

MATEMATIKA KONSTRUKTIBILNOG

$\tau(A \vee B)$				$\tau(A \& B)$			
$\tau A \backslash \tau B$	$\top$	N	$\perp$	$\tau A \backslash \tau B$	$\top$	N	$\perp$
$\top$	$\top$	$\top$	$\top$	$\top$	$\top$	N	$\perp$
N	$\top$	$\top$	N	N	N	N	$\perp$
$\perp$	$\top$	$\top$	$\perp$	$\perp$	$\perp$	$\perp$	$\perp$

$\tau(A \Rightarrow B)$				$\tau(A \Leftrightarrow B)$			
$\tau A \backslash \tau B$	$\top$	N	$\perp$	$\tau A \backslash \tau B$	$\top$	N	$\perp$
$\top$	$\top$	N	$\perp$	$\top$	$\top$	N	$\perp$
N	$\top$	$\top$	N	N	N	$\top$	N
$\perp$	$\top$	$\top$	$\top$	$\perp$	$\perp$	N	$\top$

Kleenejeva: kao Łukasiewiczzeva, samo što je sada $N \Rightarrow N = N$, $N \Leftrightarrow N = N$.

Pored intuicionističke matematike, o kojoj će biti govora dalje, postoji još niz »neklasičnih« logika: logike striktno implikacije, modalne logike (koje uzimaju u obzir modalitete, npr. »nužno«, »moguće« itd.), logike s više negacija (različitog značenja), ultraintuicionističke logike Grissa i Jesenjin-Voljina itd. Od formalizacija pojedinih matematičkih teorija posebno su važne različite formalizacije teorije skupova u logikama prvog i drugog reda.

INTUICIONISTIČKA MATEMATIKA

Od razmotrenih (matematičkih) logika radikalno se i duboko razlikuje tzv. intuicionistička. S gledišta intuicionista, formalizam u matematici nije drugo doli »igra« simbolima; s gledišta formalista, intuicionizam predstavlja nepotrebno i nedopustivo sakaćenje i osiromašenje te kompliciranje matematike.

Osnovna intuicionistička postavka jest mogućnost (bar načelno) *efektivne konstrukcije*. Klasični matematički iskazi o egzistenciji određenih matematičkih objekata koji ujedno ne daju i mogućnost njihova efektivnog pronalaženja intuicionistički su bez vrijednosti i bez sadržaja. Intuicionistički je neka tvrdnja A istinita ako je dokazana (bar potencijalno) efektivnom konstrukcijom. Tvrdnja A je intuicionistički neistinita (i time tvrdnja $\neg A$ »per definitionem« intuicionistički istinita) kad se, polazeći od pretpostavke da ima neka efektivna konstrukcija od A , ova konstrukcija uspjela produžiti do neke (intuicionističke) kontradikcije, npr. iskaza $0 = 1$. Disjunkcija $A \vee B$ intuicionistički je dokazana kad je bilo dan konstruktivni dokaz od A bilo dan konstruktivni dokaz od B . Implikacija $A \Rightarrow B$ intuicionistički je dokazana kad se pretpostavljena konstrukcija od A uspjela produžiti do konstrukcije od B .

Zaključivanje prema shemi $A \vee \neg A$ intuicionistički općenito nije legitimno. Isto tako ne vrijedi tu ni shema $\neg \neg A \Rightarrow A$. Slično otpadaju i klasične tautologije $(\neg A \Rightarrow \neg B) \Rightarrow (B \Rightarrow A)$, $((A \Rightarrow B) \Rightarrow A) \Rightarrow A$. S druge strane, tautologije $A \Rightarrow \neg \neg A$, $(A \Rightarrow B) \Rightarrow (\neg B \Rightarrow \neg A)$, $\neg A \Leftrightarrow \neg \neg \neg A$ vrijede i intuicionistički. Na razini predikata npr. sheme $\neg(\exists x) \neg P(x) \Rightarrow (\forall x) P(x)$, $\neg(\forall x) \neg P(x) \Rightarrow (\exists x) P(x)$ intuicionistički nisu legitime; suprotne implikacije vrijedi i intuicionistički.

Na razini sudova vrijedi ovaj rezultat: Ako je formula $\mathcal{A}$ kao formula (klasične) logike sudova identički istinita, onda je $\neg \neg \mathcal{A}$ intuicionistički legitimna shema. Tako npr. i intuicionistički vrijedi $\neg \neg(A \vee \neg A)$.

Sustavna izgradnja nekog područja matematike prema intuicionističkom programu često je vrlo složena i dobivena teorija obično se duboko razlikuje od klasične; npr. već teorija realnih brojeva, zasnovana intuicionistički, bitno je drugačija od one u klasičnoj analizi.

Intuicionistička kritika klasične matematike i Hilbertova programa njene formalizacije bila je i jedan od razloga razvoja matematičkih teorija o konstruktibilnom. Te su teorije uskoro pored samostalnog interesa našle i primjene u različitim područjima matematike a i nekih drugih znanosti, npr. u teoriji automata.

Za razliku od intuicionizma kao konstruktivne teorije, te teorije o konstruktibilnom (redovito, iako ne uvijek i nužno) polaze od prihvaćanja i nekonstruktibilnih objekata kao »egzistencijalno« postojećih, iz »rezervoara« kojih se onda određenim definicijama i metodama »izlučuju«, »odvajaju« oni među njima koji su konstruktibilni u smislu dane teorije. E. Post je u tim teorijama i u spoznajama do kojih su dovele vidio jedan od isto tako dubokih i fundamentalnih osnova čitave matematike uopće, kao što su to i prirodni brojevi.

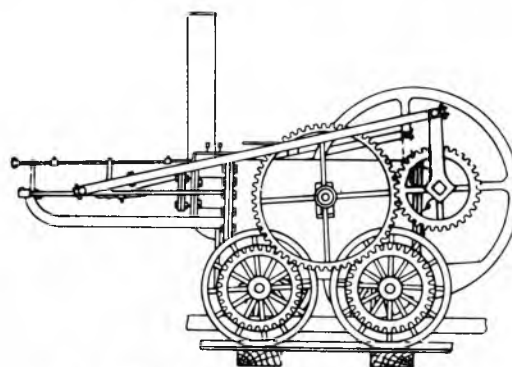
Većina matematičara koji se bave ovim granama matematike ističu neočekivano slaganje po opsegu tih po polaznim koncepcijama naoko vrlo različitih teorija: Turingovih strojeva, rekurzivnih funkcija, Markovljevih algoritama itd. Naime, pokazuje se da su sve te teorije »ekvivalentne« u smislu da je neki matematički objekt konstruktibilan u smislu jedne od tih teorija onda i samo onda ako je konstruktibilan i u smislu druge. Prema glasovitoj *Churchovoj tezi*, svaka u intuitivnom smislu izračunljiva funkcija (određenog tipa) izračunljiva je i u smislu navedenih teorija. Načelno nema izgleda da se ova teza ikada dokaže, iako nije nemoguće da jednom bude opovrgnuta.

LIT.: D. Hilbert, W. Ackermann, Grundzüge der theoretischen Logik. Springer, Berlin 1938. — D. Hilbert, P. Bernays, Grundlagen der Mathematik. Springer, Berlin 1939. — S. C. Kleene, Introduction to metamathematics. Van Nostrand, New York 1952. — J. B. Rosser, Logic for mathematicians. McGraw-Hill, New York 1953. — A. Heyting, Intuitionism. North-Holland Publ. Comp., Amsterdam 1956. — A. Church, Introduction to mathematical logic. Princeton University Press, Princeton 1956. — E. W. Beth, The foundations of mathematics. North-Holland Publ. Comp., Amsterdam 1959. — И. С. Новиков, Элементы математической логики. Государственное издательство физико-математической литературы, Москва 1959. — H. Hermes, Aufzählbarkeit, Entscheidbarkeit, Berechenbarkeit. Springer, Berlin 1961. — H. B. Curry, Foundations of mathematical logic. McGraw-Hill, New York 1963.

V. Devidé

LOKOMOTIVE, pružna pogonska vozila koja služe za vuču vagona, bez prostora za putnike ili teret. Po tome se i razlikuju od pogonskih kola koja uz pogonsko postrojenje imaju i prostor uređen za prijevoz korisnog tereta, tj. putnika i robe.

Prvu upotrebu lokomotivu izgradio je 1804. godine Englez Richard Trevithick (1771–1833). Ta lokomotiva s imenom *Invicta* (sl. 1) počela je voziti 1. II 1804. na industrijskoj pruzi duljine 15,6 km gdje je vukla vlak od 5 vagona, bruto-mase nekih 25 t, maksimalnom brzinom od 7 m/s (25,2 km/h) na horizontalnoj pruzi, a sa 2 m/s na usponu.

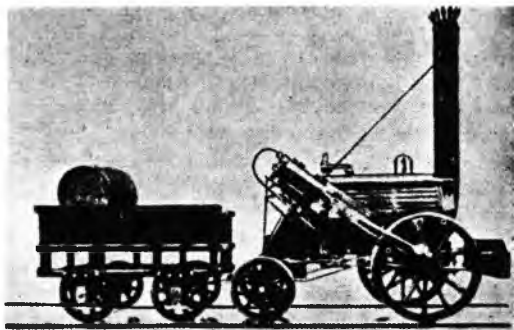


Sl. 1. Trevithickova lokomotiva Invicta, 1804.

Nakon duge i žučne borbe u engleskom parlamentu bila je odobrena gradnja željezničke pruge Liverpool-Manchester. Uprava te željeznice raspisala je nagradni natječaj za najbolju lokomotivu uz ove uvjete: najveća masa lokomotive u službi 6 t, najveći tlak pare u kotlu 0,34 MPa (3,5 at) i najmanja

brzina od 4,4 m/s (15,8 km/h) s vlakom bruto-mase 20 t. Na natjecanju je pobijedila Stephensonova lokomotiva *Rocket*. Na pokusnim vožnjama od 6. do 12. X 1829. ona je jedina od četiri lokomotive, koje su sudjelovale u natjecanju, ispunila sve uvjete, postigavši za to doba nevidenu brzinu od 12 m/s (43,2 km/h). Lokomotiva *Rocket* je u osnovi bila građena kao što su građene i današnje parne lokomotive sa stapnim parnim strojem (sl. 2) i s njom su braća George i Robert Stephenson ispunili glavni uvjet za razvoj željeznica.

Nakon uspjeha Stephensonove lokomotive, parna lokomotiva je skoro čitavo stoljeće sama svladavala željeznički promet i tek početkom XX stoljeća pojavljuje se i lokomotiva s motornim i električnim pogonom. Zamašnija elektrifikacija željeznica, i to uglavnom u Evropi, počinje dvadesetih godina ovog stoljeća. Za vrijeme drugoga svjetskog rata i poslije njega dolazi do drugoga snažnog razvika elektrifikacije željeznica, što se odrazilo i na razvoj svih vrsti električnih pogonskih vozila (v. *Električna vuča*, TE 3, str. 689).



Sl. 2. Stephensonova lokomotiva *Rocket*, 1829.

Godine 1912. sagradio je R. Diesel prvu lokomotivu s dizelskim motornim pogonom, koja je zadovoljavala u željezničkoj vuči. Iako je ta prva dizelska lokomotiva imala dosta nedostataka, ipak se pokazalo da dizelski motor može izvršno poslužiti za željezničku vuču ako se riješi problem prijenosa snage od dizelskog motora na pogonske kotače. Naime, dizelski motor je stroj konstantnog zakretnog momenta, pa ako je direktno spojen s pogonskim kotačima, nije u stanju da se prilagodi velikim promjenama opterećenja kakve nastaju u lokomotivskom pogonu. Trebalo je dosta vremena da se razviju prikladni sustavi prijenosa, i tek četrdesetih godina našeg stoljeća počinje sve veće i veće sudjelovanje dizelskih lokomotiva u željezničkoj vuči, osobito u SAD.

Tridesetih se godina našeg stoljeća plinska turbina također počinje upotrebljavati za pogon lokomotiva. Specifični zahtjevi službe u nekim industrijskim granama doveli su do razvoja specijalnih tipova lokomotiva koje su po obliku, dimenzijama, konstrukciji, a često i po načinu pogona, sasvim različite od normalnih željezničkih lokomotiva. Tako nastaju lokomotive tjerane komprimiranim zrakom, lokomotive kojima je izvor pogonske energije električna akumulatorska baterija, lokomotive s giropogonom, parne lokomotive koje umjesto kotla imaju spremnik pare pod tlakom itd.

Od ukupnog broja lokomotiva u svijetu, koji je 1952. iznosio ~193700, parnih lokomotiva je bilo ~163000, dizelskih lokomotiva ~22000, a električnih ~8700. To znači da je parnih lokomotiva bilo ~84% od ukupnog broja svih tipova lokomotiva, dizelskih lokomotiva ~11,5%, a električnih ~4,5%. Već 1957. godine ti su postoci bili ~76% za parne, ~19% za dizelske, a ~5% za električne lokomotive. U novijem razvoju željeznica postotak parnih lokomotiva pomalo ali neprestano pada, dok postotak električnih i dizelskih lokomotiva polagano ali neprestano raste. Prema gruboj procjeni, sadašnje sudjelovanje pojedinih tipova lokomotiva u njihovu ukupnom broju iznosi ~55% za parne lokomotive, ~35% za dizelske lokomotive, a ~10% za električne lokomotive. Nadalje, treba imati u vidu da električne i dizelske lokomotive, u usporedbi s parnim, preuzimaju na sebe veći dio transporta, nego što bi to odgovaralo njihovu međusobnom odnosu u postocima.

RAZVRSTAVANJE I OZNAKE LOKOMOTIVA

Mehanički dio lokomotive, često nazvan i vagoni dio lokomotive, sastoji se od kolnih slogova, glavnih ležajeva i nosivih opruga, zatim od pojedinih dijelova pogonskog mehanizma lokomotive, glavnog frema i fremova podvozaka, te konačno od kućišta lokomotive. Ta raspodjela mehaničkog dijela lokomotive na četiri glavna dijela prikazana je na sl. 3.

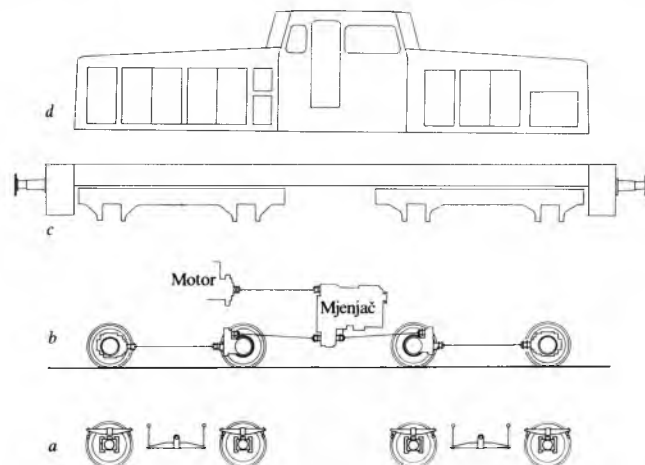
Dijelovi pogonskog mehanizma pripadaju prijenosniku, a nalaze se na dizelskim hidrauličkim i dizelskim mehaničkim lokomotivama između mjenjača i kolnih slogova, a na dizelsko-električnim, električnim i plinskoturbinskim lokomotivama između vučnih elektromotora i kolnih slogova.

U mehanički dio lokomotive smješten je cjelokupan pogonski uređaj s primarnim pokretačem i prijenosnikom na dizelskim lokomotivama i plinskoturbinskim lokomotivama, odnosno cjelokupna električna oprema na električnim lokomotivama.

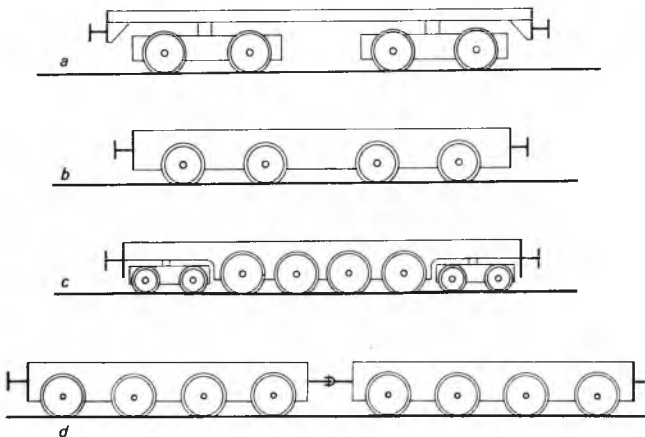
Lokomotiva i njezin noseći okvir, tzv. frem, moraju biti tako konstruirani da lokomotiva može lako svladavati zavoje

na pruzi. Prema konstrukciji frema, lokomotive se razvrstavaju na mosne, fremske i zglobne (sl. 4).

Mosne lokomotive imaju osovine (kolne slogove) uložene isključivo u dva ili više podvozaka, a ne u glavnom fremu.



Sl. 3. Mosna dizelska hidraulička lokomotiva. a kolni slogovi, ležajevi i opruge, b dijelovi pogonskog mehanizma, c glavni frem i fremovi podvozaka, d kućište lokomotive



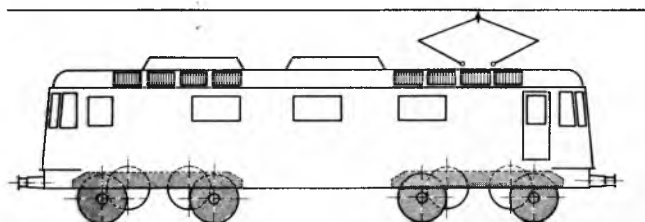
Sl. 4. Razvrstavanje lokomotiva prema konstrukciji frema. a mosna lokomotiva, b fremska lokomotiva, c fremska člankasta lokomotiva, d zglobna lokomotiva

Fremske lokomotive imaju bar dvije osovine, odnosno kolna sloga smještena u glavnom fremu koji nosi kućište lokomotive. Ostale osovine, ako postoje, mogu biti smještene i u podvozcima. Lokomotive s osovinama smještenim u glavnom fremu i u podvozcima nazivaju se *fremske člankaste lokomotive*.

Zglobne lokomotive sastavljene su od više dijelova koji se mogu potpuno odvojiti i voziti pojedinačno. Ti dijelovi lokomotive nemaju zajedničko kućište.

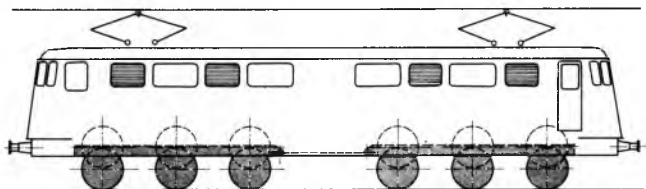
U današnje vrijeme lokomotive se najčešće grade kao mosne lokomotive (sl. 5 do 7), a rjeđe kao fremske (sl. 8) ili zglobne (sl. 9).

Lokomotiva ima pogonske osovine i slobodne osovine. Pogonske osovine na neki su način vezane s pogonskim strojem,

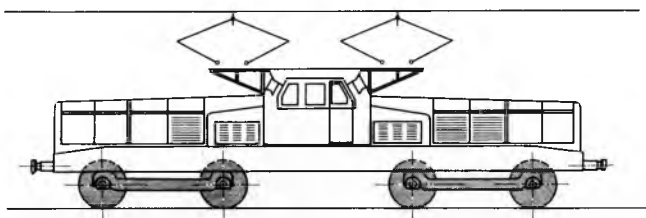


Sl. 5. Mosna lokomotiva B₀B₀ s dugačkim kućištem i dva podvozka sa dvije pojedinačno pogonjene osovine

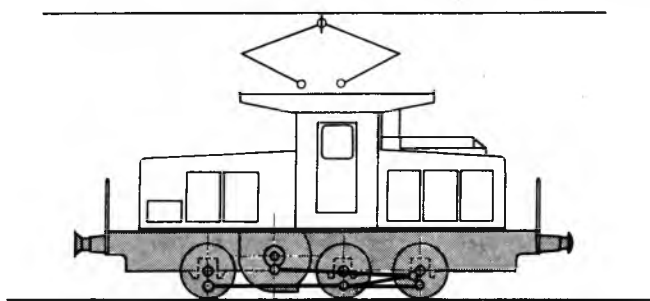
i preko njih se prenosi moment vrtnje na pogonske kotače. Slobodne osovine nemaju vezu s pogonskim uređajem. Prema međusobnom razmještaju frema i osovina lokomotive, odnosno prema vrsti, broju i načinu grupiranja osovina, lokomotive se razvrstavaju na pojedine tipove. Za obilježavanje tipova lokomotiva postoji nekoliko sustava. Jedan od njih je UIC-sustav, koji je propisala Međunarodna unija željeznica (UIC-Kodex 612 V).



Sl. 6. Mosna lokomotiva C₀C₀ s dugačkim kućištem i dva podvoska sa tri pojedinačno pogonjene osovine



Sl. 7. Mosna lokomotiva B₀B₀ s kratkim kućištem i dva podvoska sa dvije pojedinačno pogonjene osovine



Sl. 8. Frenska lokomotiva C sa tri međusobno vezane pogonske osovine ugrađene u glavni frem

Prema UIC-sustavu slobodne se osovine lokomotive označuju arapskim brojevima, vrijednost kojih pokazuje broj osovina koje slijede jedna iza druge. Pogonske se osovine označuju velikim latinskim slovima. Tako A označuje jednu pogonsku osovinu, B dvije pogonske osovine koje slijede jedna iza druge itd. Tim se slovima dodaje indeks 0 (nula) ako osovine imaju pojedinačni pogon, dok slova bez tog indeksa označuju osovine koje su međusobno vezane. Prema tome, brojevi i slova znače broj i vrstu osovina: 1 jednu slobodnu osovinu; 2 dvije slobodne osovine; A jednu pogonsku osovinu; B dvije međusobno vezane pogonske osovine; B₀ dvije pogonske osovine s pojedinačnim pogonom; C tri međusobno vezane pogonske osovine; C₀ tri pogonske osovine s pojedinačnim pogonom itd.

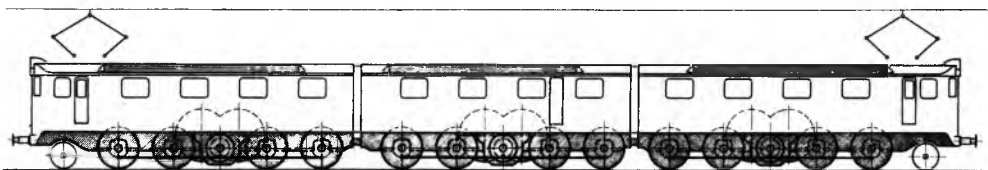
Ako su ovi brojevi, odnosno slova, s crticom, onda to označuje osovine ili grupe osovina smještene u jednom fremu podvoska. Ako lokomotiva ima grupe osovina smještene u dva ili više podvozaka, a oznaka svake grupe sadrži više od jednog

Tablica 1

OZNAKE TIPOVA LOKOMOTIVA PREMA BROJU I RASPOREDU OSOVINA (PREMA UIC SUSTAVU)

	Mosna lokomotiva B ₀ B ₀ ; dva podvoska, svaki sa dvije pojedinačno pogonjene osovine
	Mosna lokomotiva C ₀ C ₀ ; dva podvoska, svaki sa tri pojedinačno pogonjene osovine
	Mosna lokomotiva (A1A) (A1A); dva podvoska, raspored osovina u svakom podvosku: pojedinačno pogonjena osovin, slobodna osovin, pojedinačno pogonjena osovin
	Mosna lokomotiva B'B'; dva podvoska, svaki sa dvije međusobno vezane pogonske osovine
	Mosna lokomotiva C'C'; dva podvoska, svaki sa tri međusobno vezane pogonske osovine
	Mosna lokomotiva (1'B)(B1'); dva podvoska, raspored osovina u prvom podvosku: slobodna osovin neovisna o fremu podvoska, dvije međusobno vezane pogonske osovine; raspored osovina u drugom podvosku: dvije međusobno vezane pogonske osovine, slobodna osovin neovisna o fremu podvoska
	Frenska lokomotiva B; dvije međusobno vezane pogonske osovine u glavnom fremu
	Frenska lokomotiva C; tri međusobno vezane pogonske osovine u glavnom fremu
	Frenska lokomotiva D; četiri međusobno vezane pogonske osovine u glavnom fremu
	Frenska lokomotiva 1'C1'; raspored osovina: slobodna osovin neovisna o glavnom fremu, tri međusobno vezane pogonske osovine u glavnom fremu, slobodna osovin neovisna o glavnom fremu
	Frenska lokomotiva 1D ₀ 1; raspored osovina: slobodna osovin, četiri pojedinačno pogonjene osovine, slobodna osovin
	Frenska lokomotiva 1'D ₀ 1'; raspored osovina: slobodna osovin neovisna o glavnom fremu, četiri pojedinačno pogonjene osovine, slobodna osovin neovisna o glavnom fremu
	Zglobna lokomotiva C + C; sastavljena od dva dijela sa tri međusobno vezane pogonske osovine
	Zglobna lokomotiva D ₀ + D ₀ ; sastavljena od dva dijela sa četiri pojedinačno pogonjene osovine

Sl. 9. Zglobna lokomotiva 1'D + D + D1' sastavljena od tri dijela s fremskim jedinicama



broja ili jednog slova, onda se oznaka svake grupe stavi u zagradu.

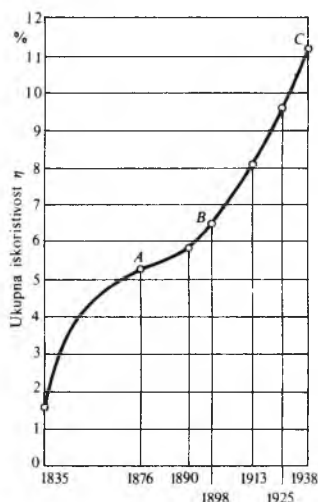
Lokomotive sastavljene od više dijelova, koji se mogu potpuno odvojiti i pojedinačno voziti, označuju se tako da se između oznaka pojedinih dijelova stavi znak + (plus). U tablici 1 prikazane su oznake prema UIC-sustavu za nekoliko različitih tipova lokomotiva.

PARNE LOKOMOTIVE

Nakon izgradnje prvih parnih lokomotiva (sl. 1 i 2) slijedi razdoblje njihova razvoja više od jednog stoljeća. U tom razdoblju povećala se snaga parnih lokomotiva preko 60 puta, brzina 5...6 puta, a njihova je masa porasla od 6 na više od 350 t.

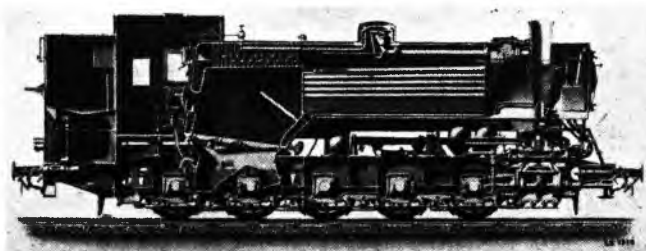
Parne lokomotive u početku gradile su se kao lokomotive na mokru paru, tj. para proizvedena u kotlu neposredno se dovodila u parne cilindre. Godine 1898. počele su se graditi i lokomotive na pregrijanu paru, u kojima para iz kotla, prije ulaska u parne cilindre, prolazi kroz pregrijač. Te su lokomotive gotovo potpuno istisnule one na mokru paru, tako da su se konačno lokomotive na mokru paru gradile samo kao građevne i industrijske lokomotive.

Razvitkom parnih lokomotiva sa stapnim parnim strojem, koje su građene sve do snaga od 5000 kW, neprestano se povećavala i njihova ukupna iskoristivost η . Porast ukupne iskoristivosti parnih lokomotiva od 1835. do 1938. godine prikazan je na sl. 10.



Sl. 10. Porast ukupne iskoristivosti parnih stapnih lokomotiva. A prva kompaundna lokomotiva, B prva lokomotiva na pregrijanu paru, C pre tlak u kotlu 2 MPa, pregrijanje pare 400 °C, potpuni ispuh

Parni stroj je vrlo prikladan za lokomotivski pogon, jer se potpuno prilagođuje zahtjevima toga pogona, tj. pri malim brzinama daje veliki okretni moment, a pri velikim brzinama mali okretni moment. Mogućnost promjene punjenja stapnog parnog stroja daje parnoj lokomotivi sposobnost kretanja u vrlo širokim granicama različitih brzina. Tim je ujedno omogućeno i prilično lako pokretanje vlaka s mjesta pod punim opterećenjem. Promjena smjera kretanja lokomotive postiže se jednostavnim preokretanjem (reverziranjem) stroja. Lokomotivski kotao se automatski prilagođuje promjenama opterećenja nastalim zbog promjene jačine ispuha stroja. Održavanje parnih stapnih lokomotiva ne postavlja velike zahtjeve ni u kom pogledu. Zahvaljujući svojstvima pogonskog uređaja, stapna parna lokomotiva je potpuno samostalna pogonska jedinica vrlo prikladna za masovni promet.



