

LIT.: A. v. Engel, M. Steenbeck, Elektrische Gasentladungen, 2 Bde, Berlin 1932/34. — J. D. Cobine, Gaseous conductors, New York 1941. — H. A. Kanopus, Коронный разряд и его применение в электрофильтрах, Москва-Ленинград 1947. — M. Laporte, Décharge électrique dans le gaz, Paris 1948. — H. A. Kanopus, Электрические явления в газах и вакууме, Москва 1950. — K. G. Emelius, Conduction of electricity through gases, London 1951. — J. M. Meek, J. D. Craggs, Electrical breakdown of gases, London 1953. — B. Gänger, Der elektrische Durchschlag von Gasen, Berlin 1953. — L. B. Loeb, Basic processes of gaseous electronics, Los Angeles 1955. — S. Flügge, Handbuch der Physik, Band 21,22, Berlin 1956. — H. S. W. Massey, E. H. S. Burhop, Electronic and ionic impact phenomena and the properties of gaseous ions, New York 1957. — S. C. Brown, Basic data of plasma physics, New York 1959. — C. De Witt, J. F. Detoeuf, The theory of neutral and ionized gases, New York 1960. — J. L. Delcroix, Introduction to the theory of ionized gases, New York 1960. — E. W. McDaniel, Collision phenomena in ionized gases, New York 1964. — J. B. Hasted, Physics of atomic collisions, London 1964. — H. Raether, Electron avalanches and breakdown in gases, London 1964. — A. v. Engel, Ionized gases, London 1965. — L. B. Loeb, Electrical coronas, Los Angeles 1965. — Л. С. Поляк, Кинетика и термодинамика химических реакций в низкотемпературной плазме, Москва 1965. — F. Llewellyn-Jones, The glow discharge and an introduction to plasma physics, London 1966. — F. Llewellyn-Jones, Ionization and breakdown in gases, London 1966. — S. C. Brown, Introduction to electrical discharges in gases, New York 1966. — A. J. Mac Donald, Microwave breakdown in gases, New York 1966.

Z. Šternberg

ELEKTRIČNA VUČA I ELEKTROMOTORNA VOZILA.

Primjena električno pogonjenih šinskih i cestovnih vozila za transport robe i putnika zove se električna vuča, ukoliko vučnu silu potrebnu za kretanje ovih vozila razvija elektromotor koji je izravno ugrađen u njih. Elektromotorna vozila konstruirana su tako da služe bilo izravno za prijenos putnika i robe (elektrokolica, tramvaji, trolejbusi, električni šinobusi i elektromotorne željezničke putničke kompozicije) bilo samo za vučenje vagonskih kompozicija (električne lokomotive). U elektromotorna vozila, međutim, ne idu samo vozila na kojima se električna energija pretvara u mehaničku energiju za svaladanje otpora vuče, nego i tzv. upravljačka vozila (bez elektromotora) na kojima se nalaze samo uredaji za upravljanje elektromotornim pogonom drugih vozila. Električna vuča predstavlja vrstu elektromotornog pogona s vrlo promjenljivim brzinama vrtnje i vrlo različitim zakretnim momentima. Osim toga je i mjesto potrošnje energije i njenog pretvaranja u stalnom pokretu.

Sredstva, tehnika i sistemi električne vuče dijele se prema mjestu izvora energije, prema podlozi po kojoj se vozila kreću, prema namjeni postrojenja za vuču i prema vrsti struje, frekvenciji i nazivnom naponu u kontaktnoj mreži napajanja.

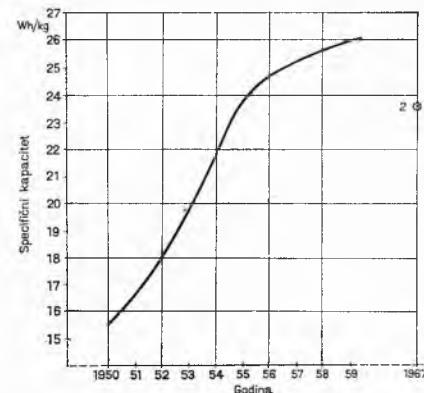
Podjela električne vuče prema mjestu izvora energije

Prema mjestu izvora energije električna se vuča dijeli na autonomnu (nezavisnu) vuču i zavisnu vuču. Pri autonomnoj vuči nalazi se izvor energije na samom elektromotornom vozilu; pri zavisnoj električnoj vuči izvor je energije izvan vozila u nepokretnom (fiksnom) postrojenju, a vozilu se električna energija dovodi postrojenjem za prijenos te energije.

Autonomna ili nezavisna vozila, budući da imaju vlastiti izvor energije, moraju povremeno, npr. na polaznoj stanicici, krcati energiju putem nosioca te energije i to: električnu energiju za nabijanje akumulatora, električnu energiju za pogon motora koji će dati ubrzanje zamašnjaku, kemijsku energiju u obliku goriva, npr. za dizelski pogon, a za budućnost dolazi u obzir gorivo za nuklearni reaktori i kemijska energija za pothranjivanje gorivnih elemenata. Ograničena udaljenost koju vozilo može preći pomoću jednog krcanja energije naziva se njegovim *akcionim radijusom*.

Akumulatorska elektromotorna vozila. Akumulatori ovih vozila za vrijeme njihova mirovanja (npr. u toku noći) nabijaju se električnom energijom koja se troši u toku vožnje. Ova se vozila odlikuju mogućnošću velikih ubrzanja, tihim i čistim radom i jeftinom pogonskom energijom, naročito ako se akumulatori nabijaju jeftinom noćnom energijom. Upotreba im je ograničena relativno velikom težinom akumulatorske baterije i njenim relativno kratkim vijekom. U tim vozilima velik dio težine vozila ide na težinu akumulatora; stoga za konstrukciju i rentabilnost vozila ima značajnu ulogu specifični kapacitet akumulatora, tj. električna energija (Wh) akumulirana u 1 kg akumulatora (sl. 1). Danas se na vučnim vozi-

lima primjenjuju olovni i alkalni akumulatori. Olovni akumulatori su teži i kraće vijeka, ali su znatno jeftiniji od alkalnih, pa se u nas mnogo više upotrebljavaju.



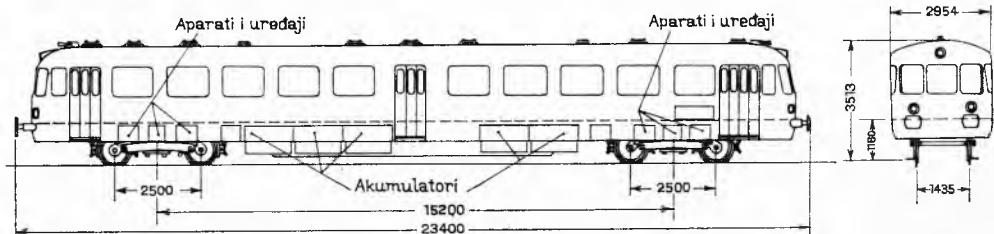
Sl. 1. Porast specifičnog kapaciteta olovnih akumulatora za vuču u toku posljednjih godina. I Podaci za inozemne akumulatore, 2 domaći akumulatori (Munja 6 Ky 225)

Akumulatorska se motorna vozila upotrebljavaju za unutarnji transport robe u radionicama i pogonima (radionička vozila, sl. 2), za cestovni saobraćaj na kraće udaljenosti kad su posrijedi mnoga pokretanja i zaustavljanja, za lokalni i prigradski šinski saobraćaj (akumulatorski šinobusi, sl. 3) i za manevar (rudničke lokomotive, manevarke).



Sl. 2. Akumulatorsko radioničko vozilo (Rade Končar, tip EKS 3). 1 Akumulatori, 2 pogonski motor

Giro- ili žiro-vozila. Kao izvor energije za pogon električnih vučnih motora primjenjuje se na ovim vozilima kinetička energija rotirajućeg zamašnjaka (zvrka). Takva vozila služe za prijevoz putnika (girobus) i robe (giro-traktor) itd. U stanicama se vozilo priključuje na izvor električne energije i pomoću ugradenog asinhronog elektromotora ubrzava se masa zamašnjaka na vozilu. Zatim se strujni priključci odvajaju, pa zamašnjak pomoću akumulirane kinetičke energije pogoni asinhroni stroj koji je s njime spojen; ovaj sada radi kao samouzbudeni asinhroni generator i napaja vučni motor te tako, kočeci zamašnjak, ubrzava vozilo. Na sl. 4 prikazan je takav zamašnjacički agregat s asinhronim strojem (elektrogiro) tvornice strojeva Oerlikon. Radi smanjivanja gubitaka uslijed trenja i radi što boljeg hlađenja, zamašnjak se vrti u atmosferi razrijeđena vodika.



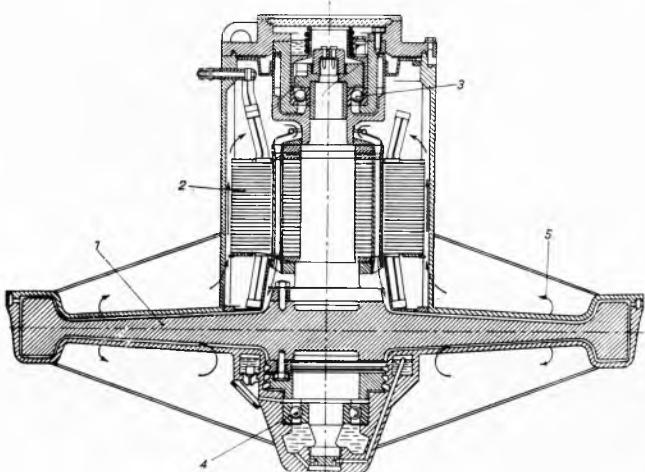
Sl. 3. Željezničko akumulatorsko vozilo za lokalni i prigradski saobraćaj (DB-ETA 150)

ELEKTRIČNA VUČA

Kinetička energija koja se ubrzavanjem zamašnjaka u njemu akumulira iznosi:

$$E = \frac{1}{2} \Theta \omega^2 = \frac{1}{2} m r^2 \omega^2 = \frac{1}{2} m v^2,$$

gdje je Θ moment inercije, ω kutna brzina, r srednji polumjer i v obodna brzina. Iz ovih se jednadžbi vidi da je mogućnost akumuliranja kinetičke energije u zamašnjaku (zvruku) montiranim na vozilo ograničena dimenzijama zamašnjaka, veličinom i rasporedom njegove mase kao i brzinom vrtnje. Pri povećanju

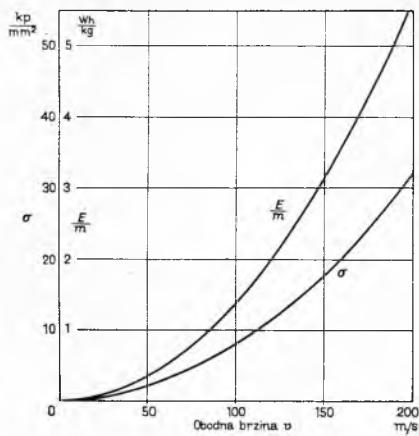


Sl. 4. Elektrozvuk (giro ili žiro) tvornice Oerlikon. 1 Zamašnjak, 2 asinhroni motor/generator, 3 noseći ležaj, 4 vodeći ležaj, 5 strujanje hladnog zraka

brzine vrtnje pojavljuju se naime zbog centrifugalnih sila u čeličnom zamašnjaku znatna naprezanja na vlak (σ) u smjeru oboda, koja ne smiju prekoračiti neku dopuštenu vrijednost, a koja priблиžno iznose

$$\sigma = \rho v^2,$$

gdje ρ znači gustoću a v obodnu brzinu. Kinetička energija po jedinici mase, koja je interesantna radi uspoređivanja s drugim vrstama vuče, iznosi $E/m = v^2/2$. U sl. 5 prikazana je ovisnost ovih veličina o obodnoj brzini v . Iz nje proizlazi da npr. za za-



Sl. 5. Ovisnost akumulirane energije i naprezanja σ o obodnoj brzini zamašnjaka

mašnjak od čeličnog liva Če 45 s dozvoljenim naprezanjem (na 2/3 granice elasticiteta) $\sigma = 14$ kp/mm², koje se pojavljuje pri obodnoj brzini $v = 132$ m/s, možemo nakratki samo 2,5 Wh/kg, a sa specijalnim livom koji izdrži $v = 200$ m/s i $\sigma = 32$ kp/mm², postiže se 5,6 Wh/kg, što je još uvijek relativno malo prema akumulatoru sa ~ 25 Wh/kg, a pogotovo prema plinskom ulju koje služi kao pogonsko gorivo u dizelskoj lokomotivi, a ima ogrjevnu moć 11 300 Wh/kg. Zbog toga se ovakva vozila i rijetko primjenjuju (npr. u Švicarskoj).

Dizelska elektromotorna vozila imaju kao izvor energije dizelski motor. On pogoni električni generator koji zatim, kao i na ostalim

elektromotornim vozilima, napaja vučne motore. Diesel-električna vozila danas su zbog svojih dobrih svojstava i ekonomičnosti jako rasprostranjena.

Primjena *nuklearnih reaktora* kao izvora energije na vozilima s električnom vučom nalazi se još u pokusnoj fazi i za sada još nema praktičnog značaja.

Gorivni elementi kao izvori energije za elektromotorna šinska i cestovna vozila vrlo mnogo obećavaju. Međutim, kako njihov razvoj još nije završen, za sada se još ne upotrebljavaju.

Zavisna elektromotorna vozila. Ova vozila primaju električnu energiju iz stabilnih elektrana putem kontaktne šine ili voda razapetog duž pruge ili ceste kojom se vozilo kreće. Vozila imaju oduzimač struje kojim uzimaju struju iz tog voda. Budući da se ova vozila napajaju energijom iz mreže velike snage, bilo iz zemaljske distributivne mreže bilo iz posebne mreže koja služi samo za napajanje željeznice, ona raspolažu praktički neograničenom količinom energije te im stoga ni aktioni radijus nije ograničen. Budući da za napajanje služi mreža s jakim izvorom energije, električni strojevi i aparati ovih vozila za kratke periode vremena raspolažu i mnogo većom snagom od one koju smiju trošiti trajno.

Vrste električne struje upotrijebljene za električnu vuču

Za električnu vuču se danas upotrebljava istosmjerna struja različitih napona i izmjenična struja, prvenstveno jednofazna, različitih napona s nekoliko frekvencija.



Sl. 6. Trolejbus (proizvod Rade Končar)

Najčešće se upotrebljavaju istosmjerni naponi 40, 80, 160 i 400 V za baterijska vozila; 250, 500 i 1200 V za rudnička i industrijska postrojenja za vuču; 600 i 750 V za gradski saobraćaj; (600 i) 750 V za prigradski, a 1500 i 3000 V za međugradski željeznički saobraćaj.

Napon od 1500 V za međugradski željeznički saobraćaj upotrebljava se u Australiji, Danskoj, Francuskoj, Holandiji, Japanu i SSSR, a napon od 3000 V u Belgiji, Čileu, ČSSR, Italiji, Jugoslaviji, Južnoafričkoj Uniji, Maroku, SSSR i USA.

Najčešće primjenjivani izmjenični naponi jesu: 3300 V, 16 $\frac{2}{3}$ Hz, jedini trifazni napon na željeznicama (samo u Italiji, a i tamo se napušta); 6000 V, 50 Hz za površinske kopove u Njemačkoj; 11 000 V, 25 Hz u USA; 15 000 V, 16 $\frac{2}{3}$ Hz za željeznicu u Austriji, Njemačkoj, Norveškoj, Švedskoj i Švicarskoj; 15 000 V, 50 Hz za željeznicu u Madžarskoj; 25 000 V, 50 Hz za željeznicu najprije u SR Njemačkoj i Francuskoj, a zatim u svim zemljama koje su poslijepedeset godina počele elektrificirati nova područja svoje željezničke mreže, tako i u Jugoslaviji.

Podjela elektromotornih vozila prema namjeni i prema podlozi na kojoj se kreću

Elektrokolica za unutarnji transport (v. sl. 2) kreće se po cesti i radioničkom podu, a služe za prijenos, za dizanje i slaganje tereta, a ponekad i za vuču prikolica. *Vozila za gradski saobraćaj* kreće se ili po cesti (trolejbusi, sl. 6) ili po tračnicama.

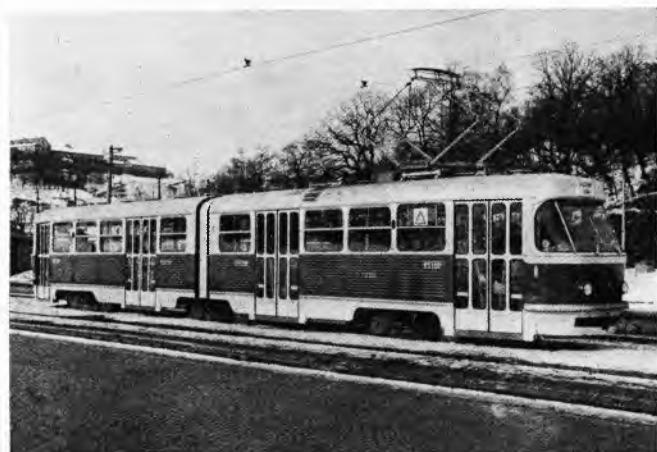
Gradska šinska vozila odlikuju se malom potrošnjom energije i velikom preopteretljivosti. Tračnice se mogu smjestiti na dio ceste općeg saobraćaja (*tramvaj*, sl. 7) ali je bolje da se za njih predviđi poseban odvojeni dio ceste ili pruga. Da bi se štedila



Sl. 7. Kola Zagrebačkog električnog tramvaja (proizvod Đuro Đaković)

radna snaga, da bi vozila prolazeći kroz oštре krivine ostajala u dopuštenom profilu raspoloživog prostora i radi svladavanja velike navale putnika u odredene sate, često se upotrebljavaju zglobni tramvaji (sl. 8) i zglobni trolejbusi. Radi povećavanja komercijalne brzine cestovnih i šinskih vozila nastoje se osim toga križanja izvoditi u dva nivoa ili dio pruge kroz najstroži centar grada spustiti pod zemlju. Ako se gradska šinska vozila slože u veće kompozicije s velikim ubrzanjima i velikim brojem vrata radi brze izmjene putnika i potpuno odvoje od cestovnog saobraćaja, dobivaju se brze (podzemne ili nadzemne) *gradske željeznice* (sl. 9).

