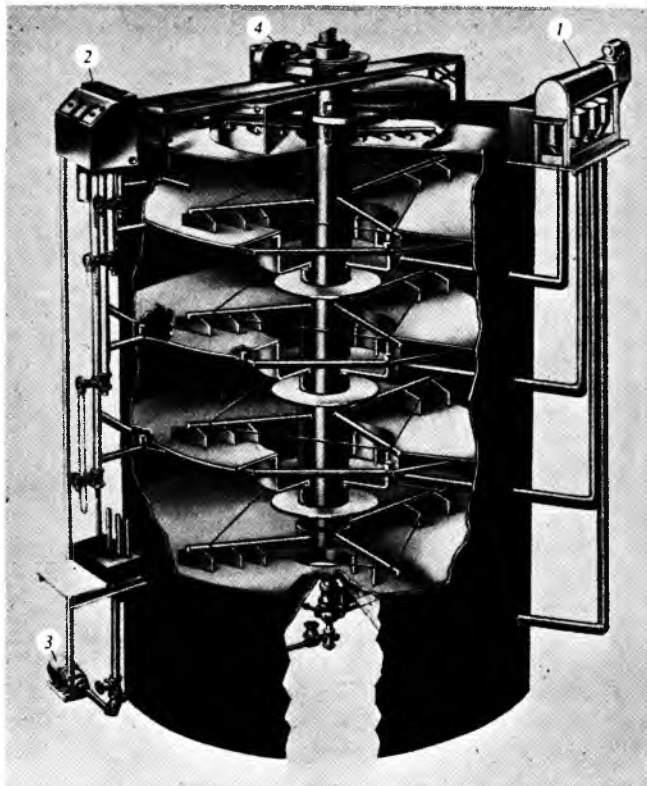


U vertikalnim klarifikatorima materijal struji pretežno okomito. Među tim aparatima najpoznatiji su tzv. akceleratori (sl. 15), prikladni za pročišćavanje vode. U akceleratoru voda najprije, uz snažno miješanje, prolazi kroz dvije reakcijske zone gdje se sediment flokulira, a zatim dospijeva u sedimentacijsku komoru. Odatle se s vrha odvodi očišćena voda, a s dna sediment.



Sl. 16. Višekomorni klarifikator za preradbu soka šećerne trske. 1 dovod, 2 sustav za skupljanje sedimenta, 3 pumpa za odvođenje sedimenta, 4 pogonski sklop

Višekomorni klarifikatori (sl. 16) upotrebljavaju se kad je potrebno štedjeti ugradbenu površinu. Obično se grade za paralelno funkcioniranje komora i slični su višekomornim ugušćivačima s balansiranim pladnjevima. Ima, međutim, nekih konstrukcija s obrnuto okrenutim pladnjevima na koje se periferno dovodi mulj i s kojih se također periferno odvodi sediment, a sa središta izbistrena kapljevina. U njima se sediment grablja prema periferiji i odvodi u nižu komoru kroz periferna korita.

LIT.: G. G. Brown and Associates, Unit Operations. J. Wiley and Sons, New York 1950. – A. S. Foust, L. A. Wenzel, C. W. Clump, L. Maus, L. B. Andersen, Principles of Unit Operations. J. Wiley and Sons, New York-London 1960. – A. Anable, Sedimentation, u djelu: J. H. Perry, Chemical Engineers Handbook. McGraw-Hill, New York 1963. – F. L. Bosqui, Sedimentation, u djelu: Kirk-Othmer, Encyclopedia of Chemical Technology, Vol. 17. Interscience Publishers, New York 1968. – K. Imhoff, Taschenbuch für Stadtentwässerung. R. Oldenburg, München 1969. – W. Gundelach, Sedimentation, u djelu: Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie, Band 2. Verlag Chemie, Weinheim 1972. – H. Robel, Sedimentieren im Schwerefeld, u djelu: Lehrbuch der chemischen Verfahrenstechnik. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1983. – H. Schubert, Sedimentieren, u djelu: Mechanische Verfahrenstechnik. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1985.