Sl. 11. Parna stapna tender-lokomotiva Njemačkih željeznica za vuču teretnih vlakova (1950). Masa lokomotive u službi 91,6 t, tlak pare u kotlu 1,37 MPa, maksimalna brzina 19,5 m/s (70 km/h)

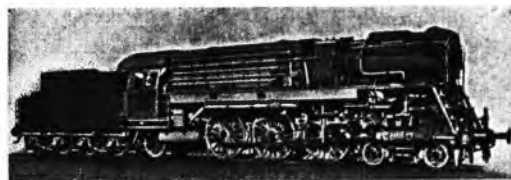
Nedostatak stapnih parnih lokomotiva jesu njihove slabe dinamičke osobine zbog čega im je i iskorištenje snage, s obzirom na adhezijsku težinu, slabo. Adhezijska težina lokomotive jest težina koja otpada na pogonske kotače. Za postizavanje velikih brzina te lokomotive moraju imati kotače velikog promjera, što znači velike neoslonjene mase. To su mase onih dijelova lokomotive koji nisu oslonjeni na nosiva pera lokomotive. Zbog velikih neoslonjenih masa i slabih dinamičkih svojstava parnih stapnih lokomotiva troškovi su održavanja gornjeg stroja pruge veći. Jedan od najvećih nedostataka parnih stapnih lokomotiva jest nizak ukupni stupanj iskoristivosti goriva (10...12%), zbog čega treba mnogo goriva.

Na sl. 11 i 12 prikazane su dvije parne stapne lokomotive novije konstrukcije, kojima je ukupni stupanj iskoristivosti ~10...11%.



Sl. 12. Četverocilindrična parna stapna lokomotiva Chesapeake & Ohio Railway Co. (1943). Graditelj: Lima Locomotive Works Inc., Lima, Ohio, SAD. Masa lokomotive 327 t, masa tendera sa 2/3 zaliha 155 t, vučna sila lokomotive 490 kN.

U nastojanju da se poboljša termička iskoristivost parnih lokomotiva, počinju se graditi lokomotive s visokim tlakovima u parnom kotlu (sl. 13) i lokomotive kojima je pogonski stroj parna turbina s kondenzacijom izlazne pare (sl. 14). Ta rješenja nisu potpuno zadovoljila, jer su postignuta poboljšanja bila premalena da bi opravdala velike troškove gradnje takvih tipova lokomotiva.



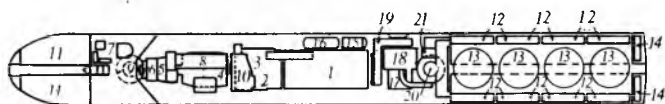
Sl. 13. Schwartzkopff-Löfflerova lokomotiva s visokotlačnim kotlom (11,8 MPa), izgrađena 1929. godine



Sl. 14. Parna turbinska lokomotiva s kondenzacijom izlazne pare Njemačkih željeznica (1924). Graditelj: Krupp A. G., Essen

S obzirom na potrošak pare i goriva, parne turbinske lokomotive pokazale su se u eksploataciji boljim od parnih stapnih lokomotiva, a imaju i dobra dinamička svojstva. No, parne turbinske lokomotive imaju i mnoge mane, naročito u vezi s

konstrukcijom i djelovanjem kondenzacijske instalacije i prijenosnog mehanizma. Te su lokomotive dva puta skuplje od stapnih parnih lokomotiva iste snage, a zbog čestih i skupih popravaka i troškovi održavanja su im veliki.



Sl. 15. Raspored pogonskog postrojenja američke eksperimentalne parne turboelektrične lokomotive (1939). Masa lokomotive 265 t, snaga lokomotive 1860 kW, tlak u kotlu 10,3 MPa. 1 parni kotao, 2 visokotlačna glavna parna turbina, 3 niskotlačna glavna parna turbina, 4 glavni generator, 5 pretvarač, 6 uzbudnik, 7 upravljačko mjesto, 8 isparivač uređaja za grijanje vlaka, 9 puhalo vučnog motora, 10 kompresor, 11 tankovi za vodu, 12 kondenzatori hlađeni zrakom, 13 ventilatori, 14 akumulatorske baterije, 15 tank za kondenzat, 16 grijalo napojne vode, 17 otpornik za kočenje, 18 pomoćni parni kotao, 19 ventilator za propuh parnog kotla, 20 puhalo vučnog motora, 21 ispuh pare

Dobra termička iskoristivost parne turbine nastojala se kombinirati s prednostima električnog pogona, pa su tako nastale parne turboelektrične lokomotive. Princip parnog turboelektričnog pogona sastoji se u tome da para dobivena u kotlu prolazi turbogeneratorski sklop, zatim odlazi u veliki zrakom hlađeni kondenzator gdje se kondenzira i kao voda ulazi u rezervoar napojne vode odakle se opet vraća u kotao. Parni turbogenerator napaja vučne elektromotore na pogonskim osovina lokomotive (sl. 15). Termička iskoristivost parnih turboelektričnih lokomotiva više je nego dva puta veća od one parnih stapnih lokomotiva, jer su temperatura i tlak pare u kotlu viši. Dalje su prednosti: veliko ubrzanje lokomotive, električno kočenje, pogonski kotači mogu biti manji i projek-tant ima više slobode u izboru njihova rasporeda. Sl. 16 prikazuje jednu od najvećih parnih turboelektričnih lokomotiva koje su ikad izgrađene.

Lokomotive s parnim turbinskim pogonom i mehaničkim ili električnim prijenosom snage na kotače, koliko god su zna-



Sl. 16. Parna turboelektrična lokomotiva bez kondenzacije izlazne pare, izgrađena 1941. godine za Chesapeake & Ohio Railway Co., SAD. Graditelj: Baldwin Locomotive Works i Westinghouse Electric Corp., SAD. Masa lokomotive 594 t, snaga lokomotive 4500 kW

čile tehnički savršenija rješenja od pogona stapnim parnim strojem, ipak se nisu nikad uspjele dulje održati. Glavni razlog tome bili su vrlo visoki troškovi gradnje i održavanja složenih turbinskih uređaja. Zato parne turbinske lokomotive znače samo jedan pokušaj koji zbog ekonomskih razloga nije mogao izdržati takmičenje s jednostavnijim i jeftinijim parnim stapnim strojem i s jeftinijim a jednako uspješnim dizelsko-električnim pogonom.

Lokomotive s rešetkom

Većina današnjih parnih lokomotiva jesu stapne lokomotive ložene ugljenom (sl. 17). Kotao tih lokomotiva ima rešetku na kojoj izgaraju komadi ugljena. Rešetke mogu biti nepomične, a ima ih i takvih kojima se jedan dio pomiče.

Lokomotivski kotao (sl. 18). Pri projektiranju neke lokomotive količina pare koju treba proizvesti u kotlu odredi se iz:

$$D = 1,1 P'_i d'_i \quad (1)$$

gdje je D potrebna ukupna proizvodnja pare u kg/s, P'_i potrebna najveća trajna indicirana snaga u W, a d'_i najpovoljniji jedinični potrošak pare u kg/J koji se očekuje pri najpovoljnijoj brzini lokomotive. S faktorom 1,1 uzima se u obzir potreba dodatne količine pare za ostale potrošače na lokomotivi. Taj faktor može u nekim slučajevima biti i manji, i to 1,08 pa sve do 1,03.



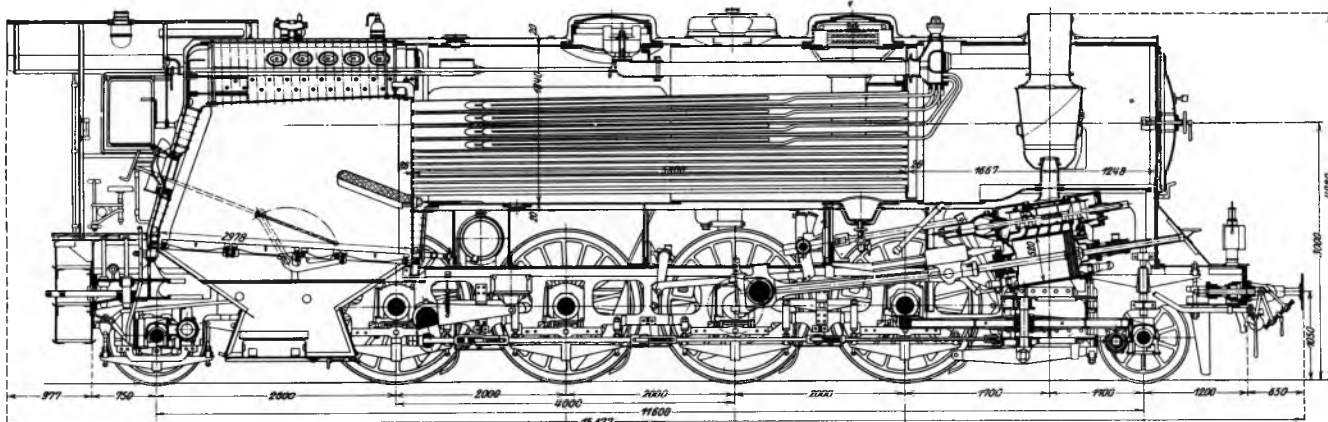
Sl. 18. Opći izgled lokomotivskog parnog kotla. Dimnjača je skinuta, pa se vidi glava pregrijača

Najpovoljniji jedinični potrošak pare d'_i u kg/J za lokomotive s jednostavnim djelovanjem na pregrijanu paru, dobiva se iz izraza:

$$d'_i = \left(a - \frac{t_p}{b} \right) \left(0,47 - \frac{d}{6630} \right) 10^{-6} \quad (2)$$

gdje je t_p temperatura pregrijane pare u °C, d promjer cilindra u mm, a a i b su konstante koje su prema podacima Meineke, prikazane u tablici 2.

Najpovoljniji jedinični potrošak pare d'_i ovisan je o vrsti pare, kotlovskom tlaku i tipu lokomotive. Za lokomotive snage $P_i \geq 600$ kW vrijednosti su d'_i od $2,20 \cdot 10^{-6}$ do $2,91 \cdot 10^{-6}$, već



Sl. 17. Presjek parne stapne lokomotive sa tri cilindra

Tablica 2

KONSTANTE a , b I OMJER α' SREDNJEG INDICIRANOG I KOTLOVSKOG TLAKA PARE, OVISNO O KOTLOVSKOM TLAKU p_k

p_k , MPa	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
a	13,0	12,4	11,8	11,3	10,8
b	59	64	69	74	80
α'	0,285	0,262	0,247	0,235	0,220

prema kotlovskom tlaku koji iznosi od 1,2 do 2,0 MPa i temperaturi pregrijane pare koja može biti 300, 350 ili 400 °C.

Najveća trajna snaga P'_i može se odrediti pomoću izraza:

$$P = Fv, \quad (3)$$

gdje se za brzinu v uzima najpovoljnija brzina lokomotive, a F je indicirana vučna sila.

Jedan dio gubitaka lokomotivskog parnog stroja opada s povećavanjem brzine lokomotive, a drugi dio tih gubitaka s povećavanjem brzine raste. Pri nekoj određenoj brzini ukupni će gubici stroja imati minimum, i zbog toga će se dobiti najpovoljniji jedinični potrošak pare d'_i u kg/J. Brzina pri kojoj se postiže d'_i jest *najpovoljnija brzina lokomotive* v' . Najpovoljnija brzina v' u m/s određuje se iz izraza:

$$v' = \frac{D_i}{d'_i \alpha' M'} \quad (4)$$

gdje je D_i količina pare u kg/s koja se treba dovesti parnom stroju, a jednaka je razlici ukupno proizvedene količine pare D i količine pare D_0 potrebne za pomoćne uređaje lokomotive; α' je omjer srednjeg indiciranog tlaka i tlaka pare u lokomotivskom kotlu (tabl. 2), a M' sadrži u sebi samo konstante određene konstrukcijom lokomotive. Za pojedine vrste službe može se najpovoljnija brzina lokomotive približno birati i iz tablice 3.

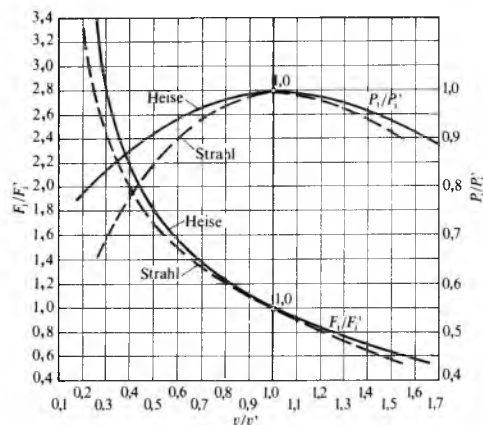
Kad se pomoću izraza (2) i (3), i za najpovoljniju brzinu lokomotive koja može biti odabrana iz tabl. 3, odrede potrebna najveća trajna indicirana snaga P'_i i najpovoljniji jedinični potrošak pare d'_i , može se iz izraza (1) odrediti potrebna proizvodnja pare D . Polazeći od potrebne proizvodnje pare D , izračunava se i određuje za projekt lokomotive potrebna ogrjevna površina kotla, površina njegove rešetke, dimenzije cilindara parnog stroja, adhezijska težina lokomotive i pripadajući broj pogonskih osovin, te konačno ukupna težina i tome primjerena masa lokomotive.

Tablica 3
NAJPOVOLJNIJA BRZINA ZA RAZLIČITE UVJETE
SLUŽBE LOKOMOTIVE

	Najpovoljnija brzina v' , m/s		
	Gorovito	Brežuljkasto	Ravnica
Lokomotive za teretne vlakove	—	11...14	14...17
Lokomotive za putničke vlakove	14...17	17...19	22...25
Lokomotive za brze vlakove	19...22	22...25	25...28

Pri projektiranju stapne parne lokomotive uobičajene konstrukcije može se pomoću *Strahlove krivulje* (sl. 19) s dovoljnom točnošću i na jednostavan način odrediti vrijednosti kotlovske vučne sile F_{ik} za različite brzine v' . Ta krivulja predstavlja *karakteristiku snage*, tj. indiciranu snagu P_i prema brzini vožnje v pri približno konstantnom opterećenju ogrjevnog površine. Strahlovu krivulju je korigirao Heise na osnovi ispitivanja dobro održavanih lokomotiva (sl. 19). Najveća trajna snaga P'_i postiže se pri najpovoljnijoj brzini v' , kojoj pripada i *najpovoljnija vučna sila* F'_i . Snaga P'_i postiže se uz najmanji jedinični potrošak pare. Iznad najpovoljnije brzine v' snaga P'_i opada zbog

povećavanja gubitaka prigušivanja, a ako je brzina manja od najpovoljnije, P'_i opada zbog manje ekspanzije pare i povećanih toplinskih gubitaka zbog dužeg trajanja hoda stapa za vrijeme jednog stapaja.



Sl. 19. Strahlova krivulja karakteristike snage i krivulja korigirana prema Heiseu

Prema Strahlu, pojam opterećenja kotla A označuje količinu topline, izraženu u MJ, proizvedenu u jednoj sekundi na 1 m² površine rešetke, a izračunava se iz izraza:

$$A = \frac{B_h H_d}{R \cdot 10^6}, \quad (5)$$

gdje je B_h izgorjela količina goriva u kg/s, H_d donja ogrjevna vrijednost goriva u J/kg, R površina rešetke u m². Za kameni ugljen ogrjevnog vrijednosti od $28 \cdot 10^6$ J/kg proizlazi prema gornjem izrazu da slijedeća opterećenja rešetke B_h/R u kgm⁻²s⁻¹ odgovaraju pojedinim opterećenjima kotla A :

B_h/R	0,089	0,125	0,160	0,215	0,250
A	2,5	3,5	4,5	6	7

Za velike lokomotive, s površinom rešetke jednakom ili većom od 2 m², smatra se $A = 3,5$ kao dobro trajno opterećenje, $A = 4,5$ kao najveće trajno opterećenje, a $A = 6$ kao kratkotrajno maksimalno opterećenje.

Podaci u tablici 2, koji služe za proračun najpovoljnijeg jediničnog potroška pare d'_i , vrijede u rasponu opterećenja kotla od $A = 2,5$ do $A = 4,5$.

Lokomotivski parni stapni stroj (sl. 20). Promjer cilindra parnog stapnog stroja može se odrediti pomoću izraza:

$$d = \sqrt{\frac{2 D_i F'_i}{z s p'_{i sr}}}, \quad (6)$$

gdje je d promjer cilindra u m, a u kompaundnim lokomotivama promjer niskotlačnog cilindra; D_i promjer pogonskog kotla lokomotive u m; F'_i najpovoljnija indicirana vučna sila u N; z broj cilindara, a u kompaundnim strojevima samo niskotlačnih cilindara; s stapaj u m; a $p'_{i sr}$ srednji indicirani tlak u Pa pri najpovoljnijem punjenju koje odgovara najpovoljnijoj brzini vožnje v' . U kompaundnim lokomotivama srednji se indicirani tlak odnosi na zajednički dijagram visokotlačnog i niskotlačnog cilindra, sa zamišljenim djelovanjem u niskotlačnom cilindru. Srednji indicirani tlak

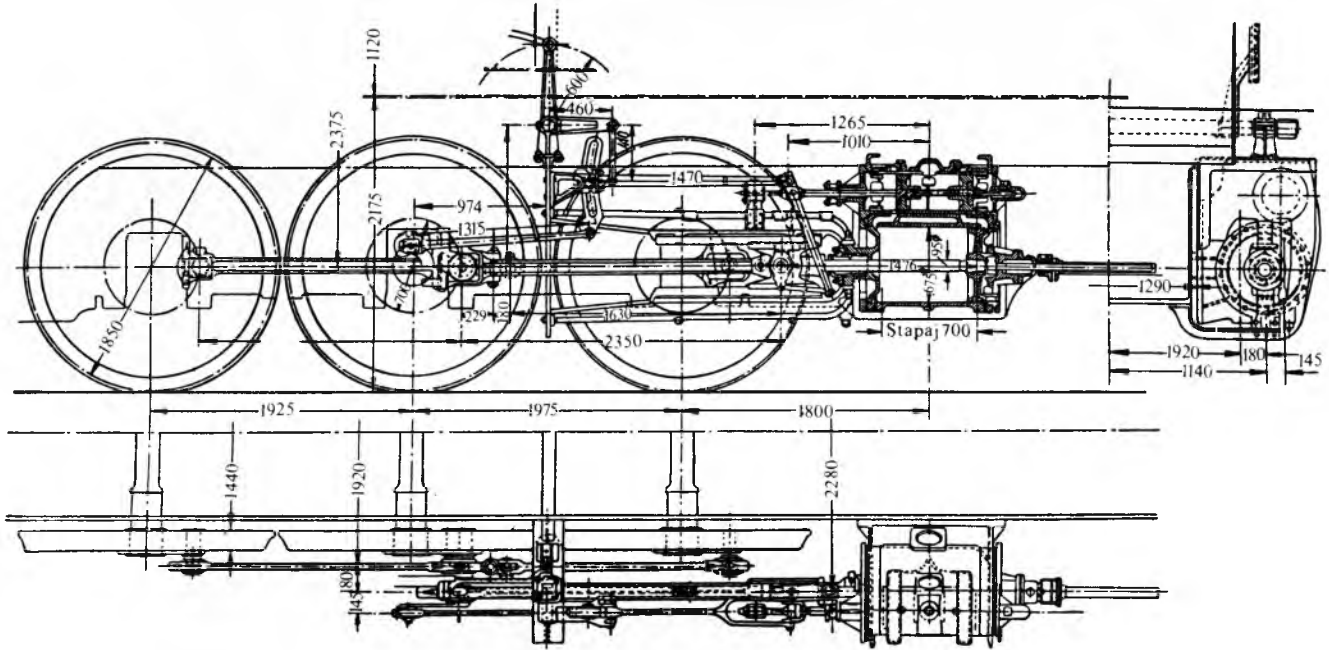
$$p'_{i sr} = \alpha' p_k \quad (7)$$

može se odrediti pomoću vrijednosti α' i p_k iz tabl. 2, pa se zatim prema izrazu (6) proračuna promjer cilindra d .

Promjer cilindra određen pomoću najpovoljnije brzine v' , odnosno s pomoću $p'_{i sr}$ nije konačan, jer Strahlov postupak u prvom redu vodi računa o ekonomičnom potrošku pare, a ne i o zahtjevu da lokomotivski pogon ima potrebnu adhezijsku vučnu silu i što veće područje vučne sile. Područje vučne sile

određuju najveća moguća vučna sila, koja je ograničena adhezijskom težinom lokomotive, i najmanja vučna sila, koju lokomotiva razvija pri maksimalnoj brzini.

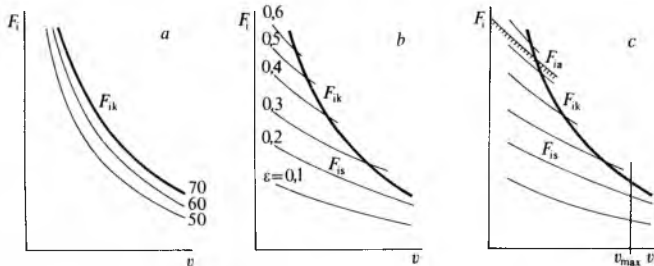
denom punjenju cilindra parnog stroja ε , gdje npr. $\varepsilon = 0,6$ znači da se ta linija odnosi na punjenje od 60%. Vučna sila ograničena veličinom stroja naziva se *cilindarska vučna sila*.



Sl. 20. Stapni parni stroj lokomotive serije C⁹ Sovjetskih željeznica

Da se zadovolje sva tri zahtjeva koja željeznički pogon traži od lokomotiva, tj. ekonomičan potrošak pare, svrsishodno prilagođivanje adhezijskoj granici (granici odupiranja) i što veće područje vučne sile, treba biti ispunjeno sljedeće: a) da se maksimalna brzina pod punim opterećenjem postiže s punjenjima od 25...30%, kod kojih je hod lokomotive miran. Pri tom će maksimalna brzina vožnje najčešće biti i najpovoljnija brzina. Pri manjim opterećenjima spomenuta se punjenja trebaju zadržavati, a vožnja se odvija uz prigušivanje pare; b) da na uobičajenoj granici odupiranja, tj. uz koeficijent odupiranja kotača o tračnice $\psi \approx 0,2$, budu punjenja od 40...50%. Povećaju li se punjenja iznad ovih vrijednosti, mogu se sile odupiranja povećavati sve do granice uvjetovane sa $F_{i\max}$, odnosno sa $\psi_{\max}$. Osim toga, nije potrebno da se adhezijska vučna sila postigne tek uz maksimalno punjenje i puni kotlovski tlak, jer je dobro da se osigura i neka određena ekspanzija pare na velikim usponima, ili da se s maksimalnim punjenjima može doseći adhezijska vučna sila i uz nešto sniženi kotlovski tlak.

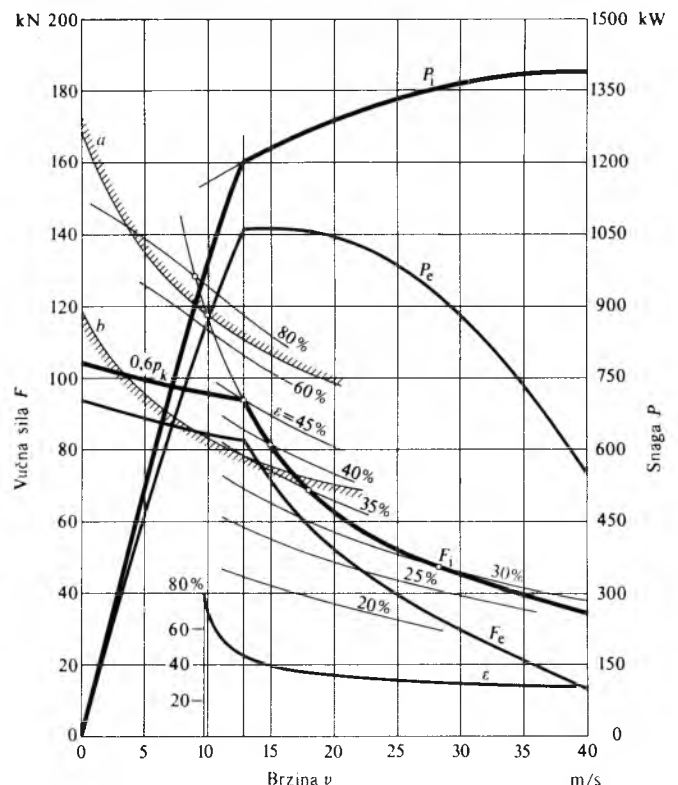
Vučna karakteristika parne stapne lokomotive. U koordinatnom sustavu *vučna sila—brzina* ($F_i—v$), na sl. 21 a, ucrtana je linija F_{ik} koja označuje ograničenje indicirane vučne sile uvjetovano veličinom kotla. Tanke linije ispod te granice odnose se na rad kotla s manjom intenzivnošću. Vučna sila ograničena veličinom kotla naziva se *kotlovska vučna sila*.



Sl. 21. Vučne karakteristike parne stapne lokomotive

Na sl. 21 b, pored linije F_{ik} , ucrtane su i linije F_{is} koje označuju ograničenje indicirane vučne sile uvjetovano veličinom punjenja cilindra parnog stroja, tj. ograničenje vučne sile uvjetovano veličinom parnog stroja. Svaka linija F_{is} odgovara odre-

Tako prikazano polje radnog područja lokomotive s gornje je strane ograničeno linijom F_{ia} koja označuje ograničenje vučne sile uvjetovano veličinom adhezijske težine lokomotive (sl. 21 c). Vučna sila ograničena adhezijskom težinom lokomotive naziva se *adhezijska vučna sila*. To radno područje lokomotive ograničeno je i maksimalnom brzinom vožnje $v_{\max}$, koja je određena konstrukcijom lokomotive. Takav dijagram (sl. 21 c), koji prikazuje karakteristike stapne parne lokomotive, naziva se i *vučni pasoš lokomotive*.



Sl. 22. Vučni pasoš dvocilindrične parne stapne lokomotive serije 03 Njemačkih željeznica

Vučni pasoš s karakteristikama za puno opterećenje jedne dvocilindrične lokomotive s jednostavnim strojem i pregrijanom parom prikazan je na sl. 22. U tom vučnom pasosu unesene su i linije efektivne vučne sile F_e (na kuki lokomotive) i efektivne snage P_e .

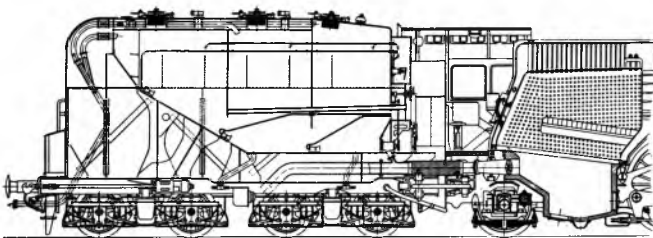
Jedan od najvažnijih zadataka pri projektiranju lokomotiva jest da se međusobno usklade veličine kotla, parnog stroja i adhezijske težine. To usklađivanje može projektant dobro pratiti konstruiranjem dijagrama vučnih karakteristika za lokomotivu koju projektira. Izgraditi lokomotivu, dobro usklađenu s obzirom na spomenute tri veličine, više je stvar umijeća konstruktora i njegove prakse nego poznavanje teorije.

Lokomotive ložene ugljenom prašinom

Neposredno pred prvi svjetski rat i za vrijeme rata željeznice u Sjevernoj i Južnoj Americi nastoje iskoristiti jeftine otpatke ugljena, te ispituju izgaranje ugljene prašine u lokomotivama.

Nakon dugotrajnih pokusa ustale su se 1928. godine u Njemačkoj dvije izvedbe takvih lokomotiva. Jednu od njih je izgradila tvrtka Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft (AEG), a drugu Studiengesellschaft für Kohlenstaubfeuerung auf Lokomotiven (Stug). Osnovna razlika između tih dvaju tipova lokomotiva jesu gorionici. Oba tipa imaju lako upaljivu i eksplozivnu ugljenu prašinu smještenu u potpuno zatvorenom spremniku na tenderu, odakle se pužnim prijenosnikom ugljena prašina transportira do kotla, i pomiješana sa zrakom kroz gorionike ubacuje u ložište. Za pogon pužnog prijenosnika u izvedbi Stug služi posebna parna turbina koja istodobno pokreće i ventilator, a u izvedbi AEG posebni parni stroj. Oko 60% od ukupnog zraka za izgaranje ulazi kao sekundarni zrak neposredno u ložište. Jedan gorionik ubaci u satu do 1500 kg ugljene prašine (0,42 kg/s). Pepeo izgorjele ugljene prašine vrlo je sitan i lagan pa ne pada u pepeljaru nego ga propuh iznosi kroz dimnjak. Izbačeni pepeo zagađuje okoliš, te stoga upotrijebljeni ugljen smije sadržavati najviše 30% pepela.

Uređaji lokomotiva (u izvedbi AEG i Stug) loženih ugljenom prašinom bili su prilično komplicirani. Zbog toga je i došlo do novog konstrukcijskog rješenja kojim su uređaji za ugljenu prašinu do te mjere pojednostavnjeni da nemaju nikakvih mehaničkih pokretanih dijelova (sl. 23). Ugljena se prašina pneumatski prenosi iz spremnika tendera takve lokomotive. Ložište je hermetički zatvoreno prema vanjskom zraku i nema dovođenja sekundarnog zraka. Konstrukcijom gorionika postiže se takvo izgaranje da lokomotiva niti dimi niti iskri, a niti se okoliš zagađuje pepelom.



