zračenja još se upotrebljavaju ionizacijske komore, brojači zračenja, scintilacijski kristali i poluvodički detektori. Ti se detektori primjenjuju u rendgen-



Sl. 7. Presjek rendgenografskog filma stavljenog između dvaju fluorescentnih zaslona za pojačavanje učinka

skoj dozimetriji, spektrometriji, a poluvodički u posljednje vrijeme u tomografiji pomoću računala.

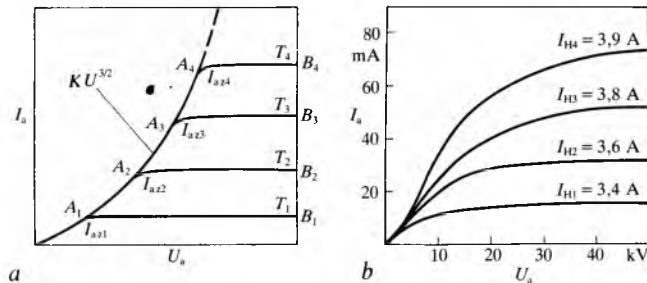
**Izvori rendgenskog zračenja.** Izvor rendgenskog zračenja je najčešće rendgenska cijev. Danas se upotrebljavaju rendgenske cijevi s užarenom katodom, koja je mnogo efikasnija u emitiranju elektrona od hladne katode u ionskim cijevima. Struja elektrona (anodna struja zasićenja)  $I_{az}$  koju neka užarena katoda može emitirati dana je Richardsonovim zakonom

$$I_{az} = CAT^2 \exp\left(\frac{eU_a}{kT}\right), \quad (21)$$

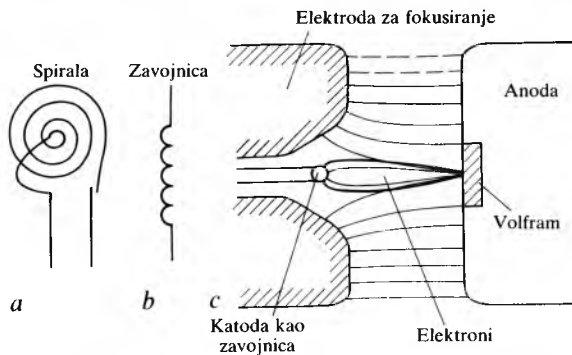
gdje je  $A$  ploština katode,  $T$  temperatura katode,  $k$  Boltzmannova konstanta,  $eU_a$  izlazni rad elektrona (npr. za volfram  $eU_{aw} = 4,56$  eV), a  $C$  koeficijent proporcionalnosti (npr. za volfram  $C_w = 10^6 \text{ Am}^{-2}\text{K}^{-2}$ , za molibden  $C_{Mo} = 6,5 \cdot 10^5 \text{ Am}^{-2}\text{K}^{-2}$ , a za torij  $C_{Th} = 7 \cdot 10^5 \text{ Am}^{-2}\text{K}^{-2}$ ). Prema tome je lako zaključiti da maksimalna struja elektrona koja može izići iz užarene katode, tzv. struja zasićenja, jako ovisi o temperaturi. Temperatura se može lako regulirati strujom žarenja katode  $I_H$  i na taj način upravljati količinom emitiranih elektrona iz katode, a time i anodnom strujom. Za manje anodne napone može se regulirati struja emitiranih elektrona anodnom naponom. To je tzv. područje prostornog naboja. No, kada anodni napon prijeđe određenu vrijednost, kada su svi emitirani elektroni privučeni anodom, tada anodna struja ne može više rasti. To je područje struje zasićenja izraženo relacijom (21). U području prostornog naboja, tj. za manje anodne napone struja  $I_a$  rendgenske cijevi dana je Longmir-Schottkyjevom relacijom

$$I_a = KU_a^{3/2}. \quad (22)$$

Koeficijent proporcionalnosti  $K$  ovisi o geometrijskoj izvedbi rendgenske cijevi. U tom području je anodna struja ovisna o naponu  $U_a$ . Ovisnost krivulja anodne struje o anodnom naponu prema relacijama (21) i (22) dana je na sl. 8a, dok je na sl. 8b dana realna izmjerena karakteristika. Rendgenske cijevi rade obično u području struje zasićenja, u kojem je ovisnost o anodnom naponu slabo izražena. Struja zasićenja regulira se promjenom struje žarenja katode, o kojoj ovisi temperatura katode. Žarna nit rendgenske cijevi izrađuje se iz volframa, koji ima visoko talište ( $3370^\circ\text{C}$ ), pa ne dolazi do prevelikog isparavanja katode kod radnih

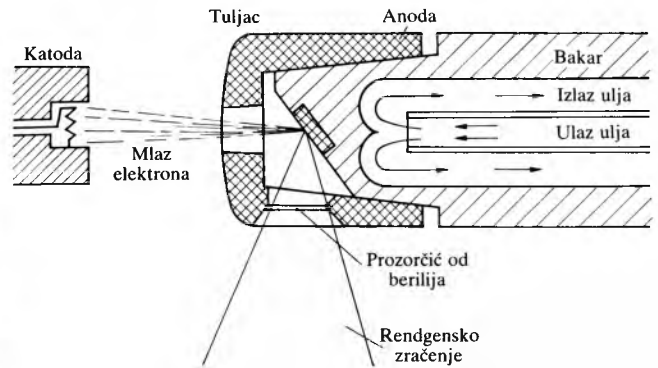


Sl. 8. Strujno-naponska karakteristika rendgenske cijevi. a prema relaciji (21), b realno izmjerena karakteristika



Sl. 9. Katoda rendgenske cijevi. a i b spiralna i zavojna izvedba, c smještaj u cijevi

temperatura od  $2500^\circ\text{C}$ . Obično se radi u području  $2200\text{--}2500^\circ\text{C}$ , što omogućava trajanje rendgenske cijevi  $\sim 4000$  sati. Katoda se može izvesti u obliku spirale ili zavojnice (sl. 9a), tako da izvor elektrona ima kružni, odnosno štapičasti oblik, koji se više primjenjuje. Na sl. 9b prikazana je skica na kojoj se vidi kako iz katode u obliku zavojnice elektroni bivaju fokusirani pomoću fokusirajuće elektrode prema anodi, tako da padaju na vrlo usko područje anode koje se naziva fokus. Fokusirajuća elektroda formira električno polje između katode i anode, koje omogućuje usnoplavanje elektrona prema anodi. Razmak između anode i katode nije velik ( $\sim 1$  cm), pa se mjesto na anodi zbog toga a i zbog oštrog usnoplavanja kod viših anodnih napona i jačih struja jako zagrijava (katkada do užarenja). Zato treba da se anoda, kod iole većih snaga, prisilno hladi. Za sasvim male snage hladi se zrakom, dok se kod većih snaga hladi uljem ili vodom. Osim toga, mjesto gdje elektroni pogađaju anodu izrađeno je od volframa, koji uz visoko talište ima i relativno velik atomski broj,  $Z = 74$ , što povećava stupanj djelovanja prema izrazu (10). Na sl. 10 prikazana je izvedba anode hladene uljem. Tuljac oko same anode služi za sprečavanje raspršivanja rendgenskog zračenja izvan užeg područja. Prolaz rendgenskog zračenja kroz tuljac olakšan je prozorčićem od berilija, koji vrlo dobro propušta rendgensko zračenje zbog svog vrlo malog atomskog broja,  $Z = 4$ . Berilijski prozorčić se stavlja i na vanjsko staklo rendgenske cijevi. Rendgenska cijev s malim fokusom može se smatrati točkastim izvorom zračenja. Kako se samo  $\sim 1\%$  uložene energije pretvara u rendgensko zračenje, a ostatak od  $\sim 99\%$  pretvara u toplinu, to se anoda jako zagrijava. Volframska anoda zagrijava se na temperaturu do  $1500^\circ\text{C}$ , a bakrena anoda na temperaturu do  $800^\circ\text{C}$ . Ako se rendgenskom cijevi žele postići veće energije zračenja, onda uz veće dimenzije anode treba odvoditi toplinu kako se anoda ne bi pregrijala i rastalila. Hladi se najčešće protokom ulja ili vode u zatvorenom rashladnom sustavu.