Ž. Viličić

SELEN (Selenium, Se), kemijski element s atomnim brojem 34 i relativnom atomnom masom 78,96. Nalazi se u VI B skupini periodnog sustava elemenata, između sumpora i telura, te je po svojim kemijskim svojstvima sličan tim

elementima. Prirodni selen predstavlja smjesu šest stabilnih izotopa: ^{74}Se (0,87%), ^{76}Se (9,02%), ^{77}Se (7,58%), ^{78}Se (23,52%), ^{80}Se (49,82%) i ^{82}Se (9,19%). Od 16 radioaktivnih izotopa najvažniji je ^{75}Se s vremenom poluraspada 121 dan. Elektronska konfiguracija atoma selena jest $[\text{Ar}] 3d^{10}4s^24p^4$.

Selen je danas veoma važan kao poluvodički materijal. Poluvodički karakter selena i njegova fotoelektrična svojstva jesu ono na čemu se i danas osniva primjena selena u elektronici. Njegova kemijska svojstva uvjetuju primjenu tog elementa i u drugim granama industrije, kao što su industrija stakla i keramike, industrija boja, čelika itd.

Selen je 1817. godine otkrio J. J. Berzelius u komornom mulju od proizvodnje sulfatne (sumporne) kiseline. Berzelius je i detaljno ispitao kemijska svojstva selena. J. W. Hittorf je 1851. otkrio da se selen javlja u više kristalnih modifikacija, a W. Smith je 1873. otkrio da se električna provodnost selena mijenja pri osvjetljavanju. Selen je praktično 50 godina bio jedini kemijski element koji je služio u uređajima za izravno pretvaranje energije elektromagnetskog zračenja u električnu energiju.

Selen je dobio ime u čast mjeseca (grč. σελήνη selene mjesec).

Prosječni maseni udjel selena u Zemljinoj kori je $5 \cdot 10^{-6}\%$. Rijedak je otprilike kao zlato. Najčešće se pojavljuje zajedno sa sumporom, a uz elementarni sumpor može se naći i elementarni selen. I pored rasprostranjenosti selena u Zemljinoj kori, u svijetu nisu poznata veća nalazišta selena. Obično se nalazi uz sulfide teških metala u obliku selenida, koji su izomorfni sa sulfidima. Od 38 poznatih minerala selena najvažniji su selenidi: naumanit Ag_2Se , klaustalit PbSe , timanit HgSe , berceljanit Cu_2Se , onofrit $\text{Hg}(\text{Se},\text{S})$ i drugi. Poznati su i minerali selena koji predstavljaju soli kiselina, kao što je npr. halkomenit $\text{CuSeO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Selen se u tragovima javlja u ljudskim i životinjskim kostima, zubima, zatim u mlijeku itd. Na tlu bogatu selenom rastu biljke u kojima je udjel selena veći od granice otrovnosti za ljude i životinje.

ELEMENTARNI SELEN

Fizikalna svojstva. Selen je tamnozute boje sa smeđom nijansom. Poznato je više alotropskih modifikacija selena. Pri sobnoj je temperaturi stabilan heksagonalni sivi selen (tzv. metalni selen), s parametrima rešetke: $a = 0,435$ nm i $c = 0,494$ nm, te gustoćom $4,79$ g/cm³. Sastoji se od spiralnih lanaca atoma selena. Iz vodenih otopina izdvaja se amorfni selen crvene boje, koji pri zagrijavanju prelazi u heksagonalnu modifikaciju. U dodiru s otapalima (metilen-jodid, ugljik-di-sulfid) selen stvara dvije monoklinske modifikacije crvene boje, gustoće $4,48$ g/cm³ i $4,40$ g/cm³. Kristalna rešetka tih modifikacija, slično kao u sumpora, sastoji se od molekula Se_8 . U površinskom sloju monoklinske modifikacije otkrivene su još dvije kubične modifikacije selena s parametrima rešetke $a = 0,5755$ nm i $0,2970$ nm. Atomni radijus selena iznosi $1,6 \cdot 10^{-10}$ m, a ionski su radijusi: Se^{2+} $1,98 \cdot 10^{-10}$ m, Se^{4+} $0,069$ nm, Se^{6+} $0,035$ nm.