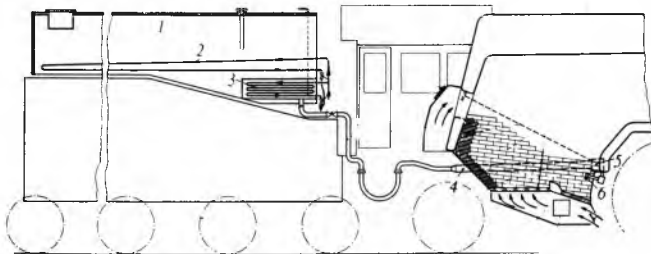
Sl. 23. Tender lokomotive ložene ugljenom prašinom

Opterećenje ogrjevne površine lokomotivskog kotla loženog ugljenom prašinom mnogo je veće nego u lokomotivi s rešetkom i dostiže do 0,022 kg/m² pare u sekundi, pa i nešto više. Kisik iz zraka ima dobar pristup česticama goriva pa se uz manji pretičak zraka postiže veća iskoristivost kotla. Kad se naloži takva lokomotiva, potrebno je svega 45 minuta da se dobije količina pare koja pokreće lokomotivu. Osim prašinom smeđeg ugljena, lokomotive se mogu ložiti i prašinom kamenog ugljena. Tada im se povećava akcijski doseg (akcijski radijus) zbog veće ogrjevne vrijednosti kamenog ugljena.

Lokomotive ložene uljem

Loženje lokomotiva uljem ekonomično je u zemljama gdje ima malo ugljena a dovoljno zemnog ulja, ili u kojima je ložno ulje jeftino. Najčešće je gorivo mazut, tj. ostatak pri destilaciji

sirove nafte. Ogrjevna je vrijednost mazuta visoka, oko 41,9 MJ/kg, tako da 1 kg ulja proizvede u kotlu 10...12 kg zasićene pare, dok 1 kg kamenog ugljena proizvodi samo 6...7 kg pare. Najstarije mehaničko loženje na lokomotivama je loženje uljem. Već je 1885. godine Urquhart upotrijebio mazut za loženje lokomotiva u Rusiji. Budući da je to ulje gusto, potrebno ga je već u tenderu zagrijati na ~50 °C (sl. 24). U posebnom predgrijaču, smještenom na lokomotivi, ono se dalje zagrijava do ~100...110 °C. Tek pri temperaturi iznad 100 °C ono je dovoljno rijetko da se, dovedeno gorioniku, može raspršivati u ložište. Da bi se postigao što duži put izgaranja, lokomotive s glavnim loženjem na ulje imaju najčešće gorionik ugrađen u prednjoj stijeni ložišta. Zbog vrlo visokih temperatura izgaranja (temperatura plamena doseže do 2000 °C), čitava pepelara i donji dio kotlovskog ložišta obzidani su šamotnim opekama.



Sl. 24. Shema lokomotivskog uređaja za loženje uljem. 1 spremnik ložnog ulja, 2 zagrijač u spremniku ulja, 3 zagrijač iznad ispusta ulja, 4 predgrijač ulja, 5 zasun za reguliranje goriva, 6 gorionik

Opeke dugo zadržavaju toplinu pa su i nakon duže stanke u loženju tako vruće da se ulje na njima ponovno može upaliti. Ako se želi naložiti hladna lokomotiva, mora se ulje raspršiti pomoću pare iz nekog drugog izvora ili pomoću zraka pod tlakom. Ta mješavina pare i ulja, odnosno zraka i ulja, zapali se u ložištu na vatri od drva. Kad u kotlu naraste tlak do ~0,15 MPa, može se loženje dalje nastaviti s vlastitom parom.

Loženje uljem može služiti i kao dodatno loženje kotlova na ugljen da se pokriju vrhovi opterećenja. Gorionici za dodatno loženje uljem znatno su manji nego kad je loženje uljem glavno, a ugrađuju se iznad ili ispod ložnih vrata.

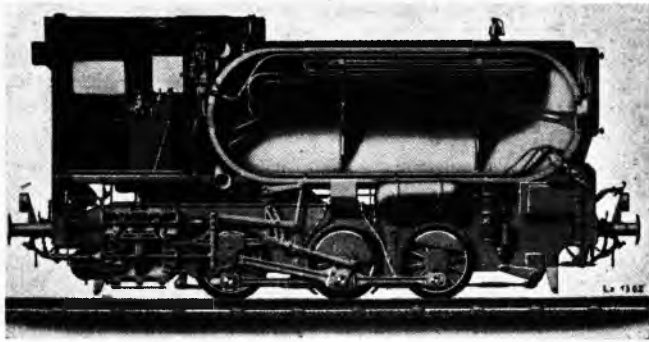
Lokomotive bez vatre

To su parne lokomotive koje ne proizvode paru u vlastitom kotlu, nego od vremena do vremena pune parom svoj visokotlačni spremnik iz nekog vanjskog stacionarnog parnog kotla. Djelovanje lokomotivskog parnog uređaja bez vatre temelji se na svojstvu vode da pod visokim tlakom akumulira velike količine toplinske energije i da ju postepenim smanjivanjem tlaka oslobađa, dajući tako dovoljno pare za pogon male lokomotive. To je predložio još 1873. godine američki zubar dr E. Lamm. Takav se uređaj mnogo primjenjivao na malim manevarskim lokomotivama u pogonima gdje postoji opasnost od eksplozije uzrokovane iskrom, i na lokomotivama koje rade u zatvorenim prostorima.

Lokomotive bez vatre na svom fremu nose veliki, dobro izoliran spremnik vode (kotao). Kad se prvi put stavlja u pogon, približno se 2/3 spremnika napune hladnom ili predgrijanom vodom pa se zatim priključi na parni vod (vod za punjenje) nekog stabilnog kotlovskog postrojenja. Voda se u spremniku zagrijava dovedenom parom do temperature koja odgovara vrenju vode pod tlakom stabilne kotlovske instalacije. Time se u spremniku lokomotive postiže kotlovski tlak p_k , približno jednak tlaku u stabilnoj kotlovskoj instalaciji. Nakon punjenja lokomotiva neko određeno vrijeme radi samostalno uz neprestano opadanje tlaka u kotlu. Rad lokomotive poslije punjenja parom ovisi o njenom kapacitetu i može trajati 5...6 sati.

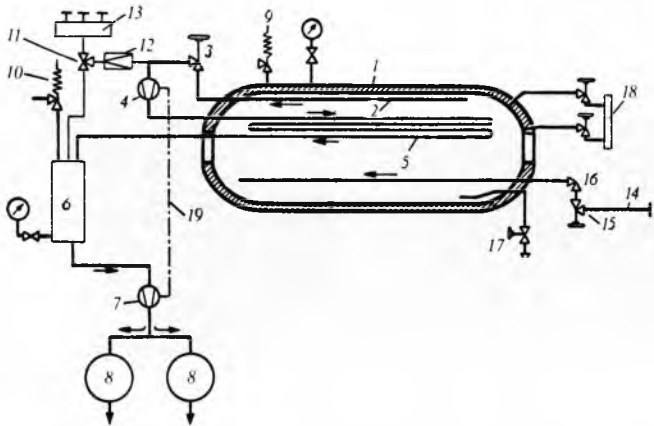
Kapacitet lokomotive bez vatre ovisi o volumenu spremnika (kotla) lokomotive i o kotlovskom tlaku p_k . Što je tlak viši, to je i količina akumulirane energije veća, a i iskorištenje energije je povoljnije. Zbog toga je oko 1938. godine bečki inženjer Gilli konstruirao lokomotivu visokog tlaka bez vatre, koja je imala spremnik s vrućom vodom tlaka 12 MPa.

Lokomotive bez vatre s tlakom u kotlu $\sim 1,5 \dots 1,6$ MPa nazivaju se *niskotlačnim* lokomotivama, a s tlakovima $\sim 4 \dots 14$ MPa *visokotlačnim*. Niskotlačne lokomotive bez vatre troše, već prema punjenju cilindra i načinu vožnje, $7 \dots 10,5$ kg/J pare, a za visokotlačne taj se potrošak može računati sa $3,3 \dots 5,3$ kg/J.



Sl. 25. Visokotlačna Henschel-Gillijeva lokomotiva bez vatre

Presjek visokotlačne Henschel-Gillijeva lokomotive bez vatre i shema pogonskog uređaja prikazani su na sl. 25 i 26. Ta je lokomotiva građena 1952. za normalnu prugu, a njena masa u službi iznosi ~ 60 t. Visokotlačna para iz spremnika (kotla) 1 svodi se od 12 MPa na radni tlak od $1 \dots 1,4$ MPa (sl. 26). Iza visokotlačnog regulatora s prigušnim ventilom 4 para se provodi kroz sustav cijevi 5 smještenih u visokotlačnom spremniku i tako se pregrrije na temperaturu ovisnu o temperaturi u kotlu. Zahvaljujući konstantnom radnom tlaku takva lokomotiva nema nikakvih promjena u vučnim odnosima za vrijeme pogona, pa se s njom postupa kao s loženom lokomotivom.



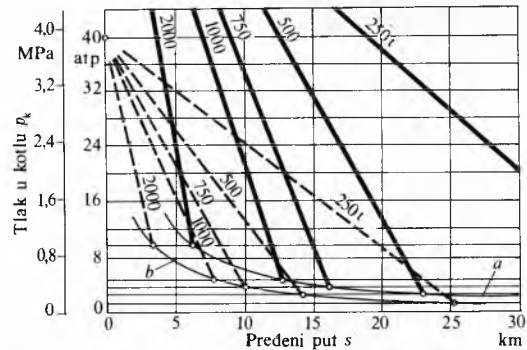
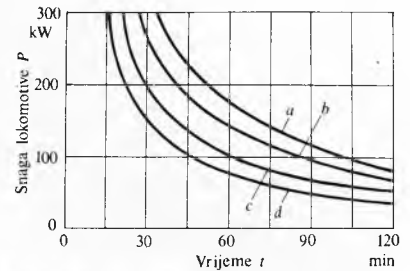
Sl. 26. Shema spajanja visokotlačne Henschel-Gillijeva lokomotive bez vatre. 1 spremnik pare visokog tlaka, 2 cijev za odvod pare, 3 glavni ventil, 4 visokotlačni regulator s prigušnim ventilom, 5 pregrijač, 6 spremnik za izjednačenje, 7 niskotlačni regulator, 8 cilindar parnog stroja, 9 visokotlačni sigurnosni ventil, 10 niskotlačni sigurnosni ventil, 11 automatski pretočni ventil, 12 reduksijski ventil, 13 oduzimač pare za pomoćne strojeve, 14 vod za punjenje, 15 ventil za punjenje, 16 protutlačni ventil, 17 ventili za ispuštanje vode, 18 vodikazno staklo, 19 mehanička spojica između visokotlačnog i niskotlačnog regulatora

Minimalni tlak u kotlu ovisan je o veličini tereta koji lokomotiva treba vući. Da bi lokomotiva još mogla pokretati samu sebe, može tlak u kotlu pasti na $\sim 0,15$ MPa.

Snaga nije karakteristično obilježje neke lokomotive bez vatre, jer snaga za takvu lokomotivu nije konstantna. Mjerodavna veličina za takve lokomotive jest akumulirana količina toplinske energije u kotlu, pa je snaga lokomotive ovisna o dužini vremena kroz koje se akumulirana energija iskorišćuje. Neko mjerilo za upotrebu lokomotive u eksploataciji jest prema tome produkt *snaga $\times$ vrijeme vožnje*. U praktičnom se pogonu ta snaga određuje prema brzini vožnje i teretu koji lokomotiva vuče.

Dijagram na sl. 27 pokazuje kako dugo može Henschel-Gillijeva lokomotiva bez vatre sa $12,6 \text{ m}^3$ vode u kotlu odavati neku određenu snagu. Prema liniji *a*, snagu od 220 kW može

Sl. 27. Smanjenje snage Henschel-Gillijeva lokomotive bez vatre prema dužini vremena vožnje; pad tlaka: *a* od 8 na 0,2 MPa, *b* od 8 na 1,3 MPa, *c* od 4 na 0,2 MPa, *d* od 4 na 1,3 MPa

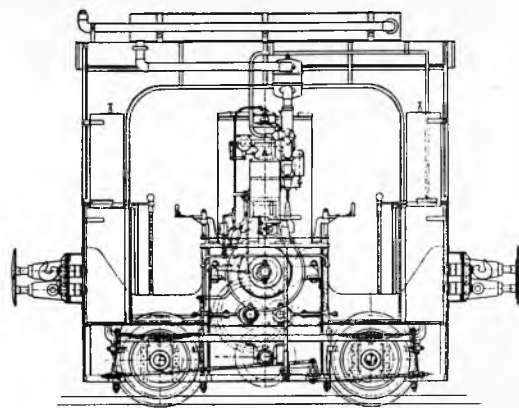


Sl. 28. Krivulje zavješene tereta Henschel-Gillijeva lokomotive bez vatre, mase 60 t, za početne tlakove od 8 i 4 MPa

lokomotiva odavati kroz 45 minuta, a 147 kW nekih 70 minuta. Iz dijagrama na sl. 28 vidi se koliki put može lokomotiva s jednim punjenjem spremnika vući bez prekida neki zavješeni teret na ravnoj i horizontalnoj pruzi. Linije *a* i *b* pokazuju najniže tlakove u kotlu, pri kojima lokomotiva još može vući pojedine zavještene terete. Na primjer: lokomotiva s početnim tlakom od 4 MPa može vući zavješeni teret od 500 t na ravnoj i horizontalnoj pruzi oko 14 km, a 23 km isti zavješeni teret ako je početni tlak u kotlu 8 MPa.

DIZELSKIE LOKOMOTIVE

Sličan put u razvoju, kakav je na početku XIX stoljeća imao parni stroj, imao je potkraj tog stoljeća dizelski motor. I dizelski je motor isprva bio razvijen kao čisti stabilni stroj bez mogućnosti da posluži na vozilima kao vučni motor. Za razliku od dizelskog motora već osamdesetih godina XIX stoljeća pokušalo se ugraditi u lokomotivu mali Daimlerov brzohodni motor s rasplinjačem. Jedna od takvih lokomotiva, izgrađena 1892. godine u Esslingenu, imala je ugrađen Daimlerov benzinski motor snage 7,3 kW (sl. 29).



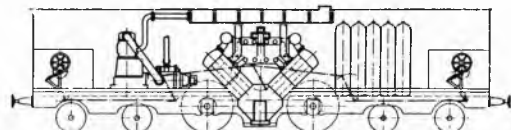
Sl. 29. Daimlerova motorna lokomotiva izgrađena u Maschinenfabrik, Esslingen, 1892. godine

Prvi poticaj da se izgradi jedna velika motorna lokomotiva s dizelskim motorom dao je 1906. godine Klose. On je u zajednici s Dieslom i tvornicom Gebr. Sulzer, Winterthur, izgradio u vremenu od 1910. do 1912. prvu veliku dizelsku lokomotivu s dvotaktnim četverocilindričnim dizelskim motorom snage 735 kW (sl. 30 i 31). Raspored osovine na toj lokomotivi bio je 2'B2'. Dizelski je motor bio spojnim motkama kruto povezan s pogonskim kotačima, pa se za vrijeme stajanja lokomotive i motor morao zaustaviti. Budući da se dizelski motor ne može pokrenuti pod opterećenjem, bilo je potrebno osigurati neku vanjsku energiju da se pokrene lokomotiva s mjesta sve dok motor ne

postigne brzinu vrtnje paljenja. To se postiglo komprimiranim zrakom iz baterije čeličnih boca smještenih u lokomotivi, koje je punio kompresor gonjen pomoćnim dizelskim motorom. Tako je, pri malim brzinama lokomotive, sve do približno 3 m/s, dizelski motor radio kao zračni motor. Od te brzine dalje motor može već normalno raditi kao dizelski motor.



Sl. 30. Diesel-Klose-Sulzerova lokomotiva sa skinutom bočnom stijenom



Sl. 31. Raspored mašinskog postrojenja Diesel-Klose-Sulzerove lokomotive

Prve probne dizelske lokomotive dugo su se ispitivale. Razlog tome zastoju nije bila eventualna konstrukcijska nerazrađenost tadašnjeg dizelskog motora, nego što tada još nisu postojali prijenosnici koji bi omogućili da se način rada dizelskog motora prilagodi zahtjevima lokomotivskog pogona.

Dvadesetih godina XX stoljeća, tehničke i ekonomske prednosti dizelskih lokomotiva potiskuju benzinski motor iz lokomotivskog pogona. Benzinski se motor još neko vrijeme zadržava u gradnji pogonskih kola, jer još nije postojao dovoljno malen i dovoljno lagan dizelski motor, ali početkom tridesetih godina XX stoljeća dizelski motor potpuno istiskuje benzinski motor iz gradnje pružnih vozila. Dvije moderne dizelske lokomotive prikazane su na sl. 32 i 33.



Sl. 32. Univerzalna dizelsko-električna lokomotiva Jugoslavenskih željeznica za manevarsku i laku pružnu službu, snage 600 kW. Izgrađena 1961. godine u tvornici Đuro Đaković (Slavonski Brod) prema licenci Brissoneau & Lotz, Paris



Sl. 33. Pružna dizelska lokomotiva snage 2200 kW, izgrađena u tvornici American Locomotive Co., Schenectady, SAD, za Union Pacific Railroad

Prednosti dizelskih lokomotiva u usporedbi s parnim lokomotivama jesu: vrlo visoka termička iskoristivost dizelskog motora, okretni moment kotača je jednoličniji, mogu raditi i na prugama s malo vode ili s vodom loše kvalitete. Zbog lakog smještaja potrebnih količina pogonskog goriva i jer ne moraju dopunjavati vodu kao parne lokomotive dizelske lokomotive vrlo su prikladne za vožnju na dugim relacijama bez stajanja. Zahvaljujući velikom akcijskom dosegu (akcijskom radijusu) dizelskih lokomotiva, treba ih manji broj nego parnih lokomotiva da se u eksploataciji postigne isti učinak. Za vuču brzih vlakova dizelske lokomotive imaju prednost u većoj čistoći, boljoj mogućnosti ubrzanja vlaka i u izvršnoj vidljivosti iz kabine strojovođe. U usporedbi s parnim lokomotivama nedostaci su dizelskih lokomotiva znatno veća nabavna cijena i visoki troškovi održavanja i popravaka preciznog i osjetljivog dizelskog motora.

Dizelski motor za željezničku vuču

Vučni dizelski motor počeo se razvijati iz automobilskeg motora. U njegovu razvoju konstruktori su najviše pažnje posvećivali problemima hlađenja i ležaja, jer je taj motor izložen jakim unutarnjim i vanjskim dinamičkim opterećenjima. Među vanjska dinamička opterećenja vučnog dizelskog motora spadaju i jaki udarci što ih motor dobiva prilikom prijelaza vozila preko spojeva i ostalih neravnina tračnica. Što je motor robustnije građen, to su mu i dimenzije veće pa je manje pristupačan u ograničenom prostoru tračničkih vozila, a to je nepovoljno za veoma opterećene motore.

S obzirom na konstrukciju, snagu i maksimalnu brzinu vrtnje, postoje brojni različiti dizelski motori za željezničku vuču.

Raspon snaga vučnih dizelskih motora, osim onih najmanjih, može se razvrstati na slijedeća područja: područje manjih snaga, 300...1100 kW; područje srednjih snaga, 650...2000 kW; područje velikih snaga, 1500...3700 kW; područje vrlo velikih snaga, 3100...5300 kW.

Unutar područja vrlo velikih snaga danas postoji dizelski motor SEMT-Pielstick PAG-280 snage 4640 kW, koji ima 18 cilindara. Tvrtka Pielstick namjerava povećati snagu tog motora na 5300 kW povećavajući mu kutnu brzinu od 100 rad/s (1050 min^{-1}) na 115 rad/s (1100 min^{-1}).

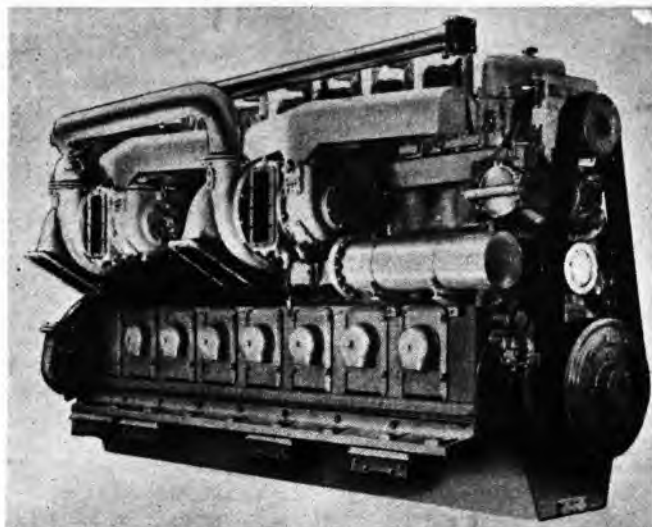
Prema kutnoj brzini osovine (odnosno broju okretaja osovine), vučni dizelski motori mogu biti: sporohodni, kutna brzina do 105 rad/s (do 1000 min^{-1}); srednje brzi, kutna brzina 105...157 rad/s ($1000...1500 \text{ min}^{-1}$); brzohodni, kutna brzina više od 157 rad/s (preko 1500 min^{-1}).

U Americi se pretežno grade dvotaktni sporohodni motori kutne brzine osovine 68...105 rad/s ($600...1000 \text{ min}^{-1}$), a u Evropi četverotaktni motori s kutnom brzinom 78...167 rad/s ($750...1600 \text{ min}^{-1}$).

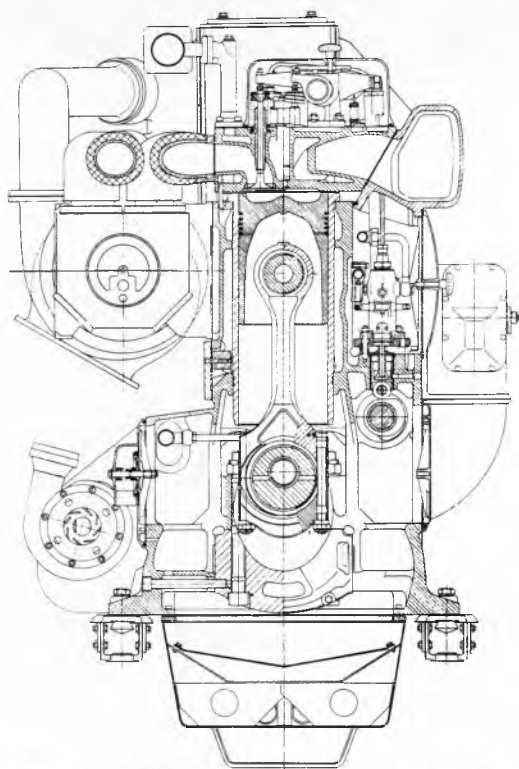
Pojam brzohodnosti dizelskih motora može se odnositi i na srednju brzinu klipa. Srednja je brzina klipa u različitim vučnim motorima $\sim 7...12 \text{ m/s}$. Uz jednake konstrukcijske i radne uvjete, vijek se trajanja motora skraćuje što je veća srednja brzina klipa. Vučni dizelski motori s obzirom na srednju brzinu klipa mogu biti brzohodni i srednjohodni. Granicu između njih čini srednja brzina klipa od 9 m/s.

Brzohodni dizelski motori za željezničku vuču imaju slijedeće prednosti: znatno su manjih dimenzija od sporohodnih motora istih snaga, pa su i pristupačniji u skučenom prostoru lokomotive, što uvelike olakšava njihovo održavanje. Zbog male duljine brzohodnog motora i lokomotiva može biti kraća. Brzohodni motori su i mnogo lakši od sporohodnih motora pa stoga u prvom redu dolaze u obzir za ugradbu u pogonska kola. Na željezničkim prugama s malim dozvoljenim osovin-skim pritiscima često se upotrebljavaju lokomotive s brzohodnim umjesto lokomotiva sa sporohodnim motorima, jer su razlike težina motora velike. Npr., prema podacima iz 1958. godine Maybachov motor od 880 kW sa 157 rad/s (1500 min^{-1}) ima masu od 4,65 t, a Sulzerov motor iste snage sa 78 rad/s (750 min^{-1}) ima $\sim 9,7 \text{ t}$. Budući da se industrijske lokomotive obično kreću po prugama male nosivosti, to su za njih motori male težine veoma važni. Primjenom brzohodnih motora ne smanjuje se masa lokomotive samo zbog manje težine motora

nego i zbog manje težine svih ostalih dijelova koji provode snagu dalje na pogonske kotače i pomoćne strojeve, jer za prenošenje neke određene snage ti dijelovi mogu biti to slabije dimenzionirani što je njihova brzina vrtnje veća.



Sl. 34. Lokomotivski dizelski motor sa 8 cilindara, tipa M 282, tvornice MaK Maschinenbau GmbH, Kiel. Snaga motora 1100 kW pri 1000 min⁻¹, srednja brzina klipa 9,35 m/s



Sl. 35. Presjek lokomotivskog dizelskog motora tipa M 282

Pojedini dijelovi brzohodnih motora moraju biti proizvedeni unutar relativno strogih tolerancija, pa popravak tih motora otežava održavanje lokomotiva u zemljama sa slabije razvijenom strojogradnjom, tim više što se od lokomotiva svuda na svijetu zahtijeva u prvom redu velika pouzdanost u pogonu. U tom su pogledu mnogo povoljniji sporohodni motori zbog grubljih proizvodnih tolerancija, pa su i popravci jednostavniji i lakši. Takvi motori, zbog svoje robusnosti, imaju duži vijek trajanja, što se i traži od dizelskih motora za željezničku vuču.

S razvojem dizelskih motora neprestano se povećavalo vrijeme između redovnih glavnih popravaka motora. Ranije je bilo

potrebno oko 10000 radnih sati između dva glavna popravka, a danas 20000 pa i 30000 sati, što, dakako, ovisi o vrsti dizelskog motora.

Izgled jednog od dizelskih motora za željezničku vuču i njegov presjek prikazani su na sl. 34 i 35.

Lokomotivski prijenosnici

Visok stupanj ekonomičnosti u radu dizelskog motora bio je jedan od glavnih razloga da se nastojalo primijeniti taj motor za pogon lokomotiva. Budući da je na prvoj pružnoj dizelskoj lokomotivi, građenoj 1912. godine, dizelski motor bio neposredno vezan spojnim motkama s pogonskim kotačima lokomotive (sl. 30 i 31), komprimirani je zrak služio za pokretanje lokomotive s mjesta.

Jedna od najvećih mana direktnog prijenosa jest ta što komprimirani zrak prilikom pokretanja ohladi motor do te mjere da se on teško upali pri prijelazu na normalni rad s gorivom. Pri tom dolazi do velikih temperaturnih promjena u motoru, koje mogu dovesti do pucanja pojedinih njegovih dijelova.

U današnje dizelske lokomotive ugrađuju se između dizelskog motora i pogonskih kotača prijenosnici, pomoću kojih se prilagođuju karakteristike i svojstva dizelskog motora zahtjevima lokomotivskog pogona. Najčešće se primjenjuju slijedeći tipovi prijenosnika: mehanički prijenosnici, hidraulički prijenosnici, električni prijenosnici i čitav niz prijenosnika koji su kombinacije od tih triju osnovnih tipova.

Pneumatski prijenos koji je primijenjen na jednoj lokomotivi od 735...880 kW i na nekoliko manjih lokomotiva nije bio ekonomičan. U takvim lokomotivama dizelski motor pokreće zračni kompresor, a komprimirani zrak obavlja rad u lokomotivskim cilindrima na isti način kao para u cilindrima parne stape lokomotive.

Prijenosnici dizelskih lokomotiva moraju zadovoljiti slijedeće zahtjeve: 1. Transformacija okretnog momenta motora treba da bude takva da se rezultirajuća krivulja vučne sile što više prilagodi idealnoj vučnoj sili (sl. 62 do 65), jer se time postiže iskorisćenje pune snage motora pri svim brzinama vožnje. Od svakog se prijenosnika zahtijeva veliko povećanje ulaznog okretnog momenta, da bi polazak lokomotive pod velikim opterećenjem bio lagan. Omjer između okretnog momenta na izlaznoj strani prijenosnika pri brzini vožnje nula i pri maksimalnoj brzini vožnje jest od 5:1, za pogonska kola, do 10:1 za univerzalne lokomotive. Taj se omjer naziva *puna transformacija okretnog momenta*. 2. Iskoristivost prijenosnika η i iskoristivost primarne snage prijenosnika ε treba da budu što viši. 3. Pri uvrštavanju prijenosnik mora djelovati kontinuirano, odnosno pri mijenjanju pojedinih stupnjeva brzine, ne smije nastati diskontinuitet u prenošenju snage. 4. Prijenosnik mora biti reverzibilan, tj. da bez ikakva rizika omogućuje promjenu smjera vožnje dok lokomotiva stoji, a eventualno i za vrijeme kretanja lokomotive. 5. Konstrukcija prijenosnika mora biti solidna, malih dimenzija i male težine. Mala težina prijenosnika vrlo je važna kad je dozvoljeno osovinsko opterećenje lokomotiva malo. 6. Prijenosnik mora biti robusan radi sigurnosti u pogonu i da bi troškovi njegova održavanja bili mali. 7. Prijenosnik mora biti neosjetljiv prema klimatskim nepogodama, tj. prema ekstremnim temperaturama i snijegu.

