

Vrijeme odjeka važan je podatak pri akustičkom ispitivanju prostorija i utvrđivanju njihove pogodnosti za ozvučenje i druge namjene. On je potreban i pri određivanju akustičke snage potrebne za ozvučenje neke prostorije, nadalje pri mjerenju koeficijenta apsorpcije, određivanju gustoće zvučne energije u nekoj prostoriji, itd.

Mjerenje koeficijenta apsorpcije pojedinih (građevinskih) materijala svodi se također na mjerenje vremena odjeka. Najprije se izmjeri vrijeme odjeka prazne ječne komore, a zatim vrijeme odjeka ječne komore u kojoj je ispitivani materijal raspoređen po svim plohama. Iz tih dvaju mjerenja može se izračunati koeficijent apsorpcije zvuka za ispitivani materijal.

Mjerenje akustičke izolacione moći svodi se na mjerenje zvučnog tlaka. U otvor zida, poda ili stropa (veći nego 3 m^2), kojim su spojene dvije inače jedna od druge dobro akustički izolirane ječne komore, ugrađuje se (građevinski) materijal kojemu treba odrediti izolacionu moć. U jednoj od komora smješten je izvor zvuka ili buke (zvučnik ili mehaničko lupalo) pomoću kojeg se stvara difuzno zvučno polje. Baždarenim mikrofonom i pripadnim mjernim uređajem mjeri se na više mjesta svake od prostorija zvučni tlak radi utvrđivanja njegove prosječne vrijednosti; iz obiju tako određenih prosječnih vrijednosti izračunava se izolacija i izolaciona moć ispitivanog materijala.

LIT.: *W. T. Bartholomew*, Acoustics of music, New York 1952. — *F. Schuh*, *N. Mikhnevitch*, L'enregistrement magnétique, Paris 1952. — *J. W. Winstanley*, Textbook on sound, New York 1952. — *F. S. Saic*, Elektroakustik, Wien 1952. — *F. Kroner*, Die magnetische Schallaufzeichnung, Wien 1952. — *G. W. Swenson*, Principles of modern acoustics, New York 1953. — *E. Skudrzyk*, Die Grundlagen der Akustik, Wien 1954. — *E. Weuer*, *M. Laurence*, Physiological acoustics, New York 1954. — *B. A. Красильников*, Звуковые волны в воздухе, воде и твердых телах, Москва 1954. — *L. Coustac*, Acoustique appliquée, Paris 1955. — *A. B. Wood*, A textbook of sound, London 1955. — *S. Begun*, Magnetic recording, New York 1955. — *R. Feldtkeller*, *E. Zwicker*, Das Ohr als Nachrichtempfänger, Stuttgart 1956. — *W. Furrer*, Akustik, Basel 1956. — *H. Lowery*, A guide to musical acoustics, London 1956. — *H. F. Olson*, Acoustical engineering, New York 1957. — *E. G. Richardson*, Sound, London 1957. — *H. Burstein*, *C. Pollak*, Tape recorder circuits, New York 1957. — *O. Brand*, Akustisk planering, Stockholm 1958. — *J. Moir*, High quality sound reproduction, London 1958. — *W. E. Steward*, Magnetic recording technique, New York 1958. — *J. R. Pierce*, *E. E. David*, Man's world of sound, New York 1958. — *H. M. Tremaine*, The audio cyclopaedia, New York 1959. — *M. Adam*, Akustik, Bern 1959. — *C. H. Ронский*, Курс лекций по теории звука, Москва 1960. — *H. Kurtovic*, Elektroakustika, 2 sv., Beograd 1960. — *M. Dourian*, Stéréophonie, disques, haute fidélité, Paris 1960. — *G. Slot*, From microphone to ear, Eindhoven 1960. — *F. Trendelenburg*, Einführung in die Akustik, Berlin 1961. — *T. Jelaković*, Arhitektonska akustika, Zagreb 1962. — *M. Rettinger*, Practical electroacoustics, London 1962. — *H. Mercier*, Traité d'acoustique, Paris 1962. — *L. L. Beranek*, Music, acoustics, architecture, New York 1962. — *L. E. Kinsler*, *A. R. Frey*, Fundamentals of acoustics, New York 1962. — *D. A. Snel*, Magnetische Tonaufzeichnung, Eindhoven 1963. — *A. E. Robertson*, Microphones, New York 1963. — *N. W. Fransen*, Stereophonie, Eindhoven 1963. — *J. Matras*, Acoustique et electroacoustique, Paris 1964. — *M. Adlešić*, Svet zvoka in glasbe, Ljubljana 1964. — *H. Burrell Hadden*, Practical stereophony, London 1964. — *L. Guéyèsse*, *P. Sabathé*, Acoustique sous-marine, Paris 1964. — *G. Slot*, Die Wiedergabequalität elektroakustischer Anlagen, Eindhoven 1965. — *W. Moll*, Bauakustik I, Berlin 1965. — *Z. Zyszkowski*, Podstawy elektroakustiki, Warszawa 1966. — *H. H. Klinger*, Technische Akustik, München 1966. — *G. Büscher*, Hi-Fi und Stereo für den Tonbandfreund, Stuttgart 1966. — *D. G. Tucker*, *B. K. Gazez*, Applied underwater acoustics, London 1966. — *I. Dragović*, Mikrofoni, Beograd 1966. — *A. П. Сташкевич*, Акустика моря, Ленинград 1966. — *A. Sercer*, Otorinolaringologija, I. Propedeutika, Zagreb 1966. — *M. Kuljiš*, Osnovi hidroakustike i hidroakustičkih uređaja, Beograd 1967. — *L. Cremer*, *M. Heckl*, Körperschall, Berlin 1967. — *E. Meyer*, *E. G. Neumann*, Physikalische und technische Akustik, Braunschweig 1967. — *J. Tecklin*, Lautsprecherbuch, Stuttgart 1967. — *F. Bergold*, Moderne Schallplattentechnik, München 1967. — *G. Büscher*, Philips Lehrbriefe, Bd II, Hamburg 1967. — *T. Jelaković*, Magnetsko snimanje zvuka, Zagreb 1968. — *W. Reichardt*, Grundlagen der technischen Akustik, Leipzig 1968. — *F. Kühne*, Musikübertragung sanlagen, München 1968. — *M. Schmidt*, Schalltechnisches Taschenbuch, Düsseldorf 1968. — *S. Miszczaak*, Elektroakustika, Warszawa s. a. (~ 1968). — *E. Christian*, Magnetontechnik, München 1969. — *T. Jelaković*, Mikrofoni, Zagreb 1969. — *L. F. Yerges*, Sound, noise, vibration control, New York 1969. — *M. L. Gayford*, Electroacoustics, London 1970. — *J. V. Tobias*, Foundations of modern auditory theory. vol. I, New York-London 1970. — *W. Reichardt*, Elektroakustik, Leipzig 1971. — *C. M. Аллон*, *Н. Н. Максимов*, Музыкальная акустика, Москва 1971. — *F. Kühne*, *K. Tetzner*, Kleines Stereo-Praktikum, München 1971.