Temperatura je taljenja heksagonalnog selena 217°C , a talina pri hlađenju lako stvara staklastu amorfnu modifikaciju. Pri brzom zagrijavanju alfa-oblik se tali pri 170°C , a beta-oblik pri $180\text{--}190^\circ\text{C}$. Temperatura ključanja je $685 \pm 1^\circ\text{C}$. Pare selena žučkaste su boje. U parnoj fazi pri temperaturama nižim od 900°C uspostavlja se ravnoteža $\text{Se}_8 \rightleftharpoons \text{Se}_6 \rightleftharpoons \text{Se}_4 \rightleftharpoons \text{Se}_2$. Pri temperaturi $900\text{--}1000^\circ\text{C}$ pare selena sastoje se praktično od molekula Se_2 , koje pri temperaturi 1350°C počinju disociirati u jednoatomne molekule.

Toplina taljenja selena iznosi $5,5$ kJ/mol, a toplina isparivanja 70 kJ/mol (pri temperaturi ključanja). Termički koeficijent linearnog širenja jest $4,927 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$, specifični toplinski kapacitet $0,35 \text{JK}^{-1}\text{g}^{-1}$, toplinska provodnost $2,3 \cdot 10^{-1} \text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$. Tvrdća je selena po Mohsovoj skali 2, a po Brinellu 735N/mm^2 .

Energija ionizacije $\text{Se}^0 \rightarrow \text{Se}^+ \rightarrow \text{Se}^{2+} \rightarrow \text{Se}^{3+}$ iznosi $9,75$ eV, $21,5$ eV, odnosno 32 eV. Presjek zahvata termičkih

neutrona (udarni presjek) jest $12,3 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$. Selen ima dijamagnetska svojstva.

Selen je tipičan poluvodič, do danas najsloženiji i najmanje izučen i pored opsežnih istraživanja. Provodnost selena zavisi od čistoće. Električna otpornost staklaste modifikacije selena viša je od $10^{10} \Omega \text{ m}$. Otpor heksagonalnog selena, osim čistoće, zavisi i od termičke obradbe. Heksagonalni selen najvišeg stupnja čistoće pri temperaturi bliskoj talištu ima električnu otpornost reda veličine $10^2 \Omega \text{ m}$.

Važno je svojstvo selena sa stajališta njegove primjene da mu se električna provodnost mijenja s promjenom intenziteta svjetlosti. Ona je na običnoj dnevnoj svjetlosti veća oko 1000 puta od provodnosti u mraku. Na granici između selena i metalne podloge na koju je selen nanesen stvara se zaprečni sloj koji propušta struju samo u jednom smjeru. Pri osvjetljavanju zaprečnog sloja pojavljuje se i fotoelektrični efekt, koji se svestrano primjenjuje (v. *Električna mjerenja*, TE 3, str. 642; v. *Fotometrija*, TE 5, str. 619).

Kemijska svojstva. U svojim se spojevima selen javlja u više stupnjeva oksidacije: $-1, -2, +1, +2, +4, +6$. Najstabilniji su spojevi četvorovalentnog selena. Kemijska svojstva selena u mnogo čemu slična su kao u sumpora. Tako su poznati mnogi spojevi selena kao što su selenidi, seleniti, selenati te organski spojevi selena.

Pri sobnoj temperaturi na zraku selen je postojan. Kisik i voda na njega također ne djeluju. Selen je postojan na djelovanje kloridne (solne) i razrijeđene sulfatne kiseline, ali se dobro otapa u koncentriranoj nitratnoj (dušičnoj) kiselini i smjesi nitratne i kloridne kiseline. Selen se sporo otapa uz zagrijavanje i oksidaciju u alkalijama. Pri zagrijavanju u struji zraka ili kisika oksidira uz stvaranje selen(IV)-oksida, SeO_2 . Oksidacija se ubrzava gorenjem selena u struji kisika uz razvijanje plavog plamena. Oksidacija je brza u prisutnosti dušikovih oksida, što se primjenjuje prilikom rafinacije selena. Selen reagira s vodikom pri zagrijavanju uz stvaranje selenovodika, H_2Se . Pri djelovanju plinovitog klora na selen egzotermnom reakcijom stvara se prvo selen(I)-klorid, Se_2Cl_2 , u obliku smeđe tekućine, koji pri djelovanju klora prelazi u čvrsti, bijeli selen(IV)-klorid, SeCl_4 . Selen reagira s fluorom na sobnoj temperaturi, s bromom pri slabom zagrijavanju, dok s jodom uopće ne reagira. S mnogim metalima pri taljenju tvori selenide, koji su po vanjskom izgledu, sastavu i svojstvima slični odgovarajućim sulfidima.