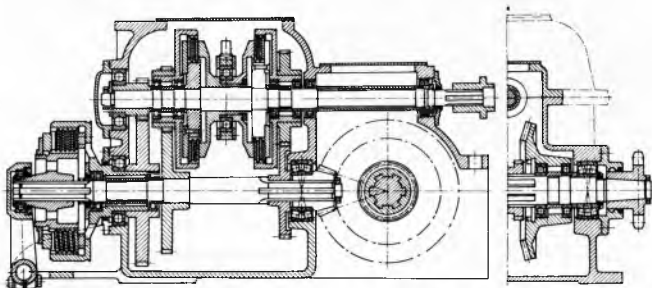
Mehanički prijenosnik. Pod prijenosnikom se razumijeva cjelokupan mehanizam za prenošenje snage između dizelskog motora i pogonskih osovina lokomotive. Prema tome, mehanički prijenosnik sastoji se od mehaničkog mjenjača i lančanika s lancima za prenošenje snage na pogonske osovine, ili nekih drugih elemenata određenih njegovim konstrukcijskim rješenjem. Prijenos snage na pogonske osovine dizelskih mehaničkih lokomotiva do 80 kW izvodi se obično pomoću lanaca. Za lokomotive od 150 kW i jače obično se primjenjuju spojne motke.

Iz tehničkih i ekonomskih razloga mehanički se prijenosnici upotrebljavaju uglavnom na lokomotivama manjih snaga (gornja granica ~250...350 kW). Izgrađeno je i nekoliko lokomotiva većih snaga s mehaničkim prijenosnikom, no te su lokomotive iznimke. Među takve spadaju lokomotiva 2E1 Sovjetskih željeznica snage 800 kW, izgrađena 1927. godine, i lokomotiva Bri-

tanskih željeznica snage 1500 kW, izgrađena 1951. godine (najveća lokomotiva svijeta s mehaničkim prijenosnikom).

Mehanički prijenosnici za sasvim male snage još ponekad imaju mjenjače slične automobilskim. Ti mjenjači mijenjaju pojedine stupnjeve brzina ubacivanjem različitih zupčanika u zahvat s njihovim parovima. Primjena je takvih mjenjača danas ograničena na uskotračne industrijske lokomotive do ~22 kW.

Za lokomotive većih snaga takvi mjenjači nisu prikladni, jer pogrešnim uvrštavanjem pojedinih stupnjeva brzine, zbog velikih masa vlaka, prijenosnik bi se veoma oštetiio ili potpuno uništio, a bile bi potrebne i velike sile za uvrštavanje različitih stupnjeva brzina. Zato lokomotive snage do 200 kW imaju *mjenjače sa spojka* (sl. 36). Mjenjač sa spojka ima sve zupčanike neprestano u zahvatu, a za svaki stupanj brzine postoji posebna tarna spojka (*spojka mjenjača*) kojom se pripadajući par zupčanika uključuje u prijenos snage. Za manje se snage spojke mjenjača uključuju pomoću ručnih poluga, a za veće snage pomoću hidrauličkih, pneumatskih ili elektromagnetskih uređaja.



Sl. 36. Mehanički mjenjač sa spojka

S povećanjem snage povećavaju se dimenzije spojaka mjenjača tako naglo da ih se za velike snage gotovo i ne može smjestiti u lokomotivu. Za te velike snage ima i poteškoća s odvođenjem topline stvorene trenjem u spojci mjenjača pri pokretanju vlaka s mjesta. Zbog velikog trenja troše se lamele u spojci pa ih često treba mijenjati, što povećava troškove održavanja. To su razlozi koji ograničavaju primjenu mehaničkog prijenosnika za velike snage, unatoč tome što su ti prijenosnici jeftiniji i što imaju bolju iskoristivost od ostalih vrsta prijenosnika.

Mehanički prijenosnici uobičajenih veličina imaju vrlo povoljnu iskoristivost η , i praktički se ne zagrijevaju. Pri tom se ne misli na zagrijavanje pobuđeno klizanjem spojke mjenjača pri polasku vlaka. Stoga mehanički prijenosnici ne trebaju uređaj za hlađenje i mogu pri svim brzinama raditi pod punim opterećenjem po volji dugo vremena. Dobro svojstvo mehaničkih prijenosnika jest mala težina i mali obujam.

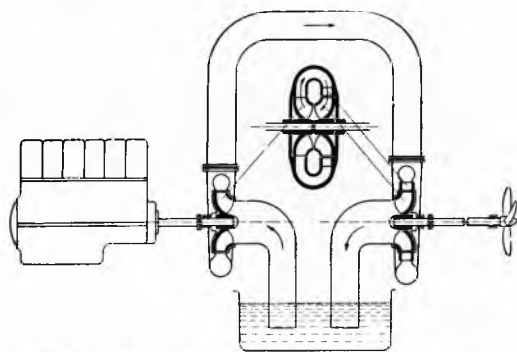
Nedostaci su mehaničkih prijenosnika: osjetljivost prema pogrešnom uvrštavanju stupnja brzina, nepovoljna iskoristivost primarne snage ϵ i prekid djelovanja vučne sile pri mijenjanju stupnja brzine.

Prekid djelovanja vučne sile pri promjeni stupnja brzine nastaje i u mehaničkim mjenjačima s ubacivanjem zupčanika i u onima sa spojka. Nastojanja konstruktora da se spojka koja je u zahvatu potpuno isključi tek kad je spojka sljedećeg stupnja uključena, nisu mnogo pridonijela da se eliminiira prekid djelovanja vučne sile, i to se često smatra jednim od najvećih nedostataka mehaničkog prijenosnika. Prije više godina nastojalo se pokazati ispitivanjima teških vlakova na horizontalnim prugama i prugama velikih uspona, da taj nedostatak u eksploataciji i održavanju lokomotiva nema tako veliko značenje. Mnogo je veći nedostatak što mjenjač ima ograničen broj stupnjeva, pa se događa da lokomotiva pod teškim teretom mora voziti s nižim stupnjem brzine, jer se viši stupanj ne da ubaciti zbog prevelikog skoka. Posljedica toga jest smanjena brzina vožnje i gubitak u vremenu. Taj nedostatak imaju svi mehanički mjenjači, pa i oni s automatskim mijenjanjem brzina. Što mjenjač ima više stupnjeva, to je utjecaj tog nedostatka manji. Lokomotivski mehanički mjenjači obično imaju 3...8 stupnjeva brzina.

Hidraulički prijenosnik. Hidraulički lokomotivski prijenosnici djeluju na hidrodinamičkom ili hidrostatskom principu. Hidrostatski se prijenosnici uglavnom upotrebljavaju za pogon lokomotivskih pomoćnih strojeva i uređaja, a vrlo rijetko za glavni pogon. Hidrodinamički prijenosnici upotrebljavaju se za glavni pogon takvih vozila. Hidraulički prijenosnici imaju malu težinu i malo dijelova izloženih habanju, i zato se često primjenjuju na željezničkim vozilima.

Hidrostatski prijenosnici rade sa statičkim tlakom tekućine, pa su stoga sastavljeni od stapnih i njima sličnih strojeva. Hidrodinamički prijenosnici iskorištavaju energiju gibanja tekućine koja struji, pa su sastavljeni od rotacijskih strojeva s lopaticama. Pri hidrostatskom prijenosu dizelski motor pokreće stapnu pumpu. Tekućina se iz pumpe vodi u stapni radni stroj prijenosnika koji, obično posredstvom zupčanika, pokreće pogonske kotače vozila. U hidrodinamičkim prijenosnicima dizelski motor pokreće centrifugalnu pumpu, a tekućina se iz nje vodi u turbinu koja je obično preko zupčanika vezana s pogonskim kotačima vozila.

Hidrodinamički prijenosnici (ili *strujni prijenosnici*) iskorišćuju sile koje nastaju pri promjeni stanja gibanja neke mase tekućine. U centrifugalnoj pumpi (sl. 37), koju pokreće dizelski motor, masa se tekućine ubrzava, odlazi u turbinu, gdje se usporava, pa zbog toga nastaju sile koje se dalje prenose na postrojenje ili stroj koji treba pokretati. Tekućina se iz turbine vraća u rezervoar odakle ju pumpa ponovno siše. Na ideju takva prenošenja snage, s brzohodne osovine parnih turbina na sporohodnu osovinu brodskog vijka, došao je dr inž. Herman Föttinger u vrijeme kad su parne turbine počele zamjenjivati parne strojeve u brodskim pogonima (v. *Brod, Osoviniski vod*, TE 2, str. 363). Zbog velikih otpora u cijevima takva postrojenja bila je ukupna iskoristivost prvih hidrodinamičkih prijenosnika najviše do 60%. Osim toga, centrifugalna pumpa i turbina s njihovim dovodnim i odvodnim cijevima zahtijevale su suviše mnogo prostora. Brzi razvoj hidrodinamičkih prijenosnika i njihova sve veća primjena počinje tek 1905. godine kad je Föttinger patentirao princip prijenosnika, prema kojem se i pumpa i turbina nalaze u jednom zatvorenom okrilju, kako je prikazano u sredini sl. 37. Ova konstrukcija ima lopatična kola poredana neposredno jedno iza drugoga u kružnom toku tekućine. Izlazna se energija jednog lopatičnog kola korisno iskorišćuje u sljedećem susjednom lopatičnom kolu. Pored malog obujma i male težine, takav prijenosnik ima vrlo visoku iskoristivost, jer su gubici trenja i gubici zbog pretvaranja energije veoma smanjeni.

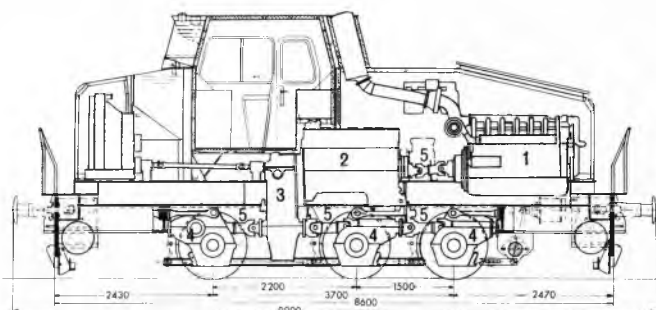


Sl. 37. Shema osnova djelovanja hidrodinamičkog prijenosnika

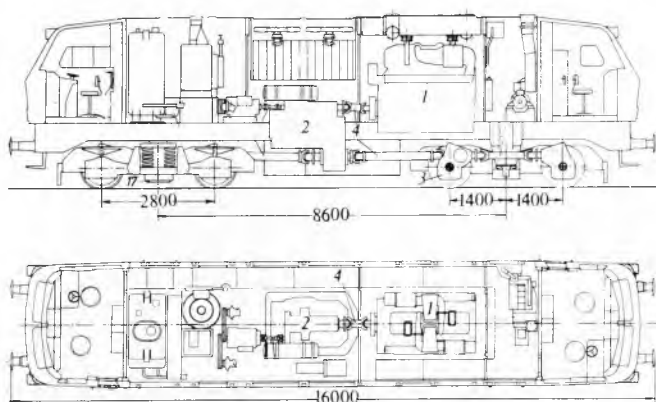
Na osnovi Föttingerova principa prijenosa snage razvila su se dva tipična oblika prijenosnika, koji se po svojoj funkciji potpuno razlikuju. Jedan je od njih Föttingerov transformator (hidrodinamički transformator), a drugi Föttingerova spojka (hidrodinamička spojka). Iskoristivost hidrodinamičkog transformatora doseže do 90%, a iskoristivost hidrodinamičke spojke do 97...98%.

Tridesetih godina našeg stoljeća počinju se i u gradnji dizelskih lokomotiva upotrebljavati hidrodinamički transformator i hidrodinamička spojka kao elementi lokomotivskih hidrodinamičkih prijenosnika snage. Skice lokomotivskih pogonskih uređaja s takvim prijenosnicima prikazane su na sl. 38 i 39. Na

sl. 38 pogonski dizelski motor 1 vezan je kardanskom osovinom 5 s hidrodinamičkim mjenjačem 2. Na mjenjač je pri rubnicom pričvršćen dodatni mjenjač 3. U dodatnom mjenjaču nalazi se prekretnik od čelnih zupčanika za vožnju naprijed i vožnju natrag, te parovi čelnih zupčanika za dva područja brzina vožnje 0...8 i 0...16 m/s. Dodatni mjenjač u sebi ujedinjuje zupčani prijenos s izlazne osovine hidrodinamičkog mjenjača na pogonsku osovinu lokomotive, prekretni uređaj za promjenu smjera vožnje i mehanizam za prevrtavanje na dva različita područja brzina vožnje, tj. mehanizam za promjenu maksimalne brzine vožnje, ili sadrži samo neke od tih mehanizama. Na lokomotivama manevarkama dodatni mjenjač može biti u posebnom okrilju, pričvršćen pri rubnicom na hidrodinamički mjenjač. To na jednostavan način omogućuje varijacije u rasporedu lokomotivskog prijenosnika, npr. da iza dodatnog mjenjača slijede kardanske osovine ili slijepa osovina koja je spojnim motkama vezana na pogonske kotače lokomotive. Na pružnim lokomotivama dodatni je mjenjač konstrukcijski uključen u hidrodinamički mjenjač i tako s njim čini jednu cjelinu.

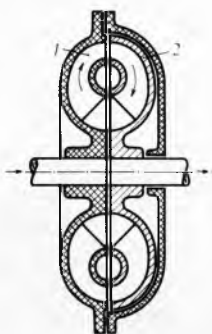


Sl. 38. Hidrodinamički prijenosnik dizelske hidrauličke lokomotive DHG 360/500 tvornice Henschel, snage 264/268 kW. 1 dizelski motor, 2 hidrodinamički mjenjač, 3 dodatni mjenjač, 4 osovinski prijenosnik, 5 kardanske osovine



Sl. 39. Hidrodinamički prijenosnik lokomotive B'B' serije 216 Njemačkih željeznica, snage 1400 kW. 1 dizelski motor, 2 hidrodinamički mjenjač s dodatnim mjenjačem, 3 osovinski prijenosnik, 4 kardanske osovine

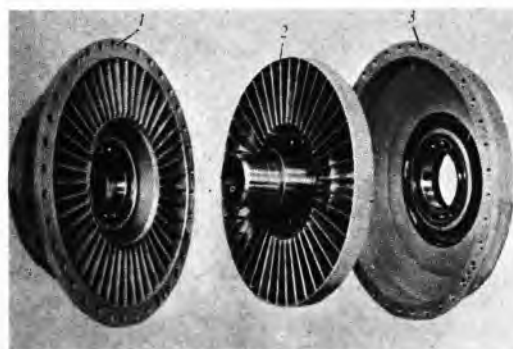
Na osovinske prijenosnike snaga se prenosi kardanskim osovinama 5. Svi navedeni dijelovi od motora do pogonske osovine nazivaju se zajedničkim imenom hidrodinamički prijenosnik ili općenito hidraulički prijenosnik. U sastavu loko-



Sl. 40. Shema hidrodinamičke spojke. 1 pumpa, 2 turbina

motivskog prijenosnika, umjesto kardanskog prijenosa, može biti i prijenos pomoću spojnih motki vezanih na slijepu osovinu ili, pri manjim snagama, pomoću lanaca.

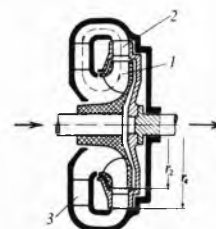
Hidrodinamička spojka sastoji se od pumpnog i turbinskog kola (sl. 40). Pumpno kolo je povezano s ljsuskom koja zajedno s njim rotira i čini kućište spojke. Između ljsuske i izlazne osovine je brtvilo koje sprečava izlazak ulja. Ako se zanemari trenje zraka o rotirajuće kućište, onda su ulazni okretni moment, tj. okretni moment pumpe M_1 , i izlazni okretni moment, tj. onaj koji predaje turbina M_2 , jednaki unutar svih radnih okolnosti. Pumpno i turbinsko kolo imaju ravne radijalne lopatice (sl. 41). Hidrodinamička se spojka puni određenom količinom tekućine, najčešće uljem malog viskoziteta, ali može se upotrijebiti i nafta ili voda.



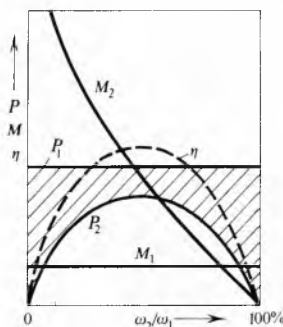
Sl. 41. Lopatična kola hidrodinamičke spojke. 1 pumpno kolo, 2 turbinsko kolo, 3 ljsuska kućišta spojke

Hidrodinamički transformator omogućuje razliku između okretnih momenata pumpnog i turbinskog kola. U tu svrhu postoji u hidrodinamičkom transformatoru, osim pumpnog i turbinskog kola i treći element, i to vodeće kolo ili reaktor koji preuzima razliku okretnih momenata. Najjednostavniji oblik hidrodinamičkog transformatora (sl. 42) sastoji se, dakle, od pumpnog 1, turbinskog 2 i vodećeg kola 3. Ta su tri dijela tijesno ugrađena u zajedničko kućište.

Sl. 42. Skica hidrodinamičkog transformatora. 1 pumpno kolo, 2 turbinsko kolo, 3 vodeće kolo (reaktor)



Hidrodinamički transformator pretvara uvedeni okretni moment pogonskog motora M_1 tako da uz konstantnu ulaznu kutnu brzinu ω_1 , tj. pri konstantnoj snazi pumpe P_1 , daje veliki izlazni okretni moment M_2 pri malim kutnim brzinama turbinskog kola ω_2 , a mali okretni moment pri velikim kutnim brzinama turbine (sl. 43). To upravo i odgovara zahtjevima lokomotivskog pogona, odnosno krivulji idealne vuče



Sl. 43. Karakteristike hidrodinamičkog transformatora pri konstantnoj ulaznoj kutnoj brzini ω_1

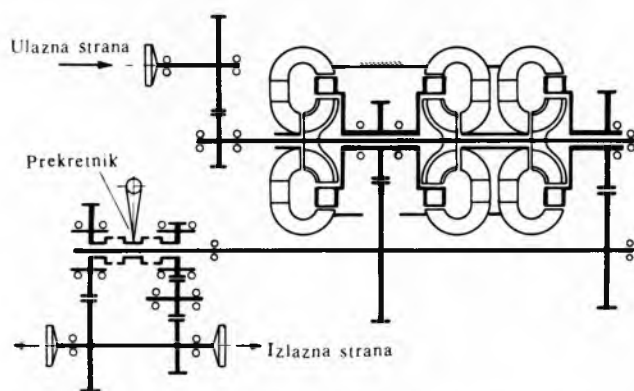


Sl. 44. Kola hidrodinamičkog transformatora. 1 vodeće kolo, 2 pumpno kolo, 3 turbinsko kolo

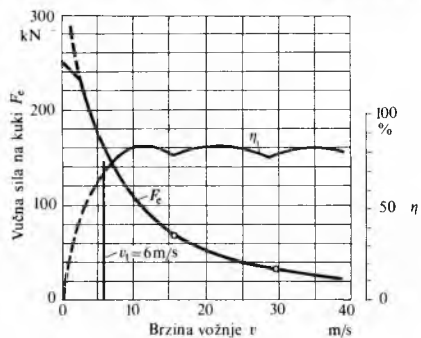
sile. Dio privedene mehaničke energije pretvara se u hidrodinamičkom transformatoru u toplinsku energiju. Zbog toga nastaje gubitak snage jednak razlici između preuzete snage P_1 na ulazu transformatora i predane snage P_2 na izlaznoj strani transformatora. Iskoristivost transformatora η ovisi o tom gubitku snage.

Fotografija pojedinih kola hidrodinamičkog transformatora prikazana je na sl. 44.

Hidrodinamički mjenjači na lokomotivama trebaju omogućiti velike vučne sile pri polasku i na usponima, a visoke maksimalne brzine vožnje na ravnoj i horizontalnoj pruzi. Samo jedan hidrodinamički transformator to ne može zadovoljiti, jer, kao što se vidi iz paraboličkog oblika krivulje njegove iskoristivosti η (sl. 43), jedan je transformator u stanju pokriti samo mali dio velikog raspona brzina vožnje uz zadovoljavajuću iskoristivost η . Zahtjev da se što više poveća okretni moment i postigne što je moguće bolja iskoristivost u čitavom rasponu brzina može se zadovoljiti ako se čitavo područje brzina vožnje podijeli na više pojedinačnih područja, pa svakom području odgovara jedan stupanj nekog sastavljenog mjenjača.



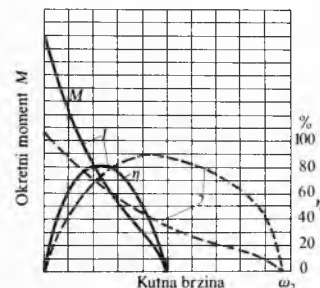
Sl. 45. Shema Voithova hidrodinamičkog mjenjača LT 306r sa tri transformatora



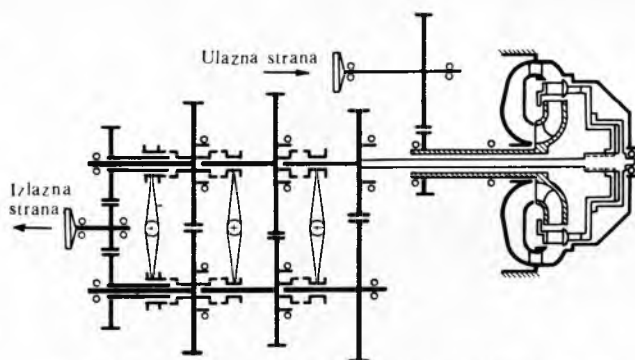
Sl. 46. Dijagram vučne sile lokomotive V 200 Njemačkih željeznica s hidrodinamičkim mjenjačem LT 306r; η iskoristivost hidrodinamičkog mjenjača, v_1 najmanja trajna brzina vožnje pri punom opterećenju

Postoji nekoliko konstrukcijskih rješenja višestepenog hidrodinamičkog mjenjača. Jedno je da se u mjenjač ugradi nekoliko hidrodinamičkih transformatora (sl. 45 i 46), ili jedan transformator s jednom ili dvije hidrodinamičke spojke. Svaka od tih hidrodinamičkih jedinica vezana je u mjenjaču uz jedan stupanj. Pojedini se stupnjevi uključuju i isključuju punjenjem i pražnjenjem primjerenih hidrodinamičkih jedinica. Prijenosni odnosi pojedinih stupnjeva mjenjača s više hidrodinamičkih transformatora postižu se time što je svaki hidrodinamički transformator mjenjača različit (tj. lopatice su svakog transformatora različite). Ako su transformatori jednaki, onda je svaki od njih vezan s izlaznom osovinom mjenjača preko parova zupčanika različitih prijenosnih odnosa. Prvi hidrodinamički transformator u takvim mjenjačima gotovo je uvijek tako konstruiran da daje veliki okretni moment na račun iskoristivosti η , a drugi da daje povoljniju iskoristivost na račun okretnog momenta (sl. 47). Prvi od transformatora naziva se *transformatorom polaženja*, a drugi *transformatorom vožnje*. Ako postoji i treći transformator, onda se razlikuje transformator vožnje srednjih brzina od transformatora vožnje velikih brzina.

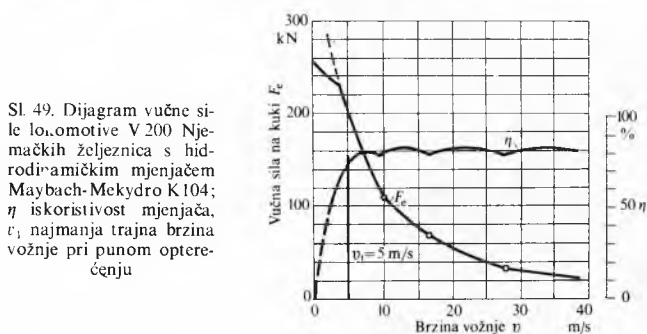
Sl. 47. Okretni moment i iskoristivost hidrodinamičkih transformatora. 1 transformator polaženja, 2 transformator vožnje



Drugo konstrukcijsko rješenje jest mjenjač s jednim hidrodinamičkim transformatorom (ili jednom hidrodinamičkom spojkom) iz kojeg slijedi mehanički višestepeni mjenjač s mehaničkim spojkama za uključivanje pojedinih prijenosa. U nekim od takvih hidrodinamičkih mjenjača transformator djeluje samo u nižim područjima brzina, tj. pri polasku kad su okretni momenti veliki, dok je u područjima viših brzina prijenos direktan, tj. samo preko mehaničkog dijela mjenjača bez ikakva sudjelovanja hidrodinamičkog transformatora, da bi se postigla visoka iskoristivost η pri velikim brzinama vožnje. U drugim hidrodinamičkim mjenjačima ovog tipa transformator je uključen u rad svakog stupnja mjenjača (sl. 48 i 49).



Sl. 48. Shema hidrodinamičkog mjenjača Maybach-Mekydro K 104

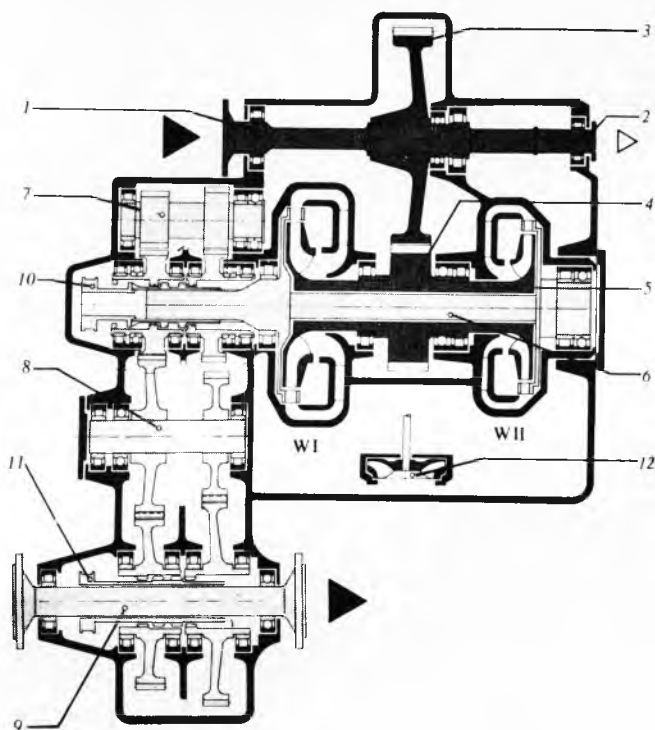


Sl. 49. Dijagram vučne sile lokomotive V 200 Njemačkih željeznica s hidrodinamičkim mjenjačem Maybach-Mekydro K 104; η iskoristivost mjenjača, v_1 najmanja trajna brzina vožnje pri punom opterećenju

Jedan od mnogih tipova modernih automatskih hidrodinamičkih mjenjača jest Voithov hidrodinamički mjenjač L 720 rs (sl. 50). Mjenjači toga tipa konstruirani su za lokomotive s podvoscima, i to za snage na ulazu u mjenjač do 1300 kW; imaju dva hidrodinamička transformatora, pa se stupnjevi mjenjača uvrstavaju i izvrstavaju punjenjem i pražnjenjem jednog od transformatora. Punjenje jednog stupnja pogonskom tekućinom i pražnjenje prethodnog vremenski se tako prekriva da se neki prekid vučne sile praktički uopće ne osjeća. Uvrštavanje i izvrštavanje pojedinih stupnjeva jest automatsko, a ovisi o brzini vozila (utjecaj sekundarne strane) i o brzini vrtnje motora (utjecaj primarne strane). Danas se hidrodinamički mjenjači za lokomotive, i to osobito većih i najvećih snaga, isključivo grade na principu punjenja i pražnjenja.

Strojovoda mijenja brzinu vožnje lokomotive pomicanjem ručice manipulatora. Ručica djeluje na regulacijsku šipku dizelskog motora, a povezana je i s upravljačkim sustavom hidro-

dinamičkog mjenjača. Djelovanjem na ručicu manipulatora automatski se uključuje i isključuje mjenjač, a uvrštavanje i izvrštavanje pojedinih stupnjeva mjenjača odvija se automatski.



Sl. 50. Voithov hidrodinamički mjenjač L 720 rs. 1 ulazna osovina, 2 priključak na pomoćni stroj, 3 i 4 zupčani prijenos, 5 primarna osovina mjenjača, 6 sekundarna osovina mjenjača, 7 i 8 međuosovine, 9 izlazna osovina, 10 spojka za promjenu smjera vrtnje, 11 spojka za promjenu brzine vrtnje, 12 pumpe za punjenje

Lokomotive s hidrodinamičkim prijenosnikom mogle bi se trajno kretati pod punim opterećenjem unutar čitavog raspona brzina vožnje kad bi rashladni uređaj hidrodinamičkog mjenjača bio dimenzioniran za odvođenje cjelokupne topline nastale zbog trenja. Budući da se rashladni uređaji ne grade tako veliki, to se određuje najmanja trajna brzina vožnje pri punom opterećenju lokomotive (sl. 46 i 49).