B. Somek

ELEKTRODIJALIZA, tehnička operacija pri kojoj se proces analogan dijalizi (v. TE 3, str. 338) vrši pod utjecajem električnog potencijala kao glavne djelujuće sile procesa. Osnovni proces obične dijalize, difuzija kroz polupropusnu membranu izazvana razlikom kemijskog potencijala otopljene tvari u difuzatu i dijalizatu, postaje sporedan, a kao glavni nastupa prinudno kretanje iona pod utjecajem električnog polja (okomitog na površinu membrane). Iz definicije slijedi da se elektrodijaliza može primijeniti samo na otopine koje sadrže elektrolite. Za njezinu provedbu potrebne su membrane i njihovi nosači, komore i putovi otopina kao u običnoj dijalizi, ali se elektrodijaliza razlikuje od obične dijalize konstrukcijom aparature, namjenom i potrebnim

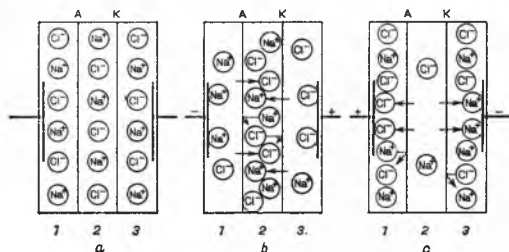
svojstvima membrana. Obična dijaliza, kao »pasivni« proces koji ovisi o postojanju konačne razlike koncentracije među otopinama s obiju strana membrane, može da se odvija samo u jednom smjeru, i to određenom brzinom na koju se gotovo nikako ne može utjecati i koja postaje praktički jednaka nuli prije nego što je sva otopljena tvar prodifundirala kroz membranu. Pri elektrodijalizi može se smjer difuzije kroz membranu obrnuti, a okolnost da se njome mogu ukloniti i posljednji tragovi elektrolita iz dijalizata, npr. iz otopine koloida, i da se mogu postići veći učinci, glavne su prednosti elektrodijalize pred običnom dijalizom.

Elektrodijalizu je vjerojatno prvi upotrijebio Schwein (1900), ali se pronalazak elektrodijalize obično pripisuje H. N. Morseu i I. A. Pierceu, koji su je 1903 upotrijebili za čišćenje otopine želatine od elektrolita u običnom laboratorijskom dijalizatoru, kakav se tada upotrebljavao. W. Pauli sa saradnicima prvi je racionalno konstruirao laboratorijski elektrodijalizator sa tri komore odvojene jedna od druge neselektivnim membranama. E. Manegold i K. Kalauch pokazali su 1939 da su za postizanje većih učinaka potrebne ionski vrlo visoko permselektivne membrane; 1940 predložili su K. H. Meyer i W. Strauss konstrukciju elektrodijalizatora sa takvim membranama u izvedbi s većim brojem komora. Danas se u tehničkoj praksi isključivo upotrebljavaju takvi elektrodijalizatori.

Visoko ionski permselektivne membrane počele su se proizvoditi tek poslije drugog svjetskog rata, kada je industrija po prihvatljivim cijenama stavila na raspolaganje sintetske tvari od kojih su se takve membrane mogle proizvesti i kad je elektrodijaliza dobila jak poticaj kao jedan od perspektivnih postupaka za rješavanje sve aktualnijeg problema snabdijevanja svijeta dovoljnim količinama slatke vode.

Ionski permselektivne membrane, koje se još nazivaju i ionski selektivnim, ionski permeabilnim membranama i membranama za izmjenu iona, polupropusne su opne koje, kada odjeljuju dvije otopine elektrolita izložene djelovanju električnog polja okomitog na njihovu površinu, pokazuju svojstvo selektivnog transporta iona određenog naboja. To svojstvo posljedica je njihove polielektrolitske građe s ionima jednog naboja učvršćenim u netopljivu matricu i pokretljivim protuionima koji mogu prenosi elektricitet. (V. Membrane.)

Djelovanje ionski permselektivne membrane pri elektrodijalizi otopine kuhinjske soli prikazano je shematski na sl. 1. U najjednostavnijem elektrodijalizatoru tri su komore odvojene jedna od druge idealno permselektivnim membranama A i K, od kojih membrana A potpuno propušta anione i potpuno priječi put kationima, membrana K propušta katione i potpuno priječi put anionima, a obje isključuju sve ostale oblike difuzije, npr. običnu dijalizu, osmozu i elektroosmozu (sl. 1 a). Očito je da se, kada je katoda u komori 1 a anoda u komori 3 (sl. 1 b), u komori 2 moraju nagomilavati ekvivalentne količine kationa i aniona, jer im se na njihovim putevima iz te komore u katodnu komoru 1, odn. anodnu komoru 3, isprečuju za njih nepropusne permselektivne membrane. Istovremeno iz komore 3 nestaju količine kationa, a iz komore 1 količine aniona ekvivalentne količinama kationa odn. aniona nagomilanih u komori 2. Ovi procesi očituju se posljedicama poznatih elektrodnih reakcija (tj. razvijanjem vodika i nastajanjem natrijum-hidroksida na katodi i klora, klorovodične kiseline i kisika na anodi) i odgovarajućim elektrodijalitičkim učinkom, tj. povećanjem koncentracije NaCl u komori 2 i njenim smanjenjem u komorama 1 i 3.



Sl. 1. Elektrodijalizator s tri komore. a Stanje kad struja ne teče kroz aparat, b stanje kad struja teče u jednom smjeru (otopina se koncentrira u komori 2), c stanje kad struja teče u suprotnom smjeru (otopina u komori 2 se razrjeđuje), A anionski permselektivna membrana, K kationski permselektivna membrana, 1...3 komore

Kada se, pak, obrne smjer električne struje, tj. kad se elektroda u komori 1 učini anodom a elektroda u komori 3 katodom (sl. 1 c), slobodan je put do elektroda objema vrstama iona koji se nalaze u komori 2, ali kationi ne mogu izaći iz komore 1, a anioni iz komore 3. Zbog toga u elektrodnim reakcijama, koje su jednake kao i u prethodnom slučaju i imaju jednake vanjske posljedice,

učestvuju samo količine ionâ ekvivalentne onima koje su napustile komoru 2. Elektrodijalitički učinak u ovom slučaju jednak je kao u prvom, samo što se koncentriraju (i djelomično elektrolitički razlažu) otopine u komorama 1 i 3, a razrjeđuje otopina u komori 2.

U opisanom slučaju prolaz količine elektriciteta od jednog faradeja (F) izazvat će koncentriranje/razrjeđivanje otopina ekvivalentno jednom molu kuhinjske ili, općenito uzevši, jednako jednom ekvivalentu bilo koje druge soli koja može učestvovati u ovom procesu. Međutim, idealne ionski permselektivne membrane ne postoje; stvarne permselektivne membrane uvijek propuštaju i stanovite količine ionâ čije bi kretanje trebalo da zaustave, a i stanovite količine otapala. Osim toga nastupaju i procesi obične dijalize, osmoze, elektroosmoze i drugi, uslijed čega su pojave u stvarnim permselektivnim membranama daleko složenije nego u opisanom, vrlo pojednostavnjenom slučaju. Ionski permselektivitet membrana ovisi također o vrsti i koncentraciji ionâ koji se nalaze u otopinama s jedne i druge njihove strane. Izlaganje u nastavku ograničava se zbog toga na jedan određeni slučaj.