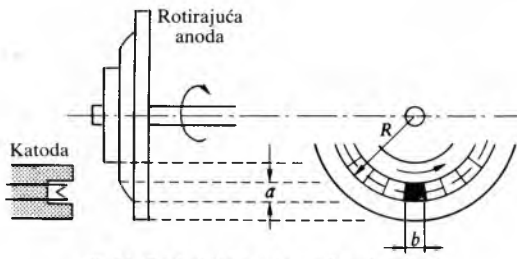
Sl. 10. Presjek katode i anode uljem hladene rendgenske cijevi

Velika se snaga može ostvariti ako se umjesto statičke anode upotrijebi rotirajuća anoda. Na taj se način, zapravo, jako proširuje površina  $A$  na koju udaraju elektroni. Brzina odvođenja topline s anode jest

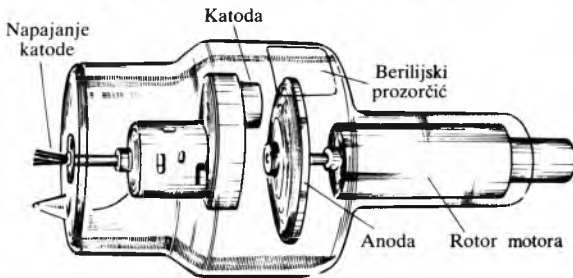
$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\lambda A}{\Delta d} \Delta \vartheta, \quad (23)$$

gdje je  $Q$  toplina,  $t$  vrijeme,  $\lambda$  toplinska vodljivost, a  $\Delta d$  je debljina sloja kroz koji se javlja temperaturna razlika  $\Delta \vartheta$ . Taj je izraz analogan Ohmovu zakonu,  $dQ/dt$  odgovara jakosti električne struje,  $\lambda A/\Delta d$  vodljivosti a  $\Delta \vartheta$  naponu. Jednak toplinski tok ostvaruje se uz manju razliku temperature ako je odvodna površina veća. Ako je meta statičke anode malih dimenzija  $a \times b$  (npr.  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ ), to će anoda rotirajuće anode imati dimenzije  $2\pi Ra$ , gdje je  $R$  polumjer prstena rotirajuće anode i dosta je veći od dimenzije  $b$  (sl. 11). Također je na sl. 12 prikazana kompletna rendgenska cijev s rotirajućom anodom. Na ovaj način se mogu, uz iste dimenzije ozračenih površina, postići desetak puta veći rashladni efekti.



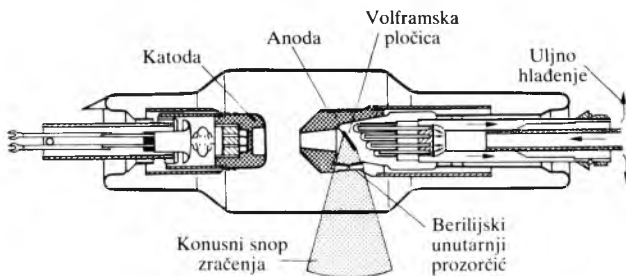


Sl. 11. Rotirajuća anoda rendgenske cijevi



Sl. 12. Rendgenska cijev s rotirajućom anodom

Rotacija se anode ostvaruje tako da je ta anoda na istoj osovini s bakrenim valjkom koji predstavlja kratkospojeni rotor. Stator se postavlja izvan staklenog balona rendgenske cijevi i s rotorom čini asinhroni motor s kratkospojenim rotorom. Stator je načinjen sa tri para polova napajanih trofazno, tako da je brzina vrtnje oko  $2800 \text{ min}^{-1}$ . Radi još efikasnijeg hlađenja brzina vrtnje se može povećati za oko tri puta, što iznosi  $8400 \text{ min}^{-1}$  uz frekvenciju od 150 Hz. Na sl. 13 prikazana je rendgenska cijev sa statičkom anodom, koja se hladi uljem. Ulje za hlađenje prisilno cirkulira u zatvorenom krugu. Ta je cijev predviđena za anodne napone do  $U_a = 300 \text{ kV}$ . Rendgenske cijevi s visokim naponima (višim od 200 kV) obično se napajaju simetričnim anodnim naponom, što znači u ovom slučaju  $\pm 150 \text{ kV}$ , pa su i anoda i katoda na visokom potencijalu prema zemlji. U takvim cijevima anoda se hladi uljem. Pri nižim naponima katoda je redovito na visokom potencijalu (asimetrično napajanje), dok je anoda na potencijalu zemlje i može se hladiti vodom. Tako npr. rendgenske cijevi za ispitivanje kristalne strukture i spektralnu analizu rade sa nižim naponima i sve su hladene vodom.



Sl. 13. Rendgenska cijev za dubinsku terapiju, hladena uljem

**Rendgenske cijevi.** U medicinskoj dijagnostici upotrebljavaju se anodni naponi rendgenske cijevi  $40 \dots 150 \text{ kV}$ . Rendgenske cijevi za stomatološku dijagnostiku rade uz niže napone,  $6 \dots 40 \text{ kV}$ , a nisu dulje od 5 cm. Za dijagnostiku dijaskopiranjem pogon cijevi traje dulje (oko nekoliko minuta) pa su snage obično manje od 300 W, a za dijagnostiku snimanjem na film, koje traje vrlo kratko, primjenjuju se snage i od nekoliko kilovata. Dijagnostičke rendgenske cijevi najviše se izvode s rotirajućom anodom. Takve cijevi mogu biti za velike snage, čak i do 25 kW.

U terapijske svrhe cijevi moraju biti predviđene za trajni pogon pa se izvode za manje snage i sa stacionarnim anodama. Za površinsku terapiju upotrebljava se napon  $80 \dots 120 \text{ kV}$ . Snaga cijevi nije veća od 1,5 kW. Fokus može

biti puno veći nego kod dijagnostičkih cijevi, jer nije potrebna oštrina slike. Za dubinsku terapiju naponi su viši i od 300 kV, dok snage mogu doseći 3 kW. Kod tih viših napona za hlađenje se upotrebljava ulje (sl. 13).

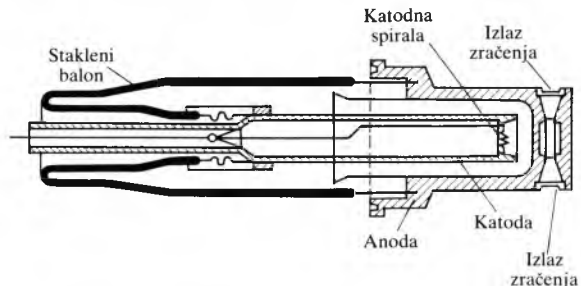
Izvan područja medicine rendgenske cijevi nalaze primjenu u *prozračivanju materijala* u tzv. *rendgenskoj defektoskopiji* za pronalaženje nehomogenosti materijala, pukotina u odljevima, varovima itd., pri čemu ne dolazi do razrušavanja materijala. Za prozračivanje lakih slitina primjenjuju se naponi do 60 kV, aluminija  $\sim 120 \dots 150 \text{ kV}$ , a čelika 200 kV i više. Uz te napone struje se redovito male. Tako se mogu analizirati komadi čelika debljine do 6 cm. Za čelik debljine veće od 12 cm potrebni su anodni naponi i do 400 kV, a za još deblje i do 2000 kV. Za čelik debljine veće od 10 cm danas se upotrebljava  $\gamma$ -zračenje iz radionuklida, npr. kobalta  $^{60}\text{Co}$ , a za čelik debljine 60 cm upotrebljavaju se akceleratori kojih energija može iznositi i 30 MeV (v. *Defektoskopija*, TE 3, str. 186).