Fiziološka uloga i toksičnost selena i njegovih spojeva intenzivno se istražuju zadnjih godina zbog njegove sve šire primjene u industriji. Selenove pare su otrovne i njihovo udisanje dovodi do pneumonije, selenoze, koja može uzrokovati smrt. Naročito je otrovan selenovodik. Već u koncentracijama većim od jednog dijela na milijun uzrokuje oštećenja sluzokože očiju, nosa, ždrijela i organa za disanje, koja se dugo i vrlo teško liječe. Samo kratkotrajno udisanje selenovodika uzrokuje tzv. selenske kihavice. Selen(IV)-oksid, seleniti i selenati imaju slično djelovanje kao i selenovodik. Pri dodiru sa selenom, pri njegovoj proizvodnji i preradbi, moraju se posebno zaštititi zaposleni radnici i okolina. Jedan je od prvih znakova otrovanja selenom povećanje njegove koncentracije u urinu. Posebno je potrebna zaštita, uz strogu kontrolu brtvljenja uređaja i dobru ventilaciju, pri radu s isparljivim spojevima selena, kao što je to pri njegovoj proizvodnji.

Sirovine. Selenove rude i minerali nisu praktički važni za industrijsku proizvodnju selena. Selenovi se minerali obično pojavljuju u rudama teških metala. Pri preradbi tih ruda selen se koncentrira u nekim međuproizvodima iz kojih se kasnije može izolirati. Međutim, osnovne sirovine iz kojih se danas u svijetu dobiva selen jesu muljevi od proizvodnje sulfatne kiseline i anodni muljevi od elektrolize bakra. U tim se sirovinama selen obično pojavljuje zajedno s telurom i plemenitim metalima, pa je osnovni problem u proizvodnji selena njegovo odvajanje od tih elemenata.

Proizvodni postupci. Izbor tehnološkog postupka za proizvodnju selena zavisi od vrste polazne sirovine, ukupne količine i udjela selena u njoj te vrste i količine pratećih elemenata.

U muljevima od proizvodnje sulfatne kiseline selen je prisutan u elementarnom obliku, pored telura i sumpora. Da bi se dobio selen, sirovina se podvrgava oksidacijskom prženju, pri čemu se selen oksidira i prelazi u lako isparljivi selen(IV)-oksid. On isparuje iz peći za prženje i hvata se obično direktnim uvođenjem u vodu. Pri apsorpciji u vodi dobiva se otopina selenaste (selenitne) kiseline, koja se filtriranjem odvaja od eventualno prisutnih čvrstih čestica. Iz bistre otopine selenaste kiseline nakon zakiseljavanja izdvaja se elementarni selen redukcijom natrij-disulfitom. Redukcijom izdvojeni selen zatim se filtrira, ispire i suši. Dobiveni selen tehničke je čistoće, te se redovito podvrgava rafinaciji sublimacijom u vakuumu ili se rafinira po tzv. sulfitno-cikličnom postupku.

Selen se iz muljeva od proizvodnje sulfatne kiseline može proizvesti i tako da se selen i telur otape natrij-sulfidom, a zatim se selen selektivno izdvaja iz otopine u elementarnom obliku oksidacijom natrij-selenosulfida.

Najveća količina selena danas se u svijetu dobiva iz anodnog mulja od elektrolize bakra. U toj su sirovini osim bakra prisutni telur i plemeniti metali.

Anodni muljevi od elektrolize bakra prvo se podvrgavaju odbakrivanju izluživanjem bakra razrijeđenom otopinom sulfatne kiseline uz intenzivnu oksidaciju. Kako je selen u anodnom mulju prisutan u obliku jednostavnih i složenih selenida (najčešće selenida plemenitih metala), koji su netopljivi, to je svim industrijskim postupcima u osnovi oksidacija selenida i prevođenje u oblik lako topljiv u vodi. U industrijskoj su primjeni postupci oksidacijskog prženja mulja, sulfatizirajućeg prženja i pečenja mulja s kalciniranom sodom. Kao proizvod prvih dvaju postupaka stvara se lako isparljivi selen(IV)-oksid, kojemu se pare hlade i obično hvataju apsorpcijom u vodi u specijalnim uređajima, skruberima ili mokrim elektrofiltrima. Prilikom pečenja mulja s kalciniranom sodom selen se prevodi u selenite i selenate natrija, koji su neisparljivi, a lako topljivi u vodi. Luženjem kalcinata u vreloj vodi selen se prevodi u otopinu. Iz vodenih otopina, koje se prethodno zakiseljuju, izdvaja se selen u elementarnom obliku redukcijom pomoću sumpor(IV)-oksida.

