

vanje. Kapacitet proizvodnih linija za živine visokotlačne žarulje iznosi danas do 500 kom/h, uz najveće angažiranje radne snage za operacije elektrozavarivanja, koji procesi nisu automatizirani, već se rade ručno. Živine visokotlačne žarulje proizvode se polaganije i s mnogo više pažnje nego drugi izvori svjetla zbog vrlo visoke cijene dijelova od kojih su sastavljene.

Ispitivanje živinih žarulja sastoji se u mjerenju napona paljenja, gorenja i gašenja, svjetlosnog toka, pada svjetlosnog toka trajnosti. Ispitivanje trajnosti vrlo je skupo zbog toga što su živine žarulje snažni izvori svjetla koji troše mnogo električne energije, a i zbog toga što se ne mogu ispitivati po skraćenom postupku, već treba da gore 6–10 hiljada sati.

Proizvodnja ostalih izvora svjetlosti. Nemoguće je ukratko opisati proizvodnju svih izvora svjetla jer ih ima vrlo mnogo, ali osnovni principi proizvodnje i tehnologije uglavnom su za sve isti kao u proizvodnji opisanih osnovnih izvora svjetla. Ipak, za proizvodnju nekih izvora svjetla postoje specifične operacije, kao, na primjer, optičko centriranje spirale automobilskih žarulja s obzirom na podnožak, odnosno budući reflektor. Kod džepnih žarulja za ručne svjetiljke također je vrlo važno centriranje, oblik i dimenzije spirale, s obzirom na smještaj i oblik zrcala u svjetiljci. Kod projekcionih žarulja gotovo svih tipova fokusiranje i tačno održavanje osnovnih dimenzija smještaja žarne niti od posebne je važnosti. U proizvodnji halogenih žarulja punjenje se plinom (Ar, Br, J) vrši na temperaturi tekućeg dušika. Tako se cjevčica za ispuštanje može zataliti pod pritiskom plina od svega 650 mmHg, a na radnoj temperaturi od 200–300°C tlak poraste na 3 at i više. Posebne konstrukcije i ispitivanja zahtijevaju, na primjer, žarulje za semafore sa vrlo velikim brojem prekida, žarulje za upotrebu na strojevima, koje treba da budu otporne prema potresima i vibracijama, žarulje za upotrebu na brodovima, koje treba da budu posebno dobro izolirane, itd.

B. Jemrić

LIT.: T. G. Spreadbury, Electric discharge lighting, London 1946. — M. Fahslander, Residential lighting, New York 1947. — Ch. L. Amick, Fluorescent lighting manual, New York 1947. — D. Matanović, Tehnika rasvjete, Zagreb 1948. — A. A. Bright, Electric lamp industry, New York 1949. — H. A. Miller, Cold cathode fluorescent lighting, London 1949. — J. O. Kraehenbuehl, Electric illumination, New York 1951. — W. E. Barrows, Light, photometry, and illumination engineering, New York 1951. — H. M. Sharp, Introduction to lighting, New York 1951. — R. Cadiergues, L'éclairage par fluorescence, Paris 1951. — R. O. Ackerley, The science of artificial lighting, London 1951. — W. R. Stevens, Principles of lighting, London 1951. — D. A. Clarke, Modern electric lamps, London 1952. — R. G. Weigel, Grundzüge der Lichttechnik, Essen 1952. — W. Köhler, Lichttechnik, Berlin 1952. — W. B. Boast, Illumination engineering, New York 1953. — J. Jansen, Beleuchtungstechnik, 3 Bde, Eindhoven 1954. — E. Neumann, Die physikalischen Grundlagen der Leuchtstofflampen, Berlin 1954. — D. Zwickler, Fluoreszent-Beleuchtung, 1954. — N. Troppen, Aktuelle Fragen der Straßenbeleuchtung, Berlin 1954. — W. Strahinger, Laternen und Leuchten, Frankfurt/Main 1954. — A. D. S. Atkinson, Modern fluorescent lighting, London 1955. — A. P. Iwanow, Elektrische Lichtquellen. Gasentladungslampen, Berlin 1955. — H. Zijl, Leitfaden der Lichttechnik, 1955. — R. Grandi, Illuminazione sportiva, Milano 1956. — J. Jansen, Technique de l'éclairage, 3 vol., Eindhoven 1956. — K. P. R. Schmidt, Beleuchtungstechnik im Betrieb, Berlin 1956. — J. W. T. Walsh, Planned artificial lighting, London 1956. — Y. Le Grand, Light, colour and vision (prijevod s francuskog), New York 1957. — W. Köhler, Die Beleuchtung von Schnellverkehrsstraßen, Bielefeld 1958. — R. van der Veen, G. Meijer, Licht und Pflanzen, Eindhoven 1958. — Illuminating Engineering Society, Lighting in corrosive, flammable and explosive situations, London 1958. — W. Elenbaas, Fluorescent lamps and lighting, Eindhoven 1959. — C. Novelli, V. Gramsci, Illuminazione stradale, Milano 1960. — Parry Moon, The scientific basis of illuminating engineering, New York 1961. — W. Elenbaas, Leuchtstofflampen und ihre Anwendung, Eindhoven 1962. — E. Rebske, Lampen, Laternen, Leuchten, Stuttgart 1962. — C. H. Sturm, Vorschaltgeräte und Schaltungen für Niederspannungs-Entladungslampen, Essen 1963. — J. W. Favie, C. D. Damne, G. Hietbrink, N. J. Quaedflieg, Eclairage, Eindhoven 1964. — D. Gligo, Zaštita vida na radu, Zagreb 1964. — Elektrokovina, Električno osvjjetljenje u školama, Maribor 1964. — J. Boud, L'éclairage dans la maison, Eindhoven 1964. — C. Clerici, Illuminotecnica, Milano 1965. — M. Dérivière, Lampes à iode - lampes à iodure, Paris 1965. — M. Dérivière, La technique de l'éclairage, Paris 1965. — M. Reck, Lichttechnik, Braunschweig 1966. — W. Elenbaas, Quecksilberdampf-Hochdrucklampen, Eindhoven 1966. — J. Rieck, Lichttechnik, Braunschweig 1966. — O. Piškorić, Rasvjeta u industriji, Zagreb 1966. — M. Cohu, Sources lumineuses, Paris 1966. — H. Hewit, A. S. Vause, Lamps and lighting, London 1966. — The British Lighting Council, Lighting in industry, London 1967. — H. A. E. Keitz, Lichtberechnungen und Lichtmessungen, Eindhoven 1967. — Illuminating Engineering Society, IES Lighting handbook, New York 1967. — J. Riege, A. Kurrek, Handbuch der lichttechnischen Literatur, Berlin 1966/68. — H. Prochazka, Praxis der Industriebeleuchtung, Wien 1968. — H. Cotton, Principles of illumination, New York 1968. — VEM-Kollektiv, Handbuch der Beleuchtungstechnik, Berlin 1968. — M. G. Lurie, Л. А. Райцельский, Л. А. Циперман, Осветительные установки, Москва 1968. — Н. М. Гусев, Н. Н. Кибеев, Освещение промышленных зданий, Москва 1968. — В. В. Федоров, Производство люминесцентных ламп, Москва 1969. — M. D. W. Pritchard, Lighting, London 1969. — R. G. Hopkinson, Lighting and seeing, London 1969. — B. Steck, Lichttechnik im Betrieb, München 1969. — E. Wittig, Einführung in die Beleuchtungstechnik, 1969. — H. Mehnert, Lichtmessung, Lichtführung, Lichtgestaltung, 1969. — J. Jemrić, Priručnik električne rasvjete, Zagreb 1970. — H. Prochazka, Praksa industrijske rasvjete (prijevod s njemačkog), Zagreb 1971.

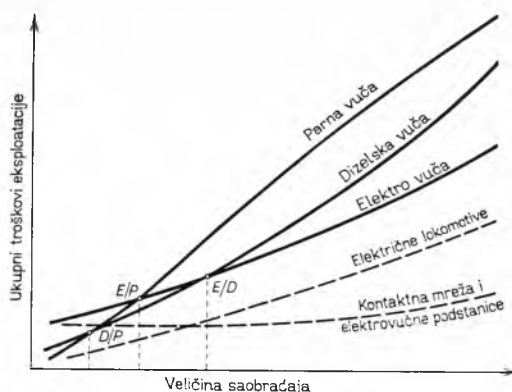
R. Žurić B. Jemrić

ELEKTRIFIKACIJA ŽELJEZNICA, opremanje željezničkih pruga i stanica svim onim električnim postrojenjima i uređajima koji su potrebni za primjenu električne vuče.

Uvođenje električne vuče na željeznica predstavlja prema današnjem shvaćanju najviše tehničko dostignuće u željezničkoj vuči jer se njome ostvaruje povoljnije iskorištavanje energetske izvora; bolji kvalitet prevoza putnika i robe; povećanje brzine prevoza, udobnosti, čistoće i sigurnosti; veće i šire saobraćajne mogućnosti zbog primjene brzih i težih vlakova; povećanje propusne i prevozne moći pruga po broju vlakova i količini tereta. Elektrifikacija željeznica je i najekonomičnije rješenje čim su ispunjeni određeni tehnički i ekonomski uvjeti.

Osnovni je tehnički preduvjet za elektrifikaciju željezničkih pruga da postoje dovoljni izvori energije za napajanje električnih lokomotiva. U ranijem razdoblju elektrifikacije električnu energiju za tu svrhu dobivala je željeznica iz vlastitih elektrana, u današnje vrijeme ona je obično dobiva iz nacionalne elektroprivredne mreže. Količina električne energije za elektrificirane pruge i u državama s visokim stepenom elektrifikacije željeznica samo je mali dio (do 5%) ukupne potrošnje električne energije; stoga je elektrifikacija željeznica tehnički moguća u većini zemalja gdje postoji elektroprivredna mreža. Elektrifikacija željeznica povoljna je i za proizvođača električne energije jer električne željeznice troše energiju i danju i noću. Osnovni je ekonomski uvjet za elektrifikaciju željezničke pruge da jačina saobraćaja na njoj bude dovoljno velika.

Ukupni troškovi eksploatacije željeznica bitno zavise od vrste vuče, najviše zbog toga što na njih utječu prvenstveno pogonski troškovi, a u ovima predstavljaju troškovi za pogonsku energiju najznačajniju stavku. Iz istog razloga troškovi eksploatacije željezničke pruge rastu s jačinom saobraćaja, ali rastu mnogo sporije kad je vuča električna nego kad je parna ili dizelska, — zbog toga što je cijena električne energije po pravilu niža od cijene energije iz uglja ili plinskog ulja u parnoj odn. dizelskoj lokomotivi, a i zbog toga što su također svi ostali eksploatacioni troškovi elektrificiranih pruga manji nego pruga sa parnom ili dizelskom vučom. Električna vuča ima jeftinije održavanje, lokomotive imaju veći korisni rad (ne treba im priprema za vožnju), bolji stepen iskorištenja pogonske energije, manju specifičnu potrošnju i manji utrošak energije. Zbog povećanja brzine prevoza i propusne moći pruge električna vuča treba manje lokomotiva i vagona za prevoz istog tereta, a time i manje osoblja. U odnosu prema parnoj vuči električna vuča ostvaruje uštede i time što otpadaju troškovi za prevoz uglja i što se za taj prevoz više ne angažiraju vagoni. Sve to utječe na to da pogonski troškovi električne vuče ne rastu tako brzo s jačinom saobraćaja kao pogonski troškovi parne i dizelske vuče (sl. 1). Međutim, pri maloj



Sl. 1. Ukupni godišnji troškovi parne dizelske i električne vuče u ovisnosti o veličini saobraćaja

jačini saobraćaja električnom vučom, troškovi amortizacije, ukaćivanja itd. prevladavaju u ukupnim troškovima nad pogonskim troškovima zbog toga što su investicije za električne željeznice veće nego za željeznice s parnom ili dizelskom vučom. Stoga su pri malom i srednjem saobraćaju ukupni eksploatacioni troškovi parne i/ili dizelske vuče manji od troškova električne vuče (na-

lijevo od tačka E/P odn. E/D u dijagramu na sl. 1). Odatle spomenuti osnovni ekonomski uvjet za elektrifikaciju pruga: veličina saobraćaja na njima mora biti dovoljno velika. Taj je uvjet ispunjen prvenstveno na glavnim (magistralnim) prugama. Takve pruge obično čine manji dio željezničke mreže ($\sim 20\text{--}35\%$), ali se na njima ostvaruje iznad polovice do dvije trećine čitavog željezničkog prevoza. Stoga je u prvome redu elektrifikacija takvih pruga ekonomski opravdana. Uštedama ostvarenim prelazom od parne na električnu vuču sredstva uložena u elektrifikaciju tih pruga otplaćuju se za nekoliko godina.

Na brdskim prugama na kojima se odvija velik saobraćaj, a koje su često usko grlo u željezničkom prevozu, također je opravdana elektrifikacija. Uvođenjem električne vuče na njima znatno se povećava prevozna i propusna moć pruge, proširuje se saobraćajni kapacitet pruge i povećavaju brzine.

Prigradske pruge velikih gradova, gdje se svakodnevno prevozi mnoštvo putnika, također se često elektrificiraju, jer samo električna vuča omogućava znatno ubrzanje pri polasku, velike brzine vožnje, vuču dugih vlakova s velikim brojem putnika i veliku učestalost vlakova. Osim toga je ekonomična i pruža udobnost.

Razvoj elektrifikacije željeznica i električne vuče kreao se od njenih prvih primjena pa dalje usporedno s razvojem elektrotehnike i struje. Elektrifikacija željeznica zavisila je stoga od mogućnosti proizvodnje i prenosa električne energije, a razvoj vučnog motora od trenutnog stanja razvoja elektromotornih pogona. Razvoj elektrifikacije željeznica kretao se u nekoliko pravaca, u traženju najprikladnijeg sistema napajanja, u primjeni najpogodnijeg elektromotora za vuču i rješavanju svih problema u vezi s pretvaranjem struje i njezinim dovođenjem na lokomotivu.

Razvoj elektrifikacije željeznica može se podijeliti u dva glavna perioda. Prvi obuhvaća razdoblje od 1879 do 1920, tj. od prvih početaka električne vuče do njezine afirmacije i pobjede u odnosu prema parnoj vuči. U tom razdoblju nastaju prvi sistemi elektrifikacije željeznica i ostvaruju se prve elektrificirane pruge gradskih tramvaja, podzemnih željeznica velegradova i željezničkih pruga. U drugom razdoblju, od dvadesetih godina ovog stoljeća do danas, elektrifikacija željezničkih pruga razvija se i širi u punoj mjeri na evropskim željeznicama i nekim drugim krajevima svijeta, usavršavaju se već postojeći ili uvode novi sistemi električne vuče a počinju se primjenjivati i višesistemske električne lokomotive za 2, 3 ili čak 4 sistema elektrovođe, što praktički omogućuje nesmetanu transevropsku vuču nekih važnijih međunarodnih putničkih vlakova istom lokomotivom.

Prvom razdoblju elektrovođe prethodili su različiti pokušaji, npr. s elektromotorima na principu elektromagneta koji su se naizmjenice privlačili i odbijali i bili napajani iz galvanskih baterija. Oni su se primjenjivali od 1830 do 1848 na nekim malim lokomotivama Engleza R. Davidsona, Amerikanca Th. Davenporta i na motornom čamcu Rusa M. H. Jakobja na Nevi (v. članak *Električni strojevi* str. 172, sl. 75). Električno napajanje preko tračnica upotrebljavali su 1850 i 1876 Amerikanac Farmer i Rus F. A. Pirockij.

Zahvaljujući pronalasku električnog istosmjernog generatora, tzv. dinamo-stroja (Gramme 1870), i električne samouzbuđe (W. v. Siemens 1867) bio je utrt put za konstrukciju prvog serijskog istosmjernog motora.

Prva mala električna lokomotiva izrađena od firme Siemens & Halske izložena je na industrijskoj izložbi u Berlinu 1879. Ta lokomotiva s istosmjernim serijskim motorom veoma male snage (~ 3 KS) i napona 150 V vukla je na uskom kružnom kolosijeku dugom 300 m tri vagončića sa 18 osoba brzinom 7 km/h. Napajanje je vršeno uz pomoć treće izolirane tračnice. Kasnije je ta lokomotiva smještena u tehnički muzej u Münchenu. Ovo simbolički predstavlja početak električne vuče.

Prvi je žičani kontakti vod iznad vozila izvela firma Siemens & Halske na svjetskoj izložbi u Parizu 1881. Istosmjerni napon 150 V s motorom od 7,5 KS primjenjuje se od te godine kao jedini napon za vuču tramvaja sve do pojave napona 600 V (Edison 1888). Napon 150 V upotrebljava se u prvom periodu razvoja samo za električnu tramvajsku vuču, novi istosmjerni napon 600 V, pak, primjenjuje se prvenstveno za brze podzemne i nadzemne gradske željeznice.

Snaga serijskog istosmjernog vučnog motora pri naponu od 150 V ne prelazi 7,5 KS, a pri naponu od 600 V ne prelazi 40 KS, zbog toga što do tada problemi komutacije nisu bili riješeni i što motor nije imao pomoćnih polova ni kompenzacionih namotaja. I pored toga primjena električnog tramvaja u USA i Kanadi naglo se razvija, tako da se 1894 nalazi tamo u prometu već 12 000 km tramvajskih pruga, dok ih u Evropi u isto vrijeme ima samo 300 km.

Istosmjerni napon 600 V za elektrovođu naglo se primjenjuje u elektrifikaciji podzemnih i nadzemnih željeznica svjetskih velegradova: New Yorka 1888, Londona 1890, Pariza 1900, Berlina 1902. Struja se pri istosmjernom sistemu 600 V dovodi lokomotivi preko treće, izolirane tračnice.

Prva električna lokomotiva pojavljuje se na željeznici 1895 u baltimorskom tunelu na pruzi Baltimore—Ohio, da se izbjegnu neugodnosti dima i čađe parne vuče. Te prve tri električne lokomotive firme General Electric Co. istosmjernog su napona 650 V. Prva električna lokomotiva mogla je na usponu od 14‰ i duljini pruge 6,5 km vući vlak od 1700 t brzinom 20 km/h. Napajanje električnom energijom izvedeno je putem treće, izolirane tračnice pored kolosijeka. Time je pokazano da je moguće konstruirati lokomotivu za željezničku vuču, ali se relativno niski istosmjerni napon od 650 V nije mogao primijeniti za elektrovođu na većim udaljenostima sa snažnijim lokomotivama. Zbog toga se istosmjerni sistem 650 V električne željeznice vuče primjenjivao samo za posebne prigradske i lučke željeznice, npr. u Americi na pruzi New York—Hudson River i drugdje. U Evropi su elektrificirane prve pruge istosmjernim sistemom 600 V sa trećom tračnicom 1900, u Francuskoj (Paris—Juvisy 23 km), i u Italiji (Milano—Varese—Porto Ceresio) 1901/2.

Oko 1900 još nije bilo istosmjernog serijskog motora veće snage. Jedini električni motor veće snage bio je tada izmjenični trofazni asinhroni motor. Stoga se pojavljuje i počinje razvijati trofazni sistem elektrifikacije pruga u Evropi s upotrebom asinhronog motora na električnoj lokomotivi.