Voithov hidrodinamički mjenjač L 720 rs (sl. 50) radi na slijedeći način: okretni moment dizelskog motora prenosi se preko elastične spojke i kardanske osovine na ulaznu osovina mjenjača 1. Pomoću para zupčanika 3 i 4 prenosi se okretni moment s ulazne osovine 1 na primarnu osovina mjenjača 5. Par zupčanika 3 i 4 ima takav prijenosni odnos da je broj okretaja primarne osovine 5 znatno veći nego ulazne osovine 1. Time se postiže velika kutna brzina primarne osovine, što je potrebno da bi dimenzije mjenjača bile što manje. Prednost takva načina prijenosa okretnog momenta s ulazne na primarnu osovina jest i to da se mogu upotrijebiti pogonski dizelski motori različitih kutnih brzina i snaga, jer se promjenom tog para zupčanika može postići ona ulazna kutna brzina koja odgovara hidrodinamičkom transformatoru. Primarna osovina mjenjača povezana je s pumpnim kolom hidrodinamičkog transformatora polaznja WI i s pumpnim kolom transformatora vožnje WII. Turbinska kola tih transformatora pričvršćena su na sekundarnoj osovinu mjenjača 6. Prevrštavanjem spojke 10 povezuju se zupčanci sekundarne osovine 6 i izlazne osovine 9 za vožnju naprijed, ili preko međuosovine 7 za vožnju natrag. Spojka 10 smije se prevrstiti radi promjene smjera vožnje samo kad lokomotiva stoji i kad su kružni tokovi mjenjača ispražnjeni. Priružnica 2 na ulaznoj osovinu 1 predviđena je za priključak nekog pomoćnog stroja ili uređaja.

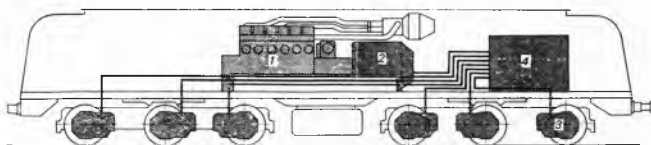
Ako se za neku lokomotivu želi postići tako velika maksimalna vučna sila i tako velika maksimalna brzina vožnje kakve se ne bi mogle postići nekom kombinacijom hidrodinamičkih transformatora i spojaka, tada se u dodatni prijenosnik ugradi

mehanizam za promjenu maksimalne brzine. To je u biti dvo-stepeni mehanički mjenjač kojim se čitavo područje brzina vožnje lokomotive podijeli na dva područja, jedno, koje odgovara manevarskoj službi lokomotive, i drugo, za pružnu službu lokomotive. Maksimalna brzina vožnje za prvo područje može biti, npr., 11...14 m/s, a za drugo 20...25 m/s. Prevrštavanjem u dodatnom prijenosniku pomoću spojke 11 odabire se područje maksimalne brzine vožnje, ali to se također smije učiniti samo kad lokomotiva stoji. Prijenosnici tipa L 720, koji se ugrađuju u lokomotive namijenjene jednoj vrsti službe, imaju na osovinu 9 samo jedan zupčanik, tj. postoji samo jedan čvrsti prijenos između te osovine i međuosovine 8.

Hidrodinamički mjenjači tipa L 720 konstruirani su u prvom redu za lokomotive na sporednim prugama, jer za takve lokomotive dolaze u obzir hidrodinamički mjenjači sa dva kružna toka. Pod lokomotivom za sporedne pruge u evropskim prilikama danas se općenito smatra lokomotiva B'B' mase 60...72 t, osovinskog opterećenja oko 150...180 kN, krajnje konstrukcijske brzine od 28 m/s do najviše 33 m/s, s ugrađenim motorom snage 1 100...1 500 kW, čemu odgovara mjenjač snage 1 000...1 300 kW.

Lokomotive na glavnim prugama, koje trebaju postići veliku vučnu silu pri polasku i veliku maksimalnu brzinu vožnje, trebaju imati hidrodinamičke mjenjače sa tri kružna toka. Takvim je lokomotivama osovinsko opterećenje 200 kN i veće, a razvijaju brzinu od 45 m/s i više. Lokomotivski hidrodinamički mjenjači sa tri kružna toka za takve lokomotive vrlo često se izvedu sa tri hidrodinamička transformatora, ili sa dva hidrodinamička transformatora i jednom hidrodinamičkom spojkom.

Električni prijenosnik. Zajedničko je obilježje svih električnih prijenosnika snage na motornim ili turbinskim lokomotivama da neki motor (benzinski ili dizelski motor) ili turbina (para ili plinska turbina) pokreće električni generator koji napaja jedan ili više vučnih elektromotora. Dizelski motor najčešći je primarni pokretač. Primjer rasporeda dizelskog motora, generatora i vučnih elektromotora u dizelsko-električnoj lokomotivi vidi se na sl. 51. Upravljački sklop ugrađen u lokomotivu omogućuje zajednički rad dizelskog motora, generatora i vučnih elektromotora.



Sl. 51. Električni prijenosnik dizelsko-električne lokomotive. 1 dizelski motor, 2 generator, 3 vučni elektromotor, 4 upravljački sklop

Oko 80% svih motornih lokomotiva u svijetu opremljeno je električnim prijenosnikom. Najprije je izgrađen električni prijenosnik koji se sastoji od istosmjernog generatora i istosmjernih elektromotora, dakle izveden je u istosmjerno-istosmjernoj tehnici (*prijenosnik istosmjernog sastava*), i služi u željezničkom prometu već više od pola stoljeća. U posljednjem desetljeću sve se više težilo lokomotivama velikih snaga a malih težina. Tome, dakako, nije mogao udovoljiti električni prijenosnik istosmjernog sastava zbog relativno velike vlastite težine, pa je elektroindustrija morala tražiti načina da smanji težinu takve električne opreme. Vučni elektromotori i pogotovo istosmjerni generator najteži su dijelovi opreme. U principu težina generatora može se smanjiti povećanjem brzine vrtnje. To je povećanje, međutim, ograničeno zahtjevom da se osigura pouzdana komutacija (v. *Električni strojevi*, TE4, str. 153), što se postiže kad obodna brzina kolektora nije veća od 50 m/s. Iz istih razloga mora biti zadovoljen uvjet

$$Pn \leq 3 \cdot 10^6, \quad (8)$$

gdje je P snaga generatora u kW, a n brzina vrtnje u min^{-1} . Prema izrazu (8) proizlazi da za dizelski motor s brzinom vrtnje od 1500 min^{-1} maksimalna snaga generatora iznosi 2000 kW. Već 1968. godine izrađen je u SR Njemačkoj dizelski motor sa 16 cilindara snage 2400 kW pri brzini vrtnje od 1500 min^{-1} ,

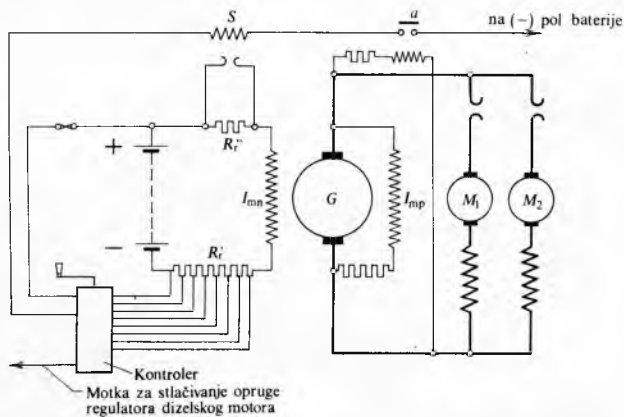
za koji se nije mogao izvesti istosmjerni generator potrebne snage.

Zbog toga je istosmjerni generator zamijenjen trofaznim sinhronim generatorom koji preko silicijskih ispravljača napaja istosmjerne vučne elektromotore uobičajene konstrukcije. Uzbudnik tog generatora također je trofazni generator, kojemu rotor može biti smješten na zajedničkoj osovini s glavnim generatorom i s ispravljačem njegove uzbudne struje. Budući da takav generator nema kolektora koji bi ograničavao brzinu vrtnje, to za izbor te brzine postoji mnogo veća sloboda. Da bi se iskoristila ta prednost, ugrađen je između dizelskog motora i generatora mehanički prijenosnik (npr. planetarni prijenosnik s prijenosom 1 : 4) koji povećava brzinu vrtnje trofaznog sinhronog generatora. I uz dodatnu težinu takva prijenosnika, ukupna se težina znatno smanjuje prema težini postrojenja s istosmjernim generatorom. Prema francuskim izvorima, takvo postrojenje (trofazni sinhroni generator, uzbudnik i oba ispravljača) može se izvesti do specifične snage od $0,55 \dots 0,66 \text{ kW/kg}$, dok za postrojenje s istosmjernim generatorom ta specifična snaga iznosi $0,29 \dots 0,33 \text{ kW/kg}$. Ako se za pogon trofaznog generatora upotrijebe plinske turbine, postiže se specifična snaga od $1,15 \text{ kW/kg}$. Godine 1974. u Francuskoj je bilo oko 450 lokomotiva s trofaznim generatorima. Električni prijenosnik izveden u izmjenično-istosmjernoj tehnici naziva se *prijenosnik mješovitog sastava*.

Lokomotive s prijenosnicima izvedenim u izmjenično-izmjeničnoj tehnici, tj. s *prijenosnicima trofaznog sastava*, posljednja su riječ (1971) u razvoju električnih prijenosnika snage. U tim se prijenosnicima za vučne elektromotore upotrebljavaju asinhroni trofazni motori. Oni su manji i lakši od istosmjernih motora, a zahtijevaju i manje održavanje jer nemaju kolektora. Problem je, međutim, reguliranje brzine vrtnje asinhronih motora, no razvitak tiristora velikih snaga danas već omogućuje njihovu ekonomičnu regulaciju. Vrijeme će pokazati da li će ta vrsta prijenosnika istisnuti prijenosnike mješovitog sastava iz lokomotivskog pogona.

Električni prijenosnik istosmjernog sastava sastoji se od dva osnovna dijela: istosmjernog generatora i istosmjernog vučnog elektromotora. Kad je u pogonu lokomotivski uređaj s takvim prijenosnikom, neprestano se međuovisno mijenjaju brzina vrtnje i punjenje gorivom dizelskog motora, uzbuda generatora, te brzina vrtnje elektromotora, odnosno brzina vožnje i otpor vožnje. Te su međuovisne promjene diktirane zajedničkim radom dizelskog motora i generatora, te zajedničkim radom generatora i vučnog elektromotora. Dizelski motor i generator čine pogonsku grupu koja, neovisno o vučnim elektromotorima, radi prema potpuno određenoj, njoj svojstvenoj, pogonskoj karakteristici. Vučni elektromotori moraju se prilagoditi toj pogonskoj karakteristici tako što pojedinim stanjima u vožnji lokomotive odgovaraju određene točke na krivulji pogonske karakteristike.

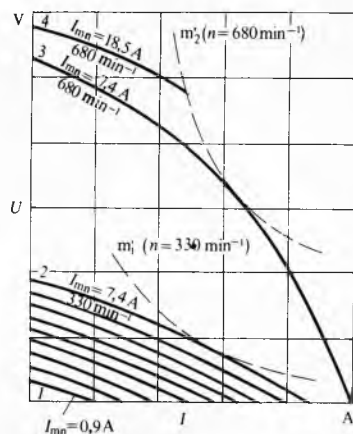
Upravljanje dizelsko-električnom lokomotivom pomoću upravljača mora strojovodi omogućiti da skokovito mijenja snagu lokomotive od nule do maksimuma. To se postiže promjenom brzine vrtnje dizelskog motora, promjenom uzbude glavnog ge-



Sl. 52. Shema spajanja upravljača u električnom prijenosniku manevarske lokomotive

neratora ili kombiniranom jednom i drugom promjenom. Dva tipična slučaja mogu poslužiti kao primjeri.

Shema spajanja jednostavnog upravljača, koji se primjenjuje na manevarskoj lokomotivi, prikazana je na sl. 52. Tada se pokretanjem ručice kontrolera najprije mijenja jakost struje u nezavisnom uzbudnom namotu, isključivanjem pojedinih otpora iz kruga struje nezavisne uzbude, pri čemu se dizelski motor okreće s njegovom najmanjom brzinom vrtnje. Daljim se pokretanjem ručice povećava punjenje dizelskog motora, a time se povećava njegova brzina vrtnje do najveće vrijednosti a da se ne mijenja već postignuta jakost struje nezavisne uzbude. Međusobni odnosi napona U i struje I generatora prikazani su pogonskim karakteristikama (sl. 53). U prvih devet položaja ručice kontrolera postepeno se isključuje otpor R'_t (sl. 52) iz kruga struje nezavisne uzbude. Time se postepeno mijenja uzbudna struja od $0,9 \text{ A}$ do $7,4 \text{ A}$, koje su vrijednosti navedene uz vanjske karakteristike generatora (krivulje 1 do krivulje 2 na sl. 53). Brzina je vrtnje dizelskog motora pri tome konstantna i iznosi 330 min^{-1} . Daljim pokretanjem ručice kontrolera, preko slijedeće serije njezinih položaja, povećava se brzina vrtnje dizelskog motora sve do maksimalne vrijednosti. Povećavanjem brzine vrtnje podižu se, u dijagramu, i karakteristike zbog povišenja napona generatora. To se izvodi pomoću motke kontrolera kojom se stlačuje opruga regulatora dizelskog motora. Pri tome se ne mijenja jakost uzbudne struje ($7,4 \text{ A}$). Karakteristika generatora označena sa 3 na sl. 53, koja se postiže pri maksimalnoj brzini vrtnje dizelskog motora (680 min^{-1}), dodiruje krivulju raspoložive konstantne snage dizelskog motora m'_2 samo u jednoj točki. I sve ostale karakteristike generatora, pri bilo kojoj brzini vrtnje dizelskog motora, dodiruju odgovarajuće krivulje raspoložive konstantne snage samo u jednoj točki i leže ispod tih krivulja, kao i ona za maksimalnu brzinu vrtnje.



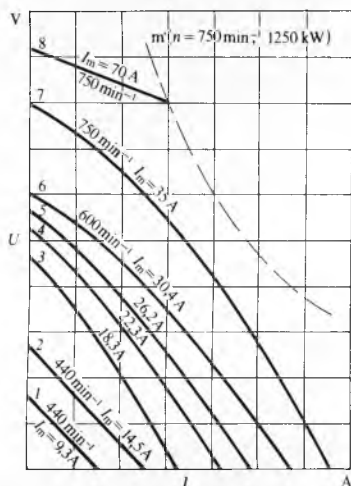
Sl. 53. Pogonske karakteristike manevarske lokomotive s električnim prijenosnikom

Ako se pri najvećoj brzini vrtnje smanji jakost struje, koju uzima elektromotor, tako da raspoloživa snaga više nije iskorištena, u upravljačima uobičajene izvedbe isključuje se daljim pomakom ručice kontrolera u posljednji njezin položaj i posljednji dio otpora iz kruga struje nezavisne uzbude R'_t . To se izvodi pomoću kontaktora S ako je napon generatora dovoljno visok da je relej a zatvoren (sl. 52). Isključenjem otpora R'_t prelazi se na karakteristiku generatora označenu sa 4 na sl. 53, što znači da elektromotor dobiva viši napon, pa on zbog toga uzima više struje i time ubrzava lokomotivu. Opteret li se tada generator toliko da njegova karakteristika presiječe liniju raspoložive konstantne snage dizelskog motora m'_2 , on će postati preopterećen. Tada napon padne a struja naraste. Da se spriječi to preopterećenje, aktivira se podnaponski relej a , ili u nekim izvedbama prekostrujni relej, pa kontaktor S ponovno uključi otpor R'_t u strujni krug. Time se ponovno prelazi na nižu karakteristiku generatora označenu sa 3.

Djelovanje opisanog upravljača je jednostavno. U praksi se pokazalo da ono zadovoljava svemu što se od manevarskih lokomotiva zahtijeva.

Mijenjanje lokomotivske snage unutar čitavog područja rada može se postići i tako da se samo nekoliko odabranih brzina vrtnje dizelskog motora kombinira s različitim uzbudnim stru-

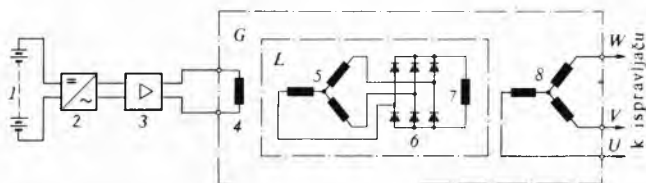
jama glavnog generatora. Tipičan su primjer za to pogonske karakteristike pružne lokomotive s automatskom regulacijom snage (sl. 54). Za tu su lokomotivu odabrane tri brzine vrtnje dizelskog motora koje s različitim uzбудnim strujama glavnog generatora daju osam položaja na kontroleru. Krivulja 8 prikazuje karakteristiku generatora koja se automatskom regulacijom snage prilagođuje krivulji maksimalno raspoložive konstantne snage dizelskog motora m' .



Sl. 54. Pogonske karakteristike pružne lokomotive s automatskom regulacijom snage

Električni prijenosnici s trofaznim generatorima. Upotrebom sinhronog generatora može se ostvariti prijenosnik mješovitog sastava (izveden u izmjenično-istosmjernoj tehnici) i prijenosnik trofaznog sastava (izveden u izmjenično-izmjeničnoj tehnici). Radi ilustracije navodi se nekoliko takvih prijenosnika ugrađenih u lokomotive.

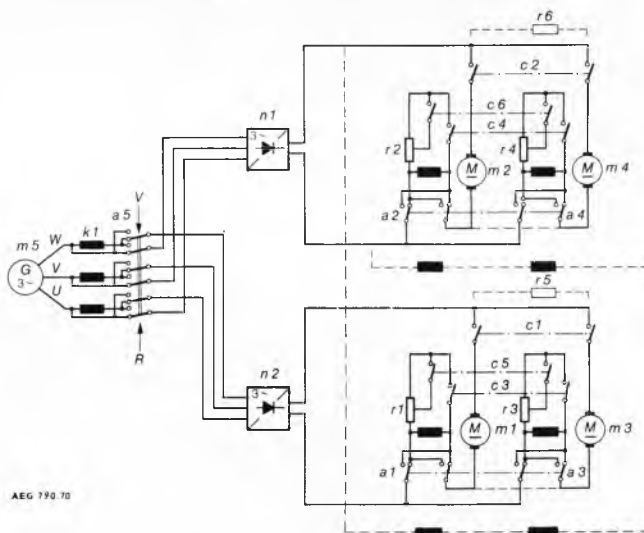
Od 1967. godine u pogonu je lokomotiva koju su zajednički izgradile tvornice Fried. Krupp GmbH, Essen, i AEG-TELEFUNKEN, Berlin. To je prva lokomotiva građena u SR Njemačkoj s trofaznim sinhronim generatorom i istosmjernim vučnim elektromotorima napajanim preko ispravljača. Pojednostavnjena shema spoja te lokomotive prikazana je na sl. 55. Struju za napajanje vučnih elektromotora proizvodi glavni generator (statorski namot 8 i uzбудni namot 7 na rotoru). Uzбудni namot 7 dobiva struju iz pomoćnog trofaznog sinhronog generatora koji ima armaturni namot 5 na rotoru, a uzбудni namot 4 na statoru. Taj se uzбудni namot napaja iz akumulatorske baterije 1 preko izmjenjivača 2 i transduktora 3 ili tranzistorskog pojačala. Struju proizvedenu u namotu 5 pomoćnog generatora ispravlja silicijski ispravljači 6, koji se okreću zajedno s tom armaturom i uzбудnim namotom 7 glavnog generatora, pa su tako izbjegnuti klizni prstenovi. Frekvencija napona generatora iznosi od 60...150 Hz pri brzini vrtnje dizelskog motora od 600...1500 min⁻¹.



Sl. 55. Pojednostavnjena shema spajanja trofaznog generatora. 1 akumulatorska baterija, 2 izmjenjivač, 3 pojačalo, 4 uzбудni namot uzбудnika (stator), 5 armatura uzбудnika (rotor), 6 ispravljački most (rotirajući), 7 uzбудni namot glavnog generatora (rotor), 8 armatura glavnog generatora (stator), L rotor, G stator (okrilje generatora)

Iz shematskog prikaza glavnog strujnog kruga (sl. 56) vidi se da glavni trofazni generator $m5$ napaja ispravljače $n1$ i $n2$ u trofaznom ispravljačkom spoju, iz kojih se dobiva istosmjerna struja prikladna za željezničku vuču. Ispravljački mostovi $n1$ i $n2$ sastavljeni su od silicijskih dioda. Inače je glavni krug struje izveden na uobičajen način za vožnju i kočenje. Pri

električnom kočenju uzбудni namoti svih četiriju vučnih elektromotora spojeni su u seriju i preko ispravljačkog mosta nezavisno su uzbuđeni iz generatora. Po dva vučna elektromotora, spojena u seriju, rade kao generatori na po jedan kočni otpor $r5$ i $r6$. Uzbuđom elektromotora utječe se na struju i time na silu kočenja. Vučni elektromotori su istosmjerni serijski motori sa šapastim ležajima. Po jedan motor ugrađen je na svakom kolnom slogu te B₀B₀ lokomotive.

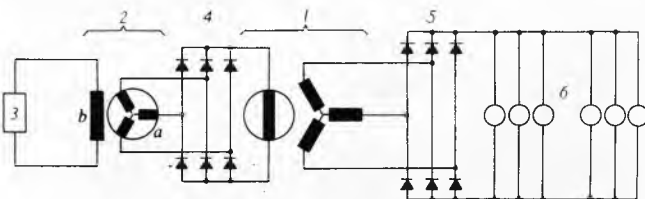


Sl. 56. Spoj glavnog kruga struje električnog prijenosnika mješovitog sastava. $m1...m4$ vučni elektromotori, $a1...a4$ mjenjači smjera, $r1...r4$ otpori za slabljenje polja, $c3$ i $c4$ kontaktori za slabljenje polja (stepen 1), $c5$ i $c6$ kontaktori za slabljenje polja (stepen 2), $r5$ i $r6$ otpori kočnice, $m5$ glavni generator, $n1$ i $n2$ ispravljači, crtkano je prikazan spoj kruga uzbudne struje pri kočenju

Rad elektroničke regulacije snage ovisi o brzini vrtnje dizelskog motora. Pri tom se na uzbuđivanje uzbuđnog generatora preko transduktora utječe tako da glavni generator preuzima od dizelskog motora onu snagu koja odgovara njegovoj trenutnoj brzini vrtnje. Ta se snaga održava konstantnom s velikom točnošću u cijelom području brzina vožnje.

Maybachov dizelski motor, tip MD 655, primarni je pokretač takve lokomotive. Njegova je snaga 11000 kW pri brzini vrtnje 1500 min⁻¹ (157 rad/s).

Shema spoja električnog prijenosnika na lokomotivi C₀C₀ Kestrel Britanskih željeznica (BR) prikazana je na sl. 57. Glavni generator 1 trofazni je generator snage 2520 kW, 410 V, 91,6 Hz pri brzini vrtnje od 1100 min⁻¹. On je neposredno mehanički spojen s uzbuđnikom 2. Uzbuđnik je trofazni generator s rotirajućom armaturom a i uzbuđnim namotom b . Struja u uzbuđnom namotu regulira se prema potrebnoj snazi, djelovanjem na ručicu upravljača 3. Kroz taj namot protječe istosmjerna uzbuđna struja. Trofazna struja iz uzbuđnika 2 pretvara se pomoću silicijskog ispravljača 4 u istosmjernu struju koja se dovodi uzbuđnom namotu na polovima glavnog generatora 1. Strujom iz glavnog generatora preko silicijske ispravljačke grupe 5 napaja se šest paralelno spojenih istosmjernih vučnih elektromotora, snage po 380 kW pri brzini vrtnje od 681 min⁻¹. Dizelski motor Sulzer, tip 16 LVA 24, snage 2950 kW neposredno pokreće glavni generator 1 i uzbuđnik 2.

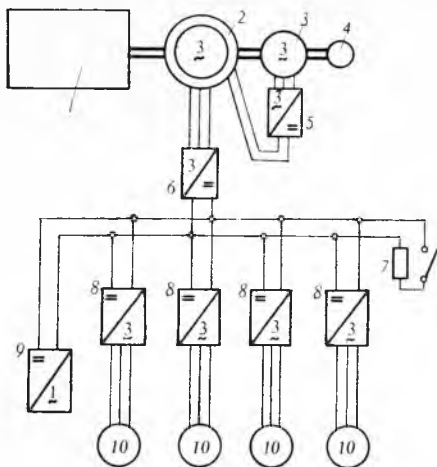


Sl. 57. Shema spoja električnog prijenosnika na C₀C₀ lokomotivi Kestrel Britanskih željeznica. 1 glavni generator, 2 uzbuđni generator, 3 ručica upravljača, 4 i 5 trofazni ispravljač sa silicijskim diodama u Graetzovu spoju, 6 istosmjerni pogonski motori

Nedostatak je takvih prijenosnika što se ne može glavni generator upotrijebiti za pokretanje dizelskog motora, što je moguće s istosmjernim generatorom, nego je potreban poseban električni pokretač ili pokretač pomoću komprimiranog zraka.

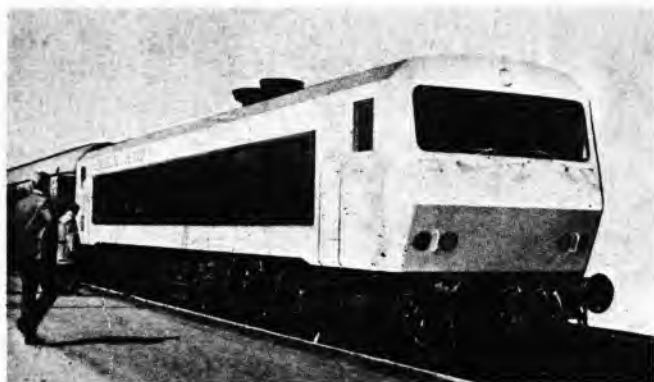
Pogon s prijenosnicima mješovitog sastava ima za ~2% veću iskoristivost od pogona s prijenosnicima istosmjernog sastava. Osim toga, troškovi održavanja trofaznog generatora znatno su niži od onih istosmjernog generatora. No, za snage manje od 1500...2200 kW prijenosnici su istosmjernog sastava ekonomičniji, uglavnom zbog toga što nisu potrebni ispravljači. Zbog toga se za dizelsko-električne lokomotive manjih od navedenih snaga gotovo bez iznimke upotrebljavaju prijenosnici istosmjernog sastava.

Prijenosnici mješovitog sastava, tj. izvedeni u izmjenično-istosmjernoj tehnici, omogućuju paralelno spajanje vučnih elektromotora, što je povoljno za iskorištenje sile odupiranja.



Sl. 58. Shema spoja lokomotive DE 2500 s trofaznim generatorom i asinhronim vučnim elektromotorima u prijenosniku. 1 dizelski motor, 2 trofazni glavni generator, 3 uzbuđnik, 4 dinamo-pokretač, 5 ispravljač uzbuđ, 6 ispravljač, 7 otporna kočnica, 8 izmjenjivači, 9 izmjenjivač grijanja, 10 vučni elektromotori

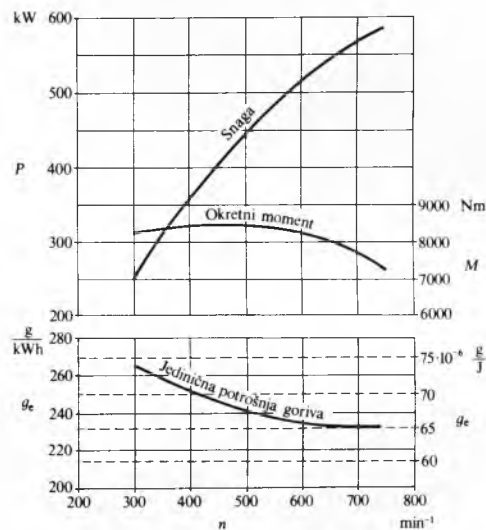
Godine 1971. pojavljuje se prvi put dizelsko-električna lokomotiva s prijenosnikom trofaznog sastava, tj. izvedenom u izmjenično-izmjeničnoj tehnici. Tu lokomotivu, označenu s DE 2500, izgradile su tvornice Rheinstahl-Transporttechnik (Henschel) i BBC-Mannheim. Izvedena kao B₀ B₀ ima masu od 80 t i snagu 1840 kW (2500 KS). Njezini asinhroni trofazni motori snage 375 kW imaju malu masu od svega 1,8 t. Shema spoja električnog prijenosnika, koji je izveden bez mehaničkih kontaktora, prikazana je na sl. 58. Struja trofaznog generatora pretvara se u istosmjernu struju ispravljačem 6 od silicijskih dioda u trofaznom ispravljačkom spoju. Četiri pojedinačna izmjenjivača 8 napajaju vučne elektromotore 10. Izmjenjivač pretvara istosmjernu u trofaznu struju, različitog napona i promjenljive frekvencije. Lokomotiva DE 2500 izvedena kao C₀ C₀ prikazana je na sl. 59.