Lokomotive i vagoni grade se danas za širine kolosijeka od 450 mm za rudničke željeznice do 1676 mm za željeznice tzv. širokog kolosijeka. U Jugoslaviji se primjenjuju: normalni željeznički kolosijek (1435 mm = 4' 8½"), uski željeznički kolosijek (760 mm), metarski kolosijek (1000 mm, većinom za tramvaje) i 900-milimetarski kolosijek za površinske kopove u rudnicima. Ove mjere odgovaraju slobodnom razmaku među glavama tračnica.



Sl. 8. Zglobni tramvaj (proizvod ČKD Tatra)

Raspored osovina (pogonskih, nosećih, vodećih) označuje se time što se broj pogonskih osovina u jednom postolju obilježava velikim slovom po redu iz abecede (C znači npr. 3), a broj nosećih osovina arapskim brojem. Ako je postolje okretljivo, dodaje se apostrof, a ako svaka osovina ima svoj vlastiti elektromotor, dodaje se indeks 0. Tako npr. C₀' C₀' označuje lokomotivu sa dva troosovinska okretna postolja na kojima sve osovine imaju svoje pogonske motore, a sa B'2' označuje se vozilo s jednim dvoosovinskim pogonskim okretnljivim postoljem na kome se nalazi jedan vučni motor i s jednim nosećim dvoosovinskim okretnim postoljem.

Dinamika električne vuče

Vučna sila (F_v) je sila potrebna da bi vozilo svladalo otpore jednolike vožnje i ubrzanja. Ona se redovno mjeri na obodu pogonskih točkova a ponekad, kad se to posebno naznači, i na kuki tegljenika motornog vozila, a izražava se u kilopondima (kp) ili njutнима (N).

Kočna sila (F_k) je sila koja se prenosi preko oboda točka i koja je potrebna da se vozilo ili vlak usporava ili održava u jednolikom gibanju na nizbrdici.

Otpor vožnje je otpor što ga neko vozilo ili kompozicija suprostavlja vuči. On se izražava silom što je potrebna da se takvo vozilo ili kompozicija održava u jednolikom kretanju. Otpor vožnje je proporcionalan ukupnoj težini (G) vozila i tereta a ovisi još i o brzini vožnje i nekim karakteristikama vozila koje se izražavaju tzv. specifičnim otporom, a osim toga o stanju pruge, vremenu, usponu itd.

Specifični otpor vožnje je veličina koja u električnoj vuči obično služi za određivanje otpora vožnje. To je u stvari bezdimenzijski koeficijent ($w = F_v/G$) koji za određeni tip vozila kazuje koliki je dio normalnog pritiska što ga vozilo svojom težinom G vrši preko osovina i točkova na svoju podlogu potreban da se takvo



Sl. 9. Kompozicija podzemno-nadzemne gradske željeznice Stockholma (proizvod ASEA). Vide se kontaktne šine, a na vagonima pripadni oduzimači struje i veliki broj vrata

vozilo održava u jednoličnom kretanju. Kako se ove veličine određuju empirički i kako se sila vuče (F_v) i sila otpora (F_w) izražavaju po pravilu u kilopondima (kp), a težina kompozicije u megapondima (Mp), to je pri označivanju specifičnog otpora prikladnije dopisati oznaku [kp/Mp] umjesto faktora 10^{-3} .

Ukupni specifični otpor vožnje sastoji se od specifičnog otpora kotrljanja točka po podlozi w_v , specifičnog otpora u ležajima w_l , specifičnog otpora zraka w_{zr} , specifičnog otpora krivine w_k , specifičnog otpora uslijed uspona ili pada w_i , specifičnog otpora uslijed ubrzavanja ili usporavanja w_a . Prva se tri specifična otpora obično računaju zajedno kao specifični otpor jednolike vožnje u ravnici, w . Ovaj se izračunava na osnovu empirijskih formula koje su za određenu vrstu vozila dobivene mjerjenjem.

Potrebna vučna sila F_v za vuču lokomotive i zavješene kompozicije, dakle ukupna sila koju lokomotiva mora razvijati na obodu

pogonskih točkova, ovisi o težini lokomotive G_{lok} , težini kompozicije (vlaka) G_{vl} i ukupnog specifičnog otpora vožnje:

$$F_v = G_{\text{lok}}(w + w_k + w_i + w_a)_{\text{lok}} + G_{\text{vl}}(w + w_k + w_i + w_a)_{\text{vl}}.$$

Otpor kotrljanja je neovisan o brzini, otpor trenja u kliznim ležajima je proporcionalan brzini. Otpor zraka je proporcionalan kvadratu brzine, a ovisan je i o aerodinamičnom obliku čela i začelja vlaka kao i o ostaloj površini vozila ili vlaka.

Ukupni specifični otpor vožnje u ravnici može se prema tome izraziti u općem obliku:

$$w = a + c V + b V^2,$$

gdje a , b i c znače empirijski utvrđene koeficijente za pojedine vrste vozila, a V brzinu. Srednji se član često zanemaruje.

Za procjenu specifičnog otpora vožnje w elektromotornog vozila mogu poslužiti empirijski izrazi navedeni u nastavku, u kojima znači: G težinu vozila u Mp , A poprečni presjek vozila u m^2 , G_1 osovinski pritisak pogonske osovine u Mp i V brzinu u km/h .

Za dvoosovinski tramvaj:

$$w = 5 + 0,25 \left(\frac{V}{10} \right)^2 [\text{kp/Mp}].$$

Za četveroosovinski tramvaj:

$$w = (4 \cdots 5) + \frac{0,4 A}{G} \cdot \left(\frac{V + 15}{10} \right)^2 [\text{kp/Mp}].$$

Za trolejbus na dobroj podlozi:

$$w = 13 + 0,56 \left(\frac{V}{10} \right)^2 [\text{kp/Mp}].$$

Za električne i dizelelektrične lokomotive:

$$w = 0,65 + \frac{14,5}{G_1} + 0,01 V + 0,005 \frac{A}{G_{\text{lok}}} \left(\frac{V + 15}{10} \right)^2 [\text{kp/Mp}].$$

Specifični otpor vožnje vučene željezničke kompozicije w_{vl} računa se često prema Strahlovu formulom:

$$w_{\text{vl}} = a + \frac{1}{d} \left(\frac{V}{10} \right)^2,$$

gdje je $a = 2,5$, a $d = 40$ za brze i specijalne teške teretne vlakove, 25 do 30 za dvoosovinske putničke i teretne vagone, 10 za teretne vlakove s otvorenim wagonima. Jugoslavenske željeznice računaju sa $a = 2$ i $d = 32$ za brzi vlak i $d = 17,5$ za teretni vlak. Ovi specifični otpori mnogo ovise i o stanju pruge.

Kod pokretanja vlaka s mesta, naročito ako je stajao nešto dulje i ako veći dio osovine ima klizne ležaje, mora se računati sa specifičnim otporom vožnje $4,5 \text{ kp/Mp}$ za teretne vlakove i $\sim 7 \cdots 8 \text{ kp/Mp}$ za putničke vlakove. Razlika nastaje uslijed toga što pri teretnim vlakovima kvačila među wagonima nisu pritegnuta pa se uslijed elastičnosti kompozicije ne pokreću svi vagoni istovremeno. Specifični otpor vožnje pri pokretanju s mesta može pri nepovoljnim uvjetima biti i do 25 kp/Mp . On se smanjuje na normalu nakon $5 \cdots 10 \text{ m}$ vožnje ako vagoni imaju klizne ležaje, a već nakon nekoliko decimetara vožnje, ako vagoni imaju kotrljavajuće ležaje.

Specifični otpor vožnje u krivini veći je nego u pravcu zbog dodatnih trenja na površini kotrljanja i na vijencu točka.

Dodatni specifični otpor w_k je prema Röcklu

$$w_k = \frac{a}{R - b},$$

gdje je R radius krivine, a ostale veličine dane su u ovoj tablici:

Širina kolosijeka (mm)	a	b
1435	650	55
1000	400	20
750	300	10
600	200	5

Na ovaj otpor ima utjecaj i osovinski razmak vozila, odnosno okretnog postolja.

Dodatni otpor vuče zbog uspona ili pada iznosi $G \sin \alpha$, gdje G znači težinu, a α kut nagiba pruge ili ceste. Specifični otpor s tog naslova je prema tome: $G \sin \alpha / G = \sin \alpha$.

Budući da uspon i (tj. prirast odnosno opadanje visine pruge izražen u metrima po kilometru) iznosi

$$i = \tan \alpha [\text{m/km}]$$

i budući da za mali α vrijedi sin $\alpha \approx \tan \alpha$, a $[\text{m/km}] = [\text{kp/Mp}] = \% = 10^{-3}$, može se specifični otpor vuče zbog uspona ili pada uzeti u račun naprosto na taj način da se svim ostalim specifičnim otporima pribroji uspon u promilima

$$w_i = \pm i [\text{kp/Mp}].$$

Specifični otpor vuče uslijed ubrzanja vozila (w_a) izračunava se iz slijedeće empirijske formule, ako se ubrzanje ili usporjenje a izrazi u cm/s^2 :

$$w_a = 1,02 (1 + \zeta) a [\text{kp/Mp}],$$

gdje je ζ dodatni član kojim se uzima u obzir povećanje kinetičke energije uslijed masa koje rotiraju, npr. rotora vučnih motorâ, točkova itd. ζ iznosi za teretne vagone $\sim 0,05$ i penje se do 0,25 za trolejbus.

Vučna i kočna sila. Ukupna potrebna vučna sila (F_v) na taj je način

$$F_v = G_{\text{lok}} [w_{\text{lok}} + 1,02 (1 + \zeta_{\text{lok}}) a] + G_{\text{vl}} [w_{\text{vl}} + 1,02 (1 + \zeta_{\text{vl}}) a] + (G_{\text{lok}} + G_{\text{vl}}) \cdot (w_k + i).$$

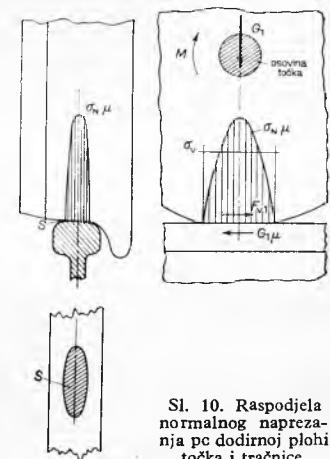
Ova sila ne može biti veća od granične sile F_μ pri kojoj točkovi pogonskih osovina počinju klizati na podlozi. Pri vuči na tračnicama redovno je ova sila, tzv. *adheziona vučna sila*, granica vučne sile, dok je pri vuči na cesti ubrzanje ili usporjenje najčešće ograničeno raspoloživim zakretnim momentom pogonskog motora ili čvrstocom prijenosnog mehanizma. Pri kočenju, tj. pri smanjivanju brzine ili zadržavanju vozila pri vožnji na padini, potrebna je *kočna sila*, tj. sila koja ima smjer suprotan smjeru vožnje. Ona se određuje na analogan način kao i vučna sila uz odgovarajuće promjene predznaka:

$$F_k = G_{\text{lok}} [1,02 (1 + \zeta_{\text{lok}}) a - w_{\text{lok}} - i - w_k] + G_{\text{vl}} [1,02 (1 + \zeta_{\text{vl}}) a - w_{\text{vl}} - i - w_k].$$

Koefficijent adhezije je iskoristivi dio koeficijenta trenja između točkova i tračnica.

Koefficijent adhezije μ_1 jednog osovinskog sloga (sa dva pogonska točka) omjer je ostvarene vučne sile F_{vl} na obodu točkova te osovine i osovinskog pritiska G_1 , tj. zbroja svih vertikalnih sila na mjestu dodira ovih točkova i tračnica, $\mu_1 = F_{\text{vl}}/G_1$. Budući da se danas već mogu graditi laka motorna vozila s vrlo velikom koncentracijom snage i vučne sile uz mali osovinski pritisak, potpuno iskorištenje raspoložive težine, tj. postizanje maksimalnog koefficijenta adhezije, vrlo je važan faktor ekonomičnosti svake, pa i električne željezničke vuče.

Zeljeznički točak je blago koničan valjak, a tračnica ima takoder zaobljenu površinu, tako da se pri dodiru točka s tračnicom uslijed djelovanja osovinskog pritiska G_1 ova tijela elastično deformiraju, a od početne dodirne tačke nastaje dodirna ploha. Na sl. 10 prikazana je raspodjela normalnog naprezanja σ_N po ovoj plohi S . Dodirna ploha ima oblik elipse a veličina normalnog naprezanja je opisana elipsoidom, tako da su naprezanja na rubu dodirne plohe jednaka nuli. Pretpostavlji se da se vučna sila F_v jednolikom raspodijelila po dodirnoj plohi, ustanovit će se da kod svake vučne sile ima jedan dio dodirne plohe na kojem je jedinična vučna sila veća od lokalne moguće specifične sile trenja $\mu \sigma_N$, gdje je μ lokalni koefficijent trenja. Usljed toga nastaje lokalno proklizavanje jednog dijela dodirne plohe, koliko to dopušta deformacija materijala. To proklizavanje naziva se *mikroklizanjem* i ono je to veće što je veća vučna sila u odnosu na osovinski pritisak. Kad sva dodirna ploha klizi, klizanje naglo raste s daljnjim porastom vučne sile, te tako



Sl. 10. Raspodjela normalnog naprezanja po dodirnoj plohi točka i tračnice

nastaje *makroklizanje*, kako je to prikazano u sl. 11. Tu je klizanje prikazano kao razlika obodne brzine ($r\omega$) i stvarne brzine vožnje (v) u odnosu na brzinu vožnje:

$$s = \frac{r\omega - v}{v} = \frac{r\omega}{v} - 1.$$

Vidi se da vučna sila i pri makroklizanju još malo raste i tek onda postiže maksimalnu, tzv. adhezionu vučnu silu F_{μ} . Pri daljem rastu klizanja ostvarena vučna sila naglo pada te osovina od *pseudoklizanja* prelazi u *pravo klizanje* (tzv. buksiranje). Slično se razvija klizanje i pri kočenju.

Veličina adhezije vučne sile i koeficijenta adhezije i njihova ovisnost o brzini klizanja ovise o nizu elemenata, kao što su vlagi, sitnije i krupnije neravnine tračnice, strana tijela na tračnicama, neizbalansiranost masa pogonskog točka itd., zbog čega se ove veličine mnogo mijenjaju s mjestom i vremenom,

te se smatraju statističkim veličinama s određenom srednjom vrijednosti i određenim rasipanjem tih vrijednosti. U praksi se smatra dopustivim da pojedine osovine motornog vozila pri maksimalnoj vučnoj sili mogu kliznuti u 5% slučajeva nastupanja takve sile; računa se dakle s vjerojatnosti klizanja 5%.

Utrošak energije pri vuči. Pri vožnji jednolikom brzinom energija se troši na svladavanje otpora vožnje, pri ubrzavanju ona se troši još i na povećanje kinetičke energije vozila. Pri postepenom smanjivanju brzine ova se energija može iskoristiti za svladavanje otpora vožnje. Pri usporavanju, odnosno kočenju, kinetička se energija vozila (i rotacionih masa) pretvara u toplinu ili se vraća u izvor energije. Pri ubrzavanju vozila motorima za istosmjernu struju, ako se napajaju iz izvora konstantnog napona, troši se energija još i u predotpornicima.

Ukupni utrošak energije za vožnju i kočenje u ravni po toni (t) i kilometru (km), mjerjen na nekom mjestu postrojenja, iznosi približno:

$$A_1 = 2,72 \frac{w + w_k + 2}{\eta} + \frac{1 + \zeta}{93 L} (a_1 V_r^2 + V_k^2) \left[\frac{\text{Wh}}{\text{tkm}} \right],$$

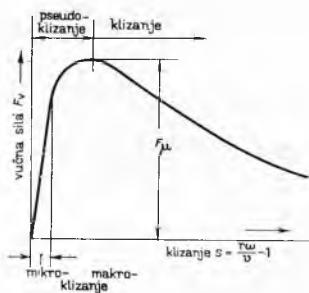
gdje je η korisnost računata od oboda točka do mjesta mjerjenja energije, L udaljenost medju stanicama u km, a_1 omjer energije koja je poništena u predotpornima i kinetičke energije vozila pri brzini V_r , V_r brzina vozila u momentu isključenja posljednjeg stepena predotpora, V_k brzina vožnje na početku kočenja (sve brzine u km/h) a ζ dodatni član (v. str. 692).

Vozila za istosmjernu struju

Vučna vozila koja se napajaju istosmjernom strujom mogu biti zavisna ili nezavisna. Zavisna vozila za istosmjernu struju priključena su preko oduzimača struje na kontaktni vod ili kontaktnu šinu istosmjernog napona.

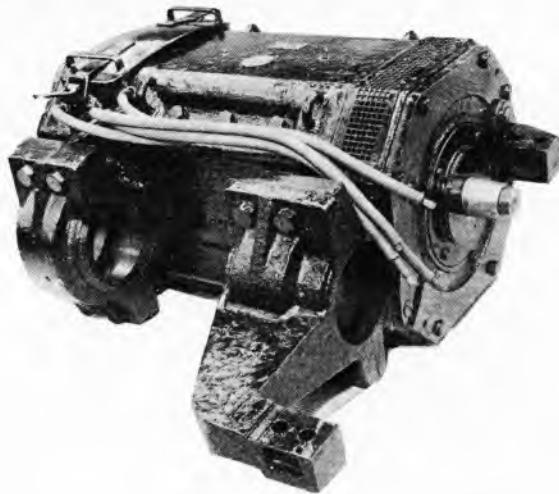
Istosmjerni vučni motor u elektromotornom je vozilu redovno smješten u okretnom postolju, te se zbog ograničenosti prostora primjenjuju i odgovarajuća konstrukcionalna rješenja. On je u vozilu smješten ili paralelno s osi pogonske osovine, u kom se slučaju njegov zakretni moment prenosi na pogonsku osovinu pomoći čeonih zupčanika, ili je postavljen udužno, u smjeru osi vozila, i onda se moment motora prenosi na pogonsku osovinu pomoći kardanske osovine i koničnih zupčanika. Cestovna vozila u tom slučaju imaju i diferencijal (v. *Automobilna vozila*).