U stvarnom elektrodijalitskom procesu, uslijed nepotpunog ionskog permselektiviteta membrane, pri prenosu elektriciteta kroz nju učestvuju obje vrste iona. Što je selektivitet membrane veći, u tom prenosu učestvuje veći broj jedne i manji broj druge vrste iona. Elektrodijalitska djelotvornost kationski i anionski permselektivnih membrana (η) može se, prema tome, prikazati izrazima:

$$\eta_k = \frac{M_k - N_k}{M_k + N_k}; \quad \eta_a = \frac{N_a - M_a}{N_a + M_a}, \quad (1)$$

gdje se indeksi k i a odnose na kationski i anionski permselektivnu membranu, a M i N su brojevi kationa i aniona koji prolaze kroz membranu. Na taj način definirani permselektiviteti prikladnije se izražavaju pomoću prenosnih brojeva t_k^+ i t_a^- kationa i aniona kroz kationski, odnosno prenosnih brojeva t_a^+ i t_k^- kationa i aniona kroz anionski permselektivnu membranu. Ti su prenosni brojevi definirani jednadžbama:

$$\begin{aligned} t_k^+ &= \frac{M_k}{M_k + N_k}, & t_k^- &= \frac{N_k}{M_k + N_k}, \\ t_a^+ &= \frac{M_a}{M_a + N_a}, & t_a^- &= \frac{N_a}{M_a + N_a}. \end{aligned} \quad (2)$$

Uvrštenjem jednadžbi (2) u jednadžbe (1) dobiva se:

$$\eta_k = t_k^+ - t_k^-, \quad \eta_a = t_a^+ - t_a^- \quad (3)$$

ili, budući da je očito $t_k^+ + t_k^- = t_a^+ + t_a^- = 1$,

$$\eta_k = 2t_k^+ - 1, \quad \eta_a = 2t_a^+ - 1.$$

Općenito:

$$\eta = 2t^\pm - 1. \quad (4)$$

Prenosni broj kationa, odnosno aniona, neke stvarne ionski permselektivne membrane (t^\pm) može se izračunati iz dva podatka. Prvi je minimalni teorijski (koncentracijski) potencijal procesa elektrodijalaze u kojem membrana učestvuje:

$$E_m = \frac{RT}{F} (2t^\pm - 1) \ln \frac{a_1^\pm}{a_2^\pm}, \quad (5)$$

gdje su R i F konstante (opća plinska i Faradayeva), a a_1^\pm i a_2^\pm aktiviteti otopina s jedne i druge strane membrane (u prvom približenju jednaki koncentracijama). Drugi potrebni podatak je minimalni teorijski potencijal procesa za slučaj da je membrana idealno ionski permselektivna, tj. za slučaj kad je ispunjen uvjet $t^\pm = 2t^\pm - 1 = 1$:

$$E_{m0} = \frac{RT}{F} \ln \frac{a_1^\pm}{a_2^\pm}.$$

Iz posljednje dvije jednadžbe slijedi

$$t^\pm = \frac{E_{m0} + E_m}{2E_{m0}}, \quad (6)$$

pa se t^\pm može izračunati pošto se izmjeri E_m , a E_{m0} odredi iz podataka o aktivitetima. Time je ujedno određen i η , kao osnovni podatak o permselektivitetu.

Uz zahtjev visokog permselektiviteta, membrana za elektrodijalizu treba da zadovoljava i niz drugih zahtjeva. Jedan je od najvažnijih da ima što niži električni otpor, kako bi omogućila slobodan tok protuionima uz nizak trošak energije. Osim toga ona mora biti dovoljno mehanički čvrsta i kemijski otporna prema hidrolizi, oksidaciji i drugim procesima razgradnje, kako bi imala dovoljno dug vijek trajanja u pogonu i ne bi izazivala teškoće pri konstrukciji aparature i održavanju postrojenja. Ona također mora biti otporna prema zagađivanju talozima i začep-ljivanju viševalentnim organskim ionima. U početku su se za elektrodijalizu upotrebljavale membrane od istih tvari kao i za običnu dijalizu (v. TE 3, str. 338). One nisu zadovoljavale ni jedan od napred spomenutih zahtjeva. Membrane izrađene od fino usitnjenih izmjenjivača iona kao što su hidratizirani zeoliti, slijepljeni vezivom od permeabilne smole, bile su razmjerno selektivne, ali nisu imale ostalih potrebnih svojstava. Slične permselektivne membrane, još uvijek heterogene građe, izradivale su se kasnije od zrna sulfoniranih polietilenskih smola također ugrađenih u vezivo, ali ni jedan od tih materijala nije omogućavao proizvodnju filmova zadovoljavajući male debljine i, prema tome, malog otpora. Te poteškoće konačno su savladane kad su proizvedene fenol-formaldehidne i druge smole za kationsku i poliaminske za anionsku izmjenju; te smole predstavljaju temeljne tvari za izradu suvremenih homogenih ionski permselektivnih membrana.

Od čvrstih fenol-formaldehidnih smola za izradu homogenih kationski permselektivnih membrana nisu prikladne ni one koje se dobiju u početnim ni one koje se dobiju u krajnjim stadijima kondenzacije, jer su prve odviše topljive ili odviše sklone bu-brenju, a drugima nedostaje permeabilitet. Za izradu prikladnih kondenzata između ta dva krajnja stanja postoji mnoštvo patenata; zajedničko je svojstvo tih kondenzata da sadrže još dovoljan broj fenolnih i alkoholnih grupa koje im daju tražena svojstva. Ta se svojstva modificiraju zamjenom fenola i/ili formaldehida njihovim homolozima, također kopolimerizacijom s aminima, amidima, mastima, ugljikohidratima, itd.

Uz kondenzate fenola i formaldehida i njihovih derivata, za izradu kationski permselektivnih membrana upotrebljavaju se najviše kopolimeri stirena i divinilbenzena ili vinilklorida, koji se naknadno sulfoniraju. Poznate su i kationski permselektivne membrane od polimera akrilne, metakrilne i maleinske kiseline ili maleinskog anhidrida i od njihovih kopolimera s divinilbenzenom.

Anionski permselektivne membrane najčešće se proizvode od kondenzata koji se dobivaju potpunom ili djelomičnom zamjenom fenola u recepturama za izradu fenol-formaldehidnih smola fenilendiaminom, melaminom ili gvanidinom, a formaldehida tetraetilendiaminom, dietilentriaminom ili tetrametilenpentaminom.

Druga skupina tvari za izradu anionski permselektivnih membrana jesu kondenzati piridina ili njegovih soli s divinilbenzenom, koje se naknadno kvarterniziraju npr. alkilsulfatima ili -kloridima. Alternativno može se prethodno kvarternizirati piridinska komponenta kondenzata, ili se u prethodno halogenirani polimer od kojega je izrađena membrana uvede alifatski tercijarni amin.