Za *strukturne analize materijala* upotrebljava se meko zračenje. Anodni naponi ne prelaze 70 kV, a obično iznose  $40 \dots 60 \text{ kV}$ . Radi se s malim snagama i statičkim anodama. Nastoji se što više iskoristiti karakteristično zračenje. Kod ispitivanja strukture kristala snop rendgenskog zračenja karakteristične valne duljine (monokromatsko zračenje) pada na prostornu rešetku kristala te na osnovi reflektiranog snopa mogu se utvrditi razmaci među centrima prostorne rešetke  $d$  na osnovi poznate valne duljine rendgenskog zračenja  $\lambda$  i kuta  $\delta$  upada snopa na kristal

$$2d \sin \delta = n \lambda. \quad (24)$$

Na taj se način može iz poznatog  $d$  odrediti valna duljina  $\lambda$ . Red refleksije određuje se brojem  $n$ . Posebnim filterima mogu se izdvojiti ostale komponente spektra, tako da ostaje samo monokromatsko zračenje. Ispitivanjem kristalne strukture materijala može se odrediti raspored atoma i molekula u materijalu, što posebno dolazi do izražaja u metalurgiji kod određivanja sastava slitina te utjecaja mehaničke i termičke obrade na takve materijale.

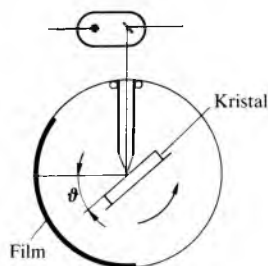
Da bi se dobilo karakteristično rendgensko zračenje različitih valnih duljina, upotrebljavaju se mete (anode) od raznih materijala, ne samo od volframa kao što je to za ostale svrhe slučaj. Da se omogući promjena materijala mete, rendgenske cijevi se mogu rastaviti (sl. 14). Te rendgenske cijevi zahtijevaju i sistem sisaljki za stvaranje vakuuma poslije svake promjene mete. Atomski broj  $Z$  elementa od kojega je osnovna anoda mora biti manji od najmanjeg atomskog broja elementa slitine koja se ispituje. Da se što više istakne karakteristično zračenje, a potisne kontinuirani spektar zračenja, radi se s nižim naponima,  $20 \dots 70 \text{ kV}$ . Zbog malog intenziteta zračenja vrijeme djelovanja zračenja na filmu pri strukturnoj analizi može trajati i više od jednog sata. Za povećanje osjetljivosti filma na rendgensko zračenje upotrebljavaju se ionizacijske komore, scintilacijski detektori s brojačima, poluvodički detektori itd.



Sl. 14. Rastavljiva rendgenska cijev za strukturnu analizu materijala

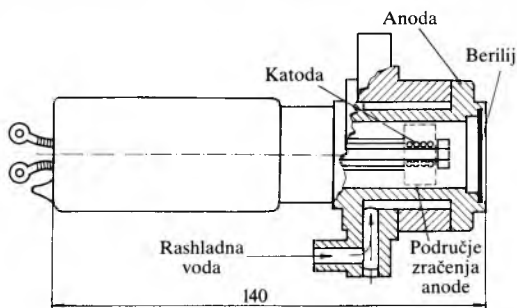
Uz optičku spektralnu analizu u mnogim slučajevima se upotrebljava i *rendgenska spektralna analiza* koja omogućava da se odredi svaki pojedini kemijski element prema njegovom karakterističnom spektru. Rendgenski spektar određene tvari može se dobiti na dva načina, i to tako da se ispitivana tvar bombardira elektronima te ona zrači rendgenski karakteri-

stičan spektar (primarno zračenje) ili tako da se tvar ozračuje rendgenskim zračenjem, pa ona emitira fluorescentno (sekundarno) zračenje. Za primarno zračenje ispitivani materijal se nalazi utisnut na anodi od bakra ili aluminija, bombardiranoj elektronima. Anode se hlade protočnom vodom. Da bi se ispitivani materijal mogao mijenjati, rendgenske cijevi se može rastaviti i svaki put je potrebno isisati zrak iz cijevi. Otvor u rendgenskoj cijevi kroz koji prolazi rendgensko zračenje načinjen je od berilija ( $Z=4$ ), koji je propustan i za meko zračenje. Da bi se rendgensko zračenje različitih valnih duljina moglo razdvojeno prikazati, pušta se snop zračenja da pada na ravni ili blago savinuti kristal od tinjca ili kalcita koji se neprekidno giba, tako da snop upada pod različitim kutovima. To prema izrazu (24) daje mjesta gdje se intenzitet povećava za određenu valnu duljinu i tako daje spektralnu liniju. Princip dobivanja rendgenskog spektra vidljiv je na slici 15. Rendgenske cijevi za primarni spektar obično se konstruiraju pojedinačno, za određene namjene.



Sl. 15. Razdvajanje snopova rendgenskog zračenja različitih valnih duljina

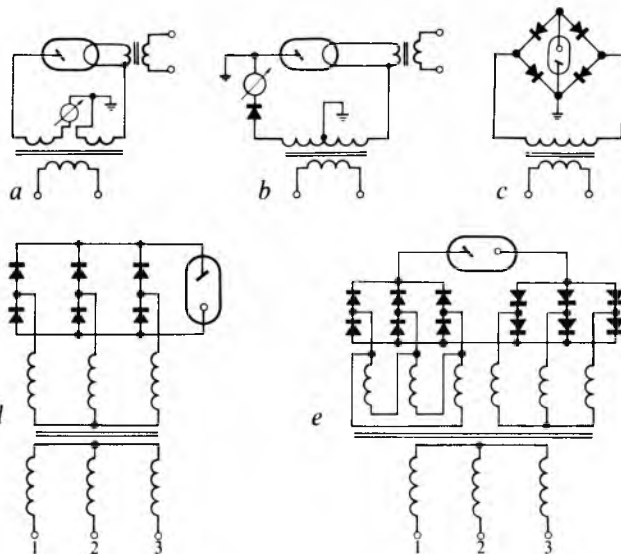
Rendgenske cijevi za fluorescentnu spektralnu analizu imaju dosta velik otvor prekriven berilijem tako da rendgensko zračenje pada na materijal koji se ispituje, a on opet emitira svoje karakteristično zračenje s drugim valnim duljinama (sekundarno zračenje), tj. pobuđuje spektar fluorescencije. Na sl. 16 prikazana je jedna izvedba rendgenske cijevi za fluorescentnu spektralnu analizu. Elektroni iz užarene katode koja je oblika spirale bombardiraju anodu u prstenastom području (širine ~6 mm), odakle emitirano rendgensko zračenje prolazi kroz relativno velik otvor (30 mm) kojemu se u neposrednom okolišu nalazi ispitivani materijal. Ako se želi istaći značajno zračenje, upotrebljava se meta većeg atomskog broja. Anoda od bakra hladi se protočnom vodom i uzemljena je pa se ispitivani uzorak može smjestiti direktno u otvor rendgenske cijevi. Anodni naponi nisu visoki, niži su od 50 kV, ali su struje veće, tako da se na anodi mogu podnijeti snage do 5 kW. Danas ima izvedbi disperzije rendgenskog zračenja i bez pokretnog kristala, kada se može iskoristiti mnogo veća količina izračene energije.