Ako je glavna os vučnog motora paralelna s osi pogonske



Sl. 11. Ovisnost klizanja o vučnoj sili

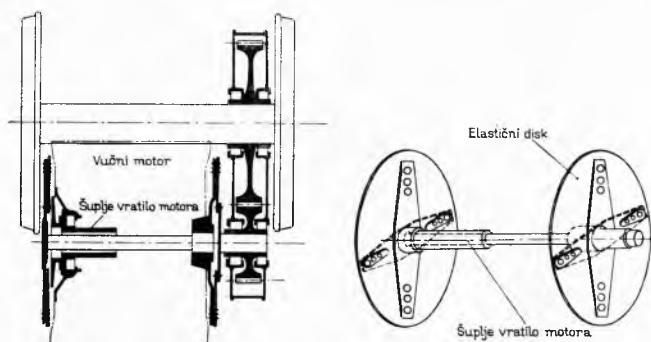
osovine i ako maksimalna brzina vozila nije veća od 100–120 km/h, vučni motori se jednom svojom stranom oslanjaju neposredno o pogonsku osovinu vozila, a druga se strana pomoći elastičnog spoja opire o okvir okretnog postolja. Ležaji na pogonskoj osovinu zovu se šapasti ležaji, zbog toga što podsjećaju na šape. Izvode se kao klizni ili valjkasti ležaji. Na sl. 12 prikazan je smještaj takva motora. Niz veličina, kao što su: promjer kotrljanja točka D , minimalna slobodna visina a od gornje ivice šine (GIŠ) do oklopa velikog zupčanika, osovinski pritisak, širina kolosijeka, u tom slučaju, uz ostale električne i mehaničke elemente, definiraju i ograničuju dimenzije i mogućnost izvođenja motora u toj izvedbi



Sl. 12. Smještaj vučnog motora sa šapastim ležajima

(sl. 13). Računa se da su težišta motora za vrijeme vožnje izložena najčešćim ubrzanjima do 15 g (do $\sim 150 \text{ ms}^{-2}$) i to pri brzinama od 60 do 70 km/h.

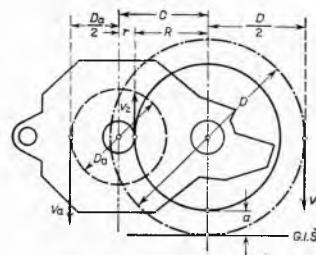
Ako je snaga motora velika i maksimalna brzina vozila 120 km/h i više, motori se kruto učvršćuju u okvir okretnog postolja, a zakretni se moment prenosi pomoći elastičnih elemenata, kao što su npr. elastični disk BBC (firme Brown Boveri, sl. 14), gumeni prijenos Siemens (sl. 15), polužni prijenos ALSTHOM pomoći »lebdećeg prstena« (sl. 16), kardanski prijenos Jacquemin (sl. 17) ili torzionalno vratilo ASEA (sl. 18).



Sl. 13. Istosmjerni vučni motor s valjkastim šapastim ležajima (proizvod Rade Končar)

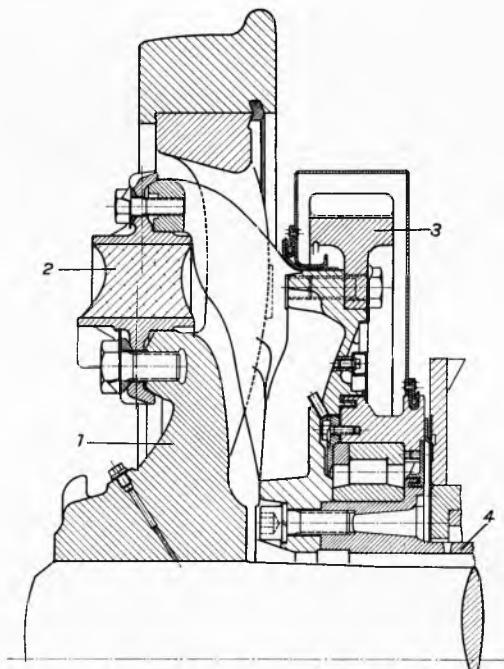
Francuske željeznice (SNCF) mnogo primjenjuju okretna postolja sa samo jednim pogonskim motorom. Na sl. 19 prikazano je jednomotorno postolje lokomotive SNCF B'B'—16500 za dva omjera prijenosa u zupčanicima.

Istosmjerni motori za vuču (v. *Električni strojevi*) velikom se većinom izvode kao 4-polni motori sa serijskom uzbudom, bez kompenzacijonog namota. Ako je snaga velika i potreba slabljenja uzbudne velike, primjenjuju se 6-polne izvedbe i kompenzacijoni namoti. Prednost je vučnog motora sa serijskom uzbudom u tome što njegov zakretni moment M (a time i vučna sila) raste kad mu brzina vrtnje n (a time i brzina vožnje) pada. Uslijed toga snaga motora raste sporije nego moment (vučna sila), a u slučaju

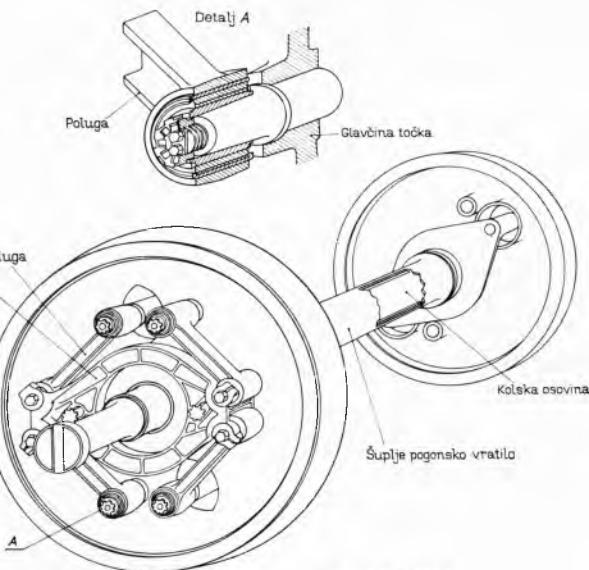


Sl. 14. Transmisija pomoći elastičnog diska (proizvod BBC)

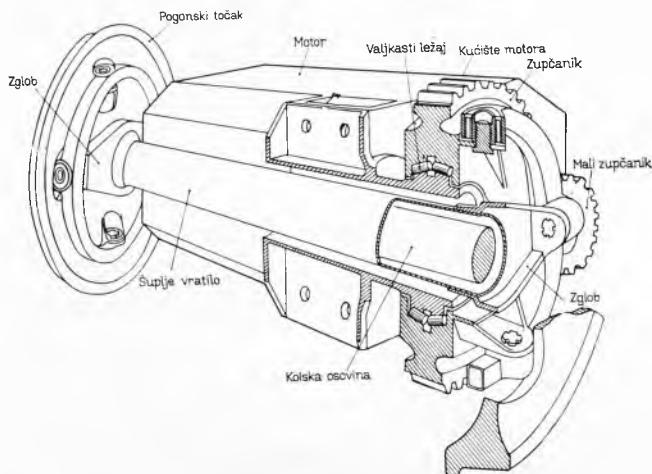
ELEKTRIČNA VUČA



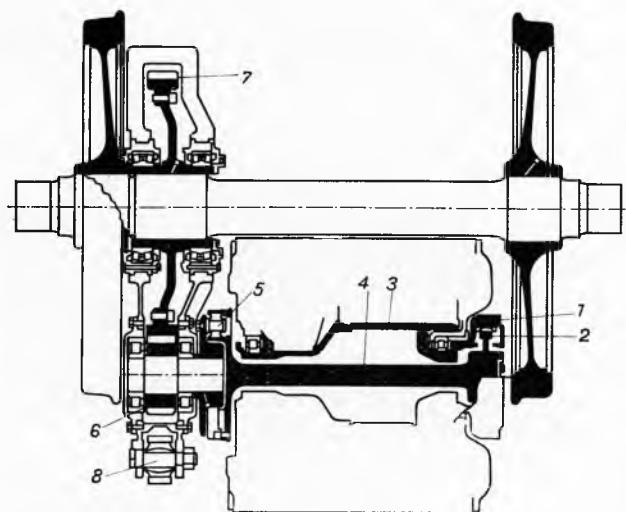
Sl. 15. Gumeni prijenos tvornice Siemens. 1 Glavčina pogonskog točka, 2 gumeni prsten, 3 veliki zupčanik prijenosnika, 4 šuplje vratilo



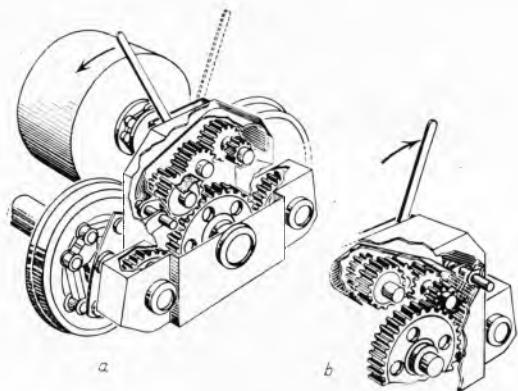
Sl. 16. Polužni prijenos sistema ALSTHOM



Sl. 17. Kardanski prijenos Jacquemin

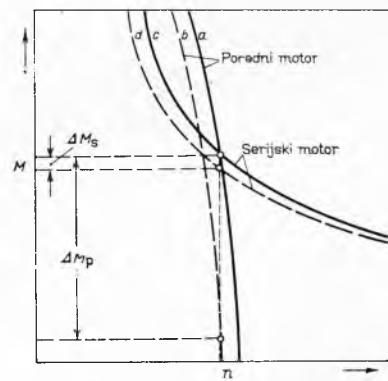


Sl. 18. Prijenos torzionim vratilom tvornice ASEA. 1 Pogon šupljim vratilom sistema ASEA, 2 zupčasta spojka, 3 šuplje vratilo rotora, 4 torzionalno (elastično) vratilo, 5 gumena spojka, 6 mali zupčanik, 7 veliki zupčanik, 8 elastični oslonac kućišta zupčanog prijenosnika



Sl. 19. Jednomotorno postolje sa dva omjera prijenosa tipa ALSTHOM. a I omjer prijenosa, b II omjer prijenosa

različitim promjera točkova pogonskih osovina, npr. uslijed ishabnosti, razlika struja (i vučnih sile) manja je nego pri motorima s drugim spojevima. Na sl. 20 prikazane su karakteristike $M = f(n)$ dvaju porednih (a, b) i dvaju serijskih (c, d) vučnih motora istih tipova; razlika među njima je unutar granica tolerancije.



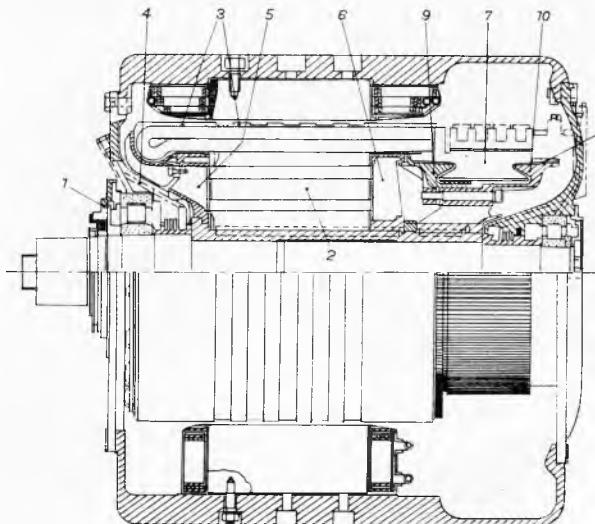
Sl. 20. Zakretni moment M kao funkcija vrtnje n . Različita karakteristika serijskog i porednog vučnog motora

Pri jednakim brzinama vrtnje motora, razlika zakretnih momenata među motorima pri serijskoj uzbudi (ΔM_s) bit će mnogo manja nego pri porednoj uzbudi (ΔM_p). Ova razlika može se još i povećati ako su pri istoj brzini vozila zbog različitih promjera pogonskih točkova (npr. zbog ishabnosti) brzine vrtnje motora a time i vučne sile pogonskih osovina različite.

Slične su prednosti serijskog spoja također u pogledu nagle promjene napona i u pogledu komutacije pri preopterećenju.

Vučni motori za istosmjernu struju sa šapastim ovjesom grade se za različite snage do ~ 700 kW i različite napone do 3000/2 V (3000 V prema masi i 1500 V na stezalkama motora). Na sl. 21 prikazan je presjek vučnog motora za 3000/2 V i satnu

nalazi na cesti ili na pruzi; otpornost prema koroziji kojoj je izvrgnuto vozilo kad dugo stoji van pogona, izvan garaže ili remize, i dovoljna mehanička i električna trajnost, kako bi troškovi održavanja ostajali unutar određenih granica. Svi su ovi zahtjevi obuhvaćeni propisima. Na vozilima za istosmjernu struju najčešće se primjenjuje oprema navedena u nastavku.

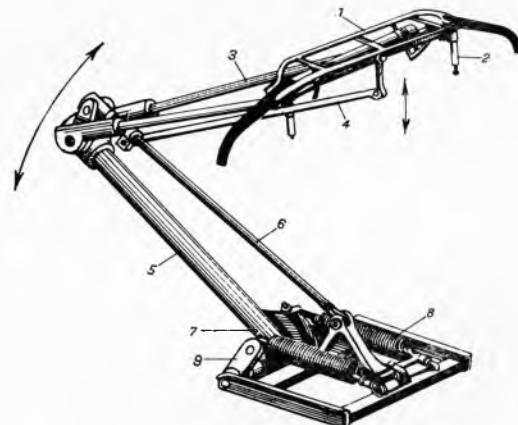


Sl. 21. Vučni motor za istosmjernu struju napona 3000/2 V, satne snage 525 kW, sa šapastim ležajem (ASGEN). 1 Brtvičko ležajnog poklopa, 2 zezgra rotora, 3 banda rotora, 4 kanal za podmazivanje, 5 nosač glave namota na pogonskoj strani, 6 nosač glave namota na kolektorskoj strani, 7 kolektorska lamela, 8 međuizolacija kolektorskih lamele, 9 fiksni tlačni prsten kolektora, 10 pomični tlačni prsten kolektora, 11 izolacijska »manšeta« kolektora, 12 namot glavnog pola, 13 spojni vodovi unutar motora, 14 namot pomoćnog pola, 15 vijak za pritezanje namota glavnog pola, 16 vijak za pritezanje namota pomoćnog pola, 17 tlačni prsten namota glavnog pola, 18 tlačni prsten namota pomoćnog pola, 19 provrt za pritezni vijak, 20 udubljenje za pritezni vijak, 21 držać četkica

snagu 525 kW. (Satnom snagom naziva se najveća snaga koju vučni motor smije u okviru dozvoljenog zagrijavanja davaći kroz 1 sat).

Ostala električna oprema i aparati za istosmjerna vozila. Na vozilima se općenito primjenjuju slični aparati i uređaji kao i na stabilnim električnim postrojenjima, s time što ta oprema mora odgovarati i nekim dodatnim zahtjevima, među kojima treba istaknuti: otpornost prema mehaničkim vibracijama i potresima uslijed trešnje pri vožnji, uslijed vibracija zbog rada dizelskog ili nekog drugog motora i uslijed lakših sudara, kako ne bi nepredviđeno proradili kontakti i kako ne bi došlo do loma pojedinih dijelova; neosjetljivost na promjene napona izvora električne energije u širokim granicama; zaštićenost od prašine koja se uvijek

Oduzimač struje su aparati pomoću kojih se ostvaruje prijelaz struje od kontaktog voda ili strujne tračnice na elektromotorno



Sl. 23. Polupantografski oduzimač struje. 1 Klizač, 2 opruga klizača, 3 gornje noseće šipke, 4 gornja vodeća šipka, 5 donja noseća šipka, 6 tlačna šipka, 7 poluga za prijenos uzgona, 8 opruge za uzgon pantografa, 9 poluga za povlačenje pantografa

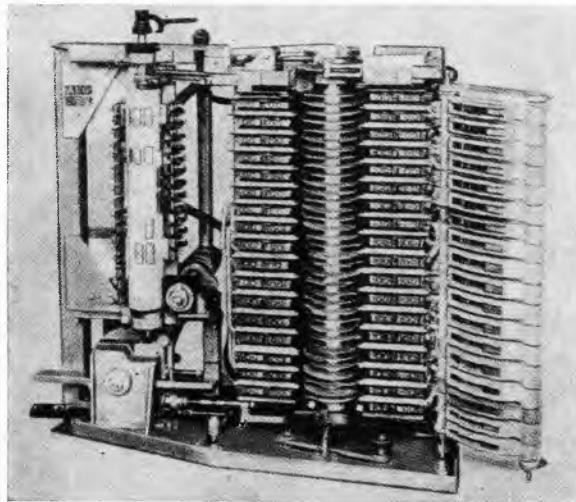


Sl. 22. Oduzimač struje za strujnu tračnicu

vozilo. Klizne površine klizača na oduzimaču od ljevenog su željeza, aluminijuma ili elektrografitiranog ugljena. Ovaj posljednji najmanje troši kontakt vod i najmanje iskri, ali se sam najviše troši. Oduzimači se grade za priključak na strujnu tračnicu (sl. 22, v. i sl. 9) ili za kontaktni vod. Ovi opet mogu biti sa šipkom i metalnim točkom (engl. trolley) (v. sl. 6), u obliku lire (v. sl. 7), u obliku pantografa (v. sl. 8) ili polupantografa (sl. 23). Ovaj posljednji se odlikuje time što zauzima mali prostor na krovu vozila i time što strujanje zraka ima mali utjecaj na veličinu sile kojom klizna površina pritisnuje kontakt vod pri velikim brzinama.