Trofazni sistemi snižene frekvencije stvarno su prvi sistemi elektrifikacije na glavnim željezničkim prugama. Trofazni sistem elektrifikacije pruga, napona 750 V i frekvencije 40 Hz, ostvarila je švicarska firma Brown-Boveri i on se počeo primjenjivati u Švicarskoj 1899 na pruzi Burgdorf—Thun u dužini 40 km na usponu 25‰. U Italiji puštena je u pogon 1902 u Valtolini željeznica elektrificirana trofaznim sistemom visokog napona 3300 V i snižene frekvencije 15 Hz, firme Ganz, konstruktor inž. Kando. Tai se sistem proširio do 1928 na

2700 km pruge sjeverne Italije. Trofazni sistem 3300 V, 15 Hz prvi je sistem elektrifikacije željezničkih pruga prikladan i za dulje relacije glavnih pruga, zbog primjene visokog napona u kontaktom vodu i upotrebe indukcionih asinhronih motora veće snage na lokomotivama. Kontaktna mreža za napajanje lokomotiva električnom energijom postavljena je iznad kolosijeka na stupovima duž pruge.

Trofazni sistem pokazao je tokom eksploatacije pored navedenih kvaliteta i niz nedostataka, kao npr. otežano paralelno vođenje međusobno izoliranih vodiča dviju faza, naročito preko skretanja (tračnice su služile kao treća faza), zatim, potrebno sniženje frekvencije (zbog lošijeg faktora snaga pri malim opterećenjima) i nedovoljne mogućnosti regulacije brzine asinhronog motora. Posljedica toga bila je da se takav sistem nije mogao neposredno priključiti na opću elektroprivrednu mrežu. To je dalo poticaj za iznalaženje novih, jednostavnijih i boljih tehničkih sistema elektrifikacije željeznica. Razvoj u tom smjeru u prvoj dekadi ovog stoljeća, bio je u znaku dvaju suprotnih stremljenja. Firma Oerlikon u Evropi i firma Westinghouse u USA razvile su na osnovi izmjeničnog serijskog kolektorskog motora jednofazni sistem vuče povišenog napona i snižene frekvencije (u Evropi 15 000 V i 16½ Hz, u Americi 11 000 V, 25 Hz), a američka firma General Electric Co ostvarila je istosmjerni sistem 3000 V.

Prvu jednofaznu lokomotivu za 16½ Hz sagradila je 1905 u Švicarskoj firma Oerlikon s elektromotorom od 250 KS satne snage (v. *Električna vuča*, TE 3, str. 695); puštena je u pogon 1906 na pruzi Seebach—Wettingen (20 km). Prvobitno je bilo zamišljeno da se jednofazni motor konstruira za normalnu frekvenciju 50 Hz. Međutim, u takvim je motorima nepovoljan napon transformacije koji je upravo proporcionalan frekvenciji. Da bi se snizilo štetno djelovanje više frekvencije na kolektor motora i četkice, sišlo se na 1/3 redovne frekvencije, tj. 50/3 = 16½ Hz. Time je smanjen i utjecaj loše komutacije na telekomunikacione vodove, ali se zbog sniženja frekvencije nije mogla ostvariti želja da se sistem vuče napaja direktno iz elektroprivredne mreže 50 Hz. Trebalo je ili graditi vlastite željezničke elektrane za frekvenciju 16½ Hz ili upotrijebiti pretvarače frekvencije od 50 Hz na 16½ Hz. Nezavisno od razvoja u Evropi, firma Westinghouse je 1906 izgradila prvu jednofaznu lokomotivu 11 kV, 25 Hz koja je stavljena u pogon iste godine na elektrificiranju pruzi New York—New Haven—Hartford. U to su vrijeme i evropske željeznice počele elektrificirati svoje pruge jednofaznim sistemom snižene frekvencije 16½ Hz i napona 15 kV, tako Švicarska 1909, Njemačka 1909, Švedska 1910, Austrija 1914, Norveška 1922. Od tada pa do 1928 bilo je elektrificirano u svijetu 10 000 km pruga jednofaznim sistemom snižene frekvencije. U samom početku bilo je nekoliko manje značajnih pokušaja elektrifikacije pruga s naponom od 5 i 6 kV i s frekvencijama 15 ili 25 Hz.

Suština problema istosmjernog sistema bila je u tome da se konstruira serijski istosmjerni motor za viši napon i veću snagu. Na istosmjernom motoru gradskih željeznica primjenjuju se prvi put pomoćni polovi 1903, što je omogućilo dalji razvoj istosmjernog motora. Ujedno je napredovao i razvoj živinih ispravljača za dobivanje višeg istosmjernog napona. Na osnovi toga firma General Electric Co razvila je istosmjerni sistem vuče s visokim istosmjernim naponom. 1913 elektrificirano je istosmjernim naponom 2,4 kV 40 km pruge Butte—Anaconda, a 1915 elektrificirana je značajna pruga Chicago—Milwaukee—St. Paul s istosmjernim naponom 3 kV u kontaktom vodu, a od 1914 do 1918 već ukupno 2200 km pruga. Istosmjerni napon se dobivao ispravljanjem trofazne izmjenične struje u istosmjernu u elektrovođnim podstancama. Elektrovođne podstanice za napajanje kontaktne mreže priključivale su se primarno direktno na trofaznu elektroprivrednu mrežu normalne frekvencije. Dalji razvoj istosmjernog sistema 3 kV u drugim državama slijedio je iza 1918 do 1928 brzim tempom. Tako redom Kanada 1918, Čile 1920, Brazil 1921—1926, Meksiko 1923, Južna Afrika 1924, Španija 1922, Italija 1920 i 1928, SSSR 1926, Maroko, Belgija i Poljska. Poslije drugog svjetskog rata uveli su također CSSR i Jugoslavija (sjeverozapadni dio mreže jugoslavenskih željeznica) taj sistem.

U Francuskoj je 1920 donijeta odluka da se željeznice elektrificiraju istosmjernim sistemom 1,5 kV. Prva elektrificirana pruga Pau—Tarbes bila je u prometu 1922, a do 1948 popela se duljina pruga elektrificiranih tim sistemom na blizu 5000 km. Nakon usvajanja sistema elektrifikacije željeznica istosmjernim naponom 1,5 kV u Francuskoj, prihvatile su taj sistem i druge države: Nizozemska, Engleska, Japan, Java, Indija, Australija, Novi Zeland i dr.

Jednofazni sistem normalne frekvencije 50 Hz ostvaren je najprije u Mađarskoj 1931 na elektrificiranju pruzi Budapest—Hegyeshalom u duljini 187 km (15 kV, 50 Hz) ali je elektrolokomotiva firme Ganz (inž. Kando) bila vrlo složena jer je imala sinhroni pretvarač napona i faza za asinhroni vučni motor. U Njemačkoj je 1936 elektrificirana ispitna pruga Höllethal s 20 kV, 50 Hz na duljini od 55,6 km sa četiri tipa električnih lokomotiva, ali rezultati nisu bili još potpuno zadovoljavajući. Na ispitnoj pruzi u Francuskoj, dugoj 76 km, između gradova Aix-les-Bains i La Roche-sur-Foron, koja je elektrificirana sistemom 20 kV, 50 Hz, bilo je ispitano od 1950 do 1952 pet vrsta električnih lokomotiva. Na temelju toga francuske su se željeznice odlučile za elektrifikaciju sjeveroistočnih pruga u Francuskoj novim jednofaznim sistemom 25 kV, 50 Hz. Tako je elektrificirana njime prva pruga Valenciennes—Thionville 1955, a poslije i druge. Nakon toga taj sistem usvajaju i druge države: Sovjetski Savez za dalju elektrifikaciju neelektrificiranih rajona, Japan, Engleska, Portugal, Indija, Jugoslavija, Bugarska, Rumunjska i Turska. Lokomotive tog sistema napajanja imale su različite elektromotorne pogone od motornih grupa do direktnog jednofaznog serijskog kolektorskog motora i do istosmjernog serijskog motora za ispravljenu valovitu struju. Jasno se pokazalo da je danas najpovoljnije rješenje jednofazna lokomotiva s transformatorom, silicijumskim ispravljačima i istosmjernim serijskim vučnim motorom za valoviti napon (v. *Električna vuča*, TE 3, 700). Primjena upravljanih silicijumskih ventila, tzv. tiristora, pridonijela je daljem usavršavanju lokomotiva tog sistema.

Danas se grade moderne 4-osovinske i 6-osovinske električne lokomotive s ukupnom masom do ~ 80 t ili 120 t, snage 4000 ili 6000 kW, za velike brzine od 120 do 200 km/h a posebno i više.

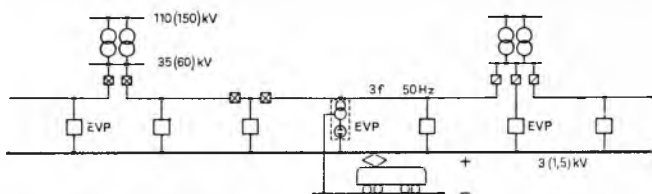
Za sisteme napajanja koji se danas još upotrebljavaju u električnoj vuči općenito v. *Električna vuča*, TE 3, str. 690.

Historijski razvitak električne vuče dao je, dakle, više sistema elektrifikacije, ali su se zadržala i učvrstila u svom razvoju samo četiri sistema za elektrifikaciju željezničkih pruga. To su dva istosmjerna i dva jednofazna sistema: istosmjerni sistem napona 1,5 kV, istosmjerni sistem 3 kV, jednofazni sistem snižene frekvencije 16½ Hz, 15 kV i jednofazni sistem normalne frekvencije 50 Hz, 25 kV. Od ta četiri sistema smatra se najuspješnijim i najsuvremenijim jednofazni sistem frekvencije 50 Hz, 25 kV, iako se još i dalje izvode istosmjerni sistem 3 kV i jednofazni sistem snižene frekvencije 16½ Hz, 15 kV na onim že-

ljezničkim mrežama gdje su bili ranije uvedeni ti sistemi. Primat pripada jednofaznom sistemu 25 kV industrijske frekvencije 50 Hz zbog najvišeg napona u kontaktnoj mreži, najlakše kontaktne mreže, najmanjeg broja elektrovočnih podstanica, mogućnosti priključka na elektroprivrednu mrežu najvišeg napona, uspješnog rješenja električne lokomotive s regulatorom napona preko transformatora i primjene postupka ispravljanja struje silicijskim ispravljačem, tako da je omogućena upotreba nenadmašenog serijskog istosmjernog motora. Istosmjerni sistem elektrovoče 3 kV i jednofazni sistem 15 kV, 16 $\frac{2}{3}$ Hz jesu po investicijama i u eksploataciji za $\sim 5\cdots 10\%$ skuplji od jednofaznog 25 kV, 50 Hz, a istosmjerni sistem 1,5 kV za $\sim 15\cdots 20\%$.

Sistemi napajanja elektrificiranih željezničkih pruga. Da bi se na nekoj pruži mogla primijeniti zavisna elektrovoča, na njoj se mora izgraditi niz objekata i postrojenja koja će služiti za napajanje zavisnih elektrovozila. Iz izvora električne energije, preko prikladnih transformatorskih stanica i dalekovoda, dovodi se električna energija do tzv. *elektrovočnih podstanica* u kojima se dovedena izmjenična struja visokog napona pretvara u struju one vrste napona i frekvencije koja odgovara sistemu elektrifikacije pruge. Elektrovočne podstanice izravno napajaju kontaktne mreže pojedinih dionica pruga. Struja se dovodi elektrovozilu, npr. lokomotivi, preko kontaktnog voda po kome klizi pantograf (oduzimač struje) elektrovozila, a kao povratni vod služe točkovi, tračnice pruge i zemlja.

Istosmjerni sistemi napajanja (sl. 2) rade u kontaktnoj mreži s nazivnim naponima 1,5 kV i 3 kV. Elektrovočne podstanice



Sl. 2. Shema napajanja istosmjernog sistema. EVP Elektrovočna podstanica

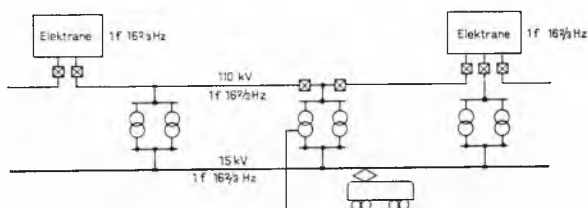
tih sistema ne smiju biti suviše udaljene jedna od druge zbog relativno niskog napona u kontaktnoj mreži. One se postavljaju na međusobnoj udaljenosti od 8 do 25 km ili prosječno na svakih 18 km za sistem s naponom 1,5 kV i na udaljenosti 15 $\cdots$ 45 km, tj. prosječno na svakih 30 km, za sistem sa 3 kV. Niže vrijednosti odnose se na teške uslove vuče, npr. na brdske pruge ili na pruge s razdijeljenom rezervom napajanja, a veći brojevi vrijede za ravničarske i manje opterećene pruge.

Presjeci vodiča kontaktne mreže iznose za normalne uslove $\sim 650 \text{ mm}^2$ za 1500 V i $\sim 320 \text{ mm}^2$ za 3000 V, a za teške uslove ~ 1000 , odnosno 500 mm^2 .

Izvori napajanja podstanica obično su udaljene elektroprivredne transformatorske stanice visokog napona. Takva transformatorska stanica napaja obično po nekoliko elektrovočnih podstanica, spojenih međusobno bilo radijalno bilo više njih paralelno, čak i ponekad do druge transformatorske stanice. Sve to ovisi o prilikama gustoće podstanica, o elektroprivrednim transformatorskim stanicama i o terenskim prilikama. Visoki napon na vodu od transformatorske stanice do elektrovočne podstanice različit je u različitim zemljama i iznosi: 110, 60 i 35 kV, a struja se prenosi trofaznim dalekovodima. Za jugoslavenske željezničke pruge na zapadu zemlje, koje su elektrificirane istosmjernim sistemom 3 kV, uzete su kao čvrste pojne tačke elektroprivredne trafostanice 110 kV/35 kV, a od njih se energija s naponom 35 kV dalekovodima dovodi do elektrovočne podstanice. Načelno ima svaka elektrovočna podstanica mogućnost dvostranog napajanja, pa je priključena na dva takva nezavisna dalekovoda, jedan glavni i drugi rezervni, čime se osigurava neprekinut rad i u slučaju kvara. Pored toga su elektrovočne podstanice između sebe povezane paralelno preko kontaktne mreže od 3 kV pa tako i rade paralelno, bilo sve zajedno ili dio njih. U svakoj elektrovočnoj podstanici ugrađuju se jedinične grupe transformator-ispravljač (živin ili silicijski) snage od 1 do 3 MW (na jugoslavenskim su željeznicama od 2,3 MW). Broj grupa ovisi o predviđenom opterećenju za vuču vlakova

na pruži. Obično treba 1, 2 ili 3 grupe u svakoj elektrovočnoj podstanici. Kao rezerva tim grupama, za slučaj neke pogonske potrebe ili vršnih opterećenja, također za slučaj kvara ili popravka jedne grupe, postavlja se češće po jedna dodatna grupa kao koncentrirana rezerva u svaku elektrovočnu podstanicu; rjeđe se ta grupa ugrađuje između dvije elektrovočne podstanice. To je tzv. sistem porazmještene rezerve; on je sproveden npr. na pruži napona 1,5 kV Paris—Dijon, gdje su elektrovočne podstanice na svakih 8 $\cdots$ 10 km.

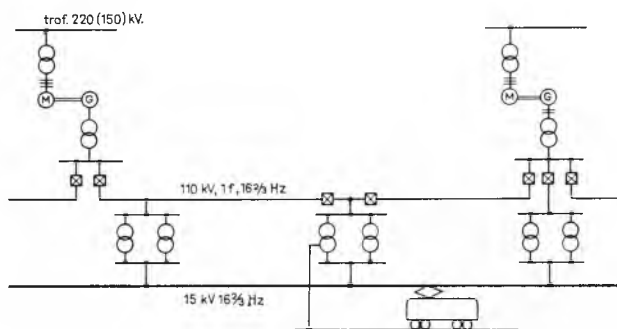
Istosmjerna kontaktna mreža napaja se uvijek dvostrano, tj. istovremeno iz dvije elektrovočne podstanice. Količine električne energije koju električna lokomotiva dobiva iz svake od te dvije elektrovočne podstanice obrnuto je razmjerna udaljenosti od nje. To je jednako i kod jednokolosiječnih i kod dvokolosiječnih pruga, s time što se kod dvokolosiječnih pruga mogu, ako treba, spajati paralelno i kontaktne mreže obaju kolosijeka da bi se dobio manji pad napona u kontaktnoj mreži pri velikim opterećenjima u vuči.



Sl. 3. Shema napajanja sistema 16 $\frac{2}{3}$ Hz iz jednofaznih elektrana (Švicarska i Austrija)

U *izmjeničnom jednofaznom sistemu napajanja sa sniženom frekvencijom* 16 $\frac{2}{3}$ Hz i s naponom 15 kV udaljenost između elektrovočnih podstanica iznosi prosječno 30 $\cdots$ 50 km. Presjek vodiča kontaktne mreže iznosi prosječno 150 mm^2 . Napajanje elektrovočnih podstanica može se provoditi na tri načina: iz vlastitih željezničkih elektrana snižene frekvencije, pretvorbom trofazne struje na jednofaznu u centralnoj podstanici i pretvorbom trofazne struje na jednofaznu u svakoj elektrovočnoj podstanici.

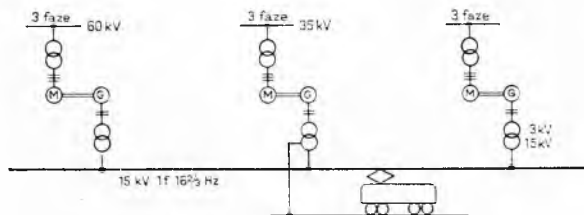
Pri prvom načinu (sl. 3) struja se iz vlastite elektrane jednofaznim dalekovodima 110 kV, 16 $\frac{2}{3}$ Hz, od kojih svaki služi za nekoliko elektrovočnih podstanica, dovodi elektrovočnim podstancama, gdje se transformira od 110 kV, 16 $\frac{2}{3}$ Hz na 15 kV, 16 $\frac{2}{3}$ Hz, koji je napon priključen na kontaktnu mrežu. Pri drugom načinu (sl. 4) u jednoj se centralnoj podstanici pretvara trofazna struja 220 kV, 50 Hz na jednofaznu struju 110 kV,



Sl. 4. Shema napajanja sistema 16 $\frac{2}{3}$ Hz s centralnom pretvorbom frekvencije i broja faza (Austrija i Njemačka)

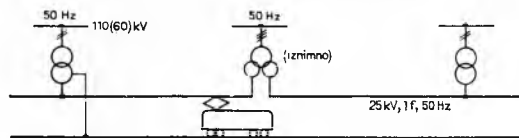
16 $\frac{2}{3}$ Hz i ta se onda odvodi jednofaznim dalekovodima do nekoliko podstanica, gdje se u svakoj podstanici transformira na 15 kV, 16 $\frac{2}{3}$ Hz za kontaktnu mrežu. U oba slučaja elektrovočne podstanice rade paralelno, jer su u fazi, i kontaktna mreža napajana je iz obje elektrovočne podstanice, a kod dvostrukog kolosijeka mogu kontaktne vodovi obaju kolosijeka također raditi paralelno. Pri trećem se načinu (sl. 5) struja pretvara od trofazne na jednofaznu u svakoj elektrovočnoj podstanici, koja je priključena trofazno na mrežu elektroprivrede. S pomoću jednog ili dva pretvarača faza i frekvencije dobiva se struja 15 kV, 16 $\frac{2}{3}$ Hz

kojom se napaja kontaktna mreža. Ti pretvarači sastoje se od trofaznog transformatora koji snižuje priključni napon i napaja trofazni sinhroni motor, a ovaj pokreće jednofazni generator napona 15 kV, 16⅔ Hz. Taj se sistem primjenjuje u Švedskoj da bi se izbjegli posebni izvori snižene frekvencije i gradnja jednofaznih dalekovoda. Uz određeno podešenje na generatorima može i nekoliko elektrovučnih podstanica raditi paralelno. Snaga grupe je 2,4 ili 4 MVA, a može ih biti u jednoj podstanici i više.