Sl. 16. Rendgenska cijev za fluorescentnu spektralnu analizu

**Rendgenski uređaji.** Za napajanje rendgenske cijevi visokim naponom upotrebljava se transformator. U najjednostavnijem slučaju rendgenska se cijev može priključiti direktno na transformator. Tada kroz rendgensku cijev teče poluvalno ispravljena struja, jer je ona istodobno i ispravljačica (sl. 17a). Ukoliko se radi o većoj energiji koja se oslobađa na anodi, može doći do užarenja anode i do emisije elektrona iz anode te tako ispravljačko djelovanje prestaje. Tada je potrebno u strujni krug uključiti visokonaponsku ispravljačicu koja će onemogućiti tijek struje u protivnom smjeru. Vakuum-

ske ispravljačice s užarenom katodom, tzv. *kenotroni*, mogu podnijeti zaporne napone do 250 kV uz struje od 700 mA. Za napajanje žarne niti potreban je poseban transformator za žarenje. Danas se sve više upotrebljavaju poluvodički ispravljači koji ne trebaju transformator za žarenje katode. Dioda u ispravljaču zbog svog propuštanja struje samo u jednom smjeru djeluje kao ventil pa je u medicinskoj rendgenskoj tehnici za ispravljačku diodu uobičajen naziv ventil.



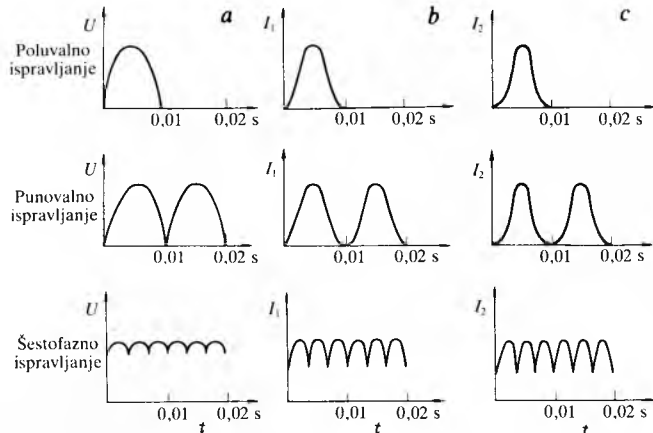
Sl. 17. Sklopovi za ispravljanje izmjenične struje za napajanje rendgenske cijevi. a poluvalno ispravljanje, b poluvalno ispravljanje s jednim ventilom, c punovalno ispravljanje s Graetzovim spojem (četveroventilno ispravljanje), d trofazno ispravljanje (šestovalentno), e šestofazno ispravljanje (dvanaestovalentno)

Shema poluvalnog napajanja rendgenskog uređaja (sl. 17b) danas se primjenjuje, zbog svoje slabije efikasnosti i neravnomjernog opterećenja mreže, samo kod uređaja vrlo malih snaga kao npr. u zubarskoj tehnici. Shema punovalnog napajanja ima mnogo veću primjenu, a najčešće je u mosnoj izvedbi, tzv. Graetzov spoj (sl. 17c). Za veće rendgenske uređaje izvodi se trofazni priključak na mrežu, koja je onda mnogo ravnomjernije opterećena. Sekundar transformatora se može spojiti tako da se na sekundaru dobije dvostruki i trostruki broj faza, odnosno shema za šestofazno ili dvanaestofazno napajanje. Tada se upotrebljava šest, odnosno dvanaest visokonaponskih dioda (ventila), a zato je i valovitost puno manja. Treperenje slike ne postoji, a srednja vrijednost napona praktički se približava vršnoj vrijednosti. Za još veću smanjenje valovitosti napona upotrebljavaju se katkad i visokonaponski kondenzatori. Shema za šestofazno i dvanaestofazno napajanje rendgenskog uređaja prikazana je na sl. 17d i e. Veći rendgenski uređaji često imaju još jedan transformator s mogućnošću regulacije napona, smješten ispred glavnog transformatora. Ako ne postoji takav predtransformator, regulacija napona se provodi glavnim transformatorom, i to promjenom odvojaka na primaru. Osim regulacije napona, čime se može mijenjati intenzitet i valna duljina rendgenskog zračenja, moraju se regulirati i struje. To se postiže regulacijom struje žarenja žarne niti. Izraz (8) pokazuje intenzitet rendgenskog zračenja neposredno na izlazu rendgenske cijevi. U slučaju prolaska rendgenskog zračenja kroz filter, odnosno biološko sredstvo u kojemu slabljenje ovisi o valnoj duljini (a ona opet o anodnom naponu  $U_a$ ), izraz za intenzitet rendgenskog zračenja poprima oblik

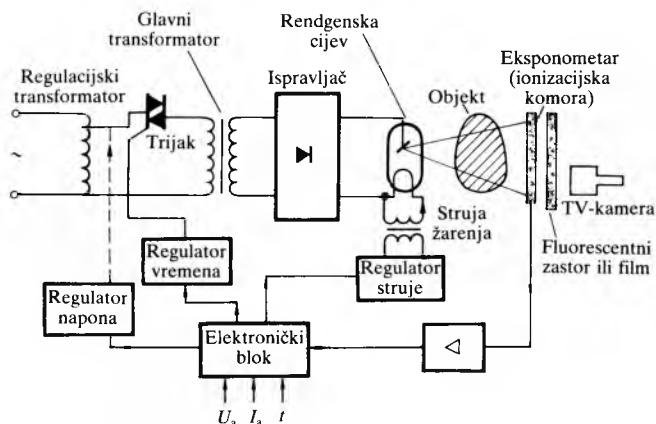
$$J_n = a_n U_a^n I_a \quad (25)$$

Tu je vrijednost eksponenta  $n = 3 \dots 6$ , i puno je veća od  $n = 2$  u izrazu (8). Iz toga izlazi da je apsorbirana doza zračenja koju prima pacijent jako ovisna o visini anodnog napona. Na sl. 18a prikazan je napon  $U_a$  na anodi rendgenske cijevi u slučaju jednofaznog poluvalnog i punovalnog, te šestofaznog

napajanja. Na sl. 18b vidi se promjena intenziteta zračenja  $J_1$  na izlazu rendgenske cijevi, a na sl. 18c intenziteta  $J_2$  nakon prolaska kroz organizam. Energija emitiranog zračenja dana je integralom intenziteta zračenja  $J_n$  u zadanom vremenskom intervalu, tj. površinom pod krivuljom intenziteta  $J_n$ . Iz ovoga proizlazi da je ona puno veća kod šestofaznog načina napajanja nego kod jednofaznog poluvalnog odnosno punovalnog načina. To je jedan od glavnih razloga upotrebe trofaznog napajanja rendgenskih uređaja. Jednofazno se napajanje danas primjenjuje samo za prijenosne zubarske i fluorografske uređaje, dok se stacionarni rendgenski uređaji napajaju trofazno.