Rafinacija. Po opisanim tehnološkim postupcima proizvodi se elementarni selen tehničke čistoće. U tehnici poluvodiča upotrebljava se selen visokog stupnja čistoće (99,999% Se i više). U tu se svrhu tehnički selen podvrgava postupcima rafinacije. U primjeni su ovi postupci rafinacije: destilacija pod normalnim tlakom u struji inertnih plinova; isparivanje i sublimacija selena u vakuumu; zonska rafinacija i usmjerena kristalizacija; oksidirajuće prženje tehničkog selena i frakcijsko isparivanje selen(IV)-oksida; selektivno otapanje tehničkog selena u različitim otapalima i selektivno taloženje selena iz otopine; stvaranje i termička razgradnja lako isparljivih selenovih spojeva, itd. Često se primjenjuju dva ili više postupaka rafinacije, već prema vrsti i udjelu primjesa koje se žele ukloniti, te zahtijevanom stupnju čistoće rafiniranog selena.

Upotreba. Selen se u poluvodičkoj tehnici upotrebljava za izradbu ispravljača i fotoelemenata sa zapornim slojem, koji se mnogo primjenjuju u elektronici (v. *Električna mjerenja*, TE 3, str. 642). U novije se vrijeme znatne količine selena troše u kserografiji za izradbu fotoosjetljivih slojeva za fotokopiranje. Selen i njegovi spojevi upotrebljavaju se u industriji stakla za obezbojavanje i bojenje stakla, a u industriji keramike služe za izradbu ružičastih i crvenih nijansi boja, pretežno za emajle. U metalurgiji čelika selen služi kao modifikator. Selen se upotrebljava i u industriji gume, proizvodnji katalizatora, proizvodnji mnogih organskih spojeva itd.

SELENOVI SPOJEVI

Selen gradi mnogo kemijskih spojeva, od kojih su važniji selenovi oksidi, kiseline, pripadne soli, zatim selenovodik i organski spojevi selena.

Selen(IV)-oksid, selen-dioksid, SeO_2 , na sobnoj je temperaturi bijela, kristalna tvar koja se lako otapa u vodi i alkoholu. Otapanjem u vodi stvara selenitnu (selenastu) kiselinu, H_2SeO_3 . Lako sublimira i može se taliti samo u hermetički zatvorenoj posudi. Nastaje oksidacijom elementarnog selena zrakom na visokoj temperaturi, sagorijevanjem selena u kisiku, dehidratacijom selenitne kiseline ili termičkom razgradnjom nekih spojeva selena. Selen(IV)-oksid jak je oksidans i lako se reducira do elementarnog selena slabim reducensima kao što je sumpor(IV)-oksid. U kemiji se upotrebljava kao jako oksidacijsko sredstvo.

Selen(VI)-oksid, selen-trioksid, SeO_3 , termički je nestabilna tvar, te se ne može dobiti analognim postupcima kao dioksid. Dobiva se dehidratacijom selenatne (selenove) kiseline, H_2SeO_4 , pomoću fosfor-anhidrida uz isparivanje selen(VI)-oksida u vakuumu. Otapanjem u vodi stvara selenatnu kiselinu. U kemiji služi kao jak oksidans.

Selenitna (selenasta) kiselina, H_2SeO_3 , dobiva se otapanjem selen(IV)-oksida u vodi ili oksidacijom praha elementarnog selena nitratnom kiselinom. Ubraja se u slabe kiseline. S jakim oksidansima oksidira do selenatne kiseline, H_2SeO_4 . Gradi soli, selenite, od kojih je većina, s izuzetkom soli alkalijskih metala, topljiva u vodi. Osim normalnih soli tvori i kisele i bazne selenite.