Sl. 5. Shema napajanja 16⅔ Hz s pojedinačnim pretvorbom frekvencije i broja faza (Švedska)

Pri napajanju jednofaznog sistema industrijske frekvencije (25 kV, 50 Hz) udaljenost između elektrovučnih podstanica može biti još veća zbog visokog napona u kontaktnoj mreži, a praktički iznosi ~40...60 km. I ovdje presjek vodiča kontaktne mreže iznosi prosječno 150 mm². Elektrovučne podstanice priključuju se direktno na zemaljsku elektroprivrednu mrežu 50 Hz (sl. 6). Nije potrebno ni ispravljanje struje ni pretvaranje frekvencije i faza u elektrovučnim podstanicama. Međutim, kako je za jednofaznu vuču potreban jednofazni transformator za sniženje primarnog visokog napona elektroprivredne mreže od 110 kV na 25 kV, 50 Hz, pojavljuju se jednofazni potrošači na trofaznoj mreži elektroprivrede, što prouzrokuje nesimetriju i neko pogoršanje rada primarnog sistema. Da se izbjegne ta nesimetrija opterećenja, pojedine elektrovučne podstanice priključuju se na različite faze elektroprivredne mreže, ovisno o njenoj jakosti, ili se postavljaju pored nekoliko običnih jednofaznih elektrovučnih podstanica još i podstanice sa posebnim Scottovim transformatorom (v. *Transformatori*). Na jake elektroprivredne mreže nesimetrija ne utječe mnogo, te se u njima sve elektrovučne podstanice priključuju jednofazno, i to čak na iste faze. U svakoj podstanici nalaze se jedan ili dva transformatora od 5, 7,5 ili 10 MVA. Elektrovučne podstanice postavljaju se bilo uz samu transformatorsku stanicu elektroprivrede ili se od ove do podstanice dovodi energija dalekovodima sa dva vodiča.



Sl. 6. Shema napajanja jednofaznog sistema 50 Hz

U pogledu napajanja kontaktne mreže postoji razlika između jednofaznog sistema 50 Hz i drugih sistema. Ovdje se napajanje kontaktne mreže ne vrši dvostrano, već obično jednostrano, i to tako da svaka elektrovučna podstanica napaja kontaktnu mrežu »antenski«, tj. do polovine udaljenosti između dviju susjednih podstanica, gdje postoje mjesta sekcioniranja s neutralnim vodom. Neutralni vod je predviđen da električna lokomotiva ne bi premostila dvije zone napajanja, a rastavljači služe za to da se kontaktna mreža može spojiti na drugu podstanicu ako jedna ispadne iz pogona. Jednofazne podstanice mogu se vezati paralelno samo ako su primari njihovih transformatora spojeni na iste faze istog elektroprivrednog sistema, ali i kad je ispunjen taj uvjet, jednofazne elektrovučne podstanice 50 Hz rjeđe se vežu paralelno. Ako ustreba, mogu se paralelno vezati kontaktne mreže dvaju kolosijeka dvokolosiječnih pruga unutar antenskog napajanja.

Projektiranje stabilnih postrojenja za elektrifikaciju pruga. Pri projektiranju stabilnih postrojenja za elektrifikaciju pruga potrebno je izvršiti kompletan elektrovučni proračun.

Polazi se od specifikacije saobraćajnih podataka prijevoza za određenu bližu i dalju perspektivu, za teretne, putničke i brze vlakove dotične pruge, i izvrši se izbor električne lokomotive koja može najbolje udovoljiti postavljenim zahtjevima saobraćaja, vuče i parametrima pruge.

Stabilna postrojenja, tj. kontaktnu mrežu i elektrovučne podstanice, treba dimenzionirati tako da bude pod svim mogućim okolnostima vuče osiguran povoljan napon za električne lokomotive, i za sva opterećenja koja mogu nastupiti. U tu se svrhu odabire iz saobraćajnog grafikona najnepovoljnija dionica između dvije elektrovučne podstanice i analiziraju opterećenja koja nastupaju u toku 2 sata. Elektrovučni proračun može se izvesti ili klasičnim matematičkim metodama (što je dugotrajno), ili s pomoću analognog računala na modelima koji imitiraju kontaktnu mrežu, elektrovučne podstanice i elektrovuču vlakova (v. *Analizatori, mrežni*, TE 1, str. 292), ili na osnovi prikladnog programa s pomoću digitalnog računala. Na osnovi više takvih računskih provjera dolazi se do optimalnih rješenja.

Pad napona u kontaktnoj mreži od podstanice do električne lokomotive mora da zadovolji dva uvjeta: da srednji napon u kontaktnoj mreži bude što bliži nazivnom naponu duž cijele pruge, radi ispravnog rada električne lokomotive, i da trenutni napon nikada ni na jednoj tački ne padne ispod dozvoljenog minimuma. Kao dobar srednji napon smatra se napon do 10% niži od nazivnog. Presjek vodiča kontaktne mreže obratno je proporcionalan udaljenosti između podstanica i njihovoj snazi, tj. uz veći presjek kontaktne mreže potrebna je manja udaljenost i snaga podstanica i obratno. Uz slabi teret mogu elektrovučne podstanice biti udaljenije nego uz veći teret. Za dozvoljeni pad napona treba naći ono rješenje između nekoliko mogućih koje daje tehnički i ekonomski optimum za određena vučna opterećenja. Propisima U. I. C. — Međunarodne željezničke unije — određeni su ovi nazivni, minimalni i maksimalni naponi za električne sisteme:

	Nazivni napon	Minimum	Minimum trenutni	Maksimum
Istosmjerna struja	1 500 V	1 000 V	—	1 800 V
Istosmjerna struja	3 000 V	2 000 V	—	3 600 V
Jednofazna struja 16⅔ Hz	15 000 V	12 000 V	11 000 V	16 000 V
Jednofazna struja 50 Hz	25 000 V	19 000 V	17 500 V	27 500 V

Istosmjerni sistemi. Pri istosmjernoj struji nastaje pad napona zbog omskog (radnog) otpora vodiča kontaktne mreže i otpora povratnog voda, tj. tračnica, do elektrovučne podstanice. Omski otpor pri 50 °C kontaktne mreže R'_{km} po kilometru može se izračunati iz brojčane jednadžbe:

$$R'_{km} = \frac{18,8}{S} \Omega/\text{km},$$

gdje je 18,8 specifični otpor bakra u $\Omega\text{mm}^2/\text{km}$, a S ekvivalentni presjek u mm^2 . Omski otpor povratnog voda po kilometru je

$$R'_{pv} = \frac{10^3 \cdot 115 \cdot 7,8 \cdot 10^{-6}}{m} = \frac{0,9}{m} \Omega/\text{km},$$

gdje je 115 specifični otpor čelika u $\Omega\text{mm}^2/\text{km}$, $7,8 \cdot 10^{-6}$ gustoća čelika u kg/mm^3 , $10^3 = \text{m}/\text{mm}$, a m masa tračnice po metru u kg/m .

Presjeci vodiča kontaktnog voda i udaljenosti podstanica za istosmjerne sisteme 1,5 i 3 kV navedeni su naprijed.

Jedinična snaga i broj ispravljačkih grupa bira se na osnovi proračuna i grafikona opterećenja elektrificirane pruge, a ovisno o maksimalnom opterećenju, imajući na umu da je dozvoljeno preopterećenje ispravljačke grupe 50% kroz 2 sata ili 200% kroz 5 minuta.

Izmjenični sistemi. Izračunavanje pada napona i strujnih opterećenja u kontaktnoj mreži jednofaznog sistema složenije je nego kod istosmjernog sistema jer treba uzeti u obzir induktivni otpor i faktor snage ($\cos \varphi$). Proračun se provodi za antensko napajanje iz podstanice. Faktor snage lokomotive, koji se kod jednofaznih lokomotiva s ispravljačima kreće oko 0,80...0,85, znatno utječe na pad napona.

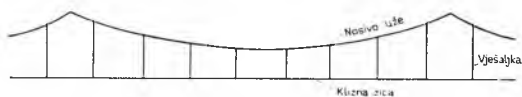
Ukupni otpor kontaktne mreže u jednofaznom sistemu 50 Hz veći je nego u sistemu 16 $\frac{2}{3}$ Hz, jer je zbog trostruko veće frekvencije induktivni otpor triput veći. Međutim, i pored toga uvjeti su pada napona i udaljenosti podstanica približno jednaki i ujednačeni za oba monofazna sistema, jer je napon u sistemu normalne frekvencije viši, tj. 25 kV prema 15 kV.

Pri projektiranju vodi se računa o tome da podstanice imaju rezervu za slučaj kvara, remonta ili vanrednih vučnih slučajeva. Rečeno je da kod istosmjerne struje može biti dodana u svaku podstanicu po jedna grupa kao rezerva, dok se kod jednofaznih podstanica to radi tako da se za nekoliko podstanica drži u pripremi rezervni transformator za slučaj potrebe.

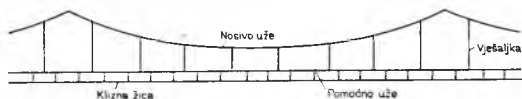
Također se pri proračunu podstanica vodi računa o tome da kad ispadne iz pogona jedna čitava podstanica, njenu ulogu mogu preuzeti na neko vrijeme dvije susjedne podstanice do otklanjanja kvara ili dovoza pokretne elektrovoćne podstanice na vagonima. Ovisi o važnosti pruge, veličini saobraćaja i gledanju željezničke uprave koliki će biti stepen osiguranja za takve slučajeve.

Kontaktna mreža je zračni vod bakrenih vodiča postavljen iznad željezničkih kolosijeka na određenoj visini na stupovima pored pruge. Stupovi nose željezne konzole, zatezače i držače s izolatorima i poligonacionim motkama na kojima su obješeni vodiči kontaktnog voda. Kontakti vod sastoji se od bakrenog, brončanog ili čeličnog nosivog užeta, o koje je s pomoću vješaljki obješena bakrena klizna (trolejska) žica s utorom, po kojoj klizi pantograf lokomotive.

Kontaktna mreža izvodi se kao lagana, obična i složena. *Lagana kontaktna mreža* (sl. 7) ima jedno nosivo uže i jednu kliznu žicu (u jednofaznim sistemima 16 $\frac{2}{3}$ Hz i 50 Hz), *obična kontaktna*

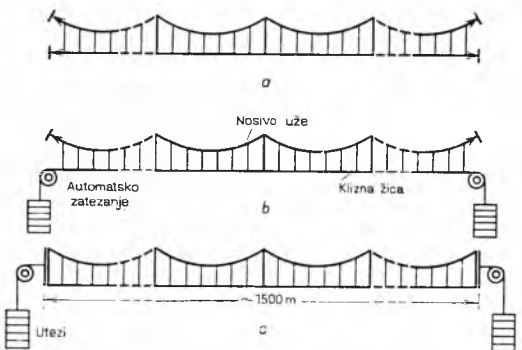


Sl. 7. Lagana i obična kontaktna mreža. Pri laganoj kontaktnoj mreži: jedno nosivo uže i jedna klizna žica (25 kV 50 Hz i 15 kV 16 $\frac{2}{3}$ Hz); pri običnoj kontaktnoj mreži: jedno nosivo uže i dvije klizne žice (3 kV—)



Sl. 8. Složena kontaktna mreža: jedno nosivo uže, jedno pomoćno uže, dvije klizne žice (1,5 kV—)

mreža ima jedno nosivo uže i dvije klizne žice (istosmjerni sistem 3 kV), a *složena kontaktna mreža* (sl. 8) ima jedno nosivo uže i jedno pomoćno uže uz dvije klizne žice (istosmjerni sistem 1,5 kV). Vrlo se rijetko upotrebljava obično tramvajsko ovješeno klizne žice bez nosivog užeta.

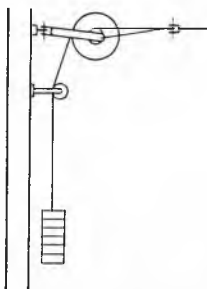


Sl. 9. Kontaktna mreža. a) Nekompenzirana kontaktna mreža, b) polukompenzirana kontaktna mreža, c) kompenzirana kontaktna mreža

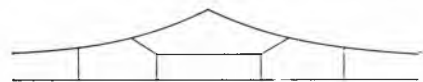
Prema načinu ovješanja i zatezanja postoje tri vrste kontaktne mreže: nekompenzirana, polukompenzirana i kompenzirana. Kompenzacija se odnosi na toplinsko rastezanje, a izvodi se zatezanjem klizne žice ili i klizne žice i nosivog užeta. Razmak dužine ~ 1500 m od jednog do drugog stupa između kojih se vrši

zatezanje — zatezni razmak ili zatezno polje — sačinjava osnovni dužinski dio kontaktne mreže.

Nekompenzirana kontaktna mreža (sl. 9 a) ima čvrsto ukotvljene i nosivo uže i kliznu žicu. Ona služi za male brzine i kratke zatezne razmake, a primjenjuje se samo na kratkim staničnim kolosijecima. Nosivo uže *polukompenzirane kontaktne mreže* čvrsto je ukotvljeno, a klizna je žica nategnuta utezima (sl. 10) na oba kraja preko kolotura automatskog zatezala silom od 750 kp, da bi uvijek bila što paralelnija (u vertikalnoj ravni) s kolosijekom (sl. 9b), unatoč produženju i skraćivanja pri promjenama temperature. Takva se mreža gradi obično za brzine do 120 km/h. Za veće brzine montira se još Y-vješaljka kod



Sl. 10. Automatsko zatezanje na stupu



Sl. 11. Y-vješaljka uz konzolu

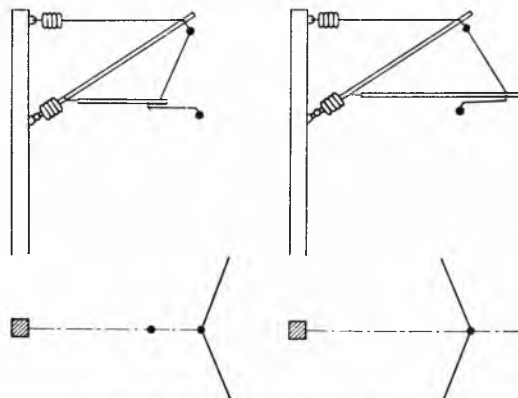
konzola (sl. 11). U *kompenziranoj kontaktnoj mreži* zajednički se automatski zateže i nosivo uže i klizna žica silom do 1000 kp. To je mreža za velike brzine, redovno do ~ 160 km/h i više; po potrebi i do ~ 200 km/h (sl. 9 c). Na sredini svakog zateznog razmaka nalazi se čvrsta tačka ovješanja gdje su čvrsto spojeni nosivo uže i klizna žica. Kompenzacija kontaktne mreže računa se za temperaturu okoline od -20°C do +40°C. Zatezanje provodi se automatskim zatezalom s omjerom prenosa 1 : 4 ili 1 : 5.

Da se izbjegne preveliko trošenje klizača pantografa na jednom mjestu i da se osigura pravilno oduzimanje struje, izvodi se *poligonacija* kontaktne mreže. To se postiže tako da se kontakti vod postavlja u cikcaku (na ševuljicu), tj. od stupa do stupa naizmjenično za ~ 20...25 cm lijevo ili desno od osi kolosijeka.

Kontaktna mreža na pruzi može biti montirana na horizontalnoj konzoli (sl. 12, sistem 3 kV u Italiji i Jugoslaviji) ili na kosoj konzoli (sl. 13, sistem 3 kV u nekim drugim zemljama i jednofazni sistemi 16 $\frac{2}{3}$ Hz i 50 Hz). Stanična kontaktna mreža može biti ovješena na pojedinačnim stupovima, na stupovima tipa «kišobran» koji služe za više kolosijeka (sistem 3 kV u Italiji i Jugoslaviji), na krutim portalima ili na gipkim portalima. Kruti portali nose rešetkastu gredu iznad nekoliko staničnih kolosijeka, a gipke portali tvore poprečno nad kolosijecima zategnute čelične žice ili užad, koja nose kontakti vod.

J nastavku su navedene karakteristike kontaktne mreže jugoslavenskih željeznica.

Za sistem 3 kV istosmjerne struje primijenjena je polukompenzirana mreža ovješena na stupove kao što ih prikazuje sl. 12. Presjek nosivog užeta je 120 mm², a dviju kliznih žica 100 mm². Na teškim brdskim dijelovima pruge dodat je još i bakreni vod pojačanja, presjeka 100...200 mm². U stanicama upotre-

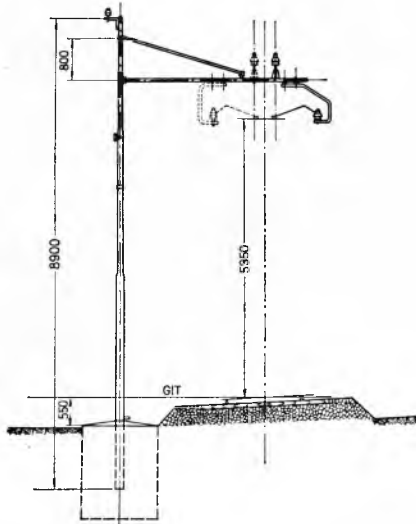


Sl. 12. Ovješeno kontaktne mreže na stupu

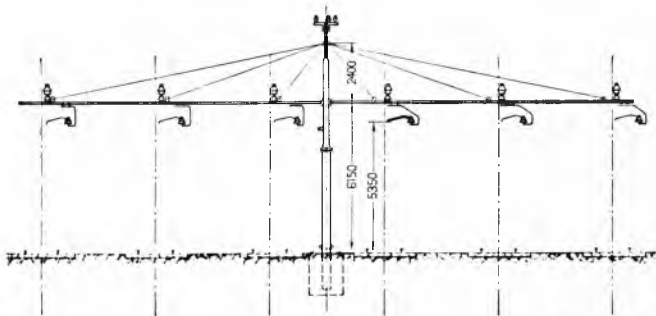
bljavaju se stupovi kišobranskog oblika (sl. 14). Visina kontaktnog voda nad tračnicom iznosi 5,35 m, a minimalno 4,95. Razmak stupova je do 60 m, ovisno o krivini pruge i brzini vjetra.

Sistem 25 kV, 50 Hz ima kompenziranu kontaktnu mrežu: brončano nosivo uže presjeka 65 mm² i jednu bakrenu kliznu žicu presjeka 107 mm². Na

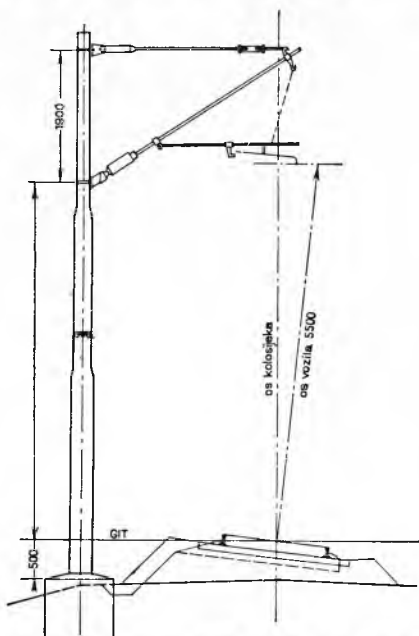
otvoreni pruži upotrijebljeni su pojedinačni stupovi s kosom konzolom (sl. 15), a na staničnim kolosijecima montirani su pretežno kruti portali (sl. 16). Visina kontaktne mreže nad tračnicom iznosi 5,50 m, a minimalno 5,05 m. Razmak među stupovima je do 65 m.