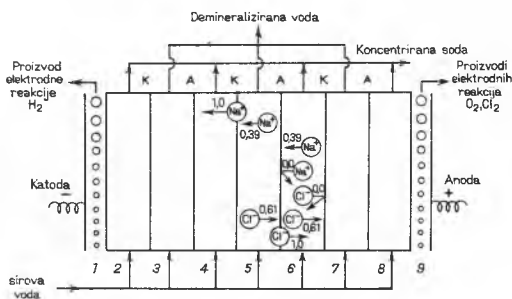
Osim toga takve se membrane mogu proizvesti i kopulacijom alkilen-poliamina na film polimera koji sadrži halogene, npr. polivinilklorida, kloriranog polietilena, klorirane gume, kondenzata alifatskih amina s epiklorhidrinom, nanesenih na celulozni papir, itd.

Višekomorni elektrodijalizator. Svi moderni elektrodijalizatori konstruirani su prema principu višekomornog elektrodijalizatora koji su prvi iznijeli Meyer i Strauss (1940). Djelovanje takvog elektrodijalizatora shematski je prikazano na sl. 2 primjerom elektrodijalaze kuhinjske soli. Membranama koje su izmjenično kationski i anionski permselektivne čelija je podijeljena u veći broj (i do 300) komora. U krajnjim komorama (1 i 9) smještene su elektrode; tu se zbivaju poznate elektrodne reakcije i nastaju tekućine sastava bitno različitog od sastava elektrodijalizirane tekućine. U ostalim komorama, otopina koja se u njih uvodi izmjenično se razrjeđuje (komore 2, 4, 6 i 8) i koncentrira (komore 3, 5 i 7). Po dvije komore, jedna za razrjeđivanje i jedna za koncentriranje, s pripadnim dvjema susjednim mem-

branama, jednom kationski i jednom anionski permselektivnom, tvore element ćelije koji se ponavlja, tzv. *par komora*.

Usljed toga što se u višekomornom elektrodijalizatoru elektrodne reakcije vrše samo u dvije od velikog broja komora, umjesto u dvije komore od triju kao u trokomornom, specifični su pogonski troškovi za takav elektrodijalizator znatno manji. Mnogo se manji dio otopine razlaže elektrodnim reakcijama, pa su manji troškovi skopčani s rukovanjem plinovitim i korozivnim tekućim produktima, manji je specifični potrošak energije (jer se najviše energije nekorisno troši za elektrodne reakcije, a ta je količina energije jednaka za trokomorni aparat s malim učinkom elektrodijalize i za mnogokomorni s velikim učinkom), povratna difuzija vodika i hidroksidnog iona ograničava se na krajeve aparata. Također nabavna cijena i troškovi pogonskog održavanja manji su za elektrodijalizator s velikim brojem komora nego za aparat sa tri komore a istog učinka, jer su ti troškovi za elektrodnu komoru mnogo veći nego za obični par komora. Membrane u susjedstvu elektroda moraju biti posebno zaštićene ili skuplje izvedbe nego ostale membrane zbog veće korozivnosti otopina u elektrodnim komorama: u katodnom prostoru često je potrebno održavati vrlo kiselu reakciju da se spriječi izlučivanje kalcijum-karbonata i magnezijum-hidroksida, a u anodnom prostoru sredina je oksidativna. I pored toga membrane elektrodnih komora kraćeg su vijeka od ostalih. Konačno je u mnogokomornim elektrodijalizatorima u istom volumenu smještena veća membranska površina nego u aparatu sa tri komore, pa je za smještaj elektrodijalizatora građenih po principu Meyera i Straussa za isti učinak potreban manji građevinski prostor.

Iz gore navedenog razumljiva je težnja da se pri projektiranju elektrodijalizatora broj komora u njima poveća što je moguće više. Kako s povećanjem broja komora raste potrebni radni napon elektrodijalizatora a opada iskorištenje struje u njemu, tom su povećanju postavljene granice maksimalnim raspoloživim ili dopuštenim naponom i optimalnim iskorištenjem struje koje osigurava najekonomičniju proizvodnju. Osim toga broj komora ograničen je konstruktivnim faktorima kao što je veličina razvodnika kojom se struja tekućine može jednolično raspodijeliti po komorama, stabilnost uređaja, lakoća montaže i vršenja popravaka, itd. Industrijski elektrodijalizatori imaju obično 50-300 parova komora. Po pravilu, komore su spojene paralelno u odnosu na struje tekućine kroz njih, kako je to prikazano na sl. 2, ali u nekim slučajevima se elektrodijaliza izvodi u stepenima, te je elektrodijalizator podijeljen u grupe komora unutar kojih tekućine struje paralelno, a grupe su spojene jedna s drugom u seriji. Drugi je ekstreman slučaj da su svi pafovi komora među sobom spojeni u seriji. Spajanje u seriji potrebno je uslijed toga što je stepen razrjeđenja/koncentracije koji se može postići jednim prolazom kroz par komora tehnički i ekonomski ograničen.



Sl. 2. Višekomorni elektrodijalizator. A anionski permselektivne membrane, K kationski permselektivne membrane, 1-9 komore (iznad strelica naneseni su prenosni brojevi iona)

Umjesto spajanja u seriji uz kontinuiran rad, ponekad se upotrebljava šaržni pogon, tj. jedna određena količina produkta recirkulira se kroz paralelno spojene komore dijalizatora dok se postigne željeno razrjeđenje ili koncentracija. Sličan efekt može se postići uz kontinuiran rad time što se samo jedan dio produkta recirkulira, pomiješan s količinom dovedene pojne tekućine ekvivalentnom količini produkta koji se ne recirkulira nego iz procesa odvodi (*feed-and-bleed*).

Osnove proračuna elektrodijalizatora. Osnovni proračun dijalizatora odnosi se na određivanje dimenzija para komora, električne energije potrebne za provedbu elektrodijalize i, u vezi s time, potrebnog pada napona i jakosti struje. Jakost struje za jedan par komora iznosi

$$I_p = \frac{U_p dA}{R_p} = \frac{F ds}{E}, \quad (7)$$

gdje je U_p pad električnog napona u jednom paru komora, R_p električni otpor jedinice površine membrane, A površina membrane, s broj ekvivalenata prošlih kroz membranu u jedinici vremena, F Faradayeva konstanta, E prosječno iskorištenje struje u jednom paru komora, jednako

$$E = \frac{F(N_0 - N_1)f_0}{In}, \quad (8)$$

pri čemu su N_0 i N_1 normaliteti struja dijalizata i razrijeđenog difuzata (ekvivalenti u jedinici volumena), f_0 protok struje razrijeđenog difuzata (volumen u jedinici vremena), I ukupna jakost struje kroz n parova komora u elektrodijalizatoru. Iskorištenje E , tj. broj koji kaže koji se udio od ukupne količine elektriciteta prođe kroz par komora iskorištava za povećanje/smanjenje koncentracije dijalizata, mjera je za performansu procesa. Smanjenje tog iskorištenja ukazuje na poremećaje u funkciji aparata jer ga izaziva niski ionski permselektivitet membrana, povratna difuzija elektrolita, prelaz vode iz razrijeđene u koncentriranu struju tekućine uslijed osmoze i elektroosmoze, gubitak električne struje kroz priključene cijevi, i hidrauličko propuštanje između pojedinih komora i prema vani. Tako definirano iskorištenje struje neovisno je o električnom otporu i padu napona kroz elektrodijalizator (prema tome i o utrošku energije), površini membrane i načinu rada elektrodijalizatora.