Sl. 59. Dizelsko-električna lokomotiva Henschel-BBC DE 2500

Vučna karakteristika dizelske lokomotive

Svaki dizelski motor ima određene pogonske karakteristike. Karakteristike motora prikazane su krivuljom snage motora P i krivuljom okretnog momenta motora M prema brzini vrtnje motora n pri konstantnoj potrošnji goriva (sl. 60). Dizelski motor ima konstantan okretni moment unutar relativno malog raspona brzina vrtnje, a snaga mu opada približno proporcionalno sa smanjenjem brzine vrtnje i to naročito pri punom opterećenju motora. Brzina vrtnje dizelskog motora može se mijenjati samo u relativno uskim granicama. Ispod neke minimalne brzine vrtnje motor ne može raditi, jer dolazi do smetnji pri paljenju zbog previše hladnih stijena cilindara, motor počinje lupati jer nastaju eksplozije u mrtvoj točki, a i hod stroja postaje nejednolik, što bi se moglo ispraviti jedino s vrlo velikom zamašnom masom. Nadalje, karakteristično je za dizelski motor da se daje samo malo preopterećenje i da se pod opterećenjem ne može pokrenuti iz mirovanja.



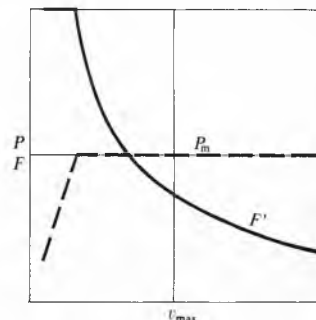
Sl. 60. Karakteristike dizelskog motora snage 590 kW za puno opterećenje

Spomenute karakteristike i svojstva dizelskog motora upravo su protivne onome što zahtijeva lokomotivski pogon, a to je: da se lokomotiva može pokrenuti s mjesta pod opterećenjem, da joj je brzina vožnje promjenljiva od nule do maksimalne brzine i da pri malim brzinama ima velik okretni moment, a pri velikim brzinama mali okretni moment, tj. da je pri različitim brzinama vožnje snaga lokomotive konstantna.

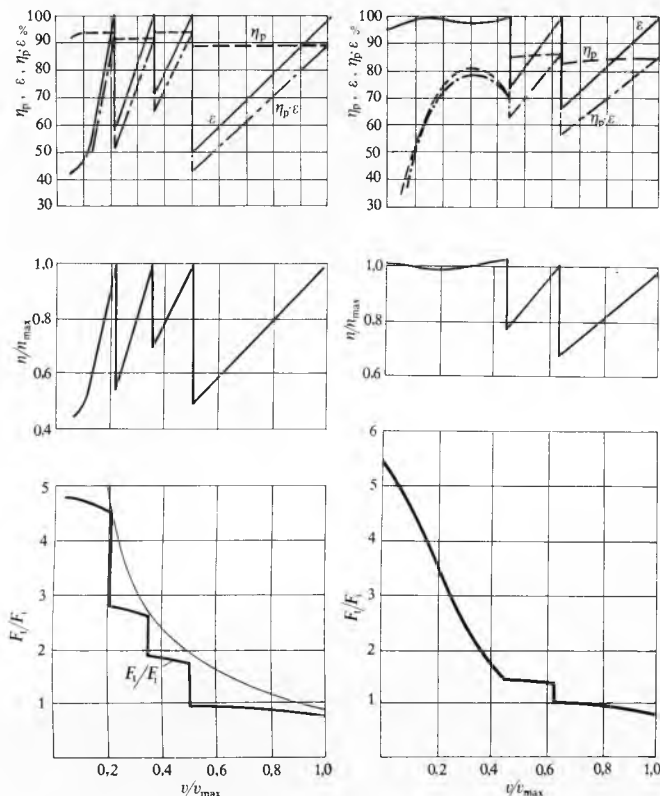
Da bi se udovoljilo zahtjevu lokomotivskog pogona, tj. da bi se što jednoličnije iskoristila puna ugrađena snaga lokomotive unutar čitavog raspona različitih brzina vožnje, mora se vučna sila lokomotive što više prilagoditi idealnoj vučnoj sili. Ovisnost idealne vučne sile F' o brzini vožnje v dobiva se iz izraza:

$$F' = P_m / v = \text{const.}, \quad (9)$$

gdje je P_m snaga primarnog pokretača, tj. za dizelske lokomotive maksimalna korisna snaga (nominalna snaga) dizelskog

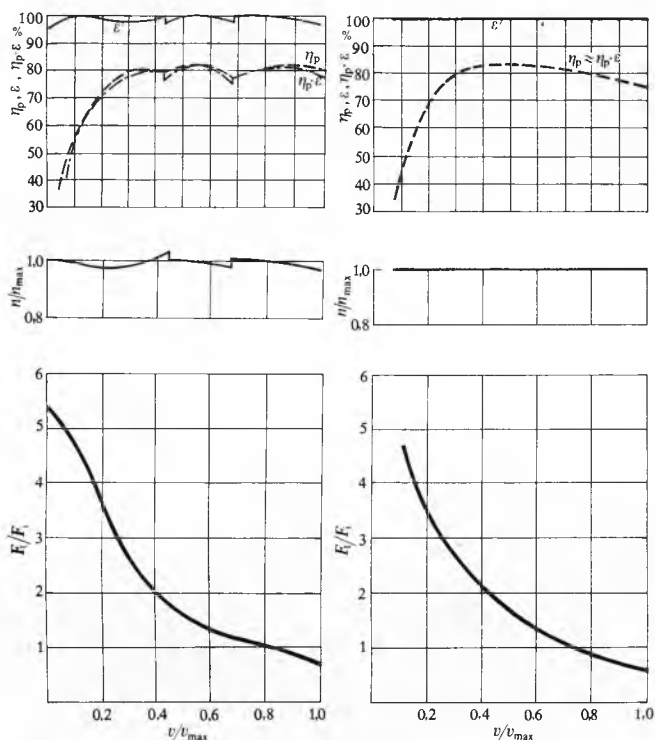


Sl. 61. Idealna vučna karakteristika lokomotive



Sl. 62. Vučna karakteristika dizelske lokomotive s mehaničkim četverostepenim prijenosnikom; F_t vučna sila na obodu kotača, F_i idealna vučna sila pri maksimalnoj brzini $v_{\max}$, v brzina vožnje, n broj okretaja motora, ϵ iskoristivost primarne snage, η_p iskoristivost prijenosnika

Sl. 63. Vučna karakteristika dizelske lokomotive s Voithovim hidrodinamičkim prijenosnikom (transformator—spojka—spojka)



Sl. 64. Vučna karakteristika dizelske lokomotive s Voithovim hidrodinamičkim prijenosnikom sa tri transformatora

Sl. 65. Vučna karakteristika dizelske lokomotive s električnim prijenosnikom

motora. Iz izraza (9) vidi se da je krivulja $F' = f(v)$ istostrana hiperbola (sl. 61). Ta je krivulja na jednom kraju ograničena maksimalnom vučnom silom uvjetovanom adhezijskom težinom lokomotive, a na drugom kraju maksimalnom brzinom lokomotive.

Dizelska lokomotiva može udovoljiti ovom zahtjevu pogona samo ako se dizelski motor poveže s pogonskim osovima preko prijenosnika koji može mijenjati okretni moment dizelskog motora.

Vučna karakteristika dizelske lokomotive pokazuje ovisnost vučne sile F_t na obodu kotača o brzini vožnje v . Kako utječu pojedine vrste prijenosnika na vučne karakteristike motornih vozila i u kojoj ih mjeri prilagođavaju idealnoj vučnoj sili F_i , vidi se na sl. 62 do 65, koje pokazuju ovisnost omjera F_t/F_i i iskoristivost primarne snage ϵ o brzini vožnje. Za određenu lokomotivu pri maksimalnoj brzini vožnje, idealna vučna sila F_i konstantna je veličina, pa krivulje F_t/F_i pokazuju vučne karakteristike pojedinih lokomotiva u nekom određenom mjerilu. Iskoristivost primarne snage ϵ definirana je sa:

$$\epsilon = P/P_m, \quad (10)$$

gdje je P_m snaga motora, a P snaga koja se pri nekoj određenoj brzini vožnje, može prenijeti s dizelskog motora na pogonske kotače, ne uzimajući u obzir iskoristivost prijenosnika η_p .

PLINSKOTURBINSKE LOKOMOTIVE

Prve lokomotive s pogonom pomoću plinske turbine izgrađene su tridesetih godina XX stoljeća. Pokazalo se da po svojim karakteristikama plinska turbina odgovara za lokomotivski pogon i da u određenim uvjetima službe može uspješno zamijeniti parnu turbinu ili dizelski motor. Ukupna iskoristivost η plinskoturbinske lokomotive s ugrađenim generatorom plina sa slobodnim klipovima iznosi do $\sim 27\%$, a s plinskom turbinom s ostvorenim kružnim tokom $\sim 11\cdots 12\%$, što je bolje nego u parnoj turbini ili parnom stapnom stroju, ali lošije od dizelskog motora. Glavne su prednosti plinske turbine njena velika snaga uz malu težinu i male dimenzije, relativno jeftino gorivo i nije joj potrebna rashladna voda. Nedostaci plinske turbine jesu: visoka nabavna cijena, visoki troškovi održavanja, a u usporedbi s dizelskim motorom i nepovoljna termička iskoristivost.

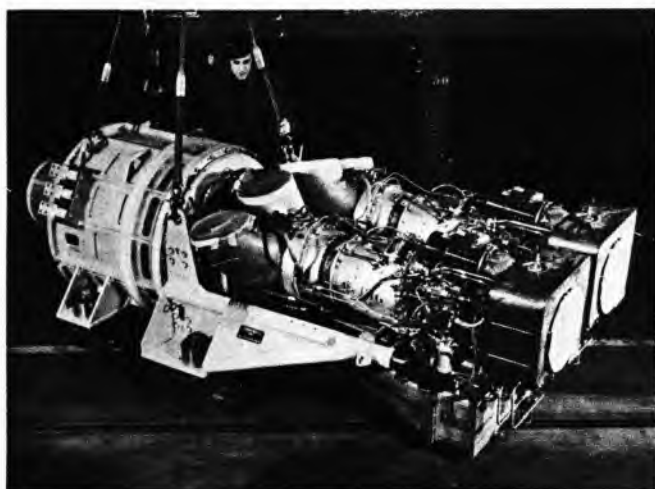
Jedinična je potrošnja goriva plinske turbine velika, pa iako je cijena gorivu mala, troškovi su za gorivo relativno veći od onih za dizelski motor. Potrošnja goriva u praznom hodu neke plinske turbine iznosi, već prema njezinoj izvedbi, $20\cdots 35\%$ od potrošnje za puno opterećenje. Za dizelski motor taj je postotak oko $4\cdots 5\%$. Plinske turbine imaju i nerazmjerno velik potrošak goriva pri djelomičnom opterećenju. Zbog nepovoljne potrošnje goriva pri djelomičnom opterećenju i u praznom hodu plinske turbolokomotive su ekonomski opravdane samo u dugačkim neisprekidanim vožnjama pod punim opterećenjem, ili približno punim opterećenjem, bez dužeg rada plinske turbine u praznom hodu. To je razlog da je i interes za plinskoturbinske lokomotive najveći u Sjedinjenim Američkim Državama, gdje one vuku teške teretne vlakove na dugim relacijama, od istočnih država sve do zapadnih, djelomično i kroz pustinjske krajeve, pa je važna i prednost da plinskoturbinska lokomotiva ne treba vodu. Povoljan odnos između snage i težine, odnosno veličine plinske turbine, omogućuje gradnju plinskoturbinskih lokomotiva vrlo velikih snaga, čak do 6250 kW. Jedna tako snažna plinska turbolokomotiva može zamijeniti i četiri do pet dizelskih lokomotiva uobičajenih snaga od približno 1450 kW, što doprinosi ubrzanju željezničkog prometa. Lokomotive tako velikih snaga dolaze u obzir samo još u Sovjetskom Savezu. U ostalim evropskim zemljama, kao npr. u Švicarskoj, Engleskoj, Njemačkoj, Francuskoj i Švedskoj ova vrsta lokomotiva nije pokazala tako izrazite prednosti pred dizelskim i električnim lokomotivama.

U novije se vrijeme plinske turbine u Evropi pretežno primjenjuju za brza pogonska kola, za koja se uz velike snage zahtijevaju mala osovinska opterećenja. Plinska turbopogonska kola naročito su prikladna za neelektrificirane pruge s relativno teškim trasama, jer lakše postižu brzine iznad 40 m/s, nego

dizelska pogonska kola. Plinski turbopogonski vlakovi omogućuju i brzine vožnje između 55–80 m/s. Jedan od takvih turbopogonskih vlakova Francuskih željeznica (sl. 66) postigao je na probnim vožnjama 1972. godine brzinu od 88 m/s (318 km/h). Pogonsko postrojenje toga vlaka ima dva pogonska agregata (sl. 67), svaki sa po dvije turbine tipa Turmo III G od 940 kW (ukupna vučna snaga vlaka iznosi 4×940 kW), koje su paralelno vezane na jedan zajednički reduktor i jedan generator izmjenične struje.



Sl. 66. Francuski vlak TVG 001 s plinskoturbinskim pogonom



Sl. 67. Plinskoturbinsko pogonsko postrojenje francuskog vlaka TVG 001

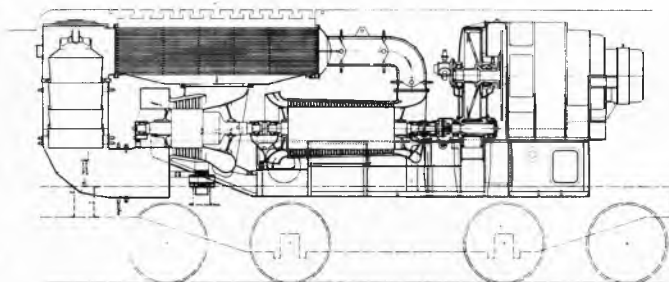
Ograničen prostor i ograničena težina pogonskog stroja na lokomotivi te otežan ili nemoguć nadzor nad strojem za vrijeme pogona razlog je da za željeznički pogon od mnogobrojnih vrsta plinskoturbinskih postrojenja služi samo vrlo malo tipova, i to onih najjednostavnijih. Praktički, to su samo postrojenja s jednostavnim otvorenim procesom, i postrojenja koja se sastoje od generatora tlačnog plina i turbine. Raznovrsni uređaji koji služe u stabilnim postrojenjima za povećavanje termičke iskoristivosti plinske turbine, kao npr. međuhlađenje i međuižgaranje, ne primjenjuju se u postrojenjima željezničkog pogona, a vjerojatno se neće primjenjivati niti u budućnosti. Zbog ograničenog prostora u lokomotivi ne upotrebljavaju se niti plinskoturbinska postrojenja sa zatvorenim kružnim tokom, iako bi ona omogućila znatno poboljšanje iskoristivosti η , i to osobito pri djelomičnom opterećenju do kojeg često dolazi u željezničkom pogonu.

Danas u svijetu niti nema tako mnogo plinskoturbinskih lokomotiva. Godine 1962. bilo ih je ukupno 73, a raspon njihovih vučnih snaga bio je od 265 do 6250 kW. Njihov se broj do 1971. godine nije mnogo promijenio.

Lokomotive s komorom izgaranja u turbinskom postrojenju. Godine 1941. izgradila je tvornica Brown, Boveri & Cie (BBC) jednu plinskoturbinsku lokomotivu približne snage od 1500 kW za Švicarske željeznice (sl. 68). Ta prva plinskoturbinska lokomotiva svijeta s aksijalnim kompresorom bila je u pogonu 13 godina i radila vrlo dobro.

Plinskoturbinsko postrojenje te lokomotive radilo je na slijedeći način (sl. 69): u zračnom kompresoru 1, što ga pokreće plinska turbina 4, usisani atmosferski zrak stlači se na približno 0,4 MPa. Na putu u komoru izgaranja 3 taj zrak prolazi

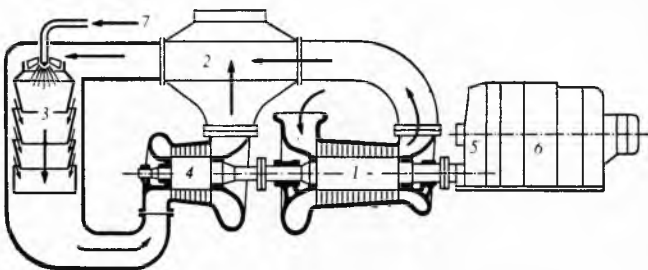
kroz cijevi predgrijača zraka 2. Plin koji služi kao pogonsko sredstvo nastaje u komori izgaranja 3 izgaranjem ložnog ulja uz dovod vrućeg zraka iz predgrijača. Vrući zrak je svojim manjim dijelom potreban za izgaranje, a većim dijelom da se snizi temperatura mješavine zraka i plina. Ta mješavina plinova izgaranja i zraka temperature 550–600 °C pokreće turbinu 4, koja preko reduktora 5 tjera električni generator 6. U turbini padne temperatura mješavine plinova na ~350 °C i s tom temperaturom mješavina ulazi u predgrijač zraka. Iz predgrijača zraka mješavina plinova izlazi u otvoreni prostor s temperaturom ~250 °C.



Sl. 68. Mašinsko postrojenje plinskoturbinske lokomotive 1101 Švicarskih željeznica

Turbinsko postrojenje ove lokomotive građeno je kao *jednoslojinsko*, što znači da se turbina i kompresor nalaze na istoj osovini od koje se odvodi i korisna snaga. Prijenosnik lokomotive je električni s generatorom istosmjerne struje. Od 5900 kW, koliko razvija turbina pri punom opterećenju, potrebno je gotovo 4400 kW za pogon kompresora, a preostala razlika od 1500 kW predaje se kao korisna snaga generatoru.

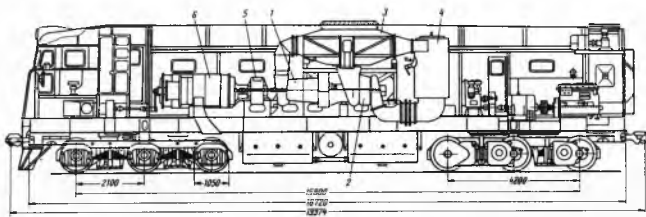
Za pokretanje postrojenja ove lokomotive upotrebljava se glavni generator kao motor što ga napaja pomoćni dizelski agregat snage 75 kW. Pri pokretanju postrojenja upotrebljava se uvijek dizelsko gorivo, a na ložno ulje se prelazi tek kad se postigne puna brzina vrtnje. Za paljenje pri pokretanju služi električki grijani upaljač ugrađen u komoru izgaranja. Tek kad se postigne brzina vrtnje paljenja, odvoji se pomoćni agregat od glavnog generatora, a postrojenje se dalje pokreće vlastitom snagom od 295 sve do 545 rad/s ($2800 \dots 5200 \text{ min}^{-1}$). Čitav taj proces od polaska do razvijanja pune snage traje svega oko 10 minuta.



Sl. 69. Plinskoturbinsko postrojenje s otvorenim kružnim tokom. 1 zračni kompresor, 2 predgrijač zraka, 3 komora izgaranja, 4 plinska turbina, 5 reduktor, 6 generator, 7 dovod goriva (ložnog ulja)

Za vožnju lokomotive i manevarsku vožnju do brzine vožnje od 4 m/s upotrebljava se samo jedan traksijski elektromotor, što ga napaja pomoćni dizelski agregat, jer turbinsko postrojenje u praznom hodu i pri djelomičnom opterećenju ima visoku jediničnu potrošnju goriva.

U ovu grupu lokomotiva spada i C_0C_0 lokomotiva za teške teretne vlakove, građena u tvornici lokomotiva u Harkovu, SSSR (sl. 70). Lokomotiva ima dvije paralelno smještene plinske turbine koje su preko mehaničkog reduktora vezane svaka s vlastitim generatorom. Svaka plinska turbina razvija 2400 kW pri 735 rad/s (7000 min^{-1}), i uz ulaznu temperaturu plina od 700 °C. Kutna je brzina generatora 168 rad/s (1600 min^{-1}). Termička iskoristivost čitavog postrojenja iznosi 21,3%. Lokomotiva razvija snagu na kuki od 3950 kW, a masa lokomotive



Sl. 70. C₀C₀ jedinica plinskoturbinske lokomotive građene u SSSR. 1 kompresor, 2 plinska turbina, 3 izmjenjivač topline, 4 komora izgaranja, 5 reduktor, 6 električni generator

iznosi 139 t. Kompletna udvojena lokomotiva sastavljena od dvije takve C₀C₀ jedinice ima masu 278 t.

Izmjenjivač topline zauzima mnogo prostora, a i uzrok je kvarova zbog kojih se lokomotiva mora isključivati iz pogona i zbog kojih rastu troškovi održavanja. To je razlog da je izgrađena plinskoturbinska lokomotiva bez izmjenjivača topline. Time smanjena ekonomičnost jednim se dijelom nadoknadila uvođenjem što je moguće viših temperatura u proces. Prvu



Sl. 71. Plinskoturbinska lokomotiva 18100 Britanskih željeznica

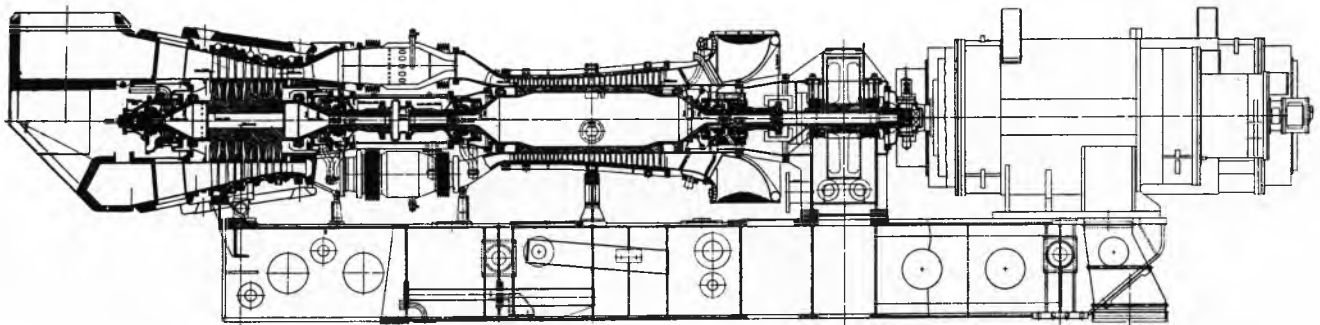
takvu lokomotivu u Evropi izgradila je 1951. godine tvornica Metropolitan Vickers Ltd., Manchester (kasnije AEI) za Britanske željeznice, tadašnje Great Western Railway (sl. 71). Ta lokomotiva snage 2200 kW ima jednoosovinsko turbinsko postrojenje s otvorenim kružnim procesom. Pri punoj snazi turbinskog postrojenja temperatura je plinova na ulazu u turbinu 700 °C, a na izlazu 400 °C, kutna brzina turbinske grupe jest 734 rad/s (7000 min⁻¹), kutna brzina generatora je 167 rad/s (1600 min⁻¹), potrošnja goriva 150 g/J pri punom opterećenju, a iskoristivost pri punom opterećenju 16,8%. Plinskoturbinska grupa pokreće preko reduktora tri glavna generatora, jedan pomoćni generator i uzбудnik za glavne generatore (sl. 72).

Od travnja 1952. godine, kad je ova lokomotiva bila prvi put uvrštena u službu, pa sve do rujna 1953. kad je bila isključena iz službe, prošla je oko 164000 km. Za sve je to vrijeme u pogonu općenito zadovoljavala, ali ne i u ekonomičnosti. Razlog je tome što takve lokomotive zahtijevaju dugačke vožnje pod punim opterećenjem bez prekidanja, a taj se uvjet u Britanskim željeznicama gotovo ne može ostvariti.

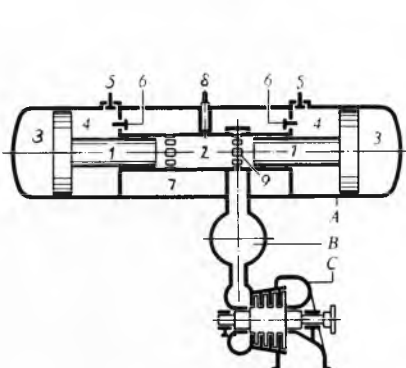
Okolnosti su na željeznicama u Sjedinjenim Američkim Državama drugačije, a tamo je i gorivo jeftinije, pa su se lakše odlučili za plinskoturbinsko postrojenje bez izmjenjivača topline. Tako je pedesetih godina XX stoljeća tvornica General Electric izgradila 30 plinskoturbinskih lokomotiva bez izmjenjivača topline, snage 6250 kW. Te su lokomotive bile ekonomične jer su vukle teške teretne vlakove, ~5000 t, na pruzi dugoj ~1600 km, prosječno prolazeći ~4800 km u tjedan dana.

Lokomotive s generatorom tlačnog plina u turbinskom postrojenju. Prva plinskoturbinska lokomotiva s generatorom tlačnog plina izgrađena je 1933. godine prema zamisli Büchija i švedske tvornice Götaverken, Göteborg. U daljem razvoju takvih lokomotiva 1955. godine izgrađena je za Švedske željeznice lokomotiva snage 740 kW, kojoj je kao plinski generator služio 5-cilindrički dizelski motor s protuklipovima.

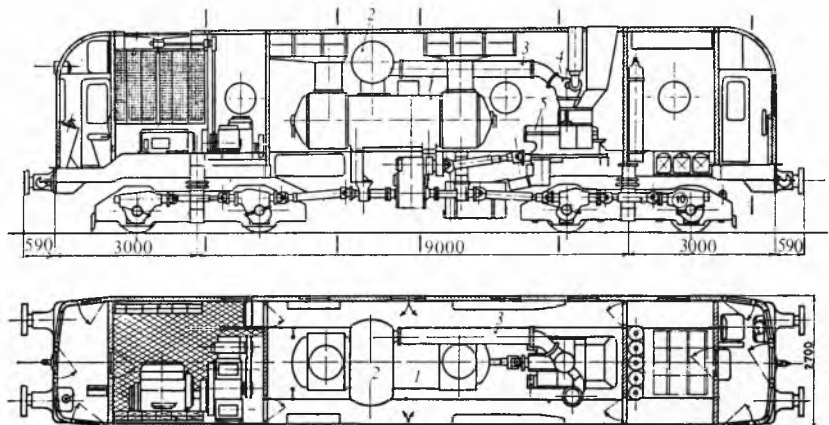
Najjednostavniji oblik generatora tlačnog plina jest plinski generator sa slobodnim klipovima, koji je za lokomotivske svrhe, prema prijedlogu Pescara a na osnovi licence SEME (Société



Sl. 72. Mašinsko postrojenje plinskoturbinske lokomotive 18100 Britanskih željeznica



Sl. 73. Shema Pescarova plinskog generatora sa slobodnim klipovima. A plinski generator, B skupljalo plina, C plinska turbina, 1 klipovi, 2 radni cilindar, 3 povratni cilindar, 4 cilindar kompresora, 5 usisni ventili, 6 ispušni ventili, 7 ulazni raspori, 8 brizgaljka goriva, 9 izlazni raspori



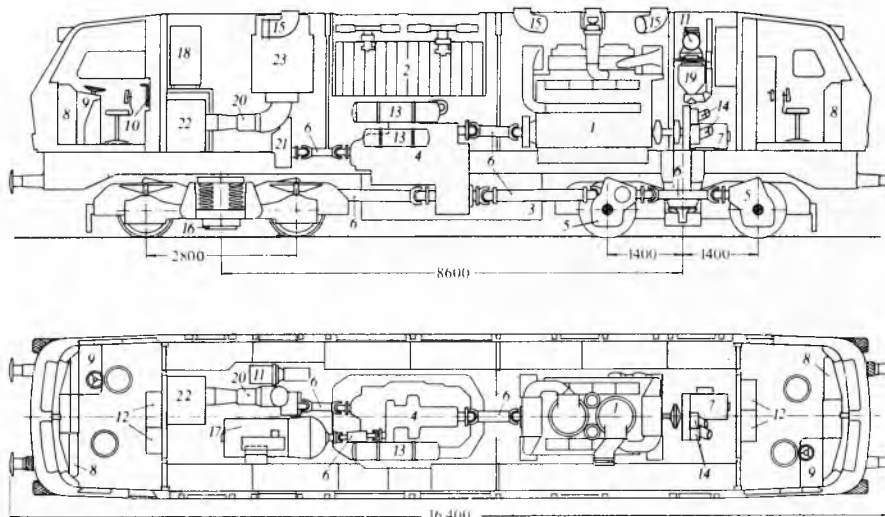
Sl. 74. Plinskoturbinska lokomotiva izgrađena u tvornici Renault za Francuske željeznice. 1 plinski generator sa slobodnim klipovima, 2 skupljalo plina, 3 plinovod, 4 mimovod (by-pass), 5 plinska turbina

d' Études Mécaniques et Energétiques), izgradila SIGMA (Société Industrielle Générale de Mécanique Appliquée) (sl. 73). Takvo plinskoturbinsko postrojenje ima tri glavna dijela: plinski generator sa slobodnim klipovima, skupljalo plina i plinsku turbinu.