Kontroleri su upravljačke sklopke kojima se uklapaju i prespajaju drugi aparati i strojevi i isključuju predotpori. Oni mogu biti direktni, koji sami spajaju te strujne krugove (sl. 24), ili indirektni, koji to spajanje vrše posredstvom kontaktora ili drugih naprava. Pogon im je ručni, elektropneumatski ili elektromotorni.

Sklopnići ili *kontaktori* sadrže jedan ili više glavnih kontakata (polova), koji se uklapaju djelovanjem elektromagneta (sl. 25) ili pomoću cilindra u koji se pušta zrak elektropneumatskim ventilima. Sklopnići su predviđeni samo za uklapanje i isklapanje nazivne struje (i dopustivih preopterećenja) i redovno ne mogu

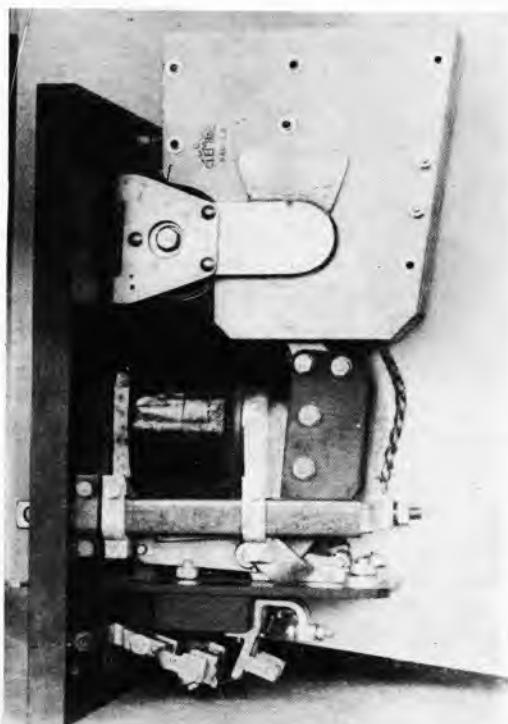


Sl. 24. Direktni kontroler za četvoromotorni tramvaj

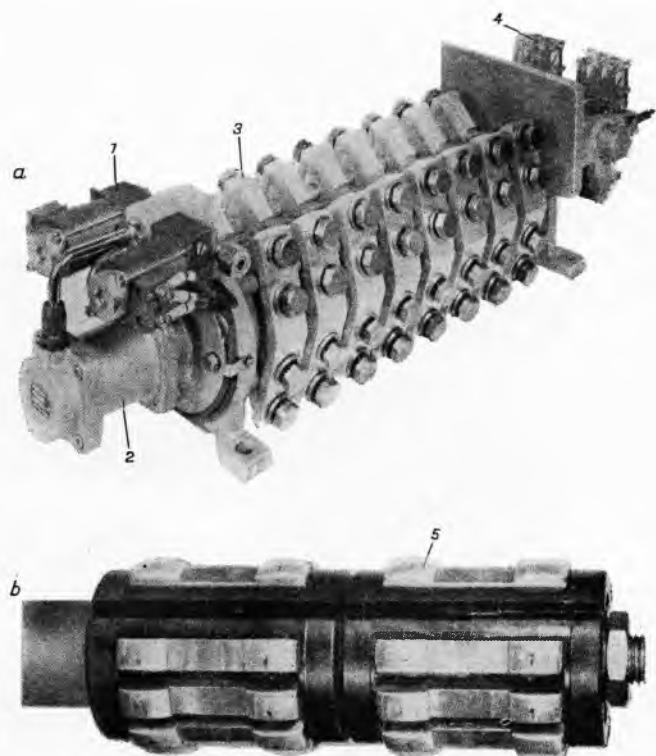
isklopiti struju kratkog spoja. Oni se odlikuju velikom trajnošću, tj. velikim brojem uklapanja bez potrebe održavanja.

Preklopke s električnim ili pneumatskim pogonom služe za prespajanje strujnih krugova, npr. za promjenu smjera vožnje ili za prijelaz od vuče na kočenje, a sadrže velik broj kontakata s mogućnošću vodenja svih struja koje se pojavljuju u tim strujnim krugovima. Ove preklopke vrše preklapanja bez struje, jer im kontakti nisu opremljeni za gašenje luka (sl. 26).

Otpornici su važan sastavni dio svakog elektromotornog vozila za istosmernu struju (osim ako se primjenjuju strojni pretvarači ili impulsno upravljanje poluvodičkim ventilima). Služe za regulaciju napona pri pokretanju i za pretvaranje kinetičke energije vozila ili vlaka (preko električne energije) u toplinsku prilikom kočenja. Otpornici se izrađuju od ljevenog željeza ili od otporskog materijala u obliku žice ili vrpce koja je motana u spirale. Ako



Sl. 25. Elektromagnetski sklopnik



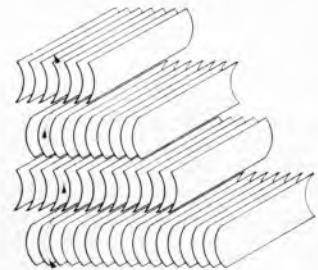
Sl. 26. Elektropneumatska preklopka firme BBC s aksijalnim pomakom. 1 Elektropneumatski ventil, 2 zračni cilindar s klipom, 3 stezaljka za glavne vodove, 4 signalni kontakt, 5 glavni pomicni kontakti

je potrebno da se u što manjem prostoru otporima što manje težine pretvara velika električna snaga u toplinu, npr. kad lokomotiva mora na dugom padu kočiti težak vlak, otpornici se intenzivno prisilno ventiliraju. U tom se slučaju otpornici često izrađuju u obliku limenih traka koje su u poprečnom presjeku svinute u obliku slova V ili C. One se slažu u sača (sl. 27) kroz koja se puše rashladni zrak.

Poluvodički sastavni dijelovi sve više se primjenjuju i na elektromotornim vozilima za istosmernu struju. Tranzistori i poluvodički diode omogućili su razvoj kibernetike, koja se u električnoj vuči primjenjuje za automatizaciju, radi pojednostavljenja upravljanja, radi povećanja sigurnosti i za pronalaženje optimalnih voznih redova pri svim sistemima elektrifikacije. Tiristori, tj. poluvodički (silicijumski) upravljeni električni jakastrujni ventilii s karakteristikama tiratrona, mogu u kombinaciji s kondenzatorima zamijeniti uklopne aparate vučnog strujnog kruga npr. pri impulsnom upravljanju. Tiristorski spojevi ne sadrže pokretne dijelove ni kontakte i ne zahtijevaju nikakvo održavanje, otporni su prema mehaničkim vibracijama i promjenama temperature, a uz to omogućuju kontinuirano i vrlo brzo automatsko reguliranje brzine i vučne sile.

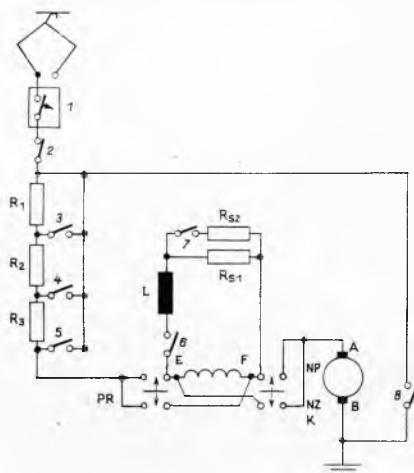
Upravljanje vozilima obavlja se različnim načinima opisanim u nastavku.

Upravljanje uvrštanjem otpornika u strujne krugove vučnih motorova. Za pokretanje i elektrodinamičko kočenje vozila za istosmernu struju redovno se upotrebljavaju sheme s otpornicima. Na sl. 28 prikazan je primjer takve sheme s jednim vučnim motorom, sa zaštitnim prekidačem 1, sa tri predotpornička stepena R_1 , R_2 , R_3 , sa dva stepena slabljenja uzbude R_{s1} i R_{s2} , s induktivnim šantom L i s preklopkom smjera vožnje PR. Stepenovanje predotpora i slabljenje uzbude vrši se kontaktima 3 do 7. Pri elektrodinamičkom kočenju rade vučni motori kao serijski istosmerni



Sl. 27. Shematski prikaz žlibastog otpornika tvornice BBC

generatori koji se u tom slučaju pogone energijom kretanja vozila posredstvom točkova. Električna energija kojom ti generatori napajaju otpornike pretvara se u toplinu. Na taj se način kinetička energija vozila pretvara u toplinsku energiju i vrši kočenje. Elektro-

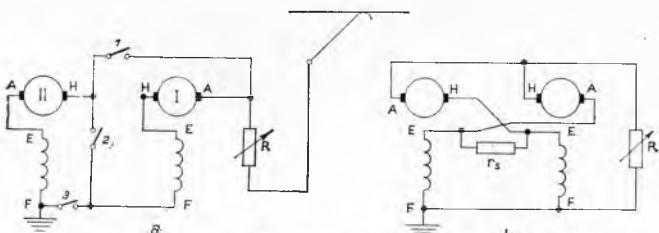


Sl. 28. Vučni strujni krug elektromotornog vozila za istosmjernu struju

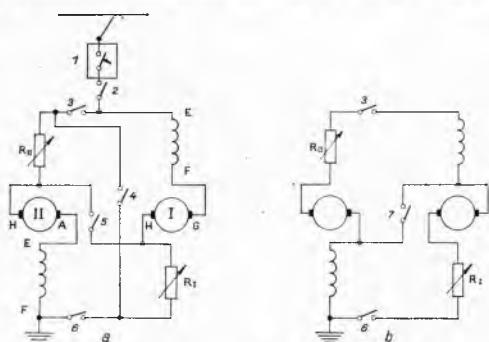
dinamičko kočenje se postiže zadržavanjem smjera struje u uzvodnom namotu EF a promjenom redoslijeda priključaka krovne AB, što se postiže pomoću preklopke PR, odvajanjem motora od izvora struje kontaktom 2 i zatvaranjem strujnog kruga za kočenje otpornika R_1, R_2, R_3 pomoću kontakta 8.

Upravljanje prespajanjem vučnih motora. Ako elektromotorno vozilo ima više vučnih motora, npr. dva, ono se redovno pokreće najprije s motorima u serijskom spoju, uz postepeno isključivanje otpornika. Nakon isključenja predotporeda prespaja se motori u paralelni spoj i istovremeno ponovo uključe predotpornici. Oni se zatim ponovo postepeno isključuju. Time se energija koja se pri pokretanju gubi u predotpornicima smanjuje približno na polovicu.

Motri se mogu prespojiti iz serijskog spoja u paralelni na dva načina: »kratkim spojem« jednog od motora, kako je to prikazano na sl. 29 a, ili mostom, kako je to prikazano na sl. 30 a.



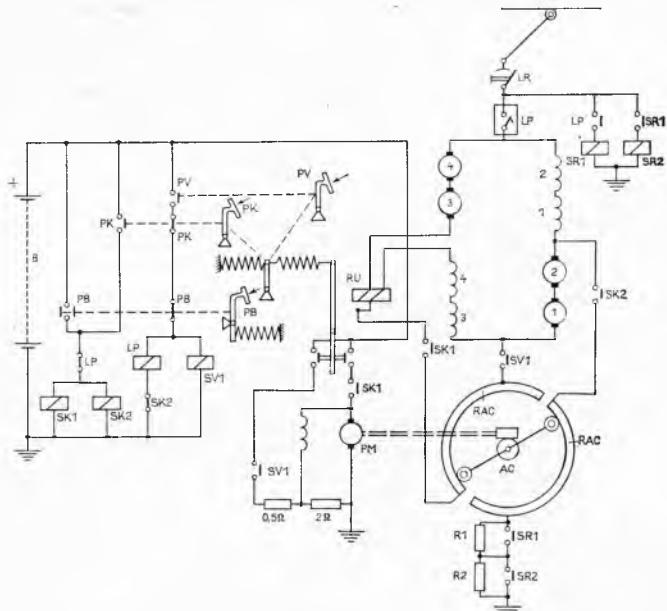
Sl. 29. Prespajanje vučnih motora »kratkim spojem«. a) Vožnja, b) kočenje



Sl. 30. Prespajanje vučnih motora mostom. a) Vožnja, b) kočenje

U prvoj je shemi za vrijeme vožnje u serijskom spoju uključen kontakt 2 a otvoreni su kontakti 1 i 3. Pri prijelazu na paralelni

spoj najprije se uključuje npr. kontakt 1, koji kratko spaja motor I pa se isključuje 2 i zatim uključuje 3. Pri kočenju prespajaju se motori u tzv. »križni« spoj (sl. 29b), koji je potreban radi stabilnosti budući da tada motori rade kao generatori s međusobnom serijskom uzbudom. Bolji, ali i skuplji, jest prijelaz u »mostu«, ili »ciklički« spoj, prema slici 30a. U serijskom spoju uključeni su kontakti 1, 2 i 4. Nakon isključenja predotporeda R_I i R_{II} uključuje se kontakt 5, a kontakt 4 se isključuje. Uključivanjem kontaktata 3 i 6 i ponovnim uključivanjem jednog dijela otpora R_I i R_{II} ne mijenja se struja u motorima, a struja u kontaktu 5 može se otporima podesiti na nulu i onda isključiti. Time se postiže prijelaz u paralelu bez skoka struje a time i bez nagle promjene vučne sile, što je naročito važno za lokomotive koje vuku teške teretne vlakove. Pri kočenju (sl. 30 b) samo se isključi kontakt 2 i uključe kontakti 3, 6 i 7. Prednost je ovog spoja još i u tome što svih kontakti i otpornici, osim kontakta 7, stalno vode samo struju jednog stroja (ili jedne grupe strojeva). Analogno se prespajaju motori i na lokomotivama sa šest vučnih motora. Na akumulatorskim vozilima vrši se ponekad osim gore navedenih prespajanja još i prespajanje dijelova baterije u paralelni i serijski spoj.

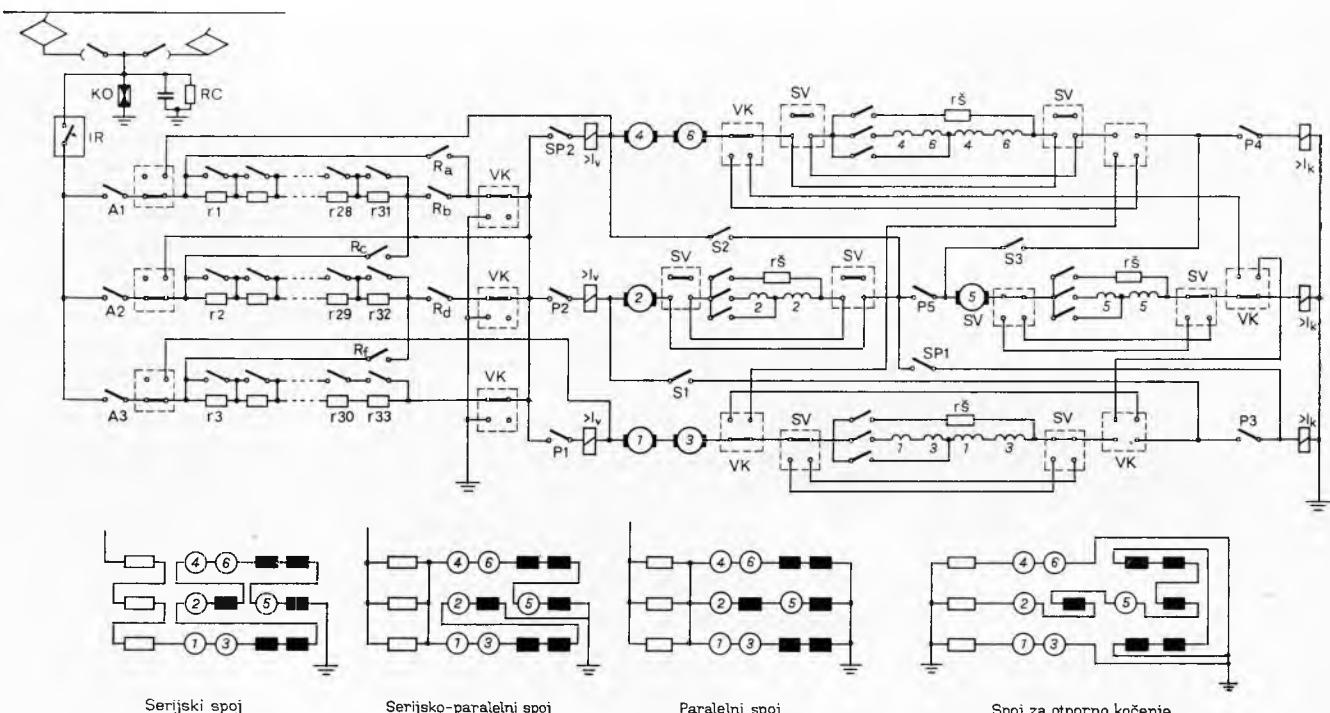


Sl. 31. Pojednostavljena električna shema tramvaja tipa PCC. I-4 Vučni motori, AC akcelerator, B akumulatorska baterija, LR linijski rastavljač, LP linijski prekidač, PB pedala budnosti, PV pedala za vožnju, PK pedala za kočenje, PM pogonski motor akceleratora, RAC otpornici akceleratora, R1 i R2 dodatni otpornici za kočenje, RU reljef ubrzanja, SK1 i SK2 sklopniči za kočenje, SV1 i SV2 sklopniči za vuču, SRI i SR2 sklopniči za kratko spajanje otpornika

Na sl. 31 prikazana je pojednostavljena električna shema tramvaja tipa PCC-Westinghouse koji se proizvodi i u Evropi, a koji se odlikuje finostepenim kontrolerom-akceleratorom i polaskom u paralelnom spoju, što mu omogućuje dobro adheziju i veliko ubrzanje (uz povećani potrošak energije). Predotpori RAC za pokretanje i kočenje uključuju se i isključuju električnim servomotorom PM. Pritiskom na pedalu za vožnju PV uključuje se linijski prekidač LP kojim se vučni motori priključuju na kontaktni vod i stavljaju u pogon motor PM koji smanjuje predotpore. Kad struja pokretanja postigne svoju granicnu jačinu, reljef ubrzanja RU privlači krovnu i motor PM se zaustavlja. Pritiskom na pedalu za kočenje PK isključuje se linijska sklopka i uklapaju sklopniči za kočenje SK1 i SK2, a motor PM se sada vrti u suprotnom pravcu i opet smanjuje predotpore AC koji su sada uključeni preko kontaktata SK1 i SK2. Pedalu budnika PB valja držati u srednjem (nacrtanom) položaju. Ako vozač klone, ona isključuje vučne struje krugove i uključuje kočenje.