Sl. 13. Ovisanje kontaktne mreže na stupu (Jugoslavenske željeznice pri sistemu 3 kV—) GIT gornja ivica tračnica

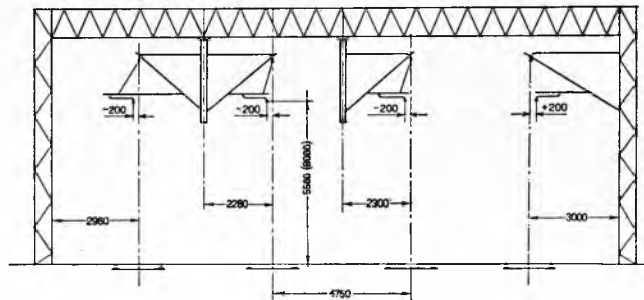


Sl. 14. Stanični stup za ovisanje kontaktne mreže pri sistemu 3 kV — (JŽ)



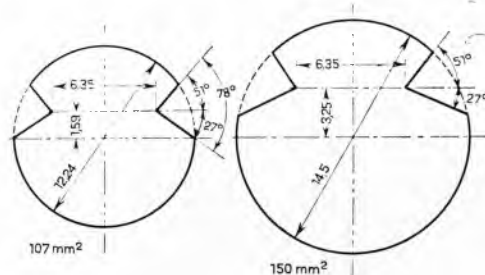
Sl. 15. Stup za ovisanje kontaktne mreže pri sistemu 25 kV 50 Hz (JŽ). GIT gornja ivica tračnica

Povratni vod kontaktne mreže čine tračnice i tlo. Da se postigne dobar tok povratnih struja, pogotovo kod istosmjernih siste-



Sl. 16. Portalni stup za ovisanje kontaktne mreže pri sistemu 25 kV 50 Hz (JŽ)

ma, spojevi se tračnica premošćuju privarenim bakrenim vezicama ili, još bolje, stavljanjem specijalne grafitne masti ispod tračničkih spojnica. Tamo gdje su na kolosijeku postavljene tračnice zavarene u duge neprekinute trakove, to normalno nije potrebno.

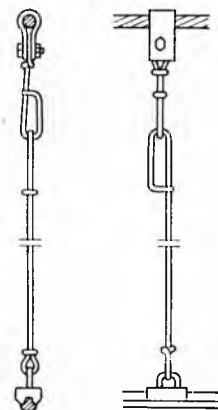


Sl. 17. Presjek bakrene klizne žice

Kontaktna mreža željezničkih stanica odvojena je od kontaktne mreže otvorene pruge; ona se u slučaju potrebe ili kvara može s njome spajati ili od nje odvajati rastavljačima. Na isti se način mogu isključiti od napona pojedini istovarni kolosijeci u stanicama. U jednofaznom sistemu takva mjesta s rastavljačima zovu se *postrojenja za sekcioniranje*.

Od prekostrujnih opterećenja kontaktne su mreže zaštićene prekidačima a naponsku zaštitu obavljaju odvodnici prenapona ili iskrišta.

Presjek i profil *klizne žice* nije u svijetu tipiziran, iako postoji nekoliko standarda koji se među sobom razlikuju. Upotrebljavaju se presjeci 107 mm² ili 150 mm², s utorima za stezaljke (sl. 17). Stezaljke drže kliznu žicu s pomoću vješaljki obješenih na nosivo užu (sl. 18).

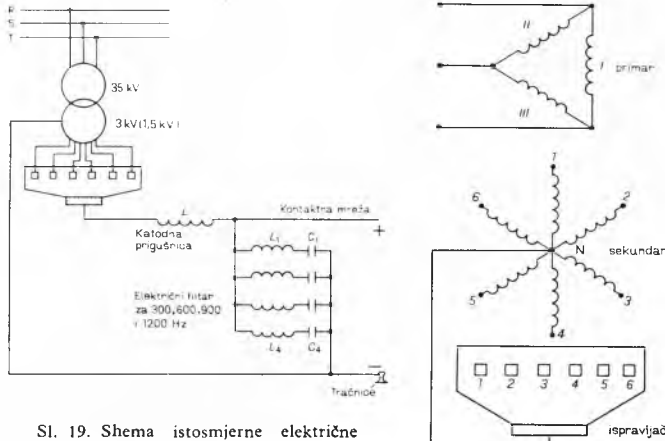


Sl. 18. Izvedba vješaljke

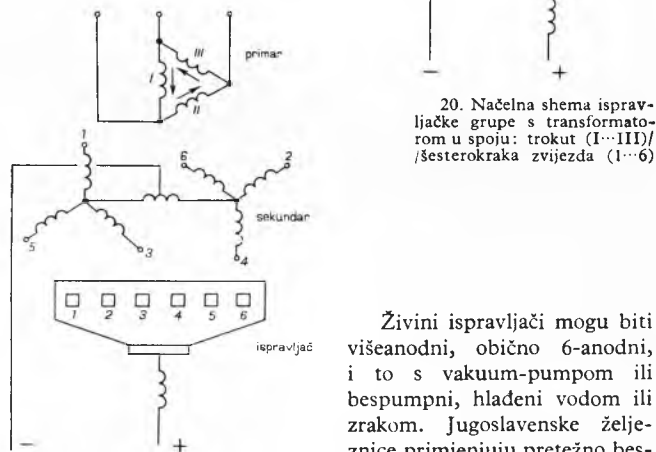
Elektrovučne podstanice istosmjernih sistema 1,5 kV i 3 kV ispravljaju izmjeničnu struju u istosmjernu. Ranije su se za dobivanje istosmjerne struje upotrebljavali motor-generatori ili obrtni jednoarmaturni pretvarači. Zatim se potpuno prešlo na živine ispravljače sve do najnovijeg vremena, kad se pojavljuju u upotrebi i poluvodički silicijumski ispravljači.

Podstanice sa živinim ispravljačima. Glavni elementi ovakve elektrovučne podstanice jesu dovod trofaznog visokog napona, ispravljački transformatori, živini ispravljači i izlazne naprave istosmjernog napona 3 kV (sl. 19).

Ispravljački transformator ima zadatak da snizi trofazni visoki napon na napon podesan za ispravljanje u živinim ispravljačima. Primar transformatora može biti spojen u zvijezdu ili u trokut, a na sekundaru je ili šesterostruka viljuška (sl. 20) ili dvije obrnute zvijezde (sl. 21) sa međuprigušnicom i slično. Svaki namot na sekundarnoj strani transformatora opterećen je samo dok radi odgovarajuća anoda u ispravljaču, pa je stoga transformator sekundarno lošije iskorišten, te namot sekundara mora biti dimenzioniran jače, za veću prividnu snagu, nego namot primara.



Sl. 19. Shema istosmjerne električne podstanice

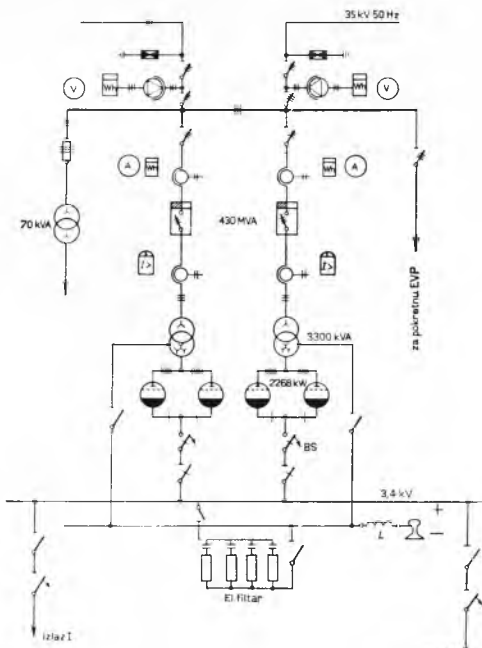


20. Načelna shema ispravljačke grupe s transformatorom u spoju: trokut (I-III) / šestokraka zvijezda (1-6)

Sl. 21. Načelna shema ispravljačke grupe s transformatorom u spoju: trokut / dvije obrnute zvijezde (1-6)

Jednopolnu shemu elektrovučne podstanice za istosmjerni sistem 3 kV (JŽ) prikazuje sl. 22.

Osim višeanodnih živinih ispravljača u upotrebi su u elektrovučnim podstancama i jednoanodni živini ispravljači (ignitroni i eksitroni), obično njih 6 u jednoj ispravljačkoj grupi.



Sl. 22. Jednopolna shema elektrovučne podstanice za istosmjerni sistem 3 kV (JŽ)

Živini ispravljači zaštićeni su od vanjskih smetnji s istosmjerne i izmjenične strane. S istosmjerne strane predviđen je brzi prekidač koji je osjetljiv ne samo na strujna preopterećenja nego i na obratan tok istosmjerne struje od strane kontaktne mreže. On se isklapa vrlo brzo, za $(4 \dots 10) \cdot 10^{-2}$ s. Na izmjeničnoj strani ispravljačka grupa zaštićena je od prekostrujnih opterećenja učinkom sklopkom.

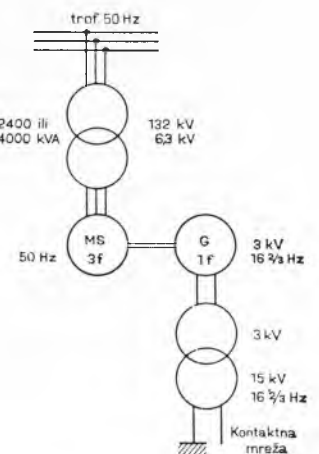
Podstanice sa silicijumskim ispravljačima. U proteklom desetljeću afirmirali su se silicijumski ispravljači (diode) i u električnoj vuči (na električnim lokomotivama i u elektrovučnim podstancama). Te diode zauzimaju malo prostora, odmah ispravljaju bez ikakvih paljenja pomoćnih anoda i imaju najbolju korisnost ispravljanja od svih dosadašnjih ispravljača, gotovo 99%, a rade stabilno i pri velikoj unutarnjoj temperaturi do 190 °C i temperaturi okoline do 100 °C. U novije vrijeme primjenjuju se za tu svrhu tiristori.

Za jednu silicijumsku ispravljačku grupu uzima se više serijski-paralelno vezanih dioda. Može biti upotrijebljena Graetzova ili puš-pul ispravljačka sprega. Zaštita silicijumskih ispravljača bila je u početku složena, ali je danas već svedena na jednostavno rješenje.

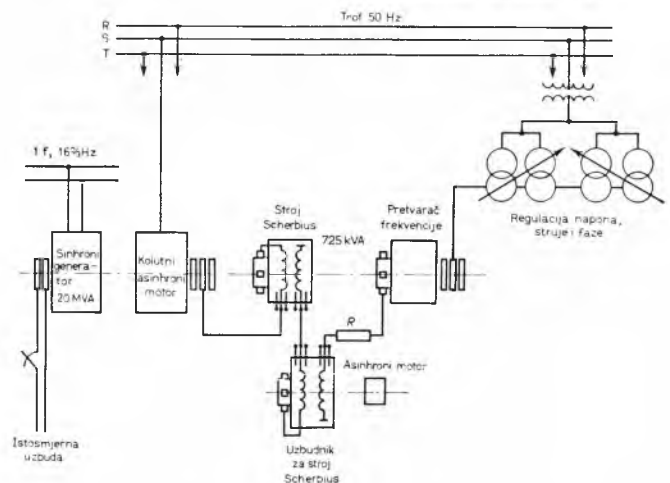
Živini i silicijumski ispravljači opisani su u članku *Ispravljači* u ovoj enciklopediji.

Elektrovučne podstanice izmjeničnih jednofaznih sistema. Elektrovučne podstanice jednofaznog sistema snižene frekvencije 16 2/3 Hz predstavljaju običnu transformatorsku stanicu s jednofaznim transformatorom 110 kV/15 kV. One su priključene preko dalekovoda na vlastite elektrane niže frekvencije ili na pretvaračke stanice snižene frekvencije.

Kao pretvarači koji snižuju frekvenciju od 50 Hz na 16 2/3 Hz mogu se upotrijebiti rotirajuće ili statičke grupe. Rotirajuća grupa može biti sastavljena od dva sinhrona stroja od kojih jedan radi kao motor a drugi kao generator (sl. 23) ili od jednog velikog kolutnog asinhronog stroja Scherbius, koji služi za održavanje njegovog rotora na sinhronoj brzini, i jednog jednofaznog sinhronog generatora od 20 MVA (sl. 24). Više



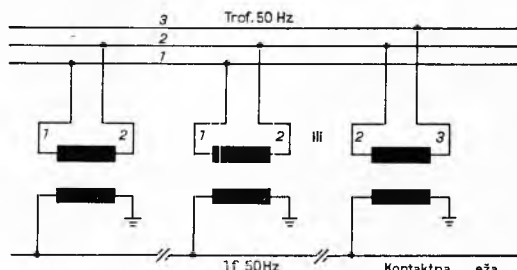
Sl. 23. Shema jednofazne električne podstanice sistema 16 2/3 Hz s pojedinačnom okretnom pretvaračkom grupom (švedski tip)



Sl. 24. Shema jednofazne elektrovučne podstanice sistema 16 2/3 Hz s centralnom okretnom pretvaračkom grupom (Austrija, Njemačka)

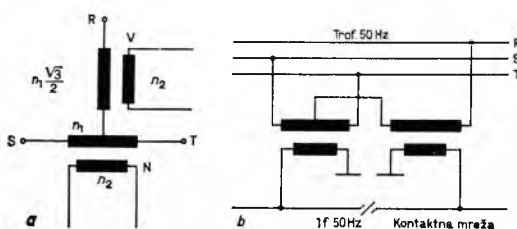
takvih pretvaračkih stanica izrađeno je u Švicarskoj, Austriji, Njemačkoj i Norveškoj. Statičke se grupe nisu jače proširile jer su tehnički složenije.

Električne podstanice jednofaznog sistema mrežne frekvencije 50 Hz priključene su izravno na elektroprivrednu mrežu (sl. 25). U tim se podstanicama primjenjuju jednofazni transformatori, a iznimno posebni Scottovi transformatori ili jednofazni transformatori u V-izvedbi.



Sl. 25. Shema jednofazne elektrovučne podstanice za sistem 25 kV 50 Hz s običnim jednofaznim transformatorom

Scottov transformator (v. Transformatori) jednoliko opterećuje sve tri faze trofazne mreže i pored jednofaznog opterećenja na sekundaru transformatora (sl. 26). Ovakvo je rješenje skuplje i rjeđe se upotrebljava.



Sl. 26. Shema jednofazne elektrovučne podstanice za sistem 25 kV 50 Hz koji se sastoji od dva jednofazna transformatora (upotrebljava se iznimno). a Shema Scottova spoja, b priključak na kontaktnu mrežu

U podstanicama koje su priključene na jaku elektroprivrednu mrežu, npr. na elektrificiranim prugama Jugoslavenskih željeznica, upotrebljavaju se danas samo jednofazni transformatori. Detaljnu shemu takve podstanice Jugoslavenskih željeznica prikazuje sl. 27.

Upravljanje elektrovučnim podstanicama. Elektrovučne podstanice grade se na otvorenom prostoru, u zgradama ili dijelom na otvorenom a dijelom u zgradama. Njihovim postrojenjima može se upravljati ili s pomoću posade ili automatski. U podstanicama bez stalne ljudske posade upravljanje odvija se daljinskim putem iz udaljenog centralnog mjesta.

Na svim prugama koje su u novije vrijeme elektrificirane istosmjernim sistemom, a pogotovo na onima koje su elektrificirane jednofaznim sistemom 50 Hz, primjenjuje se daljinsko upravljanje. Na pogodnom mjestu pruge (obično u većim stanicama) nalazi se centralno mjesto za daljinsko upravljanje podstanicama. Tu se nalazi komandna ploča ili komanda s reljefnim prikazom svih podstanica i postrojenja za sekcioniranje. U daljinsko upravljanje ide uključivanje i isključivanje osnovnih prekidača i rastavljača, mjerenje struje i napona, te signalna dojava čitavog stanja iz udaljenih mjesta duž pruge. Za prijenos komandi i dojavnih signala služi telefonski kabel. Postoji više sistema prenosa, npr. sistem rotirajućih birača i kodni sistem. Izvršavanje komandi i vraćanje signala na svakom mjestu ostvaruje se uz pomoć dodatnih uređaja u elektrovučnim podstanicama. Centralna komandna ploča nosi shematski prikaz svih postrojenja koja se kontroliraju i na njoj su ugrađene komandne sklopke. Komandna sklopka na ploči je obično tipa »zakreni-pritisni« sa dva položaja: krilce u crti sheme pokazuje da je aparat uključen, a krilce okomito na shemu pokazuje da je aparat isključen. Signalne svjetiljke na ploči obično su u spoju tamne sheme, što znači da ne svijetle kad je aparat u redovnom položaju, a pale se pri mijenjanju položaja aparata ili pri nenormalnoj pojavi, kao što je kvar ili nestanak napona.

Telekomanda ili daljinsko upravljanje elektrovučnim podstanicama i postrojenjima za sekcioniranje kontaktne mreže primijenit će se na svim prugama Jugoslavenskih željeznica s jednofaznim sistemom. Mjesta centralnog daljinskog upravljanja bit će u Zagrebu, Vinkovcima, Beogradu, Nišu i Sarajevu.

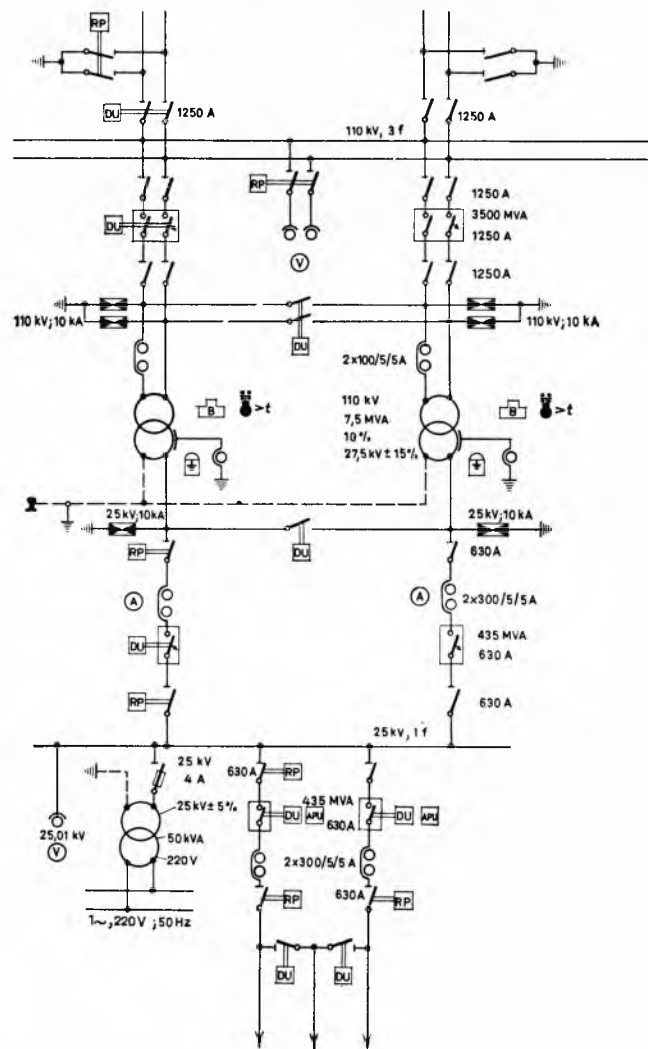
Štetni utjecaji i smetnje što ih stvaraju elektrificirane pruge. Elektrificirane željezničke pruge sa svojim vučnim podstanicama, vučnim krugom kontaktne mreže i tračnicama kao povratnim vodom ponekad na različite načine nepovoljno utječu na postrojenja koja su vezana s njima ili se nalaze u njihovoj blizini. Ti utjecaji i smetnje mogu se odgovarajućim mjerama potpuno otkloniti ili smanjiti na dozvoljenu veličinu.