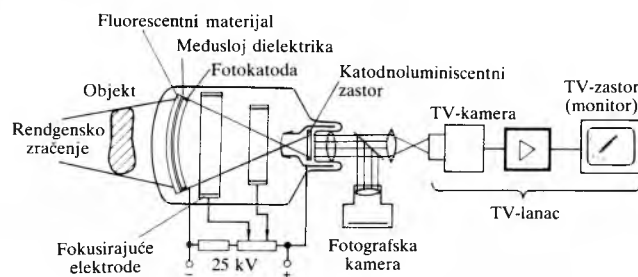
Sl. 18. Grafički prikaz za tri načina ispravljanja: a anodnog napona rendgenske cijevi, b intenziteta rendgenskog zračenja  $J_1$  na izlazu iz rendgenske cijevi i c intenziteta  $J_2$  nakon prolaza kroz organizam



Sl. 19. Blok-shema rendgenskog uređaja

Blok-shema rendgenskog uređaja dana je na sl. 19. Osnovne veličine koje se pri tom mijenjaju jesu: anodni napon  $U_a$  i anodna struja  $I_a$  rendgenske cijevi, te trajanje ekspozicije rendgenskog zračenja. Anodna struja kroz rendgensku cijev određuje se naponom žarenja katode. Trajanje ekspozicije mjeri se ekspozimetrom, koji se sastoji od senzora primljenog rendgenskog zračenja dovoljnog za procrnjenje rendgenskog filma. Kada rendgensko zračenje djeluje toliko dugo da je film dovoljno ekspoziran, rendgensko zračenje se prekida. Kao senzor može se upotrijebiti rendgenski prozračna ionizacijska komora ili fluorescentni zastor koji emitira svjetlo, a ono se nekim fotootpornikom pretvara u električni signal. Pojačani signal iz senzora ekspozimetra upravlja preko elektroničkog bloka trijacom, koji isključuje napajanje rendgenske cijevi. Preko elektroničkog bloka regulira se i anodni napon i anodna struja. Kod mnogih rendgenskih uređaja za određenu dijagnostiku napon i struja su povezani, a automatski se određuje njihov međusobni odnos i trajanje ekspozicija prema organu koji se rendgenski pretražuje.

**Optičko pojačalo.** Rendgenska slika promatrana na zastoru slabe je svjetljivosti i mora se promatrati u mraku, nakon što se oko akomodira. Veća svjetljivost može se dobiti samo većim intenzitetom rendgenskog zračenja, što je, opet, za pacijenta i liječnika štetno. Da se ti štetni efekti izbjegnu, upotrebljava se optičko pojačalo (sl. 20), koje pojačava svjetljivost slike više tisuća puta. Rendgenska slika pada na fluorescentni zastor optičkog pojačala, koji rendgensko zračenje pretvara u svjetlosno. To zračenje preko prozirnog dielektrika djeluje na fotokatodu, koja je napravljena od materijala s malim izlaznim radom elektrona, tako da na osvijetljenim mjestima ta fotokatoda emitira elektrone. Elektroni pod utjecajem elektrostatskog polja između katode i anode optičkog pojačala bivaju ubrzani i usnopljeni prema katodoluminiscentnom zastoru. Taj zastor djelovanjem elektrona velike kinetičke energije svijetli, ovisno o gustoći elektrona na pojedinim mjestima. Tako dobivena slika sustavom leća povećava se i može se promatrati direktno, snimiti na film ili preko televizijske kamere (vidikon, ortikon) prenijeti na jedan ili više televizijskih monitora. Na taj način je liječnik potpuno zaštićen od rendgenskog zračenja, svjetljivost slike je velika, pa se slika može promatrati u svijetlom prostoru i omogućeno je promatranje dobivene snimke na više mjesta istodobno.

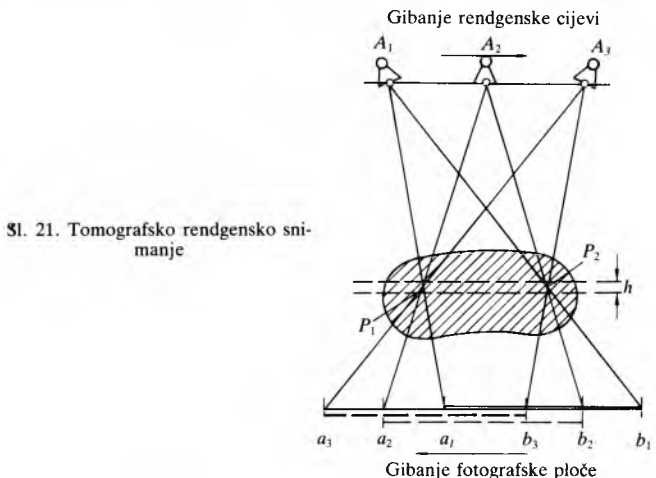


Sl. 20. Optičko pojačalo rendgenske dijagnostičke slike

**Tomografija pomoću računala**

Tomografija (grč. τόμος, *režanj*; isto i laminografija, planigrafija) pomoću elektroničkog računala, tzv. kompjutorizirana tomografija (CT, prema engl. computer tomography) suvremena je metoda rendgenske pretrage u kojoj se nizom snimanja prikazuje samo neki dio unutrašnjosti predmeta ili tijela.

Kod rendgenskog prikaza na filmu na fluorescentnom zastoru neki dijelovi organizma bivaju pokriveni drugim dijelovima koji više apsorbiraju rendgensko zračenje, pa se na taj način ne vide. Da bi se omogućio prikaz presjeka, odnosno sloja male debljine ljudskog organizma, upotrebljava se rendgenska tomografija. Ta metoda rendgenskog snimanja omogućava snimanje tankog sloja i zasnovana je na principu prikazanom na sl. 21. Rendgenska cijev giba se u jednom smjeru praveći niz podekspozicioniranih snimaka na rendgenskom

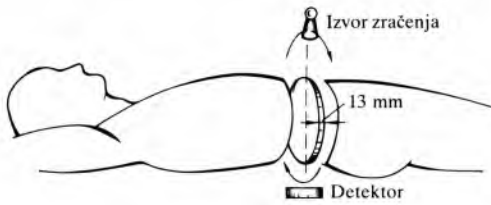


Sl. 21. Tomografsko rendgensko snimanje

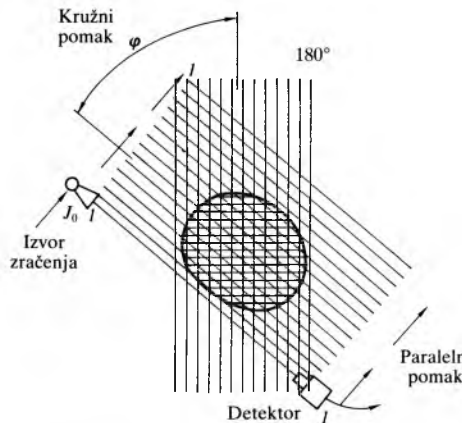


filmu smještenom ispod pacijenta. Film se giba sinhrono u protivnom smjeru. Podesponirane snimke snimaju se jedna preko druge, tako da su dovoljno osvijetljene i ističu se samo dijelovi u sjecištu rendgenskih zraka u točkama  $P_1$  i  $P_2$ . Ostali dijelovi slike gdje se djelovanje zraka ne zbraja bivaju *razmazani* i ne primjećuju se dobro. Na taj način izdvaja se samo prikaz sloja debljine  $h$ , kao što je prikazano na slici 21. Ipak, ta metoda nije davala dovoljno dobre snimke sloja. Daleko bolji rezultati postignuti su uvođenjem računala u tomografska snimanja. Principe tomografskog snimanja pomoću računala prvi je postavio inženjer G. N. Hounsfield 1972. god., a prvi uređaj takve vrste proizvela je britanska tvrtka EMI (EMI-scanneri). Za taj izum su G. N. Hounsfield i A. M. Cormack dobili 1979. god. Nobelovu nagradu za medicinu.

Tomografima pomoću računala dobiju se snimke temeljene na novim principima, neusporedivo bolje i s daleko većim razlučivanjem od običnih tomografa i tako se otvara jedno novo, važno područje u rendgenskoj dijagnostici s mogućnošću promatranja dijelova tijela koji se prije nijednom rendgenskom tehnikom nisu mogli vidjeti. Osim toga, dobiva se slika s mnogo više detalja.