U sl. 32 prikazana je električna shema lokomotive serije JŽ 361 za 3000 V i 3150 kW. Pri polasku u serijskom spoju najprije se uključuju sklopniči A1, R_c, R_r, P1, S1, S2, S3 i zatim se sklopničima isključuju predotpori r1 do r33. Nakon slabljenja uzbude i 5 stepena prijelaza (kroz kratko spajanje motora 2 i 5) motori se spajaju u serijsko-paralelni spoj po 3 motora u 2 paralele grane. Analogno se zatim prelazi u tri paralele grane sa po dva motora. Odvajanjem od kontaktne mreže, uzbudom svih uzbudnih namota iz jednog para vučnih motora i priključivanjem svih motora na otpornike dobiva se spoj za otporno kočenje.

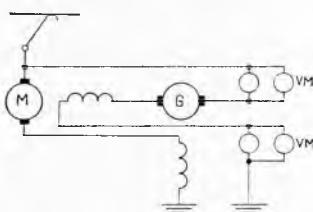
Upravljanje metadinom. Kad vozilo treba često pokretati i zaustavljati, troši se velik dio energije u otpornicima. U želji za smanjenjem potrošaka energije primjenjivali su se različni strojni agregati. Po prijedlogu Pestarinija (1930) počeo se primjenjivati metadinski pretvarač (v. *Električni strojevi*). To je rotacioni pretvarač koji ide u grupu metadinskih strojeva s poprečnim poljem,



Sl. 32. Električna shema lokomotive ASGEN za JŽ, serije 362, za 3000 V i 3150 kW, IR ultrabrz prekidač, A1, A2 i A3 linijski sklopni; S1, S2 i S3 linijski sklopni za serijski spoj; SP1 i SP2 linijski sklopni za serijsko-paralelni spoj; P1, P2, P3, P4 i P5 linijski sklopni za paralelni spoj; r1...r33 sklopni za isključenje otpornika; SV preklopka za promjenu smjera, VK preklopka za vuču i kočenje, Iv prekostrujni relaj za vuču, I_k prekostrujni relaj za kočenje, r_s otpornik za šantiranje, 1...6 vučni motori, KO i RC prenaponska zaštita odvodnikom i RC-članom

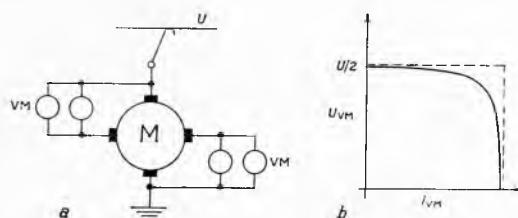
a radi na principu reakcije kotve. On pretvara električnu energiju konstantnog istosmernog napona, koju uzima iz mreže, u električnu energiju istosmjerne struje konstantne jakosti. Zamišljamo da on spaja istosmerni motor i generator pretvarača u jedan stroj time što $2n$ -polno motano rotor ugrađuje u stator sa $4n$ polova i $4n$ reda držača četkica na kolektoru. Na taj se način u rotoru dobiva uzuđno i poprečno polje u odnosu na glavnu os, tj. na os para četkica koje su priključene na nepromjenljivi napon mreže. Na

slici 33 prikazana je funkcionalna shema pretvarača sa $n = 1$, kojemu je kolektor u shemi razdvojen. Četkice uzuđnog smjera prikazane su na kolektoru zamišljenog motora M a četkice poprečnog smjera na kolektoru zamišljenog generatora G. Vučni motori (VM) priključeni su na kolektor za mišljeni generatora G. Cijeli agregat vrti se konstantnom brzinom (tijekom npr. malim pored-



Sl. 33. Funkcionalna shema metadina. M Motorni dio, G generatorski dio, VM vučni motori

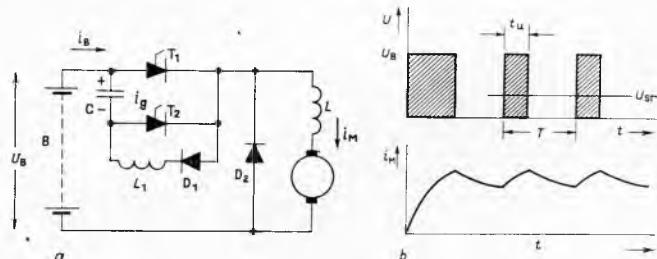
nim motorom). Četkice kolektora zamišljenog motora M moraju imati konstantan napon mreže i zato četkice generatora G, koje napajaju njihovu uzbudbu, propuštaju konstantnu struju. Četkicama motora M dakle teče struja koja je potrebna da se u četkicama generatora G održava takva struja. Dok vučni motori VM stoje, ova struja kruga M u četkicama generatora G inducira puni napon mreže i propušta samo navedenu uzbudnu struju za četkice motora M. Kako se motori VM počnu vrtjeti, napon im raste, pa napon u G pada a da struja u G, pa tako i u VM, ostaje kon-



Sl. 34. Shema i karakteristika metadina spojenog u »osmici«. M metadin, VM vučni motori

stantna, jer je konstantan i napon četkica motora M. Spajanjem u jedan rotor nastaje metadinski pretvarač u spoju »osmice« prema slici 34 a. Struja vučnih motora I_{VM} u tom spoju ostaje konstantna u velikom području napona U_{VM} (sl. 34 b).

Impulsno upravljanje. Primjena tiristora omogućuje upuštanje i kočenje bez gubitaka u otpornicima i bez rotacionog pretvarača. Pri impulsnom upravljanju vučni motor sa serijskom uzbudom napaja se dužim ili kraćim impulsima punog napona izvora struje. Na sl. 35 a prikazana je shema za napajanje motora pomoću tiristora. Uzbudni namot motora ima induktivitet L . Tiristorima T_1 T_2 upravlja se iz impulsnog uredaja; kad nema impulsa, kondenzator C se s vremenom nabije na napon U_B naznačenog polariteta. Pri impulsu na tiristor T_1 on počinje propuštati struju



Sl. 35. Impulsna regulacija struje pomoću tiristora. a) Shema regulacije, b) struja i napon pri impulsnoj regulaciji tiristorima

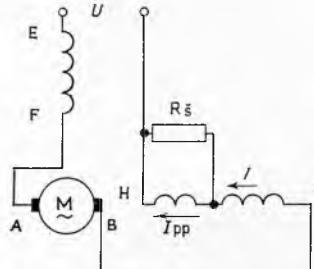
i_M koja je na početku ograničena samo naponom izvora U_B i induktivitetima L i L_1 (sl. 35 b). Kondenzator C se isprazni preko tiristora T_1 , te se preko diode D_1 i induktiviteta L_1 nabije na polaritet suprotan označenom. Kad struja i_M postigne podešeni maksimum, impulsni uredaj daje potreban impuls tiristoru T_2 . Sada se preko njega kondenzator C izbije strujom gašenja i_g . On osim toga trenutno preuzima na sebe svu struju i_M motora, tako da tiristor T_1 ostaje kratko vrijeme bez struje. U tom vremenu je tiristor T_1 zatvoren za struju u suprotnom smjeru. Ako je T_1 dovoljno dugo bez struje, on će prestati biti vodljiv, a struja i_M iz baterije će se prekinuti čim se kondenzator C nabije na napon U_B . U tom momentu i tiristor T_2 prestaje biti vodljiv i čitav tiristorski sklop je spreman za ponovni impuls na tiristor T_1 kad struja i_M vučnog motora padne na podešenu minimalnu vri-

jednost. Pri prekidu struje u tiristorskom sklopu struja motora i_m teče diodom D_2 pod djelovanjem induktiviteta L uzbudnog namota motora. Za vrijeme ubrzavanja motora period T ostaje konstantan, a vrijeme uključenja t_u produžuje se dok motor ne dođe na prirodnu karakteristiku. Ako izvor struje sadrži induktivitet (npr. kontaktni vod), uključuje se paralelno s njim odgovarajući kondenzator. Za kočenje vraćanjem energije u izvor priključuje se tiristorski sklop paralelnom motoru, a sve zajedno se preko diode priključi na izvor energije.

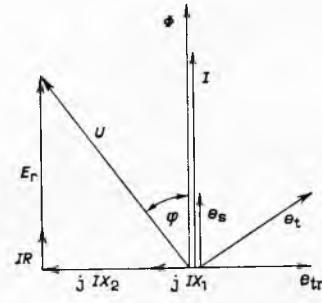
Vozila za izmjeničnu struju

Vučna vozila za izmjeničnu struju priključena su preko pantografa na kontaktnu mrežu izmjeničnog napona. Na ovim se vozilima visoki napon mreže pomoću regulacionog jednofaznog transformatora transformira na niži radni napon koji odgovara vučnim motorima. Tako im se slobodno može birati i regulirati pogonski napon. Vučni motori ovih lokomotiva priključuju se na ovaj napon ili direktno ili preko ispravljača, pa se zato upotrebljavaju ili motori za jednofaznu struju ili motori za ispravljenu struju.

Jednofazni serijski kolektorski vučni motor redovno se upotrebljava na vozilima za izmjeničnu struju snižene frekvencije ($16\frac{2}{3}$ Hz), a samo iznimno za frekvenciju 50 Hz. Jednofazni vučni



Sl. 36. Shema namota jednofaznog serijskog kolektorskog motora. EF glavni polovi, GH pomoćni polovi



Sl. 37. Vektorski dijagram jednofaznog serijskog kolektorskog vučnog motora



Sl. 38. Sporedba glavnih dimenzija triju vučnih motora građenih za različne vrste struje i različite frekvencije. a - 6-polni motor za istosmjernu struju 650 KS, 645 o/min, 4300 kp; b - 10-polni motor za izmjeničnu struju $16\frac{2}{3}$ Hz, 720 KS, 1070 o/min, 2500 kp; c - 18-polni motor za izmjeničnu struju 950 KS, 955 o/min, 4400 kp.

motor (v. *Električni strojevi*) razlikuje se od motora za istosmjernu struju po tome što su mu struja i magnetski tok izmjenične veličine, što mu osim omskih otpora namota dolaze do izražaja i induktivni otpori namota i što se u kratkospojenom svitku rotora pri komutaciji osim napona samoindukcije uslijed mijenjanja smjera momentane vrijednosti struje pojavljuje i napon transformacije što ga inducira izmjenični tok glavnih polova. Radi smanjivanja ukupnog induktivnog otpora ovaj motor uvijek ima kompenzacioni namot, a zbog ograničenosti napona transformacije broj polova ovog stroja relativno je velik. Na sl. 36 prikazana je shema spoja namota tog motora, a na sl. 37 njegov vektorski dijagram. Narinuti napon U dobiven iz regulacionog transformatora troši se na padove napona na induktivnim (jIX_1 i jIX_2) i djelećim otporima (JR) stroja, kao i na savladavanje protuelektromotorne sile E_r u armaturi. X_1 je induktivni otpor rasipanja namota rotora i kompenzacione namota. On je mnogo manji od induktivnog otpora glavnih i pomoćnih polova X_2 . U kratkospojeni svitak koji komutira treba inducirati napon e_t koji je jednak vektorskom zbroju napona samoindukcije e_s i napona transformacije e_{tr} . To se pri određenoj brzini vrtnje i pripadnoj veličini struje može postići u polju pomoćnih polova time što se paralelno namotu pomoćnih

polova priključi omski otpor R_g . Zbog pretežno induktivnog otpora tog namota struja u toj grani zaostajat će približno za $\pi/2$ iza struje u grani sa čistim omskim otporom.

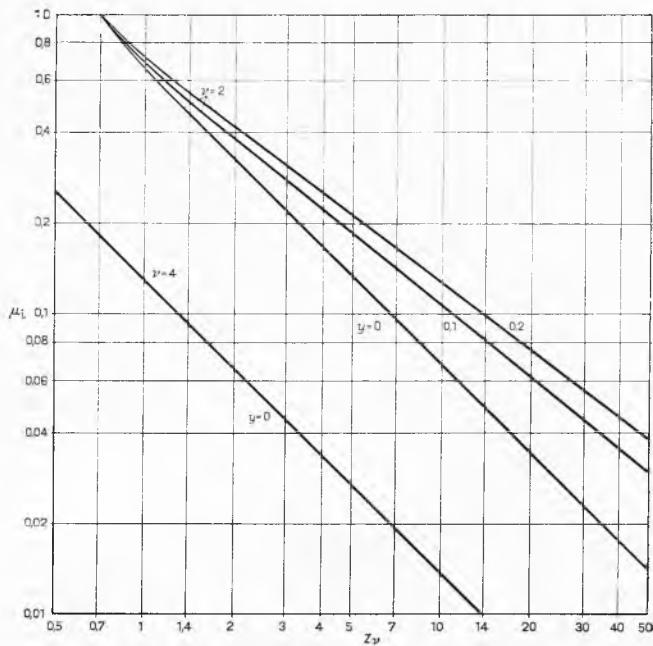
Kako napon transformacije pri nazivnom toku treba ograničiti na $\sim 2,5\cdots 4,5$ V, to i broj polova i promjer ovih motora raste sa snagom i frekvencijom. Na sl. 38 prikazane su radi usporedbe glavne dimenzije triju vučnih motora sa sličnim zakretnim momentima. Prvi (sl. 38 a) predviđen je za istosmjerni napon 1500/2 V, a ostala dva za izmjenični napon, i to drugi (sl. 38 b) za frekvenciju $16\frac{2}{3}$ Hz, a treći (sl. 38 c) za frekvenciju 50 Hz. Zbog ograničenja napona transformacije u kratko spojenom svitku, ograničene obodne brzine kolektora i minimalne neophodne debline kolektorskih lamela, napon rotacije, a time i ukupni napon ovih motora, ne može biti veći od ~ 200 V za frekvenciju mreže 50 Hz, odnosno

~ 600 V za $16\frac{2}{3}$ Hz. Zato ovim motorima s porastom snage brzo raste i struja. Uslijed prisustva omskog šanta stupanj korisnosti ovih motora nešto je manji nego istosmjernih motora.

Vučni motor za ispravljenu struju je motor koji se napaja strujom iz ispravljača. Ovi motori se sve više primjenjuju jer objedinjuju prednosti jednofaznih serijskih kolektorskih motora, kojima se napon po volji može mijenjati pomoću transformatora, i motora za »čistu« istosmjernu struju, koji nemaju problema komutacije zbog napona transformacije u kratkospojenom svitku. Ovi se motori napajaju ispravljenim jednofaznim izmjeničnim naponom koji osim istosmrjene komponente sadrži i velik broj takih harmonika. Tako npr. za frekvenciju 50 Hz u kontaktnoj mreži i kut komutacije $\alpha = 15^\circ$ iznose tjemene vrijednosti harmonika napona izražene u dijelovima istosmrjene komponente U : $U_{100} = 0,7 U$, $U_{200} = 0,17 U$, $U_{300} = 0,08 U$ itd., gdje indeksi 100, 200, 300 itd. označuju drugi, četvrti, šesti itd. harmonik frekvencije 100, 200 itd. herca. Valovitost struje je omjer tjemene vrijednosti harmonika prema srednjoj vrijednosti struje

$$\mu_i = \frac{i_{\max} - i_{\min}}{i_{\max} + i_{\min}}.$$

Motori za pogon ispravljenom strujom grade se načelno u dvije izvedbe i to ili kao motori za valovitu struju ili kao motori za valoviti napon. Osnovna je razlika između ove dvije vrste u tome što se motori za valovitu struju napajaju strujom čiji su harmonici pomoću posebne prigušnice smanjeni na potrebnu mjeru.



Sl. 40. Ovisnost valovitosti struje o induktivitetima

Motori za valoviti napon priključuju se izravno na ispravljač bez uvrštanja prigušnice, tj. izravno na pulzirajući napon, te su građeni za veće harmonike struje. Radi suzbijanja utjecaja valovitosti namoti takvih motora moraju imati veći induktivitet, a osim toga preduzimaju se još i neke druge mjere.

Vučni motor za valovitu struju izvodi se za valovitost struje $\sim 20\cdots 30\%$ i primjenjuje mnogo češće od motora za valoviti napon. Potreban induktivitet radi ograničavanja valovitosti odvojen je od vučnog motora u obliku posebne prigušnice. Na slići 39 prikazana je nadomjesna shema ispravljačkog mosta, u kojoj su u L_1 skupljeni svi induktiviteti mreže uključivo induktivitet lokomotivskog regulacionog transformatora, a u L_{II} svi induktiviteti vučnog motora i katodne prigušnice.

Na sl. 40 prikazana je valovitost struje μ_1 za različite induktivitete mreže i katodne prigušnice za prva dva tāka harmonika ($v = 2$ i $v = 4$). Kao apscisa nanesen je omjer induktivnog otpora $v \omega L_{II}$ za određeni harmonik i otpora tereta U_m/I_m , tj. kvocijenta istosmjernog nazivnog napona U_m i nazivne struje I_m motora:

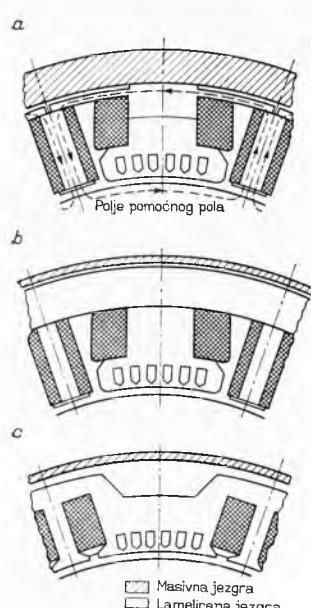
$$Z_v = \frac{v \omega L_{II}}{U_m/I_m}.$$

Induktivitet mreže L_1 izražen je relativno, u odnosu na L_{II} , tj. kao omjer $y = L_1/L_{II}$. Za krutu mrežu je $y = 0$.