Elektrificirane pruge mogu izazvati: nesimetrično opterećenje primarne elektroprivredne mreže pri jednofaznom sistemu 50 Hz; koroziju metalnih cijevi i armatura kabela zbog lutajućih struja pri istosmjernoj vuči; smetnje na telefonskim vodovima i eventualnu opasnost za poslužioce, nepoželjne utjecaje na željeznička signalna postrojenja.

Utjecaj elektrovučnih podstanica na primarnu mrežu može se pojaviti pri istosmjernim sistemima i pri jednofaznom sistemu 50 Hz.

Podstanice istosmjernog sistema priključene su trofazno na elektroprivrednu mrežu; kad je ova dovoljno jaka, kao što to jest u zemljama gdje se vrši elektrifikacija željeznica, nema nikakvih posljedica za primarnu mrežu. Iznimka može nastupiti zbog višeanodnih živinih ispravljača veoma velikih snaga jer se pojavljuju harmonični članovi (6. harmonik, 300 Hz) koji se prenose na primarnu mrežu. To se poništava priključivanjem transformatora elektrovučnih podstanica na dalekovod naizmjenice u zvijezdi i u trokutu (tako na pruži Paris—Lyon).

U proizvodnji, u prijenosnim i distributivnim mrežama trofazni je sistem uravnotežen. Vuča jednofaznim sistemom 50 Hz



Sl. 27. Detaljna shema elektrovučne podstanice sistema 25 kV 50 Hz (JŽ)

stvara nesimetrično opterećenje primarne mreže, što ima za posljedicu strujnu nesimetriju, jer su dvije faze na koje je priključen krug vuče jače opterećene od treće faze, i naponsku nesimetriju jer je pad napona veći u dvjema opterećenim fazama. Nesimetrično opterećenje u trofaznom sistemu ima za posljedicu utjecaj strujne nesimetrije na generatore i naponske nesimetrije na elektromotorne pogone i električnu rasvjetu. Nesimetrični trofazni sistem može se i pri vuči analizirati metodom simetričnih komponenta (v. *Elektrotehnika, Dalekovođi*).

Nesimetrija se danas uklanja ili ublažava uglavnom na dva načina (obično samo u slučaju priključka na slabe mreže): napajanjem elektrovočnih podstanica naizmjenice s različitim faza trofazne mreže (ukoliko je mreža jača), tako da se jednofazno opterećenje raspoređuje prilično ujednačeno između faza, ili upotrebom Scottovih transformatora u onim elektrovočnim podstanicama gdje su jednofazna opterećenja približno jednaka i snaga kratkog spoja mreže mala.

Na dovoljno velikim trofaznim elektroprivrednim mrežama električna vuča stvara jednofazna opterećenja koja su znatno ispod dozvoljene granice, pa nisu potrebne nikakve mjere za sprečavanje nesimetrije.

Utjecaj lutajućih struja na podzemne metalne cijevi i kabele. Pored kemijske i elektrokemijske korozije metala u zemlji i van nje, koja nastaje zbog razlika napona između metalnih predmeta i zemljišta, pri istosmjernoj električnoj vuči pojavljuje se i korozija metalnih predmeta položenih u zemlju u blizini pruge zbog lutajućih struja, jer dolazi do djelovanja elektrolize. Tračnice i cijevi ili omotači kabela su elektrode, a kao elektrolit služi vlažna i agresivna zemlja (v. *Korozija*). Strujni krug elektrovuče zatvara se od ispravljača preko kontaktne mreže, vozila i natrag kroz tračnice i zemljište do uzemljenja tačke sekundara transformatora podstanice. Struja koja se vraća kroz povratni vod u podstanicu ne prolazi nikada sva kroz tračnice, već jedan njezin dio (čak i do 40% a ponekad i do 60%) prolazi najkraćim putem do elektrovočne podstanice kroz zemlju kao tzv. lutajuće struje i za prolaz koristi se metalnim cijevima vodovoda i plina, kao i armaturom i zaštitnim plaštevima jakostrujnih i telekomunikacionih kabela. Pri tome lutajuće struje korodiraju cijevi i kabele, prvenstveno na mjestima njihova izlaza iz tih instalacija, i to naročito u blizini elektrovočnih podstanica. Iznimku čine omotači od aluminijuma ili njegovih legura, koje struja pri koroziji nagrizava jednako i kad ulazi i kad izlazi.

Mjere za smanjivanje lutajućih struja pri istosmjernoj vuči idu za tim da se smanje povratne struje koje napuštaju tračnice i kreću se kroz zamlište kao lutajuće struje. To se može ostvariti povećanjem otpora između tračnica i zemlje, a donekle se postiže dobrim pragovima, čistim šljunčanim zastorom i povećanjem vodljivosti tračnica koje služe kao povratni vod (varenjem vezica na sastavima tračnica ili premazom grafitne masti ispod šinskih pločica ili direktnim zavarivanjem tračnica u duge kolosiječne trakove na suvremenom kolosijeku). Za rasprostiranje lutajućih struja mjerodavan je i specifični otpor zemlje. Prema iskustvu zemlja specifičnog otpora preko $25 \Omega\text{m}$ ne izaziva koroziju, zemlja s otporom od 25 do $20 \Omega\text{m}$ slabo je korozivna, kad joj je otpor od 20 do $10 \Omega\text{m}$ ona je korozivna, a kad je otpor od $10 \Omega\text{m}$ naniže njeno je korozivno djelovanje vrlo jako.

Potpuno izoliranje tračnica od zemlje gotovo je nemoguće. U praksi se primjenjuju različiti sistemi, od izolacije kolosijeka prema zemlji, u kom slučaju tračnice nisu spojene sa stupovima kontaktne mreže i drugim metalnim konstrukcijama, do spajanja stupova s tračnicama, bilo preko probojnog osigurača radi osiguranja od struje kratkog spoja, bilo direktno, u kojem je slučaju sve zajedno uzemljeno, osigurano i zaštićeno. Stupovi se uzemljuju svaki posebno ili su povezani zaštitnim uzetom.

O zaštiti cijevnih i električnih vodova od lutajućih struja v. *Električni vodovi, Korozija*.

Utjecaj električne vuče na telekomunikacione vodove. Elektrificirane pruge i električna vuča utječu na obližnje telekomunikacione nadzemne linije i kabele. Ti su utjecaji različiti u režimu redovne eksploatacije vuče i pri kratkom spoju.

Uzroci koji utječu na stvaranje tih pojava jesu: elektrostatičko djelovanje (električna indukcija) na telekomunikacione vodove zbog djelovanja električnog polja kontaktne mreže pod naponom

i elektromagnetsko djelovanje (elektromagnetska indukcija) na telekomunikacione vodove zbog utjecaja magnetskog polja što ga stvaraju struje promjenljive jakosti koje teku u kontaktnom vodu. Promjene struje mogu biti izmjeničnog oblika, kao što je to pri jednofaznoj vuči i pri ispravljenoj valovitoj istosmjernoj struji (pri postojanju harmoničnih nadtitraja) ili pak zbog naglih promjena jakosti struje kad nastane kratki spoj na kontaktnom vodu pri istosmjernoj i jednofaznoj vuči.

Električni utjecaj je elektrostatička pojava koja nastaje zbog djelovanja električnog polja voda pod naponom na zračnu telefonsku liniju. Struja i frekvencija tu nemaju nikakvu ulogu.

Električni utjecaj može se izraziti formulom $V = U C_1 / C_2$, gdje je C_1 kapacitet između kontaktne mreže i telefonske linije, a C_2 kapacitet između telefonske linije i zemlje (C_1 je vrlo malen prema C_2), U je napon u kontaktnoj mreži, a V je nepoželjan potencijal u telekomunikacionom vodu (sl. 28).



Sl. 28. Elektrostatički utjecaj kontaktne mreže na zračnu telekomunikacionu liniju

Elektromagnetski utjecaj pojavljuje se zbog elektromagnetske indukcije što je izaziva struja koja za vrijeme napajanja lokomotive teče u kontaktnoj mreži. Taj je utjecaj to veći što je frekvencija struje i njenih harmonika viša, što je jakost struje veća, što su promjene struje brže i veće i što je sprega između kontaktne mreže i telekomunikacionog voda veća (što je veći koeficijent međusobne indukcije M). Napon kontaktne mreže, naprotiv, nema nikakvu ulogu. Inducirane elektromotorne sile koje se pojavljuju u pojedinim vodičima voda nisu jednake jer se pojedini vodiči nalaze u oblastima različitih jakosti magnetskih polja. Razlike tih napona između vodiča pojedinih vodova ili između vodiča i zemlje predstavljaju smetnje u telekomunikacionim vodovima. Inducirana elektromotorna sila proporcionalna je kružnoj frekvenciji $\omega = 2\pi f$, koeficijentu korekcije k , koeficijentu međuinukcije M , duljini l paralelnog vođenja linija uz kontaktnu mrežu i jakosti struje I u kontaktnoj mreži. Inducirani napon u cijeloj dužini voda iznosi: $e = k \omega M l I$ ili za jedinicu duljine telekomunikacionog voda: $e' = k \omega M' I$. Uobičajeno je da se e' izražava u V/km.

Posljedice koje mogu električna i elektromagnetska indukcija izazvati u telekomunikacionim vodovima i kabelima koji se nalaze u blizini kontaktne željezničke mreže mogu biti raznovrsne. Tako može npr. doći do oštećenja instalacije, do pojave nisko-frekventnih smetnji i do pojave šumova, a poslužujući i drugi korisnici telekomunikacionih naprava mogu biti izloženi električnom i akustičnom udaru.

Električna vuča utječe mnogo jače na nezaštićene zračne telekomunikacione vodove nego na armirane, metalnim plaštom opremljene, posebno zaštićene i ukopane kabele, i mnogo više pri jednofaznoj vuči nego pri istosmjernoj. To je stoga što je utjecaj električne indukcije veći pri višim naponima koji se primjenjuju u jednofaznoj električnoj vuči, što je utjecaj elektromagnetske indukcije već pri normalnom pogonu vuče jači kad je struja izmjenična i što su struje kratkog spoja na kontaktnom vodu jednofazne vuče veće. Prema tome od svih sistema električne željezničke vuče na telekomunikacione vodove najviše utječe jednofazni sistem 25 kV , 50 Hz . Njegov je utjecaj veći nego utjecaj sistema 15 kV , $16\frac{2}{3} \text{ Hz}$ zbog višeg napona i više frekvencije.

Utjecaji na telekomunikacione zračne linije. Pri primjeni istosmjernih sistema pojavljuju se, zbog djelovanja električnih polja kontaktne mreže pod naponom, opasnosti od električnog udara i smetnje zbog dodatnih napona što ih prouzrokuju harmonički članovi ispravljene struje. Nadalje se javljaju smetnje pri redovnom radu vuče, zbog elektromagnetskog djelovanja, ako ispravljena istosmjerna struja sadrži harmoničke članove. Da se to spriječi, ugrađuju se električni rezonantni filtri uz ispravljačke grupe. Opasnosti strujnog udara postoje i zbog djelovanja elektromagnetske indukcije kad nastane kratki spoj u kontaktnoj mreži. Pri primjeni sistema s jednofaznom izmjeničnom strujom

pojavljuje se, zbog djelovanja električnog polja kontaktne mreže pod naponom, opasnost električnog udara, a i smetnje zbog različitih djelovanja na dva vodiča telefonskih linija i stvaranja parazitskih struja. Pri redovnoj vuči pojavljuju se zbog elektromagnetske indukcije opasnosti i smetnje, a kratki spoj na kontaktnoj mreži može izazvati opasnost zbog elektromagnetske indukcije.

Utjecaji na telekomunikacione kabele manji su nego na zračne linije jer su kabeli zaštićeni od elektrostatičkog djelovanja. Do izražaja dolazi samo djelovanje elektromagnetske indukcije, a i ono je manje, pa su stoga opasnosti i smetnje manje i pri istosmjernoj i pri jednofaznoj vuči.

Postojeći standardi u vezi sa štetnim djelovanjem elektrificiranih pruga na obližnje telekomunikacijske vodove propisuju najviše dozvoljene inducirane napone za pojedine slučajeve. Na zračnim linijama može doći do *akustičnog udara* kad se telekomunikacijski vodovi nabiju do te mjere da na njima vlada napon veći od 300 V, što je i granica na kojoj prorade osigurači i prenaponski odvodnici telefonskih linija. Stoga se dozvoljava da elektrostatički utjecaj izaziva napone do najviše 300 V. Na zračnim linijama može nastati opasnost od *električnog udara* za poslužioce i proboj izolacije ako se trajno inducira poduzna EMS veća od 60 V ili veća od 140 V u specijalno građenim linijama s umetnutim translatorima, a u režimu kratkog spoja ako je inducirana EMS veća od 430 V. Na kabelskim linijama nema gotovo nikakve opasnosti od elektrostatičkog utjecaja, ali postoji opasnost *uništenja izolacije kabela* pod djelovanjem elektromagnetskog polja i to pri jednofaznoj vuči u normalnom radu i pri kratkom spoju, a pri istosmjernoj vuči samo u slučaju kratkog spoja. Propisano je da inducirana EMS u vodičima kabela ne smije biti viša od 60% u odnosu prema najnižem naponu ispitivanja dielektrične čvrstoće prema omotaču. Smetnje na zračnim linijama koje se pojavljuju u obliku *parazitskih šumova* definiraju se pomoću psfometrijskog napona (napona šuma) koji se određuje signalnim generatorom pri frekvenciji 800 Hz. Granica je dozvoljenog psfometrijskog napona 5 mV za zračne vodove, mjereno na kraju. Smetnje u kabelima nastaju samo zbog elektromagnetskog utjecaja, a psfometrijski napon ne smije preći 2 mV.

Mjere za sprečavanje opasnosti i smetnji na telekomunikacionim vodovima. Pri istosmjernim sistemima vuče primjenjuju se mjere navedene u nastavku. Da se zaštite zračni telekomunikacioni vodovi od opasnosti elektromagnetskog utjecaja, čak i u slučaju kratkog spoja na kontaktnoj mreži, dovoljno je da se telekomunikacioni strujni krugovi opreme osiguračima i odvodnicima prenapona za 300 V, kako je to i inače propisano. Da se spriječe parazitski šumovi koje stvara valovita istosmjerna struja kontaktne mreže u telekomunikacionim vodovima, a koja je posljedica ispravljanja izmjenične struje s pomoću živinih ispravljača, obavezno se u elektrovočnim podstanicama u krug ispravljene struje ugrađuju prigušnice i filtri. Prigušnicama ublažuje se valovitost struje, a pojedinim filtrima prigušuju se pojedini harmonici (300, 600, 900 i 1200 Hz) koji se pojavljuju u kontaktnoj mreži. Filtri mogu biti pojasi ili selektivni, tj. podešeni tačno na smetajuće frekvencije. U navedene mjere mogu se postaviti zračne telekomunikacione linije duž pruga elektrificiranih istosmjernim sistemom, ali se ipak većinom istovremeno s elektrifikacijom pruge moderniziraju i telekomunikacije, pa se telekomunikacioni vodovi izvode kabelski.

Pri izmjeničnim jednofaznim sistemima vuče primjenjuju se ove mjere:

Zračni vodovi telekomunikacionih linija izmjeničnog jednofaznog sistema 25 kV, 50 Hz moraju, radi smanjenja elektrostatičkog djelovanja, biti odmaknuti od pruge na udaljenost 50 m od kontaktne mreže, kako napon izazvan električnom indukcijom ne bi prešao 300 V. Time se udovoljava i normi da psfometrijski napon ne pređe 5 mV. Međutim, zbog induktivnog elektromagnetskog djelovanja struje kontaktne mreže, zračni vodovi moraju se udaljiti na nekoliko stotina metara (preko 300 m) od kontaktne mreže. Umjesto toga mogu se telefonske linije porazdijeliti na dionice od 6 km, da se ostane ispod dozvoljene inducirane EMS od 60 V u normalnom radu elektrovoče, a ispod 430 V za slučaj kratkog spoja. Psfometrijski napon ostaje u tom slučaju ispod dozvoljenog maksimuma od 5 mV. Kako je i jedno i drugo

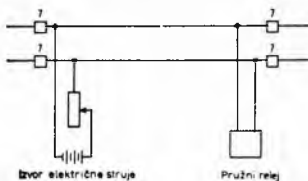
često skupčano s poteškoćama i troškovima, obično se pri jednofaznom sistemu telefonski vodovi smještaju u kabele.

Telefonski kabeli koji su položeni duž elektrificiranih pruga s jednofaznim sistemom ne podliježu više elektrostatičkom djelovanju kontaktne mreže pod naponom jer su ukopani u zemlju i imaju metalni plašt, a znatno se smanjuje i utjecaj zbog elektromagnetske indukcije što je izaziva struja vuče. Polaganjem kabela otklanjaju se i smetnje od šumova jer je psfometrijski napon u kabelima znatno niži od 2 mV, čak ako voze i električne lokomotive s ispravljačima (koji stvaraju u kontaktnoj mreži harmoničke nadtitraje u području govorne frekvencije). Da se smanje EMS koje se pojavljuju zbog djelovanja magnetske indukcije, u praksi se telekomunikacioni kabelski vodovi dijele na dionice od ~15 km upotrebom translatora. Time se postiže da se ne prelazi propisana vrijednost od 420 V između vodiča, tj. 60% probojnog napona između vodiča telefonskih kabela (700 V) i između vodiča i mase 1200 V, tj. 60% od dozvoljenih 2000 V između jednog vodiča i obloge kabela. Tada je kabel zaštićen za normalan rad vuče i od kratkog spoja, ako se pretpostavi da je normalna struja vuče jednofaznog sistema 400–600 A, a struja kratkog spoja ~2000 A.

Utjecaji pri jednofaznom sistemu 16½ Hz u praksi su za oko polovinu manji nego pri jednofaznom sistemu 50 Hz.

Prilagođavanje signalnih postrojenja elektrificiranim prugama. Na elektrificiranim prugama mora se uskladiti sistem električnih signalnih postrojenja (automatskog pružnog bloka) sa sistemom električne vuče. U vezi s time treba osigurati da u tračnicama usporedno postoje struje signalizacije i struje vuče (osim, dakako, kad pruga ima mehanički sistem signalizacije).