Sl. 22. Raspored izvora, predmeta i detektora pri rendgenskoj tomografiji

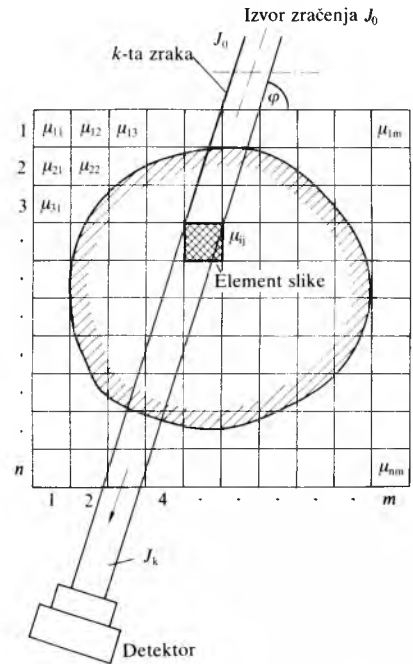


Sl. 23. Projekcija pomicanja izvora i detektora pri rendgenskoj tomografiji

U uređaju za tomografiju pomoću računala izvor rendgenskog zračenja giba se po kružnici, a detektor se rendgenskog zračenja također giba po kružnici, ali u protivnom smjeru, kao što je prikazano na sl. 22 i 23. Debljina sloja koji se može prikazati jest 13 mm. U toj prvoj izvedbi tomograf je imao jedan izvor rendgenskog zračenja i jedan detektor. Izvor zračenja se pri jednom kutu zakretanja  $\varphi$  pomicao paralelno s detektorom preko snimanog objekta (pacijent) i na taj način detektor je za svaki kut  $\varphi$  prikupio 160 podataka o apsorpciji zračenja iz izvora konstantnog intenziteta zračenja  $J_0$ , koji radi impulsno. Intenzitet je zračenja, nakon prolaska kroz objekt, različit za svaki kut zakreta  $\varphi$  (koji se mijenja u koracima  $0,5^\circ$ ,  $1^\circ$  ili  $3^\circ$ ) i za svaki paralelni pomak  $k$ , a dan je općenito izrazom (13)

$$J_{k\varphi} = J_0 \exp\left(-\sum_{j=1}^k \mu_j d_0\right), \quad (13)$$

$d_0$  je debljina elementa sloja pri  $j$ -tom prolazu, a  $\mu_j$  koeficijent gušenja na tom putu. Presjek kroz pacijenta može se podijeliti na gustu mrežu malih kvadratića slikovnih elemenata (*pixel*,



Sl. 24. Slikovni elementi u ravni snimanog sloja pri rendgenskoj tomografiji

prema engl. *picture element*) ( $j, i$ ), svakog s koeficijentom gušenja  $\mu_{ij}$ . Zadatak je rendgenske tomografije da se odredi intenzitet prolaznog rendgenskog zračenja u svakom takvom slikovnom elementu. Vrijednosti tako dobivenih intenziteta  $J_{k\varphi}$  unesene s odgovarajućom svjetljivošću za svaki taj kvadratić (dimenzija  $\sim 1,5 \text{ mm}$  ili čak  $0,75 \text{ mm} \times 0,75 \text{ mm}$ ) daju sliku promatranog presjeka pacijenta. Prikaz se vidi na zastoru katodne cijevi. Da bi se mogao odrediti intenzitet zračenja u svakom pojedinom slikovnom elementu, određuje se intenzitet zračenja kroz svaki od 160 paralelnih putova. Tako je za put prema sl. 24. ukupno gušenje kroz sve te slikovne elemente na tom prolazu zrake

$$J_{k\varphi} = J_0 \exp\left(-\left|\sum \mu_{ij} d_0\right|\right). \quad (26)$$

Kako je debljina  $d_0$  za sve elemente gotovo jednaka, izlazi da je

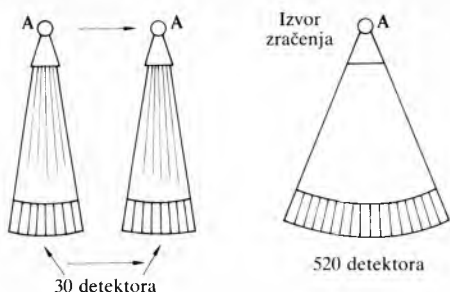
$$\sum \mu_{ij} = \frac{1}{d_0} \ln \frac{J_0}{J_i} = k_{ij}. \quad (27)$$

Svih 160 putova predstavlja sustav od 160 jednačbi

$$\begin{aligned} \mu_{11} + \mu_{12} + \dots + \mu_{1m} &= k_{1m}, \\ \mu_{21} + \mu_{22} + \dots + \mu_{2m} &= k_{2m}, \\ &\vdots \\ \mu_{n1} + \mu_{n2} + \dots + \mu_{nm} &= k_{nm}. \end{aligned} \quad (28)$$

Tih 160 jednačbi nije dovoljno da se odredi vrijednost  $n \cdot m$  elemenata, pa se za dobivanje novih podataka po kružnici zakrene izvor zračenja i detektor za  $1^\circ$  te se ponovo mjeri intenzitet detektorom za svih 160 paralelnih putova, ali pomaknutih za jedan stupanj. Za obilazak pola kružnice napravi se 180 koraka pa je  $160 \times 180 = 28800$  jednačbi. Neke izvedbe imaju korak od  $0,5^\circ$ , a neke  $1^\circ$  ili  $2^\circ$ . Broj paralelnih putova može u današnjim uređajima biti 256 pa i 512 (sl. 23). Kako kvadratična slika ima  $160 \times 160 = 25600$  slikovnih elemenata, broj jednačbi je veći od nepoznanica, tj. slikovnih elemenata, pa bi se mogle odrediti vrijednosti kvadratića s određenom redundancijom. No to nije tako, jer sve jednačbe nisu međusobno nezavisne, pa se, prema tome, njihov stvarni broj smanjuje. Za izračunavanje pojedinih elemenata slike danas postoji veći broj različitih metoda. Jedna od njih je metoda algebarske rekonstrukcije koja je iterativna aproksimacija, gdje se pretpostavlja jedna vrijednost za sve elemente slike i uspoređuje se s vrijednošću  $k_{ij}$ ,

dobivenom mjerenjem. Mjerenjem se dobiva vrijednost ukupne apsorpcije svih pojedinih elemenata u jednom putu prema jednadžbi (25). Dobivene razlike se tada uzimaju u račun i korigiraju se prve pretpostavljene vrijednosti. Dobivene se vrijednosti nakon prve korekcije uspoređuju s mjerenim podacima i zatim se korigiraju vrijednosti elemenata slike. Taj proces aproksimacije provodi se u više koraka dok aproksimacija ne postane zadovoljavajuća, što se očituje u smanjenju korigiranih vrijednosti. Potrebno je provesti velik broj računanja da bi se dobio ovakav rezultat, a bez brzih računala realizacija te tehnike bila bi nemoguća. Opisana metoda je iznesena zbog svoje jednostavnosti, a danas postoje mnogo bolje metode, npr. metoda filtrirane povratne projekcije (engl. *back projection*) i metoda dvodimenzijske Fouriroke rekonstrukcije. Kod prvih tomografa pomoću računala za izračunavanje elemenata slike bilo je potrebno ~5 min, a današnje najsavršenije metode trebaju svega 2...10 s. Veća se brzina postiže zato što se danas mjesto jednog upotrebljava do 512 detektora koji simultano primaju podatke iz jednog ili nekoliko izvora zračenja (rendgenskih cijevi) prema sl. 25.