U nastavku su navedene posljedice valovitosti struje motora. Povećava se zagrijavanje vodiča jer je efektivna vrijednost struje veća nego pri »čistoj« istosmjernoj komponenti struje:

$$I_{ef} = \sqrt{1 + \frac{\mu^2}{2}} \cdot I_{sr}$$

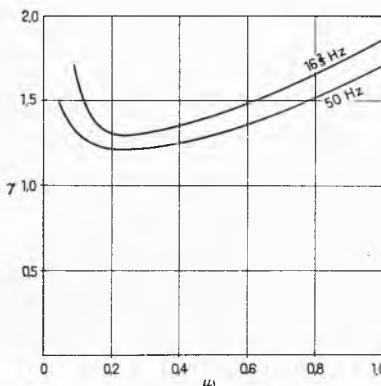
i jer se pojavljuje skin-efekt. Uslijed harmonika magnetskih tokova glavnih i pomoćnih polova u masivnim dijelovima jarma nastaju vrtložne struje zbog kojih se jarmovi zagrijavaju, pa treba povećati presjeke jarmova i jezgre polova ako se želi izbjegići zasićenje. Ti tokovi zaostaju u fazi za njihovim uzbudnim strujama i manji su nego što bi bili bez utjecaja vrtložne struje. U kratko spojenom svitku kolektora koji upravo komutira nastaje napon transformacije, koji je proporcionalan izmjeničnoj komponenti magnetskog toka glavnog pola i frekvenciji mreže. Povećava se maksimalni napon među susjednim lamelama za faktor $(1 + \mu_{12})$. Počinje se napon greške pri komutaciji, tj. razlika između naponu koji se u kratkospojenom zavodu pri komutaciji inducira uslijed polja pomoćnog pola i naponu potrebnog za idealnu komutaciju (po pravcu).



Sl. 42. Izvedbe motora za ispravljenu struju. a) Masivni jaram statora i posebne lamelirane jezgre za polove, b) lamelirani jaram s posebnim lameliranim polnim jezgrama, c) zajednički rez za jaram i jezgru lameliranog statora

Komponente, tako da se smanjuju: pulzacija glavnog polja na $0,5 \cdots 1\%$, vrtložne struje u jarmu statora na malu mjeru i

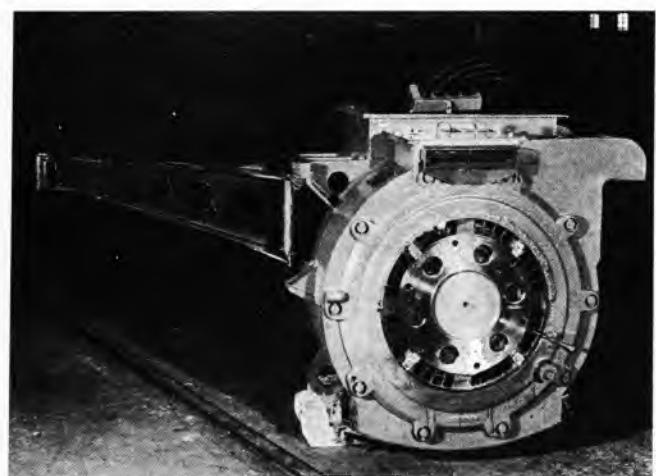
transformatorski napon komutacije na poželjnju veličinu. Ostatak harmonika glavnog polja s harmonicima struje daje zanemarljive harmonike zakretnog momenta. Lameliraju se jezgre pomoćnih polova i dio ili čitav presjek statora (sl. 42).



Sl. 43. Omjer težina γ motora za valovitu struju i istosmjernog motora istih svojstava u ovisnosti o faktoru valovitosti μ_1

Na sl. 43 prikazan je omjer težine motora za valovitu struju (zajedno s odgovarajućom prigušnicom) prema težini istosmjernog motora iste snage i istih ostalih svojstava, a u ovisnosti o faktoru valovitosti μ_1 .

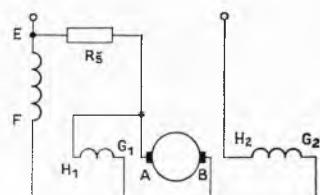
Na sl. 44 prikazan je takav lokomotivski vučni motor za satnu snagu 900 kW, koji s uređajem za konstantni napon ima satnu snagu 1020 kW. Uredaj za konstantni napon automatski sprečava povećanje napona na motoru iznad nazivnog ako se napon mreže naglo poveća.



Sl. 44. Vučni motor za valovitu struju satne snage po IEC 900 kW pri 1085 o/min i 770 V (ASEA)

Vučni motori za valoviti napon imaju uvijek potpuno lameliran čitav stator, tako da im induktivitet glavnih i pomoćnih polova dolazi potpuno do izražaja. Pri ovim motorima dopušta se relativno velika valovitost struje ($0,5$ i više). Zbog toga nastaje u kratkospojenom svitku relativno velik napon transformacije e_{tr} ; pri maksimalnom pogonskom naponu on postiže i 4 V. Napon transformacije u motorima za ispravljenu struju (drukčije nego kod motora za izmjeničnu struju) pri malim brzinama, odn. pogonskim naponima, iznosi svega ~ 1 V. Napon greške pri komutaciji ne prelazi $1,5$ V.

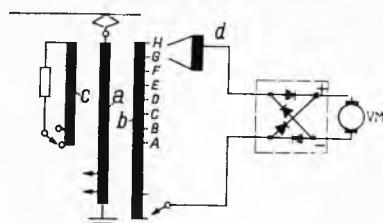
Motori za valoviti napon imaju omski šant R_s koji obuhvaća i pomoćne polove GH i



Sl. 45. Shema namota motora za valoviti napon. EF Namot glavnih polova, GH namoti pomoćnih polova, R_s šant

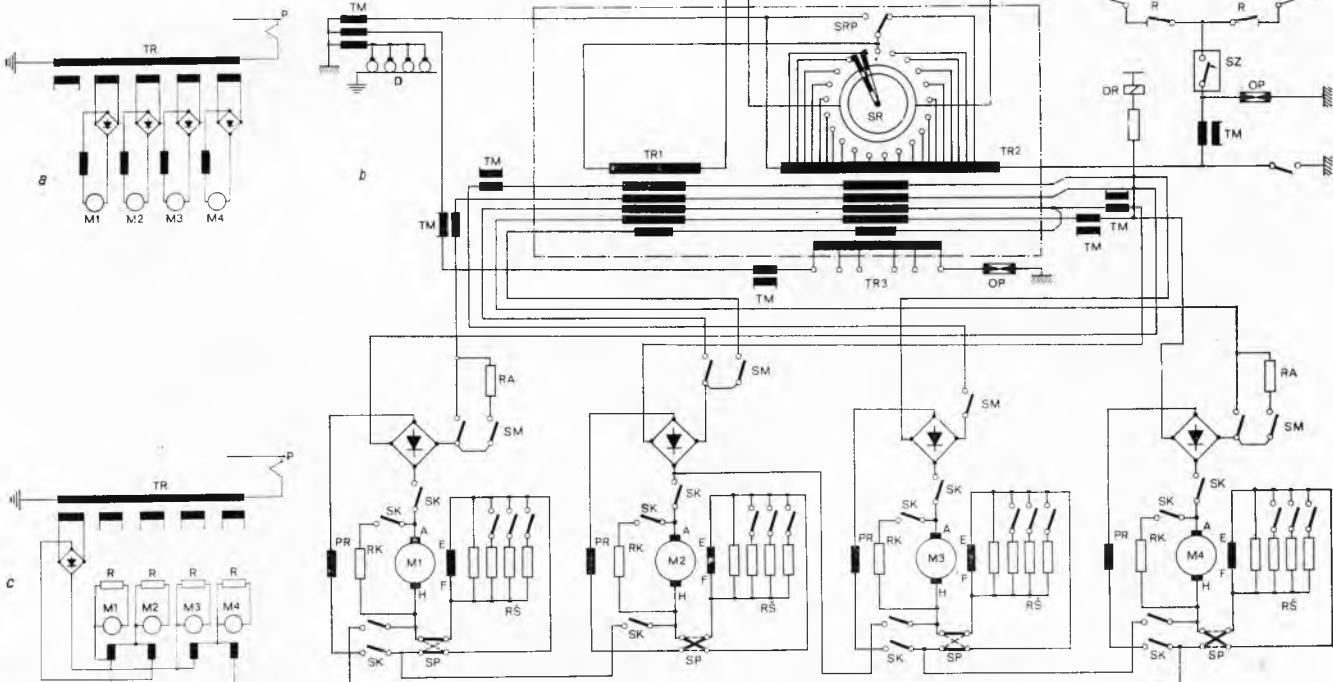
glavne polove EF (sl. 45), čime se postiže povoljna kompenzacija transformatorskog napona za sve harmonike do 500 Hz. Uslijed relativno velikog otpora omskog šanta, harmonici glavnog magnetskog toka malo se prigušuju. Budući da su ovi harmonici u fazi s harmonicima struje, oni zajedno daju dodatan pulsirajući zakretni moment, koji pri nazivnoj snazi i $16\frac{2}{3}$ Hz iznosi npr. ~4,5% a pri maksimalnoj brzini može iznositi i 10% ukupnog momenta. Primjena ovih motora rentabilna je samo ako treba da rade i sa $16\frac{2}{3}$ i sa 50 Hz, jer bi potrebna prigušnica za $16\frac{2}{3}$ Hz bila preteška.

Regulacija napona vučnih motora provodi se u elektromotornim vozilima za izmjeničnu struju transformatorom s promjenljivim omjerom prijenosa. To se postiže nizom otcjeipa na strani visokog ili niskog napona (sl. 46). Za male snage upotrebljavaju se normalni transformatori, a priključivanje na otcjepe sekundara vrši se elektropneumatskim sklopnicima. Za velike snage sekundarna je struja transformatora vrlo velika (npr. za 3000 kW i 500 V struja iznosi 6000 A!) pa se preklapanje vrši

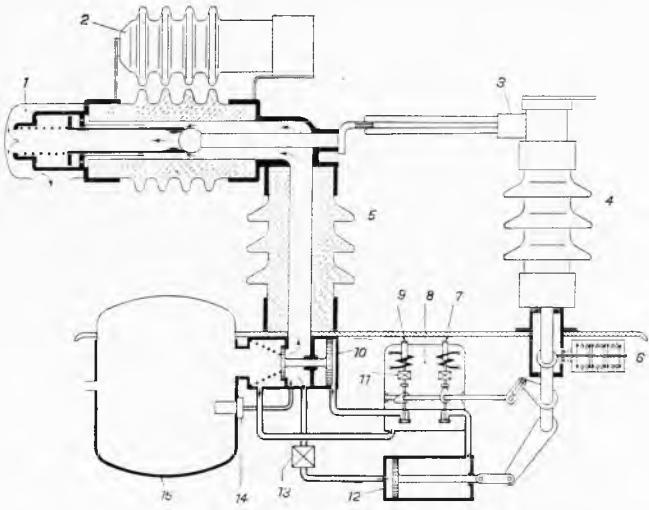


Sl. 46. Principijelna shema priključka vučnog motora za valoviti napon VM na kontaktni vod izmjenične struje $16\frac{2}{3}$ Hz ili 50 Hz preko regulacionog transformatora s otcjeipima na strani niskog napona. *a* Primarni namot za priključak na visoki napon, *b* sekundarni namot, *c* namot za napajanje ostalih pomoćnih pogona, *d* preklopna prigušnica

na strani visokog napona. Na sl. 47 b prikazana je takva shema regulacije napona na strani visokog napona. Transformator se sastoji od autotransformatora TR2 s otcjeipima i od tzv. vučnog transformatora TR1 sa stalnim omjerom prenosa. Transformator prema ovoj shemi razlikuje se od uobičajenih izvedbi po tome



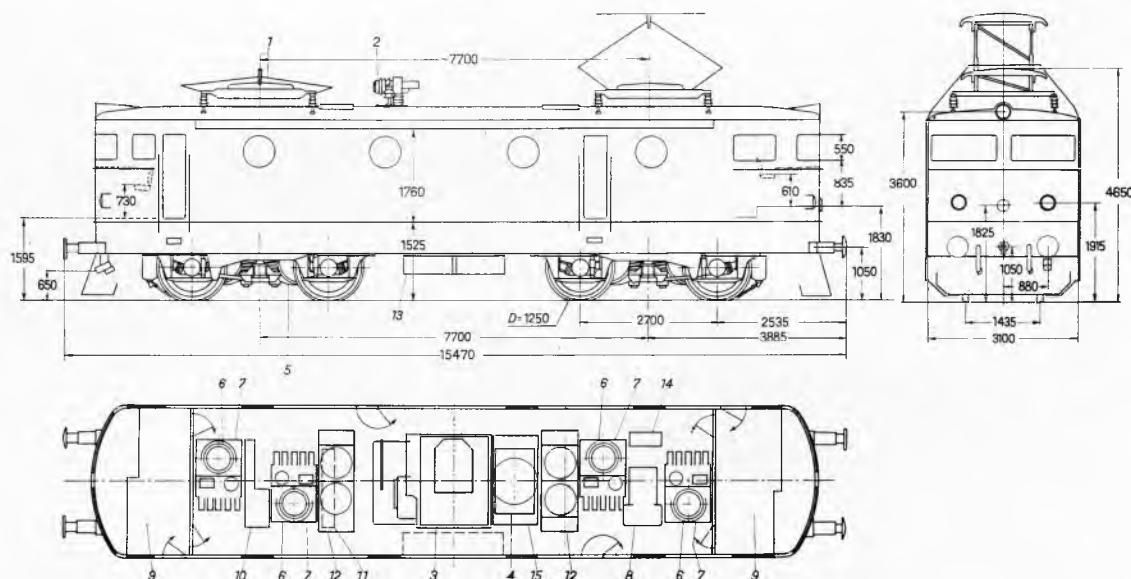
Sl. 47. Shema vučnih strujnih krugova jednofazne ispravljačke lokomotive JŽ serije 441 (ASEA). *a* Gruba principijelna shema pri vuči, *b* nešto detaljnija shema, *c* gruba principijelna shema pri kočenju. P pantograf, SZ zaštitni prekidač 25 kV, OP odvodnik prenapona; TR namot regulacionog transformatora: *I* s nepromjenljivim omjerom prijenosa, *2* s promjenljivim omjerom prijenosa, *3* za pomoće pogone; TM transformatori za mjerjenje i zaštitu, D dozmi kontakti, DR dozemni relj, SR regulaciona sklopka, SRP preklopka regulacione sklopke, SP preklopka za smjer vožnje, SK preklopka za vuču i kočenje, M1-M4 vučni motori, RK otpornici za kočenje, RS otpornici za šantiranje, RA otpornici za kompenzaciju rasterećenja prve osovine, PR prigušnica



Sl. 48. Lokomotivski prekidač 25 kV, 400 A, 250 MVA proizvod BBC. *1* Komora za gašenje luka, *2* otpornik, *3* rastavljač, *4* nosivi izolator raspravljača, *5* nosivi izolator komore, *6* signalni kontakt, *7* ventil za uključivanje prekidača, *8* blok za upravljanje, *9* ventil za isklapanje prekidača, *10* glavni ventil, *11* opruga *12* pogon rastavljača, *13* zatezni ventil, *14* patrona za prolaz zraka, *15* rezervoar za zrak

što je ovdje sekundarni namot razdijeljen u dvije polovice od kojih se jedna nalazi na jezgri autotransformatora TR2 i tu se u njemu inducira konstantni napon, a druga se nalazi na jezgri vučnog transformatora TR1 i ova se napaja reguliranim naponom pomoću regulacione sklopke SR i preklopke SRP. Ovim se spojem postiže da se pri malim naponima inducirani naponi u objema polovicama sekundarnog namota jedan od drugog odbijaju (preklopka SRP u položaju prema slici), a pri višim naponima (kad se SRP preklopí) jedan i drugi zbrajaju. Ovaj spoj osim toga omogućuje bolje iskorištenje namota transformatora pa on time postaje lakši.

Ostala oprema vozila za izmjeničnu struju. Aparati koji su navedeni u opisu opreme za istosmjerna motorna vozila upotrebljavaju se i na vozilima za izmjeničnu struju s time što



Sl. 49. Mjerna skica i raspored opreme u električnoj lokomotivi JŽ serije 441. 1 Pantograf, 2 prekidač visokog napona, 3 regulacioni transformator, 4 hladniak za ulje, 5 vučni motor, 6 silicijski ispravljač, 7 ventilator i aparati za 5, 8 kompresor, 9 vozačka kabina, 10 stalak s aparatima, 11 kondenzator za pomoćnu fazu, 12 kočni otpornik, 13 baterija, 14 stalak s opremom za komprimirani zrak, 15 katodna prigušnica

su oni u tom slučaju prilagođeni izmjeničnoj struji ukoliko ona protjeće tim aparatima ili njihovim dijelovima.