Pri primjeni automatskog pružnog bloka pruga je podijeljena na izolirane odsjeke od 1–2 km, tzv. signalne prostorne razmake. Na svaki takav izolirani odsjek dviju tračnica priključen je s jedne strane izvor struje, npr. baterija, a na drugom kraju kolosiječni pružni relej (sl. 29). Normalno je da izvor napaja pružni relej



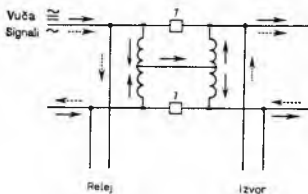
Sl. 29. Shema signalnog pružnog odsjeka

kroz obje tračnice; dok je relej pod naponom, signalni uređaj pokazuje da je kolosiječni put slobodan. Čim se tračnice premoste osovinom lokomotive ili vagona, premosti se i strujni krug, pružni relej ostaje bez napona i signalni uređaj automatski pokazuje zauzetost pruge. Signalni prostorni razmaci mogu se na željezničkim prugama izvesti izoliranjem objiju tračnica ili samo jedne, jer je i to dovoljno za uzastopne izolirane odsjeke. Kraće se to zove *dvostračnička* i *jednostračnička izolacija*. Bolje je da su signalni razmaci izolirani na objema tračnicama jer se onda automatski može osim prisutnosti vlakova signalizirati i pucanje jedne ili druge tračnice (v. *Signalni i sigurnosni uređaji*).

Za signalna postrojenja mora se primijeniti druga vrsta struje nego za vuču, i to pri istosmjernoj vuči izmjenična struja, a pri jednofaznoj vuči istosmjerna struja ili izmjenična struja druge frekvencije nego što je ima struja vuče.

Treba osigurati put povratnoj struji vuče i pored izolacije signalnih prostornih razmaka. Kad se upotrebljava jedna tračnica za izolirane odsjeke signalizacije a druga za povratnu struju električne vuče, nema posebnih problema. Jednostračnička izolacija signalno-sigurnosnih uređaja može se primijeniti pri istosmjernoj struji vuče ako je dovoljna samo jedna tračnica za povratnu struju vuče, a pri jednofaznoj vuči ako se primijeni istosmjerna struja za napajanje izoliranih odsjeka signalizacije.

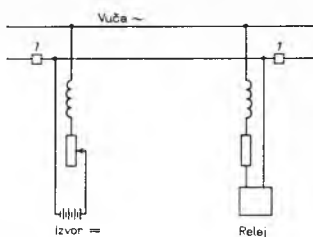
Kad se istodobno koriste obje tračnice i za izolirane odsjeke i za povratnu struju vuče, za napajanje signalnih odsjeka upotrebljava se samo izmjenična struja, a na izoliranim sastavima između tračnica upotrebljavaju se prigušnice (sl. 30). Dvostrač-



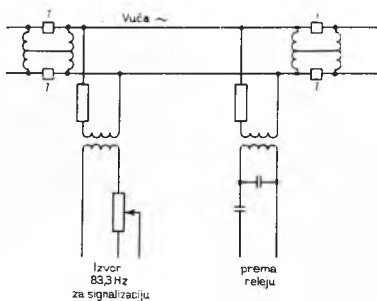
Sl. 30. Upotreba induktivnih međuprigušnica kad električna vuča iskorišćuje obje tračnice. 1 Izolirani sastavi među tračnicama

nička izolacija primjenjuje se pri istosmjernoj vuči kad jedna tračnica nije dovoljna za povratne struje ili se izričito želi da su obje tračnice izolirane za signalizaciju, a pri jednofaznoj vuči kad je za izolirane odsjeke primijenjena izmjenična struja posebne frekvencije. Krug izmjenične struje signalizacije zatvara se u svakom prostornom signalnom razmaku od izvora napajanja preko dvije tračnice i pružnog releja i ne prelazi međuprigušnicu kod izoliranih sastava tračnica, zbog njezina velikog induktivnog otpora; povratna struja vuče, pak, teče paralelno u objema tračnicama u istom smjeru i protječe preko i između sredine dvaju induktivnih svitaka međutračničke prigušnice. Istosmjerna struja vuče, naime, prolazi lako kroz induktivne svitke, ali lako prolazi i izmjenična struja vuče u ovom slučaju, jer u polusvicima prigušnice teku jednofazne struje suprotnog smjera i njihovi se magnetski tokovi među sobom poništavaju.

Općenito se izolirani pružni odsjeci za signalizaciju na prugama elektrificiranim istosmjernim sistemom napajaju izmjeničnom strujom 50 Hz, na prugama elektrificiranim jednofaznim sistemom pri jednotračničkoj izolaciji napajaju se istosmjernom strujom (sl. 31), a pri dvotračničkoj izolaciji izmjeničnom strujom frekvencije koja se razlikuje od frekvencije jednofazne vuče, npr. 83,3 Hz, da se izbjegne frekvencija 50 Hz i njeni harmonici 100 i 150 Hz (sl. 32), ili pak izmjenična struja zvučnih frekvencija (npr. kombinacija 300 i 850 Hz).



Sl. 31. Jednofazna vuča. Jednotračnička izolacija uz napajanje odsjeka za signalizaciju istosmjernom strujom. / Izolirani sastavi među tračnicama



Sl. 32. Jednofazna vuča. Dvotračnička izolacija uz napajanje odsjeka za signalizaciju posebnom frekvencijom 83,3 Hz. / Izolirani sastavi među tračnicama

U najnovije vrijeme počinju se i u nas upotrebljavati brojači osovinama umjesto signalizacije koja radi pomoću izoliranih tračničkih odsjeka, kako na velikim ranžirnim stanicama tako i na elektrificiranim prugama. Brojači osovinama aktiviraju se pritiskom prolaska vozila, ne trebaju nikakve prigušnice među kolosijecima niti izolirane sastave. Oni na određenoj pružnoj dionici, po volji dugačkoj, utvrđuju elektroničkim putem broj ušlih i izašlih osovin nekog vlaka; ako se oba broja slažu, to znači da je kolosiječni put slobodan i ta se informacija prenosi na signal.

Sučeljavanje dvaju sistema elektrificiranih pruga izvodi se na mjestu gdje se ta dva različita sistema stiču (sastaju). To može biti na pograničnim stanicama, ako željeznice dviju susjednih zemalja imaju različite sisteme elektrifikacije, ili unutar željezničke mreže iste zemlje, ako u njoj postoje dva sistema elektrifikacije.

Za rješenje sučeljavanja dvaju sistema elektrifikacije pruga postoje dvije mogućnosti i, kao treća, njihova kombinacija. Prvi

je način da se na stanici sučeljavanja električne lokomotive jednog sistema zamijene lokomotivama drugog sistema, a drugi da se električna vuča vrši posebnim dvosistemskim ili višesistemskim električnim lokomotivama. Pri kombinaciji jednog i drugog načina za neke se vlakove primjenjuju višesistemске lokomotive (npr. za brze vlakove), a za druge (npr. osobne i teretne), lokomotive se mijenjaju.

U vezi s time mogu stanice za sučeljavanje s obzirom na kontaktnu mrežu i sigurnosne uređaje biti riješene na više načina.

Pri primjeni *sistema s izmjenom lokomotiva* svi se vlakovi moraju zaustaviti i zadržati na stanici sučeljavanja. Za izmjenu lokomotiva uobičajena su tri rješenja. Prema prvom, kontaktna je mreža do sredine stanice pod jednim sistemom, a u drugom dijelu stanice pod drugim sistemom. Električne lokomotive ulaze na kolosijeke stanica sa spuštanim pantografom pod kontaktnu mrežu drugog sistema. Zatim ih lokomotiva drugog sistema ili dizelska manevarka odvlači i doveze natrag pod kontaktnu mrežu njihova sistema, za odvoz drugih vlakova u suprotnom smjeru, a kompoziciju preuzima lokomotiva drugog sistema. Ovaj se način najranije upotrebljavao, obično u pograničnim stanicama (npr. na stanici Brenner). Prema drugom rješenju, kontaktna mreža na jednim kolosijecima predviđena je samo za istosmjerni sistem vuče, a na drugima samo za jednofazni izmjenični sistem vuče. Kontaktna mreža kolosijeka koji se nalaze između njih može se priključiti ili na jedan ili na drugi sistem. Prema potrebi ona se priključi na onaj sistem koji odgovara sistemu za koji je građena električna lokomotiva ili koji je primijenjen na pruži po kojoj će vlak krenuti. U ovom se slučaju električne lokomotive odvoze same i sklanjaju na kolosijeke svog napona bez pomoći druge lokomotive. Ovaj se način najviše primjenjuje u stanicama sučeljavanja srednje veličine ili u manjim stanicama bliže velikim čvorovima. Treće je rješenje da su kolosijeci, kontaktna mreža i peroni jednog sistema potpuno odvojeni od postrojenja drugog sistema. Taj se način obično primjenjuje u većim stanicama u kojima se od glavne pruge odvajaju sporedna, drugim sistemom elektrificirana pruga na koju nema direktnih vlakova sa glavne.

Upotreba višesistemskih lokomotiva daje mogućnost boljih rješenja sučeljavanja. Višesistemске električne lokomotive (v. *Električna vuča*, TE 3, str. 702) prelaze obično na postrojenje drugog sistema u vožnji, bez zaustavljanja na izoliranom odsjeku koji razdvaja oba sistema.

Kombinirani način primijenjen je i na jugoslavenskim željeznicama u stanici Dobova, gdje se sučeljavaju istosmjerni sistem 3 kV s jednofaznim 23 kV, 50 Hz: za teretne vlakove zamjenjuje se lokomotiva, a za vuču brzih i ekspresnih vlakova na pruži Ljubljana—Zagreb upotrebljavaju se dvosistemске električne lokomotive. U pograničnoj stanici Jesenice, gdje se sučeljavaju sistemi 3 kV iz Slovenije i 16½ Hz, 15 kV iz Austrije, vrši se izmjena električnih lokomotiva dvaju sistema.

Uspoređenje parne, dizelske i električne vuče. Prva željeznica, i to s parnom vučom, krenula je 1825 godine. Početkom ovog stoljeća uvodi se za željezničku vuču električni motor, a zatim i dizelski motor. Parna vuča vladala je suvereno gotovo sto godina, a onda je postepeno gubila primat i ustupila mjesto električnoj i dizelskoj vuči.

Evropa se odlučila načelno za elektrifikaciju glavnih pruga, za prelaz na dizelsku vuču na sporednim prugama i za primjenu dizelske vuče pri manevarskom radu. Međutim, ponegdje se u Evropi prešlo na dizelsku vuču i na glavnim prugama u prelaznom periodu do elektrifikacije. U USA, zbog niske cijene plinskog ulja u odnosu prema cijeni električne energije, data je prednost dizelskoj vuči. U ostalim zemljama svijeta prihvaćen je, prema okolnostima, jedan ili drugi način vuče ili neka njihova kombinacija.

Prikaz prednosti i nedostataka parne, dizelske i električne vuče bit će iznijet s obzirom na tehničke karakteristike lokomotive, vučne mogućnosti, saobraćajne prilike, energetske pokazatelje i ekonomske momente.

Tehničke karakteristike i vučne mogućnosti lokomotiva. Snaga električnih lokomotiva znatno je veća od snage dizelskih i parnih lokomotiva. Prosječna snaga jačih parnih lokomotiva kreće se od 1000 do 2000 KS, dizelskih od 2000 do 3000 KS, a električnih

od 3000 do 5000 KS, iako se danas grade poneke dizelske lokomotive za snage do 4000 KS, a električne čak i preko 6000 KS. Snaga parne lokomotive termički je ograničena kotlom, a dizelske snagom pogonskog dizelskog motora koji se još može ugraditi na lokomotive određenog tipa, veličine i težine. Stoga su električne lokomotive nekoliko puta snažnije od dizelskih iste težine. Danas se zahtijeva velika snaga radi postizanja velikih brzina ili vuče teških vlakova, ili jedno i drugo. Veća snaga lokomotive omogućava i veća ubrzanja vlakova. Parnе lokomotive imaju ubrzanje od 0,05 (za teretne) do 0,20 m/s² (za putničke vlakove), električne lokomotive za putničke vlakove 0,15...0,30 m/s², a elektromotorni vlakovi za međugradski saobraćaj 0,30...0,60 m/s².

Pri istoj snazi električne lokomotive imaju manju masu nego druge vrste lokomotiva jer se specifična masa kreće ovako: za električne lokomotive ranije 40...60 kg/KS, a danas ~15...20 kg/KS, za dizelske lokomotive 40...65 kg/KS i za parne lokomotive oko 55 kg/KS, ranije i do 100 kg/KS. To znači da lokomotive teške 80 t sa četiri pogonske osovine mogu imati: ~4500...5500 KS ako su električne, a ~1200...2000 KS ako su dizelske, i lokomotive težine 120 t sa 6 pogonskih osovine 6000...8000 KS ako su električne i 1650...4000 KS ako su dizelske.

Odnos vučne sile i brzine, tzv. vučni pasož lokomotive, za istu je snagu lokomotive najpovoljniji kod električne lokomotive. Iza toga dolazi dizelska, a tek onda parna lokomotiva. Električne lokomotive postižu vučne sile za blizu 25% veće s težinom koja je za trećinu manja nego pri parnoj lokomotivi. Srednja vrijednost koeficijenta adhezije (iskoristivog dijela koeficijenta trenja) električnih lokomotiva suvremene konstrukcije iznosi i do 0,33, što osigurava vuču većeg tereta lakšim lokomotivama. Kako su u električnim lokomotivama ugrađeni elektromotori velike snage, to im dobre vučne i adhezione osobine omogućavaju da vuku velike brze vlakove brzinom od 120 do ~200 km/h i teške teretne vlakove brzinom od 80 do ~120 km/h, već prema konstrukcijskoj brzini vagona. Tako može npr. električna lokomotiva mase 80 t vući na usponu od 10% vlakove od 1200 do 1500 t.

Serijski motor električne lokomotive sposoban je da izdrži veća kratkotrajna preopterećenja, čak i do 50%, trenutno i do 100%, ako je kontaktna mreža dovoljno jaka. Dizelski motor, naprotiv, to ne može. Od lokomotiva se traži velika vučna sila pri polasku i pri malim brzinama i, obratno, manja vučna sila pri velikim brzinama u vožnji, tj. brza promjena vučne sile ili momenata u zavisnosti od brzine. Tome odgovara parna vuča i, pogotovo, električna vuča zbog karakteristika serijskog vučnog elektromotora. Njegov moment može biti pri polasku za 1,5 do 2 puta veći od nominalnog.

Mehanička karakteristika dizelskog motora $M = f(n)$ nije po svom obliku podesna za vuču, jer mu se moment vrlo malo mijenja pri promjeni brzine vrtnje (sl. 33). To dolazi otuda što je volumen cilindra konstantan, a i količina ubrizganog goriva po jedinici energije malo se mijenja s brzinom (~160...190 g/KS h). Snaga motora proporcionalna je brzini; da bi se povećala snaga, treba povećati brzinu. Kad motor radi punom brzinom, koja je ograničena zagrijavanjem, dizelski motor razvija maksimalnu ili punu snagu. Da bi se dizelski motor mogao primijeniti u vuči, treba na lokomotivu ugraditi poseban prenosnik snage, koji omogućuje da se preobrazbi moment i da se vučna sila mijenja s brzinom. Međutim, preopterećenja nisu moguća ni tada, jer je snaga ograničena maksimalnom snagom dizelskog motora odnosno dizelskog agregata. Prenosnici snage dizelki mogu biti: hidraulični (s tekućinom), mehanički (sa zupčanicima) i električni (s kombinacijom dizelskog generatora i serijskih električnih vučnih motora). Tako su nastale različite vrste dizelskih lokomotiva: dizelsko-mehaničke, dizelsko-hidraulične i dizelsko-električne.

Električna lokomotiva ima daleko veću radnu sposobnost nego druge vrste lokomotiva jer joj ne treba ni priprema pare, ni priprema snage dizelskog motora, ni popunjavanje zalihe goriva, već je ona sposobna da krene čim se priključi na kontaktnu mrežu. Električne lokomotive imaju, stoga, u prosjeku veći dnevni rad u vuči i veću dnevnu kilometražu. Ova može biti za ~50% veća nego pri dizelskoj vuči i za ~100% veća nego pri parnoj vuči, ali razlika može pod određenim uslovima pruge i vuče biti i

veća. Prosječno se vrijeme korišćenja elektrolokomotiva prema vremenu korišćenja dizelskih i parnih lokomotiva odnosi kao 4000 : 3000 : 2000 h/god. ili 11 : 8,25 : 5,5 h/dan. S obzirom na to da je iz naprijed iznijetih razloga pri električnoj vuči potreban manji broj lokomotiva nego pri dizelskoj ili parnoj vuči, manji je i broj osoblja, a manje treba i depoa (remiza) za lokomotive.

Ekonomični rok trajanja i korišćenja iznosi za parne lokomotive 35, za dizelske lokomotive 20, a za električne lokomotive 35...40 godina.

Saobraćajne prilike. Evropa ima relativno gust saobraćaj vrlo brzih putničkih vlakova mase 350...1000 t, jak prigradski saobraćaj milijunskih gradova i teretne vlakove mase 350...2000 t, koji voze brzinom i do 80 (iznimno 120) km/h, a uz manju nosivost pojedinih teretnih vagona. (Takav vlak može da povuče jedna četvero- ili šesteroosovinska električna lokomotiva; iznimno su potrebne dvije). SSSR i USA, naprotiv, imaju teretne vlakove znatno veće mase, prosječno 3000...5000 t, zbog veće nosivosti vagona i zbog prevoza na veoma velike udaljenosti. U SSSR prevoz se vrši pretežno električnom vučom, u USA se za tu svrhu primjenjuje pretežno dizelsko-električna vuča zaprežanjem po nekoliko lokomotiva.

Po svim tehničko-saobraćajnim i vučnim pokazateljima prednost ima električna vuča, osim što je dizelska vuča autonomnija, jer za električnu vuču treba graditi stabilna postrojenja elektrifikacije. Ipak i u saobraćajnom pogledu električna vuča ima prednost što, zbog veće brzine i težine vlakova, isti rad vrši s manjim brojem lokomotiva te povećava propusnu i prevoznu moć pruga, a u pojedinim je slučajevima i jedini izlaz (na jako opterećenim prugama, osobito brdskim).

Energetska analiza vuče. Korisnost parnih lokomotiva od izvora energije (uglja) do vuče, tj. do snage razvijene na obodu točka, kreće se u granicama $\eta_{pv} = 2,5\text{--}5\%$. Niža vrijednost vrijedi za manevre i češće zaustavljanje vlakova. Iako moderna parna lokomotiva može doseći pri punoj snazi i radu bez gubitaka i praznog hoda $\eta_{max} = 10\text{--}12\%$, ipak se pri parnoj vuči samo u praznom hodu troši ~20% energije, prema 5% kod dizelske vuče i 2% kod električne vuče. U Evropi se u godišnjem prosjeku korisnost parne vuče, ovisno o vrsti rada, kreće otprilike između 2,8 i 4%. Parna lokomotiva ima veću korisnost pri punoj snazi i stalnoj vožnji, a manju pri manevru i čestom stajanju.

Korisnost suvremenih dizelsko-električnih lokomotiva od pogonskog goriva do snage razvijene na obodu točka iznosi maksimalno $\eta_{max} = 26\text{--}32\%$, a prosječno $\eta_{dv} = 16\text{--}20\text{--}22\%$, već prema načinu primjene u vuči i prema tipovima lokomotiva. Vidi se da je korisnost mnogo veća pri dizelskoj vuči nego pri parnoj vuči.