Budući da je $ds = -f_0 dN_d$, gdje je dN_d promjena koncentracije razrijeđenog difuzata, a otpor kroz membranu može se uzeti da je obrnuto razmjernan normalitetu tog difuzata N_d : $R_p = k/N_d$, može se pisati (v. jedn. 7):

$$\frac{E U_p dA}{f_0 F} = k \frac{dN_d}{N_d},$$

što integrirano između granica 0 i A_p (= površina membrane u jednom paru komora), odn. N_0 i N_1 , daje:

$$\frac{E U_p A_p}{f_0 F} = k \ln \frac{N_0}{N_1} = R_p N_d \ln \frac{N_0}{N_1}. \quad (9)$$

Uz poznate R_p , N_d , E i izabran U_p , može se za željeni omjer razrjeđenja N_0/N_1 s pomoću jednadžbe (9) izračunati potrebna površina membrane u jednom paru komora.

Pad napona U_p , međutim, ili njemu proporcionalna gustoća struje $J = U_p/R_p$, ne može se birati slobodno. Zbog razmjerno visoke cijene opreme za elektrodijalizu, pri proračunavanju dijalizatora ekonomski je povoljno računati sa što većom gustoćom struje. Povećanje gustoće struje, međutim, ograničeno je njezinom vrijednošću pri kojoj nastupa polarizacija graničnih slojeva uz membrane, tzv. *graničnom gustoćom struje* J_{lim} . To je gustoća struje pri kojoj elektrolit iz graničnog sloja uz membranu nestaje tako brzo da se ne može više nadoknaditi difuzijom iz glavne mase tekućine. Polarizacija uzrokuje povećanje otpora i u izvjesnoj mjeri smanjuje iskorištenje struje E , pa time povećava električnu energiju potrebnu za provedbu elektrodijalize, ali najštetnije djeluje kemijskim djelovanjem što ga izaziva na površini anionski permselektivnih membrana. Na strani koncentrirane otopine stvara se uz takvu membranu jak alkalitet nagomilavanjem hidroksidnih iona koji na razrijeđenoj strani nastaju uslijed polarizacije i koji difundiraju kroz membranu. Taj alkalitet može izazvati stvaranje taloga kalcijum-karbonata i magnezijum-hidroksida, koji kao sloj male vodljivosti na površini membrane povećava njezin električni otpor, a ako nastaje u unutrašnjosti membrane, dovodi do njezinog raspadanja. Na strani razrijeđene otopine nestanak pokretljivijih aniona pogoduje taloženju velikih polianiona (huminskih i silicijumskih kiselina, fenola, poliofosfata, proteina i polimernih sastojaka kationski permeabilnih membrana i/ili izmjenjivaca iona), koji također povisuju otpor membrane. Polarizacija postaje znatna kad je koncentracija

elektrolita u komori mala a difuzijski sloj je debeo. Djelovanju male koncentracije elektrolita teško je doskočiti kad je razrijeđena struja tekućine proizvod (npr. pri desalinaciji morske vode), ali debljina difuzijskog sloja može se efikasno smanjivati povećanjem brzine strujanja f_0 (malim razmakom među membranama) i izazivanjem turbulencije. Uz to se nastoji održavanjem gustoće struje ispod granične vrijednosti polarizacija smanjiti toliko da se njezino djelovanje može zanemariti. Mnogi konstruktori računaju s gustoćama struje i za polovicu manjima od granične vrijednosti. Kako su te vrijednosti znatno manje od optimalnih za ekonomski pogon u odsutnosti polarizacije, učinci polarizacije onemogućavaju optimizaciju elektrodijalitskih postrojenja za desalinaciju vode. Gustoće struje u takvim postrojenjima kreću se obično od 10 do 20 mA/cm². U postrojenjima koja preraduju otopine veće električne vodljivosti (npr. pri elektrodijalitskoj koncentraciji morske vode i otkiseljavanju citrusnih sokova) primjenjuju se mnogo veće gustoće struje, većinom i do 60-80 mA/cm². Povišenje gustoće struje u ovim slučajevima ograničeno je drugim faktorima, kao što je sposobnost elektroda i vodova da prenese struje velike jakosti, pregaranje membrana i brtvenica uslijed lokalnog zagrijavanja Jouleovom toplinom.

Ako se u jedn. (9) uvrsti $U_p = J R_p$ i $A_p = h l$ (gdje je h visina a l duljina komore), može se iz nje izvesti izraz:

$$\ln \frac{N_0}{N_1} = \left(\frac{E}{F} \right) \left(\frac{J}{N_d} \right) \left(\frac{h}{f_0} \right) l. \quad (10)$$

Omjer J/N_d ovisan je o linearnoj brzini protjecanja tekućine, odn., uz određenu duljinu i debljinu komore (razmak među membranama), o omjeru f_0/h . Ovisnost između omjera J/N_d i brzine protjecanja tekućine određuje se eksperimentalno. Granična vrijednost $\frac{J_{lim}}{N_d}$ može se odrediti iz jednadžbe

$$\frac{J_{lim}}{N_d} = k' (f_0)^a, \quad (11)$$

gdje je konstanta k' karakteristična za tip elektrodijalizatora a konstanta a za konstrukciju komore. Vrijednost a leži obično između 0,6 i 1,0; većina autora uzima $a = 0,8$. Drugi autori određuju J_{lim} na različite druge načine, npr. kao gustoću struje kod koje u strujama otopina nastupa promjena pH-vrijednosti; ili kao gustoću struje J koja odgovara sjecištu granā krivulje oblika slova V koja prikazuje ovisnost omjera napona i gustoće struje U/J o recipročnoj vrijednosti gustoće struje $1/J$. S pomoću jedn. (10) mogu se za željeni omjer razrjeđenja N_0/N_1 , poznato iskorištenje struje E i pogodno izabrani omjer J/N_d izračunati dimenzije komore bez upotrebe podataka o otporu R_p i potrebnom padu napona U_p .

Utrošak električne energije W_p za prenos elektrolita kroz membranu u jednom paru komora iznosi

$$W_p = U_p I_p.$$

Iz jedn. (9) slijedi da je

$$U_p = F \frac{f_0}{A_p} \left(\ln \frac{N_0}{N_1} \right) \left(\frac{R_p N_d}{E} \right),$$

a iz jedn. (8) da je

$$I_p = \frac{F}{E} f_0 (N_0 - N_1),$$

pa je, prema tome,

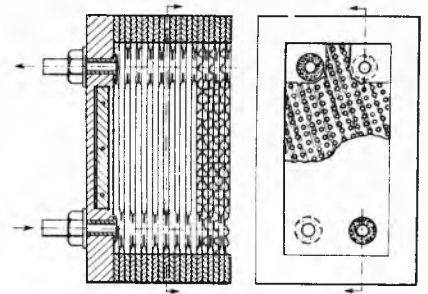
$$W_p = U_p I_p = F^2 \frac{f_0}{A_p} (N_0 - N_1) \left(\ln \frac{N_0}{N_1} \right) \left(\frac{R_p N_d}{E^2} \right). \quad (12)$$

Jedn. (12) pokazala se korisnom za izračunavanje energije potrebne za desalinaciju u određenim granicama koncentracije kad je faktor $R_p N_d/E^2$ unutar tih granica praktično konstantan. Toj energiji treba još pribrojiti energiju potrebnu za elektrodne reakcije, za pogon pumpi, za gubitke u električnim vodovima itd. Osim ove jednadžbe predloženo je za izračunavanje energije potrebne za elektrodijalizu niz drugih formula, izvedenih i empirijskih.