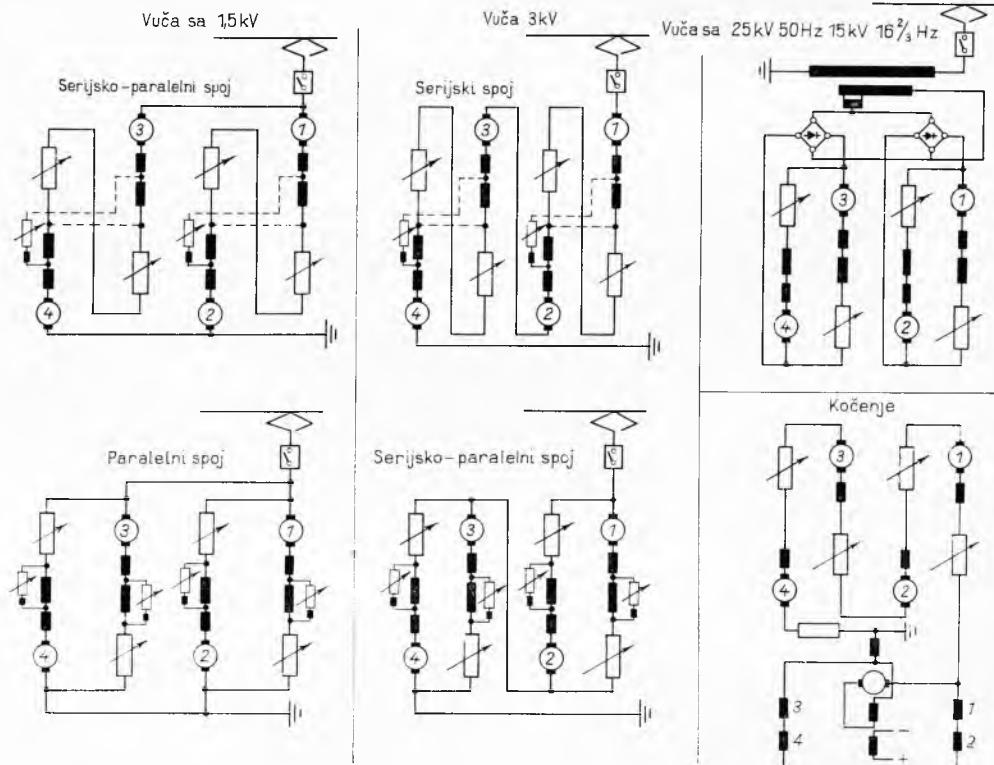
U sl. 47 b prikazana je električna shema vučnih strujnih krugova jednofazne ispravljačke lokomotive JŽ serije 441 za pogonski napon 25 000 V, 50 Hz. Struja se preko pantografa P i rastavljača R dovodi na zaštitni prekidač visokog napona SZ u kome se prilikom prekidanja strujnog kruga električki luk gasi mlazom komprimiranog zraka. (Na sl. 48 vidi se takav prekidač u presjeku). Visoki napon priključen je na regulacijski transformator TR iz kojeg se preko ispravljačkih uredaja napajaju sva četiri motora. Motori imaju po jedan stalni šant i tri dodatna šanta radi daljnog slabljenja uzbude. Pri velikim strujama pokretanja može se vučna sila prvog ili četvrtog motora smanjiti pomoću predtopora RA da bi se prilagodila smanjenom osovinskom pritisku. Pojava klizanja pojedinih osovina kontrolira se diferencijalnim relejem. Za promjenu smjera vožnje predviđena je preklopka SP kojom se mijenja smjer struje u uzbudnom namotu. Za mjerjenje struja i za zaštitu motora i transformatora predviđeni su mjeri transformatori TM. Na sl. 47 a data je principijelna shema spoja pri vuči, a na sl. 47 c shema spoja pri električnom otpornom kočenju. Pri kočenju se uzbudni namoti vučnih motora napajaju iz jednog ispravljačkog mosta, a svaki motor koči radeci kao generator na svoj kočni otpornik. U sl. 49 prikazana je mjerena skica lokomotive s rasporedom električne opreme u njoj.

Elektromotorna vozila sa više sistema

U Evropi su se zadržala 4 glavna sistema elektrifikacije željeznica: istosmjerni sistemi s naponima 1500 i 3000 V i izmjenični sistemi sa 15 kV, $16\frac{2}{3}$ Hz i 25 kV, 50 Hz. U borbi za modernizaciju željeznica, radi skraćivanja manipulacija i smanjivanja broja potrebnih lokomotiva, upotrebljavaju se na međunarodnim linijama 2-, 3- i 4-sistemske lokomotive i elektromotorni vlakovi koji se mogu uz odgovarajuće prespajanje upotrijebiti za vuču s raznim sistemima. Pri tome se pojavljuje velik broj kombinacija s obzirom na potrebnu rasploživu snagu pri pojedinim sistemima. Željezničke uprave s različitim sistemima imaju većinom još i različite širine pantografa, tako da lokomotiva za 4 sistema ima obično i 4 različita pantografa.

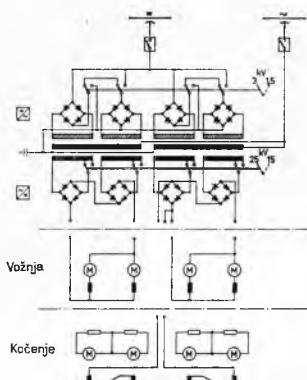
Na sl. 50 prikazane su principijelne sheme spojeva švicarskih 4-sistemskih elektromotornih vlakova, tzv. Trans-Europa-ekspreza. Na ovim se elektromotornim kolima primjenjuju isti četveropolni statorom i istim otpornicima za pokretanje za svu četiri evropsku sistem elektrifikacije. Pri priključku na istosmjerni sisteme vrši se pri pokretanju preklapanje sa serijskog na serijsko-paralelni, odnosno paralelni spoj, mijenjanje otpora otpornika za pokretanje i mijenjanje uzbude pomoću šantova. Pri pogonu izmjeničnom strujom motori se pogone ispravljenim naponom. Napon vučnih motora regulira se pri izmjeničnom napajanju u 12 otpornih stepena i pomoći 15 otjecja na sekundarnom narmotu transformatora. Pri električnom otpornom kočenju primjenjuju se za kočenje isti otpornici kao i za pokretanje, a uzbudni namoti vučnih motora napajaju se iz posebnog motor-generatora.

Cetverosistemske lokomotive francuskih željeznica CC 40101 do 4 (ALSTHOM) riješene su slično ali s dvostrukim motorima (sa 2 rotora na 1 osovini) za 3 kV i s pokretanjem putem otpornika u svim sistemima. Njemačke željeznice u lokomotivama serije 410 imaju jedno rješenje takoder s otpornicima (BBC), a drugo predviđa za sva 4 sistema napajanje vučnih motora preko transformatora

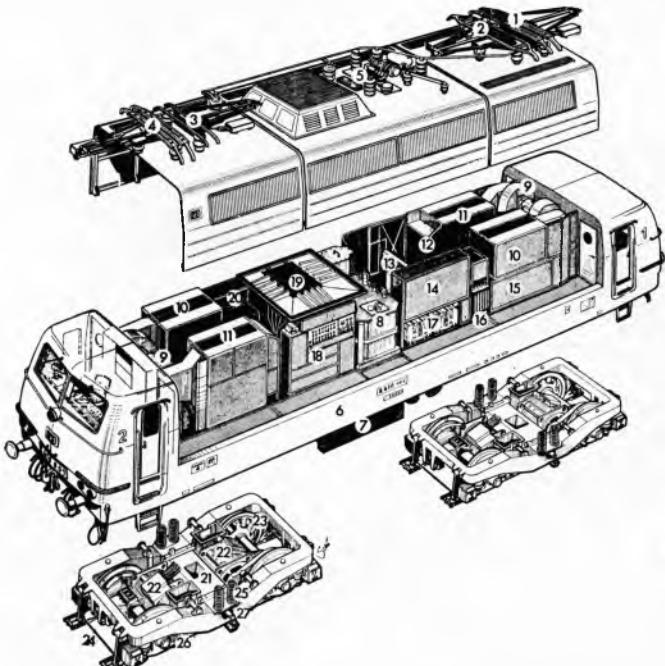


Sl. 50. Principijelne sheme spojeva za vuču i kočenje švicarskih 4-sistemskih elektromotornih vlakova Trans-Europa ekspreza, proizvod M. F. Oerlikon

i ispravljača, a transformator se pri istosmernim sistemima napaja preko tiraških presmjerivača (AEG). Na sl. 51 prikazana je takva shema spoja, a na sl. 52 raspored opreme u takvoj lokomotivi.



Sl. 51. Električna principijelna shema 4-sistemske lokomotive njemačkih saveznih željeznica, serije E 410, proizvod AEG



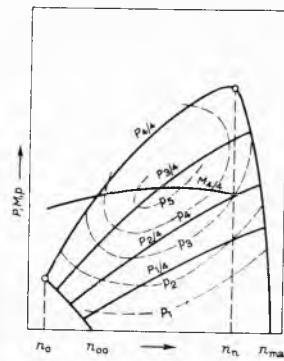
Sl. 52. Raspored opreme u 4-sistemskoj lokomotivi E 410 — AEG. 1-4 Pantografi za vučne sisteme željeznica NS/SNCB, DB/ÖBB, SNCF i NS/SNCB; 5 prekidač za izmjenični strujni, 6 postolji s upravljačnicama, 7 baterija, 8 glavni transformator, 9 ventilator, 10 ispravljač, 11 presmjerivač, 12 kondenzatori za presmjerivač, 13 prekidač za istosmernu struju, 14 aparati za visoki napon, 15 aparati za slabljenje uzbude, 16 prigušnica za presmjerivač, 17 katodne prigušnice, 18 stalak s aparatom, 19 kočni otpornik i hladnjak za ulje, 20 aparati za komprimirani zrak, 21 okretna postolja, 22 vučni motori, 23 kolski slog s pogonom, 24 kočno polužje, 25 oslon (lokomotivskog sanduka), 26 gibanjevi, 27 amortizer (prigušivač)

Dizelelektrična motorna vozila

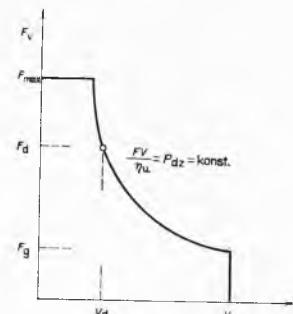
U dizelelektričnim motornim vozilima dizelski motor kao izvor snage (prvotni motor) pogoni generator, a ovaj napaja vučne motore. Dizelski se motor vrti konstantnom brzinom u području najpovoljnijeg rada, a napon i struja generatorka i motora mijenjaju se tako da se raspoloživa snaga dizelskog motora prenosi na pogonske osovine vozila u širokom području brzina vozila. Električni prenos snage sa dizelskog motora na pogonske osovine teži je i skuplji od drugih prenosa, ali radi s najmanje gubitaka i najviše štedi dizelski motor, pa se zato najviše upotrebljava pri vozilima velike snage.

Dizelski motor kao izvor energije ovih autonomnih vozila (v. Motori s unutrašnjim sagorijevanjem) može svoju punu snagu davati samo pri punoj, tj. nazivnoj brzini vrtnje n_n ; on je stroj s približno konstantnim zakretnim momentom M za određena punjenja, tj. za određenu dobavu goriva.

Na sl. 53 prikazana je pogonska karakteristika dizelskog motora, tj. ovisnost njegove snage P i njegova zakretnog momenta M od brzine vrtnje n pri 1/4, 2/4, 3/4 i 4/4 nazivnog punjenja. Dizelski motor može davati maksimalno samo nazivnu snagu, a ako se preoptereti, smanjit će mu se brzina vrtnje i snaga. Na sl. 53 ucrtane su i krivulje konstantne specifične potrošnje goriva $p_1 \dots p_5$ u kilogramima po konjskoj snazi i satu (kg/KS h). Pomoću njih može se za svaku potrebnu snagu odabratи najpovoljnija brzina vrtnje n koja daje najmanji potrošak goriva. Konstantna snaga P_{dz} dizelskog motora ispoljuje se na obodu točkova pogonskih osovina kao konstantni umnožak vučne sile F_v i brzine V . Prema tome pri malim brzinama vozila treba razvijati velike vučne sile F , a pri velikim brzinama odgovarajuće manje vučne sile, kako je to prikazano u sl. 54. η_u je ukupni stupanj korisnosti elektročićnog prijenosa. Vanjska karakteristika generatora prema



Sl. 53. Karakteristike dizelskog pogonskog motora



Sl. 54. Ovisnost vučne sile dizel-električne lokomotive o brzini

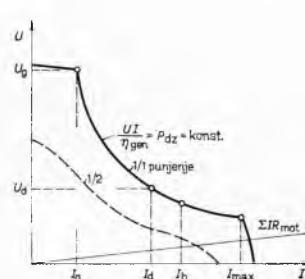
tome također mora odgovarati konstantnoj snazi dizelskog motora (sl. 55), tj. približno hiperboli

$$P_{el} = U I = P_{dz} \eta_{gen},$$

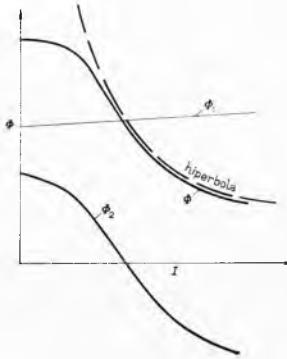
gdje P_{el} znači snagu glavnog generatora, P_{dz} snagu dizelskog motora, η_{gen} njegov stupanj korisnosti.

Dimenziije glavnog generatora određene su njegovim karakterističnim trajnim režimima rada (sl. 55). *Gornji trajni režim* određen je najvišim naponom U_g koji generator može trajno davati uz struju I_g koja odgovara nazivnoj snazi dizelskog motora P_{dz} . *Donji trajni režim* određen je najjačom strujom I_d koju generator može trajno davati uz napon U_d , koji opet odgovara snazi dizelskog motora P_{dz} . Osim ovih režima obično se daju i satna struja I_h koju generator može davati kroz 1 sat i maksimalna kratkotrajna struja I_{max} pri kojoj komutacija još zadovoljava. Budući da generator mora biti dimenzioniran i za gornji napon U_g i za donju struju I_d , njegova je dimenziona (tipska) snaga P_{dim} određena umnoškom ovih veličina $P_{dim} = U_g I_d$. Strujama i naponima gornjeg i donjeg trajnog režima odgovaraju i pripadne vučne sile i brzine u karakteristici vozila (sl. 54).

Vučni motori su istosmerni serijski motori kojima je zakretni moment funkcija struje, a brzina uz određenu struju funkcija naponu.



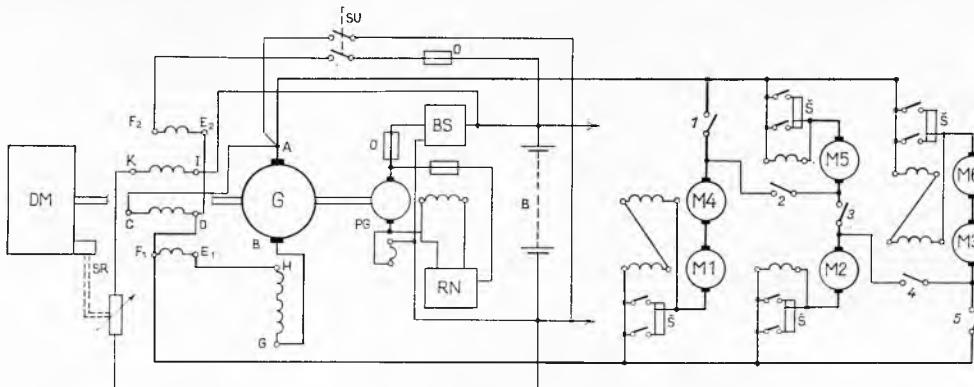
Sl. 55. Vanjska karakteristika dizelskog generatora U_g i I_g napon i struja generatorka pri gornjem trajnom režimu rada, U_d i I_d napon i struja pri donjem trajnom režimu rada



Sl. 56. Regulacija snage karakteristikom (WEMCO i G.E.)

ELEKTRIČNA VUČA

Regulacija električnog prijenosa je regulacija uzbude generatora u ovisnosti o struci ili o brzini vrtnje dizelskog aggregata, sa zadatkom da se snaga ili brzina vrtnje dizelskog motora održi konstantnom u nekom odabranom stepenu.



Sl. 57. Shema spoja dizel-električne lokomotive GM. DM dizelski motor, G generator, PG pomoći generator, B baterija M1 : M6 vučni motori, 1...5 sklopniči, SR servoregulator, SU sklopnik za upuštanje, BS baterijska sklopka, RN regulator napon, Š šant za slabljenje uzbude, O osigurači

Sistemi regulacije karakteristikom sadrže na generatoru ili pomoćnim strojevima takve namote da se vanjska karakteristika generatora što više približi hiperboli. Najjednostavnija realizacija ovog sistema je spoj zvan *Gebusov spoj*, pri kojem generator sa serijskim uzbudnim namotom radi na granici samouzbudne brzine vrtnje i tako ima napon jako promjenljiv u ovisnosti o brzini vrtnje dizelskog motora. Budući da je tu prijenos snage jako ovisan o temperaturi namota i o histerezi, a generator mora ostati slabo zasićen, ovaj se prijenos upotrebljava samo za male snage. Najrašireniji sistem regulacije karakteristikom koristi se u uzbudniku generatora, pomoću dva uzbudna namota, kombinacijom dvaju magnetskih tokova (sl. 56), od kojih je jedan (Φ_1), veći i konstantan ili nešto kompaundiran, a drugom (Φ_2), manjem toku uzbuda je jako ovisna o struci generatora, te se od zasićenja u jednom smjeru (pri malim strujama) mijenja do zasićenja u suprotnom smjeru (pri velikim strujama). Napon tog uzbudnika dobiva se djelovanjem zbroja ovih tokova. Uzbudnik se izvodi s podijeljenim, cijepanim i nejednolikim polovima. Prema sistemu Westinghouse primjenjuje se npr. 6-polni uzbudnik s valovitim namotom rotora. Skoro konstantna uzbudba u 4 pola daje tok Φ_1 a u ostala 2 pola za tok Φ_2 postoji uz $I = 0$ temeljna uzbuda protiv koje uz $I \neq 0$ djeluje jaka protukompaundacija uslijed struje I generatora. Napon na četkicama uzbudnika inducira zbroj ovih tokova i on daje glavnom generatoru uzbudu koja omogućuje hiperboli sličnu vanjsku karakteristiku u jednom području struja.