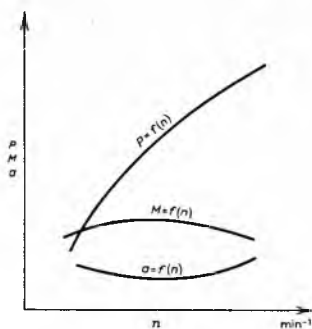
Korisnost električne vuče računajući od pogonske energije do snage razvijene na obodu točka lokomotive iznosi $\eta_{ev HE} = 38\text{--}48\%$ ako je električna energija iz hidroelektrana, a $\eta_{ev TE} = 10\text{--}25\%$ ako je iz uglja (manji iznos vrijedi za stare a veći za nove termoelektrane). Ovi podaci važe ako se uzme da je korisnost hidroelektrana ~70%, a termoelektrana na uglj od 19 (stare) do 37% (nove). U termoelektranama na uglj potrebno je, naime, 4500...2200 kcal/kWh, a u termoelektranama na plinsko ulje ~2000 kcal/kWh. Korisnost u prenosu energije iznosi od praga elektrane do lokomotive $\eta_{pre} = 72\text{--}80\%$ (za sve dalekovode 90%, za elektrovučne podstanice 90% i za kontaktnu mrežu 88% prosječno u praksi, iako se pojedinačno postižu i viši iznosi, tako za vodove 95%, za elektrovučne podstanice 92...98% i za kontaktnu mrežu 92...98%), a za električnu lokomotivu od pantografa električne lokomotive do snage razvijene na obodu točka pojedinačno ~80...88%, a prosjek u praksi $\eta_{elok} = 75\text{--}85\%$.

Uzme li se ukupni stepen djelovanja pri proizvodnji, prenosu energije do lokomotive i korištenju na lokomotivi, dobije se stepen djelovanja električne vuče:

$$\eta_{ev HE} = \eta_{HE} \cdot \eta_{pre} \cdot \eta_{elok} = 38\text{--}48\%,$$

$$\eta_{ev TE} = \eta_{TE} \cdot \eta_{pre} \cdot \eta_{elok} = 10\text{--}25\%.$$

Iz podataka: $\eta_{pv} = 2,5\text{--}5\%$, $\eta_{dv} = 16\text{--}20\text{--}22\%$, $\eta_{ev TE} = 10\text{--}25\%$ i $\eta_{ev HE} = 38\text{--}48\%$ može se zaključiti da se uglaj energetske najslabije iskorištava u parnoj lokomotivi, a nekoliko puta bolje ako se spaljuje u termoelektrani i proizvedena elek-



Sl. 33. Karakteristike dizel-motora: $P = f(n)$, $M = f(n)$ i $Q = f(n)$, gdje je a potrošnja goriva po KS i satu, P snaga, M moment i n brzina vrtnje

trična energija upotrijebi za elektrovoću. Dalje, da se plinsko ulje bolje iskorištava na dizelskoj lokomotivi nego ugalj u parnoj vući, ali ne bolje nego ugalj u novoj termoelektrani; da se plinsko ulje energetski približno jednako iskorištava u dizelskoj lokomotivi kao i u termoelektrani, ali da, s obzirom na gubitke u prenosu do električne lokomotive, nije baš povoljno trošiti dizelsko ulje u termoelektrani za elektrovoću. Sve je to tačno ako se gleda samo s energetskog stanovišta, bez obzira na cijene goriva.

Specifična potrošnja ugljena, plinskog ulja i električne energije označava potrošak po jedinici rada vuče, a izražava se u jedinicama kg/1000 btkm (za ugalj) i plinsko ulje) ili kWh/1000 btkm (za električnu energiju).

Kratica btkm znači bruto-tonakilometar. U tehničkom sistemu jedinica tonakilometar istovremeno je mjera za količinu tereta prevezenog na nekoj pruzi (bruto znači uključujući i težinu vlakla) i za rad izvršen tim prevozom. U današnjem zakonskom sistemu jedinica, tog jedinici u prvom smislu odgovara tonakilometar, a u drugoj megapondkilometar (Mpkm). Numeričke vrijednosti prevezenog tereta u tonakilometrima i rada izvršenog tim prevozom u megapondkilometrima jednake su, pa mogu u brojčanim jednadžbama jedna drugu zamijeniti.

Specifična potrošnja goriva q za parnu i dizelsku vuču izračunava se iz brojčane jednadžbe

$$q = 2342 \frac{w_0 + i_m}{H \cdot \eta} \text{ [kg/1000 btkm]},$$

gdje je H kalorična vrijednost uglja ili plinskog ulja (kcal/kg), η korisnost parne ili dizelske vuče, w_0 ukupni specifični otpor kretanja vlaka i lokomotive (kp/MPa), i_m dodatni specifični otpor zbog uspona (= mjerodavnom usponu u ‰, v. *Električna vuča*, TE 3, str. 692), a 2342 je omjer $Mpmk/kcal$.

Specifična potrošnja a električne energije za električnu vuču iznosi:

$$a = 2,72 \frac{w_0 + i_m}{\eta_{\text{exp}} \cdot \eta_{\text{km}} \cdot \eta_{\text{elok}} \cdot \tau} \text{ [kWh/1000 btkm]},$$

gdje je 2,72 omjer M_{pk}/kW_h , a τ je faktor iskorištenja snage lokomotive, koji pokazuje koliki se dio maksimalne snage lokomotive stvarno iskorištava u vuči.

Specifična potrošnja je, dakle, ovisna o vrsti vlaka (jer o vrsti vlaka ovisi i specifični otpor kretanja w_0 ; manji je za teretne vlakove, $w_0 = 3,5 \cdots 6$ kp/Mp, a veći za brze $w_0 = 4 \cdots 10$ kp/Mp), o veličini uspona pruge (i_m) i o faktoru iskorištenja snage lokomotive. Faktor iskorištenja snage lokomotive pri putničkom je saobraćaju na duge relacije bez zaustavljanja $\tau = \sim 50\%$, za teretne vlakove $\tau = 8 \cdots 40\%$, za putničke vlakove $\tau = 10 \cdots 25\%$.

u lokalnom putničkom saobraćaju $\tau = 5 \cdots 10\%$, a na manevarskoj službi $\tau = 1 \cdots 7\%$.

Tablica 1
SPECIFIČNA POTROŠNJA ENERGIJE ZA RAZLIČITE VRSTE VUČE
(kcal/btkm)

Faktor iskorišćenja τ	Parna vuča		Dizelska vuča		Električna vuča	
	teretni vl.	osobni vl.	teretni vl.	osobni vl.	teretni vl.	osobni vl.
1	130	280	44,8	94	14,5	29,0
0,5	156	312 ¹	49,2	98 ¹	14,8	29,6 ¹
0,2	235 ⁹	470	56,2 ⁹	112	15,6 ⁹	31,2
0,1	366	732 ⁹	68,0	136 ⁹	17,1	40,0 ⁹
0,05	650 ⁴	1300	86,0 ⁴	182	19,0 ⁴	42,0
0,01	2710 ⁴	6420	278,0 ⁴	536	43,0 ⁴	86,0

¹ brzi vlakovi, ² prigradski vlakovi, ³ teretni vlakovi, ⁴ manevriranje

Da bi se lakše mogao uspoređivati utrošak energije po vrstama vuče i za različite slučajeve eksploatacije, može se specifična potrošnja ugljena, plinskog ulja i električne energije prikazati u jedinstvenoj mjeri i svesti na istu jedinicu potrošnje, tj. na kilokalorije po brutotonakilometru (kcal/btkm). Ako se pretpostavi da je ogrijevna moć normalnog uglja 4840 kcal/kg a dizelskog ulja 10 000 kcal/kg i uvaži da je 1 kWh = 860 kcal, dobiju se približno prosječne vrijednosti navedene u tablici 1 i prikazane na dijagramu sl. 34.

Načini li se prosjek za putničku i teretnu vuču, bez ranžirno-manevarskog rada, dobije se karakterističan odnos specifične potrošnje energije za električnu E , dizelsku D i parnu vuču P :

$$E : D : P = 22,5 \text{ kcal/1000 btkm} : 77 \dots 80 \text{ kcal/1000 btkm} : 270 \dots 135 \text{ kcal/1000 btkm}$$

ili

$$E : D : P = 26 \text{ kWh/1000 btkm} : 6,8 \dots 8 \text{ kg ulja/1000 btkm} : 62 \dots 71 \text{ kg uglja/1000 btkm}.$$

Prema tome 1 kWh pri električnoj vuči vrijedi i zamjenjuje prosječno $\sim 0,28$ kg plinskog ulja pri dizelskoj vuči ili 2,5 kg uglja pri parnoj vuči. To znači da je električna vuča u pogonu jeftinija od dizelske i parne vuče ako 1 kWh električne energije ne stoji više nego $\sim 0,28$ kg plinskog ulja, odn. $\sim 2,5$ kg uglja.

Pri uspoređivanju ekonomičnosti triju vrsta željezničke vuče treba, međutim, uzeti u račun, pored jedinične cijene goriva i troškova pogonske energije, još ukupne troškove eksploatacije i

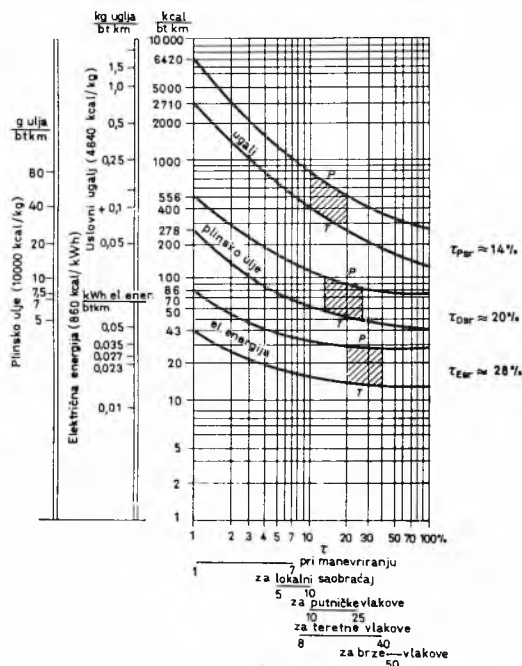
Tablica 2

DULJINA ELEKTRIFICIRANIH PRUGA U EVROPI u kilometrima (stanje 1. VII 1969)

Zemlja i naziv željeznice		Istosmjerna struja			Jedno- fazna struja snižene frekven- cije 16⅔ 15 kV	Jedno- fazna struja nor- malne frekven- cije 50 Hz, 25 kV	Trofaz- na struja 16⅔ Hz 3,6 kV	Duljina elektri- ficira- nih pruga km	Elektri- ficira- nost pruga %	Učesće rada po btkm vuče u 1969 %		
		0,6 do 1 kV	1,5 kV	3 kV						električna vuča	dizel- ska vuča	parna vuča
Švicarska (CFF, BLS)			14		3 068	5		3 087	99,8	100	0	0
Švedska (SJ)					6 963			6 963	60,0	94	6	0
Italija (FS)				7 450			456	7 908	49,4	92	6	2
Austrija (ÖBB)					2 215			2 215	41,0	80	8	12
Norveška (NSS)					2 269			2 269	53,5	77	22	1
Nizozemska (NS)		1 635	7		3			1 645	52,5	75	25	0
Francuska (SNCF)	105	4 845	13		60	3 934		8 957	24,0	75	17	8
S.R. Njemačka (DB)		81			8 073			8 154	27,4	66	14	20
Čehoslovačka (ČSD)		46	1 477			648		2 171	16,5	52	17	31
Belgija (SNCB)			1 125					1 125	26,0	51	49	0
SSSR (SZD)			19 454			11 323		30 777	23,0	47	47	6
Portugal (CP-Estiril)		26				415		441	15,6	47	43	10
Luksemburg (CFL)			19			117		136	41,5	44	56	0
Španjolska (RENFE)		617	2 402					3 019	22,0	44	36	20
Velika Britanija (BR)	1 762	146				1 264		3 172	15,7			
Poljska (PKP)	94		3 112					3 206	13,8	38	10	52
Bugarska (BDZ)					695			695	16,7	27	29	44
Mađarska (MAV)					662			662	8,3	22	39	39
D. R. Njemačka (DR)					54			1 203	8,3	19	20	61
Jugoslavija (JŽ)	323	15	369	811	413			982	10,4	11	41	48
Danska (DSB)		84						84	3,4	10	89	1
Turska (TCDD)					71			71	0,9	3	24	73
Rumunjska (CFR)					182			182	1,8	2	66	32
Finska (VR)					38			38	0,6	0	92	9
Ukupno		2 284	7 509	35 628	23 462	19 821	456	89 162	23,2			
		45 421										

održavanja vuče, visinu investicionih ulaganja i vrijeme otplate uloženi sredstava, a sve to u ovisnosti o veličini prometa.

Da bi se uočilo do kakvog su zaključka u pogledu elektrifikacije željezničkih pruga došle pojedine zemlje Evrope i svijeta na osnovi iznijetih tehničkih, ekonomskih a i drugih razloga, dat je u tabl. 2 prikaz današnjeg stanja elektrifikacije. On daje duljine elektrificiranih pruga u kilometrima u Evropi (sa čitavim Sovjetskim Savezom) i u svijetu, po električnim sistemima, s učešćem sprovedene elektrifikacije prema ukupnoj duljini pruga, kao i postoci učešća električne, dizelske i parne vuče u ukupnom radu, sa stanjem 1. jula 1969. g. Iz te se tablice vidi da se uloga parne vuče sve više smanjuje, te je u desetak zemalja već praktički nema. Kad se dovrše radovi modernizacije i elektrifikacije željezničkih pruga evropskih zemalja koji su u toku, još će se znatno povećati učešće električne vuče, a dizelskoj će vuči ostati preostali manji dio ukupnog rada vuče u željezničkom saobraćaju. Predviđa se da će tada praktički potpuno nestati parna vuča.



Sl. 34. Dijagram specifične potrošnje energije za parnu, dizelsku i električnu vuču

Elektrifikacija jugoslavenskih željeznica. Jugoslavenske željeznice imaju značajnu ulogu u razvoju i privredi Jugoslavije. Tu ulogu će i dalje održati, samo u novim i izmijenjenim uvjetima.

U tabl. 3 skupljeni su statistički podaci o jugoslavenskim željeznicama 1938, tj. uoči drugog svjetskog rata, i 1965, tj. na početku ostvarivanja programa modernizacije. Iz te se tablice razabire da su neznatno porasli osnovni željeznički kapaciteti, broj vagona i lokomotiva, dok je prijevoz putnika i robe u promatranom periodu porastao za nekoliko puta, tačno za 4,2 i 3,6 puta. Ti su rezultati postignuti boljim korišćenjem tehničkih kapaciteta i većom produktivnošću rada, ali sa skoro jednakim i zastarjelim sredstvima i stoga dijelom na štetu kvaliteta.

Tablica 4 pokazuje procentno učešće željezničkog, cestovnog, riječnog i cjelovitog saobraćaja u pojedinim evropskim zemljama 1962/63 i u Jugoslaviji 1950, 1960 i 1964, a u tabl. 5 dat je prikaz povećanja broja motornih vozila u Jugoslaviji. Iz tih se podataka vidi tendencija porasta prevoza kod drugih saobraćajnih grana, posebno autobusnog saobraćaja.

Međutim, pored svega toga jugoslavenske željeznice jesu i ostale veliki prevoznici robe i putnika, osobito na duljim relacijama i u prigradskom saobraćaju. Tako su npr. 1965 jugoslavenske željeznice prevezle od ukupnog obima prijevoza svih saobraćajnih grana izuzev pomorskog saobraćaja 53% putnika sa 66,4% putničkih kilometara (pkm) i 62,8% robe sa 74,6% netonskih kilometara (ntkm). Za 1970 se predviđa da će JŽ ostvariti prijevoz 50% putnika sa 60% pkm i 60% robe sa 71% ntkm.

Ovdje je značajno naglasiti da se na svega 31% pruga I reda odvija sada čak 67% ukupnog rada JŽ ili na manje od jedne trećine svih pruga ukupno dvije trećine rada. To su pruge s veličinom saobraćaja od 4 do 20 miliona bt godišnje. Na drugih 37% pruga II reda ima oko 20% rada s pretežnom gustoćom saobraćaja od 1 do 4 miliona bt godišnje, i zajedno na 68% pruga I i II reda ukupno 87% rada. Na preostalih 24% pruga odvija se samo 13% rada. To su pretežno pruge ispod 1 miliona bt redno godišnje i u stvari to su nerentabilne pruge.

Dovoljno je pogledati veličinu opterećenja robnog saobraćaja na prugama JŽ iznad 2 miliona brutotona na karti sl. 35, pa da se odmah uoči da glavne i velike tokove bruto-tereta predstavljaju magistralne pruge koje upravo prioritarno ulaze u program modernizacije jugoslavenskih željeznica.

Kako se uporedo s porastom rada nisu obnavljali u odgovarajućem opsegu željeznički kapaciteti, to su postojela osnovna sredstva JŽ dotrajala i zastarjela preko 50%, osobito pruge, lokomotive i vagoni. Jugoslavenske željeznice našle su se u situaciji da imaju zastarjela sredstva i da ih nemaju dovoljno, te ih treba

Tablica 3

OSNOVNI PODACI JUGOSLAVENSKIH ŽELJEZNICA

Naziv	Jedinična mjera	1938	1965	Faktor povećanja prema 1938
Duljina svih pruga: normalnog kolosijeka uskog kolosijeka	km	9 545 7 316 2 229	11 839 9 311 2 528	1,24
Duljina elektrificiranih pruga	km	—	472	
Lokomotive i motorna vozila	kom.	2 331	2 536	1,09
Lokomotive: parne dizelske električne Motorna kola	kom.	2 309 2 309 — 22	2 204 1 995 236 53 252	
Putnički vagoni	kom.	3 644	4 546	1,26
Teretni vagoni	kom.	52 045	72 440	1,39
Prevezeno putnika	miliona	56,16	236,03	4,2
Prosječan put 1 putnika	km	53,7	54,2	
Prevezeno robe	Mt	20,76	74,68	3,6
Prosječan put 1 t robe	km	204	245	
Ukupan rad: putnički saobraćaj teretni saobraćaj	mlrd. btkm	16,4 5,7 10,7	50,8 12,3 38,5	3,05
Broj zaposlenih		80 806	154 317	1,91
Potrošak uglja	Mt	1,63	2,56	1,57

Tablica 4

STANJE PRIJEVOZA 1962/63

Zemlja	Željeznice	Ceste	Rijeke	Cjelovodi
Italija	25%	72%	1%	2%
Belgija	32%	72%	25%	—
Engleska	39%	61%	—	—
S. R. Njemačka	41%	31%	25%	3%
Francuska	57%	31%	10%	2%
SSSR	84%	6%	6%	4%
ČSSR	88%	12%	—	—
Jugoslavija 1950	83,18%	11,15%	5,67%	
1960	78,44%	14,86%	6,70%	
1964	66,50%	26,40%	7,10%	

Tablica 5

BROJ MOTORNH VOZILA U JUGOSLAVIJI (prema UIC)

	1950	1955	1960	1965
Autobusa kom.	1 081	2 356	5 158	8 227
Automobila „	6 378	12 622	54 257	187 842
Kamiona „	15 973	26 073	50 723	77 735

zamijeniti, povećati i podići na suvremeni tehnički nivo, i sve to u teškoj materijalnoj situaciji, kad su željeznice prisiljene da troše velika novčana sredstva za održavanje starih kapaciteta, uz gotovo najniže cijene željezničkog prijevoza u Evropi i u ozbiljnoj konkurenciji s poraslim cestovnim saobraćajem.