Sl. 25. Raspored niza detektora pri rendgenskoj tomografiji pomoću računala

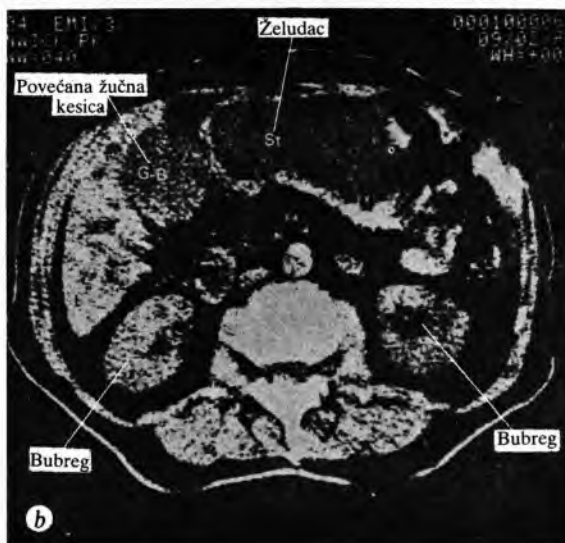
Kao detektori danas se najviše upotrebljavaju scintilacijski kristali (kalij-jodid ili cezij-jodid), koji imaju veliku osjetljivost (daleko veću od filma), velik dinamički opseg ( $4 \cdot 10^5$ ) i malu vremensku konstantu (v. *Nuklearno zračenje*, TE 9, str. 550). Rad s više detektora jako smanjuje vrijeme snimanja, a time se smanjuje ozračenost pacijenta. Pri upotrebi većeg broja detektora važno je da su detektori malih dimenzija, kao što su poluvodički detektori i scintilacijski kristali (cezij-jodid) s fotodiodama. U ovom slučaju osjetljivost se bitno smanjuje prema upotrebi jednog detektora s fotomultiplikatorom. Na izlazu iz detektora dobiveni napon se nakon pojačanja pojačalom pretvara analogno-digitalnim pretvornikom u binarni broj, koji je onda pogodan za obradu računalom. Izračunate vrijednosti apsorpcije u pojedinim elementima slike pretvaraju se, opet, digitalno-analognim pretvornikom u naponske vrijednosti, a te se dovode na Wehneltov cilindar katodne cijevi (monitor), koja služi za prikaz tomograma. U klasičnoj rendgenskoj tehnici ne mogu se razlikovati objekti kojih se gustoća razlikuje u omjeru manjem od 0,02. Tomografima pomoću računala mogu se razlikovati tvari kojima je omjer gustoća 0,005 pa čak i 0,002. Na taj način tomografija pomoću računala omogućava razlikovanje do 2000 razina gustoće. Da se to može prikazati na zastoru katodne cijevi koja omogućava razlikovanje samo 20 nijansi u svjetljivosti, potrebno je dovesti na zastor samo uže područje, interesantno s obzirom na promatrani objekt. Tako se pomiče tzv. *prozor fine rezolucije*, već prema promatranom objektu.

Fina rezolucija  $R$  gustoće u rendgenskoj tomografiji pomoću računala izražava se dosad nestandardiziranom jedinicom *hounsfield* (znak H), koja je definirana koeficijentom gušćenja  $\mu_r$  rendgenskog zračenja u vodi,  $H = 0,001 \mu_r$ . Ako se za referentnu razinu fine rezolucije uzme voda i prida joj se vrijednost nula hounsfielda, tada kosti imaju na ljestvici fine rezolucije gustoće 50...1000 H, krv 20...80 H, slezena 30...60 H, masno tkivo - 10...-280 H, a pluća - 80...-400 H. Za zrak je određena gustoća - 1000 H.

Napon je napajanja rendgenskih cijevi koje se upotrebljavaju u tomografiji od 120...150 kV, dok snaga disipacije nije

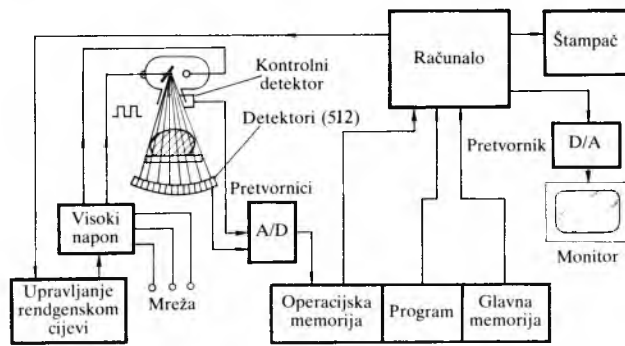
veća od 5 kW. Impulsi s kojima cijev radi traju 1...5 ms, a snaga u impulsu može biti i 60 kW. Kod brzih tomografa najviše se upotrebljava rendgenska cijev s rotirajućom anodom.

Na sl. 26a prikazan je tomografski presjek glave s hematatom kao svjetlijim područjem. Slika je dobivena jednim od prvih tipova tomografa (EMI) pomoću računala, gdje su uočljivi slikovni elementi kao relativno veliki kvadratići. Sl. 26b snimljena je modernim tomografom, gdje su elementi slike neprimjetljivi zbog mnogo finijeg rastera, odnosno manjih kvadratića. Na slici je prikazana trbušna šupljina, gdje se može vidjeti povećana žučna kesica, želudac i dva bubrega.



Sl. 26. Tomografske snimke. a presjek glave s malo velikih slikovnih elemenata, b presjek abdomena s mnogo malih slikovnih elemenata

Blok-shema tomografa pomoću računala vidi se na sl. 27. Visoki napon djeluje na rendgensku cijev i impulsima. U jednom impulsu 512 detektora primi informaciju o slabljenju na 512 putova. Dobivene informacije analogno-digitalnim dekoderom pretvaraju se u binaran broj, prikladan za obradu digitalnim računalom. Kontrolni detektor (može ih biti i više) kontrolira intenzitet zračenja  $J_0$  iz rendgenske cijevi, koji



Sl. 27. Blok-shema uređaja za rendgensku tomografiju pomoću računala

mora ostati konstantan, kako bi mjerena veličina odgovarala koeficijentu slabljenja  $\mu_{ij}$ . U tomografiji se primjenjuju brza računala, a na diskove se može uskladištiti veći broj slika.

LIT.: B. K. Шмелеб, Рентгеновские аппараты. Государственное энергетическое издательство, Москва 1957. — J. Urlaub, Röntgenanalyse, Band 1. Siemens A. G., Berlin-München 1974. — Ю. А. Быстров, С. А. Иванов, Ускорители и рентгеновские приборы. Высшая школа, Москва 1976. — S. Deutsch, W. Welkowitz, Biomedical Instruments, Theory and Design. Academic Press, New York 1976. — R. A. Lens van Rijn, General Principles of CT Scanning. Journal Belge de Radiologie, 1976. 3. 201-211. — И. А. Перелетна, Технические средства рентгено-диагностики. Медицина, Москва 1981.

A. Šantić

**ROBOTIKA**, naučnoistraživačka disciplina i privredno-industrijska grana. Mada ne postoji univerzalna definicija robota, industrijski robot je, prema definiciji RIA (Robot Institute of America), reprogramabilni multifunkcionalni sistem projektovan za pokretanje materijala, delova alata ili specijalnih uređaja duž promenljivih programskih kretanja koji vrše pri tome raznovrsne zadatke.

Naziv *robot* (prema slovačkom *robota*, teški rad) prvi put je (1920) upotrebio češki pisac K. Čapek u svojoj naučnofantastičnoj drami R. U. R. (*Rossum's Universal Robots*, Rossumovi univerzalni roboti), koji je tako nazvao mašinu u obliku čoveka, namenjenu za obavljanje teških poslova. Danas roboti vrlo retko imaju oblik čoveka.

Prvi je industrijski robot prijavljen radi patentne zaštite u SAD pod nazivom programirani prenosnik delova, a prijavio ga je G. S. Devol 1961. Tada je prva usavršena verzija tog uređaja puštena u redovni rad u velikoj livnici za livenje pod pritiskom. Od tada je ovo rešenje, pod nazivom UNIMATE, prošireno širom sveta.