Selenatna (selenova) kiselina, H_2SeO_4 , dobiva se oksidacijom selenitne kiseline jakim oksidansima. Bezvodna selenatna kiselina kristalizira u obliku bezbojnih heksagonalnih kristala koji se tale pri temperaturi $62,4^\circ\text{C}$. Reducira se slabim reducensima do selenitne kiseline, a jakim do elementarnog selena. Stupanj disocijacije selenatne kiseline blizak je onome sulfatne, ali je selenatna kiselina jači oksidans. Soli selenatne kiseline, selenati, po mnogim su svojstvima slične analognim sulfatima. Pri zagrijavanju selenati se razgrađuju uz stvaranje selenita.

Selenovodik, H_2Se , dobiva se reakcijom elementarnog selena s vodikom uz zagrijavanje na 350°C , ili pak djelovanjem razrijeđenih mineralnih kiselina na selenide metala. To je bezbojan plin, neugodna mirisa i vrlo visoke toksičnosti. Selenidi mnogih metala lako se dobivaju direktnim djelovanjem selenovodika na metale uz zagrijavanje.

Selenidi. Selenidi su spojevi selena s elektro pozitivnim elementima, pretežno metalima. Bliski su po svojstvima analognim sulfidima i teluridima. Dobivaju se reakcijama metala s elementarnim selenom na sobnoj temperaturi, uz zagrijavanje, pa čak i taljenje. Mogu se dobiti u reakcijama s plinovitim elementarnim selenom ili selenovodikom i djelovanjem selenovodika na taline metala. Neki od selenida prijelaznih metala imaju poluvodička svojstva, a selenidi metala podskupine cinka vrlo su osjetljivi na različite oblike zračenja. Mnogo se upotrebljavaju za proizvodnju poluvodiča, fotoelementata, fotooptornika, fotoosjetljivih slojeva itd.

Organoselenovi spojevi. U tim je spojevima atom selena direktno vezan za atom ugljika. Po svojstvima i metodama dobivanja slični su analognim organskim spojevima sumpora. Poznati su selenidi, R_2Se , diselenidi, RSeSeR , selenoli, RSeH , selenooksidi, R_2SeO , selenoni, R_2SeO_2 , i više drugih spojeva.

PROIZVODNJA I POTROŠNJA SELENA

Opseg svjetske proizvodnje selena (bez bivšeg SSSR i NR Kine) u posljednjih je 15 godina na razini 1200–1400 t, sa stalnom tendencijom blagog porasta. Glavni proizvođači selena u svijetu jesu Kanada, Japan i SAD, a njihov zajednički udjel u svjetskoj proizvodnji iznosi 78%. Zatim slijede Belgija, Švedska, Meksiko, Čile i Jugoslavija s udjelom od 20%, dok sve ostale zemlje sudjeluju samo sa 2%.

Struktura potrošnje selena u razvijenim zemljama Zapada u zadnjim je godinama (1975–1985) bila sljedeća: elektronika 35% (od toga ispravljači 5%, kserografija 25%, ekrani katodnih cijevi, fotoelementi i sunčane baterije 5%), zatim industrija stakla i keramike 25%, industrija boja 25%, industrija čelika 10% i ostale grane industrije 5%.

Udjel Jugoslavije u svjetskoj proizvodnji selena iznosi 4%. Jedini je proizvođač selena Rudarsko-topioničarski bazen Bor s godišnjom proizvodnjom tehničkog selena 50–60 t. U Boru se selen proizvodi iz mulja od elektrolitičke rafinacije bakra po sulfatnom postupku.

LIT.: C. A. Hampel, Rare Metals Handbook. Chapman and Hall, London 1962. – A. A. Кудрявцев, Химия и технология селена и теллура. Издательство «Металлургия», Москва 1968. – B. Đurković, D. Đurković, Metalurgija retkih metala. Građevinska knjiga, Beograd 1976.

Redakcija

SERVOMECHANIZMI, mehanizmi u kojima izlazna veličina vjerno slijedi ulaznu veličinu. Slični su u semantičkom smislu izrazi servouredaj, servosustav, slijedni mehanizam, slijedni sustav itd. Servomehanizam sadrži regulacijski krug s pojačalom snage, a regulirana je veličina mehaničko gibanje, kao što je pomak, brzina, ubrzanje, kutni zakret itd. Još je 1934. god. H. L. Hazen precizno definirao: »Servomehanizam je sustav zatvorene petlje s kinetičkim izlazom koji sadrži pojačalo snage u direktnoj stazi i koji se aktivira razlikom između ulaza i upravljanog izlaza«.