Jugoslavenske željeznice su donijele i usvojile 1964 program modernizacije do 1970.

Na 1578 km pruga koje se po tom programu elektrificiraju, a koje čine samo 13% svih pruga, vrši se 50% rada JŽ, a na ukupno 2175 km pruga koje će do kraja 1971 biti elektrificirane, tj. sa svima koje su bile ranije elektrificirane, što iznosi 18,4% ukupne duljine pruga, odvijat će se blizu 60% rada.

Studija usporedenja dvaju sistema elektrifikacije pruga, istosmjernog 3 kV i jednofaznog 25 kV, 50 Hz, pokazala je da su prednosti na strani jednofaznog sistema, kako u pogledu troškova investicije tako i u pogledu troškova eksploatacije. Zaključeno je da se istosmjernim sistemom 3 kV elektrificira zapadni dio glavnih pruga JŽ (u priključku na elektrificirane pruge zatečene pri oslobodenju zemlje), a sve ostalo jednofaznim sistemom 25 kV, 50 Hz. Stanice sučeljavanja jesu Dobova (na pruzi Ljubljana—Zagreb, 29 km od Zagreba) i Karlovac (privremeno Zagreb).



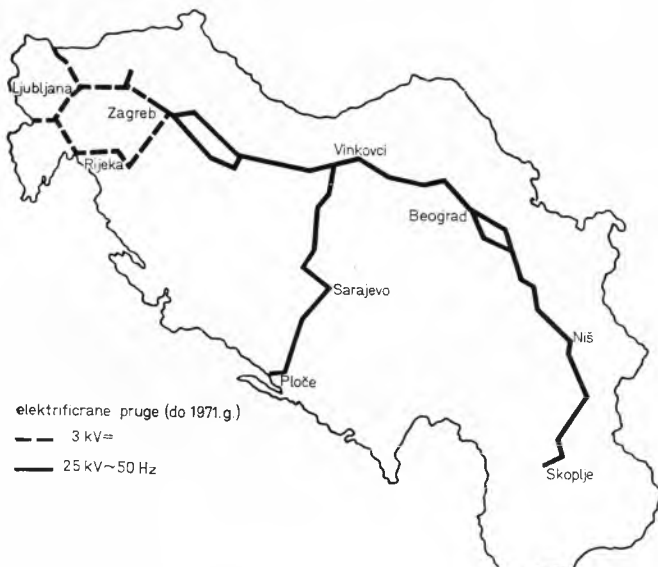
Sl. 35. Teretni saobraćaj na prugama JŽ iznad 2 do 20 miliona bt godišnje. Debljina izvučene pruge proporcionalna je gustoći teretnog saobraćaja

Tok elektrifikacije JŽ odvija se ovako:

Pri oslobodenju 1945 zatečeno je u Jugoslaviji 117 km elektrificiranih pruga (Sežana—Postojna 53 km i Rijeka—Pivka 64 km). Od 1952 do 1964, tj. do početka programa modernizacije, bilo je elektrificirano daljih 252 km: Rijeka—Karlovac 176 km i Postojna—Ljubljana 76 km. Od 1965 dalje ostvaruje se program elektrifikacije JŽ i taj je program, koji obuhvaća 1578 km pruga, izvršen 1971. Elektrificirane su pruge Karlovac—Zagreb 53 km, Jesenice—Ljubljana 74 km i Ljubljana—Zidani Most 73 km, Radovi na čitavoj relaciji Zidani Most—Skopje i Vrpolje—Sarajevo završeni su do 1971.

Izgradnja pruge Sarajevo—Ploče završena je sredinom 1969, s električnom vučom na čitavoj duljini od 228 km.

Od 2175 km pruga elektrificiranih do 1971 na jugoslavenskim željeznicama, 625 km je s istosmjernim sistemom 3000 V i 1550 km s jednofaznim sistemom 25 kV, 50 Hz (sl. 36).



Sl. 36. Elektrificirane pruge JŽ do 1971. g.

Dobru ilustraciju efekata elektrifikacije pruža prva u Jugoslaviji elektrificirana pruga: Rijeka—Zagreb. To je jednokolosiječna pruga duga 229 km, izrazito brdskog karaktera u svom donjem dijelu do mora, na duljini 91 km. Uspón od Jadranskog mora do brda dugačak je 36 km i iznosi stalno 25‰, što je najveći i najdulji uspon JŽ u Jugoslaviji. Najveća nadmorska visina pruge je na 836 m. Elektrifikacijom pruge povećala se u odnosu prema parnoj vuči propusna moć (moгуći broj vlakova) pruge za 60%, a prevozna moć (moгуća količina prevoza) blizu 3 puta; vrijeme putovanja putničkih vlakova skraćeno je za 1,5 do 2 sata, a teretnih vlakova za 3 sata. Jedna električna lokomotiva od

4000 KS zamijenila je ~ 2,5 parne lokomotive od 1100 KS, brzina vuče na usponu od 25‰ povećana je od 18 i 22 km/h pri parnoj vuči na 50 do 60 km/h pri električnoj vuči. Godišnje se više ne troši 150 000 t uglja, niti se on prevozi za vlastite potrebe, što je bilo ~ 5% tadašnjeg prevoza. Ukinute su četiri ložionice parne vuče i izgrađen samo jedan depo (remiza) za električne lokomotive u Rijeci. Broj ljudi je znatno smanjen. Uštede su ukupnih troškova toliko, u odnosu prema troškovima parne vuče, da će se čitava elektrifikacija s elektrovozilima otplatiti za nekoliko (6—8) godina. Samo ušteda na direktnim troškovima goriva iznosi oko 15 miliona dinara godišnje.

Kako će do izvršenja programa modernizacije biti rashodovano ~ 800 parnih lokomotiva, za pokriće vuče će se istovremeno nabaviti nove električne i dizelske lokomotive, tako da će se ukupan broj vučnih vozila kretati oko 1450 komada s oko blizu 2,7 miliona KS, dakle bit će ih znatno manji broj nego prije elektrifikacije (v. tabl. 1), ali s većom ukupnom snagom. Ocijenjeno je da će procentno učešće po vrstama vuče na JŽ između 1970 i 1975 biti kako je prikazano u tablici 6.

Struktura investicionih i eksploatacionih troškova elektrifikacije željeznica po prugama JŽ ovisna je o veličini saobraćaja i karakteru pruge, ali se u prosjeku mogu dati ovi procentni odnosi: investicioni troškovi elektrifikacije pruga kreću se za stabilna postrojenja između 41 i 54%, a za električne lokomotive između 59 i 46%; eksploatacioni troškovi električne vuče iznose za stabilna postrojenja 16—24%, za električnu energiju ~ 20% i za električne lokomotive 64—58%.

Tablica 6

UČEŠĆE LOKOMOTIVA NA JUGOSLAVENSKIM ŽELJEZNICAMA 1970—1975

	po broju	po snazi	po radu
Električne lokomotive i elektromotorni vlakovi	20%	52%	55%
Dizelske lokomotive i dizelski vlakovi	26%	22%	25%
Parne lokomotive	54%	26%	20%

Struktura uloženih investicija samo za stabilna postrojenja elektrifikacije pruga približno se za JŽ kreće u ovim odnosima: dalekovodi 10‰, elektro-vučne podstanice 16‰, postrojenja za sekcioniranje 5‰, centralno daljinsko upravljanje za elektro-vučne podstanice i postrojenja za sekcioniranje 2‰. Ukupno sva postrojenja dovoda, transformacije i komande primarne energije 33‰. Zatim za kontaktnu mrežu otvorene pruge 40% i za kontaktnu mrežu željezničkih stanica 16‰, ukupno 56‰ za kontaktni vod. Za radionice i nadzorništva 2‰, za izmještanje zračnih telefonskih linija 6‰ i razno 3‰, ukupno ostalo 11‰.

Perspektiva razvoja električne željezničke vuče. U konkurenciji s drugim vrstama saobraćaja željeznice nastoje osigurati prijevoz putnika i robe. Brzina i kvalitet prijevoza jedan je od glavnih zahtjeva suvremenog prometa. U teretnom prijevozu vlakova nastaje novi period željeznice u mnogim zemljama, s uvođenjem vagona velike nosivosti, korištenjem paleta i kontejnera za prijevoz robe i s vučom teretnih vlakova brzinom od 80, 100 i 120 km/h. To omogućuje električna i dizelska vuča. U željezničkom putničkom saobraćaju razvoj ide sve više ka najvećim brzinama prijevoza, uz potpunu sigurnost i visoki komfor. Na ovome području nesumnjivo ima punu mogućnost i očitu prednost električna vuča. Dizelska vuča ne zadovoljava jer je ograničena snagom motora.

Brzine prijevoza putničkih vlakova na elektrificiranim prugama kreću se danas između 110 i 160 km/h na većini elektrificiranih pruga, do 200 km/h na nekim najglavnijim elektrificiranim evropskim prugama i od 200 do 250 km/h na posebno građanim specijalnim prugama za putnički saobraćaj, kao što je japanska elektrificirana pruga Tokio—Osaka (Tokaido). Ta pruga, otvorena za putnički saobraćaj s električnom vučom 1964 g., građena je za brzinu od 250 km/h. Maksimalna brzina je danas 210 km/h, iako je pruga ispitivana sa 256 km/h. Uskoro će se voziti i sa 250 km/h na novim dijelovima linije koji su u gradnji, a možda čak i do 300 km/h. Udaljenost od 515 km Tokio—Osaka prelazi se za 3 sata i 10 minuta. Dnevno se na njoj 1968 prevozilo prosječno 180 000 putnika, s dnevnim rekordom početkom 1969 od 520 000 putnika ili 1 300 000 u 3 dana. Snaga električnih motora za elektromotorne vlakove sa 16 kola i brzinu 250 km/h na toj pruzi iznosi 16 000 kW.

Francuske željeznice postigle su u martu 1955 svjetski rekord brzine od 331 km/h s električnom lokomotivom.

Iza 1964 počele su se uvoditi na nekim evropskim elektrificiranim prugama velike brzine od 160 do 200 km/h, npr. u Francuskoj na dijelovima pruge Paris—Bordeaux i u Njemačkoj između Münchena i Augsburga do 200 km/h, a i u drugim zemljama od 160 do 180 km/h, kao u Velikoj Britaniji, Belgiji, Holandiji, SSSR, USA, Italiji i drugdje. Program razvoja takvih elektrificiranih pruga u Evropi sve je širi. Snage električnih lokomotiva na tim prugama kreću se oko 8000 KS.

Na ovim elektrificiranim prugama uspostavljena je potpuna sigurnost primjenom automatizacije saobraćaja putem daljinskog upravljanja. Upravljanje napajanja elektrificiranih pruga provodi se daljinski a primjenjuje se poluautomatska kontrola maksimalne vožnje i signalizacije u upravljačnici vozila, iako bi sve moglo biti potpuno automatizirano i bez prisustva strojovođe.

Na taj su način željeznice postigle da su konkurentne ne samo autobusnom putničkom prevozu, već čak i avionskom prometu na relacijama do ~ 400 km.

Osim električne vuče u Kanadi se uvode brzi motorni vlakovi na plinsko-turbinski pogon za brzinu od 225 km/h. Francuzi vrše studije i pripreme za brzine od 235 i čak 300 km/h za prugu Paris—Lyon, a Englezi za 250 km/h.

Možda će biti ostvarene i brzine vožnje iznad 300 km/h do 400 km/h, ali ne više s klasičnom željeznicom i vučom. U Francuskoj, Engleskoj i Japanu mnogo se radi na studiranju, razvijanju i eksperimentima radi uvođenja tzv. aerovlakova, na principu lebdjelice s raketnim pogonom, na posebnom betonskom trupu, ili primjenom električnog linearnog indukcionog motora (v. *Električni strojevi*).

LIT.: K. Sachs, Elektrische Vollbahnlokomotiven, Berlin 1928. — M. F. Nouvion, La technique de l'électrification ferroviaire, 1958. — Č. Čavčina, Električna vuča na željeznici, Beograd 1960 — И. И. Власов, К. Г. Марквардт, Контактная сеть, Москва 1961 — К. Г. Марквардт, Энергоснабжение электрических железных дорог, Москва 1965. V. i literaturu u članku *Električna vuča*.

Č. Čavčina

ELEKTROAKUSTIKA je grana elektrotehnike koja se bavi teorijskim i praktičnim problemima pretvorbe zvuka u električne oscilacije i obrnuto. Ona proučava: elektro-akustičke pretvarače (zvučnike, mikrofone itd.), snimanje zvuka i njegovu reprodukciju (fotografskim, magnetskim ili mehanografskim putem), prijenos reproduciranog zvuka većem broju ljudi na otvorenom i u zatvorenim prostorijama (ozvučavanje), akustičku obradu prostorija, metode borbe protiv buke, stvaranje zvuka elektroničkim putem i njegovu primjenu u tehničke svrhe (infrazvuk, ultrazvuk) i drugdje (podvodna akustika, medicina itd.). Pri prijenosu govora i glazbe elektroakustika proučava svu problematiku u vezi s vjerljivošću prijenosa između originala i reprodukcije. Ona sudjeluje pri rješavanju problema osoba s oštećenim sluhom. Konačno treba spomenuti i razvijanje elektroakustičkih mjernih metoda i provođenje takvih mjerenja radi ispitivanja pojedinih elektroakustičkih elemenata, uređaja i njihovog kvaliteta, akustičko mjerenje prostorija, ispitivanje građevinskog materijala i materijala za akustičku izolaciju.

OSNOVE AKUSTIKE

Akustika, nauka o zvuku, bavi se zvukom i kao fizikalnom pojavom (oscilacijama gustoće materije i/ili položaja materijalnih čestica), i kao stimulusom (podražajem) za osjetni doživljaj sluha, i kao samim tim doživljajem u svijesti čovjeka. Akustika općenito, a tako i elektroakustika, prema tome je interdisciplinska grana nauke: jednim dijelom pripada fizici, a drugima psihologiji i psihofizici, graničnom području između psihologije i fizike (također fiziologije).

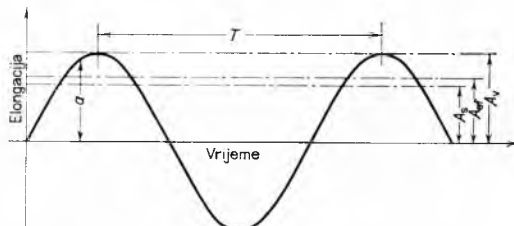
Za razliku od akustike općenito — koja se bavi svim oscilacijama materijalnih čestica, kako onima koje mogu predstavljati podražaj za osjet sluha tako i onima koje to ne mogu — elektroakustika se bavi pretežno čujnim zvukom, jer glavnoj namjeni primjeni u tehnici krajnji je cilj kvalitetna reprodukcija ljudskog glasa i zvukova muzičkih instrumenata. Zbog toga su za elektroakustiku od podjednake važnosti i *fizikalna ili objektivna akustika*, koja se bavi zvukom kao podražajem za osjet sluha (fizikom proizvodnje, prijenosa i primanja čujnog zvuka), i *psihološka ili subjektivna akustika*, koja se bavi kako odnosima između subjektivnog osjeta zvuka i njegovog objektivnog podražaja (psihofizika sluha) tako i doživljajima osjeta sluha bez veze s njegovim podražajem (psihologija sluha). Onaj dio fizikalne akustike koji se bavi fizikom ljudskih organa za proizvodnju i primanje zvuka — govornog organa i uha — pripada i u fiziologiju (*fiziološka akustika*). Zakonitosti svakog od navedena dva dijela akustike specifične su, u njima je riječ o posebnim fizikalnim, psihofizičkim, odn. psihološkim veličinama, koje se mjere različitim jedinicama, kako je to u nastavku prikazano.

Fizikalne osnove akustike

Akustika se i u svom fizikalnom dijelu prvobitno bavila samo čujnim zvukom (звук акуо чужем), tj. oscilacijama materijalnih čestica frekvencije između 16 i 20000 Hz. Danas se ona bavi zvukom u širem smislu, tj. oscilacijama materijalnih čestica bez obzira na njihovu frekvenciju, pri čemu se oscilacije frekvencije niže od 16 Hz nazivaju *infrazvukom*, frekvencije više od 20000 Hz *ultrazvukom*, a oscilacije vrlo visokih ultrazvučnih frekvencija, u području iznad 10^{10} Hz, i *hiperzvukom*. Zvuk se u prostoru (zvučnom polju) širi u obliku vala. U plinovima i u tekućinama valovi su zvuka isključivo longitudinalni, tj. oni se šire u istom pravcu u kojem se gibaju čestice medija pri titranju (kako je prikazano modelom u sl. 1), u čvrstim tijelima mogu valovi zvuka biti također transversalni, tj. čestice medija mogu titrati i okomito na pravac širenja vala. Pod zvukom u najužem smislu riječi razumijeva se *zvuk u zraku*, tj. titranje čestica zraka.

Fizikalnim osnovama proizvodnje, širenja i prijema zvuka (u širem smislu riječi), nekim primjenama zvuka (posebno ultrazvuka) u tehnici i arhitektonskom akustikom bavi se u ovoj enciklopediji članak *Akustika* (TE 1, str. 56). Ovdje će se u drugom kontekstu, tj. u vezi prvenstveno s reprodukcijom govora i muzike, iznijeti glavni pojmovi objektivne akustike, te veličine i jedinice kojima se oni mjere.

Zvučni val. Zvuk u zraku predstavlja longitudinalno titranje molekula zraka oko ravnotežnog položaja, uslijed čega dolazi do periodične promjene (oscilacije) tlaka zraka p oko vrijednosti atmosferskog tlaka p_0 . Najjednostavnije titranje koje može izvoditi čestica, odn. tlak zraka, jest harmoničko ili sinusoidno titranje, pri kojemu se pomak čestice ili odstupanje tlaka zraka u određenoj točki od ravnotežne vrijednosti (*elongacija*) mijenja s vremenom po zakonu sinusa (sl. 2). Promjena položaja čestice ili visine tlaka između dvije vremenske točke u kojima su elongacija i smjer te promjene jednake zove se *titraj*, trenutno stanje unutar titraja zove se *faza titranja*, razmak vremena između dvije uzastopne jednake faze zove se *period titraja*, T , najveća elongacija unutar perioda zove se *amplituda* (vršna vrijednost veličine koja oscilira), npr. amplituda (vršna vrijednost) zvučnog tlaka p_v .



Sl. 2. Čisti (sinusoidni) ton i njegove karakteristične veličine: T perioda, a elongacija, A_s srednja vrijednost, A_{eff} efektivna vrijednost, A_v vršna vrijednost

Recipročna vrijednost perioda titraja T , $f = 1/T$, tj. broj titraja u jedinici vremena, zove se *frekvencija titranja*. Mjeri se obično u titrajima na sekundu (hercima, Hz).

Efektivna vrijednost izmjenične veličine, npr. efektivni zvučni tlak p_{eff} , jest njezina kvadratna sredina:

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt}.$$

Pri pravilnim titrajima efektivna vrijednost stoji u određenom omjeru prema vršnoj vrijednosti, tj. amplitudi, npr. za sinusoidno titranje efektivna vrijednost zvučnog tlaka iznosi $\sqrt{0,5} p_v = 0,7071 p_v$. *Srednja vrijednost* izmjenične veličine je njezina aritmetička sredina, npr. zvučnog tlaka:

$$p_s = \frac{1}{T} \int_0^T |p| dt.$$