Za veće snage upotrebljava se kombinacija poredne, protukompaundne i strane uzbude ili u samom generatoru ili u uzbudniku ili pak opisani sistem regulacije karakteristikom pomoću cijepanih polova, ali sve u kombinaciji s vanjskim regulatorom snage koji u ovisnosti o odabranoj brzini vrtnje dizelskog motora regulira jednu od uzbuda glavnog generatora. Na sl. 57 prikazana

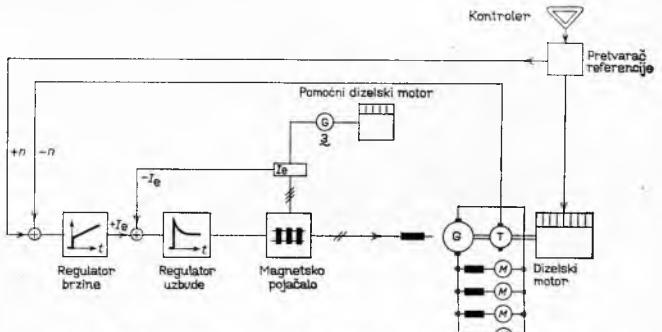
je pojednostavnjena shema spoja General Motors za 6-osovinsku lokomotivu C₀'C₀'. Iz upravljačnice se dizelskom motoru odredi punjenje, a ovome odgovara i određena brzina vrtnje. Poseban regulator brzine posredstvom uljnog servomotora SR po-dešava dodatnu uzbudu IK generatora G i tako zakretnim momentom generatora »drži« dizelski motor na odabranu brzinu.

Pokretanje dizelskog motora vrši se uklapanjem sklopnika SU, čime se glavni generator G priključuje na bateriju B u spolu kao motor sa serijskom uzbudom, pri čemu namot za pokretanje E₂F₂ i protukompaundni namot E₁F₁ rade kao serijski uzbudni namoti motora. RN je regulator napona pomoćnog generatora PG a BS baterijska sklopka. O su osigurači. Pri malim brzinama spojena su po tri vučna motora M u seriju, a pri većim brzinama po dva

u seriju u tri paralelne grane, svi uz dva stepena šantiranja otporima Š.

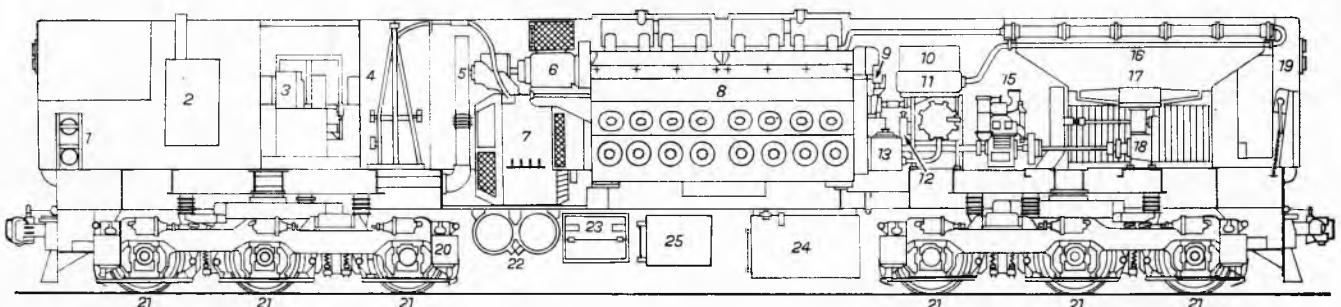
Na sl. 58 prikazan je raspored opreme u lokomotivi serije 661 Jugoslavenskih željeznica.

Regulacija uzbude električnim pojačalom prikazana je na sl. 59. Blokshema prikazuje regulaciju uzbudnog glavnog generatora na lokomotivi firme Siemens A. G. snage 2000 KS. Lokomotiva

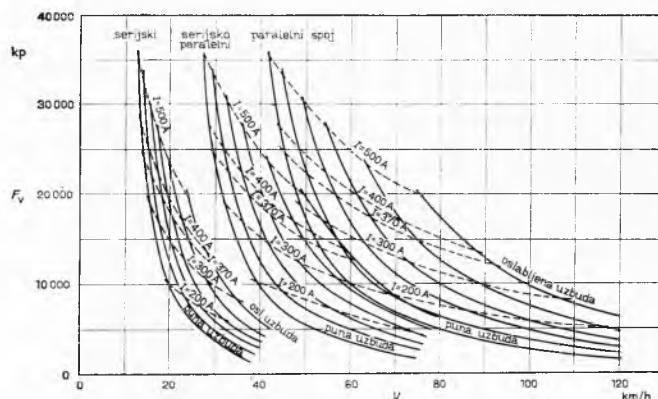


Sl. 59. Blokshema lokomotive 2000 KS tvornice Siemens AG

ima pomoći dizelski agregat iz koga se napajaju magnetska pojačala (i drugi pomoći pogoni). Strojovoda kontrolerom po-dešava tlak zraka (od 0 do 5,5 kp/cm²) u upravljačkom vodu. Pomoći pretvarač referencije za svaki se tlak zraka dobiva odgovarajući tlak ulja u servomotoru, odnosno odgovarajuće punjenje dizelskog motora i odgovarajući referentni (poredbeni) napon koji će služiti za regulaciju brzine vrtnje. U regulatoru brzine ovaj se napon uspoređuje s naponom tahogeneratora T koji daje napon proporcionalan brzini vrtnje i nakon djelovanja povratne



Sl. 58. Raspored opreme lokomotive GM model G-16 (JŽ-661). 1 Oprema zračne kočnice, 2 generator pare, 3 komandni stol vozača, 4 ormari električne opreme, 5 ventilatori vučnih motora, 6 pomoći generator, 7 glavni generator, 8 dizelski motor, 9 regulator, 10 rezervoar vode za hlađenje dizelskog motora, 11 hladnjak za ulje, 12 filter za gorivo, 13 procjeđivač ulja, 14 filter za ulje, 15 kompresor, 16 hlađnjaci vode dizelskog motora, 17 ventilator hlađnjaka, 18 uređaj za povećanje brzine ventilatora, 19 ručna kočnica, 20 pjeskara, 21 pogonske osovine, 22 glavni rezervoari za komprimirani zrak, 23 sanduk akumulatorske baterije, 24 rezervoar za gorivo, 25 rezervoar za vodu



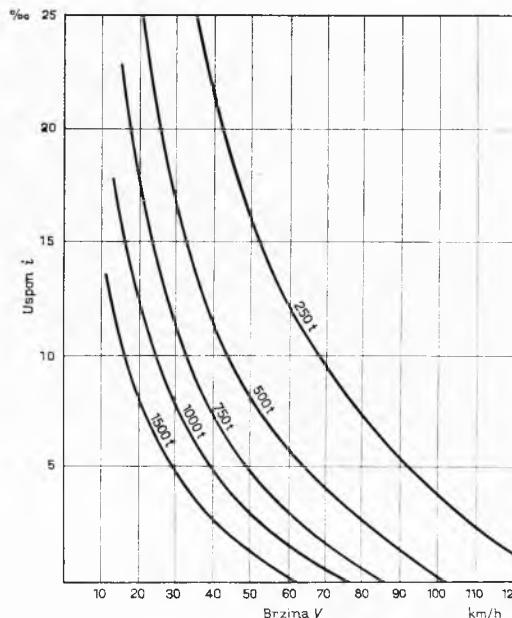
Sl. 60. Karakteristika vučne sile električne lokomotive JŽ serije 362 za istosmjerni napon 3150 kW (ASGEN)

veze — I_e razlika signala $+n$ i $-n$ se u magnetskom pojačalu pretvara u uzbudnu struju koja zakretni moment generatora G podešava tako da on drži dizelski motor na brzini $+n$.

Karakteristike elektromotornih vozila

Karakteristike vučnih sila su dijagrami koji prikazuju vučne sile elektromotornih vozila, mjerene na obodu točka, kao funkciju brzine. Na sl. 60 prikazana je karakteristika vučnih sila električne lokomotive za istosmjernu struju JŽ serije 362, 3000 V, 3150 kW, 1 sat.). Na slici dati su podaci samo za stepene u kojima su isključeni predotpori, tj. za tzv. ekonomski stepene vuče.

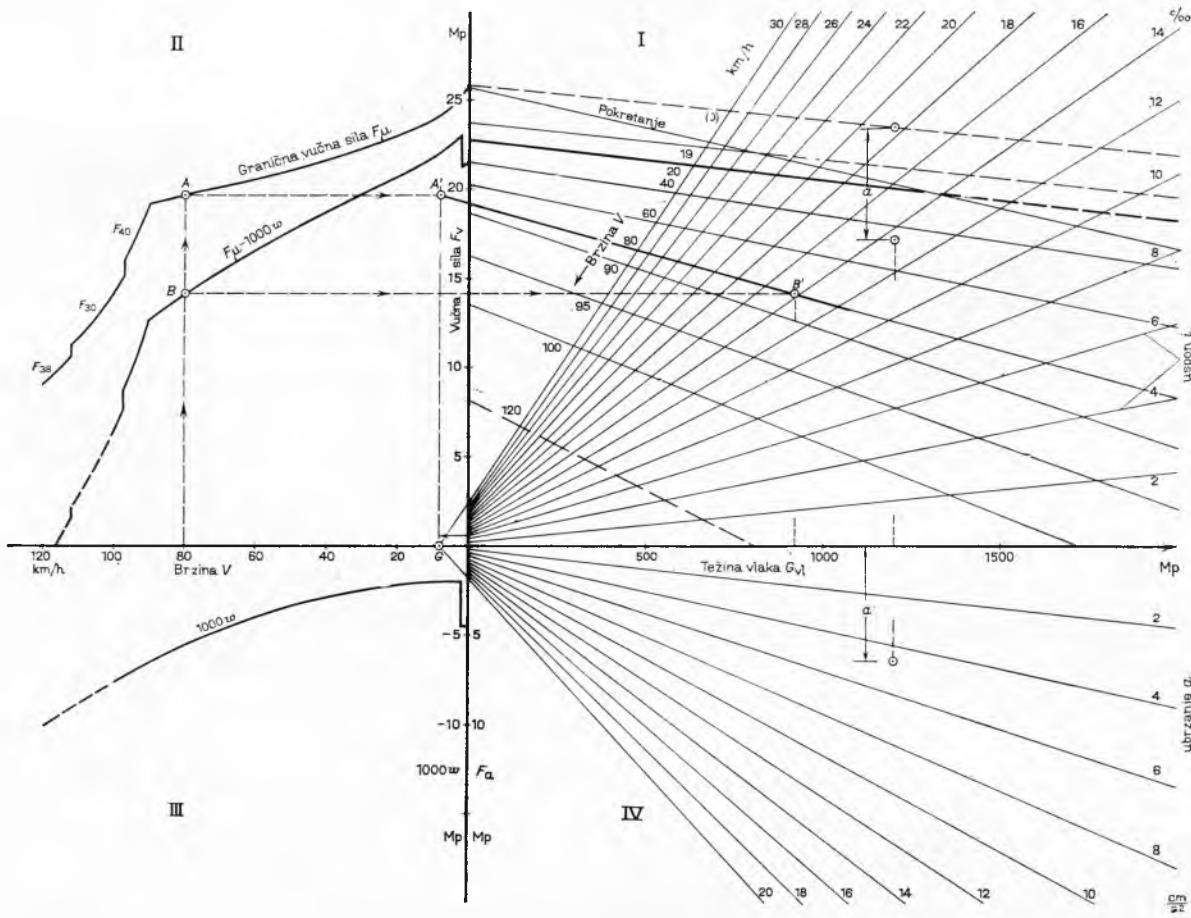
i V - dijagram (sl. 61) služi također za prikazivanje vučnih sposobnosti lokomotiva. U njemu su naneseni na osi ordinata I u ampertima i na osi apscisa brzine u kilometrima na



Sl. 61. iV -dijagram dizel-električne lokomotive 2x825 KS JŽ serija 662 (Đ. Đaković)

sat. Iz dijagrama se vidi za pojedine brzine i raspoložive vučne sile na kom se usponu može još vući određena masa vlaka (u tonama).

Koreffov dijagram vrlo je praktičan, a služi za to da se za određenu lokomotivu utvrde međusobni odnosi dopustivih tereta, uspona i ubrzanja. Na sl. 62 prikazan je dijagram za električnu lokomotivu 5550 KS, 25 kV, 50 Hz i teretni vlak. U II kvadrantu nacrtana je najprije granična vučna sila određena adhezijom F_μ i dozvoljenim stepenima s obzirom na maksimalni



Sl. 62. Koreffov dijagram za električnu lokomotivu 5550 KS, 25 kV, 50 Hz, JŽ serije 441 (50 Hz Traction Union — Rade Končar)

ELEKTRIČNA VUČA

napon motora (F_{40} , F_{39} , F_{38}). Od toga je odbijen za sve brzine vozni otpor u ravnini za vlak od 1000 Mp, čime se dobiva kružnica granične vučne sile $F_\mu = 1000 w$ (iz III kvadranta). U I kvadrantu su na osi apscisa nanesene težine vlakova. Pomoćna ordinata dignuta je iz tačke $-G_{lok}$ koja odgovara težini lokomotive. Za svaku brzinu, npr. 80 km/h (apscisa II kvadrant), u prvom je kvadrantu određen pravac koji je definiran tačkom A' za težinu vlaka jednakoj nuli i tačkom B' za vlak ukupne težine 1000 Mp. Iz iste tačke G_{lok} povlače se pravci $F_v = (G_{lok} + G_{vi}) i$. U IV kvadrantu ucrtani su pravci potrebnih vučnih sila za različita ubrzanja mase vlaka i lokomotive. Iz tog dijagrama može se očitati da npr. vlak težine 1200 Mp na usponu 13,5% možemo vući brzinom do 45 km/h i da ga pri malim brzinama možemo ubrzavati $\sim 4,5 \text{ cm/s}^2$. Pravac »pokretanje« nije identičan s pravcem za brzinu 0 jer je vozni otpor pri pokretanju veći nego pri vožnji, te npr. za teretne vlakove iznosi $w = 4,5 \text{ kp/Mp}$.

Tendencije razvoja

Upotreba upravljaljivih poluvodičkih sastavnih dijelova, koji se u novije vrijeme sve više primjenjuju, omogućuje beskontaktnu kontinuiranu regulaciju u baterijskim vozilima (v. sl. 35), uz mogućnost vraćanja energije kočenja u bateriju. Time se postiže 25 do 30% veći akcioni radijus vozila. Primjenom iste tehnike na zavisna elektromotorna vozila za istosmjernu struju omogućuje se kontinuirana regulacija vučnih motora uz trajan paralelni spoj vučnih motora, čime se istovremeno i povećava ubrzanje i štedi energija.

Na vozilima za izmjeničnu struju tiristorima se omogućuje kontinuirana regulacija napona uz jednostavan transformator. To smanjuje težinu lokomotive i povećava koeficijent adhezije, jer više nema skokova vučne sile, a vučna sila se može regulirati za svaki motor posebno prema njegovom momentanom osovinskom pritisku i momentanim uvjetima adhezije. Upotreba upravljaljivih

poluvodičkih uredaja obećava u budućnosti veću primjenu istosmjernih sistema. Istosmjerni napon iz kontaktne vode bi se u lokomotivi pretvorio u izmjenični napon, transformirao i dalje pretvorio u trofazni napon povoljne promjenljive frekvencije, čime bi bila omogućena primjena asinhronih vučnih motora.

Primjena kibernetike omogućuje kako na fiksnim postrojenjima tako i u samom vozilu rasterećenje osoblja od raznih sporednih funkcija i postepeni prelaz na potpuno automatski saobraćaj s programiranim redom vožnje i načinom vožnje na pojedinim dijelovima pruge.

Koeficijent adhezije, koji ima važnu ulogu u određivanju rentabilnosti šinskih vozila, nastoji se različitim zahvatima povećati. Na njega se utiče: tzv. niskom vučom, tj. niskim hvatištem za prijenos sile između sanduka i okretljivog postolja (malo rasterećenje osovine); uredajima za kočenje; uredajem za mehaničku kompenzaciju rasterećenja osovine (zračnim cilindrom); otpornikom za slabljenje vučne sile prve osovine; primjenom istosmjernih vučnih motora sa serijskom uzbudom (veliko dF/dV); primjenom paralelnog spoja vučnih motora pri pokretanju i primjenom individualne regulacije napona za pojedine motore prema njihovom momentanom osovinskom pritisku.

Gorivni elementi doći će možda u budućnosti u obzir kao izvor električne energije na nezavisnim vozilima. U njima se kemijska energija koja se oslobada pri oksidaciji izravno pretvara u električnu energiju. Može se očekivati da će razvoj ovih elemenata biti vrlo koristan za nezavisna elektromotorna vozila (v. Gorivni elementi).

LIT.: K. Sachs, Elektrische Triebfahrzeuge, Frauenfeld 1953. — T. Ferguson, Electric railway engineering, London 1955. — G. Wilke, Akkumulator-Triebwagen, München 1956. — B. E. Розенфельд и др., Основы електрической тяги, Москва 1957). — M. F. Nouvion, Les techniques de l'électrification ferroviaire, Paris 1958. — F. Jansa, Trakční mechanika a energetika kolejové dopravy, Praha 1959. — M. Garreau, Cours de traction électrique, Paris 1960. — ВДЕ Reihe 6, Gleichtstrombahnen und Gleichtstromfahrzeuge, Berlin 1960. — B. Radojković, Električna vuča, Beograd 1965.

E. Najman

TUMAČ KRATICA U ČLANKU ELEKTRIČNA VUČA

Željeznice

DB	Deutsche Bundesbahn (SR Njemačka)
JŽ	Jugoslavenske željeznice (SFR Jugoslavija)
NS	Nederlandse Spoorweg (Nizozemska)
ÖBB	Österreichische Bundesbahn (Austrija)
SNCB	Société Nationale des Chemins de fer Belges (Belgija)
SNCF	Société Nationale des Chemins de fer Français, (Francuska)
<i>Poduzeća</i>	
AEG	Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft, SR Njemačka
ALSTHOM	Société Générale de Constructions Electriques et

Mécaniques (nastalo fuzijom Société ALSatienne de constructions mécaniques i Compagnie Française THOMson-Houston), Francuska

ASEA	Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget, Švedska
ASGEN	Ansaldo San Giorgio Compagnia Generale, Italija
BBC	Brown Boveri & Cie, Švicarska
ČKD	Českomoravská Kolben-Daněk, Čehoslovačka
GE	General Electric Company, USA
GM	General Motors Company, USA
Oerlikon	Werkzeugmaschinenfabrik Oerlikon, Bührle & Co, Švicarska
WEMCO	Westinghouse Electric Manufacturing Company, USA