Iako čovjek kao operator može biti uključen u lancu povratne veze, servomehanizmi su redovno potpuno automatski sustavi bez prisutnosti čovjeka (v. *Regulacija, automatska*, TE 11, str. 505).

Prvi pokušaji da se ostvare automati, tj. mehanizmi koji sami obavljaju koristan rad, potiču još iz starog vijeka, odnosno helenističkog razdoblja (Ktezibije, Filon i Heron). Tek u novome vijeku slijedili su izumi pojedinačnih automatskih mehanizama, ali je istom centrifugalni regulator (konično njihalo), opisan u patentu Wattova parnog stroja iz 1784, označio preteču suvremenih servomehanizama. Taj je regulator imao proporcionalno djelovanje. W. Siemens je 1845. opisao tzv. *diferentni regulator*, a njegovo integralno djelovanje može potpuno ukloniti regulacijsku pogrešku.

Sljedeća bitna karika u razvoju servomehanizama jest Maxwellov teorijski rad *On governors* iz 1868, gdje je povezo praktičke regulatore s diferencijalnim jednadžbama i pokazao da stabilnost servomehanizma ovisi o negativnom realnom dijelu korijena diferencijalne jednadžbe.

Do prvog svjetskog rata nema bitnih događaja u teoriji i praksi servomehanizama, iako treba spomenuti radove o stabilnosti algebarski opisanih sustava (E. J. Routh, A. Hurwitz, J. A. Višnegradski, A. M. Ljapunov). N. Minorsky je 1922. opisao automatsko upravljanje brodom, a Hazen 1934. pozicioniranje vratila. Njegova je knjiga ujedno prvi pokušaj postavljanja opće teorije. Iz 1932. godine potječe znameniti traktat H. Nyquista o stabilnosti nepotpuno opisanih sustava.

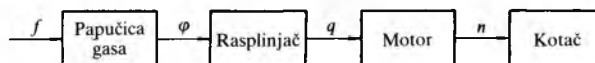
Drugi svjetski rat veoma je potaknuo razvoj servomehanizama, jer je niz novih oružja uvjetovalo automatski rad. U teoriji je također postignut velik napredak: klasičnu metodu rješavanja diferencijalnih jednadžbi zamijenila je analitička metoda Laplaceove transformacije, odnosno grafičke metode Fourierove transformacije temeljene na radovima H. Nyquista, H. W. Bodea i N. B. Nicholasa.

Nakon rata su u tehničku praksu ušla i računala, prvo analogna, a zatim digitalna. Na dalji razvoj servomehanizama i automatike općenito veoma su utjecali mikroprocesori, koji nadomještavaju druga rješenja automata.

Teorija automatske regulacije i dalje ostaje jedna od najprofulzivnijih znanstvenih grana nakon rata. Rješavali su se problemi sinteze, odnosno optimalizacije, zatim nelinearnosti, a zbog veće složenosti tehničkih rješenja i multivarijabilni sustavi. Odgovor na ta pitanja daje metoda prostora stanja što su je oko 1960. razvili sovjetski i američki znanstvenici.

SERVOMECHANIZMI I REGULACIJA PROCESA

Upravljanje. Prvi je korak u zamjeni čovjekova umnog rada strojem upravljanje što se odvija u otvorenom lancu, i to unaprijed, tako da signal putuje od ulaza k izlazu. Primjer je upravljanje brzinom vozila gdje vozač pritiskom f namješta na papučici gasa kut zakreta φ , što djeluje na protok q goriva u rasplinjaču, a dalje na snagu motora, odnosno broj okretaja n (sl. 1). Dakle, ulazni signal f djeluje posredno na izlaz n . Na tom primjeru se vidi i suština *sustavnog prilaza*, gdje se radi lakšeg uočavanja problema sustav razbija na podustave ili elementarne članove. Prema definiciji sustav je skup



Sl. 1. Blok-shema upravljanja brzinom vozila