Zadatak je plinskog generatora sa slobodnim klipovima da usisava zrak i da ga komprimira. Energija potrebna za komprimiranje zraka dobiva se izgaranjem goriva u generatoru. Skupljalo plina, koje je smješteno između generatora plina i plinske turbine, služi za miješanje zraka i plinova izgaranja iz plinskog generatora. U skupljalu se prigušuju i udarci plina uzrokovani ritmičkim radom plinskog generatora. Pogonski plin, tj. mješavina plinova izgaranja i zraka (80% zraka i 20% plinova izgaranja) koja iz skupljala plina struji u plinsku turbinu, ima pri punom opterećenju pretlak $\sim 0,3$ MPa i temperaturu $\sim 460^\circ\text{C}$.

Jedna od lokomotiva u koju je ugrađeno takvo plinskoturbinsko postrojenje jest lokomotiva snage 740 kW Francuskih željeznica (SNCF) Nr. 040-GA-1 (sl. 74). Ta je lokomotiva građena u tvornici Renault, Billancourt/Seine, a plinski je generator sa slobodnim klipovima isporučila tvornica SIGMA. Prednost je takvih plinskoturbinskih lokomotiva u tome što se plinski generator može smjestiti u lokomotivi neovisno o smještaju plinske turbine i s njom povezanog prijenosnika snage, jer između plinskog generatora i turbine ne postoji nikakva mehanička veza osim plinovodne cijevi. Sloboda u izboru rasporeda pogonskog postrojenja omogućuje dobru raspodjelu težina unutar lokomotive, odnosno dobru raspodjelu osovinских opterećenja, i dobru pristupačnost pojedinim dijelovima. Nezgodna strana plinskog generatora jest u tome što mu se snaga ne može sniziti ispod 30% normalne snage. Zbog toga, ako je potrebna još manja snaga kao i pri kraćim stajanjima lokomotive, pretljak plina mora se puštati u atmosferu.

Probnu lokomotivu s plinskim generatorom sa slobodnim klipovima izgradila je i tvornica lokomotiva u Harkovu (SSSR). Ta se lokomotiva sastoji od dvije jedinice sa po dva troosovinska podvoska, a ima ukupnu snagu od 4400 kW.



Sl. 75. Dizelska lokomotiva 219001 Njemačkih željeznica s pomoćnom pogonskom plinskom turbinom. 1 dizelski motor, 2 rashladni uređaj, 3 spremnik goriva, 4 hidrodinamički mjenjač prijenosnika, 5 osovinski prijenosnik, 6 kardanska osovina, 7 generator, 8 instrumentna ploča, 9 upravljački pult, 10 ručna kočnica, 11 kompresor zračne kočnice, 12 ormar za pribor, 13 izmjenjivač topline pogonskog ulja, 14 pumpe ventilatora, 15 ventilator strojarnice, 16 magnetna kočnica, 17 generator za električno grijanje vlaka, 18 ormar za pribor, 19 predgrijač rashladne vode, 20 plinska turbina, 21 reduktor turbine, 22 filter usisnog zraka, 23 ispušni lonac s prigušivačem buke

Plinskoturbinsko postrojenje na ugljen. Za plinskoturbinske lokomotive može se upotrebljavati i ugljen kao gorivo. Razvijene su dvije vrste procesa kojim se izgaranjem ugljena dobiva plin za pogon plinske turbine.

Proces s direktno loženom plinskom turbinom. Ugljena prašina izgara u komori izgaranja, a plinovi izgaranja struje neposredno u turbinu jednako kao i u postrojenjima s ložnim uljem. Najveća je poteškoća uklanjanje nesagorivih čvrstih dijelica (pepela) iz pogonskog plina, jer takve čestice veoma oštećuju turbinske lopatice.

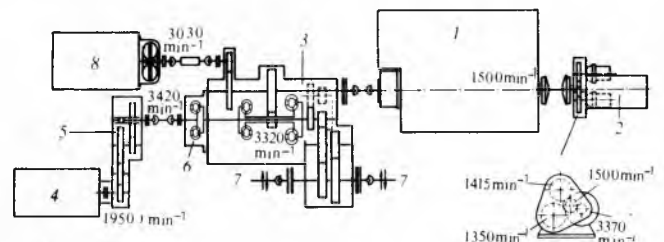
Proces s indirektno loženom plinskom turbinom. U ovom procesu služi kao pogonsko sredstvo zrak koji se između kompresora i turbine zagrije u izmjenjivaču topline. Prema tome,

plinovi izgaranja ne dolaze u doticaj s turbinom. U takvu procesu ugljen ne mora biti fino mljeven, pa ni onda kad izgara u komori izgaranja. Postoje i konstrukcijska rješenja da komadni ugljen izgara na rešetki.

Bez obzira da li je loženje ugljenom direktno ili indirektno, plinskoturbinsko postrojenje je uvijek s jednostavnim otvorenim kružnim procesom. Zbog prostora potrebnog za izmjenjivač topline snaga takvih lokomotiva je ograničena na 3000 kW.

Plinska turbina kao dodatni pogon dizelske lokomotive. Šezdesetih godina XX stoljeća već su bila razvijena lagana i mala plinskoturbinska postrojenja za pogon aviona i helikoptera. Jedno takvo dvoosovinsko plinskoturbinsko postrojenje, izgrađeno u SAD, snage ~ 740 kW, imalo je masu svega $0,15 \dots 0,25$ t, promjer malo veći od $0,5$ m i duljinu ~ 2 m, a pri punom je opterećenju potrošak goriva bio ~ 115 g/J. Na dizelskim lokomotivama takva su mala plinskoturbinska postrojenja mogla dobro poslužiti za pogon električnog generatora za grijanje vlaka. Time se postiglo da je glavni dizelski motor trošio svu svoju snagu samo za pogon lokomotive, a ne i za pomoćne uređaje, kao što je električno grijanje. Jedina je poteškoća u tome što plinska turbina pri djelomičnom opterećenju troši suviše mnogo goriva, te nije ekonomična ako služi isključivo za pogon generatora za grijanje vlaka. Rješenje je nađeno tako da je plinska turbina, pored pogona generatora za grijanje vlaka, priključena i na pogon lokomotive kao dodatni pogonski stroj.

Pomoćni plinskoturbinski uređaj prvi put je primijenjen na dizelskoj lokomotivi pogonskog broja 219001 Njemačkih željeznica (sl. 75 i 76). Na toj lokomotivi glavni dizelski motor od 1580 kW služi kao normalni pogonski stroj, a plinska turbina, nominalne snage od 660 kW, kao dodatni pogonski stroj. To znači da plinska turbina djeluje za pokrivanje špica, npr. pri ubrzavanju vlaka ili pri vožnji na usponu. Ona pomaže i indirektno jer daje snagu potrebnu za grijanje vlaka. Inače, snaga plinske turbine služi isključivo za vuču kad je snaga dizelskog motora nedovoljna. U takvim uvjetima ne dolazi do visokog potroška goriva zbog djelomičnog opterećenja plinske turbine, jer se djelomično opterećenje vozila u vožnji regulira



Sl. 76. Shema pogonskog postrojenja lokomotive 219001 Njemačkih željeznica. 1 dizelski motor, 2 pokretač dizelskog motora, 3 hidrodinamički mjenjač prijenosnika, 4 plinska turbina, 5 reduktor turbine, 6 hidrodinamički transformator za plinsku turbinu, 7 pogon pogonskih osovina, 8 generator za električno grijanje vlaka

dizelskim motorom. Prema tome, u takvom pogonu turbina radi ili s nominalnom snagom, u području povoljne jedinične potrošnje goriva, ili za vrijeme kratkih stanki u praznom hodu. Kad u dužim razdobljima nije potrebna dodatna snaga ni za pogon lokomotive ni za grijanje vlaka, rad se plinske turbine obustavi.

Ugradbom plinske turbine kao dodatnog pogonskog stroja povećava se pogonska snaga ~50% uz povećanje ukupne težine lokomotive ~2%. Time je ujedno omogućeno da se lokomotive izgrade kao BB-lokomotive umjesto CC-lokomotive, kad bi za pogon služio samo dizelski motor. Takva se turbodizelska lokomotiva sa svojim svojstvima, s obzirom na preopterećenja, približila svojstvima električne lokomotive, tj. kratkotrajno se može preoptereti.

Praksa je pokazala da se plinske turbine, kakve se primjenjuju u zrakoplovstvu, mogu s uspjehom ugrađivati i u željeznička vozila kao dodatni pogonski stroj uz dizelski motor koji je glavni pogonski stroj. To su turbodizelska vozila, koja mogu biti lokomotive ili pogonska kola. Visoki troškovi održavanja takvih avionskih plinskih turbina nisu bitni jer je od ukupnog vremena vožnje lokomotive plinska turbina u pogonu ~30%. Visoka cijena plinske turbine kompenzira se time što se turbodizelska lokomotiva može izgraditi manja od obične dizelske lokomotive jednake snage.

ELEKTRIČNE LOKOMOTIVE

Prva električna lokomotiva uključena u javni promet bila je izgrađena u tvornici Siemens & Halske u Berlinu prema projektima W. Siemens. Ta je lokomotiva 1879. godine na prostoru Zantske i industrijske izložbe u Berlinu vukla tri mala vagona za 18 osoba brzinom od 2 m/s. Neopterećena, mogla je postići i brzinu od 3,5 m/s (13 km/h), imala je masu 1030 kg, a za pogon joj je služio 2,2 kW serijski motor istosmjerne struje napona 150 V. Tokom četiri mjeseca, tim izložbenim vlakom bilo je prevezeno ~86 000 osoba na pruzi dugoj ~300 m i kolosijeka širine 490 mm. Svi putnici, pa i ostali posjetioci izložbe, bili su oduševljeni mirnom vožnjom te lokomotive bez dima i čađe.

Uspjeh i dobra svojstva prve električne lokomotive potakli su Siemens da 16. svibnja 1881. godine pusti u Berlinu u probni pogon i prvu tramvajsku liniju na svijetu, duljine 2,45 km. Iste godine prikazan je i na Međunarodnoj izložbi elektrotehnike u Parizu električni tramvaj, koji je vozio na pruzi duljine 500 m, a električnu energiju dobivao iz zračnog kontaktnog voda.

Dobra svojstva električne vuče brzo su došla do izražaja, i to osobito u gradskom i prigradskom prometu, tako da je već 1900. godine bilo ~2000 km tramvajskih pruga u Evropi i ~30000 km u SAD. U to vrijeme napon napajanja od 500–600 V i konstrukcija vučnih elektromotora ograničavaju snagu električnih lokomotiva, pa se zato nisu elektrificirale duge pruge za prijevoz teških vlakova s velikim brzinama. Iako se u Evropi radilo mnogo na razvoju lokomotive koja bi mogla obavljati i takvu službu, prva električna lokomotiva veće snage bila je izgrađena u Americi i pokazana na Svjetskoj izložbi u Chicagu 1893. godine. Dvije godine kasnije prvi put je takva električna lokomotiva uključena u redoviti promet, i to na pruzi Baltimore—Ohio. Njezina je snaga bila 800 kW, napajala se istosmjernom strujom od 650 V, a na pruzi duljine 6,5 km, s djelomičnim usponom od 14%, mogla je vući vlak od 1700 t brzinom od 5,5 m/s. Zahvaljujući električnoj vuči nestale su i teškoće koje je stvarao dim parnih lokomotiva u baltimorskom tunelu.

S tehnikom istosmjerne struje nije se mogao iskoristiti napon u kontaktnom vodu viši od 3000 V zbog poteškoća s izolacijom, i to osobito izolacijom vučnih motora. Budući da je srednji napon na lamelama komutatora istosmjernih motora ograničen na 16–19 V, to bi pri višim naponima komutator postao nerazmjerno velik. Jače opterećene pruge zahtijevaju velike struje u kontaktnim vodovima istosmjerne mreže, a time i velike presjeke tih bakrenih vodova (200–300 mm² po jednoj pruzi). Unatoč tome, i tada je pad napona u kontaktnim vodovima velik, tako da razmak između elektrovučnih podstanica mora biti malen, nekih 12–25 km, pa stoga broj podstanica postaje velik.

Željeznički sustav istosmjerne struje, koji je i najstariji, vezan je uz razmjerno niske napone u kontaktnom vodu. Napon najčešće iznosi 550–750 V za tramvajске pruge, 800–1500 V za gradske brze željeznice i prigradske željeznice, 1200–2400 V za rudničke željeznice, 1500 i 3000 V za glavne i sporedne pruge u međugradskom željezničkom prometu.

Istosmjerna struja za željezničke svrhe vrlo se rijetko proizvodi neposredno u elektranama. Redovito se trofazna struja iz velikih elektrana transformirana na visoki napon, dovodi u elektrovučne podstanice, gdje se pomoću transformatora snizuje napon i pomoću živina ispravljača (ranije pomoću okretnog

strojnog pretvarača, ili u novije vrijeme suhog ispravljača) pretvara u istosmjernu struju.

Otkriće polifaznih struja omogućilo je da se za električnu vuču primijene visoki naponi u kontaktnom vodu, s tim da se napon u vozilu pomoću transformatora snizi na vrijednost najpovoljniju za vučne motore. Potkraj XIX st. u Evropi se razvija trofazni sustav, i 1899. godine uvrštena je u službu prva električna lokomotiva Evrope napajana trofaznom strujom. Nju su gradile švicarske tvornice Gebr. Sulzer AG, Winterthur, i Brown, Boveri & Cie., Baden, a vozila je na ~40 km dugačkoj pruzi Burgdorf—Thun, koja je bila elektrificirana trofaznim sustavom pod naponom od 750 V (40 Hz). Dvije faze su bile u zračnom vodu, a treća na tračnicama kolosijeka. Lokomotiva je imala masu od 30 t, opskrbljena je bila sa dva trofazna motora od 110 kW, a maksimalna brzina iznosila je 14 m/s. Do 1933. godine ona je prošla ~600 000 km.

Nakon elektrificiranja nekoliko pruga u Italiji, elektrificirana je 1902. godine pruga Valtellina s naponom od 3000 V. Iz ove se željeznice slijedećih godina razvila jedina veća željeznica u svijetu koja je elektrificirana trofaznim sustavom.

Iako je trofazni sustav omogućio izradbu snažnih lokomotiva, koje su postizale za ono vrijeme nevjerojatne brzine od 58 m/s i koje su mogle biti opskrbljene jednostavnim induksijskim motorima koji nisu imali komutatora te su omogućivali napajanje pod visokim naponom, taj je sustav imao i niz nedostataka. Osnovni je problem bio neprikladnost asinhronog motora za vučni pogon. Pri svim opterećenjima brzina vrtnje asinhronog motora ostaje približno jednaka, i već s malim padom napona u kontaktnom vodu znatno mu opada okretni moment. Vozila za trofaznu struju trebaju za pogon dva zračna voda, koji moraju biti međusobno i prema zemlji izolirani za puni napon. Zato je visina napona u kontaktnom vodu ograničena na 3000 do 3600 V među fazama, a ograničena je i brzina vožnje. Dvožični kontakti vod zahtijeva komplicirane zračne skretnice koje često uzrokuju smetnje i time povisuju troškove održavanja. Zbog svega toga je trofazni sustav za željeznički pogon napušten i više se ne primjenjuje na novim željezničkim prugama iako omogućuje gradnju jednostavnih i jeftinih lokomotiva.

Da se otklone teškoće s istosmjernom i s trofaznom strujom, tražilo se novo rješenje, pa se u prvom desetljeću XX stoljeća počinje upotrebljavati *jednofazna struja* za željezničku vuču. To je omogućilo da se lokomotiva napaja iz samo jednog kontaktnog voda pod visokim naponom.

Prednosti jednofaznog sustava prema istosmjernom jesu: transformiranje struje je jednostavno, dakle, izbor napona u kontaktnom vodu i vučnim motorima je slobodan; konstrukcija je kontaktnih vodova jednostavna i za vodove je potrebno manje bakra (presjek vodiča ~100 mm² po pruzi); reguliranje brzine je bez gubitaka.

Prva jednofazna lokomotiva na svijetu bila je uvrštena u pogon 1905. godine na pruzi Seebach—Wettingen u Švicarskoj (15 kV, 15 Hz). Masa lokomotive iznosila je 40 t, snaga 300 kW, a maksimalna brzina 17 m/s.

Prvi pokušaji da se jednofaznom strujom frekvencije 50 i iz direktno napajaju serijski kolektorski vučni motori nisu dali dobre rezultate, pa je pomoću okretnih pretvarača u elektrovučnim podstanicama bio stvoren sustav sa 16½ Hz u Evropi, a sa 25 Hz u Americi. Tako 1913. u Švicarskoj donose odluku da željeznice potpuno elektrificiraju s jednofaznim sustavom 16½ Hz, 15 kV.

Poslije drugoga svjetskog rata u Francuskoj su se vrlo opsežno ispitivale različite mogućnosti električne vuče s jednofaznim sustavom 50 Hz. Kasnije je takvim ispitivanjima pristupila njemačka, švicarska i belgijska industrija. U Francuskoj je bilo ispitivano mnogo različitih tipova lokomotiva, pa se među ostalim pokazalo da lokomotive s direktnim motorima imaju nedostatke s obzirom na komutaciju, a da su lokomotive sa živinim ispravljačima dobre, iako je živin ispravljač na lokomotivi slaba točka. Dobri su rezultati postignuti primjenom najboljeg vučnog motora, tj. serijskog motora istosmjerne struje, napajanog preko jednoanodnih ispravljača na idealan način, što je omogućilo da se ostvari dobra regulacija brzine i vučne sile.

U najnovije vrijeme primjena silicijskih ispravljača dala je takve rezultate da se jednofazni sustav industrijske frekvencije probio u prvi plan. Silicijski ispravljači, u usporedbi sa živinim, imaju prednost da su manji, imaju bolju iskoristivost, sigurniji su u pogonu i jednostavniji u radu. Prema tome, lokomotivi služi za pogon serijski motor istosmjerne struje, reguliran preko upravljivih silicijskih poluvodiča.

Zemlje koje imaju jednofazni sustav 25 kV, 50 Hz u današnje vrijeme odlučuju se za lokomotive s poluvodičkim ispravljačima,

tako da se suvremenim tipom jednofazne lokomotive 25 kV, 50 Hz smatra ona koja ima silicijski ispravljač.

Nove pruge u svijetu danas se elektrificiraju s jednofaznim sustavom 50 Hz, osim u zemljama koje nastavljaju elektrifikaciju onim sustavom kojim su je nekada ranije i započeli.

Općenito govoreći, dobre strane električne lokomotive jesu: jednoliki okretni moment vučnih elektromotora omogućuje dobro iskorištenje snage s obzirom na adhezijsku težinu lokomotive. Zato električna lokomotiva lako savladava uspone i lako pokreće vlak s mjesta, što omogućuje ubrzanje cjelokupnog transporta. Električna lokomotiva može se za kratko vrijeme veoma preoptereti, jer ima na raspolaganju velike količine energije iz napojne mreže i jer joj to omogućuju vučni elektromotori. Zbog toga je električna lokomotiva vrlo prikladna za brdske pruge i za pruge s malim udaljenostima stanica, gdje pokretanje vlakova s mjesta treba da bude što brže. Električna lokomotiva je pridonijela da se ukloni dim i čađa iz gradskog i podzemnog prometa, ili općenito, da se znatno smanji zagađivanje čovječje okoline. Težina električne lokomotive po jedinici snage je malena, jer se izvor energije nalazi izvan nje same. Zato električna lokomotiva ima manje dimenzije i lakša je od ostalih tipova lokomotiva iste vučne snage, pa je osobito prikladna i za neke posebne službe kao npr. za vuču vagoneta koji se radi utovara podvoze pod bagere. Budući da električna lokomotiva ne nosi i postrojenje za proizvodnju električne energije, troškovi su njezina održavanja maleni. Velika brzina vrtnje elektromotora omogućuje velike brzine lokomotive s kotačima malog promjera.

Glavni nedostatak električnih lokomotiva su vrlo visoki investicijski troškovi elektrificiranja pruge.

Ostalo o električnim lokomotivama v. *Električna vuča i elektromotorna vozila*, TE 3, str. 689.

SPECIJALNE LOKOMOTIVE

Jedan od glavnih poticaja gradnji željeznica i lokomotiva bio je upravo rudnički transport. Povećanje rudarske proizvodnje bilo je uvjetovano bržim i ekonomičnijim transportom ugljena, rudače i jalovine kako u rudničkim jamama pod zemljom tako i na površini rudnika. Dok je za površinski rudnički transport mogla poslužiti bilo kakva lokomotiva, u rudničkim jamama to nije mogla. Skućen prostor u jami, opasnost od eksplozije jamskih plinova ili ugljene prašine, problemi ventilacije jame itd., zahtijevali su specijalnu konstrukciju lokomotiva, prilagođenu specifičnim uvjetima rada u jami. Ipak, prošlo je gotovo čitavo stoljeće dok je konstruirana lokomotiva prikladna za transport u rudničkoj jami.

Rudničke lokomotive

Lokomotive koje služe u rudnicima za površinski transport nazivaju se rudničkim *površinskim lokomotivama*. To su parne ili električne lokomotive, odnosno normalne industrijske parne ili dizelske lokomotive. Rudničke površinske lokomotive grade se za širinu kolosijeka 500–1000 mm.

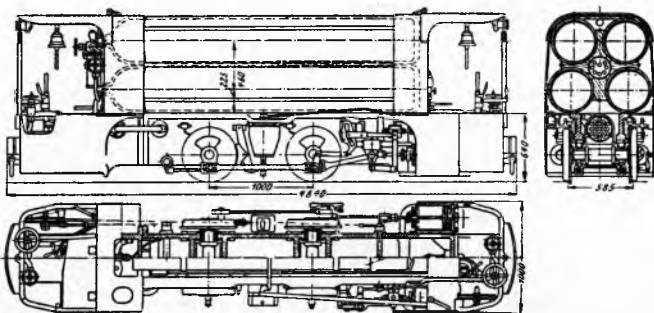
Lokomotive koje vuku vagonu u rudničkim jamama ispod površine zemlje nazivaju se *jamskim lokomotivama*. Konstrukcija jamskih lokomotiva mora zadovoljiti sljedeće glavne zahtjeve: visina lokomotive mora biti malena da bi mogla raditi u niskim prostorima ispod zemlje; zbog ograničenosti ventilacije u rudnicima bilo kakvi štetni sastojci ispuha stroja moraju se održati u određenim sigurnosnim granicama; u rudnicima u kojima prijeti opasnost od eksplozije lokomotiva mora biti tako građena da ni iskom ni plamenom ne prouzrokuje eksploziju.

Ovi zahtjevi čine i suštinsku razliku između jamskih lokomotiva i lokomotiva namijenjenih za rad na površini.

Jamske lokomotive. S obzirom na vrst pogonskog stroja, danas se uglavnom upotrebljavaju tri vrste jamskih lokomotiva: zračne lokomotive, dizelske lokomotive i električne lokomotive. Pored ovih triju glavnih vrsta jamskih lokomotiva, postoje i jamske lokomotive s različitim neuobičajenim načinima pogona, ali ih ima u rudničkom transportu vrlo malo.

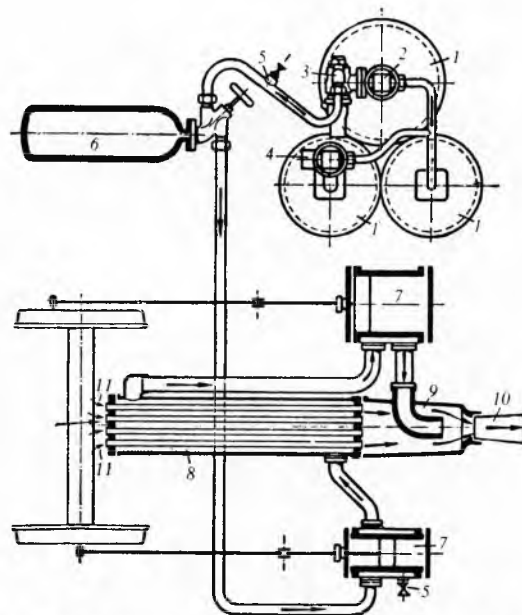
Radna je karakteristika jamske lokomotive dana njezinom *oznakom*. *Oznaka* jamske lokomotive jest produkt mase lokomotive u službi izražene u tonama i satne snage lokomotive izražene u kW. Prema namjeni i *oznaci*, jamske lokomotive svrstane su na sljedeće tri grupe: 1) otkopne lokomotive, među koje spadaju sve s *oznakom* manjom od 110; 2) sabirne lokomotive, među koje spadaju sve s *oznakom* između 110–220; 3) odvozne lokomotive kojima je *oznaka* veća od 220.

Zračne lokomotive (sl. 77). Iako je već mnogo ranije bilo predloženo da se komprimirani zrak upotrijebi za pokretanje motora, prve su zračne lokomotive izgrađene tek 1874. godine.



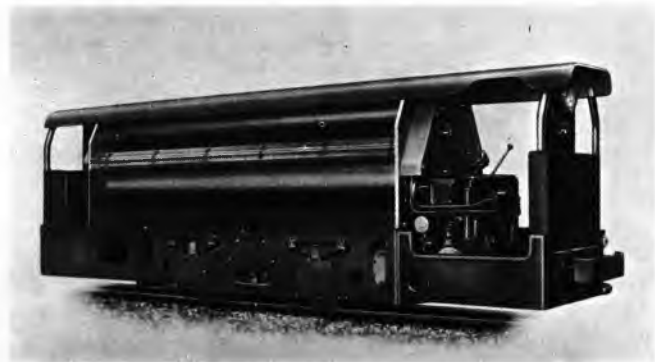
Sl. 77. Rudnička zračna lokomotiva

Zračne se lokomotive sa sigurnošću mogu upotrijebiti u rudnicima gdje postoji opasnost od eksplozije i požara. One su u tome sigurnije od svih ostalih vrsta lokomotiva. Osim toga, zračne lokomotive pospješuju ventilaciju prostora u kojima rade, jer je njihov ispuh čisti hladan zrak. Povećanjem tlaka u zračnim spremnicima i povećanjem volumena spremnika povećava se akcijski doseg zračne lokomotive. Tlak je zraka u spremnicima ~15–22 MPa. Prije ulaska u cilindre lokomotivskog zračnog stroja, tlak se reducira na 1,2–4 MPa, pri čemu se zrak znatno ohladi. Za zagrijavanje tako ohlađenog zraka lokomotiva ima predgrijače koje grije vanjski jamski zrak. U kompaundnim lokomotivskim zračnim strojevima prijeko su potrebni i međugrijači zraka, da zagriju ohlađeni zrak prije ulaza u niskotlačni cilindar (sl. 78). Snage su zračnih lokomotiva najčešće ~4–35 kW. Jedno punjenje zračnog spremnika omogućuje akcijski doseg od 2–11 km, već prema veličini lokomotive. Zračne lokomotive imaju masu do ~11 t.



Sl. 78. Shema pogonskog postrojenja zračne kompaundne lokomotive. 1 glavni spremnik, 2 glavni zaporni ventil, 3 redukcijski ventil, 4 napojni ventil, 5 sigurnosni ventil, 6 pomoćni spremnik, 7 cilindri stroja, 8 predgrijač, 9 eksaustor, 10 ispuh, 11 ulaz jamskog zraka za grijanje predgrijača

Zračne su lokomotive vrlo prikladne kao otkopne lokomotive, jer se sa sigurnošću mogu upotrijebiti u jamama gdje postoji opasnost od eksplozije i požara. Kako otkopne lokomotive ne smiju biti veće od rudarskog vagoneta, postoje velike poteškoće da se zračna lokomotiva izgradi tako malih dimenzija, jer zračni spremnici zahtijevaju mnogo prostora. Za sada je nemoguće izraditi zračnu lokomotivu koja bi mogla jednim nabijanjem zrakom raditi čitavu smjenu, ili barem pola smjene, nego ju je potrebno nekoliko puta puniti unutar jedne smjene. Radi toga se moraju postaviti visokotlačni zračni cijevni vodovi do blizine otkopa, što je jedan od glavnih uzroka da se ove lokomotive rijetko upotrebljavaju kao otkopne. Osim toga, visoki investicijski troškovi postrojenja za punjenje zračnih lokomotiva čine ih neekonomičnim u jamskom pogonu, pa one mnogo češće služe na glavnim rudničkim prugama (sl. 79).



Sl. 79. Zračna lokomotiva tvornice Arn. Jung Lokomotivfabrik GmbH. Snaga 37 kW, tlak zraka u bocama 20 MPa, radni tlak u zračnom motoru 4 MPa, masa lokomotive u službi 10,5 t, maksimalna brzina 3 m/s; gradi se za kolosijeka širine 495–750 mm

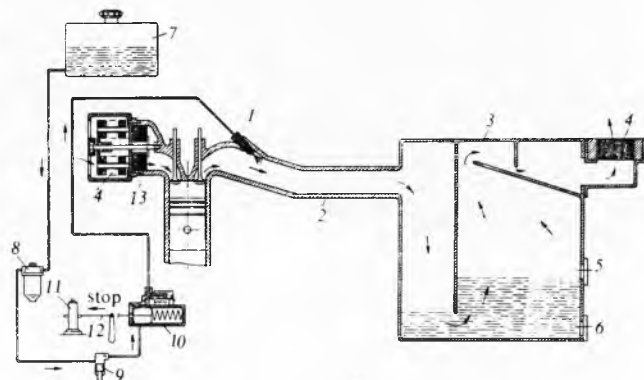
Dizelske lokomotive (sl. 80). Lokomotive s benzinskim motorom ne odgovaraju za rad u jami zbog visokog sadržaja ugljik-monoksida u ispušnim plinovima i zbog lako zapaljivog goriva. Dizelske lokomotive nemaju taj nedostatak, jer se za rad u jami mogu odabrati tako teška dizelska goriva da ona ne planu u doticaju s rudarskom svjetiljkom ili zapaljenom šibicom, ili zbog iskre uzrokovane kresanjem. Prema tome, teško dizelsko gorivo nije opasan uzročnik požara u jamama kao što je to benzin ili benzol. Visoka kompresija u dizelskim motorima (3,5 MPa kod $\sim 700^\circ\text{C}$) uz veliku količinu zraka osigurava potpuno izgaranje goriva, pa je onečišćenje jamskog zraka ugljik-monoksidom neznatno prema onome što uzrokuju benzinske lokomotive. Budući da se dizelska lokomotiva pokazala prikladnom za jamski pogon, već su se 1930. godine počele razvijati vatrosigurne dizelske lokomotive. U rudnicima ugljena u Velikoj Britaniji prvi put 1939. godine ulaze u službu dizelske lokomotive koje su imale svjedodžbu za rad u vatropasnim uvjetima.