Izvedba elektrodijalizatora. Najprikladniji princip slaganja elektrodijalitskih komora u sklopove isti je kao za običnu

dijalizu (v. TE 3, str. 339), pa su i elektrodijalizatori, kao dijalizatori, vanjštinom vrlo slični filterprešama. Međutim, materijali od kojih se grade okviri membrana elektrodijalizatora i njihovi odstoynjci ne smiju biti vodiči, pa to ne mogu biti metali.

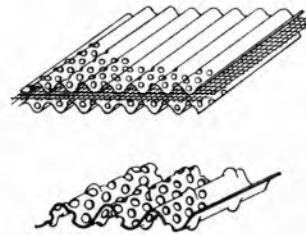
Da bi odstoynjanje između membrana bilo što manje, debljina okvira među membranama je mala (manja od 1/2 cm). U tipovima elektrodijalizatora konstruiranim na principu transverzalnog strujanja kroz komore, kao što je npr. elektrodijalizator po van Hoecku prikazan na slici 3, otvori za ulaz i izlaz jedne struje



Sl. 3. Van Hoeckov sklop

tekućine smješteni su u jednom, dijagonalno suprotnim uglovima membrane, a otvori za ulaz i izlaz druge struje tekućine u preostala dva. Dva međusobno dijagonalno suprotna otvora imaju ojačanje za rubove nalijepljena odnosno uprešana s jedne strane membrane, a

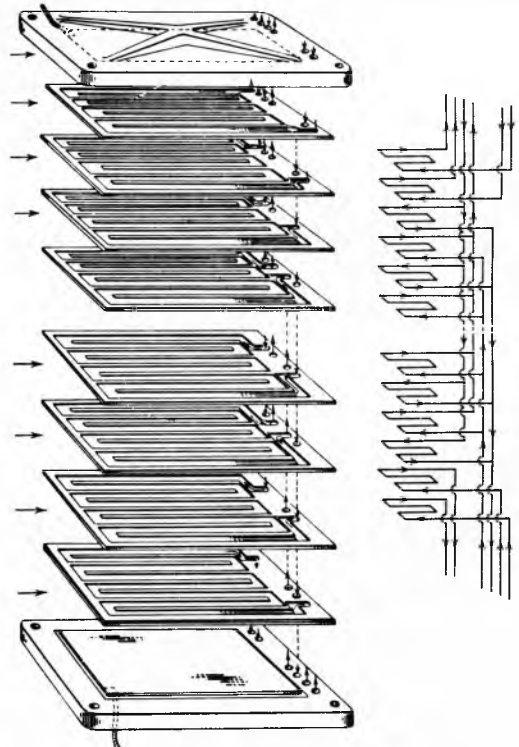
preostala dva s druge. Na susjednoj membrani ta su ojačanja rubova smještena na suprotnim stranama. Na taj način, pri sastavljanju sklopa, ojačanja susjednih otvora membrana spajaju se i tvore nezavisne dovode i odvode tekućina. Separatori (odstoynjci) za membrane koji se upotrebljavaju u komorama ovakve konstrukcije prikazani su u slici 4. To su valovite folije od krutog polivinil-



Sl. 4. Van Hoeckovi odstoynjci

klorida providene rupama. One služe i kao izazivači turbulencije.

U drugim konstrukcijama primjenjuje se princip zmijolikog kretanja otopina kroz komore uz razmjerno velike brzine strujanja.



Sl. 5. Elektrodijalizator po Kollman za postizanje visokih brzina strujanja

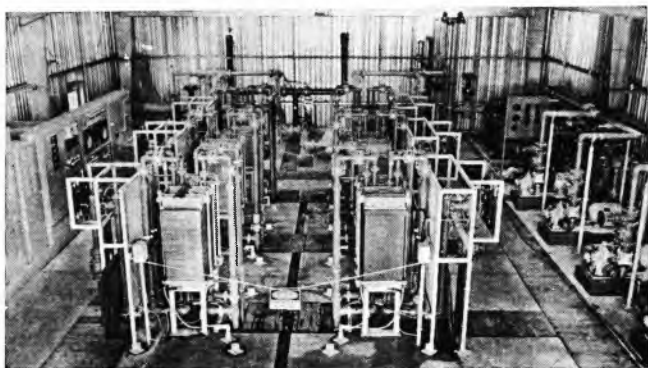
nja (~ 40 cm/s). To se postiže pomoću odstojnika koji istovremeno služe za brtvljenje među okvirima, a izrađeni su od polivinilskih folija iz kojih su izrezani putovi otopina. Izrezana površina je oko 65% od ukupne površine membrane. Jedan takav elektrodijalizator (po Kollsmannu) prikazan je na slici 5.

Dok u običnim dijalizatorima membrane moraju biti smještene vertikalno, da bi se pri protjecanju tekućine iskoristila sila teže, u elektrodijalizatorima membrane mogu biti smještene i horizontalno; radi smanjenja tlocrtna površine one se često tako i smještaju.

Primjena elektrodijalize u praksi. Elektrodijaliza se danas može na različite načine upotrijebiti za postizanje niza ciljeva, kao što su desalinacija vode, priprema pojne vode za parne kotlove, koncentriranje morske vode, otpeljavanje otopina šećera, otkiseljavanje citrusnih sokova, dekontaminacija mlijeka, desalinacija surutke, provedba metateze, rekuperacija sastojaka iz otpadne sulfite podlužnice u proizvodnji celuloze, rekuperacija kiseline od dekapiranja metala, itd. Od svih tih područja primjene daleko je najvažnija desalinacija morske vode.

Primjena elektrodijalize u desalinaciji morske vode. Priprema pitke vode elektrodijalizom morske vode zahtijeva desalinaciju od ~ 35‰, na najviše 0,5‰. Minimalni izotermni rad za to je ~ 0,69 kWh/m³ proizvoda, ali se pod praktičnim uvjetima troši 38 do 76 kWh. S obzirom na to da se elektrodijalizatori najčešće konstruiraju za odnos desalinacije 2 : 1, tj. za smanjivanje sadržaja soli na polovicu, za takav slučaj potreban je velik broj aparata spojenih u seriji, što znači vrlo skupo postrojenje. Iz tih razloga je priprema pitke vode desalacijom putem elektrodijalize morske vode, iako tehnički provediva, danas još ekonomski neostvarljiva i ograničava se na slučajeve gdje su drugi postupci desalinacije neprimjenjivi, a radi se o malim kapacitetima. Međutim, elektrodijaliza je najperspektivniji postupak za pripremu pitke vode iz brakičnih voda čiji se salinitet kreće od 1 do 5‰ Cl, jer se pri tome najčešće radi o smanjenju sadržaja otopljenih čvrstih tvari od ~ 2‰ na 0,5‰, tj. svega u omjeru ~ 4 : 1.