Za razvoj industrijske robotike važni su: a) robotski hardver (tj. mehanika, elektronika i ostali sastavni delovi robotskih instalacija) i b) robotski softver (tj. algoritmi upravljanja i specijalni robotski jezici, koji predstavljaju bitne delove upravljanja robotima; njihova je usavršenost često presudna za kvalitet obavljanja zadatka, postavljenog robotskoj instalaciji).

Prvi roboti imali su veoma skroman softver, jer su upravljački sistemi bili jednostavni električni, pneumatski ili čak hidraulički sekvencijalni sistemi, koji su redosledno generalisali pojedina stanja robotskog zadatka; ta su se stanja određivala lokalnim regulacionim kolima po pojedinim stepenima slobode kretanja.

Sadašnje stanje razvoja robotskog mehaničkog hardvera okarakterisano je sve većom upotrebom lakih legura, uključujući titanijumske i novih materijala (ugljena vlakna i sl.) za izradu mehaničke strukture robota. Što se tiče vrste pogona, danas najviše robota ima elektromotorni, pa zatim elektrohidraulički, dok je najmanje robota sa elektropneumatskim pogonom. Kao davači položaja najčešći su *enkoderni i rezolverti*, a kao davači za adaptivne i inteligentne robote davači dodira, sila, daljine, vizije i drugi. Kao upravljački sistemi upotrebljavaju se mikroročunari, sa tendencijom realizacije robotskih kontrolera multiprocesorskog tipa. Rešavanje složenijih radnih zadataka zahtevalo je razvoj sredstava za programiranje, pa su razvijeni specijalizovani programski jezici za programiranje robota.

WAVE je prvi eksperimentalni robotski jezik. Razvijen je 1973. u laboratoriji za veštačku inteligenciju Univerziteta u Stanfordu. Nakon šest godina pojavio se prvi komercijalni robotski jezik VAL firme UNIMATION, koja je izgradila i upotrebila (1961) prvi industrijski robot. Od 1979. do danas niz velikih, uglavnom američkih proizvođača industrijskih robota, izneo je na

tržište sisteme za upravljanje robotima koji omogućavaju tekstualno programiranje robota. Razlikuju se tri osnovna nivoa programiranja: nivo primitivnog kretanja, nivo strukturalnog programiranja i nivo programiranja zadataka.

Tipični su predstavnici prve grupe jezika pomenuti VAL i SIGLA (Olivetti). U tim je jezicima karakteristično da komande kretanja opisuju pomeranje vrha manipulatora iz jedne u drugu poziciju.

Jezike iz druge kategorije karakteriše upotreba strukturiranih kontrolnih iskaza visokog nivoa i obilje struktura podataka i operacije za definisanje položaja i relativnih odnosa položaja manipulatora i radnih predmeta. Većina tih jezika predviđa mogućnost definisanja položaja radnih predmeta upotrebom sistema vizije. Sintaksa jezika zasnovana je na sintaksi programskih jezika koji podržavaju strukturalno programiranje. Npr., sintaksa jezika AL (Stanford) zasnovana je na programskom jeziku ALGOL, robotski jezik HELP (General Electric) koristi se programskim jezikom PASCAL, jezik AML (IBM) sintaksom programskog jezika PL/I itd. Osnovna je mana pomenutih jezika da se u robotskom jeziku u osnovi definiše željeno kretanje robota, a ne radni zadatak koji treba da se izvrši. Taj se nedostatak delimično otklanja u jezicima vrlo visokog nivoa kojima je predstavnik AUTOPASS (IBM). Taj jezik daje komandu za smeštaj jednog na drugi radni predmet, pri čemu su detektovanje položaja obaju radnih predmeta, odluka o načinu prihvaćanja predmeta i postavljanja na drugi te odluka o radnoj putanji manipulatora prepušteni sistemu. Za izvršavanje tako složenih komandi neophodno je da sistem za upravljanje robotom može ne samo intenzivno komunicirati sa sistemom spoljašnjih senzora i vizionim sistemom već i da inkorporira složene algoritme za modeliranje radnog prostora i odluka u složenim situacijama.

Osim specijalizovanih programskih jezika, razvijen je softver za računarsko konstruisanje i sintezu upravljanja manipulatornih robota.

U Laboratoriji za robotiku Instituta »Mihajlo Pupin« u Beogradu razvijeni su prvi u svetu programski paketi aplikacionog softvera za sledeće aktivnosti: efikasno računarsko formiranje matematičkih modela dinamike manipulatornih robota, dinamičku analizu robota, interaktivno projektovanje mehanizma robota, optimalni izbor dimenzija poprečnih preseka njegovih segmenata, izbor pogonskih jedinica manipulatora, računarsko formiranje kinematičkog modela robota sa proizvoljnim brojem stepena slobode u simboličkoj formi, sintezu trajektorija redundantnih robota, sračunavanja programskog upravljanja robotskog mehanizma, sintezu lokalnog upravljanja podsistemima robota, sintezu povratnih sprega po silama, proveru stabilnosti ukupnog robotskog sistema, mikroročunarsku implementaciju različitih zakona upravljanja i druge module opšteg simulacionog paketa za upravljanje robotom. Sličan se aplikacioni softver takođe razvija i u drugim istraživačkim centrima za robotiku u svetu.

## RAZVOJ I STANJE ROBOTIKE

**SAD.** Između 1960. i 1970. skoro sve firme koje su se počele baviti robotima bile su proizvođači mašina alatki, uređaja za rukovanje i transport materijala, raznih vrsta neelektronske opreme i sl. (UNIMATION, Cincinnati-Milacron, PRAB, AMF Versatran i dr.). Potkraj sedamdesetih godina počele su se uključivati velike firme raznorodne proizvodnje sa značajnim sopstvenim računarskim kapacitetima, kao što su Westinghouse i General Electric, kod kojih su se počele formirati proizvodne jedinice ili odeljenja za proizvodnju robota. Većinom su takve firme ulazile u posao kupovinom manjih robotskih firmi. Tako je Westinghouse (1985) postao potpuni vlasnik firme Unimation, General Electric je otkupio licencu i pravo prodaje robota Volkswagen, dok je General Motors osnovao najveću svetsku firmu za robotsku tehnologiju GMF (General Motors-Fanuc), kupujući većinu akcija japanske robotske firme Fanuc, poznate po proizvodnji električnih pogona za robote i industrijskih robota na električni pogon. Tokom osamdesetih godina u SAD se pojavio i IBM, koji radi sa velikim japanskim firmama, dok ima i mnogo novih propulzivnih firmi koje uvode sasvim novu tehnologiju. Npr. ADEPT, mala robotska firma koja je prva na svetu (1984) komercijalizovala električne robote sa direktnim pogonom i s njima postigla izvanredne komercijalne uspehe.

**Japan.** U Japanu je rad na robotskim tehnologijama počeo 1968. kada je Kawasaki otkupio licencu za hidraulične industrijske robote američke firme UNIMATION. Od tada se više krupnih industrijskih firmi počelo baviti robotima. Poreklo je tih firmi, za razliku od američkih, znatnim delom iz elektronske i računarske industrije (Hitachi, Seiko i dr.). Mnoge od njih započele su tu delatnost razvijajući i primenjujući robote u sopstvenoj proizvodnji, što je karakteristično za razvoj robotske industrije u Japanu. Osim u automobilskoj industriji, u Japanu se počela i ranije nego u SAD masovnije da primenjuje robotska, a kasnije i fleksibilna tehnologija proizvodnje u elektronskoj i računarskoj industriji. Otuda i veća upotreba primenjenih robota u Japanu nego u SAD.

**Zapadna Evropa.** Poreklo je proizvođača robota ravnomernije raspoređeno nego u SAD i Japanu. Mnogi vodeći