Sl. 80. Dizelska hidraulička lokomotiva za rad u rudničkim jamama tvornice Klockner-Humboldt-Deutz. Snaga 66 kW, masa 14 t, maksimalna brzina 3,78 m/s (13,6 km/h)

U jamama gdje postoji opasnost od eksplozije metana ili ugljene prašine dizelske lokomotive su opskrbljene vatrosigurnim napravama. Bitni dio tih naprava sastoji se od ispušne cijevi hlađene vodom, sapnice za ubrizgavanje vode u ispušnu cijev, ispušnog lonca hlađenog vodom i pločastih osigurača smještenih na ispušnom loncu i na zračnoj usisnoj cijevi dizelskog motora (sl. 81). Pločasti osigurači sastavljeni su od čeličnih ploča širokih 50 mm, s međurazmacima od 0,8 mm, da bi se ispušni plinovi prolazom kroz takav osigurač ohladili na određenu temperaturu, i kad zakaže djelovanje ubrizgavanja vode i djelovanje vodene kupke u ispušnom loncu. Kad zakaže ubrizgavanje vode u ispušnu cijev, onda se pomoću specijalnog kontrolnog uređaja obustavi dovod goriva dizelskom motoru i time se motor zaustavi. I električni je uređaj za osvjjetljenje ovih lokomotiva osiguran da ne bi prouzrokovao eksploziju u jami.

Jamske dizelske lokomotive obično se grade snage 6,5–66 kW, imaju masu 2,5–14 t, i brzinu vožnje 0,7–5 m/s.



Sl. 81. Ispušni dio vatrosigurnosnog uređaja dizelske lokomotive tvornice Orenstein & Koppel A.G. 1 sapnica za ubrizgavanje vode u ispušnu cijev, 2 ispušna cijev, 3 ispušni lonac, 4 pločasti osigurač, 5 otvor za punjenje, 6 ispust vode, 7 spremnik za vodu, 8 filter za vodu, 9 pumpa za vodu, 10 prekidač, 11 pumpa za gorivo, 12 regulacijska motka, 13 filter za zrak

Električne lokomotive. Jamske električne lokomotive mogu biti kontaktne, akumulatorske i kontaktno-akumulatorske.

Od svih vrsta lokomotiva koje se upotrebljavaju za rad u jami, kontaktne lokomotive (sl. 82) pružaju najveću sigurnost pogona, najbolje svladavaju gust promet, a snaga im je po jedinici težine najveća. Te lokomotive imaju i velike mane: opasnost da radnik dodirne kontakti vod, između oduzimača struje i kontaktnog voda može skočiti iskra i uzrokovati eksploziju metana ili ugljene prašine, a i investicijski su troškovi za elektrifikaciju pruga veliki.

Kontaktne lokomotive grade se različitih veličina. Lokomotive američke konstrukcije imaju masu 4–30 t, a evropske 7–20 t, dok su im snage do ~ 170 kW, a brzina 2,8–5 m/s.



Sl. 82. Kontaktna rudnička jamska lokomotiva tvornice Siemens A.G., snage 70 kW, mase 13 t

Dok se vučna sila kontaktnih lokomotiva mijenja ukapčanjem vučnih motora u seriju ili paralelno, ta se promjena na akumulatorskim lokomotivama može izvesti prikladnim spajanjem pojedinih čelija. Stoga akumulatorske lokomotive trebaju samo jedan motor, što je povoljno za gradnju malih otkopnih lokomotiva. Također im je prednost da se njihov električni uređaj može jednostavno zaštititi da bude potpuno vatrosiguran. Ipak, akumulatorske se lokomotive relativno malo upotrebljavaju zbog osjetljivog pogonskog uređaja i visoke cijene akumulatora.

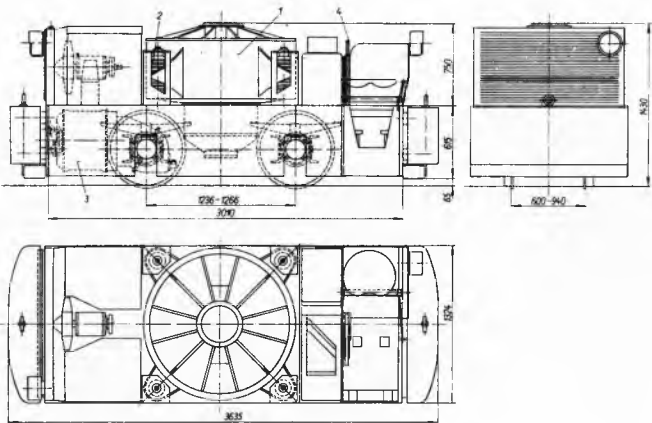


Sl. 83. Akumulatorska rudnička jamska lokomotiva tvornice Siemens A.G. Snaga 70 kW, napon akumulatora 160 V, masa 16 t; gradi se za kolosijeke raspona 600–750 mm

Masa je akumulatorskih lokomotiva (sl. 83) od 2,2 do ~15 t, a snaga 6–70 kW. Akumulatorske lokomotive veće snage, npr. od ~100 kW, mogu se dobiti povezivanjem dviju lokomotiva u jednu dvodijelnu. Brzina je takvih lokomotiva 1,5–4 m/s.

Postoje i kontaktno-akumulatorske lokomotive koje su izrađene kao kombinacija kontaktne i akumulatorske lokomotive.

Među jamske lokomotive sa specijalnim načinom pogona spada girolokomotiva (sl. 84).



Sl. 84. Rudnička jamska girolokomotiva tvornice Maschinenfabrik Oerlikon; masa lokomotive 9,3 t. 1 girouređaj (elektrogiro), 2 potpore za girouređaj, 3 vučni motor s prijenosnikom, 4 poluga ručne kočnice

Energija potrebna za pogon takvih lokomotiva akumulirana je u zamašnjaku smještenom u lokomotivi. Zamašnjak je direktno vezan na elektromotor, ujedno generator lokomotive. Na priključnoj stanici elektromotor zavrti zamašnjak do neke određene brzine vrtnje, npr. 3000 min^{-1} . Priključne su stanice međusobno udaljene 500–3000 m, već prema tome kakva je pruga i kakvo je opterećenje lokomotiva. Punjenje lokomotive na priključnoj stanici traje 60–100 sekunda, i nakon toga lokomotiva se kreće do slijedeće priključne stanice a da nije vezana na neku kontaktnu mrežu. Za vrijeme vožnje lokomotivski zamašnjak pogoni elektromotor koji sada radi kao generator, pa se akumulirana kinetička energija u zamašnjaku na

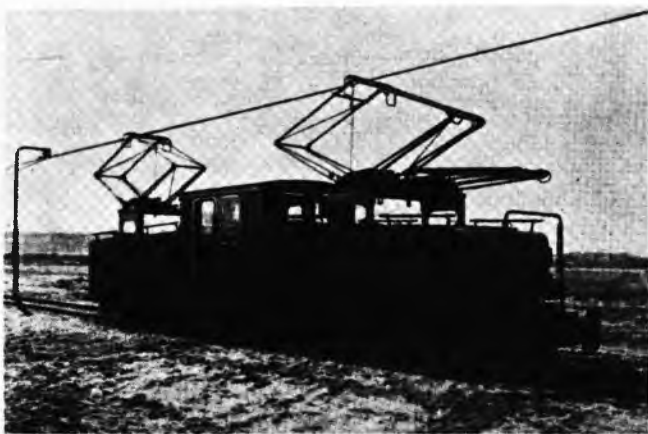
taj način pretvara natrag u električnu energiju koja napaja vučne motore lokomotive. Do ponovnog punjenja lokomotive na priključnoj stanici opadne brzina vrtnje zamašnjaku na 2/3 maksimalne vrijednosti.

Rotor girouređaja (elektrogiro) okreće se na kugličnim ležajevima u kućištu napunjenom vodikom pod tlakom od 0,07 MPa. Vodikovo punjenje služi za reduciranje gubitaka trenja i za poboljšanje hlađenja. Pokusi su pokazali da je zamašnjaku potrebno više od 11 sati da se zaustavi ako se počeo okretati sa 3000 okretaja u minuti.

U zamašnjaku se može akumulirati količina energije 5,6–9 kWh, već prema veličini i obliku zamašnjaka. Potrošnja energije iznosi 40–130 Wh po toni i km, već prema stanju pruge i uvjetima pogona.

Girolokomotive su ekonomične na prugama s kratkim razmacima između stanica.

Rudničke površinske lokomotive. Rudničke se površinske parne lokomotive konstrukcijski razlikuju od normalnih parnih lokomotiva po tome što imaju parni kotao vrlo nisko smješten da bi bile niske. Ove lokomotive treba da su male visine da bi mogle provlačiti vlak kroz otvore u velikim bagerima. Zbog ograničenih dimenzija kotla rudničke parne lokomotive imaju ograničenu snagu, pa za vuču teških vlakova služe električne rudničke površinske lokomotive (sl. 85). Prema drugim vrstama lokomotiva mogu električne, usprkos velikim snagama, biti relativno malih dimenzija, jer se izvor pogonske energije nalazi izvan lokomotive. Stoga su električne rudničke lokomotive sposobne da i teške vlakove podvlače pod bager.



Sl. 85. Električna rudnička površinska lokomotiva B₀B₀, mase 46 t, snage 4 × 88 kW pri 600 V

Električne rudničke površinske lokomotive grade se za snage ~1500 kW, mase 150 t, za pruge s normalnim razmakom tračnica od 1435 mm. Jedna od najvećih izgrađenih rudničkih površinskih lokomotiva jest lokomotiva tipa B₀B₀ + B₀B₀, mase 240 t i snage 2 × 1500 kW.

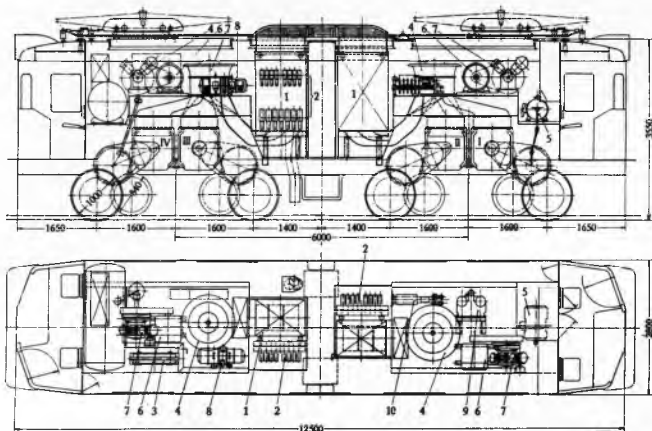
Zupčane lokomotive

Zupčane željeznice mogu biti čiste zupčane željeznice i mješovite željeznice.

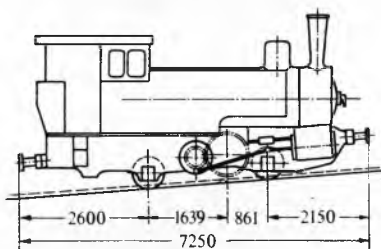
Čiste zupčane željeznice voze prugama s tako velikim usponom da uzduž cijele pruge mora postojati neprekidna zupčanica. Usponi takvih pruga najčešće iznose 120–250‰, ali postoje još i veći, kao npr. čista zupčana željeznica s lokomotivskim pogonom Mount Washington sa 377‰ i zupčana željeznica s pogonskim kolima Pilatus u Švicarskoj sa 480‰.

Mješovite željeznice imaju adhezijsku prugu u koju je na pojedinim mjestima uključena zupčana pruga, tj. pruga sa zupčanicom. To su gotovo uvijek pruge većih dužina, a pretežni dio je adhezijska pruga. Mješovite su željeznice uključene u normalni željeznički promet, dok čiste zupčane željeznice spadaju u izletničke željeznice. Najčešći uspon na prugama mješovitih željeznica jest 60–120‰, a seže naniže i do 35‰ i na više do 150‰.

Vučna vozila (lokomotive i pogonska kola) za mješovite željeznice imaju mješoviti pogon, tj. zupčani pogon i adhezijski pogon. Adhezijski pogon ostvaruje se odupiranjem kotača o tračnice. Ta se vrsta lokomotiva zove *mješovite zupčane lokomotive* (sl. 86). Čiste zupčane lokomotive (sl. 87 i 88) imaju samo zupčani pogon i služe jedino za čiste zupčane željeznice, gdje se pogon postiže pomoću zupčanika i zupčanice.



Sl. 86. Električna zupčana lokomotiva B₀B₀ za mješoviti pogon. Snaga 4 × 268 kW, masa 57,8 t, maksimalna brzina lokomotive na adhezijskoj pruzi 17 m/s, maksimalna brzina na zupčanoj pruzi 8,5 m/s. Izgrađena 1957. godine u tvornici Brown-Boweri za transandsku željeznicu u Čileu. 1 otpornici za polazak i kočenje, 2 kontakti birača, 3 prekidač glavnog strujnog kruga, 4 ventilator, 5 uzbuđnik kočnice, 6 motor kompresora, 7 kompresor, 8 pretvaračka grupa, 9 sklopka za preokret vožnje, 10 preklapnik kočnice, 1-IV glavni motori



Sl. 87. Parna zupčana lokomotiva konstrukcije Riggensbach s jednim pogonskim zupčanikom i dvije slobodne osovine

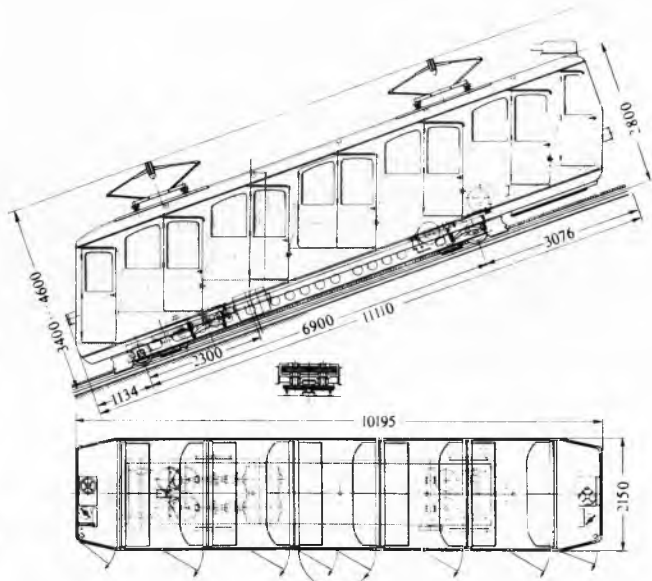
Vučna vozila na zupčanim prugama imaju znatno manju brzinu nego vučna vozila s čistim adhezijskim pogonom, tj. na čistim adhezijskim prugama. Tako su npr. u Švicarskoj pri vožnji na padu zupčane pruge dopuštene sljedeće maksimalne brzine:

Pad pruge	‰	130	150	175	200	250
Brzina vožnje	m/s	5	4,6	4,2	3,9	3,3

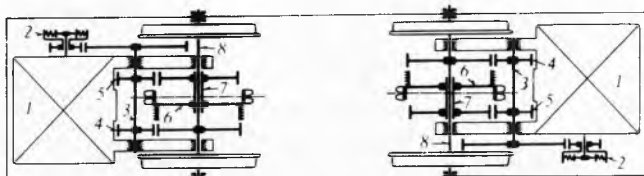
Na električnim zupčanim lokomotivama to iziskuje prijenos 1 : 10 između elektromotora i pogonskog zupčanika. Prijenos je dvostepen, a u specijalnim slučajevima i trostepen. Dvostruki prijenos ugrađuje se i iza motora adhezijskog pogona u mješovitim zupčanim lokomotivama, jer je brzina vlaka i na dionicama s adhezijskom prugom prilično malena zbog relativno velikih uspona na takvim prugama. Smještaj dvostrukih prijenosa čini konstruktorima prilične poteškoće.

Jedan od načina na koji su konstruirana pogonska postrojenja mješovite zupčane lokomotive prikazan je na sl. 89. Svakoj adhezijskoj osovini (kolnom slogu) 8, odnosno svakom pogonskom zupčaniku 6, pripada jedan motor 1. Pri vožnji na zupčanoj pruzi (pruga sa zupčanicom) prenosi se okretni moment preko oba prijenosa 4 i 5 na adhezijsku osovinu 8 i pogonski zupčanik 6. Pri vožnji na adhezijskoj pruzi prenosi se okretni moment samo na adhezijsku osovinu 8 preko prijenosa 4, a pogonski se zupčanik slobodno okreće.

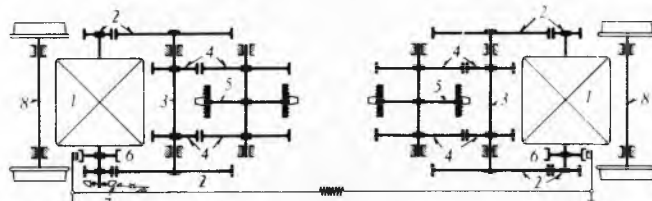
Jedno od mogućih rješenja pogonskog postrojenja čiste zupčane lokomotive (sl. 90) jest da vučni elektromotor preko prvog prijenosa 2, međuosovine 3 i drugog prijenosa 4, pokreće po-



Sl. 88. Pogonska kola za čisti zupčani pogon, željeznica Pilatus, Švicarska



Sl. 89. Shema podvoska mješovite zupčane lokomotive B₀B₀ serije HGe 4/4 11 željeznice Brig-Visp-Zermatt. 1 motor, 2 spojka s prijenosnim zupčanikom, 3 predložno vratilo, 4 zupčani prijenosnik za adhezijsku osovinu, 5 zupčani prijenosnik za zupčani pogon, 6 pogonski zupčanik, 7 tuljaci pogonskog zupčanika, 8 adhezijska osovina



Sl. 90. Shema pogonskog postrojenja za čisti zupčani pogon lokomotive serije He3 željeznice Jungfrau. 1 motor, 2 prvi prijenos, 3 predložno vratilo, 4 drugi prijenos, 5 pogonski zupčanik, 6 kočni kolot, 7 automatska kočnica, 8 nosiva osovina

gonski zupčanik 5. Osovina 8 je slobodna, tj. preko nje se ne prenosi nikakav okretni moment na kotače.

Vučna vozila za zupčane željeznice uglavnom su električne lokomotive ili električna pogonska kola, a vrlo malo dizelska motorna vozila. Razlog je u tome što su zupčane željeznice obično na velikim nadmorskim visinama gdje je zrak razrijeđen, pa se zbog toga dizelskom motoru osjetno smanji snaga. Jakim prednabijanjem motora može se spriječiti smanjenje snage, ali takav uređaj za prednabijanje je skup i čini pogon složenijim i osjetljivijim.

DALJI RAZVITAK LOKOMOTIVA

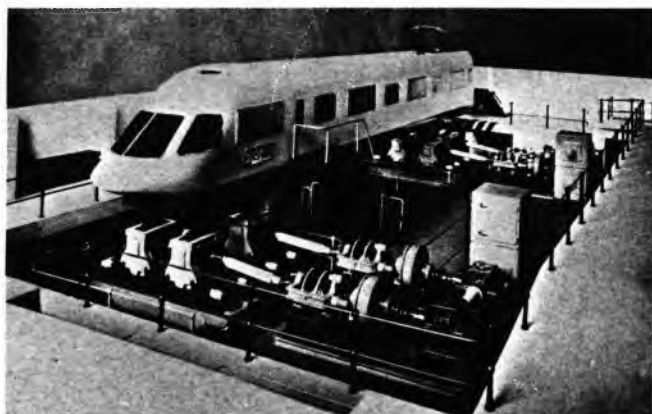
Glavno je nastojanje u današnjem razvoju lokomotiva da se povećaju maksimalne brzine vožnje. Želi se da bi brzina vožnje dosegla 83 m/s (300 km/h) ili čak nešto više. Povećanje maksimalnih brzina lokomotiva vezano je s nizom tehničkih problema, kao što su kočenje, povećanje snage pogonskog stroja, bolje iskorištavanje adhezije itd.

Radi povećanja sigurnosti u željezničkom prometu i radi poboljšanja svojstava i rada lokomotiva, usporedo s radovima na povećanju brzina, radi se i na razvoju automatskog upravljanja

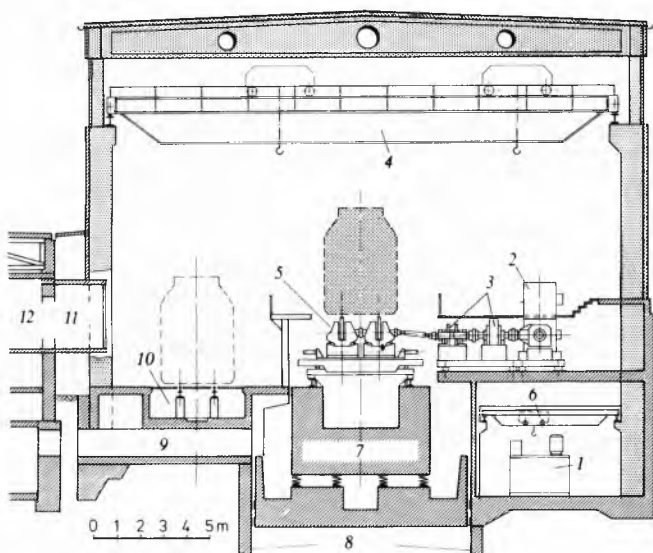
lokomotivama. Što će brzina lokomotiva biti veća, to će biti veći i zahtjevi za nekom određenom automatizacijom da bi se pojedini radovi obavljali sigurnije i brže nego što to čini čovjek u lokomotivi.

U posljednje vrijeme izgrađene su u SAD i SR Njemačkoj dvije ispitne stanice namijenjene istraživanjima mnogih problema vezanih uz povećanje brzina pružnih vozila.

Američka ispitna stanica, tj. laboratorij za dinamiku vozila u Pueblu (Colorado), počela se graditi 1972. godine s ciljem da se istraži i dobije bolji uvid u dinamiku vozila/tračnica. Istraživanja su u prvom redu trebala pridonijeti poboljšanju konstrukcije pružnih vozila da bi se na relativno lošim prugama postigla dobra i sigurna vožnja. Osim toga, bilo je poželjno, iz komercijalnih razloga, da se poveća i brzina vožnje. Naime, gornji je stroj pruga američkih privatnih željeznica, općenito uzevši, u lošem stanju, a iz financijskih razloga temeljiti popravak pruga, bar za dogledno vrijeme, nije dolazio u obzir. Te pruge služe uglavnom za teretni promet, jer se osobni promet u SAD gotovo čitav odvija automobilima i avionima. To je i razlog što za sada u toj ispitnoj stanici još nisu predviđena i istraživanja ponašanja u vožnji putničkih vagona i pogonskih vozila pri velikim brzinama.



Sl. 91. Model ispitnog stola s vozilom u ispitnoj stanici AW München-Freimann, SR Njemačka



Sl. 92. Presjek hale s ispitnim stolom u ispitnoj stanici AW München-Freimann, SR Njemačka. 1 visokotlačna hidraulička stanica, 2 pogon pokusnog stola, 3 kočnice pogonskog stola, 4 dvije mosne dizalice, svaka po 800 kN, 5 simulator, 6 mosna dizalica 50 kN, 7 elastično ovješeni temelji, 8 zid s vodilicama temelja, 9 kanal za kabele, 10 radna jama, 11 promatračka kabina, 12 upravljačka i mjerna centrala

Njemačka stanica za ispitivanje München-Freimann (sl. 91 i 92) gradi se u okviru velikog istraživačkog programa kojim su obuhvaćena teorijska i laboratorijska ispitivanja, te ispi-

vanja na otvorenoj pruzi. Dva su glavna zadatka ovih ispitivanja: a) odrediti tehničko-fizikalne granice sustava kotač/tračnica; b) ispitati ponašanje podvozaka i vozila u vožnji, i utjecaj pojedinih komponenata, kao što su opruženja, prigušivanja, raspodjele mase itd., na ponašanje vozila u području brzina do ~80 m/s.

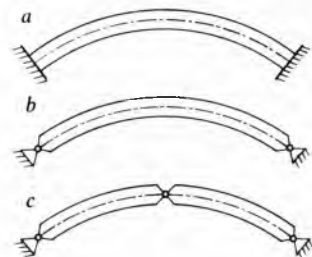
Pored ovih dviju najnovijih ispitnih stanica za lokomotive u SAD i SR Njemačkoj, slični instituti i laboratoriji postoje i u ostalim zemljama s razvijenom industrijom željezničkih vozila. Sva ta istraživačka središta rade na sličnim zadacima s ciljem da se povećaju brzina, sigurnost i ekonomičnost željezničkih vozila.

LIT.: F. Jansa, Dieselelektrická vozba I i II. Technicko-vědecké vydavatelství, Praha 1951. — A. H. Иллещин, Тепловозы. Машгиз, Москва 1957. — I. F. Semitschastnow, S. Büttner, Hydraulische Getriebe für Schienenfahrzeuge. VEB Verlag Technik, Berlin 1959. — Henschel-Lokomotiv-Taschenbuch. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1960. — J. M. Doherty, Diesel Locomotive Practice. Odhams Press Ltd., London 1962. — F. Kugel, Hydrodynamische Kraftübertragung. Krausskopf-Verlag, Wiesbaden 1962. — E. Kickbusch, Föttinger-Kupplungen und Föttinger-Getriebe. Springer-Verlag, Berlin 1963. — П. М. Шапоко, В. III. Сепеда, Гидравлические передачи тепловозов. Транскелдориздат, Москва 1963. — M. Englmann, H. Ludwig, Handbuch der Dieselelektrofahrzeuge der Deutschen Bundesbahn. Vermögensverwaltung der Gewerkschaft Deutscher Lokomotivbeamten und Anwärter GmbH, Frankfurt/M 1966. — Leitfaden der Dieselelektrofahrzeuge I i II. Transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, Berlin 1967. — VOITH — Hydrodynamische Getriebe, Kupplungen, Bremsen. Krausskopf-Verlag, Mainz 1970. — E. Bahke, Transportsysteme heute und morgen. Krausskopf-Verlag, Mainz 1973. — D. Dimić, Električna vuča vozova I i II. Građevinska knjiga, Beograd 1973. — K. Sachs, Elektrische Triebfahrzeuge I-III. Springer-Verlag, Wien 1973. — B. Radojković, Električna vuča. Naučna knjiga, Beograd 1974. — J. Serdar, Lokomotive. Sveučilišna naklada LIBER, Zagreb 1977.

J. Serdar

LUKOVI, zakrivljeni nosači velikog poluprečnika u odnosu na dimenzije poprečnog preseka, sa ukleštenjem ili zglobovima na osloncima (sl. 1).

Opterećenje luka izaziva normalnu silu pritiska u preseku luka koja dominira u odnosu na momente i na transverzalne sile. Ta pojava, tzv. lučno dejstvo, nastaje zbog fiksnog oslanjanja i zakrivljenosti ose luka, koja je najčešće kružni luk, parabola ili lančanica. Osa luka se određuje iz statičkih uslova i na osnovu potpornih linija za određena opterećenja.



Sl. 1. Tipovi lukova prema vrsti oslanjanja i broju zglobova. a usklešteni luk, b luk sa dva zgloba, c luk sa tri zgloba

Potporna linija trozglobnog luka. Trozglobni luk jedini je lučni nosač za koji se reakcije mogu odrediti iz uslova ravnoteže, jer je on statički određen. Ostali lukovi (uklešteni, jednozglobni, dvozglobovi) statički su neodređeni, pa se za njihovo rešavanje moraju postaviti posebni uslovi.

Vertikalne komponente reakcija trozglobnog luka određuju se iz uslova da su u oslonačkim zglobovima A i B (sl. 2) sume momenata svih sila jednake nuli. Iz tih uslova dobijaju se vrednosti vertikalnih sila:

$$V_A = -\frac{M_B}{l}, \quad V_B = -\frac{M_A}{l}, \quad (1)$$

gde su M_A suma momenata svih spoljnih sila osim sile V_B sa obzirom na zglob A, a M_B suma momenata tih sila osim sile V_A sa obzirom na zglob B. Komponente Z_A i Z_B u pravcu tetive luka AB imaju horizontalne komponente (potiske):

$$H_A = Z_A \cos \alpha, \quad H_B = Z_B \cos \alpha \quad (2)$$