U posljednje je vrijeme utvrđeno da pri povišenju temperature na ~ 70 °C otpor membrana jako opada, te se mogu pri elektrodijalizi povišenjem temperature postići uštede potrebne električne energije i do 70%. Proračuni su pokazali da bi uslijed toga elektrodijaliza u 8 stepena, spregnuta s toplanom za proizvodnju potrebne električne energije i ogrijevne pare, mogla ekonomično proizvoditi ~ 3000 m³/h pitke vode i iz nerazrijeđene morske vode.



Sl. 6. Postrojenje za desalinaciju vode u Buckeyeu u Arizoni (USA) s dnevnim kapacitetom od 2300 m³ vode za piće

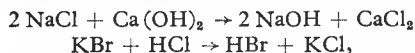
Okolnost da se elektrodijalizom desalinacija vode postiže tako da se uklanja razmjerno mala količina soli iz vode, umjesto da se odvajaju velike količine vode od soli, glavna je njena prednost pred drugim postupcima koji se upotrebljavaju za tu svrhu. Za ekonomičnost primjene elektrodijalize u ovom području najvažniji su salinitet sirove vode i kapacitet postrojenja. Prema procjenama nekih autora iz USA, ukupni troškovi desalinacije elektrodijalizom rastu kao 0,6-ta potencija saliniteta i opadaju kao 0,2-ta potencija kapaciteta. (V. *Opskrba vodom*.) Sl. 6 prikazuje postrojenje (Buckeye, Arizona, USA) za proizvodnju 2300 m³ slatke vode dnevno postupkom elektrodijalize.

U novije vrijeme sagrađena su, među ostalim, takva postrojenja u Siesta Key, Florida, USA, s kapacitetom 8 327 m³/d, i u Bengaziju, Libija, s kapacitetom 19 200 m³/d.

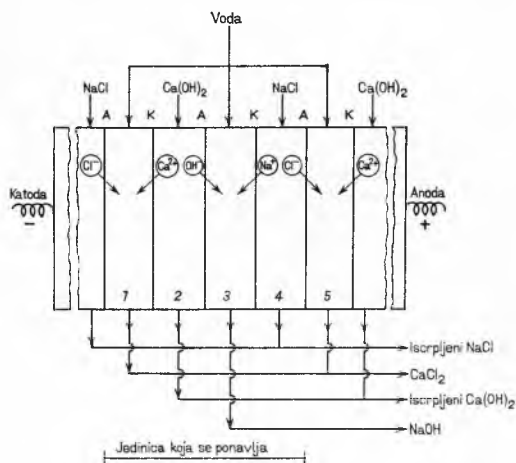
Osim za pripremu pitke vode desalacijom brakičnih voda, elektrodijaliza dolazi u obzir i kao operacija za *desalinaciju otpadnih voda* radi smanjenja zagađivanja prirodnih vodenih tokova i za *predobradu sirove vode za pojenje parnih kotlova* u sprezi s ionskim izmjenjivačima kad je salinitet iznad 0,2...0,5‰.

Primjena elektrodijalize za *koncentriranje morske vode* dolazi u obzir npr. za dobivanje otopina NaCl namijenjenih daljoj preradi u kaustičnu sodu i klor u živinim elektroliznim ćelijama. U jednoj japanskoj tvornici dobiva se na taj način otopina sa 15...20% soli iz morske vode iz koje je prethodno istaložen kalcijum-sulfat.

U elektrodijalizatoru mogu se provoditi *reakcije dvostruke izmjene iona (metateze)*, kao što su ove:

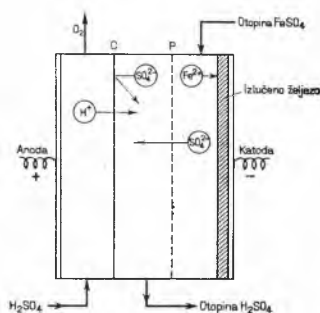


i to u aparaturi čije je djelovanje prikazano shemom na slici 7.



Sl. 7. Metateza elektrodijalizom. A anionski permselektivna membrana, K kationski permselektivna membrana, 1...5 komore

Za *rekuperaciju kiselina i metala iz otpadnih otopina od dekapiranja* postoji niz elektrodijalitskih postupaka. Za to obično služe elektrodijalizatori sa dvije ili tri komore. Shema djelovanja jednog elektrodijalizatora sa tri komore za rekuperaciju željeza i sumporne kiseline iz otpadne otopine od dekapiranja prikazana je na sl. 8. On ima jednu kationsku permselektivnu (C) i jednu poroznu membranu (P), a radi u sprezi s uređajima za koncentriranje otpadne otopine, kristalizaciju, izdvajanje fero-sulfata centrifugiranjem i njegovo ponovno otapanje. Tim operacijama priređena otopina uvodi se u katodni prostor. Željezo se izlučuje na katodi, a sulfatni ioni koji dopijevaju usredišnji prostor susreću se tu s vodikovim ionima nastalim u anodnom prostoru iz vode, tj. nastaje sumporna kiselina. Jedan dio te kiseline recirkulira se u anodni prostor, da se postigne dovoljno velika vodljivost.



Sl. 8. Elektrodijalizator s tri komore za rekuperaciju kiseline za dekapiranje. C kationski permselektivna membrana, P porozna membrana

Elektrodijalizom mogu se iz otopina dobivenih izluživanjem šećerne trske i šećerne repe ukloniti anorganski sastojci (»pepeo«) i time povećati količina šećera koja iz njih kristalizira (*otpeljavanje*). Glavnu poteškoću pri tome predstavlja začepljivanje anionski permselektivnih membrana velikim organskim ionima i karbonatskim talozima. Ti se problemi rješavaju zakiseljavanjem struje otopine šećera.

Za *otkiseljavanje citrusnih sokova*, koje se provodi u USA da bi se mogao smanjiti dodatak šećera, služe elektrodijalizatori

u kojima se nalaze samo anionski permselektivne membrane, a u komore među njima vodi se izmjenično sok i otopina kalcijum-hidroksida. Kroz membrane nastaje zamjena citratnog iona u soku za hidroksidni, čime se postiže smanjenje kiselosti od 20-40%.

U USA se predviđa *dekontaminacija mlijeka* od radioaktivnog stroncijuma ^{90}Sr elektrodijalizatorima u kojima se nalaze samo kationski permselektivne membrane kroz koje se ioni stroncijuma zamjenjuju ionima kalcijuma.

U jednom nizozemskom poduzeću koje se bavi preradom mlijeka, elektrodijalizom se *desalinira surutka* da bi se dobila hrana sa sadržajem soli sličnim kao u majčinom mlijeku.

U USA izrađen je postupak za *rekuperaciju sastojaka otpadne sulfatne podlužnice* od proizvodnje celuloze. Pri tome se koncentrirana podlužnica elektrodijalizom rastavlja u tri frakcije: čistu vodenu otopinu kemikalija upotrijebljenih za odvajanje celuloze od lignina (natrijum-, magnezijum-, kalcijum- ili amonijum-sulfit), ligninsulfonske kiseline i šećeri, niskomolekularne organske kiseline.

Osim u navedenim područjima, elektrodijaliza se može korisno upotrijebiti i za niz drugih svrha, npr. demineralizaciju sirovih amino-kiselina, proizvodnju nekih hormona, u laboratorijskoj tehnici, itd.

LIT.: P. H. Prausnitz, J. Reistötter, Elektrophorese, Elektroosmose, Elektrodialyse in Flüssigkeiten, Dresden 1931. — J. R. Wilson (ed.), Demineralization by electrodialysis, London 1960. — S. B. Tuwiner, Diffusion and membrane technology, New York 1962. — W. K. W. Chen, Electrodialysis, u djelu: Kirk-Othmer, Encyclopedia of chemical technology, vol. 7, New York 1965.

Ž. Viličić

ELEKTROENERGETSKI SISTEM sastoji se od elektrana za proizvodnju električne energije, rasklopnih postrojenja za razvod i transformaciju električne energije, vodova za prijenos i razdiobu električne energije, te potrošačkih uređaja, motora i aparata. Svi su dijelovi elektroenergetskog sistema električki ili magnetski među sobom tako spojeni da električne prilike u jednom dijelu sistema ovise o prilikama u svim ostalim dijelovima. Sve elektrane u sistemu rade paralelno spojene s točno istom frekvencijom. Danas su u svim razvijenijim zemljama praktički sve elektrane spojene u elektroenergetski sistem bez obzira na vlasnike elektrana i vodova, i bez obzira na organizacione oblike elektroprivrede. Osim toga su i elektroenergetski sistemi mnogih zemalja jedni s drugima povezani, pa u tim slučajevima jedan elektroenergetski sistem pokriva i više zemalja.

Prednosti povezivanja elektrana i njihovih opskrbnih područja u elektroenergetski sistem. Povezivanje elektrana i povezivanje više područja u elektroenergetski sistem ima niz prednosti u usporedbi s odvojenim pogonom elektrana ili odvojenom opskrbom manjih područja. Povećanjem broja raznovrsnih potrošača, čija potrošnja varira prema satu, danu, godišnjem dobu, klimatskim prilikama i karakteristikama potrošnje, postiže se da je maksimalno opterećenje sistema manje od zbroja maksimalnih opterećenja pojedinih područja, pa je za zadovoljenje potražnje potrebna i manja izgradnja elektrana. U većem elektroenergetskom sistemu radi velik broj elektrana i još veći broj agre-

Tablica 1
RAZVOJ POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE
U SVIJETU, EVROPI, SSSR i USA

Godina	Potrošnja električne energije (10 ⁶ kWh) ¹				Potrošnja električne energije po stanovniku ¹ (kWh/stan.)			
	Svijet	Evropa ²	SSSR	USA	Svijet	Evropa ²	SSSR	USA
1946	655	203	46	271	280	510	270	1920
1951	1077	331	97	436	440	790	530	2830
1956	1692	490	192	689	618	1124	960	4081
1961	2431	732	328	884	799	1563	1502	4809
1966	3602	1027	543	1250	1077	2133	2329	6344
1967	3864	1091	586	1317	1130	2252	2487	6614
1968	4160	1180	636	1432	1196	2416	2675	7121
1969	4495	1266	685	1551	1265	2568	2847	7632
1970 ³	4790	1358	740	1675	1324	2740	3044	8162

¹ uključeni gubici u mreži i potrošnja u pumpno-akumulacionim postrojenjima
² bez SSSR
³ provizorni podaci

Tablica 2
GODIŠNJA POTROŠNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE U ZEMLJAMA
EVROPE 1968 I PROSJEČNI GODIŠNJI PORAST U RAZDOBLJU
1959-1968

	Godišnja potrošnja 10 ⁶ kWh	Godišnja potrošnja po stanovniku kWh	Godišnji prosječni porast potrošnje 1958-68 %
Norveška	57 129	14 959	7,6
Švedska	57 948	7 324	7,0
Luksemburg	3 080	6 604	9,6
Švicarska	25 210	4 113	4,8
Istočna Njemačka	63 227	3 948	6,9
Finska	17 559	3 868	8,7
Velika Britanija	209 909	3 797	6,9
Island	729	3 645	4,7
Zapadna Njemačka	196 765	3 392	7,9
Austrija	21 216	2 886	5,7
Čehoslovačka	39 852	2 774	8,2
SSSR	636 200	2 675	10,4
Belgija	24 995	2 595	7,1
Nizozemska	31 573	2 478	9,0
Danska	11 835	2 425	10,5
Francuska	119 404	2 372	6,8
Italija	102 365	1 941	8,4
Bugarska	15 752	1 883	18,8
Poljska	51 768	1 607	8,9
Mađarska	14 100	1 374	8,5
Rumunjska	25 605	1 320	15,3
Španjolska	42 123	1 300	10,3
Jugoslavija	20 935	1 036	11,6
Portugal	6 223	655	8,5
Turska	6 666	199	11,9

Tablica 3
MAKSIMALNA SNAGA U TRAJNOM POGONU NA PRAGU
ELEKTRANA (NA KRAJU 1968)

	Snaga termoelektrana MW	Snaga hidroelektrana MW	Snaga nuklearnih elektrana MW	Ukupno MW
Austrija	2 235	4 821	—	7 056
Belgija	6 004	62	11	6 077
Bugarska	2 691	771	—	3 462
Čehoslovačka	7 963	1 439	—	9 402
Danska	3 620	8	—	3 628
Finska	2 547	2 105	—	4 652
Francuska	16 588	14 268	1 146	32 002
Grčka	1 082	600	—	1 682
Irski	1 027	219	—	1 246
Island	86	127	—	213
Italija	13 432	13 035	945	27 412
Jugoslavija	2 042	2 821	—	4 973
Luksemburg	252	903 ¹	—	1 155
Mađarska	2 303	20	—	2 323
Nizozemska	8 880	—	50	8 930
Njemačka DR	—	—	—	10 829 ¹
Njemačka, SR	38 360	4 630	820	43 810
Norveška	120	11 955	—	12 075
Poljska	11 059	454	—	11 513
Portugal	566	1 532	—	2 098
Rumunjska	4 780	831	—	5 611
SSSR	115 469	27 035	1 184 ⁴	143 688
Španjolska	4 845	8 473	153	13 471
Švedska	3 298	10 423	10	13 293
Švicarska	560	8 940	—	9 500
Turska	1 145	736	—	1 881
Velika Britanija	49 557	2 158	3 972	55 687
USA	254 661	51 870	2 817	309 348

¹ pumpno-akumulaciono postrojenje Vianden
² nema podataka
³ podatak za 1967
⁴ procjena

gata u elektranama, pa je za istu sigurnost opskrbe potrošača potrebna manja rezerva nego u malom sistemu s malim brojem agregata u termoelektranama. Zbog toga je u većem sistemu potrebna manja instalirana snaga elektrana nego što bi iznosila suma instaliranih snaga kad bi se uz istu sigurnost željela opskrbiti pojedina izolirana područja toga elektroenergetskog sistema. Osim toga u većem sistemu, uzevši u obzir potrebnu rezervu snage, mogu se graditi agregati većih snaga, čime se smanjuju potrebne investicije za izgradnju elektrana, jer su specifične investicije po jedinici snage agregata to manje što je snaga agregata veća. Povezivanjem hidroelektrana u sistem na većem području postiže se da se elektrane među sobom dopunjuju zbog različitog vremenskog rasporeda protoka. To ima za posljedicu smanjenje potrebne izgradnje elektrana za opskrbu iste potrošnje, jer se na taj način